



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
"ZARAGOZA."

DEL COSMOS A LO VIVO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I O L O G O

P R E S E N T A :

ENRIQUE GARCIA HERNANDEZ

ASESOR: ENRIQUE MENDIETA MARQUEZ

México, D. F.

1990

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

PÁGINA

PRÓLOGO	i
§A: EL PROPÓSITO	iii
§B: LA PERSPECTIVA	v

CAPITULO PRIMERO:

SOBRE EL ORIGEN DEL UNIVERSO.....	1
§1.1. LA RELIGIÓN CÓSMICA.....	3
§1.2. EL INGRESO DE LA RELIGIÓN CÓSMICA A LA CIENCIA.....	7
§1.3. LA REVOLUCIÓN NEWTONIANA.....	11
§1.4. EL UNIVERSO DE NEWTON.....	14
§1.5. LA REVOLUCIÓN EINSTEINIANA.....	16
§1.6. EL UNIVERSO DE EINSTEIN.....	25
§1.7. EL TÉRMINO Λ EN LOS MODELOS COSMOLÓGICOS.....	32
§1.8. LOS MODELOS COSMOLÓGICOS SIN EL TÉRMINO Λ	42
§1.9. EL MODELO DE LA GRAN EXPLOSIÓN: DESCRIPCIÓN.....	48
§1.10. EL MODELO DE LA GRAN EXPLOSIÓN: ANÁLISIS.....	53
§1.11. LA COSMOLOGÍA DE LA RELIGIÓN CÓSMICA.....	76

CAPÍTULO SEGUNDO:

SOBRE EL ORIGEN DE LAS ESPECIES QUÍMICAS.....	83
§2.1. LAS GALAXIAS.....	86
§2.2. LA GESTACIÓN ESTELAR.....	104
§2.3. EN LA SECUENCIA PRINCIPAL.....	120
§2.4. LA ALQUIMIA ESTELAR.....	128
§2.5. SENECTUD Y MUERTE ESTELAR.....	148
§2.6. EPÍLOGO.....	154
APÉNDICE A.....	161
APÉNDICE B.....	164

CAPÍTULO TERCERO:

SOBRE EL ORIGEN DEL SISTEMA SOLAR.....	169
§3.1. EL PROBLEMA.....	176
§3.2. LA HIPÓTESIS.....	181

CAPÍTULO CUARTO:

SOBRE LA EVOLUCIÓN EN EL UNIVERSO.....	211
§4.1. HISTORIA DE LA MATERIA.....	213
§4.2. LOS LÍMITES TEMPORALES DEL UNIVERSO.....	217
§4.3. LA EVOLUCIÓN EN EL UNIVERSO.....	223
BIBLIOGRAFÍA.....	239

PRÓLOGO

Era el crepúsculo de la palabra.
Desde el umbral de la conciencia,
el hombre extendió la mirada interrogante.
La diseminó de misterio en misterio
como la espiga por la tierra.

Y como el árbol que crece,
su germen abrió la tierra;
desmenuzó las arcillas ignotas,
para alimentarse de los secretos terrestres,
y beber de los orígenes sepultados.

Sus raíces estremecieron a la tierra primordial,
y su cúspide la esparció por las estrellas.

De pronto, desde el espesor del follaje,
las corolas endurecidas propagaron el fruto prohibido:
la respuesta cósmica era la delicia del producto palpitante.

No hay rama del saber humano cuya acepción haya evolucionado tanto como la de la Biología.

Para un científico del S. XVIII no existía mayor problema para definir a «lo vivo». El concepto «vida» era un signo de signos susceptible de ser relacionado plenariamente con una realidad específica. Hoy en día no cabe la posibilidad para ufanarnos de tener la capacidad de describir cabalmente tal concepto. A partir del trascendental experimento en el cual WÖHLER sintetizó la urea, la diferencia entre lo que está vivo y lo que no lo está, ha sido cada vez más estrecha y ambigua. Una vez que fue demolida la noción de exclusividad de lo vivo, la conceptualización del fenómeno «vida» ha sido un reto cada vez mayor para la Semántica, a tal punto que ésta ha sido derrotada.

La definición científica de «vida» es el producto de

la arraigada tendencia del hombre hacia la compartimentalización de los fenómenos naturales. Y así como ha sucedido que el término «vida», debido a su artificialidad, resulta obsoleto y anticuado en algunos campos específicos de la ciencia, tocará a muchos más preceptos, piedras angulares del saber, compartir tal suerte. Creo que, dicho sea de paso, ha llegado el momento de anteponer la realidad a la abstracción y de comprender que la naturaleza es una unidad de esplendoroso continuo en la que, strictu sensu, nunca habrá cabida para los límites artificiales forjados por el hombre.

Evidentemente, si no es posible delimitar el objeto de estudio de la Biología, tampoco lo es la justa puntualización de su objetivo y la precisa acotación de su campo de incumbencia. Esta última dificultad de «aparciamiento», por supuesto, no está circunscrita exclusivamente en el problema de la definición de lo vivo; la Biofísica es una muestra palmaria del ineluctable traslape que existe entre la Biología y las ciencias exactas. La Sociobiología revela la íntima relación entre la Biología y las Humanidades, y qué decir de la Bioquímica, de la Biogeografía, de la Ecología Urbana, de la Ecotecnología, del Derecho Ambiental.

El atributo polifacético que ostenta el campo de la Biología confiere a ésta un atractivo muy especial. La Biología es, como si dijéramos, la ciencia omnimoda. El biólogo, por el carácter general de su materia, transgrede los límites de casi cualquier área cognoscitiva, sin que por ello llegue a ser ajeno a su campo.

Sin duda, el rubro relacionado con el origen de los seres vivos es un paradigma de la inacotabilidad del campo de la Biología. ¿A partir de qué punto de la evolución de la materia, un biólogo, interesado en la elucidación del origen y de la evolución de lo viviente, debe emprender sus pesquisas? A poco de considerarlo, puede caerse en la cuenta de que esta cuestión toca la llaga de lo difuso de los límites de la Biología.

Dado el desarrollo actual de la ciencia, sería insensato el apelar a algunos de los llamados «procesos biológicos» como punto de partida para la meditación sobre las raíces de lo vivo. ¿Partir del origen de la reproducción y del metabolismo de los seres vivos? No, imposible. La Genética y la Bioquímica acusan a estos procesos como muy complejos: seguramente debe mediar entre ellos y lo inerte una larga historia evolutiva. Entonces, quizá, debería ser establecido como límite inferior el origen de los ácidos ribonucleicos y el de las proteínas, macromoléculas pilares de los procesos vitales. Sin embargo, esto nos remite, irremisiblemente, a cuestiones más basales: ¿de dónde provienen los sillares de tales macromoléculas?; ¿de dónde

proviene los elementos químicos constitutivos de los sillares que conforman a las macromoléculas que son las responsables de la reproducción y el metabolismo de los seres vivos? Y así podemos seguir: desandando el vericuetto evolutivo de la materia que cogemos, hasta que, sin poderlo evitar, nos sentimos fuertemente impelidos —si acaso no obligados— a indagar sobre el origen del universo.

Desde las pesquisas pioneras realizadas por OPARIN, los trabajos de los biólogos han estado caracterizados por abordar el origen de la vida, con lujo de detalle, a partir de la Tierra primitiva recién constituida. Frecuentemente, se encuentra que los autores reseñan la evolución de la materia a partir de la formación de los elementos químicos, quedando involucrados, por ende, de lleno con los conocimientos que son pretendidos propios de la Astrofísica; a veces, llegan a ser considerados los de la Cosmología. No obstante, en el compromiso que los biólogos asumen en sus obras, generalmente tales carices quedan sustraídos de la crítica reflexiva.

SA: EL PROPÓSITO

En esta tesis, ha sido mi intención compendiar, contextualizar con el mayor grado de coherencia y analizar las principales hipótesis que han sido forjadas en relación al largo e intrincado sendero evolutivo que discurre entre el origen del universo —si es que éste lo tuvo— y la formación de la Tierra, escenario en el cual fueron originados los sistemas que la intuición nos señala como entes vivos. Bajo este objetivo general, subyace un rubro específico, a saber:

— Extraer de ese amplísimo espectro de eventos que, es supuesto, precedieron a la emersión de lo vivo y de todos los principios y leyes biológicos, el comportamiento evolutivo de la materia «inerte», y hacer el intento de integrarlo y corresponderlo al comportamiento evolutivo de lo «vivo».

Para lograr tales empresas, la cosa evolutiva está abordada de tal forma que sean atendidas cuatro cuestiones fundamentales (el origen del universo, el origen de las especies químicas, el origen del Sistema Solar y la evolución global de la materia), tratadas en igual número de apartados, todas ellas íntimamente vinculadas, y de cuyas respuestas, hipótesis propuestas por un sinnúmero de científicos, pretendo establecer el nivel de coherencia que guardan unas con respecto a las otras:

Sobre el Origen del Universo. En el primer capítulo, el tema está desarrollado a propósito de la cosa

cosmológica. Se parte de algunas consideraciones sobre los mitos cosmogónicos, transitando rápidamente hasta la presentación de las condiciones bajo las cuales fue posible, por vez primera, abordar científicamente el problema del origen del universo.

Desde hace dos décadas, el modelo de la «Gran Explosión», propuesto originalmente por GAMOW, en 1942, ha gozado de amplia aceptación por parte de los científicos. En esta sección, la intención es demostrar que a este modelo cosmológico aún le subyacen grandes incertidumbres y contradicciones, por lo que lejos está del firme establecimiento científico que injustamente le ha sido adscrito.

Sobre el Origen de las Especies Químicas. El segundo capítulo tiene como objeto el desglose de las hipótesis que actualmente se tienen sobre la evolución estelar y como objetivo la elucidación que estas hipótesis permiten del origen de las especies químicas. Este apartado también está destinado para explicitar algunos problemas aún irresolubles que competen a la Astrofísica, como es el caso de la formación de las galaxias y la de las estrellas.

Sobre el Origen del Sistema Solar. El tercer capítulo tributa el espacio para atender el problema del origen del Sol y del Sistema Planetario. De manera lacónica son analizadas las hipótesis catastróficas y nebulares. En este apartado se concede atención especial a las hipótesis referentes a la conformación de los planetas, y, muy en especial, a las que proponen el mecanismo por el cual fueron construidos los planetas terrestres y que derivan en una proposición para las condiciones de la Tierra neonata.

Sobre la Evolución en el Universo. Finalmente, en el cuarto apartado el análisis está dirigido hacia la consecución de —cabría llamarle— los esbozos germinales de una visión integral respecto a la evolución de la materia. ¿Qué mutua causalidad existe entre las leyes fisicoquímicas y las biológicas? Con la manera en que generalmente está concebida la historia de la materia, pareciera que las leyes fisicoquímicas pueden existir sin que existan las biológicas, mas no viceversa. ¿Qué virtudes y contradicciones se desprenden de tal concepción? En Biología, una ley de trascendental importancia es la de las «propiedades emergentes»: en cada nuevo (así se le suele denominar) «nivel de complejidad» logrado por la materia, propiedades (y leyes que rigen a tales propiedades) emergen, sin tener precedente en los niveles de menor complejidad. ¿Qué tan cuestionable es tal ley, en tanto que pudiera ser un principio que implique la no total conexión causal —o, en el peor de los casos, que plasme una falsa conexión— entre las leyes y propiedades de los diferentes «niveles de complejidad»?

¿Cuál es nuestro origen?, ¿cuál es la historia evolutiva de la materia de la que nos conformamos?, ¿cuál es la proveniencia primera de esa materia? Preguntas trilladas: cierto; pero no banales. Espero que a lo largo de esta tesis, haya quedado reavivado el pulso vital de estas interrogantes, compañeras ancestrales del género humano.

§B: LA PERSPECTIVA

Para no pocos científicos y legos, el debate entre la posición materialista y la idealista en torno a nuestro origen es materia del pasado. El avance científico ha dado muestras, por demás palmarias, de que pertenecemos a un universo material autocontenido, a una unidad cuyos elementos se interrelacionan causalmente para erigir cada uno de los efectos que contemplamos y de los cuales formamos parte. En la visión de estos estudiosos, la ciencia es, a lo menos potencialmente, capaz de desentrañar del presente el pasado evolutivo y, en una forma no determinista, de predecir el futuro hacia el cual avanza inexorablemente la materia, todo ello basado en premisas, postulados, observaciones, leyes y principios de «fenómenos materiales». El hombre ha demostrado, mediante una rigurosa y firme epistemología positivista, la factibilidad de que las especies hayan desarrollado de ancestros más simples, de que los ancestros primigenios fueran contruidos de intrincados procesos de evolución de las moléculas, moléculas derivadas del enlazamiento de especies químicas provenientes del ámbito estelar.

En suma, en los círculos científicos habita la certidumbre de que los dioses, y el séquito de entes y conceptos ideales a ellos asociados, han sido anatematizados y desterrados, de una vez y para siempre, de este nuestro mundo material.

Creo, sin embargo, que existe un grave error de ponderación. Los avances científicos han permitido superar concepciones equivocadas como el «vitalismo» de NEEDHAM y la astrología secular. Para satisfacción, en muchos sentidos, del intelecto humano, ha sido evidenciada la apocricidad de textos «sacros» como la biblia; tenemos certeza de que nuestra naturaleza humana y la historia que nos da cimiento nada tienen que ver con el arca de Noe o con la Torre de Babel, ni con la Génesis ni con tantos preceptos y valores conceptuales y morales cuya ocurrencia en la sociedad actual resultan, frecuentemente, de tan molesto anacronismo. Mas todos estos logros, inalienables escaños arrebatados por el género humano a la ignorancia, son, a lo mucho, factores que demuestran la falsedad de postulados («torales» para una determinada coyuntura histórica) del idealismo. Con estos

logros, de ninguna manera podemos dar por sentado que la disquisición en torno a nuestro mundo ha sido dirimida a favor de la posición materialista. Dios sigue siendo un concepto de actualidad. Tan es así, que, como es señalado en el capítulo primero de este trabajo, una hipótesis sobre el origen del universo, para muchos «paradigma» del avance científico, ha sido esgrimida para dar sostén a tesis idealistas.

Vivimos en un universo no arbitrario, ceñido a un conjunto de leyes que le confieren una estructura no caótica (con todo y que haya quienes piensen que el «azar» está entrelazado inextricablemente al contexto universal). Desde las elusivas subunidades atómicas hasta los gigantescos supercúmulos galácticos, son portavoces de la subyacencia de un orden natural que, visto a priori, parece predeterminado. La conexión causal entre los diferentes eventos físicos que le dan devenir a nuestro mundo, responde a un grado de sutileza interactiva tan frágil, a una complejidad de tan asombrosa complementariedad y constancialidad, que es imposible dejar de experimentar (por más que nuestro intelecto pudiera revelarse) la sensación de que el statu quo de nuestra realidad obedece a los trazos y designios, plasmados en un plan maestro, de un ente superior. Nuestros ancestros, necesitados de una explicación sobre la causalidad de muchos eventos que directamente les afectaban, encontraron en las deidades una premisa suficiente para paliar su ignorancia y su temor. Ahora, miles de años después de la invención de las deidades, en una época en la que el avance científico ha borrado (o trastocado) las pueriles concepciones místicas surgidas en los albores de la humanidad; ahora, que la ciencia nos permite entrever la inconmensurable complejidad del universo, hemos topado con arcanos de la naturaleza que, evocando un vacío cognoscitivo abismal, reencarnan en nosotros actitudes similares a las que condujeron al hombre primitivo a apelar a divinidades. ¿Cómo poder dejar de pensar en entes que trascienden a la naturaleza, si de los eventos físicos que nos ha sido posible estudiar, eventos que observan con rigurosa escrupulosidad la primera y la segunda ley de la Termodinámica, deducimos el potencial energético finito de la materia para generar trabajo? ¿cómo dejar al soslayo, así, fríamente, la idea de un «principio termodinámico del universo»? En un nivel basal, aferrándonos a una posición de entera ecuanimidad y objetividad, debemos preguntarnos: ¿estamos en condiciones de llevar a un valor nulo la probabilidad de la existencia de entes superiores a nuestra naturaleza material? ¿la ciencia ha superado realmente a Dios como lo ha hecho con las religiones y las mitologías?

Difiero radicalmente de la opinión de NIETZCHE de que «Dios ha muerto». El concepto divino no ha sido reducido del

todo. Han sido ganadas muchas batallas a favor de la ciencia y del materialismo. Pero no la «guerra santa». En mi opinión, «Dios ha sido contemporizado». (A lo largo de esta tesis, sobre todo en el primer capítulo, he tratado de argumentar esta última aseveración). En todo caso, y eso al parecer, el hombre ha logrado desplazar a la noción escolástica y a la panteísta, mas no así a la deísta.

No tiene importancia el dejar aquí de manera explícita mi inclinación (visceral, a fin de cuentas) hacia el materialismo o hacia el idealismo; en todo caso, tengo la esperanza de que se pulse a lo largo de este trabajo. Sin embargo, he de señalar que adopto la posición materialista como herramienta basal, aunque, a decir verdad, tal posición la prohijo no por una plena convicción de que sea la perspectiva correcta, sino por la simple razón de que permite diferir la discusión metafísica. La única, y, por lo demás, rica y grandiosa ventaja que vislumbro en la posición materialista-positivista es que presenta al universo como un ingente e ignoto campo de estudio, en el cual nuestra innata virtud de indagación y escrutación puede ser desarrollada libremente. Con la posición idealista, el inicio es el fin del camino. ¡Hay de aquél que hace suya tal posición, pues sólo le resta manifestar ciego conformismo hacia explicaciones, abstrusas y dogmáticas, sobre las premisas basales que unen nuestro intelecto con la realidad! En cambio, el materialismo es un camino que pacta su inmensidad con la lejanía y que apenas hemos comenzado a surcar; ¿su fin?, ni siquiera podemos afirmar que lo tenga. Y en el caso de que exista ese fin, y de que seamos capaces de arribar a él, podemos sentirnos seguros de que entonces estaremos en condiciones de dictaminar, con la certeza incontrovertible del conocimiento absoluto, a favor o en contra del materialismo: así de formidable resulta la ruta materialista.

CAPÍTULO PRIMERO SOBRE EL ORIGEN DEL UNIVERSO

Antes que yo no hubo nada creado,
a excepción de lo eterno,
y yo duro eternamente.

D. ALIGHIERI, *La Divina Comedia*.

Desde cualquier perspectiva, el origen del universo resulta un tema demasiado escabroso de discutir.

Filosóficamente, cualquier análisis al respecto del origen del universo implica el evocar, tácita o explícitamente, el viejo y aún indirimible debate sobre la existencia de Dios. Como podrá ser notado a lo largo de esta tesis, en tanto más adentremos nuestra disquisición a la historia lejana del universo, y, en especial, en tanto más la acerquemos al tópico del origen del universo, mayor resultará la escasez de argumentos sólidos para tratar de dictaminar a favor o en contra de la postura materialista. A pesar del celeberrimo modelo de la Gran Explosión, la controversia sobre el origen del universo sigue siendo, desde por lo menos una perspectiva filosófica, un tema pletórico de argumentos viscerales.

Epistemológicamente, podría ser argumentado que el impresionante despliegue científico causado en lo que va de este siglo, ha permitido la formulación de una filosofía natural apropiada sobre la historia y la proveniencia del universo. Infortunadamente, éste no es el caso. Una de las razones de ello es que, como veremos en este capítulo, el saber humano está severamente limitado por el breve tiempo de observación sistemática del universo que el hombre ha realizado hasta la fecha. En efecto, la única ruta que tenemos para teorizar sobre la cosa cosmológica es la de hacer extrapolaciones temporales extremadamente gigantescas con respecto a la escala temporal humana. Por más optimistas

que quisiéramos estar, no deja de ser preocupante la situación de que del breve estudio del orden cósmico actual (un orden del cual, de otra parte, tenemos un conocimiento harto parcial e incompleto), pretendamos desentrañar el orden cósmico pasado, orden que, como todo lo parece indicar, devino durante ingentes intervalos temporales^{1}.

No es necesario profundizar mucho en el estudio de las hipótesis cosmológicas para llegar a la conclusión de que aún es muy pobre nuestra comprensión al respecto del origen del universo. En ciertos sentidos, esta comprensión es tan pobre —y al decir esto no pretendo en absoluto restar valor a la gran labor de la pléyade de pensadores que han impulsado a la ciencia—, que el pensamiento humano aún no ha tenido oportunidad de desembarazarse de añejas actitudes místicas hacia algunos arcanos de la naturaleza. En particular, estas actitudes han sido reflejadas en el intento de muchos legos y científicos de demostrar, a través del modelo de la Gran Explosión, la existencia de Dios y la proveniencia divina del universo.

Las secciones §1.1-§1.7 responden al propósito de contextualizar históricamente el surgimiento del modelo de la Gran Explosión. En particular, con estas secciones es pretendido señalar la situación entre la ciencia actual y el pensamiento místico proveniente desde tiempos inmemoriales. Como será indicado en su momento, no es difícil encontrar gran similitud entre las posturas místicas de varios pensadores actuales y las reacciones que los hombres forjadores de los mitos cosmogénicos tuvieron ante lo desconocido, en especial ante el concepto de lo infinito. En §1.1 son discutidos tópicos relativos a los factores causales del surgimiento de los mitos sobre el origen del universo, a más de ser señaladas algunas características que son compartidas entre estos mitos. En §1.2 se indica, someramente, el curso histórico por el que tales concepciones místicas adentráronse en la ciencia, hasta que fue construida, a través del escolastisismo, una filosofía natural en la que el universo fue tomado como un ente absolutamente dependiente de lo divino. En §1.3, el propósito es indicar la forma con la que, a través de la

{1} Es también de preocupar en relación a que si nuestro conocimiento actual es el oportuno para desentrañar la verdadera naturaleza del universo, el hecho de que el conocimiento humano está desarrollándose por una ruta en la que, en promedio, lo que hace cinco años era vanguardia y la verdad más seductora, ahora es una mentira desenmascarada por lo que nos parece una nueva verdad de gran seducción.

teoría newtoniana, fue posible que el pensamiento científico quedara emancipado de la teoría escolástica del primer motor, factor que proyectó la discusión de la cosa cósmica al plano más basal de tratar de elucidar si el universo fue creado o no. La sección §1.4 desglosa las consecuencias del intento de engastar la teoría de NEWTON en el marco macrocósmico. §1.5 y §1.6 son secciones de transición para el abordaje de los modelos cosmológicos actuales, en las que es indicado cómo a través de la Teoría de la Relatividad fue conseguido un nuevo replanteamiento del estudio del universo, y qué tipo de derivaciones cósmicas fueron obtenidas de tal estudio. En §1.7, son considerados los pasos teóricos que condujeron a la postulación del modelo de la Gran Explosión, modelo que es el eje toral de análisis en lo que resta del capítulo (i.e., §1.8-§1.11).

§1.1

LA RELIGIÓN CÓSMICA

A lo largo de esta sección, hagamos algunas consideraciones sobre los factores causales de la creación de los mitos cosmogénicos (mitos que EINSTEIN circunscribió bajo el nombre de *Religión Cósmica* [58]) y señalemos algunas propiedades que son características de tales mitos. Como será indicado con abundancia más adelante, esta información nos permitirá identificar a la Religión Cósmica como un elemento de gran relevancia dentro del pensamiento científico actual, y, en particular, como un elemento que gravita ostensiblemente en las discusiones en torno al origen del universo.

EL ORIGEN. Sin duda, el germen que fructificó en una explicación del origen del universo por parte de nuestros ancestros, fue el cuestionamiento sobre la procedencia de todas las cosas y de todos los seres vivos, principalmente la del ser humano. Ésta es una conclusión para la cual no cabe controversia. Otra conclusión evidente es que al existir deidades con poderes sobrehumanos, la conexión entre estos entes y la Creación universal fue espontánea. Pero, ¿qué motivó la postulación en sí de una Creación? ¿Por qué el hombre primitivo no prefirió un universo inmutable, sin principio y sin fin en el tiempo? Aún no existe respuesta del todo satisfactoria.

Ha sido sugerido que la noción de «Causa Primera» pudo haber motivado el surgimiento de la Creación dentro del pensamiento humano [90]. El niño es el fruto de sus padres; nada más natural que el mundo tenga padres de quienes es fruto: las deidades. Es muy probable que esta hipótesis sea,

en esencia, correcta. Un nutrido número de culturas forjaron su versión cosmogénica a partir de dos divinidades creadoras, que claramente resultan un parangón de «la hembra y el macho biológicos» [62]. Sin embargo, existieron, y aún existen, grupos sociales cuyos mitos hablan de numerosos creadores, o, más aún, de un único creador, que llevaron a cabo la Creación en forma no muy alusiva a procesos de reproducción biológica. En tales casos, he encontrado que, algunas veces manifiestamente, otras en forma subrepticia, gravita el concepto de infinito. Quizá lo infinito motivó el surgimiento (o, en todo caso, la desviación de la línea original de la «Causa Primera») de una concepción específica sobre la Creación del universo. Hagamos una pequeña digresión para aclarar esta hipótesis.

La imagen que se tiene actualmente de la estructura y dimensiones del universo diverge sustancialmente de la que predominaba en el siglo pasado, y resulta más diferente conforme retrocedemos en el tiempo. HIPARCO DE NICEA, en el S. II A. C., mostró que el diámetro de la Tierra sólo equivale a $1/30$ de la distancia entre ésta y la Luna [11]. HUBBLE, en la década de los 1920's, puso en relieve la insignificancia del tamaño de la Vía Láctea si se le compara con las distancias que separan a ésta de las galaxias más lejanas que nos es posible detectar [102,104]. Entre HIPARCO y HUBBLE sucedieron varios descubrimientos que revolucionaron el concepto dimensional sobre el universo; en cada ocasión, fue evidenciado que el cosmos es inmensamente más grande de lo que era estimado aún con los cálculos menos conservadores [11]. Sin embargo, para la gran mayoría de pensadores de siglos pasados, la idea de infinito era algo inadmisibles; la posición conservadora, después de asimilar cada descalabro, contemporizaba y volvía a preponderar. Aunque, a decir verdad, la idea de universo finito se impuso más por la oscuridad de una interdicción, que por la luz de *Spiritus Libertatis*. Fue hasta 1826 cuando OLBERS arguyó una paradoja que, por fin con un soporte teórico sólido para aquella época, se contrapuso a un universo sin coto [2].

{2} La paradoja de Olbers parte de tres supuestos fundamentales. Primero: el universo es infinito. Segundo: la cantidad de estrellas es infinita y éstas se encuentran uniformemente distribuidas. Tercero: la varianza del brillo de las estrellas es despreciable. [11,51]

Tomando un lugar cualesquiera del universo como punto de referencia, pongamos por ejemplo a la Tierra, dividámos al espacio en capas concéntricas; para facilitar la explicación, consideremos que el volumen de las capas

Infinito descuello en la Historia, pues, por ser un concepto al que siempre se le ha tratado de rehuir. Mas esta actitud nada tiene de sorprendente; infinito es un signo muy difícil de concebir y de podérselo relacionar con nuestra vida cotidiana. El tamaño relativo del hombre es del orden de una décima de trillonésima ($1/10,000,000,000,000,000$) en relación a la distancia a Andrómeda, la galaxia más cercana a nosotros. Una cantidad como esa es representable con signos, pero resulta ininteligible cuando se toma como patrón de referencia el tamaño de cualquiera de los elementos del entorno en el que nos desarrollamos. (Dicho sea de paso, tal comparación rebasa lo ininteligible debido a que, como señaló RUSSELL [159], nuestros sentidos son el pábulo principal de los prejuicios acientíficos que arrastramos). Las galaxias más lejanas de nuestro universo —el que podemos observar— están a una distancia asombrosamente mayor que Andrómeda. No obstante, y a pesar de la limitada capacidad del hombre para construir mentalmente imágenes de ingentes dimensiones, si pudiéramos desplazarnos a esas lejanas galaxias, literalmente «en nada nos acercaríamos» a las postrimerias de un universo infinito. Siempre aparecería el allende, *ad infinitum*.

Al hacer la extrapolación hasta el hombre arcaico, nada nos desautoriza el suponer que éste manifestara una actitud similar a la del hombre actual ante lo infinito. Es más, es posible que las primeras consideraciones que tuvo al respecto hayan sido de un efecto tal, que bien pudieron haber contribuido al surgimiento de la Religión Cómica.

No cabe probabilidad alguna de que sea fortuito el

aumento proporcionalmente con el cuadrado del radio. Así, si una capa se encuentra 5 veces más lejos que otra, poseerá 25 veces el volumen de esta última. Como la densidad estelar es uniforme (supuesto 2), por cada estrella de la capa cercana existen 25 estrellas en la capa lejana. Ahora bien, se sabe que el brillo de una fuente luminosa disminuye en forma proporcional al inverso del cuadrado de la distancia; una estrella colocada a una distancia 5 veces mayor aportará $1/25$ del brillo de la estrella cercana (en caso de que ambas estrellas posean el mismo brillo intrínseco (supuesto 3)). Pero como la capa externa contiene 25 veces más estrellas que la interna, ambas capas iluminarían a la Tierra con la misma intensidad. Ya que el número de capas es infinito (supuesto 1), y que todas ellas, independientemente de la distancia, aportan la misma cantidad lumínica, el total de luz que debiera llegar a la Tierra sería infinito. Simplemente, no existiría diferencia entre el día y la noche.

hecho de que en las diferentes religiones, los principales rituales sean dirigidos al cielo, y de que en ellas esté presente, aunque a veces con diferente conceptualización, un reino de los cielos. Esto debe responder a uno o varios agentes causales comunes; y es posible que uno de esos agentes sea el infinito. Por ejemplo: para los aranda —un grupo tribal del Australia Central al que se le considera un paradigma de los llamados «pueblos primitivos», y que es, por cierto, muy recurrido por historiadores de la religión, paleontólogos, sociólogos y psicólogos— su dios principal, el Gran Padre (*Knaritja*), habita en el cielo. Como el cielo rodea a la Tierra, de entrada esto plantea un continente del mundo. Pero, ¿qué taxa al continente? Para los aranda, algo que está más allá de la capacidad humana, algo sobrenatural que pueda zanjarse lo ilimitado [62]. La coyuntura es evidente: a las deidades, y a los lugares donde habitan, se les hace responsables de la distancia infinita.

Un problema análogo representa lo relativo al tiempo ilimitado. Lo eterno es un corolario de lo infinito. La evasión a lo infinito pudo haber generado la necesidad de establecer un principio para el tiempo y, consecuentemente, una Creación. Un hecho consistente con lo antedicho es que, como ha señalado ELIADE, en todas las religiones aparece un fin temporal del «universo humano» [61]: el tiempo «natural» está limitado en el pasado y en el futuro [63]. Al parecer, la panacea para que los antiguos se vieran aliviados de cualquier parámetro infinito fueron los dioses. Por ello los aranda crearon un Gran Padre inmortal y siempre joven; de allí que los hebreos bendijeran a Jehová por haber dado «la justa proporción y medida a todas las cosas».

LAS CARACTERÍSTICAS. En el conjunto de mitos creacionistas resplandece un espectro pletórico de formas de resolver misticamente el origen de la realidad [107]: las divergencias entre los mitos hacen de la Religión Cósmica

{a} Podría argumentarse, ciertamente, que la contraparte de la «Causa Primera», llamémosle la «Causa Última», haya sido responsable de que todas las culturas acotaran el tiempo en lo futuro: los organismos mueren, luego entonces el mundo debe terminar. Sin embargo, este argumento ya no tiene un sentido tan palmario como el de la «Causa Primera». Por ser motivo de establecer una analogía con el mundo real, no sería raro el encontrar en las diferentes cosmogénesis la postulación de un sucesor del mundo. Y la realidad es que mitos como el de los cinco soles de algunas culturas mesoamericanas son excepcionales.

Infinito descuella en la Historia, pues, por ser un concepto al que siempre se le ha tratado de rehuir. Mas esta actitud nada tiene de sorprendente; infinito es un signo muy difícil de concebir y de podersele relacionar con nuestra vida cotidiana. El tamaño relativo del hombre es del orden de una décima de trillonésima ($1/10,000,000,000,000,000,000$) en relación a la distancia a Andrómeda, la galaxia más cercana a nosotros. Una cantidad como esa es representable con signos, pero resulta ininteligible cuando se toma como patrón de referencia el tamaño de cualquiera de los elementos del entorno en el que nos desarrollamos. (Dicho sea de paso, tal comparación rebasa lo inteligible debido a que, como señaló RUSSELL [159], nuestros sentidos son el pábulo principal de los prejuicios acientíficos que arrastramos). Las galaxias más lejanas de nuestro universo —el que podemos observar— están a una distancia asombrosamente mayor que Andrómeda. No obstante, y a pesar de la limitada capacidad del hombre para construir mentalmente imágenes de ingentes dimensiones, si pudiéramos desplazarnos a esas lejanas galaxias, literalmente «en nada nos acercaríamos» a las postrimerías de un universo infinito. Siempre aparecería el allende, *ad infinitum*.

Al hacer la extrapolación hasta el hombre arcaico, nada nos desautoriza el suponer que éste manifestara una actitud similar a la del hombre actual ante lo infinito. Es más, es posible que las primeras consideraciones que tuvo al respecto hayan sido de un efecto tal, que bien pudieron haber contribuido al surgimiento de la Religión Cómica.

No cabe probabilidad alguna de que sea fortuito el

aumente proporcionalmente con el cuadrado del radio. Así, si una capa se encuentra 5 veces más lejos que otra, poseerá 25 veces el volumen de esta última. Como la densidad estelar es uniforme (supuesto 2), por cada estrella de la capa cercana existen 25 estrellas en la capa lejana. Ahora bien, se sabe que el brillo de una fuente luminosa disminuye en forma proporcional al inverso del cuadrado de la distancia; una estrella colocada a una distancia 5 veces mayor aportará $1/25$ del brillo de la estrella cercana (en caso de que ambas estrellas posean el mismo brillo intrínseco (supuesto 3)). Pero como la capa externa contiene 25 veces más estrellas que la interna, ambas capas iluminarían a la Tierra con la misma intensidad. Ya que el número de capas es infinito (supuesto 1), y que todas ellas, independientemente de la distancia, aportan la misma cantidad luminica, el total de luz que debiera llegar a la Tierra sería infinito. Simplemente, no existiría diferencia entre el día y la noche.

una unidad policrómica. A través del prisma del análisis comparativo, el ángulo de reflexión de cada mito corresponde a una perspectiva cultural específica de concebir la Creación. Sin embargo, pese a las grandes diferencias, trátese del mito bíblico de la creación en seis días, o del huevo de oro del brahmanismo, o de la deliberación divina quiché, o de cualquier otro mito cosmogénico, siempre se manifiestan características que los hacinan en un contexto de coincidencias [107]. Parafraseando una sentencia de UMBERTO Eco, en la gama de mitos creacionistas se entrevé la «unidad de la diversidad y la diversidad de la unidad».

De entre los atributos comunes a los mitos cosmogénicos, resalta, en primer plano, el *antropocentrismo*. No existe religión alguna en la que al hombre no se le considere el centro absoluto de la Creación, ni religión en la que los dioses principales no son concebidos con rasgos predominantemente antropomorfos: a fin de cuentas, los dioses fueron creados «a imagen y semejanza» del hombre. El centrismo no para aquí. El hombre es el centro de la Creación; por lo tanto, ocupa el centro del universo. El hombre habita la Tierra; por lo tanto, la Tierra está en el centro del universo. De la conjunción de este par de entimemas, surge una consecuencia característica del antropocentrismo: el *universo geocéntrico*.

Un atributo que también se cuenta entre los elementos místicos ubicuos en las diferentes culturas es la concepción de que el *universo fue creado a partir de la nada*. Ciertamente que no en todas las cosmogonías el universo proviene propiamente de la nada; también están los mitos en que la primordialidad cosmogónica es preexistente, increada [62]. Mas en cualquiera de los casos, ocurre la involucración de deidades para la fragua de la realidad. En cualquier mito, la «materialización» del universo está claramente subordinada a su «forjación». Lo significativo no es la materia prima, sino el acto creador. Es en este sentido por lo que se puede generalizar que en todas las Religiones Cómicas, independientemente de la primordialidad cosmogónica, el universo es concebido como un ente proveniente de la nada.

§12.

EL INGRESO DE LA RELIGIÓN CÓSMICA A LA CIENCIA

¿Con qué trascendencia ha participado la Religión Cómica en la historia de la ciencia? ¿Hasta qué punto el estudio científico actual que versa sobre el origen del universo está desvinculado de los antiguos preceptos místicos que se remontan a un tiempo no muy lejano al

afloramiento de las primeras civilizaciones? Es obvio que la respuesta de la primera pregunta, es fundamental para poder formular la respuesta de la segunda. En lo que sigue, están desglosadas algunas de las etapas más relevantes de la historia humana previas a la Revolución Científica, etapas en las cuales obtuvo características particulares lo que inicialmente fueron los elementos constitutivos de la Religión Cómica, y que, posteriormente, pasó a ser parte de sutiles y complejas filosofías de la naturaleza^[4].

La etapa jónica fue escenificada en una época en la que el gobierno estuvo confiado a tiranos, personajes caudillescos que despojaron del poder a la aristocracia latifundista. En virtud de que los tiranos gozaron de un amplio apoyo popular, durante su dirigencia el nivel ideológico de la sociedad esclavista perdió sensiblemente peso en su razón social de existencia, por lo que fue posible el origen y el desarrollo de una teoría del mundo notoriamente emancipada del pensamiento dogmático. Así, a pesar de que no deja de ser un mito la hipótesis hilozoísta de TALES DE MILETO referente a que todos los compuestos materiales se derivan del agua, es relevante el que en ninguna parte de ella esté imbuido algún factor sobrenatural; en cambio, la hipótesis decididamente contiene a favor de que la materia proviene de la materia.

[4] A lo largo de la historia, la ciencia ha sufrido avatares filosóficos y epistemológicos que le han hecho adquirir ora un matiz idealista, bien uno materialista. (La corriente teológico-filosófica tomista, basada en un método empírico y racional para conocer a Dios [40], es un importante ejemplo en el que la ciencia —por supuesto la tomista— y la Religión Cómica son conciliables). A lo largo de las etapas en las que la ciencia ha sido mantenida en la vertiente filosófica idealista, lejos de tenerse la intención de criticar a los elementos constitutivos de la Religión Cómica, fueron dedicados grandes esfuerzos para crear toda una filosofía que hiciera menos vulnerables tales elementos. Esto resulta un fenómeno de particular relevancia, puesto que cuando las condiciones históricas fueron las propicias para la fraguación de una revolución del pensamiento humano, los nuevos pensadores, que de suyo pretendían crear una nueva filosofía natural libre de cortapisas dogmáticas, antes que discutir sobre la creación divina, tuvieron que bregar contra otras concepciones que servían como escudo de las hipótesis cosmológicas idealistas.

Al igual que TALES, ANAXIMENES y ANAXIMANDRO soslayaron la idea de un Creador, formulando, en su lugar, una hipótesis ontogénica de la materia, en la que sostenían que cualquier cuerpo material es el resultado de las «continuas transformaciones mutuas de los [cuatro] elementos materiales» [19] primigenios: a saber, el agua, la tierra, el vapor y el fuego. Esta primitiva filosofía materialista recibió de HERÁCLITO una contribución de primerísima trascendencia: lo que podríamos denominar como el primer boceto de la filosofía dialéctica, originada en la formulación de los opuestos. Tal aportación marcó la cúspide de la filosofía jónica, con lo que, por vez primera en la historia, fueron rechazados los principios de la Religión Cósmica. [19]

Mas el rutilante amanecer del materialismo estuvo destinado a fenecer muy pronto. La prolija expansión del esclavismo entre los S. V y IV A. C. obligó a que la Filosofía tomara derroteros religiosos, en vista de la necesidad de reforzar ideológicamente el modo de producción floreciente. La nueva situación social propició que al materialismo se le recusara de la ciencia. Aunque parezca paradójico, el vehículo para que el misticismo fuera incorporado a la ciencia fue la escuela pitagórica, aquélla con la cual la humanidad está en deuda por la formalización de las matemáticas. PITÁGORAS y sus émulos refutaron el empirismo jónico, centraron su filosofía en el misticismo de números y figuras geométricas perfectas y, quizá el punto más relevante, abogaron por la existencia de Ideas superiores a la naturaleza del universo material, cariz que a la postre fue fundamental para que la Religión Cósmica fuera establecida como cierta por más de 2000 años y para que durante ese período, salvo en aisladas excepciones, sus premisas permanecieran sustraídas al análisis y examen crítico. [19]

PLATÓN, el máximo filósofo idealista de todos los tiempos, continuando la línea de PARMÉNIDES, hizo suyos, depuró y llevó al clímax los elementos místicos del pitagorismo. Despreció la información adquirida mediante los sentidos, asegurando que el mundo sólo es un endeble reflejo de las Ideas —que, según él, son— absolutas, inmutables y puras; lo que nuestros sentidos captan como el mundo real no son más que, de las Ideas, vacilantes sombras que se proyectan en el muro de la caverna. La negación del empirismo condujo a PLATÓN a apegarse al supuesto de que son los fenómenos naturales, nunca los modelos ideales, los falibles y corrompidos, por lo que no es posible, ni vale la pena por la intrascendencia del objeto, llegar a una descripción matemática exacta del universo material. Entre otras cosas, PLATÓN también refutó la doctrina del devenir de HERÁCLITO, y preconizó el misticismo de los números y de

las figuras geométricas, factor que gravitaría en la formulación de los modelos del Sistema Solar propuestos desde ARISTÓTELES hasta TYCHO BRAHE y KEPLER. [19]

La filosofía platónica fue en buen grado asimilada por el cristianismo primitivo, y esto no exclusivamente por su matiz de excelso idealismo. El nascente poder eclesiástico halló, a través de las interpretaciones de los *Diálogos* hechas por apologistas, alejandrinos, neoplatónicos y padres capadocios (entre los que son figura de primer relieve JUSTINO, ORIGENES y SAN GREGORIO DE NISA), un *corpus* de ideas autoconsistente que diera apoyo a la conservación de la estructura esclavista [108]. Así, el platonismo, con ciertas variantes adecuatorias, logró asirse como la filosofía hegemónica en Europa durante varios siglos de la Era Cristiana.

Evidentemente, lo anterior no significa, de alguna manera, que el platonismo fuera en ese período por mucho la principal filosofía. Y a partir del S. XIII, tuvo que ceder su posición privilegiada en la palestra religiosa a favor de la filosofía aristotélica.

ARISTÓTELES fue el sucesor dentro de la vertiente idealista griega, aunque transitó por concepciones filosóficas sutilmente diferentes a las de su maestro PLATÓN. Una de las divergencias fundamentales entre los dos griegos es que mientras aquél bregó a favor de que Dios es el motor de un mundo sin inicio y sin fin en el tiempo, PLATÓN pensó en un Creador que permanece ajeno a la dinámica de lo material (*deísmo*) [55]. Naturalmente, el tipo de teoría cosmológica postulada por ARISTÓTELES despertó la suspicacia de los prelados católicos, lo que valió que inicialmente la Iglesia reculara parcialmente ante el influjo aristotélico. Hubo que esperar hasta la aparición de SANTO TOMÁS DE AQUINO para que se produjera el casi total ingreso de la doctrina de *El Filósofo* griego al cristianismo, mediante una ligera pero rigurosa catarsis evangélica.

Del resurgimiento de las ideas aristotélicas, el punto que mayor conmoción causó en el S. XIII fue el del empirismo. La aceptación de éste por parte de los intelectuales ortodoxos europeos costó un esfuerzo supremo a SANTO TOMÁS. Según este teólogo-filósofo, «la existencia de Dios no es una verdad evidente para el entendimiento humano» [46]; el conocimiento que el hombre tiene acerca de Dios es adquirido, no innato. Por tanto, ya que «nuestro conocimiento principia con la experiencia», sólo el análisis reflexivo de los datos empíricos permite llegar al entendimiento de Dios. Pero sería del todo imposible tal logro, si no es porque existe «Algo» inmanente en la naturaleza que la trasciende. El aquinatense estaba convencido de la dependencia total del mundo con respecto a

Dios. En este punto, encontró amplio eco en la teoría aristotélica del *Primer Motor* (*Infra*, § 1.3).

Cierto es que el repunte del empirismo aristotélico trajo consigo el reinicio del estudio de la naturaleza^{5}. Mas la Física (o filosofía natural) que se deriva de este empirismo fue concebida como el punto de partida para explicar la dependencia y el origen divino del mundo. Según TOMÁS, toda la metafísica debe ser dirigida, a partir del sentido común —Física—, al conocimiento de Dios. Nada más alejado del objetivo de la Física postrenacentista y de la positivista.

Con la teoría del mundo escolástica —que a diferencia de la aristotélica, sí acepta la Creación— se erigieron tesis idealistas que acorazaron los principios de la Religión Cósmica. ¿Cómo negar en principio a la Religión Cósmica, si en el pensamiento común se pulsaba la convicción de que Dios, el Creador, es origen y fuente de la dinámica mundana? Antes de que pudiera reivindicarse la filosofía materialista, imperó la acuciante necesidad de una Revolución Científica que redefiniere el objetivo de la filosofía natural, que acabara con puntos tan espinosos como el sistema geocéntrico y que, finalmente, mediante el reestablecimiento del deísmo, preparara el escenario adecuado para que los pensadores se condujeran al análisis y a la crítica de la Religión Cósmica.

§13.

LA REVOLUCIÓN NEWTONIANA

Alguien, en algún lugar, aventuró la afirmación de que ARISTÓTELES en todo se equivocó. El tiempo ha dado la razón a tal aseveración. A lo largo del Renacimiento, primero de una en una, después en tumultuosa cascada, las concepciones escolásticas fueron derrumbadas. Experimentos, observaciones y dilucidaciones realizados por COPÉRNICO, DESCARTES, KEPLER y GALILEO formaron la gran mole granítica que sería lanzada para derrumbar la vetusta fortaleza del pensamiento

{5} Los neoplatónicos propagaron la idea de que los antiguos habían plasmado en las Escrituras Sagradas, de una vez y por todas, el conocimiento que sobre el mundo debe saber el hombre, por lo que éste tenía la santa obligación de abandonar cualquier investigación científica —lo que de hecho se hizo durante varios siglos—, y, en su lugar, consagrarse a la recapitulación.

escolástico; para mediados del S. XVII, sólo hacía falta la catapulta: la intuición científica y la capacidad matemática de NEWTON se encargaron de construirla. [19]

De la colosal obra de NEWTON, sin duda lo más encomiable es el descubrimiento de las leyes del movimiento y, muy en particular, el de la ley de la gravitación universal, considerada por muchos historiadores como el pináculo del legado a la humanidad hecho por la Revolución Científica: «Toda partícula de materia del universo atrae a cualquier otra partícula con una fuerza que es directamente proporcional al producto de las masas de ambas partículas e inversamente proporcional al cuadrado de las distancia que las separa». [43]

Con la ley de la gravitación universal fueron resueltos problemas en los que los científicos del S. XVII se habían devanado infructuosamente los sesos. Se logró dar consistencia matemática al intrigante fenómeno del movimiento uniformemente acelerado de los cuerpos en caída libre. Las leyes de Kepler, otrora oscuras leyes empíricas del movimiento de los planetas, fueron reveladas como consecuencias indefectibles de la gravedad y del movimiento inercial de los cuerpos celestes.

Pero la obra newtoniana no sólo permitió resolver añejos enigmas, sino que también contribuyó fundamentalmente a la total desacreditación de la filosofía natural que por aquel entonces preponderaba.

La vieja visión escolástica sobre el dinamismo del universo tiene su raíz en un aforismo de ARISTÓTELES en el que es establecido que «la cadena de movimiento: motor-movido necesita tener un comienzo; existe un primer principio del movimiento eterno e inmóvil.... De los movimientos locales sólo el movimiento de rotación de la esfera celeste extrema es infinito, constante y siempre idéntico a sí mismo. Es, por tanto, el movimiento primario, que mueve a todo lo demás. Este movimiento de rotación eterno no sería posible, si no existiera un principio eterno del movimiento, él mismo incorpóreo e inmóvil. Por consiguiente existe un primer motor inmóvil y eterno, que tiene su sitio en la esfera celeste extrema». [55]

Objetivamente, el razonamiento de ARISTÓTELES es muy débil. No obstante, para los teólogos escolásticos la existencia de la «cadena del movimiento» y del «primer motor» eran preceptos incontrovertibles. Para ellos, «el movimiento de los seres vivos es sólo en apariencia un automovimiento; en realidad todo movimiento natural es un moverse desde fuera». El primer motor (Dios, quien está ubicado en la esfera celeste extrema) otorga movimiento a un primer eslabón: el espacio o «sensor de Dios». A su vez, este último transfiere movimiento al segundo eslabón (los planetas), que se encarga de mover los fenómenos locales,

incluyendo a los seres vivos. [55]

La teoría newtoniana suscitó enconados debates que terminaron estrepitosamente con esta abstrusa explicación teológica del movimiento. De acuerdo con Newton, el movimiento de un planeta está constituido por un componente inercial y por una fuerza centrípeta⁽⁶⁾. Simplemente, de no poseer ambos componentes, los planetas no describirían órbitas cerradas: si sólo poseyeran el componente inercial, se alejarían tangencialmente, con movimiento rectilíneo uniforme, de la órbita heliocéntrica; en el caso de que únicamente la fuerza centrípeta actuara, los planetas terminarían «cayendo en espiral» hacia el Sol. Mediante el uso del componente inercial y de la fuerza centrípeta, establecidos, respectivamente, en la segunda ley del movimiento y en la ley de la gravitación universal, NEWTON sustentó matemática y físicamente cómo es que los planetas, por sí solos, prescindiendo en absoluto de una intervención divina constante, son capaces de sostenerse en estado dinámico por un tiempo teóricamente ilimitado⁽⁷⁾.

(6) La existencia del componente inercial en el movimiento de los cuerpos fue demostrado por GALILEO (170), en tanto que HOOKE hizo lo propio para el componente centrípeta (43).

(7) De lo anterior es deducida una consecuencia fundamental para el desarrollo de la Astronomía: el surgimiento formal de la Mecánica Celeste. La compleja maquinaria del movimiento planetario quedó sustancialmente plasmada en conceptos matemáticos. Gracias a la ley de la gravitación universal, fue por fin posible predecir con gran aproximación la posición y velocidad de cualquier planeta en cualquier momento. Ocurrió otra consecuencia que me parece de mayor importancia: fue comprendido que los seres vivos y los planetas (ahora se cree que cualquier cuerpo celeste) están regidos por las mismas leyes; los fenómenos terrestres y los fenómenos celestes quedaron proyectadas en un marco de principios comunes.

Fueron múltiples y trascendentes los logros alcanzados con la teoría newtoniana, pero justo es decir que en realidad con ella no se satisfizo el objetivo kepleriano (145) de «formar una física basada en las causas». La ley de la gravitación universal atiende a las «consecuencias» de la gravedad, pero no desvela el misterio de la «gravedad» en sí. ¿Qué es exactamente la gravedad?, ¿cómo se origina?, ¿por qué actúa de esa manera? Por desgracia, siguen siendo

Habida cuenta, el concepto de «Dios como primer motor» fue desalojado del mundo material. NEWTON, el gran sintetizador de toda una era revolucionaria, propinó el tiro de gracia al concepto cosmológico escolástico al demostrar que leyes físicas simples, basadas en fenómenos naturales autocontenidos dinámicamente, rigen el movimiento de los cuerpos. Pocos años después, cuando comenzó a ser comprendida la naturaleza evolutiva del universo y la forma en la que éste está regido por leyes físicas, químicas y biológicas no arbitrarias, leyes que han permitido una larga historia evolutiva de la materia, los científicos hicieron suya la postura de que el universo es autocontenido en muchos más aspectos que en lo dinámico. Esta postura pronto fue robustecida con la aseveración de que el universo es autocontenido evolutivamente. (Se cuenta que NAPOLEÓN, al ser de su conocimiento la teoría de LAPLACE sobre la formación del Sistema Solar, llamó al autor y le interrogó sobre la razón por la que Dios no aparecía en ningún punto de la teoría. «Es que esa hipótesis, mi señor, en mi teoría no es necesaria» —contestó LAPLACE).

§ 14.

EL UNIVERSO DE NEWTON

Las consecuencias derivadas de la ley de la gravitación universal resultaron ampliamente consistentes con la dinámica observada en la Tierra y en el Sistema Solar. Pero ¿qué cuentas ofrece esta ley si es aplicada al resto del universo? Cuando Newton atendió esta cuestión, cayó en la cuenta de que había entrado en un laberinto con una solución inalcanzable mediante los conocimientos de su época. Para todos quedó claro que, a pesar de los espectaculares resultados de la teoría newtoniana, la ciencia aún estaba lejos de poder abordar el debate cosmológico.

Newton tuvo plena certeza de que el equilibrio del Sistema Solar depende de su dinamismo. Sabía que el componente inercial es el que evita que los planetas se precipiten hacia el centro del Sistema en un colapso gravitatorio mutuo. Mas sin embargo, los movimientos planetarios eran tomados como «ligeros» variaciones cíclicas que no afectan el reposo general del universo. En efecto, Newton y todos sus coetáneos creían firmemente que el universo es esencialmente estático [130]. Pero entonces, si

el universo carece del movimiento necesario para contrarrestar la inexorable atracción gravitatoria, ¿por qué no se ha colapsado? ¿Es acaso que la gravitación no es universal?

Ante este agravante para su teoría, NEWTON se vio obligado a introducir una proposición *ad hoc* poco ortodoxa: el universo no posee algún centro absoluto de gravedad, lo que equivale a afirmar que el universo es *infinito*. Así las cosas, toda partícula estaría atraída con la misma intensidad gravitatoria en todas direcciones, por lo que el efecto neto sería que ninguna partícula se desplazaría de su lugar, conjurándose el colapso.

Teóricamente, la estabilidad de este tipo de universo se lograría si a la vez —y esto es un punto crucial— poseyera una *homogeneidad perfecta*; de no ser así, sería imposible que se estableciera el equilibrio entre la atracción de las partículas. Ahora bien, en el caso hipotético de que existiera tal distribución de la materia, sólo podría ser conservada indefinidamente en un orden de reposo absoluto, pues el movimiento de cualquier cuerpo celeste podría bastar para originar perturbaciones —inhomogeneidades— que condujeran a romper el equilibrio atractivo. En este universo, difícilmente habría lugar para «ligeros» movimientos como los planetarios. [90]

Si a NEWTON le fue difícil postular un universo infinito, le resultó del todo imposible dejar de reconocer que la necesaria —para el modelo por él planteado— homogeneidad absoluta y permanente, es una utopía. En palabras del propio NEWTON, «es mucho más difícil suponer que todas las partículas en un espacio infinito debieran encontrarse tan adecuadamente ubicadas unas entre las otras como para encontrarse inmóviles dentro de un perfecto equilibrio. Porque yo considero esto tan difícil como el hacer que no sólo una aguja sino un número infinito de ellas (tantas como partículas existieran en un espacio infinito) se encontraran adecuadamente colocadas sobre sus puntas» [130]. Con esta reculación, NEWTON, finalmente, abandonó el intento de explicar el equilibrio universal^(a).

A partir de ese momento, fue necesario esperar más de dos siglos para que, con el advenimiento de nuevos datos teóricos y empíricos, fuera abordado nuevamente el problema universal y pudiera ser encontrada la salida del laberinto en el que la ley de la gravitación había colocado a la

(a) Como sea, el modelo de NEWTON hubiese fracasado, pues como lo estableció SILK, aún un universo infinito y absolutamente homogéneo colapsaría irremisiblemente (90).

Mecánica Celeste.

§15.

LA REVOLUCIÓN EINSTEINIANA

El fracaso para explicar a partir de la ley de la gravitación el *statu quo* del universo, significó no más que un nimio adversativo que poco pudo opacar la iridiscente validez que tempranamente fue adscrita a la teoría newtoniana. La abrumadora cantidad de fenómenos físicos a los que las leyes de Newton se ajustan satisfactoriamente (en conjunto con la cascada de teoremas y corolarios que de ellas se desprende) hizo suponer a los científicos que había sido lograda una Física plenamente correspondiente a la verdadera naturaleza de los fenómenos físicos. En el discurrir de los dos siglos posteriores a la época en que Newton creó su teoría, no hubo momento en el que la Física Clásica perdiera su encumbramiento filosófico, y en el terreno experimental acá y allá siempre con éxito. Para mediados del S. XIX ninguna duda cabía a propósito de que llegada la ocasión en que la Física experimental lograra develar datos de fenómenos que hasta ese momento habían pasado desapercibidos, sería posible escrutar en arcanos de la naturaleza tan intrigantes como el equilibrio estático del macrouniverso. El desarrollo de la ciencia concedió cierta razón a los físicos de ese siglo. Efectivamente, el advenimiento de nuevos datos empíricos profetizó vías factibles para resolver casos que aparentemente carecían de explicación alguna. Pero los datos emergieron no como se esperaba del inconmensurable macrouniverso, sino del ignoto mundo de lo muy pequeño, y para sorpresa de todos, la Física Clásica resultó inadecuada ante la gigantesca información que deparó el microuniverso. En particular, y sin que originalmente así fuera pretendido, el estudio de los fenómenos electromagnéticos obligó a la teoría newtoniana a recorrer el oscuro camino rumbo al obituario de las teorías científicas.

Entre los físicos del S. XIX era de consenso general la conclusión de que cualquier tipo de onda puede desplazarse si —y sólo si— dispone de un medio de propagación adecuado [157]. La experiencia así lo enseñaba: el sonido requiere del aire; las ondas que son producidas cuando un guijarro es arrojado a un estanque, requieren del agua. Por generalización, se pensaba que debe existir un medio específico —éter, se le nombró— para la propagación de las ondas luminosas. (La postulación del éter no obedeció exclusivamente a la necesidad de un medio de propagación

luminífera. DESCARTES, por ejemplo, adujo su existencia para rebatir el «vacío» [51]; si la extensión es una propiedad esencial y privativa de los cuerpos —razonaba DESCARTES—, ¿cómo es que pueden tener un sentido físico real extensiones espaciales que carecen de «algo» que les adjudique tal propiedad?).

Al éter fue necesario adscribirle propiedades por demás peculiares: en primer lugar, si la luz puede desplazarse desde lugares tan lejanos como las estrellas, se debe a que el éter es omnipresente; por otro lado, si jamás se le había podido detectar, significa que por lo menos es prácticamente invisible y carente de peso; además, si los planetas se trasladan en un «mar» de éter, y éste no interfiere sensiblemente en el movimiento de aquéllos, es porque el éter es una «sustancia» que no produce fricción detectable al contacto con otras sustancias¹⁰⁾. [159]

Cuando MAXWELL encontró que una implicación directa de su teoría sobre el electromagnetismo era la constancia de la velocidad de la luz, no dudó en concluir que esta ley se verifica cuando se tiene como marco de referencia absoluto al éter. Este rubro conceptual ganó para el éter una nueva y peculiar propiedad: que debería encontrarse en reposo con respecto al espacio absoluto. [47]

En 1887, MICHELSON y MORLEY —a sabiendas de que siendo el éter de naturaleza tan singular y esquiva, no cabía mayor posibilidad para corroborar su existencia que no fuera por medio de pruebas indirectas— idearon un experimento que se esperaba rindiera evidencia de la sustancia etérea [159]. El dispositivo consistió en una fuente que emitiera un haz luminoso hacia un interferómetro provisto de dos brazos de igual tamaño y colocados en forma

{0} Como es evidente, por más extraordinarias que fueron las propiedades arrojadas al éter, nunca se llegó al extremo de pensarlo absolutamente insustancial. Y es que el éter resultaba un argumento basal para dar validez física a muchos fenómenos geométricos y ópticos. La posición más cómoda y concurrida fue la de otorgar al éter propiedades físicas que en el resto de los cuerpos resultan ostensibles, pero que en el caso de aquél, eran de magnitudes tan pequeñas, que salían del alcance de las posibilidades técnicas de detección. Así por ejemplo, fue calculado que la densidad del éter es de $\sim 5 \times 10^{-19}$ g/cm³. Cabe señalar, por lo peculiar de la situación, que tal densidad genera por otro lado graves problemas de índole gravitatorio (considérese que la densidad media del Universo es diez mil millones de veces menor a la putativa densidad etérea). (51)

perpendicular uno con respecto del otro. El interferómetro fue dotado de un espejo que descompusiera el haz lumínico en dos partes, y de manera tal que a cada brazo se dirigiera una parte. En el extremo distal de cada brazo fue dispuesto un espejo que reflejara el rayo hacia el interferómetro, este último en el cual se determinaría con gran exactitud la velocidad de cada rayo. En cuanto a la parte teórica, MICHELSON y MORLEY partieron del siguiente supuesto: el desplazamiento de la Tierra a través del mar de éter forja continuamente un flujo. A poco de reflexionar, sería sensato el esperar que un rayo de luz que recorriera un determinado trayecto de ida y vuelta en dirección paralela al flujo etéreo, invierta mayor tiempo en la travesía que otro rayo que surcara la misma distancia pero en dirección perpendicular al flujo [47]. Hasta aquí, la lógica empleada parece elemental e impecable. Sin embargo: no fue detectada diferencia alguna de velocidad entre los dos rayos.

El resultado obtenido por MICHELSON y MORLEY fue contradictorio al sentido común, puesto que por la velocidad del planeta, necesariamente, las velocidades de los rayos deberían haber sido diferentes. Algo andaba mal, pero ¿qué? La gran precisión del interferómetro descartaba cualquier posibilidad de limitación técnica. Inmediatamente comenzaron a llover hipótesis que pretendían explicar los resultados obtenidos. Todas tocantes a la asignación de cada vez más raras propiedades al éter, y todas ellas igual de arbitrarias [196].

La primera hipótesis digna de consideración sobre los resultados de MICHELSON y MORLEY la propusieron los matemáticos FITZGERALD y LORENTZ [159]. Según estos científicos, todo cuerpo sufre una disminución de tamaño proporcional al movimiento relativo que posea con respecto al éter. Así que no es que en el susodicho experimento los rayos tuvieran la misma velocidad, sino que uno de los rayos —el más lento con respecto a la Tierra— tenía que recorrer una distancia menor a la recorrida por el otro, por lo que siempre ambos rayos llegaban simultáneamente al interferómetro.

El problema planteado por el experimento de MICHELSON y MORLEY, a pesar de todos los intentos, no pudo ser resuelto en el S. XIX. La hipótesis de FITZGERALD y LORENTZ, aunque matemáticamente consistente, parecía más una solución *ad hoc*, que un fenómeno físico real. Para la resolución del problema, los científicos tuvieron que darse a la espera de una mente brillante, capaz de desprenderse de cualquier prejuicio científico y de que pudiera poner en tela de juicio hasta el aserto más incontrovertible.

EINSTEIN hurgó en toda la Física Clásica en busca de alguna contradicción que fuera la causante de que se

estuviera interpretando equivocadamente a los fenómenos electromagnéticos. Y la halló; pero a un nivel mucho más profundo del que cualquier persona de su época lo hubiera imaginado ^{10}. Comenzó su análisis estableciendo principios de la naturaleza extremadamente simples, carentes de contradicción alguna con respecto a la experiencia sensorial, para después cotejar sus consecuencias con las estipulaciones de las leyes físicas clásicas. El primer paso lo dio al referirse a la equivalencia entre los cuerpos inerciales: «si una masa M se mueve rectilínea y uniformemente con respecto a un sistema de coordenadas K , también se moverá rectilínea y uniformemente con respecto a un segundo sistema de coordenadas K' , siempre que este último ejecute con respecto a K un movimiento de traslación uniforme» [59]. Basado en este supuesto, EINSTEIN demostró matemáticamente, mediante el uso de las transformaciones ortogonales, que «si K' es con respecto a K un sistema de coordenadas animado de un movimiento uniforme y libre de rotación, entonces los sucesos de la naturaleza transcurren con respecto a K' según unas leyes generales que son exactamente las mismas que con respecto a K ». A esta afirmación se le conoce como el *Principio de la Relatividad (en sentido restringido)*. En otras palabras, matemáticamente es demostrable que *las leyes naturales son aplicables en la misma medida a cualquier objeto o sistema de referencia, independientemente del movimiento que éste pudiera guardar (de acuerdo al planteamiento inicial de EINSTEIN, esta aseveración es completamente cierta para los sistemas con movimiento rectilíneo y uniforme)*.

Mas una demostración matemática en realidad nada demuestra; se precisa de la sustentación de la abstracción a partir de la experiencia: EINSTEIN adujo a favor de su Principio que si éste no fuera absolutamente verdadero, los fenómenos terrestres deberían estar regidos a cada momento por diferentes leyes naturales, ya que a cada momento la dirección y la velocidad de la Tierra se modifican. Por supuesto, hasta el momento no ha sido detectada varianza alguna de las leyes naturales.

Ahora bien —siguiendo el análisis de EINSTEIN—, no

{10} Nadie más halló el origen de la contradicción, a excepción, por supuesto, de POINCARÉ (149), quien llegó independientemente, y casi simultáneamente, a los mismos resultados teóricos creados por EINSTEIN. Sin embargo, la teoría de POINCARÉ fue construida, sustancialmente, en forma matemática, por lo que no logró el nivel de difusión e impacto que causó la versión einsteniana en el lego.

existe en la naturaleza ley más simple que la de la constancia de la velocidad de propagación de la luz en el vacío ($c=299,792$ Km/seg). Por el Principio de la Relatividad, se sigue que la velocidad de la luz debe ser la misma para todos los observadores inerciales. Por consiguiente, si MICHELSON y MORLEY no detectaron diferencia entre la velocidad de los dos rayos, fue por la simple razón de que ambos rayos, ajenos a la velocidad v del planeta, se desplazaban a idéntica velocidad c . La solución es bastante sencilla; las implicaciones, revolucionarias.

Espacio y tiempo absolutos son supuestos fundamentales en los sistemas de coordenadas galileanas y en todas las leyes newtonianas. De acuerdo a las transformaciones galileanas, la equivalencia entre el espacio y el tiempo entre cualquier par de sistemas de coordenadas está dado por: $x'_\mu = x_\mu - v_\mu t$ ($\mu = 1, 2, 3$) y $t' = t$, de donde se sigue que así como es que $t' \equiv t$, también $d^2x'/dt'^2 \equiv d^2x/dt^2$. Del establecimiento de las fórmulas del movimiento con base en estos supuestos, se llega directamente a la ley de la adición de las velocidades, o lo que es lo mismo, al supuesto físico por el cual MICHELSON y MORLEY cayeron en una encrucijada: las leyes electromagnéticas no son covariantes en el marco conceptual de las transformaciones galileanas [60]. Si, por el contrario, son negadas las nociones de tiempo y espacio absolutos, y se postula en su lugar que para cada sistema de coordenadas existe un tiempo y un espacio *propios*, el problema queda salvado. Evidentemente, la clave del éxito radica en formular un nuevo sistema de transformaciones que relacione los diferentes «aquí y ahora» de los sistemas inerciales de forma tal que sean rectores el principio de constancia de la velocidad de la luz y el de la relatividad especial. Para tal efecto, EINSTEIN se valió de las ecuaciones de transformación de Lorentz [60]:

$$x'_\mu = \frac{x_\mu - v_\mu t}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (1)$$

$$t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (2)$$

(De acuerdo a este sistema de equivalencias, el tiempo y el espacio varían de un observador a otro dependiendo de la velocidad que guarden éstos entre sí. Es claro que a mayor

velocidad v , la fracción $\sqrt{1-v^2\mu/c^2}$ se reducirá cada vez más, por lo que $x'\mu$ y t' divergirán en mayor grado de los relacionados $x\mu$ y t . A esto es a lo que se le conoce como la dilatación del tiempo y el acortamiento de las distancias).

Se sabe por la ley de la propagación que un haz luminoso surca un espacio x en un tiempo t obedeciendo la simple relación $x = ct$. Si se sustituye ct por x en las dos ecuaciones de transformación de Lorentz, y se divide (1) entre (2), queda demostrado que $x' = ct'$, de tal manera que se llega a un resultado consistente con las observaciones hechas por MICHELSON y MORLEY.

Lo anterior es, en esencia, el fundamento que dio origen a la *Teoría Especial de la Relatividad* (TER). El gran aporte que proporcionó EINSTEIN a la Física en 1905, es el de haber formulado, a partir de los conceptos de relatividad del tiempo y del espacio, una teoría que «excluyera lo relativo [fenómeno del que ya se tenía conciencia desde GALILEO] y llegara a la formulación de leyes físicas que no dependan, en ningún, sentido de las circunstancias del observador» [159].

Tres años después del surgimiento de la TER, MINKOWSKI encontró en ésta una consecuencia que muestra palmariamente lo profundo que caló EINSTEIN en su propósito de establecer la invarianza subyacente a la relatividad [176]: cuando un observador cualesquiera O_1 analiza dos eventos, y llega a la conclusión de que éstos estuvieron separados por un tiempo t_1 y por una distancia r_1 , mientras que un observador O_2 para los mismos eventos les asocia un tiempo t_2 y una distancia r_2 , se cumple la relación $ct_1+r_1 = ct_2+r_2$. A la magnitud ct_1+r_1 , MINKOWSKI le nombró *intervalo espaciotemporal*, el cual está conformado por tres dimensiones espaciales y una temporal, y permanece, en términos absolutos, invariante de un sistema de coordenadas a otro. (De acuerdo a esta nueva concepción, las variaciones entre los tiempos y los espacios propios se debe simplemente a que el espaciotiempo, según las circunstancias, se manifiesta en diferente proporción en lo que los observadores miden como espacio y como tiempo). Uno de los puntos más famosos de la TER es el concebir la realidad como un continuo tetradimensional, en donde la célebre cuarta dimensión es el tiempo^[11].

{11} Junto con la cuarta dimensión, toda una pléthora de consecuencias de la TER se volvieron a la postre celeberrimas: la imposibilidad física de la materia para poder desplazarse a la velocidad de la luz; la negación de la invariabilidad de la masa inercial; la sumisión de la ley

Todos los supuestos y aplicaciones de la TER están circunscritos en fenómenos de carácter inercial; aquí cabe entonces hacer una pregunta de carácter general: ¿qué grado de equivalencia existe entre los sistemas de coordenadas con movimiento uniforme y rectilíneo y aquéllos con movimiento acelerado?; ésta pregunta se impone debido a que, a fin de cuentas, cualquier corpúsculo o cualquier cuanto de luz del universo está sometido a una influencia gravitatoria y/o de fricción (o de impulso) por parte de la materia y de la luz que lo rodea. La respuesta, inequívocamente, es: *absoluta*. EINSTEIN esgrimió un par de argumentos a favor de esta respuesta, con lo que a su vez sentó las bases de lo que acuñó con el nombre de *Principio de Equivalencia*.

El primer argumento lo extrajo de un experimento mental que reza más o menos así [59]: imaginemos a un hombre que junto con diversos objetos se encuentra dentro de un cajón con movimiento no acelerado, en una región del espacio lo suficientemente vacía como para poder afirmar que en ese lugar no existe campo gravitatorio alguno que pueda alterar el movimiento del cajón y sus tripulantes. Ahora supongamos que el cajón, por medio de una cuerda que está sujeta a su techo, es tirado con una fuerza constante por algún ente. La aceleración que de esta suerte adquiere el cajón, puede bien provocar a nuestro hombre la sensación de ser «empujado» hacia el piso en todo momento; podrá juzgar que a una situación similar están sujetos los objetos que lo acompañan. Una explicación que podría dar de esa «sensación» es que él, junto con el cajón y los demás objetos, están sometidos a una atracción gravitatoria, y que si el cajón no ha caído, se debe a que está sujeto por una cuerda que pende de «algo». Es más, si la aceleración suministrada al cajón fuera de $\sim 98 \frac{1}{2}$ cm/seg², quizá lo primero que supondría este individuo es que ha sido atrapado por el campo gravitatorio de la Tierra. En cambio, para un sujeto que inicialmente guardaba un estado de reposo con respecto al cajón, y que pudo observar la fechoría del ente, le parecerá que el cajón se está desplazando con una aceleración constante. Supongamos ahora que súbitamente aparece un tercer individuo que por coincidencia se mueve en la misma dirección y sentido que el cajón, y que comparte una aceleración idéntica a la de éste: a tal observador le parecerá, simplemente, que el cajón está en reposo.

Del experimento mental anterior, la conclusión de mayor relevancia que se puede extraer es que según las

de la conservación de la materia a la de la energía
(consecuencia directa de la ecuación $E = mc^2$); la
susceptibilidad de la luz al efecto gravitatorio (60).

circunstancias de quien lo observe, para un determinado sistema de coordenadas se puede llegar con igual justicia a suponer que está sometido a una aceleración, a una atracción gravitatoria, o, incluso, a considerar que permanece en reposo (o en movimiento uniforme y rectilíneo).

El segundo argumento para establecer la equivalencia entre los movimientos inerciales y acelerados, lo obtuvo EINSTEIN de la crítica que sostuvo al hecho de que las masas de un mismo cuerpo (inercial y gravitatoria) estén definidas dentro de la Física prerrelativista por razones matemáticas que no convergen fundamentalmente [59]. En la segunda ley del movimiento de NEWTON, la masa está definida en términos de inercia:

$$[Fuerza] \approx [masa\ inercial][aceleración],$$

en tanto que en la ley de la gravitación, está definida una masa gravitatoria:

$$[Fuerza] \approx [masa\ gravitatoria][intensidad\ gravitatoria].$$

Ahora bien, de la relación de ambas leyes, se obtiene que:

$$[aceleración] \approx \left(\frac{masa\ pesante}{masa\ inercial} \right) [intensidad\ gravitatoria].$$

De acuerdo a esta ecuación, se desprende el escolio de que para que se cumpla que un campo gravitatorio produzca una aceleración independiente de la naturaleza del cuerpo, tal como lo demostró GALILEO, numéricamente es necesario que la masa inercial sea igual a la masa gravitatoria.

Es evidente el vínculo entre el escolio anterior y el experimento del hombre en el cajón. EINSTEIN no dudó para emitir el aserto de que el fenómeno físico *masa* es «la misma cualidad del cuerpo [que] se manifiesta, según las circunstancias, como “inercia” o como “peso”» [60]. Con esta conclusión en mano, EINSTEIN estuvo en condiciones de formular el Principio de Equivalencia, punto de partida para la creación de una *Teoría General de la Relatividad* (de aquí en adelante TGR).

Naturalmente, la inclusión de los movimientos acelerados condujo a la formulación de leyes naturales que fueran igual de válidas para cualquier tipo de movimiento. EINSTEIN, para tal propósito, hiló un conjunto de elementos cuya coherencia matemática no fue sencillo establecer. Uno de estos elementos fue el hallazgo de que por causa de la gravitación «las leyes de la configuración de los cuerpos rígidos... [entre sistemas de coordenadas no inerciales]... no concuerdan con las leyes de configuración de la Geometría Euclídiana para los mismos cuerpos». Un segundo elemento fue

el propósito de EINSTEIN de incluir en su TGR el postulado que se conoce con el nombre del Principio de Mach: la inercia es causada íntegramente por la materia del universo, y su magnitud está determinada por la masa y distribución de tal materia [51]; o lo que es lo mismo, la estructura espaciotemporal está determinada por la materia del universo. Este principio responde a un rubro filosófico que mucho se ha difundido en la ciencia: en cualquier interacción física, todos los elementos participes resultan modificados. En la TER, contrariando tal principio, la estructura espaciotemporal es concebida como una entidad absoluta capaz de afectar a los eventos físicos, pero que éstos, bajo ninguna circunstancia, la perturban [90].

Un elemento más proviene del análisis de la ley de la gravitación universal, vista desde una perspectiva relativista: —la ley de la gravitación newtoniana resulta arbitraria por hacer referencia a una estructura espaciotemporal inexistente; —presupone que la acción gravitatoria entre los cuerpos es a distancia e instantánea; —dentro del marco teórico de la Física Clásica, no se encuentra explicación alguna de la equivalencia entre la masa gravitatoria y la masa inercial.

Basado en estos elementos y en el Principio de Equivalencia, EINSTEIN llegó al siguiente marco teórico [60]: la acción gravitatoria se realiza por medio de un campo gravitatorio que causa la materia en torno a sí misma. Este campo gravitatorio no es más que una zona espacial que se curva por la influencia de la materia local. Ahora bien, en un sistema no gravitatorio (o inercial), la ruta más corta entre un punto cualesquiera y otro es una línea recta (esto es a lo que ARISTÓTELES refirió como un movimiento natural (o ruta *geodésica*)). De acuerdo a la TGR, y en virtud del Principio de Equivalencia, los cuerpos acelerados no están privados de tal movimiento natural; sin embargo, las geodésicas de tales especies se desvían de lo rectilíneo debido a que están sujetas a un espacio curvado (el generado gravitatoriamente) que difiere geoméricamente del espacio plano o euclídeo de los sistemas inerciales^[12]. Dentro de este marco geométrico, la noción de «fuerza gravitatoria» y la de todas las premisas que ésta implica dentro de la

{12} De acuerdo con la concepción einsteniana, la Tierra entonces no viaja a lo largo de una elipse forzada por una atracción centripeta, sino que se desplaza libremente (en forma equivalente a los cuerpos con movimiento inercial) a lo largo de una geodésica que tridimensionalmente toma la forma de una elipse.

Física Clásica, resultan innecesarias (así como desde ha dos siglos resulta innecesaria e ilusoria la «fuerza centrífuga»).

Naturalmente, en una Física en donde la gravitación no es concebida como una «fuerza», sino como un «deformamiento del espaciotiempo», es necesario formular una ley que relacione este nuevo tipo de métrica con la densidad de la materia y la radiación. En la ley de la gravitación propuesta por EINSTEIN, se satisface que:

$$R_{\mu\nu} - 1/2g_{\mu\nu}R = (8\pi G/c^2)T_{\mu\nu} \quad (3)$$

en donde: $R_{\mu\nu}$, conocido como el tensor de segundo grado de Reimann, contiene información sobre la curvatura del espacio; $g_{\mu\nu}$ describe, respecto a un sistema cualesquiera de coordenadas, las relaciones métricas del espaciotiempo y el campo gravitatorio; R es un escalar que proviene del producto de $R_{\mu\nu}$ y una variante de g ; y $T_{\mu\nu}$ es el tensor energía de la materia, cuya magnitud depende de la densidad de energía del campo electromagnético y de la materia ponderable [60].

§16.

EL UNIVERSO DE EINSTEIN

No es incidental el que la gravitación ocupe un lugar tan prominente tanto en la Física Clásica como en la Relativista. Ciertamente es que ninguna de las dos teorías aporta algo relevante acerca de la naturaleza de la gravedad (en efecto: de las cuatro fuerzas elementales que gobiernan los fenómenos en el universo, la más estudiada y, hasta el momento, la menos comprendida es precisamente la gravitatoria^{13}), pero fuera del misterioso velo que oculta su causalidad, la gravedad manifiesta dos características que explican ampliamente el que NEWTON y EINSTEIN hayan centrado

{13} A pesar de lo dicho al final de la sección inmediata anterior, seguiré refiriéndome a la gravedad como una «fuerza». La razón es que así podré englobar en la misma jerarquía a la gravedad con las fuerzas electromagnética, nuclear débil y nuclear fuerte. Y es que los científicos creen cada vez más el estar ciertos de que las fuerzas elementales del universo (incluida la gravitación) son una misma entidad física expresada en diferentes modalidades [72,153,190].

en ella gran parte de sus esfuerzos. Primera: a pesar de ser la fuerza más débil, la gravedad es la que opera a mayor distancia, y de la que dependen sustancialmente la mecánica celeste y, en general, el *statu quo* cósmico. Segunda: la materia, la energía y la estructura espaciotemporal son susceptibles de reacción, sin caso de excepción, ante un campo gravitatorio.

Habida cuenta de esta universalidad del efecto gravitatorio, es de esperar que todo aquél que se aventure a formular una ley de la gravitación, se sienta fuertemente impelido hacia el intento de explicar la estructura del universo. Y así como en su momento NEWTON lo llevó a efecto, EINSTEIN hizo todo cuanto pudo por engastar satisfactoriamente su ley en el marco macrocósmico.

En 1917, año en el cual EINSTEIN publicó sus primeras conclusiones acerca del problema cosmológico, ya era por los astrónomos sabido que todas las estrellas cuentan con movimiento propio, y que cada movimiento posee un componente aleatorio. Sin embargo, esto era parangonado con el caso de un enjambre, en el que todas las abejas se mueven en forma aparentemente caótica, y que, no obstante, se conserva definida la estructura del grupo. Así que EINSTEIN tuvo que arrostrar un problema muy similar al que tuvo que enfrentar NEWTON: ¿cómo conjurar el colapso gravitatorio de un universo esencialmente estático?

Los cosmólogos realizan sus pesquisas bajo los supuestos de que el universo es homogéneo (esto es, que la distribución de la materia es uniforme) e isotrópico (las propiedades físicas de la materia y la energía son las mismas en cualquier parte). Este par de propiedades conforman lo que es conocido como el *Principio Cosmológico*, cuya acepción física es la siguiente: un observador cualesquiera tendrá ante sí un panorama cósmico idéntico (a gran escala) al que visualizará otro observador colocado en cualquier otra parte del universo.

NEWTON demostró (aunque nunca lo hizo explícito) que haciendo uso de la geometría euclidiana (o plana) es posible representar un universo homogéneo e isotrópico. Mas la TGR, que es una bella teoría geométrica de la gravedad, exige que sean consideradas geometrías alternativas. La razón de ello es de carácter fundamental. La ecuación einsteniana de la gravitación puede ser expresada esquemáticamente como:

$$\langle \text{curvatura del espaciotiempo} \rangle \approx \langle \text{densidad energética de la materia y de la radiación} \rangle$$

Es evidente que el caso único en el cual la curvatura universal sería nula, estaría cumplido cuando la densidad media de la materia y la energía fuera nula.

EINSTEIN encontró factible representar matemáticamente un universo que satisfaga las estipulaciones del Principio Cosmológico mediante el uso de la geometría reimanniana (o esférica) o de la geometría lobaichevskiana (o hiperbólica). La geometría reimanniana resulta de la extrapolación del perímetro (unidimensional) de un círculo (bidimensional) al volumen (tridimensional) de una hiperesfera (tetradimensional). Al círculo se le define como el conjunto de puntos, en un plano cartesiano bidimensional, que se hallan a una distancia unitaria del origen: $x_1^2 + x_2^2 = 1$. La esfera es el área, en un plano cartesiano tridimensional, que se halla a una distancia unitaria del origen: $x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = 1$. Por generalización, la hiperesfera está conformada por el volumen, en un plano cartesiano tetradimensional, que se halla a una distancia unitaria del origen: $x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 = 1$. Análogamente, la geometría lobaichevskiana se sustenta en la generalización del contorno de una hipérbola bidimensional al volumen de un hiperboloide tetradimensional [187]. (Teóricamente, sería posible conocer qué tipo de geometría corresponde la estructura del universo, analizando la ruta de, por ejemplo, dos proyectiles que se desplazan en la misma dirección: en el caso de una geometría euclidiana, las rutas permanecerán paralelas; de convergir los proyectiles, el universo es reimanniano (algo análogo a lo que sucede en la superficie terrestre, en la que si dos individuos siguen un par de meridianos diferentes, sus rutas terminarán por cruzarse); si fuera la situación de que se separaran gradualmente, se sigue que es hiperbólico. Los cálculos muestran, sin embargo, que la magnitud de curvamiento del universo sería tan pequeña, que resulta prácticamente imposible, a escala terrestre, ser concluyente con un experimento como éste).

Ahora bien, tanto el Principio Cosmológico como el supuesto del estado estático exigen, obviamente, que el universo no posea borde alguno. NEWTON intentó resolver este requerimiento con un universo infinito. Pero en la segunda década del S. xx, tal intento no cabía. La paradoja de Olbers gravitaba aún como un argumento con el suficiente peso teórico como para rechazar cualquier modelo que involucrara el espacio infinito. La solidez de esta paradoja, junto con la conclusión, derivada de la teoría de la relatividad, al respecto de que en un universo euclídeo la densidad de la materia sería nula, al parecer influyeron determinantemente para que EINSTEIN desechara las alternativas que le brindaban la geometría euclidiana y la lobaichevskiana. En contraste, halló en la geometría reimanniana algunas características topológicas con las cuales atender de una sola vez a tres problemas que parecían fundamentales [60]: (1) con un espacio esférico se permite la no existencia de un centro absoluto, sin incurrir, a la

vez, en la postulación de un universo infinito que evoque la paradoja de Olbers⁽¹⁴⁾; (2) resulta factible, al menos en teoría, el cumplimiento íntegro del Principio Cosmológico, por lo que se permite dar razón —necesaria, aunque no suficiente— de un universo estático; y (3) se incluye una parte importante de la filosofía de MACH, en el sentido de que la curvatura que le confiere estructura esférica al universo, no puede ser arrogada a influencias locales, sino que está determinada por el total de la materia universal.

La solución de las ecuaciones de EINSTEIN para un universo isotrópico y homogéneo implica las siguientes expresiones matemáticas [187]:

$$3d^2a/dt^2 = 4\pi G(\rho + 3P/c^2)a \quad (4)$$

$$3(da/dt)^2 = 8\pi G\rho a^2 - 3\Lambda c^2 \quad (5)$$

en donde: a es el factor escalar que denota la magnitud normalizada de la distancia entre las partículas de un universo homogéneo; ρ es la densidad energética de la materia; P representa la presión que en todo momento ejerce la materia; y Λ contiene la información del tipo de geometría (+1 para reimanniana; 0 para euclidiana; y -1 para lobaichevskiana).

Descartando como ideas plausibles mitos como el de la caverna de PLATÓN, o cualquier otra especulación teológica que taxe la existencia en la exclusividad metafísica, y partiendo del axioma de la existencia de la materia, se encuentra que en (4) el resultado del miembro derecho es necesariamente positivo. Esto compromete la magnitud del lado izquierdo, excluyendo de entrada la posibilidad de que el cociente de aceleración d^2a/dt^2 pueda ser igual a cero, por lo que el coeficiente de expansión (o contracción) da/dt , salvo en efímeros instantes, debe de ser de magnitud no nula. En otras palabras, *mirabile dictu*, el universo no puede ser estático; la propia densidad energética obliga a que el universo esté en un estado dinámico (lo que no se

{14} El volumen que se construye con base en una hipersfera tetradsimensional está investido con las mismas propiedades que sus homólogos de diferente grado de dimensionalidad. Así por ejemplo, un volumen esférico no posee un centro absoluto, de la misma manera como la superficie de un globo no lo posee. Un volumen esférico, análogamente al perímetro de un círculo, a pesar de ser ilimitado, es finito, puesto que es un volumen cerrado.

refiere únicamente al movimiento propio de los cuerpos celestes, sino a la expansión (o contracción) de la estructura espaciotemporal cósmica).

Ante este inesperado resultado, EINSTEIN tuvo que realizar, en contra de su manera común de teorizar, una modificación «pertinente» en su ley de la gravedad, para poder resolver un universo estático de densidad no nula:

$$\{R_{\mu\nu} - 1/2g_{\mu\nu}R\} + \Lambda g_{\mu\nu} = (8\pi G/c^2)T_{\mu\nu} \quad (6)$$

A $\Lambda g_{\mu\nu}$ se le conoce como el término cosmológico, y matemáticamente es el miembro que contiene la información sobre la curvatura espaciotemporal que se contrapone, en una proporción balanceada, a la curvatura espaciotemporal debida al tensor energía de la materia y la radiación. En sentido físico, el término ha sido interpretado como una fuerza de repulsión cósmica que, inserta en el espaciotiempo, contrarresta la aceleración debida a la densidad energética del universo.

He aquí que esta fuerza de repulsión, de la que no se tiene prueba experimental de su existencia, fue concebida por EINSTEIN como aquél fenómeno físico que se contrapone a nivel cósmico a la fuerza gravitatoria del universo, y que permite el equilibrio estático de éste. El valor que se obtuvo para Λ es de $\sim 10^{-57} \text{ cm}^{-2}$ (partiendo de una $\rho \cong 10^{-30} \text{ g/cm}^3$ para la relación $\Lambda = 4\pi G\rho/c^2$); un valor como ése es lo suficientemente pequeño como para no interferir en fenómenos locales —como la estabilidad inercial-gravitatoria del Sistema Solar—, pero lo suficientemente grande como para permitir explicar el no colapso gravitatorio del universo.

En resumidas cuentas, EINSTEIN construyó un modelo cosmológico con los siguientes atributos: homogéneo, isotrópico, estático, esférico y finito.

¿Qué hay sobre la validez del universo de EINSTEIN? Retrospectivamente, el modelo comparece como una hipótesis prenatal que históricamente corrió con la desventaja de no haber sido alumbrada por la luz de los datos observacionales con los que contamos actualmente, en particular con la de aquéllos que, provenientes de los corrimientos espectrales de las galaxias, son interpretados como fenómenos sintomáticos de la expansión del universo. Mucho han sido pregonados, y no en pocas ocasiones con cierto toque de infatuación por parte de los relativistas, los méritos intrínsecos de la ecuación de la gravedad de EINSTEIN que fueron revelados cuando FRIEDMANN encontró que una consecuencia directa de aquélla es la predicción de que el universo se encuentra en estado expansivo [60,69]: prueba irrefutable —según muchos físicos— de la validez de la TGR es que, lejos de proveer un modelo cosmológico *ad hoc*,

permitió prever el comportamiento expansivo del universo, ¡sin que siquiera se sospechara acerca de la existencia de tal expansión! Haciendo gala de una lógica solamente comparable con la cristalizada en la construcción de la Teoría de la Relatividad, FRIEDMANN cifró su éxito en haber desarrollado su modelo cosmológico con base en los supuestos originales de EINSTEIN que le parecieron autoconsistentes, y, sobre todo, en haber excluido el término cosmológico, a pesar del supuesto estado estático del universo. De aquí que es dado pensar que EINSTEIN, de haber mantenido en primer plano sus premisas simples y generales y su profunda lógica positivista, hubiera logrado la gestación de un modelo premonitorio. Pero en cambio, paradójicamente, lo que hizo fue introducir un agente abortivo: el término cosmológico.

Sin embargo, es necesario apuntar dos aclaraciones que hacen justicia a EINSTEIN. En primer lugar, si incluyó la repulsión cósmica, fue por la simple razón de tener que ajustar su ecuación a un universo que, por lo demás, todos los astrónomos afirmaban como estático. En segundo lugar, el mismo EINSTEIN fue el crítico más suspicaz sobre la validez teórica y física del término cosmológico: no proveniente de algún argumento teórico que lo sugiriera al menos como una remota contingencia, y no respaldado por alguna observación astronómica o hecho experimental, tal artificio matemático había prorrumpido injustificadamente en la Cosmología, permaneciendo tambaleante ante la lógica y el análisis propios de la filosofía y de la ciencia positivistas. Llegado que hubo el momento en que fue posible ser desechado el término cosmológico, nadie se sintió más a su gusto que el propio EINSTEIN.

Ahora bien, ¿qué veredicto merece el universo de EINSTEIN al ser circunscrito en el estado de la Astronomía de 1917? Por principio, el de un modelo hasta cierto punto arbitrario en cuanto al supuesto de la distribución y propiedades de la materia.

En el S. XVIII, KANT y LAPLACE originaron una controversia al respecto de que si ciertas nebulosas (de las cuales la más famosa era la de Andrómeda) son inter o extragalácticas. De acuerdo a LAPLACE, estas nebulosas son *sistemas planetarios en formación* que pertenecen a la Vía Láctea. Por el contrario, KANT sostenía que se trata de *universos isla* similares en dimensión y en constitución a nuestra galaxia. Por supuesto, aceptar la hipótesis kantiana presupone rechazar la vieja idea de que la Vía Láctea constituye el total del universo (de un universo finito, que es lo más importante), y sin alguna prueba contundente de la existencia de otras galaxias, la posición conservadora se asió tenazmente a la idea laplaceana, la misma que seguía preponderando en 1917. Ahora bien, HERSHEY, el gran innovador de la Astronomía Estadística, y SHAPLEY, quien

descubrió la posición excéntrica del Sistema Solar, demostraron en el S. XIX, en forma por demás contundente, que en la Galaxia existe una distribución inhomogénea y anisotrópica de la materia. De estar el universo limitado a la Vía Láctea, el Principio Cosmológico de ninguna manera puede ser válido, y por ende, el modelo de EINSTEIN careció sustancialmente, para el estado de la ciencia de la década de los 1910's, de significado físico correcto.

Sin embargo, si la incorrespondencia entre el universo de EINSTEIN y la realidad hubiese estado centrada primordialmente en la arbitrariedad del supuesto de isotropía y homogeneidad, para 1925 tal modelo hubiera llegado a ser algo así como el *speculum mundi*. HUBBLE, disponiendo del telescopio que por aquel entonces era el más grande del mundo, logró dirimir la controversia sobre las nebulosas a favor de la concepción kantiana, al haber determinado, por medio de la relación período-luminosidad de las variables cefeidas, una distancia no menor que 1,000,000 años luz entre nuestra galaxia y Andrómeda [102,104]. No mucho después del hallazgo hubbleano, BAARDE mostró pruebas fotográficas en las que nítidamente se aprecia que las putativas nebulosas intergalácticas como Andrómeda, están constituidas en realidad por miríadas de millones de estrellas, siendo cada una de esas nebulosas estructuras celestes comparables en tamaño y estructura con la Vía Láctea.

HUBBLE determinó la distancia y distribución de un nutrido número de galaxias, y encontró que éstas tienden a agruparse para formar cúmulos. Actualmente, se piensa que los cúmulos se aglutinan a su vez en supercúmulos [79]. Muchos astrónomos coinciden en que si los cúmulos de galaxias son tomados como macrounidades fundamentales de distribución, entonces es válido considerar al universo homogéneo e isotrópico.

Un punto más que tempranamente fue criticado al modelo cosmológico propuesto por EINSTEIN, es que regresan por sus antiguos fueros el tiempo y el espacio absolutos. Por ejemplo, en la ecuación $GM = \pi c^2 R/2$, R representa el radio del universo con respecto a un sistema único de referencia; similarmente, el cálculo del tiempo que tardaría un rayo de luz en circunvalar el universo esférico ha provenido de relaciones matemáticas que no incluyen el factor de relatividad del tiempo. En otras palabras, en el universo einsteniano se erige la concepción de un tiempo y un espacio cósmicos que son independientes del observador. Esto evidencia que en la cosmología einsteniana, las modalidades gravitatorias e inerciales de la estructura espaciotemporal son desatendidas. Sin embargo, existe el atenuante, sustentado en la validez del Principio Cosmológico, de que todos los puntos materia del universo están dotados de las

mismas propiedades gravitatorias e inerciales, por lo que el tiempo debe ser muy similar entre ellos.

Como sea, el propio EINSTEIN estuvo pronto a reconocer que su universo es un modelo que representa a la realidad cósmica sólo de una manera burda e idealizada.

§17.

EL TÉRMINO $\Lambda_{\mu\nu}$ EN LOS MODELOS COSMOLÓGICOS

Poco después de que EINSTEIN publicara su primer tratado cosmológico, DE SITTER anunció una solución alternativa para las ecuaciones de campo, partiendo de un valor de $\Lambda > 0$. El universo de DE SITTER puede ser caracterizado por los siguientes adjetivos: estacionario, esférico y vacío (i.e., carente por completo de materia y radiación). Tales tópicos hacen que este modelo revista un especial interés teórico, en el sentido de que al observarse la solución de un universo curvo y vacío, se evidencia —aunque sólo— matemáticamente que dentro de la TGR, el espaciotiempo posee cierta estructura intrínseca que no está determinada, en absoluto, por la densidad energética: esto implica, evidentemente, un factor limitativo para el principio de Mach, a más de delatar que EINSTEIN no logró asirlo íntegramente mediante su teoría. [196]

DE SITTER descubrió que si en su modelo fueran introducidas fuentes luminosas de masa infinitesimalmente pequeña, la luz que de ellas manara sufriría un corrimiento hacia el extremo rojo del espectro debido al retardamiento relativo de las vibraciones nucleares. Tal corrimiento hacia el rojo (conocido como *efecto de Sitter*), que por lo demás es de una estructura matemática compleja, está sustentado en la dilatación del tiempo que se verifica en forma directamente proporcional a la distancia entre los sistemas de referencia (un efecto de dilatación análogo al estipulado en las leyes de la TER, sólo que en este modelo cosmológico el factor de dependencia es la distancia, no la velocidad). En el universo de DE SITTER, por causa de la dilatación del tiempo, mientras mayor sea la distancia entre dos partículas, la frecuencia de señales luminosas que recibirá cada una con respecto de la otra será, consecuentemente, menor. Como es bien sabido, la velocidad de un haz luminoso está relacionado con su frecuencia y longitud de onda en una forma simple y precisa mediante la expresión:

$$c = \nu \times \lambda.$$

Así que en virtud de la conservación del valor de c , se sigue que a cualquier decremento de ν , el rayo de luz sufre

un alargamiento proporcional de λ , esto es, se desplaza hacia el extremo rojo del espectro.

Es fácil de ver que la luz emanada por partículas injertas en la estructura espaciotemporal del universo de DE SITTER debe sufrir, no obstante, cierta magnitud de corrimiento hacia el rojo que no es arrogable a la dilatación del tiempo. Consideremos el caso del modelo cósmico einsteniano. La solución de un universo estático con densidad media mayor que cero exigió la inclusión de una fuerza de repulsión que para todo propósito resultara exactamente balanceada con la atracción gravitatoria. Bajo tales términos, cualquier variación de la magnitud gravitatoria o de la de repulsión se traduciría en una ruptura del equilibrio cósmico (v. gr., un leve aumento de la densidad energética provocaría que el universo colapsara). En un universo como el de DE SITTER, en donde la gravedad es nula, y en el que, por ende, gobierna exclusivamente la repulsión cósmica, toda partícula se alejará del punto de inserción original con una aceleración constante. Esto es, la luz experimentará un enrojecimiento causado por el efecto Doppler.

De lo anterior surgió el famoso enunciado de que «el universo de EINSTEIN contiene materia pero no movimiento y el de DE SITTER contiene movimiento pero no materia» [57]. Como señaló el propio DE SITTER (no sin cierto toque de ironía), su modelo es estacionario simplemente porque en él no hay algo que cambie.

Estrictamente, el modelo de DE SITTER no pasa de ser una construcción matemática absolutamente desvinculada de la realidad física del universo^[15], y habría quedado inmerso en la oscuridad de lo que no pasa de ser matemáticamente curioso, de no ser por el trascendental descubrimiento, realizado por HUBBLE en 1929 [103, 104], del comportamiento de directa proporcionalidad entre la distancia de las galaxias (r) y el corrimiento hacia el rojo de sus espectros ($\Delta\lambda/\lambda$). El corrimiento espectral detectado por HUBBLE pronto fue interpretado como un genuino efecto Doppler, producto de la recesión de las galaxias: «la velocidad radial deducida del desplazamiento hacia el rojo de las líneas espectrales de una galaxia es proporcional, en primera aproximación, a la distancia de esa galaxia al observador» [124], o, en

[15] En este modelo se cumple que $P + p = 0$. Ya que la densidad promedio de la materia (p) es mayor que cero, para que esta relación resultara verosímil, sería requerido que la presión total del universo debida a la materia y a la radiación (P) fuera negativa! (100)

forma condensada, $v \approx H_0 r$ (siendo H_0 la constante de Hubble). Este enunciado, a fin de cuentas, hubo de trascender como lo que ahora es conocido como la ley de Hubble⁽¹⁶⁾.

{16} Antes de proseguir con los modelos cosmológicos, quisiera ocupar un breve espacio para apuntar algunas observaciones de carácter incidental sobre ciertas implicaciones que yacen en la ley de Hubble.

—ESCOLIO PRIMERO. La dinámica galáctica no está dictada exclusivamente por el comportamiento recessivo. Se sabe, por ejemplo, que la velocidad radial de Andrómeda con respecto a la Vía Láctea es negativa (i. e., estas galaxias se acercan con el tiempo). En lo general, las galaxias poseen en su movimiento un componente aleatorio, el cual está sobrepuesto al movimiento expansivo global.

—ESCOLIO SEGUNDO. La cantidad de energía de un rayo de luz está dada por $E = h\nu$ (en donde h es la constante de Planck). En el caso de que un rayo sufra un corrimiento hacia el rojo, su energía disminuirá por causa del decremento de la frecuencia. Con base en esto, la ley de Hubble resulta *per se* suficiente para sortear la paradoja de Olbers, aún en un universo infinito: la cantidad de luz que aportan las capas disminuye a la par del aumento de la distancia, por lo que la sumatoria de la luz de todas las capas converge en una cantidad finita. De hecho, en el caso de aquellas galaxias lo suficientemente distantes como para que se alejen a la velocidad de la luz, v posee un valor nulo, por lo que su luz jamás nos alcanzará.

—ESCOLIO TERCERO. Hémos aquí con una ley empírica que la hemos interpretado como un índice de que el universo está en expansión. ¿Qué trascendencia filosófica y epistemológica connota tal noción? El cariz filosófico está contemplado en espacios venideros; por el momento, me abocaré al epistemológico. Por definición, el universo está conformado por todo lo que existe. La aseveración es igual de cierta para un universo infinito que para uno finito. Pero entonces, ¿cómo cabe la posibilidad de que el universo se expanda, si el total del espacio está contenido en el propio universo? Esta paradoja es fácil de evadir si atendemos los postulados de la TGR. Ésta nos evidencia que es tan necio hablar de energía sin espaciotiempo, como el concebir al espaciotiempo libre de energía. El principio de Mach, además de aceptar esta consustancialidad, expresa la codependencia causal entre el espaciotiempo y la energía, de manera que estos últimos se afectan mutuamente: el espacio es susceptible de sufrir modificaciones, no es independiente ni absoluto. Y efectivamente, la TGR nos enseña que la

Numéricamente, $v = H_0 r$ no diverge fundamentalmente de

expansión del universo significa realmente una transformación sufrida por el espacio: su expansión. Las galaxias, en su comportamiento trashumante, lejos de invadir un «espacio antes desocupado», están siendo «arrastradas» por el espacio que sufre una evolución expansiva. Epistemológicamente, la expansión del universo está definida como un sistema de coordenadas en comovimiento (160).

—ESCOLIO CUARTO. La expansión del universo significa no menos que cambios en la densidad energética cósmica como función del tiempo. El universo, tomado en un determinado instante t_0 , será para todo $t > t_0$ menos denso, y para todo $t < t_0$ más denso. Es, pues, por demás evidente, que los modelos cosmológicos en los que sea pretendido incluir la ley de Hubble, deben ser *asimétricos con respecto al vector temporal*; lo que trae a colación cuestiones de diversa índole:

—ESCOLIO QUINTO. Si hemos de ajustarnos a las estipulaciones de la ley de Hubble para construir modelos cosmológicos dinámicos, tendremos que recurrir, en primera aproximación, a extrapolaciones a partir de tal ley, para poder deducir el orden cósmico futuro y pretérito. Sin embargo, tales extrapolaciones son de una magnitud asombrosamente considerable. El valor más aceptable para H_0 está entre 50 y 100 km/segMpc ($1 \text{ pc} \sim 3.0857 \times 10^{13} \text{ km}$) (124). En caso supuesto de que tal determinación sea esencialmente correcta, se tiene que por las dimensiones cósmicas, las galaxias varían de posición a un ritmo extremadamente lento con respecto a la escala temporal humana. Llevamos apenas ocho décadas de observar la dinámica global del universo. Las extrapolaciones requeridas, en contraste, son del orden de miles de millones de años. ¿Hasta qué punto a lo largo del tiempo la ley de Hubble es válida? Sinceramente, es algo incierto. Y sólo bajo el peso de esta incertidumbre se puede seguir laborando en materia cosmológica.

—ESCOLIO SEXTO. Hasta donde colijo, el punto más impactante de la ley de Hubble es su acusada insinuación sobre un *initio*. El retroceso en el tiempo conduce a un empaquetamiento cada vez mayor de la materia y de la radiación. ¿Hace cuánto y en qué condiciones se suscitó el punto de máxima densidad? ¿La expansión del universo es un fenómeno que ha existido desde el pasado sin principio? De no ser así, ¿qué fue en el pasado del *initio* de la expansión? ¿Cuál es la historia de la materia desde entonces? A estas cuestiones, y a otras muchas más, están consagrados los capítulos subsiguientes y lo que resta de este capítulo.

$v \propto r_2$, que es la expresión que valúa en términos de velocidad el corrimiento hacia el rojo en el universo de DE SITTER. Esta analogía, que en cierta medida es la premonición (en buen acierto) de un evento físico desconocido a partir de una abstracción matemática, hizo que el modelo de DE SITTER cobrara un alto significado en algunas teorías cosmológicas que poco después fueron desarrolladas.

El modelo de EDDINGTON [57] fue logrado mediante la concatenación tetrapartita de: el universo de EINSTEIN, el universo de DE SITTER, la ley de Hubble y un nuevo sentido epistemológico de la constante cosmológica. Aunque cierto es que cada uno de estos elementos fue previo al modelo de EDDINGTON, solamente la ley de Hubble conservó la concepción original (i.e., como la relación que expresa la expansión del universo). Los modelos de EINSTEIN y de DE SITTER, aunque respetados en sus accidentes matemáticos, fueron notoriamente trastocados en cuanto a su posible correspondencia con respecto a la realidad. Por lo demás, la teoría de EDDINGTON fue completamente original, y como todo lo nuevo, resultó aventurera y altisonante para los castos oídos de lo ortodoxo.

Según EDDINGTON, el universo inicialmente fue muy semejante al propuesto por EINSTEIN: homogéneo, isotrópico, finito, esférico y estático. Partiendo de un valor para H_0 de ~ 528 km/segMpc, calculó que el radio original del universo fue de 1,088 millones de años luz, y que la densidad fue de 1.05×10^{-27} g/cm³ (aproximadamente un átomo de hidrógeno por cada 1,580 cm³).

Empero, el equilibrio librado entre la atracción gravitatoria y la repulsión cósmica, pronto a perderse al menor transtorno, era muy endeble; y el surgimiento de inhomogeneidades dictadas por la ventura, derivó en la preponderancia de una de las fuerzas cósmicas, que por la ley de Hubble sabemos que es la repulsión.

¿Qué pudo ocurrir antes de que comenzará la expansión? Nada. No puede existir historia en un universo cuyas condiciones primevales mantenían todo en un orden de reposo absoluto. Ni siquiera el tiempo. La sustancia del tiempo mensurable son los eventos físicos. Al no haber sucesión de eventos, simplemente no existe discurrir del tiempo.

EDDINGTON, siguiendo una propuesta original de LEMAÎTRE, sugirió que al formarse pequeñas condensaciones, el colapso generó presión hidrodinámica entre éstas, por lo que el universo aumentó ligeramente de tamaño. Y puesto que

$$F_{rc} = -1/3c^2 \Lambda m r \quad [69],$$

la fuerza de repulsión (F_{rc}) hubo de aumentar con el incremento del tamaño del universo. Ganado que hubo la

repulsión ligeramente a la gravedad, comenzó un proceso expansivo de retroalimentación positiva e irreversible: el aumento de F_{rc} provocó la expansión del universo, y al crecer éste, F_{rc} también lo hizo, lo que a su vez llevó a que el universo volviera a expandirse y así. Según se desprende de los cálculos, para que H_0 llegara al valor de 528 (valor para H_0 que después fue evidenciado como incorrecto), el radio del universo ha tenido que quintuplicarse. [57]

La situación por la cual las inhomogeneidades provocaron que precisamente la repulsión superara a la gravedad, y no viceversa, radicó, según EDDINGTON, en la particularidad de que originalmente el universo estuvo constituido exclusivamente por hidrógeno. Si el material primigenio no hubiese sido hidrógeno, las condensaciones habrían devengado en procesos de aniquilamiento entre protones y electrones, resultando de ello un aumento neto en la cantidad de gravedad del universo, pues como es bien sabido, la «radiación es más efectiva que la materia en ejercer la atracción gravitatoria»^[17]. [57]

A la postre, las inhomogeneidades formaron las galaxias (y dentro de ellas las estrellas y los planetas), las cuales se han separado entre sí con una aceleración constante, tendiendo el estado de cosas asintóticamente hacia el universo de DE SITTER.

Curiosamente, el mismo año en que EDDINGTON dio a

{17} EDDINGTON supuso que en la formación de energía radiante debido al aniquilamiento de la materia, aquélla adquiere momento positivo, el cual debe estar nivelado con la formación de un momento reculante asimilado por la materia. En el caso del aniquilamiento del hidrógeno, no quedarían reminiscencias materiales que adquieran el momento reculante, por lo que el fenómeno de aniquilación se hace inviable.

Sin embargo, el razonamiento anterior es triplemente equívoco. En el aniquilamiento entre partículas elementales, no se requiere de un recipiente material del momento negativo, puesto que el momento puede ser transferido íntegramente de la materia a la radiación. Hasta donde es de mi conocimiento, aunque ciertamente existen procesos de aniquilación de la materia, el fenómeno no toma lugar entre protones y electrones. Las condensaciones de protones, antes que generar procesos de aniquilamiento, bajo condiciones propicias pueden llegar a procesos nucleosintéticos, por lo que es posible, aunque sea parcialmente, su conversión de materia en radiación.

conocer su modelo, DE SITTER y EINSTEIN copublicaron un comunicado en el cual explicaron que de la consideración de la solución de la ecuación de la gravedad obtenida por FRIEDMANN para un universo en expansión, y debido a la significancia del estado dinámico que se deduce de la ley de Hubble, habían llegado a la conclusión de que los modelos cosmológicos por ellos propuestos carecen de bases teóricas y físicas reales que los sustenten. «Históricamente —señalaron EINSTEIN y DE SITTER en 1932—, se introdujo en las ecuaciones de campo el término que contenía la "constante cosmológica Λ ", a fin de que nos permitiera explicar teóricamente la existencia de una densidad media finita en un universo estático. Ahora parece ser que en el caso dinámico puede alcanzarse este fin sin introducir Λ ». [196]

Mas los modelos que para sus creadores fueron intentos equívocos, para EDDINGTON resultaron una revelación científica. Inicialmente, este científico había encontrado la inclusión de Λ como poco convincente; sin embargo, terminó soslayando su escepticismo, puesto que creyó encontrar en la constante cosmológica un elemento fundamental en la búsqueda de pruebas palmarias de lo consustancial entre la teoría de lo muy pequeño (Teoría Cuántica) y la de lo muy grande (TGR).

EDDINGTON hubiera jurado, al igual que muchos otros científicos lo jurarían, sobre la existencia de formas simples que evidencian la subrepticia relación de fenómenos físicos aparentemente tan disímiles como, *verbi gratia*, la masa del electrón y el número de partículas del universo: las magnitudes que se deducen de tales relaciones son conocidas como *números puros*. Un ejemplo de número puro es el que resulta de la fuerza eléctrica y la gravitatoria de un protón y un electrón, que es del orden de 10^{39} [26]. EDDINGTON opinaba que estos mismos números expresan a la vez muchas otras relaciones ocultas. Sustentándose siempre en el valor de h_0 , demostró matemáticamente que la razón del radio del universo (en su época estática) y el radio del protón es precisamente de $\sim 10^{39}$; del mismo orden resultó la raíz cuadrada del número total de partículas que calculó para el universo. También creyó constatar que el radio del electrón es en sí un número puro que es equiparable a la relación del radio del universo con la raíz cuadrada del número de partículas.

En la teoría precedente, el universo como un sistema finito es acogido con un carácter de fundamental. Muchos de los números puros derivados por EDDINGTON se derrumbarían estrepitosamente si el radio o si el número de electrones del universo fueran infinitos. He aquí donde la constante cosmológica hace su aparición crucial. Matemáticamente, Λ está íntimamente conectada con la curvatura del universo que

permite la finitud espacial de éste ^{18}. Para EDDINGTON, Λ fue, en sí, una constante fundamental de la naturaleza.

EDDINGTON fue capaz de descubrir fórmulas precisas que correlacionaran diversos parámetros globales de su universo, como el radio y el número de partículas, con constantes fundamentales de la naturaleza. Obtuvo, siempre justificando escrupulosamente el resultado en forma matemática, para la relación de la masa del protón y la del electrón el valor de 1,834.34 (el valor observado es de 1,834.27). Por senderos similares encontró el valor de la constante de Planck y el de la gravitación universal. Todo ello partiendo simplemente de la proposición del valor de H_0 y de un valor diferente de cero para la constante cosmológica.

Ahora bien, si en el mundo abstracto de EDDINGTON, Λ se significa como la relación de concatenación entre los fenómenos naturales, al ser involucrada con la realidad física, sigue concibiéndose como una fuerza de repulsión cósmica que se opone a la atracción gravitatoria. De la gravedad hay evidencias palpables de su existencia; sin embargo, de la repulsión sólo existe una realidad: fue creada única y exclusivamente para que las ecuaciones de EINSTEIN proporcionaran la descripción de un universo estático, y resulta que todo parece indicar que tal estado es ficticio. Así que pareciera que EDDINGTON debió, por lo menos, de haber restado cualquier valor a Λ como símbolo de repulsión cósmica, antes que haberla embebido en una búsqueda casi dogmática de números puros que encierren la verdad universal.

Lo que sucede es que amén del valor teórico para erigir un marco apropiado para las constantes fundamentales de la naturaleza, EDDINGTON logró con la manipulación de la constante cosmológica resolver problemas de significante importancia. La repulsión cósmica le permitió dar cuenta del significado físico causal de la expansión del universo. Por otro lado, apenas tuvo que sondear en el abismo del principio del universo, ya que el concebir el estado inicial cósmico como un orden estático en absoluto de la materia, le libró de hurgar más hacia el pasado; como pensador positivista de un ingenio muy sutil, EDDINGTON, basado en la constante cosmológica, supo evadir elegantemente el terreno de los barruntos metafísicos.

En la época en que EDDINGTON realizó su teoría cósmica, el valor de H_0 estaba determinado en ~ 528 km/segMpc. Este valor, equivoco debido a la por entonces

{18} En el universo de EINSTEIN y en el de DE SITTER, Λ está definida como $1/R^2$ y como $3/R^2$, respectivamente.

incorrecta escala de la relación período-luminosidad de las variables cefeidas [11], da un tiempo de vida para el universo en estado expansivo (suponiendo que desde un inicio se ha expandido con velocidad constante) no mayor de 1.9 evo⁽¹⁰⁾. Los eventos geológicos y biológicos, sin embargo, requieren de períodos considerablemente mayores. La constante cosmológica permite salvar esta contradicción, ya que al relacionar una aceleración constante de la velocidad de expansión, son derivados intervalos considerablemente mayores para la edad del universo.

Durante más de dos décadas, la obra de EDDINGTON fue motivo de revuelo, de admiración, e incluso de animadversión por parte de los hombres de ciencia. La forma en que fue obtenido el nutrido número de constantes naturales es asombrosamente hermosa, y por su complejidad, muy poco accesible. Sin embargo, el tiempo mostró que al propio EDDINGTON le fueron tan deslumbrantes sus resultados, que finalmente le cegaron. Las constantes naturales fueron, en virtud de su deducción teórica, valores extremadamente comprometidos. La caída de una constante o relación podría significar el desmoronamiento global de la teoría. Y así fue: el factor de derrumbe estuvo anidado nada menos que en la ley de Hubble, pues a la postre se vio que el valor de H_0 estaba mal determinado. Y para colmo y desgracia de la teoría de EDDINGTON, a Λ también le tocó perder toda validez como constante fundamental de la naturaleza, atributo éste que en alguna ocasión llevó a comentar a EDDINGTON que él primero regresaría a la Física newtoniana, antes que abandonar a la constante cosmológica.

Como ha sido indicado, la implicación de expansión de la ley de Hubble obligó a los cosmólogos a resolver modelos evolutivos en los cuales quede incluido un principio para el universo en un estado mucho más denso que el actual. Para muchos científicos, tener que vérselas con un principio resulta algo muy embarazoso; EDDINGTON, quien se contaba entre éstos, mostró una gran sutileza como pensador al ubicar el principio del universo en uno semejante al de EINSTEIN: «un comienzo no tan inestéticamente abrupto». Pero los hubo quienes, como LEMAÎTRE, no repararon en tales sutilezas, y postularon un inicio no «tan casi

{10} El valor se deriva del simple recíproco de la constante de Hubble, y significa que bajo tal velocidad, hace cuánto que las galaxias estuvieron estrechadas. Al recíproco de H_0 se le conoce como el «tiempo de Hubble». Un mil de millones de años equivale a un evo.

imperceptible».

De acuerdo al modelo de LEMAÎTRE [69], el cual también incluye el término cosmológico, el universo entró en la realidad como un gran conglomerado cósmico en el que estaba apretujada toda la materia. LEMAÎTRE visualizó a este estado inicial de la materia como un gran átomo compuesto por un fluido nuclear de baja temperatura —lo suficientemente frío como para que las fuerzas cohesivas intranucleares permitieran la conservación de la gran estructura. Súbitamente, el gran átomo (o huevo cósmico, como también se le llamó), debido a inestabilidades mecánico-nucleares, explotó con una virulencia inimaginable, liberando ingentes cantidades de energía. El huevo se desintegró como si fuera un gran átomo radiactivo: a gran escala, fragmentándose en nubes de gas caliente que a la postre formaron las galaxias; en una escala mucho más discreta, los átomos complejos —radiactivos e inestables— se fisionaron para formar elementos ligeros. La explosión expelió a las partículas a diferentes velocidades, alejándose así unas de las otras. Mientras avanzaba la expansión, la temperatura global del universo fue disminuyendo, hasta que térmicamente fue permitida la formación de inhomogeneidades. A partir de aquí, la historia del universo de LEMAÎTRE es la misma que la del de EDDINGTON: la fuerza de repulsión cósmica actuando para llevar al universo a un estado de mínima densidad energética.

Existen varios puntos de relevancia en este modelo. En primer lugar, es un modelo prehubbleano —fue dado a conocer en 1927— que integra la expansión. En segundo lugar, se hace por vez primera un intento cosmológico de explicar el origen de los elementos químicos (aunque, por supuesto, LEMAÎTRE se equivocó, ya que con el mecanismo de desintegración radiactiva de átomos complejos, sería de esperar que el universo estuviese compuesto principalmente por aquellos elementos pesados en los que, por su estabilidad nuclear (como es el caso del plomo y del bismuto) cesara la desintegración, y no, como en realidad sucede, que esté compuesto casi completamente por hidrógeno (que representa el ~76% del total) y por helio (~24%).

Sin duda, el punto de mayor relevancia del modelo de LEMAÎTRE es de orden histórico. A la pregunta sobre qué ocurrió en la fase previa al huevo cósmico, LEMAÎTRE contestó que nada. Nada puede ocurrir en algo que no existe. Y es que el huevo cósmico fue obra de un ente Creador —así, en términos tan crudos. Históricamente, el modelo de LEMAÎTRE marca el inicio de una nueva fase de integración de la religión a la ciencia. Con NEWTON, los físicos pudieron emanciparse del concepto del primer motor escolástico; pero el deísmo, fenómeno tan subrepticio como inabordable en la etapa prerrelativista, permaneció incólume, sin que la

Física aportara elementos para derrumbarlo —o para reivindicarlo. Pero desde 1927, la situación fue muy distinta. Un religioso y científico, arguyendo y profundizando con los elementos teóricos más revolucionarios de su época, irrumpió en terreno virgen y anunció el inicio de la *Cosmología de la Religión Cósmica*. En la obra de LEMAÎTRE, paradójicamente, ¡la TGR resultó un apuntalamiento de las tesis idealistas!

§18.

LOS MODELOS COSMOLÓGICOS SIN EL TÉRMINO Λ CDM

En 1922, un novel matemático, llamado ALEXANDER FRIEDMANN, dirigióse por medio de una carta a ALBERT EINSTEIN, el científico con mayor renombre de aquel entonces, a propósito de poner a su consideración la solución de las ecuaciones de campo de la TGR, a partir de supuestos de densidad energética media finita y de un valor nulo para la constante cosmológica: la conclusión más reveladora de esa solución, como ya ha sido indicado, fue la predicción de la expansión del universo.

Sin embargo, ni siquiera el propio EINSTEIN fue capaz en un inicio de entrever el profundo significado de la obra de FRIEDMANN. Fue hasta principios de la década de los 1940's, que GAMOV cultivó afanosamente la semilla sembrada por FRIEDMANN, y con tal éxito que pronto los modelos libres del término cosmológico dieron cuenta de los que sí lo consideraban [69]. Aunque, a decir verdad, esto no fue del todo así: el poderoso magnetismo de la teoría construida por EDDINGTON, y la espectacularidad descriptiva del modelo de LEMAÎTRE, no hicieron parecer a estos científicos y a sus respectivos modelos como anacrónicos. Tanto fue así, que en fechas tan avanzadas como la de 1949, las constantes fundamentales de la naturaleza eran fervorosamente defendidas por científicos tan insignes como WHITROW [196]. Por lo que atañe al modelo de LEMAÎTRE, si bien en lo abstracto pronto acusó su innecesaria complejidad por el hecho de incluir el término cosmológico, de su interpretación física sobrevivieron más que reminiscencias, parte de lo cual fue adoptado por los modelos que hasta el momento se mantienen en la palestra cosmológica.

GAMOV [69] erigió su modelo partiendo de tres premisas fundamentales: el Principio Cosmológico, la ley de Hubble y la familia de soluciones de las ecuaciones de campo de la TGR que mejor se ajustara a la velocidad de expansión del universo. Si, como establece la ley de Hubble, las galaxias actualmente se alejan unas de otras, de forma que por la

expansión del espacio el universo tiende asintóticamente a una densidad energética nula, es natural suponer que en el pasado la densidad fue mayor que la que ocurre en la actualidad. GAMOW opinó que tal vez hace algún tiempo finito, la materia trahumante debió estar comprimida en un volumen relativamente pequeño; considerando que la presión degenerativa del neutrón es suficiente para contraponerse a cualquier colapso gravitatorio, propuso que la materia del universo observable —con el telescopio de 200 pulgadas— se halló empaquetada en un gran huevo cósmico de aproximadamente treinta veces el diámetro del Sol, con una densidad de 10^{14} g/cm³. De acuerdo a cálculos derivados a partir de la ley de Hubble, estimó que tal evento aconteció hace aproximadamente 1.7 evos^{20}. Al momento en el que la expansión en curso comenzó, se le ha nombrado el tiempo cero: con la Gran Explosión se activó el reloj que compasa el discurrir de la historia del universo en el que vivimos.

¿De dónde provino el huevo cósmico? GAMOW sugirió la idea de que alguna vez en el universo reinó un gas disperso de bajísima densidad, el cual, por causa de la atracción gravitatoria, se contrajo hasta una densidad máxima, dando origen al huevo cósmico. Una vez que la materia alcanzó el punto crítico de máxima compresibilidad, el universo sufrió una reversión del proceso contractivo: comenzó a expandirse. Esta reversión, que en lo matemático representa un «rebote elástico», físicamente es equiparable a una *Gran Explosión* (*Big Bang*). Así, en contraposición a los modelos cosmológicos que incluyen Λ , en el modelo de GAMOW la expansión del universo es un fenómeno inercial —si acaso decelerado por la gravedad— que fue adquirido en el «estallido inicial», y no un movimiento constantemente acelerado por alguna fuerza de repulsión. Λ , que en lo matemático había comparecido como prescindible, lo fue desde entonces también en lo físico.

A la etapa preexplosiva, por justa analogía, se le ha denominado como la *Era Sanagustineana*, pues en alguna

{20} La incorrespondencia entre la edad del universo que proporcionaba la teoría de GAMOW, con la mínima estipulada por otras ramas del saber (como, por ejemplo, la geología, la Astrofísica o la Biología) fue inicialmente el principal agravante del modelo. Sin embargo, la determinación de la constante de Hubble ha sido corregida en un factor de diez, ubicándose entre los 50 y los 100 Km/segMpc, de lo que se deriva una edad de 15 a 20 evos, quedando así subsanada la contradicción de que la Tierra o el Sol resultarían más antiguas que el universo. (11)

ocasión al Santo de Hipona se le preguntó acerca de qué hizo Dios y qué pudo haber ocurrido en una época que para el hombre es inescrutable: la previa a la Creación^{21}; similarmente, de la etapa que antecede a la del huevo cósmico nada se puede saber. Cualquier vestigio de esa época quedó consumido en la temperatura abrazadora y en la presión devastadora que fueron alcanzadas en el huevo cósmico. Nada, absolutamente, pudo haber sobrevivido.

GAMOW llegó a relaciones muy simples con las cuales seguir el comportamiento térmico y de densidad global del universo a lo largo del tiempo:

$$T = \text{constante} / \sqrt{t}$$

$$\rho = \text{constante} / \sqrt{t^3}$$

Teniendo esta potente y fundamental herramienta, construyó toda una historia del universo mediante el acoplamiento del comportamiento de la materia y de la radiación en tales o cuales condiciones de temperatura y densidad, con la sucesión de estos últimos parámetros a lo largo del tiempo. Metodológicamente, este tipo de construcciones son, hasta el momento, la piedra angular de la gran mayoría de modelos cosmológicos.

De acuerdo con GAMOW, en el tiempo $t = 0$ el huevo cósmico o «Ylem» (voz griega que significa «la sustancia primigenia de la cual los elementos fueron formados») estuvo constituido por un gas calentísimo de neutrones. En esa época, en la que la temperatura era superior a los 15,000 millones de °K, la densidad media de la radiación fue superior a la de la materia por un factor de —aproximadamente— 1,000 [200]^{22}. Los neutrones, durante

{21} —Estaba Dios preparando el diablo y el infierno para aquéllos que hicieran tales preguntas —fue, muy probablemente, la respuesta de SAN AGUSTÍN.

{22} La teoría de BOLTZMAN establece que la masa de los fotones por unidad de volumen está determinada por la relación $W_\gamma = 8.5 \times 10^{-36} T^4$. Actualmente, la temperatura media de los fotones es de 100 grados absolutos, por lo que la densidad radiativa constituye apenas el 1% de la densidad energética total del universo.

Ahora bien, se sabe que la densidad de la materia disminuye por un factor cúbico ante el aumento del volumen, en tanto que la de la radiación sufre un decremento mayor,

una primavera calurosa, nadaron en un mar de fotones.

Una vez establecida la expansión, en el universo se gestaron tempranamente procesos de diferenciación de la materia. Se sabe que los neutrones poseen una vida media breve (~ 3 minutos), tiempo en el cual cada neutrón (n^0) decae en: un protón (p^+), un electrón (e^-) y un antineutrino ($\bar{\nu}_e$). Seguramente este fenómeno debió estar presente en el Ylem. Pero como la temperatura ambiental fue superior a los 15,000 millones de $^{\circ}K$, los protones recién formados interaccionaron rápidamente con los electrones para rendir nuevamente neutrones. Así que en los primeros instantes de vida del universo, un equilibrio dinámico permitió la coexistencia de las partículas fundamentales de la materia. Por lo que atañe a los fotones, siendo tan energéticos, no permitieron durante esa fase la formación de condensaciones locales entre protones, neutrones y electrones. No existía por entonces ningún tipo de especie atómica compleja. Mas el enfriamiento debido a la expansión conllevó a dos sucesos fundamentales: por un lado, al descender la temperatura del valor crítico para la formación de neutrones, el proceso regenerativo de éstos cesó, por lo que el universo empezó a enriquecerse de protones y de electrones; por otro, los fotones ya no fueron lo suficientemente energéticos como para evitar que se establecieran procesos gregarios de la materia. De esta suerte, los protones comenzaron a fusionarse con los neutrones aún existentes para dar origen a los prototipos de los átomos actuales: un protón captó un neutrón para originar deuterio; el deuterio pudo encontrar otro neutrón, resultando del choque un núcleo de tritio. Ahora bien, los núcleos con proporciones en defecto de protones con respecto a la cantidad que poseen de neutrones son generalmente muy inestables, por lo que son altamente susceptibles de sufrir procesos de β -transformación (esto es, los neutrones en exceso emiten un electrón para transformarse en protones [8]). Así que el tritio emitió un electrón para transmutarse en tralfio (3He). Al tralfio se le anexionó otro protón, constituyéndose el helio 4. Y así, hacia arriba, escalando niveles de mayor complejidad hasta formar el total de los elementos de la tabla periódica, mediante el proceso de captación progresiva de neutrones, el que de cuando en vez fue momentáneamente interrumpido por los procesos de β -transformación.

Pasado que hubo una hora de que se produjera la Gran

en razón de un exponente de cuarto orden. De aquí es explicable la causa por la cual en eras tempranas del universo, la densidad de los fotones dominará numéricamente a la de la materia.

Explosión, los procesos de «cocinamiento cósmico» de los elementos químicos cesaron en su totalidad. La temperatura ya no fue favorable para que se pudieran realizar reacciones de nucleosíntesis; además, muchos de los neutrones originalmente libres, o estaban capturados en los protonúcleos o habían decaído radiactivamente.

Siendo que apenas una hora después de la Gran Explosión quedó establecida la proporción de elementos químicos, se sigue que «la tabla de abundancias relativas de las especies atómicas puede ser considerada como el documento más antiguo perteneciente a la historia de nuestro universo» [69]. Por consiguiente, el modelo de la Gran Explosión debe, so pena de pasar a engrosar el obituario de las hipótesis cosmológicas, rendir valores teóricos altamente satisfactorios al respecto de la composición química del universo. Los cálculos de GAMOW indicaron proporciones sumamente semejantes a las reales para el caso de los elementos ligeros (hidrógeno y helio, y sus isótopos deuterio, tritio y tralfio). En cambio, para los elementos de núcleos más complejos, la realidad superó a la hipótesis por el orden de miles de millones.

Las ecuaciones matemáticas de fusión utilizadas por GAMOW se desprenden de la forma general:

$$N_A = v N_0 (\sigma_{A-1} N_{A-1} - \sigma_A N_A)$$

en donde N_0 es el número de neutrones, N_A y N_{A-1} el número de núcleos de peso A y $A-1$, respectivamente, v es la velocidad de los neutrones (valor del cual depende en parte la cantidad de colisiones) y σ_{A-1} y σ_A los coeficientes probabilísticos de A y de $A-1$ de capturar un neutrón.

GAMOW consideró como iguales a los σ de las diferentes especies químicas, de lo cual obtuvo un descenso exponencial en la tabla de abundancias relativas. Pero, como él mismo hizo notar, si en lugar de ser iguales, es presupuesto que las probabilidades de captación de neutrones aumentan a la par del incremento del peso atómico, sería obtenida una curva suavizada muy semejante a la que presenta la naturaleza. Sin embargo, a priori no hay razón alguna por la cual las σ tengan que ser diferentes, y de serlo, sería más factible que varíen en orden decreciente, ya que el aumento de peso disminuye exponencialmente la velocidad del núcleo, y, por ende, la probabilidad de colisión. Como sea, el verdadero problema radica en que la tasa de expansión en los primeros instantes del universo fue muy rápida, por lo que nunca pudo propiciarse la oportunidad térmica y de densidad para la síntesis de elementos transhelianos.

GAMOW buscó en otros mecanismos nucleosintéticos la forma de sacar del atolladero a su modelo, pero nunca asertó el modo adecuado. Él tuvo conocimiento, no obstante, de un

mecanismo que le habría facilitado el camino, pero que rechazó por razones de complejidad innecesaria para su modelo, aunque el verdadero motivo de la negativa bien pudo haber radicado en que tal mecanismo tenía que ser extraído de la hipótesis del Estado Estacionario (*Steady State*) del universo [26,100], la cual, por aquella época, era la acérrima rival de la hipótesis de la Gran Explosión. El susodicho mecanismo consiste en explicar el origen de los elementos pesados a partir de los procesos de fusión que se escenifican en el corazón de las estrellas (ver Capítulo 2).

La mayoría de cosmólogos que se encargaron de dar continuidad a la postura de la Gran Explosión, por el contrario, prefirieron adoptar una posición ecléctica (como fue la usanza de CICERÓN) e incorporaron en sus cálculos la actividad nucleosintética de los cuerpos celestes. La concatenación así consumada, rindió resultados asombrosamente favorables: la hipótesis de la Gran Explosión estuvo en condiciones de explicar sustancialmente la tabla de abundancias relativas de los elementos químicos. En opinión de muchos cosmólogos, la «primer prueba de fuego» que arrojó tal hipótesis, la libró con «la cabeza en alto» [181].

A partir del modelo de GAMOW, ha sido desarrollado lo que se conoce como la línea ortodoxa de la Gran Explosión. La sustancia original del modelo de GAMOW ha quedado conservada. Los cambios que éste ha sufrido, son más bien de accidente, y se deben a la contemporización de los cosmólogos relativistas al respecto del avance de la Astronomía observacional, de la Astrofísica, de la Teoría Cuántica y, recientemente, de la Teoría de la Gran Unificación.

De hecho, muchos de los conceptos de GAMOW son para la actualidad bastante anticuados. Por ejemplo, teorías muy recientes, emanadas del estudio de las fases últimas de la evolución estelar, revelan —al menos así lo entienden muchos científicos— que la densidad primerísima del huevo cósmico tuvo que ser infinita, puesto que la presión degenerativa de los neutrones —o la acción de cualquier otro fenómeno físico— no puede de ninguna manera contrarrestar el empuje gravitatorio de una masa tan colosal [90]. Y qué decir sobre lo que GAMOW entendía por partículas elementales. Ahora existe la sospecha de que las partículas fundamentales son 6 quarks (*up, charm, strange, down, top* y *bottom*) y 6 leptones (electrón, muón, partícula τ y tres neutrinos asociados). Ha sido evidenciado que, en realidad, los protones y neutrones están conformados por combinaciones precisas de quarks [72,153].

Así que antes de pasar a ponderar con detalle las ventajas y los agravantes que de la hipótesis de la Gran Explosión se desprenden, resulta conveniente bosquejar su

actual cariz.

§19.

EL MODELO DE LA GRAN EXPLOSIÓN: DESCRIPCIÓN ^{23}

Era Cuántica: $0 \leq t < 10^{-43}$ seg. En el tiempo $t = 0$ fue la Gran Explosión. La expansión hubo de iniciar su infrangible marcha. El alba cósmica despertó en condiciones de densidad energética y de temperatura infinitas. El escenario cósmico detentaba otra propiedad singular: era sólo un punto: el volumen del universo fue nulo. No existía materia, ni la radiación como la conocemos. Sólo energía. Todo era un ambiente energético de absoluta simetría e indiferenciación.

Las cuatro fuerzas fundamentales estaban fusionadas formando una sola: la fuerza electronucleargravitatoria.

Antes de llegar a la siguiente era, la fuerza electronucleargravitatoria se escindió: hubo gravedad y fuerza electronuclear independientes. El fenómeno fue de tal virulencia exoérgica, que los fotones liberados, al chocar entre sí, constituyeron el arquetipo de todas las partículas. Así surgió el gel primitivo, todo él indiferenciado. No existía rasgo alguno del cual distinguir a los leptones de los quarks; no era posible discernir entre las partículas portadoras de fuerza y las que no la portan.

Era Hadrónica: 10^{-43} seg $< t \leq 10^{-4}$ seg. Período caracterizado por las interacciones fuertes. Después de un tiempo infinitesimalmente pequeño (10^{-43} seg), debido a los procesos de expansión y enfriamiento seguidos a la Explosión, las condiciones físicas del universo dejaron de ser singulares, siendo ya para entonces la densidad igual a 10^{92} g/cm³ y la temperatura de 10^{32} °K (magnitudes enormes: cierto, pero finitas).

Los quarks derivaban libres: las burbujas hadrónicas, que en la actualidad confinan a los quarks en una zona de libre movimiento infinitesimalmente pequeña, se hallaban sobrepuestas y fusionadas. La zona de libertad asintótica era todo el universo. En tales condiciones, fue factible la violación del principio de conservación del número bariónico.

{23} La siguiente cronología cósmica está forjada con base en las descripciones y concepciones otorgadas por diversos autores, de entre los que se distinguen los correspondientes a las referencias (17,28,49,72,124,153,156,164,165,181,190).

Los bosones X, partículas virtuales que portaban las cargas de la fuerza electronuclear, permitían el libre juego de interconversión entre leptones y quarks: las teorías de aforo actuales eran por ese entonces violadas en aras de una simetría de mayor integración.

Los bosones X ostentaban, a más de la carga que permitía la violación del número bariónico, una propiedad que a la postre resultó en que en el universo se observe la profunda asimetría entre la cantidad de materia y la de antimateria: la propiedad de poder violar el principio de invariancia CP^[24]. Por ser altamente inestables, los bosones X pronto se desintegraban, dando lugar a pares de antiquarks; los antibosones \bar{X} hacían lo propio para rendir pares de quarks. Debido a la elevada densidad imperante y a la gran velocidad de las partículas, la colisión entre quarks y antiquarks fue muy frecuente, produciéndose aniquilamientos mutuos que rendían fotones tan energéticos, que se transformaban espontáneamente en bosones y antibosones. Pero resulta que la velocidad de desintegración de los bosones X fue más tarda que la de los antibosones \bar{X} . Así que una vez que la temperatura descendió de un valor crítico para la formación de bosones, la cantidad de quarks fue ligeramente superior a la de antiquarks; en virtud de la violación del número bariónico, el mismo fenómeno de asimetría fue hizo extensivo para los leptones.

A los 10^{-35} seg, cuando la temperatura descendió del valor umbral de 10^{26} °K, la fuerza electronuclear se escindió para originar la fuerza nuclear fuerte y la electrodébil. Varios eventos significó tan crucial fraccionamiento. En esta nueva asimetrización del universo, los bosones portadores de la carga electronuclear se diferenciaron en gluones (que portan la carga fuerte (también llamada de color)) y en bosones Higgs (portadores de la fuerza electrodébil). De allí que en lo porvenir, quedara vetada la posibilidad de violar la conservación del número bariónico.

Por otra parte, la fragmentación de la fuerza electronuclear fue causa de una ingente liberación de energía, lo que suscitó que entre los 10^{-35} y los 10^{-32} seg la tasa de expansión aumentara bruscamente: el universo se «infló». En ese período, la distancia media entre las partículas creció en un factor exponencial de decenas de

[24] El principio de invarianza CP asegura que las leyes físicas son invariantes entre las partículas y sus correspondientes antipartículas. Así, por ejemplo, la velocidad de decaimiento de cualquier partícula radiactiva debe ser idéntica a la de su antipartícula.

unidad (en 10 evos, el universo sólo ha crecido en un factor de 10^4).

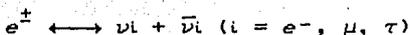
A los 10^{-12} seg ($T = 10^{16}$ K) quedaron finalmente separadas las cuatro fuerzas fundamentales. Los bosones Higgs dieron origen, por una parte, a los bosones responsables de la interacción débil (W 's y Z^0) y, por otra, devinieron en las partículas responsables de la interacción electrostática (fotones). Desde ese momento, y hasta los 10^{-6} seg, el universo fue un caldo supercaliente de quarks, leptones y fotones. En tanto, la interacción entre la materia, la antimateria y la radiación, proseguía.

El enfriamiento del universo arrojó a la materia a la fase de confinamiento de los quarks. Los quarks, siempre en escrupulosa observancia del principio de producción de colores neutros, interactuaron según su especie para formar hadrones (bariones (neutrones y protones), mesones π , etc.). Paulatinamente, el plasma de quarks se fue poblando de hadrones, hasta un punto de coexistencia equimolar. Un descenso ligero de la temperatura bastó para que a partir de este estado, se produjera una nucleación hadrónica tumultuosa. Pero como la transición fue muy exoérgica, en el caldo primitivo se produjeron inhomogeneidades de densidad: zonas de alta densidad hadrónica (burbujas) que se aislaron parcialmente de otras zonas de mucho menor densidad. En un principio, el cociente n^0/ρ^+ fue idéntico entre ambas zonas. Pero como los neutrones, debido a su mayor capacidad de difusión a través de la materia cósmica, migraron paulatinamente de las zonas de alta densidad a las de baja densidad, se produjeron variaciones locales del cociente n^0/ρ^+ .

La era hadrónica vio su fin cuando el ambiente descendió de la temperatura requerida para formar al mesón μ ($T = 10^{12}$ K), el hadrón más ligero. Ello devino en el bloqueo del equilibrio dinámico de los hadrones con sus antipartículas, por lo que dio inicio una fase de aniquilación masiva. Jamás hubo época más devastadora: por cada gramo de materia que perduró, fueron aniquilados alrededor de mil millones de toneladas de materia y antimateria. La Gran Destrucción dejó como saldo un barión por cada un mil de millones de fotones; en esta cantidad remanente fue en lo que cristalizó a final de cuentas, la diferencia de velocidad de decaimiento de los bosones X.

Era Leptónica: 10^{-4} seg $< t \leq 1$ seg. La cantidad inicial de leptones y de sus antipartículas sobrevivieron sin mayores perturbaciones al enfriamiento que dio pauta para la aniquilación de la inmensa mayoría de hadrones. Aunque no sería por mucho tiempo que la familia leptónica permaneciera del todo incólume. Poco después de acaecido el fin de la era hadrónica, la temperatura fue tan baja, que la

reacción

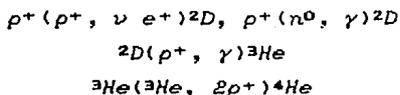


ya no más estuvo favorecida por las condiciones ambientales, por lo que desde entonces los neutrinos se desacoplaron de la materia para proseguir un derrotero expansivo independiente, sin apenas que ver con el resto de la trama cósmica.

Durante toda la era leptónica reinó el equilibrio dinámico de creación-aniquilamiento entre electrones, muones y partículas τ , con sus respectivas antipartículas. Por otra parte, las interacciones gregarias entre bariones habían comenzado (principalmente para rendir deuterio); sin embargo, los fotones eran aún lo suficientemente energéticos como para disociar cualquier estructura nuclear compleja. El dominio leptónico encontró su fin una vez que la temperatura fue menor a los 5.930×10^9 °K.

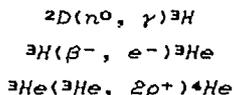
Era Radiativa: 4 seg $< t \leq 100,000$ años. Debido a la altísima temperatura reinante, durante toda la Era Radiativa los protones, neutrones y electrones interaccionaron fuertemente con los fotones, de tal suerte que este acoplamiento entre materia y radiación hizo del universo una estructura, si bien brillante, a la vez muy opaca.

A los tres minutos de iniciada la expansión, la temperatura rayó los 1,000 millones de °K; los fotones sosegaron entonces su interacción con la materia, y se hizo posible la presentación del trascendental período del «cocinamiento cósmico»: en el decurso de la gran trama nucleosintética, todo protón que colisionó con una partícula de su propia especie, originó un núcleo de deuterio y, como productos secundarios, un neutrino y un positrón. El encuentro entre un protón y un neutrón también derivó en la nucleosíntesis de deuterio, aunque teniendo simplemente como producto secundario energía radiante. El novel deuterio pronto estuvo en contacto con algún protón para formar tralfio, junto con rayos γ . Eventualmente, dos núcleos de tralfio se fusionaron, teniendo como desenlace final dos protones más el primer núcleo de helio:



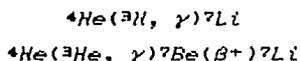
Rutas paralelas de fusión nuclear llevaron también al surgimiento del helio primordial: el deuterio captó un neutrón, creándose en el acto tritio. Como el tritio es muy inestable, sufrió del proceso de β -transformación, emitiendo

un electrón para transformarse en un núcleo mucho más estable: el tralfio, que finalmente rendiría helio al fusionarse con otro núcleo de tralfio:



Ocurrió que núcleos de helio colisionaron con neutrones. El resultado (5He), empero, fue una especie nuclear tan inestable, que se desintegró en una milésima de trillonésima de segundo (10^{-21}) para constituir nuevamente helio-4 y un neutrón independientes. Aunque con baja frecuencia, se verificó la anexión de un par de núcleos de helio, generándose por esa causa un núcleo de berilio-8. Mas este núcleo no es menos inestable que el helio-5, y con una celeridad igual de extrema, decayó radioactivamente en forma de un par de partículas α .

A punto que estuvo de terminar la era del «cocinamiento cósmico», se generó una ínfima cantidad de litio-7 como producto de dos interacciones principales: la colisión de helio con tritio y/o la fusión de helio con tralfio, proceso este último que produjo un núcleo de berilio-7 que pudo ser lo suficientemente estable como para no decaer antes de que lograra asir algún electrón del caldo cósmico.



Apenas quince minutos habían transcurrido desde que se verificó la Gran Explosión, cuando la primera escena nucleosintética finalizó. Las barreras coulombicas fueron para entonces insorteables. Ya no existían neutrones libres. La mayoría de ellos habían decaído en protones, electrones y antineutrinos, mientras que algunos quedaron fijados dentro de la estructura de núcleos complejos. Sólo doce minutos duró el «cocinamiento cósmico»; fue un proceso fugaz, pero muy productivo. El saldo constitutivo del universo quedó en cerca de 76% de hidrógeno, alrededor de 24% de helio y cantidades traza de deuterio, tritio y litio.

Después de la intensa actividad nucleosintética, al universo lo envolvió un período de tarda monotonía. En un ambiente tan brillante como opaco, la materia y la radiación se sometieron al infrangible desarrollo de la expansión. La materia, toda ella ionizada, permaneció sustancialmente sin modificación alguna hasta que el universo cumplió sus primeros 100,000 años.

Era del Desacoplamiento: $t \sim 100,000$ años. El universo, en su lento enfriamiento, tocó la temperatura crítica de los $3,000^{\circ}\text{K}$. La interferencia entre la materia y los fotones primordiales desapareció. Por vez primera, núcleos y electrones interaccionaron para formar átomos neutros. Por su parte, la energía radiativa se desvinculó para proseguir un derrotero independiente al de la materia.

Por el desacoplamiento, el universo ganó en diafanidad; empero, en él acaeció el reino de la oscuridad. Había quedado atrás la Era Radiativa.

Era Estelar: $100,000$ años $\approx t \approx 15$ a 20 evos. La expansión proseguía; el enfriamiento proseguía. Cuando el universo cumplió 100 millones de años; cuando la temperatura fue de 15°K , dos avatares físicos de la materia, la desaparición de la repulsión electrostática y el decremento de la velocidad de las partículas, y uno de la energía radiativa, el debilitamiento de la acción disolvedora de los fotones, se confabularon en favor del surgimiento de las primeras condensaciones gravitatorias. A gran escala, las primicias de las inhomogeneidades las constituyeron las protogalaxias; en una escala mucho más íntima, germinaron en cuerpos estelares, en cuyos núcleos se creó el marco físico apropiado (altas densidades y temperaturas superiores a los $1,000$ millones de $^{\circ}\text{K}$) para proseguir la transmutación de las especies químicas.

Por su parte, los fotones que derivaron libres desde la época del desacoplamiento, sufrieron, y siguen sufriendo, corrimiento hacia el rojo debido a la expansión del universo. Los que fueran en un pasado muy remoto corpúsculos radiativos calentísimos, subsisten en la época actual con una temperatura de 2.7°K : el eco espectral de la Gran Explosión nos llega como una radiación isotrópica de fondo sumamente fría.

§1.10.

EL MODELO DE LA GRAN EXPLOSIÓN: ANÁLISIS

¿Qué tan satisfechos podemos sentirnos a propósito del panorama histórico-cosmológico que nos brinda el modelo de la Gran Explosión? ¿Podemos creernos poseedores de un modelo cosmológico depurado y libre de contradicciones y de ambigüedades? Evidentemente, resulta más que difícil el que esto último pueda ser el caso; la negación es casi intuitiva. Pero entonces, si en realidad el modelo sufre de puntos oscuros, ¿son éstos simples limitaciones técnicas o de depuración, o se trata de cortapisas teóricas infranqueables?

Estas preguntas son en la actualidad pábulo de enconados debates entre los cosmólogos. Por un lado, están los panegiristas de la Gran Explosión, quienes consideran a esta hipótesis como «el paradigma de la cosmología moderna» [18]. Pero los hay quienes, cual «heréticos cosmólogos», encuentran al modelo insostenible, estimándolo como no más que un mito equiparable a las génesis que conforman la Religión Cósmica. La balanza entre estas posiciones está lejos de inclinarse a favor de alguna de ellas. Queda pues, habida cuenta de todo, el intento de determinar la posición exacta del fulcro de la cosa cosmológica a partir de la ponderación analítica de las premisas y consecuencias involucradas en la hipótesis de la Gran Explosión. Así que, en respuesta a esta demanda, desarticulemos el modelo, y sometámoslo al análisis con microscopio.

1. **EL PRINCIPIO COSMOLÓGICO.** Los supuestos de isotropía y homogeneidad tienen un significado filosófico crucial: por extrapolación, representan la culminación del Principio Copernicano [68]. COPERNICO desbalagó la concepción científica que colocaba a la Tierra como centro del universo; SHAPLEY desenmascaró el trampantojo del sistema heliocéntrico, al demostrar que nuestro sistema está ubicado en una zona espacial alejada del núcleo galáctico, en un lugar de poca relevancia dentro de la Galaxia [11]; el Principio Cosmológico presupone que la posición de la Vía Láctea no es privilegiada (precisemos: establece que en ninguna parte del universo existe posición privilegiada). Ciertamente que el Principio Cosmológico no cuenta con pruebas inobjetables a su favor como las que en su momento fueron esgrimidas para el establecimiento del Sistema Heliocéntrico y para el del universo Excéntrico. No obstante, debe ser considerado que el tamaño de nuestra galaxia es ínfimo ante el tamaño del universo que podemos observar; así que cualquier intento de dar una razón sobre por qué un objeto «dimensionalmente insignificante» ocupa precisamente el centro del universo, sería un asunto bastante escabroso.

Sin duda, una estructura homogénea e isotrópica es estética y epistemológicamente muy atractiva. En principio, por ser de mayor facilidad de manipulación dentro de los modelos matemáticos. Mas quizá lo más relevante sea que el Principio Cosmológico permite que un cuerpo de significancia dimensional menor, sea por caso la Tierra, pueda tomarse como un punto espacial perfectamente válido para estudiar y deducir las leyes y las propiedades generales que gobiernan al cosmos. Rechazar lo que por definición es el Principio Cosmológico, y, por el contrario, presuponer que allende, en las regiones del universo que para nosotros permanecen inescrutables por el velo de la distancia, las propiedades y la estructura de la materia no son semejantes a lo que

estamos habituados, implica de entrada que será toda una futilidad cualquier esfuerzo por construir un modelo cosmológico. Este punto es aún más punzante si consideramos que dentro del panorama explicativo de la expansión del universo, estamos condenados por siempre a observar no más que una zona restringida del universo. (La interdicción se erige no tanto por limitaciones técnicas, sino de índole teórica [196]: en efecto, el que las galaxias se alejen con mayor velocidad conforme el aumento de la distancia, implica que existe una zona específica en la cual la velocidad de recesión entre dos galaxias igualará la de la luz, por lo que, para todo efecto, éstas estarán inconexas causalmente por ser jamás posible que información de la una llegue a la otra).

¿Qué objeciones prefiguran en la adopción del Principio Cosmológico? Veamos.

En primera, como hemos indicado, los supuestos de isotropía y homogeneidad son premisas simplificadoras de la estructura del universo que hacen factible el manejo de las ecuaciones de campo de la Relatividad. En este sentido, el Principio Cosmológico es un ardid matemático necesario, y, hasta el momento, insoslayable.

En segunda, aunque, *strictu sensu*, el Principio Cosmológico está formulado en términos de su aplicación a la estructura geométrica universal, existe una necesidad ineludible de, por lo menos, hacer extensivo el postulado de isotropía al vector temporal⁽²⁵⁾, en el sentido de que las leyes y las constantes fundamentales que a su gobierno tienen a la naturaleza, han sido, son y serán las mismas. ¿Qué decir de la importancia de esta invarianza a lo largo del tiempo para la construcción de modelos cosmológicos! Sin embargo, como ya ha sido indicado, las extrapolaciones involucran períodos de tiempo tan grandes, que no existe forma de, a escala terrestre, comprobar la validez de la invarianza de las leyes naturales. Y aunque parezca asombroso, existen argumentos e hipótesis, cuya esencia no creo que haya podido ser aún contravenida, que sostienen que las leyes naturales podrían variar. El miembro más famoso de tales concepciones es la hipótesis de DIRAC [68], en la que es sostenido que para la observancia de la conservación de ciertos números puros, es requerido que G , la constante de la gravitación universal, decrezca con el tiempo.

{25} La generalización no sólo de la isotropía, sino también del factor de homogeneidad al vector temporal, constituye lo que a principios de la década de 1950 BONDI formuló como el Principio Cosmológico Perfecto, fundamento del modelo del Estado Estacionario del Universo [26,100].

En tercera, está lo de la homogeneidad. Las cartas celestes muestran que la materia no se distribuye homogéneamente [42,124]. Esto es un signo observacional inequívoco. En realidad, la estimación de que a nivel de supercúmulos de galaxias se visualiza un comportamiento homogéneo en cuanto a la distribución, es una conclusión muy cargada de subjetivismo. Y para desventura de los que sostienen tal supuesto, FISCHER y TULLY [79], tras un largo y consciencioso estudio, han presentado pruebas que sugieren acusadamente la existencia de un cúmulo de tercer orden (en el cual está comprendido el Supercúmulo Local). Por la vastedad de su tamaño, la confirmación de la existencia de una sola de estas estructuras haría añicos la aplicación ortodoxa del Principio Cosmológico. Y aún más: como no existe indicio alguno de que el universo sea finito, no está vedada la posibilidad, como apuntó CHARLIER [11] hace más de medio siglo, de que la distribución de la materia se avenga a un escalafón infinito, de manera que para cualquier asociación exista siempre una de mayor grado. A la luz de estas consideraciones, el supuesto de homogeneidad atraviesa por una fuerte crisis de credibilidad.

En cuarta, existe un severo problema con respecto al tamaño mínimo de las partículas que componen el fluido cósmico en el cual sería aplicable el Principio Cosmológico. Por el momento, se cree que es correcto el considerar a los supercúmulos como estructuras básicas de distribución de la materia. Mas esto presupone que los resultados obtenidos en la teoría sólo son aplicables, en sentido estricto, a las asociaciones semejantes o mayores que la de un supercúmulo galáctico. Esta peligrosa suavización de la estructura cósmica soslaya del cuadro explicativo del modelo de la Gran Explosión, al origen y al desarrollo de los cúmulos galácticos, de las galaxias, de las estrellas, de los planetas, de

Finalmente, cabe señalar que a los cuasares, objetos cuya naturaleza sigue siendo un perfecto misterio, pero que, al parecer por lo que se les imputa, poseen propiedades extraordinarias [75], se les observa concentrados en el Hemisferio Sur Galáctico y en una pequeña región próxima al Polo Norte Galáctico. Siendo que estos objetos son de características únicas, resulta insostenible la parte del Principio Cosmológico que estipula que las propiedades físicas del universo son las mismas por doquier. La observación reclama un adjetivo de anisotrópico para el universo. Por otro lado, de acuerdo al *teorema de Schur*, que declara que «la isotropía de cada punto de un espacio tridimensional implica su homogeneidad» [160], la anisotropía de la distribución de los cuasares significa a la vez un cuestionamiento empírico para el principio de homogeneidad.

Aseverar, entonces, que el universo es homogéneo e isotrópico, significa entrar en franca discordancia con la observación. No obstante, en virtud de la coherencia que como un todo representa el modelo de la Gran Explosión, este adversativo puede ser no tan significativo.

2. LA TABLA DE ABUNDANCIAS RELATIVAS DE LAS ESPECIES QUÍMICAS. Si dentro de la línea ortodoxa del modelo de la Gran Explosión se hubiese dado continuidad a la posición inicial por parte de GAMOW de no recurrir a la nucleosíntesis estelar como un fenómeno complementario para poder explicar la tabla de abundancias relativas de los elementos químicos, el modelo seguramente no hubiera despertado tanto interés como el que goza actualmente entre los científicos. Los valores teóricos derivados del modelo cosmológico que nos ocupa, en conjunto con los de la Teoría de la Evolución Estelar, hacen de las proporciones de las especies químicas una de las pruebas más sólidas y espectaculares que se cuentan a favor de la Gran Explosión.

Como ya ha sido indicado, la teoría predice que el saldo final que aportó el primer período del «cocinamiento cósmico» fue de alrededor de 76% de hidrógeno y de 24% de helio. En el cuadro 1.1 puede ser apreciado que la abundancia de helio de una galaxia a otra es asombrosamente constante. Esto, evidentemente, revela un origen común para

CUADRO 1.1. Abundancias relativas de helio-4 en 6 galaxias, según SABBATA y GASPERINI [160].

GALAXIA	ABUNDANCIA DE ^4He
Vía Láctea	0.29
NGC 6822	0.27
NGC 4449	0.28
NGC 5461	0.28
NGC 5771	0.28
NGC 7679	0.29

el helio; las pequeñas variaciones bien pueden ser explicadas mediante procesos propios de la actividad galáctica (ver capítulo siguiente). La concordancia, por lo

menos cualitativa, entre el modelo de la Gran Explosión y la observación es excelente. Realmente, resulta de alta significancia el que, hasta el momento, ninguna teoría o hipótesis, fuera de la de la Gran Explosión, haya podido proporcionar un proceso alternativo que dé cuenta de la sobreabundancia de helio que no es explicable a través de la Teoría de la Evolución Estelar.

En teoría, de entre las especies atómicas que son de esperar que fueran sintetizadas durante el período del «cocinamiento cósmico» (i.e., 2D , 3H , 3He , 4He y 7Li), las más idóneas para contrastar las predicciones teóricas del modelo de la Gran Explosión con las abundancias determinadas observacionalmente son el deuterio y el tritio. Debido a que son átomos de estructura muy endeble, es natural suponer que su concentración variara muy fácilmente ante ligeras variaciones en las condiciones primitivas del universo. Así, por ejemplo, la producción final de deuterio y de tritio puede ser un indicador preciso del número bariónico. La razón es la siguiente: el suponer una densidad bariónica alta durante el período del «cocinamiento», conlleva a la suposición de que la expansión inicial fue muy rápida. En este caso, el período nucleosintético habría sido corto, por lo que habría habido escaso tiempo efectivo para la decadencia de neutrones. En un caldo muy rico de neutrones, el equilibrio de las reacciones nucleosintéticas quedaría ampliamente favorecido hacia la mayor producción de helio, puesto que el deuterio y el tritio, por su alta inestabilidad nuclear, se comportarían como átomos ávidos de neutrones que les permitieran alcanzar niveles más cercanos a los «números atómicos mágicos» [8,144].

Una ventaja más que se posee con el deuterio y el tritio, es que de acuerdo con la Teoría de la Evolución Estelar, las concentraciones primordiales de estos elementos serían afectadas por no tantos factores como los que están involucrados, por ejemplo, con la abundancia de helio. En particular, sería menester el exclusivamente calcular la destrucción de deuterio y tritio debido a la actividad galáctica [23].

Infelizmente, los rendimientos de deuterio y de tritio que serían esperados del período nucleosintético cósmico son tan parcos, que la incertidumbre en cuanto a su determinación observacional sobrepasa en varios órdenes a la incertidumbre de predicción teórica [23].

El siguiente elemento en cuanto a la sensibilidad de su producción pregaláctica con respecto a las condiciones primitivas es el litio. Sin embargo, amén de compartir los mismos problemas que para el caso del deuterio y del tritio se presentan, en las estimaciones necesarias para determinar su concentración primordial es requerido tomar en cuenta su producción por estrellas y por rayos cósmicos en el medio

interestelar.

Por su parte, el tritio es la especie menos indicada para la cotejación entre teoría y observación; se trata de un elemento tan inestable, que verdaderamente es todo un acontecimiento detectarlo en el medio interestelar.

El elemento restante es el helio-4. Existen dos poderosas razones por las que, de acuerdo al modelo de la Gran Explosión, es el helio, por mucho, el segundo elemento en abundancia. En primer lugar, el progresivo enfriamiento del universo fue responsable de que no se tuvieran las condiciones adecuadas para que las especies atómicas superaran las barreras coulombicas, y se logrará la síntesis de elementos trashelianos. En segundo lugar, el helio es un elemento de «número atómico mágico» (i.e., de gran estabilidad nuclear)^[26]. Esta característica significa una brecha en la ruta nucleosintética muy difícil de superar. Cualquier especie con número atómico cercano al helio, tenderá a reaccionar para alcanzar la configuración de éste. (Recuérdese la indescriptible celeridad con la que el ^3He y el ^8Be decaen radioactivamente para constituir núcleos de ^4He).

Tres tipos principales de incertidumbres se erigen en el intento de contraste entre la teoría y la observación con respecto a la abundancia del helio: un tipo, de índole teórico: la predicción de abundancias primordiales; otro, de carácter observacional: la determinación de abundancias actuales; uno más, teórico-observacional: la estimación de las abundancias primordiales a partir de las abundancias observadas.

El primer tipo de incertidumbre está relacionado con los factores involucrados en la estimación de la nucleosíntesis de helio primordial (Y_p) en las condiciones de densidad y temperatura estipuladas por el modelo de la Gran Explosión. Entre los principales factores que podrían ser fuente de incertidumbre, se encuentran el tiempo de desintegración del neutrón ($10.4 < \tau_n \text{ (min)} < 10.8$), las

[26] Las especies de «número atómico mágico» son aquellas en las que la cantidad de protones es idéntica a la de neutrones, a más de distinguirse, evidentemente, por presentar la mayor energía de cohesión por nucleón (como es el caso del ^4He , del ^{12}C y del ^{16}O). No existe explicación satisfactoria del por qué precisamente los núcleos con esa característica son los más estables y menos susceptibles a reaccionar. Ha sido dicho, aunque esto en nada a ayudado a aclarar el asunto, que los núcleos de «números mágicos» tienen los «niveles nucleares completos», algo así como los gases nobles tienen completos sus niveles cuánticos. [8]

constantes de reacción nuclear, las tasas de interacción débil (sobre todo las transiciones $n^0 \longleftrightarrow p^+$), las correcciones coulombicas, y las correcciones por densidad y por temperatura. De tales factores, algunos, como es el caso de las constantes de reacción nuclear, han logrado ser medidos con gran exactitud en el laboratorio. Existen otros, en cambio, cuyos valores son muy inciertos, como es el caso de la densidad del universo. No obstante, las incertidumbres no sobrepasan el 1% en total. El intervalo más aceptado para el Y_p teórico es de:

$$0.24 < Y_p < 0.26 \quad [23]$$

El que la diferencia entre el límite superior y el inferior sea tan reducida, se debe a la conjugación del bajo grado de incertidumbre y a la altísima producción de helio debido a ser éste un núcleo tan estable. Esta constancia del valor de Y_p compromete en alto grado al modelo de la Gran Explosión, en el sentido de que no son permitidas grandes diferencias entre la cantidad estimada teóricamente y la deducida a partir de la observación.

Un tipo de incertidumbre más tiene su origen en las limitaciones técnicas actuales para determinar la composición química de los diferentes cuerpos celestes. Los problemas inherentes a la cuantificación de helio mediante métodos espectrográficos son aún considerables, tanto que aún se está lejos de llegar al intervalo de incertidumbre de determinación de $\pm 5\%$, que es el requerido para poder revelar las condiciones físicas del período nucleosintético ancestral [23].

La deducción de la abundancia de helio primordial a partir de los datos observacionales es el otro tipo de incertidumbre. Por principio, la obtención del Y_p «observacional» está minada por las incertidumbres de la cuantificación observacional; a ello, es menester añadir las imprecisiones que se derivan del cálculo de la actividad nucleosintética y nucleodestructiva de la galaxia, esto es, las incertidumbres propias de toda una rama de la ciencia: las de la Teoría de la Evolución Estelar. En general, los factores de mayor relevancia para la determinación del helio primordial son la tasa de formación estelar, la tasa de pérdida de materia de las estrellas a lo largo de su evolución, la función de masa inicial, y, curiosamente, la composición química inicial [23,144]. La conjugación de estos factores causa un contratiempo muy difícil de superar para poder llegar a determinaciones de Y_p confiables. Por fortuna, existen ciertas unidades celestes, como nebulosas HII alejadas de centros de actividad estelar intensa, o como galaxias en las que existe menor preminencia de actividad estelar (sea por la baja proporción de formación de

estrellas, o porque simplemente el cociente $M_{\text{gas}}/M_{\text{total}}$ es muy alto), en las que se cree que la actividad galáctica apenas les ha trastocado su composición química primitiva. Gracias al estudio de tales unidades, se ha llegado a una determinación relativamente confiable del helio primordial:

$$Y_p = 0.225 \pm 0.007 \text{ [144]}$$

Si comparamos este valor con el intervalo teórico, podemos ver que realmente la concordancia es asombrosa. Sin embargo, no debe de perderse de vista que por la poca respuesta de variación que se espera del Y_p teórico ante amplios intervalos de las condiciones iniciales, la comparación entre teoría y observación debe de ser muy rigurosa. El valor observacional, si bien se encuentra muy próximo al valor inferior que proporciona la teoría, cae fuera del intervalo esperado. Por supuesto que existen formas de hacer coincidir la teoría con la observación, mediante, por ejemplo, variaciones drásticas (sin que por ello entren en pugna con la observación) en la densidad bariónica, en el número de familias de neutrinos, en la tasa de expansión del universo, o mediante la postulación de la degeneración de neutrinos ($\rho_{\nu e} > \rho_{\bar{\nu} e}$ ó $\rho_{\nu e} < \rho_{\bar{\nu} e}$) [14,156]. Sin embargo, esto revela que el modelo de la Gran Explosión, debido a las incertidumbres relacionadas, aún no está en condiciones de ser considerado como un modelo que pueda probar hipótesis de teoría corpuscular, como muchos científicos así lo han asegurado [165,181]. Creo que lo más que se puede concluir es que no existe discordancia entre el modelo de la Gran Explosión y las abundancias de helio observadas, y que, en todo caso, no se conoce suficientemente el Y_p observacional, ni se tiene la certeza necesaria sobre diversos parámetros físicos (como la cantidad de familias de neutrinos o la densidad bariónica), como para poder poner severas restricciones al modelo cosmológico en cuanto a la predicción del helio primordial.

3. LA LEY DE HUBBLE. Con la ley de Hubble, interpretada como la expresión de la expansión del universo, quedaron subsanadas las serias dificultades que representaban la paradoja de Olbers y la enigmática circunstancia por la que el universo no presenta signos de colapsamiento gravitatorio global. Además, esta ley pasó a dar significado físico a la forma original de la ecuación de la gravitación de Einstein. Por otro lado, gracias a la expansión del universo, es dable el erigir una hipótesis apropiada para explicar la sobreabundancia de helio. Así las cosas, es de posición unívoca entre los cosmólogos considerar a la expansión del universo como una prueba inequívoca del aserto que representa la teoría de la Gran

Explosión.

Sin embargo, en mi opinión, lo único que esto prueba es la forma unívoca en que puede recurrir un grupo de científicos —consciente o inconscientemente— en una posición equívoca. Es asombroso que muchos cosmólogos pretendan tergiversar la virtud originaria por la cual armonizan el fenómeno de expansión del universo y el modelo de la Gran Explosión: si la ley de Hubble es concordante con este modelo, se debe a la simple circunstancia de que de entre todas las posibles soluciones para las ecuaciones de campo de la Relatividad, fue escogida precisamente aquella familia que mejor se ajustara a la relación matemática que estipula tal ley. Quede sentado, entonces, que la armonía entre teoría y observación fue lograda *a priori*, y no *a posteriori*.

Epistemológicamente, no tiene sentido que a un supuesto constitutivo de una hipótesis, se le invista el carácter de fenómeno demostratorio de la misma hipótesis. Por consiguiente, siendo la expansión un supuesto, el que el modelo de la Gran Explosión la describa satisfactoriamente, no es, de alguna manera, una «prueba» *per se*; estrictamente, tal coincidencia debe ser considerada como un «requisito» *per se necessarium*.

Ante este aforismo, un cosmólogo partidario del modelo de la Gran Explosión, podría reclamarnos indignado:

—Pero, ¿qué acaso no cuenta que el modelo de la Gran Explosión esté basado en una teoría —la de la Relatividad— que tiene el mérito intrínseco de haber predicho la expansión del universo, fenómeno que posteriormente fue ratificado por la observación? ¿Es que esto no cuenta como una prueba *per se*?

—Efectivamente, no cuenta. Al menos no por completo. FRIEDMANN fue capaz de derivar un modelo expansivo para el universo partiendo de la premisa fundamental del Principio Cosmológico —principio del que, por lo demás, aún no se tiene clara validez. Mas de ninguna manera debe pensarse que con las ecuaciones de la Relatividad no es posible —al menos en teoría— el obtener modelos no expansivos (o no contractivos). El requisito es involucrar la dinámica adecuada para contrarrestar la atracción gravitatoria. Aún quedan por ser exploradas las posibilidades de describir el *statu quo* cósmico a partir de modelos de dinámica caótica.

Por otro lado, hasta aquí hemos dado por cierto que el corrimiento hacia el rojo del espectro de las galaxias se debe al efecto Doppler causado por la expansión del universo. Sin embargo, lo cierto es que todavía no se cuenta con prueba alguna que indique, sin que en ello quepa objeción, que se está llevando a efecto la recesión de las galaxias.

Zwicky, en 1929, propuso que en el viaje de una

galaxia a otra, la luz pierde energía debido a la atracción gravitatoria [57]. Mientras mayor sea el espacio que el rayo deba surcar, mayor la cantidad de energía perdida, y, por lo tanto, mayor el corrimiento hacia el rojo. Empero, los valores que obtuvo Zwicky se alejan mucho de los corrimientos observados, por lo que su hipótesis pronto fue relegada.

La forma original de la ley de Hubble es $z = H_0 r$, en donde z está dada en términos del corrimiento espectral. Para la determinación de z , HUBBLE contó con métodos bastante precisos. Mas por el contrario, no tuvo tal ventaja para r , teniendo que basar su determinación en métodos burdos e incluso arbitrarios [77,142]. El problema de la determinación de las distancias galácticas sigue siendo de orden mayor. La gráfica de z y r revela una curva en la que, *grosso modo*, se ajusta la relación matemática estipulada por la ley de Hubble. Así pues, esta ley arrastra las deficiencias congénitas de una medición no del todo confiable y de un ajuste regresional laxo. HUBBLE inicialmente se mostró reacio a aceptar que z fuera un síntoma causado por un genuino efecto Doppler. En su opinión, «la expansión sólo puede acomodarse a las observaciones forzándola». Mas no existiendo una interpretación alternativa, finalmente terminó por aceptar la expansión del universo.

Aunque parezca paradójico, desde que a z se le interpretó como el producto de un efecto Doppler, casi nadie se ha preocupado por constatar la validez de esa interpretación. No obstante, aún siendo el terreno tan virgen, existen ciertas proposiciones, como la casi impía suposición de la variación de las constantes fundamentales de la naturaleza, que podrían ajustarse satisfactoriamente a la ley de Hubble. Un simple ejemplo de ello sería la hipótesis de que la constante de Plank aumenta conforme la distancia. Mientras más lejana sea la fuente luminosa, menor sería la energía recibida de los fotones provenientes de ella, en una región energética cada vez más desplazada hacia el extremo rojo del espectro. Por supuesto, esto es un simple barrunto; seguramente si se le analizara con detalle, surgirían diversas contradicciones, tal vez algunas de ellas infranqueables; mas mi intención al presentarlo es enfatizar que pueden existir formas alternativas al efecto Doppler para explicar cabalmente el fenómeno causal del elemento z de la ley de Hubble. Está la incertidumbre.

Como ya ha sido indicado en más de una ocasión, la ley de Hubble es una de las piedras angulares sobre las que se erige el modelo de la Gran Explosión. Por ende, la validez de todos los resultados teóricos que se derivan de éste, están sujetos fundamentalmente a la solidez de aquélla. Si por alguna circunstancia aconteciera que la ley de Hubble es

incorrecta, o que se ha malinterpretado el corrimiento hacia el rojo de los espectros de las galaxias, entonces el modelo de la Gran Explosión carecería absolutamente de razón de ser. Para proseguir con el análisis, concedamos que la interpretación actual del corrimiento es correcta, es decir, que el universo se expande; pero hagamos tal concesión, siempre y cuando estemos convencidos de que, como señaló en alguna ocasión EDDINGTON, resulta dogmático creer sin reserva en tal interpretación.

Existen varios quintetos de galaxias que por su luminosidad, dan la impresión de estar a la misma distancia. Empero, el análisis espectral indica que una de las cinco galaxias se desplaza a una velocidad mucho mayor que la de los otras cuatro, por lo que se concluye que aquélla debe ubicarse a una distancia mucho mayor [83]. Estos comportamientos anómalos, que en algunos casos llegan a desviarse hasta 20% de los valores correspondientes a su luminosidad aparente, cuestionan seriamente la ley de Hubble. Se ha tratado de apelar a explicaciones alternativas que pudieran franquear el problema, pero hasta el momento todo ha sido infructuoso.

El desatino inicial del modelo de la Gran Explosión, al obtenerse de él una edad para el universo de 1.7 evos, puso por muchos años en tela de juicio a la teoría de GAMOW, y permitió el relativo auge de teorías rivales, como la del Estado Estacionario. Para fortuna del primero, en 1952, BAADE corrigió el cálculo de las distancia entre las galaxias, arrojando un valor de H_0 que rendía la edad entre 15 a 20 evos. El que la edad teórica del universo resultara en plena concordancia (o para ser exactos, en no discordancia) con la mayoría de estimaciones hechas por otras ramas independientes del saber, fue tomado por los científicos como un augurio bastante favorable para el modelo de la Gran Explosión.

El intervalo de edad de 15 a 20 evos se obtiene de los valores para H_0 de 100 y 50 km/segMpc, respectivamente. Sucede que por el tipo de distribución estadística que presentan, ambas cantidades son irreconciliables entre sí [124]. Así, la diferencia entre las edades que cada valor de H_0 proporciona, no es una mera discrepancia, sino una grave pugna. Y de hecho, existen dos grandes grupos de cosmólogos, cada uno de ellos defendiendo tenazmente su posición sobre el valor de H_0 . En este punto, la observación ha actuado como un fenómeno cismático en la teoría, situación que no favorece a ésta.

El punto más grave del comportamiento bimodal de la constante de Hubble se desprende del rango que adquiere la ley de Hubble dentro de la hipótesis de la Gran Explosión. La expansión está considerada como un fenómeno global en el universo. Dentro del modelo de la Gran Explosión, la ley de

Hubble, que estadísticamente debe ser suavizada para ajustarla a la observación, adquiere un nivel de «ley rigurosa». Así que para H_0 , al depender exclusivamente del comportamiento métrico de todo el universo, debiera existir un y sólo un valor. [124]

El que la ley de Hubble tenga que ser rigurosamente isotrópica, significa que para que puedan ser completamente válidas las construcciones de la historia del universo que hasta el momento han sido brindadas, es indispensable que en las determinaciones de z no hayan sido cuantificados corrimientos espectrales significativos que no dependan de la expansión del universo.

MOLES ha investigado la correlación entre z y algunas propiedades físicas de las galaxias, como el tipo morfológico, compacidad y emisividad de ondas de radio. En todos los casos, ha encontrado correlación. Estos resultados son preliminares, pero parece que en un futuro no muy lejano revelarán aspectos muy interesantes sobre los contribuyentes de z . [124]

Otro tipo de «dependencia anómala» de z ha sido detectado por JAAKKOLA [124]. Este científico investigó la variación de z con respecto a diferentes regiones de una galaxia. En 18 de 25 casos, encontró que z , en la parte distal, es significativamente mayor a la de la parte cercana de las galaxias.

Por último, cabe señalar que la hipótesis de la expansión eleva al rango de misterio el caso de los cuasares. En efecto, a estos cuerpos se les ha asignado una distancia gigantesca (de hecho, son los objetos más lejanos que podemos observar) en virtud del increíble corrimiento hacia el rojo de sus espectros [75,111]. Ha sido revelado que tomando en cuenta lo lejanos que deben ubicarse, y dado el brillo aparente con que se les observa, resultan de una luminosidad por demás pasmosa, del orden de miles de veces la de una galaxia común. Y para no parar de sorpresas, se sabe que tan colosal emisión de energía se lleva a efecto en volúmenes cuyo radio es tan pequeño como dos radios del Sistema Solar. Si se negara la interpretación de que el corrimiento espectral de los cuasares es causado por la expansión del universo, y se determinara su distancia mediante el brillo aparente, estos cuerpos dejarían de ser de propiedades tan extraordinarias e inexplicables.

Resulta pues, que en el mejor de los casos, han sido detectadas desviaciones flagrantes a la ley de Hubble; en el peor, no existe prueba que sustente que el corrimiento hacia el rojo esté provocado por la expansión del universo. No obstante, en virtud de la coherencia que como un todo presenta el modelo de la Gran Explosión, estos adversativos pueden ser no tan significantes.

4. LA RADIACIÓN ISOTRÓPICA. En 1946, GAMOW predijo la existencia de una radiación isotrópica de fondo, correspondiente a un cuerpo negro cuya temperatura debería estar entre los 15 y los 40 °K. Dos décadas después, la radiación fue descubierta, aunque con una temperatura de 2.7°K [90].

Ha sido observado que la radiación isotrópica varía en menos de un 0.001% de una región a otra del cielo [177]. No importa la latitud, ni la ascensión recta, ni la hora del día, ni la estación del año; por doquier que se le observe, se le detectará con una temperatura de 2.7°K. En el marco de la hipótesis de la Gran Explosión, esta constancia térmica aporta la información de que cuando el universo tenía 100,000 años de edad, la distribución de la materia y de la radiación era muy homogénea (recuérdese que la radiación isotrópica está constituida por los fotones, ahora superenfriados, que dejaron de interactuar con la materia desde la Era del Desacoplamiento).

A priori, no hay razón para pensar en que desde el surgimiento del universo, haya imperado una distribución casi perfecta; además de que resultaría bastante fastidioso apelar a las misteriosas «condiciones originales» para explicar la isotropía primitiva del universo. En todo caso, resulta más plausible, y filosóficamente menos incómoda, la suposición de que tal fenómeno fue provocado por algún proceso homogenizador (aunque, por supuesto, quedaría por ser explicado el origen y la índole de tal proceso).

El diámetro del universo cuando aconteció la Era del Desacoplamiento, rondaba los 100 millones de años luz. Suponiendo que el proceso homogenizador se hubiera originado poco después del tiempo cero, y concediendo que pudo desplazarse a la velocidad de la luz, en 100,000 años habría homogenizado apenas el 0.1% del total del universo. ¡Cómo, entonces, poder explicar la isotropía global del universo durante la Era del Desacoplamiento, si por ese época existían, como límite inferior, 1000 volúmenes, cada uno con un diámetro máximo de 100,000 años luz, que desde siempre habían permanecido sin interacción alguna entre ellos!

A principios de la década de los 1980's, GUTH propuso la hipótesis de la «inflación» para subsanar, entre otros problemas, el anterior punto débil del modelo de la Gran Explosión, al cual se le ha denominado como el «problema del horizonte» [28,81]. Según GUTH, antes de los 10^{-35} seg de haber ocurrido la Gran Explosión, un proceso de homogenización actuó sobre el universo. Como el tamaño de éste era muy pequeño, el proceso fue capaz de homogenizar a la materia y a la radiación en un intervalo muy pequeño de tiempo. A los 10^{-35} seg, la velocidad de expansión del universo aumentó drásticamente (se dice que el universo se

«infló»). Así, los horizontes causales de las partículas fueron superados en muchos órdenes por la expansión global. A los 10^{-32} seg, cuando finalizó la inflación, las partículas ya no estaban cercanas unas de las otras, mas conservaron la información de homogenización que les fue heredada desde la época preinflacionaria. Esta hipótesis es muy atractiva, pero, como veremos un poco más adelante, hasta el momento la postulación de la inflación carece de fundamentos sólidos que la sustenten, a más de las contradicciones que ella misma genera.

La radiación de fondo constituye una de las pruebas de mayor peso a favor de la validez de la Gran Explosión. En opinión de la mayoría de físicos y astrónomos, esta radiación es un registro fósil que inobjetablemente evidencia la existencia en el pasado de un estado del universo mucho más denso y caliente que el actual. [177]

Sin embargo, estoy convencido de que aducir la existencia de la radiación isotrópica, no es un factor decisivo para demostrar la validez del modelo de la Gran Explosión. El intervalo de error del valor derivado de la teoría con respecto a la realidad, está en el orden de 5 a 15 magnitudes (recuérdese que la temperatura detectada es de aproximadamente 2.7°K). Además, ¿cómo tener la certeza, si no se cuenta con evidencias directas, de que la radiación de fondo corresponde a la fase de desacoplamiento del universo? Bien puede ser que tenga como origen un fenómeno completamente distinto al que se propone en el modelo de la Gran Explosión. Ya ha acontecido que una hipótesis falsa prediga la existencia de tal radiación [124]. La afirmación de que la radiación de fondo demuestra que en el pasado el universo fue más caliente y más denso, no es más que jugar al procedimiento tautológico de apelar a los resultados para justificar la explicación dada.

Así las cosas, por un lado, la radiación de fondo no es una prueba sólida, y por otro, provoca contradicciones en el esquema del propio modelo. No obstante, en virtud de la coherencia que como un todo presenta el modelo de la Gran Explosión, estos adversativos pueden ser no tan significantes.

5. EL ORIGEN DE LAS GALAXIAS. La isotropía de la radiación de fondo engendra una dificultad más, que puede ser considerada como la contrapartida del «problema del horizonte». Cálculos realizados por ZEILIK [200] demuestran que debido a la homogeneidad con la que el universo hizo entrada a la Era Estelar, las galaxias, producto de la atracción gravitatoria, estarían apenas formándose.

Una de las primeras propuestas para salvar esta contradicción fue el mecanismo de las turbulencias (*eddies*) primigenias, concebidas éstas como catalizadoras del proceso

de compactación de las inhomogeneidades [200]. Sin embargo, este remedio acarrea dificultades muy serias: ¿cómo es que se originaron las turbulencias?, ¿por qué resultó tan parecido el tamaño entre ellas?

La hipótesis cosmológica más reciente con la que se pretende explicar el origen de las galaxias está vinculada con la inflación del universo. Debido a la liberación de energía que se escenificó a los 10^{-35} seg, surgieron irregularidades en la textura del espacio. Inhomogeneidades similares pudieron surgir por el hecho de que el espacio estaba cuantizado [164]. El proceso de inflación se encargó después de amplificar las irregularidades, las cuales dieron origen más tarde a las galaxias. Los cómputos muestran que las estructuras originadas a partir de estas irregularidades, serían mayores a las reales por el orden de 100,000 magnitudes (*¡peccata minnuta!*).

El problema galáctico está agudizado por dos hechos observacionales recientes: (A) si es tenida en cuenta la variación que produce la dinámica galáctica al tomarse a la radiación isotrópica como marco de referencia, se encuentra que el factor de variación de ésta puede reducirse hasta en un factor de 10 [144], (B) hasta el momento en que este trabajo se realizó, los objetos más lejanos que se conocen son dos cuasares (Q0051-277 y Q2203+292), a una distancia de alrededor de 12 mil millones de años luz; no muy lejos de ellos se cree que se ha logrado la detección de galaxias propiamente dichas [111]. Así las cosas, por un lado el universo primitivo resultaría con aún menor proporción de inhomogeneidades de las cuales pudieran devengar las estructuras galácticas; por otro lado, aún sin la necesidad de aceptarse la hipótesis de que los cuasares son galaxias en estado primitivo [50], la existencia de galaxias ya bien configuradas a una distancia de 12 mil millones de años, reduce preocupantemente el tiempo disponible para el surgimiento de éstas desde que ocurrió la Era del Desacomplamiento.

Mas las dificultades en explicar la cosa galáctica no paran en los problemas de la proveniencia de fluctuaciones de densidad y del tiempo requerido para la formación de las galaxias. Hasta hace no mucho, se suponía al universo como una unidad amorfa y sin estructura [30] —naturalmente, en tal suposición gravita el Principio Cosmológico. Sin embargo, se ha hecho constar que los supercúmulos galácticos poseen una estructura que semeja ingentes filamentos (es decir, una de sus dimensiones es extremadamente grande con respecto a las otras dos) [42]. Han sido propuestas diferentes hipótesis para explicar la forma y tamaño de los supercúmulos [30,182]; sin embargo, para ambos factores el resultado ha sido, invariablemente, un rotundo fracaso.

La teoría de la Gran Explosión es incapaz de tributar

un esquema lógico para explicar el origen de las galaxias; y en los casos de las formas, los tamaños y las estructuras, acá y allá siempre con más precariedad. No obstante, en virtud de la coherencia que como un todo presenta el modelo de la Gran Explosión, estos adversativos pueden ser no tan significativos.

6. LA HIPÓTESIS DE LA INFLACIÓN. Con la hipótesis de la Inflación se pretende resolver problemas clásicos del modelo de la Gran Explosión. Hemos ya considerado el del horizonte y el de la formación de las galaxias. Restaría por ver el problema de la planitud del universo, referente a la enigmática situación por la que la densidad del universo es tan próxima a la densidad de un universo con geometría euclidiana. El modelo de la Inflación asegura que esta coincidencia se debe a que al inflarse el universo, la estructura espaciotemporal se «estiró al máximo», por lo que la curvatura se hizo casi nula (una analogía muy adecuada es el efecto de inflar un globo; en tanto más lleno, en un área determinada de su superficie disminuirá el grado de curvatura) [81].

Sin embargo, esta hipótesis cuenta con problemas propios que están lejos de ser resueltos. Si el universo se infló en infinitésimos de segundo, ¿cómo es posible que se haya llevado a efecto cabalmente el proceso del «cocinamiento cósmico» si la temperatura y la densidad adecuadas pasaron fugazmente? Se ha especulado sobre la existencia de un misterioso campo energético que no sería sensible a la variación de volumen, y que fue el responsable de que con la inflación la densidad energética del universo no se diluyera. Por supuesto, es una mera especulación sin fundamento. Muchos físicos consideran que la escisión de la fuerza electronuclear desencadenó el proceso de inflación: ¿qué fenómeno causó que ésta se detuviera, para que así la expansión prosiguiera con la velocidad «ortodoxa»? No se tiene respuesta de ello [28].

No obstante, en virtud de la coherencia que como un todo presenta el modelo de la Gran Explosión, estos agravantes pueden ser no tan significativos.

7. LA ASIMETRÍA ENTRE LA CANTIDAD DE MATERIA Y DE ANTIMATERIA. Una vez que se tuvo plena certeza de que cada vez que se produce materia a partir de energía radiativa, se produce a la vez antimateria, adquirió peso la pregunta sobre por qué el universo está constituido sustancialmente por materia. De acuerdo al modelo de la Gran Explosión, hubo un momento en que la materia surgió de los fotones sumamente energéticos. ¿Qué suerte corrió la antimateria que también tuvo que ser generada en ese proceso?

La violación a la invarianza CP y al número bariónico

lo explican. Debido a la diferencia de velocidad de desintegración entre bosones X y antibosones \bar{X} , hubo un momento en el que la cantidad de materia excedió a la de la antimateria. Esta desproporción fue «congelada» cuando la temperatura, en su desenfadada ruta de enfriamiento por causa de la expansión, descendió del valor crítico para la formación de bosones. Tal esquema proviene de la Teoría de la Gran Unificación, desarrollada originalmente por GEORGI y por GLASHOW [72,153]. De acuerdo a estos científicos, de las partículas que emergen de fotones energéticos, una ligera mayoría es materia. Al interaccionar la materia y la antimateria, se aniquilan mutuamente para formar nuevamente energía radiativa, mas se conserva el exceso inicial de materia.

Los cosmólogos afirman que después del aniquilamiento de bosones que se llevó a efecto en los primeros instantes de vida del universo, el índice η , que representa el cociente del número de bariones entre el número de fotones existentes, resultó de 10^{-9} , valor que concuerda asombrosamente con el real [181]. Sin embargo, esto no es del todo la verdad. Aún cuando se ha observado la asimetría en la formación de materia y antimateria, los mecanismos de formación y las tasas de rendimiento son de lo más inciertas. Por otro lado, hasta el momento, la existencia de los bosones X es una especulación que lejos está de ser verificada; la posibilidad de extraer evidencia directa está fuera de todo posibilidad tecnológica actual y futura. Una de las predicciones de la Teoría de la Gran Unificación es la decadencia radiactiva del protón [191], cuya vida media se estima en 10^{30} años. Los resultados favorables al respecto de la comprobación de tal decadencia han tardado más de lo que era estimado inicialmente.

Habida cuenta de todas las incertidumbres, el valor de η , en teoría, puede ser de 10^{-4} a 10^{-12} [49]. De esta suerte, el modelo de la Gran Explosión aún está lejos de recibir el respaldo teórico para poder explicar el valor que de η actualmente se observa, y, por tanto, de la ausencia de antimateria. No obstante, en virtud de la coherencia que como un todo presenta el modelo de la Gran Explosión, este adversativo teórico puede ser no tan significativo.

B. LA ERA CUÁNTICA. Existe el consenso entre los cosmólogos de que el modelo expansivo de FRIEDMANN opera satisfactoriamente en tanto sea el propósito de explicar la historia del universo ulterior a los 10^{-43} seg de haber ocurrido la Gran Explosión. Implícitamente —pues no muchos lo reconocen explícitamente—, también coinciden en que el punto más endeble del modelo se centra en la incapacidad de elucidar las condiciones físicas que reinaron en la Era Cuántica.

¿Por qué el tiempo $t = 10^{-49}$ seg representa una barrera que no permite el acceso, por medio del modelo relativista, a las condiciones físicas que reinaron en el principio del universo? A esa magnitud temporal se le conoce como el tiempo de Planck; es un valor tan pequeño, que solamente es relacionable con la duración de los eventos del mundo atómico. Para tiempos menores o iguales a 10^{-49} seg, la Física debe ser expresada y regida en términos cuánticos. Por ende, sería de esperarse que durante el intervalo temporal que comprendió: $0 \leq t \leq 10^{-49}$ seg, por las condiciones extremas que reinaron en el universo, la gravitación estuviera cuantizada. Por consiguiente, para la resolución de la Era Cuántica se precisa de una teoría que integre los fenómenos gravitatorios y los cuánticos; resulta indispensable la fusión de la Teoría Cuántica con la Teoría General de la Relatividad! Sortear tal dificultad de integración es, hasta el momento, irrealizable [119]. Los físicos, desde una posición muy optimista, opinan que dentro del futuro previsible se encontrará la perspectiva adecuada desde la cual sea posible entrever (¡!) el camino adecuado para alcanzar la tan ansiada solución.

En el tiempo $t = 0$, la densidad y temperatura fueron infinitas. El expresar que los cálculos indican condiciones tan singulares, sin que previamente sean invertidas prolijas consideraciones, ha sido una actitud poco seria por parte de muchos sustentadores del modelo de la Gran Explosión; actitud a la cual han recurrido con la intención de «maquillar» las limitaciones teóricas que en tales singularidades subyacen. Ahora que esta reticencia es tan censurable como comprensible. Obtener magnitudes infinitas de los parámetros físicos no significa de alguna manera que la teoría así lo resuelva; una singularidad, por lo contrario, evidencia la incapacidad de un modelo matemático de rendir una solución para esas condiciones.

Casi siempre, una singularidad matemática se ha significado como una prueba irrefutable de la invalidez del modelo teórico que la genera. La singularidad no es un límite teórico, es el fin de la teoría. Considérese, si no, que al dar marcha atrás en el tiempo, el modelo de la Gran Explosión nos conduciría indefectiblemente a asegurar que en un tiempo finito (10^{-49} seg), se alcanzó un estado infinito de densidad. ¿Cómo poder enmarcar con intervalos finitos eventos que «finalizan» en condiciones infinitas? Evidentemente, estamos frente a una ruptura de los conocimientos que poseemos.

Aunque la generalidad de los casos ceda poco margen, es válido argüir la posibilidad de que una singularidad sea superable con la depuración de la teoría: premisas equívocas, supuestos contradictorios, limitaciones técnicas, fenómenos no contemplados; en fin, algo en el modelo que sea

el factor fuente del error. Haciendo de esta esperanza su hilo conductor, físicos y matemáticos se han dado a la tarea de extirpar la singularidad del modelo de la Gran Explosión: reconsideración de premisas, replanteamientos teóricos, integración de nuevos parámetros, flexibilidad en las significancias probabilísticas de las extrapolaciones, postulación de teoremas, desarrollo de corolarios: todo. La conclusión, invariablemente, ha sido desfavorable. Dentro del contexto del modelo de FRIEDMANN y del de la Teoría de la Relatividad, la singularidad matemática que se origina para el tiempo $t = 0$ es ineludible [90,187]. Podriase pensar, ciertamente, que la singularidad se deriva por la falta de incluir los efectos cuánticos en la gravitación. Quién lo dudaría. Pero de lograrse la fusión, ¿qué tanto estaría trastocada la TGR?

Hay quienes opinan que la singularidad matemática tiene un significado no tan escabroso: en el Principio, reinaba el espacio; súbitamente, en un tiempo menor a 10^{-43} seg, de la nada surgió el Universo. Los postulantes de esta interpretación, conocida como la hipótesis de la Creación ex nihilo, han esgrimido argumentos científicos derivados de la concepción que ofrece la Teoría Cuántica sobre el «vacío». Hace un siglo, el vacío era considerado, por definición, como un espacio falto de contenido. La Teoría Cuántica, avalada por pruebas experimentales contundentes, ha demostrado que tal concepción es falsa [130]. Hoy se sabe que el «vacío» está «lleno» de una mezcla de partículas y antipartículas virtuales, las cuales, tan pronto como se forman, se aniquilan. La gran celeridad con la que se efectúa el proceso de creación-aniquilamiento de partículas virtuales, crea la impresión ilusoria, a nivel macroscópico, de un tipo de estado cero: el vacío.

Lo que se propone con la hipótesis de la Creación ex nihilo, es que el universo surgió de una fluctuación cuántica que en un determinado momento sufrió el espacio vacío y cuasi-eterno. Matemáticamente, esto es factible bajo la condición de que sea conservado el estado cero inicial. Se ha especulado, pues lejos está de ser así demostrado, que efectivamente el universo posee un estado cero absoluto:

- a) estado cero en la carga eléctrica;
- b) estado cero corpuscular: en un principio, en el universo existió la misma cantidad de materia y antimateria; pero, por razones esbozadas anteriormente, los fenómenos físicos condujeron a que la materia preponderara numéricamente sobre la antimateria;
- c) estado cero energético: la energía positiva de los cuerpos y de la radiación, expresados por $\mathcal{E} = mc^2$ y por $\mathcal{E} = \hbar\nu$, respectivamente, está equilibrada con la energía negativa que representa la gravitación; y
- d) estado cero en el movimiento: e.g., en virtud del

cumplimiento de la ley de la conservación del momento angular [11], se piensa que debe existir la misma cantidad de momento angular directo (positivo) y momento angular reculante (negativo).

Aún cuando se cumpliera el estado cero para el universo (lo que, repito, es una mera especulación), lo anterior resulta insensato. Es censurable que se confunda la *factibilidad matemática* con la *factibilidad física*. Ciertamente es que el vacío, por definición, es un estado cero. Mas físicamente, este estado significa «neutro», no «nulo». El estado neutro estipula que existe la misma cantidad de contrarios para un mismo fenómeno físico; de ninguna manera significa que tales fenómenos no existan. Apegándose a la Teoría Cuántica, el espacio existe porque lo constituyen partículas y antipartículas virtuales; el espacio no puede ser nada. Por consiguiente, es insostenible la postulación de la Creación *ex nihilo* [27].

Existe la interpretación alternativa de que el universo fue desde siempre un espacio con densidad energética diferente de cero, del cual, debido a la ocurrencia de alguna fluctuación cuántica irreversible —hecho increíblemente poco probable, pero, a fin de cuentas, ¿cuál sería la prisa, si tarde o temprano acontecería?—, derivó el huevo cósmico. Sin embargo, aún cuando se evade la noción de Creación a partir de la nada, esta propuesta se enfrenta a un problema quizá no menos grave: como lo conciben la mayoría de físicos, los procesos de fluctuación cuántica operan llevando a cuentas al Principio de Incertidumbre, al azar; la cuestión es si azarosamente pudieron surgir las condiciones extremadamente particulares bajo las cuales podría ser satisfactoria la descripción del modelo de la Gran Explosión [90]. El *Principio Antrópico* razonaría que sí [68]; estadísticamente, quedaría prácticamente descartada tal posibilidad.

¿Qué aconteció antes del tiempo $t = 0$? Por supuesto, el modelo nada tiene que decir al respecto. La respuesta que

{27} No encuentro sustancial diferencia entre la aseveración de que el estado energético del universo sea nulo, y la hecha por BERKELEY en el sentido de que la materia no existe, sino que todo tiene origen en nuestra mente, todo son ideas. Y creo que la mejor forma para refutar la primera aseveración, es utilizar exactamente el mismo argumento que, se cuenta, utilizó el Dr. JONES cuando se enteró de la teoría de BERKELEY:

—¿Qué no existe la materia! Pues con esto lo rebato; —y golpeó con fuerza una gran roca [90].

muchos científicos han proporcionado, radica en desacreditar filosóficamente a la pregunta. Según ellos, la singularidad es una clara manifestación de que en el tiempo $t=0$ no existía la estructura espaciotemporal: en ese «momento», el volumen era nulo; la materia toda estaba concentrada en un punto. Dado este malabaresco argumento, la continuación del aforismo de desacreditación es consistente: siguiendo la filosofía de Mach, carece de sentido hablar de eventos físicos si no existe un marco espaciotemporal en donde referirlos (y cómo, si no existe un «aquí» ni un «ahora» en tales condiciones). Así que, como lo han expresado Gott III *et al.* [77], «la pregunta inmediata de qué ocurrió antes de la Gran Explosión no tiene sentido; sería como preguntarse qué hay al Norte del Polo Norte»^{28}. Queda sentado, entonces, que son los resabios prerrelativistas de querer concebir al espacio y al tiempo como absolutos los que nos hacen caer en la tentación de indagar sobre un «antes» que no existe.

Creo que la forma en que se desacredita la pregunta sobre lo que precedió a la Gran Explosión, es más propia de un prelado de la Santa Inquisición, el cual, preocupado por la descarriada curiosidad de sus prosélitos, sermonéales para reinstaurarles el dogmatismo en el alma, que de un científico positivista. La singularidad espaciotemporal no es un dogma; refleja simplemente profunda ignorancia e incapacidad, y como tal debe ser estimada.

Dictaminar que nada pasó antes de la Gran Explosión es tan insensato como temerario. Insensato porque nada, ni siquiera la singularidad, nos sugiere que el espaciotiempo realmente no existió antes del tiempo $t = 0$. Nuestro tiempo, en todo caso, parte con la Gran Explosión. Mas no por la inescrutabilidad que se le asocia al tiempo pretérito a $t = 0$, podemos siquiera suponer (¿pues a partir de qué?) que

{28} La declaración triunfalista de GOTT III y sus colaboradores, dicho sea de paso, peca por exceso de ligereza. Frecuentemente sucede que el hombre de ciencia olvida que la conceptualización y los convencionalismos que a propósito de la representación esquemática de los fenómenos naturales son forjados, por su origen y esencia son artificiales y arbitrarios. En una geodésica que se ajusta a una superficie esferoidal (como es el caso de los meridianos), no existe punto o dirección absolutos. Es tan válido expresar que siguiendo dirección «Sur» se alcanza el Polo Norte, como el expresar que más al Norte del Polo Norte está el Polo Sur. La Naturaleza no está limitada por los convencionalismos; son éstos los que, limitados *per se*, no alcanzan a manifestar pleneramente a aquélla.

antes de la Gran Explosión nada existió. Temerario en el sentido de aventurar conclusiones sobre circunstancias de las que, paradójicamente, aunque derivadas de la teoría, nada, absolutamente, se sabe sobre ellas.

Es difícil aquí dejar de evocar el concepto sanagustineano de que el tiempo es una propiedad del universo creada por Dios; ¿cómo dejar de relacionar, al menos en accidente, el aserto de desacreditación del tiempo «preexplosivo» con los preceptos dogmáticos de que antes de la Creación nada de lo que nos trasciende materialmente existía, sólo la inmutabilidad de lo divino? ¿Cómo dejar de relacionar, por otro lado, la noción de la Creación *ex nihilo* con las génesis propias de la Religión Cósmica? Infortunadamente, estas analogías han provocado que la discusión de la cosa cosmológica trascienda del ámbito científico hacia círculos sociales en donde la interpretación de la Creación *ex nihilo* puede significarse en contra del propio desarrollo científico. Así, el Papa Pío XII expresó en 1951: «No puede negarse que un espíritu iluminado y enriquecido por los conocimientos científicos modernos y que contempla con seriedad este problema, se ve conducido a romper con el círculo de una materia independiente y autónoma ya sea increada o creada por sí misma y a remontarse hasta un Espíritu creador. Con el mismo ánimo límpido y crítico con el que examina y juzga los hechos, entrevé y reconoce la obra creadora del Todopoderoso, cuya virtud, suscitada por el poderoso *fiat* [hágase] pronunciado hace miles de millones de años por el Espíritu creador, se ha extendido por el universo, llamando a la existencia, en un gesto de generoso amor, a la materia desbordante de energía. Parece, en verdad que la ciencia de hoy, remontándose en millones de siglos, haya conseguido convertirse en el testigo de aquél *fiat lux* [Hágase la luz] inicial, de aquel instante en el que de la nada surgió, con la materia, un océano de luz y de radiaciones, mientras que las partículas de los elementos químicos se separaban y se ensamblaban en millones de galaxias».

Bueno, pero qué más podría importar que tales tergiversaciones sean construidas por los prelados católicos. Ninguna institución jamás en la historia ha demostrado tan prodigiosa capacidad de cínica contemporización como la Iglesia Católica. Lo realmente preocupante, es que aún dentro del ámbito científico, importantes personalidades no han tenido empacho en compartir tal postura.

No obstante, en virtud de la coherencia que como un todo presenta el modelo de la Gran Explosión, el adversativo que se genera de las condiciones físicas de la Era Cuántica puede ser no tan significativa.

§1.11.

LA COSMOLOGÍA DE LA RELIGIÓN CÓSMICA

Recapitulemos:

La primera respuesta que el hombre se dio acerca del origen del universo fue la de la procedencia divina. No parece remota la contingencia de que en la forja de los mitos génicos, lo infinito haya jugado algún papel. Casi dos milenios de preponderancia tuvo dentro del pensamiento humano la concepción mística que se deriva de la Religión Cómica. El aceptar dogmáticamente los preceptos de ésta, ha sido uno de los fenómenos culturales de mayor arraigo y difusión a lo largo de la historia.

El ingreso de la Religión a la ciencia posee una importancia ostensiblemente mayor de la que suele concedersele en cuanto al factor que trascendió para el establecimiento de la Religión Cómica. Una forma bastante eficaz que PLATÓN y sus seguidores encontraron para fortalecer los preceptos de la Religión Cómica (dentro de un contexto deísta), fue mediante el recusamiento de la crítica y el análisis reflexivos. Con el escolasticismo reflora la ciencia. Mas esto resultó de un costo elevadísimo. La ciencia fue reinstaurada en función de lo metafísico, lo que postergó aún más la reflexión causalística sobre el origen del universo. Durante la época del oscurantismo fueron considerados como inescrutables los arcanos que envuelven el dilema de la cosmogénesis. Alguna nueva luz al respecto, era sojuzgada por la intolerancia imperante. Históricamente, es natural que tampoco durante la Revolución Científica se entablara algún debate científico o filosófico a propósito del dilema cosmológico. Como con cualquier fortificación, para llegar al meollo se requirió derrumbar los baluartes. Así que fue preciso, en primera instancia, desvirtuar concepciones como el Primer Motor y demás preceptos teístas.

A partir del Renacimiento, el desarrollo científico se ha distinguido por las profundas alteraciones en la forma de concebir a la Naturaleza. Con NEWTON finaliza una larga lucha en contra de la filosofía aristotélica, lucha iniciada denodadamente años atrás por COPÉRNICO, DESCARTES, GALILEO y otros. Nuevos apuntalamientos, sustancialmente contrarios a los escolásticos, fueron forjados con la nueva visión. Toda la mole escolástica fue así cuestionada profundamente, y, en muchos casos, parte de ella fue desquebrajada. Sin embargo, el cambio no fue tan penetrante como para deshacer prejuicios científicos menos evidentes, más generales y por lo tanto de mayor recalcitrancia al desarrollo. Fue EINSTEIN quien evidenció y desvalidó algunas de estas ideas subrepticias del pensamiento antiguo. A tal punto fue

corregido el rumbo, que se halló a la Teoría Relativista suficiente para explicar fenómenos incluso desconocidos en 1915. Se había logrado una teoría que fuese más allá de las formulaciones matemáticas *ad hoc*.

La gran aportación de EINSTEIN en Cosmología fue proporcionar una teoría con la cual fue posible abordar científicamente la cuestión del origen del universo. Quizá por primera vez en la historia del género humano, de la ciencia se logró el nivel adecuado para proponer formas alternativas a lo estipulado en la Religión Creacionista.

Han sido propuestos varios modelos cosmológicos pertenecientes al ámbito relativista. Mas sea porque no incluyen alguna observación fundamental, o sea por su innecesaria complejidad, la mayoría de ellos han fenecido rápidamente. Actualmente, sólo el modelo de la Gran Explosión es considerado como viable; y no sólo eso, sino que además goza de una aceptación generalizada.

Ahora bien. La inexhaustible y siempre ávida curiosidad humana, la preocupación inveterada del hombre a propósito de su origen, la inercia dialéctica entre el materialismo y el idealismo, y, por otro lado, el intangible valor filosófico y religioso para el hombre actual, además del panorama histórico que depararía al porvenir de la sociedad humana, y en general todos los carices que connotan la aceptación de una hipótesis cosmológica, invisten con carácter fundamental la rigurosa calificación del modelo de la Gran Explosión. ¿Se trata de una hipótesis tan consistente con la realidad, como prometedora es a primera vista, o es acaso simplemente un singular ente opepelesco?

Para desgracia del intelecto humano, todo parece indicar que el modelo de la Gran Explosión, el cual es el mejor modelo con el que se ha contado, no es del todo consistente. El Principio Cosmológico es arbitrario; es pretencioso afirmar que ya ha sido lograda la forma de explicar el por qué de la ausencia de la antimateria y del valor de η ; la radiación isotrópica, más que una reliquia proveniente de la Era del Desacoplamiento, es un fenómeno por comprobar; es pretendido explicar el problema del horizonte y de la planitud mediante el uso de una teoría poco creíble; no ha sido posible dar explicación sobre el origen y formación de las galaxias; no existe prueba directa de que el corrimiento de las galaxias sea debido a la expansión del universo, y aún de así serlo, han sido detectadas graves anomalías al patrón expansivo que establece la ley de Hubble y el modelo de FRIEDMANN. Son demasiadas las especulaciones y las incertidumbres que plagan al modelo de la Gran Explosión, como para adoptar una actitud demasiada optimista con respecto a él.

Supongamos, por un momento, que el modelo de la Gran

Explosión se ajusta adecuadamente a toda la evolución que ha sufrido el universo, a excepción de los primeros 10^{-43} seg. «La duración de un estornudo ocuparía mil billones de billones de veces más tiempo en la historia de todo el universo que lo que ocuparía en un segundo» el tiempo que el modelo es incapaz de describir [181]. ¿Basta esto para que hagamos caso omiso del adversativo de la Era Cuántica, y nos sintamos en plena confianza para aceptar el modelo de la Gran Explosión? En mi opinión, no. Ese período infinitesimalmente pequeño es el más importante en la historia del universo. La incapacidad de explicar esa etapa tan efímera es suficiente razón para concluir que aún no conocemos el origen del universo. En el mejor de los casos, se tiene ahora el conocimiento suficiente para explicar, *grosso modo*, casi toda la evolución física y química del cosmos. Y esto por supuesto, en el caso de que el modelo de la Gran Explosión sea correcto, lo que, por lo que hemos visto, está lejos de ser así ratificado {20}.

De la interpretación que ha sido dada por diversas personalidades sobre la singularidad matemática, se desprende un fenómeno revelador: se encuentra que ante lo infinito se ha recurrido nuevamente al misticismo. Es claro que lo infinito no va con la manera de pensar y concebir del hombre.

La visión que actualmente se tiene acerca del universo, nada tiene de relación con la plasmada en la Religión Cósmica creada por los antiguos. A la luz del

{20} El físico ZEL'DOVICH ha manifestado recientemente que el modelo de la Gran Explosión «está tan bien establecido como la antigua ciencia de la Mecánica Celeste!» [181]. Para TRINH XUAN THUAN, uno de los principales defensores de este modelo en Europa, la expresión de Zel'dovich ha sido un símbolo laudatorio. Mas por la suerte que corrió la Física Clásica en general, a mí me parece, por el contrario, independientemente de lo que haya querido decir Zel'dovich, una sutil ironía. La Mecánica Celeste explica satisfactoriamente, para casi cualquier situación, los movimientos planetarios. Pero a la larga fue demostrado que la coincidencia entre teoría y observación es incidental y subjetiva. De la misma manera, el modelo de la Gran Explosión quizá esté en condición de explicar la evolución del Universo; sin embargo, tendrá que ser una nueva teoría, muy superior y sustancialmente diferente a la de la Relatividad (quizá aquella que por fin logre englobar los fenómenos gravitatorios y cuánticos) la que pueda rendir un modelo que nos dé el verdadero sentido sobre el universo, su historia y su origen.

conocimiento que se ha alcanzado, los mitos cosmogénicos son vistos como apócrifos e inverosímiles. Todos ellos, carentes de bases científicas, han pasado a ser pueriles concepciones propias de la infancia cultural de la historia del género humano.

Mas ahora, a partir de una plataforma de profundos conocimientos científicos e intrincadas teorías, se ha erigido una concepción alternativa sobre el origen del universo. Paradójicamente, este producto de la modernidad, inconsistente y oropesco, ha sido esgrimido equívocamente por los hombres de naturaleza dogmática para demostrar que el análisis causalístico de los fenómenos físicos nos conduce a la conclusión de que la Religión Cómica es el punto de afluencia de la Cosmología. La tergiversación de los conocimientos que se derivan del estudio de la Física, de las Matemáticas y de la Astronomía, en connubio con la especulación de las incertidumbres e ignorancia que son inherentes al modelo de la Gran Explosión, han cristalizado en la forjación de la Cosmología de la Religión Cómica.

Hoy por hoy no estamos en condiciones de negar, a partir de la contundencia de una teoría sólida, la posibilidad de una Creación divina del universo. Los argumentos científicos con los que contamos para recusar a la Religión Cómica son casi tan pobres como los de los primeros filósofos jonios. Sin embargo, no ha estado por demás, ni mucho menos, el trabajo intelectual de tantos pensadores de primerísima talla. Ahora, más que en cualquier otra época, estamos ciertos de saber cuan lejos estamos de elucidar el origen del universo.

Históricamente estamos en una significativa disyuntiva: o postulamos una conceptualización del origen del universo basada en una Creación, dejándonos así desbordar por la ignorancia y la especulación, o nos damos a la obligación de profundizar en el conocimiento del universo, antes de que se sigan aventurando defensas apasionadas de hipótesis basadas en premisas arbitrarias e inconducentes. Y si después de ampliar hasta el máximo nuestro conocimiento (si es que existe alguna barrera para éste), en el momento en el que el modelo generado sea capaz de explicar todas las propiedades del universo, se llegase a la conclusión de que es necesario postular una Creación, entonces, y sólo entonces, se tendría que estimar como demostrado tal evento divino. Los designios de la Creación, si efectivamente existen, sólo serán visibles con el conocimiento absoluto del universo. Por lo pronto, he de confesar que siento un natural rechazo hacia quienes toman al modelo de la Gran Explosión como una prueba de la Creación. Y aunque no lo podría sentir, sí me veo en la obligación intelectual de mostrar rechazo hacia quienes ven en tal modelo una prueba incontrovertible de que el universo es autocontenido.

Dos puntos relevantes hacen de la cosa cosmológica una encrucijada compleja y sin solución inmediata.

Primero: los elementos endebles que subyacen en el modelo de la Gran Explosión son la consecuencia lógica de querer forzar al universo a acoplarse a una hipótesis que lejos está de encontrarse firmemente establecida. Sería injusto afirmar que el modelo es débil por las contradicciones que presenta con respecto a la realidad. El problema del horizonte y la formación de galaxias se cuentan entre las pocas contradicciones que es posible detectar. Lo que cuenta como endeble es que la mayoría de predicciones teóricas caen en el marco de lo posible apenas reforzados por una pequeña probabilidad de ser: así es el caso de las abundancias relativas de las especies químicas, del cociente bariónico/fotónico y de la radiación de fondo. Esta situación sólo corresponde a un tipo de barrunto: la especulación, la cual se maximiza al considerar las premisas arbitrarias e insostenibles de las cuales se derivan los resultados.

Segundo: han pasado apenas seis décadas desde que fueron publicados los estudios pioneros de HUBBLE sobre el corrimiento espectral de la luz de las galaxias. Un lustro más antigua es la verificación de que el universo está compuesto por miles de millones de «universos isla». Sólo 65 años de observación del universo, y con ello pretendemos desentrañar el pasado cósmico y asertar sobre su futuro. Esto es algo tan temerario como lo sería por parte de un ser, que ubicado en la Luna, y sin contar con alguna información previa sobre la naturaleza humana, pretendiese teorizar sobre el nacimiento, desarrollo y muerte de un hombre al cual ha observado por un intervalo de nueve segundos. Y aún más grave que el breve tiempo de observación, es el hecho de que no se cuenta con pruebas directas y confiables que nos indique que no estamos malinterpretando el significado de los datos observacionales.

Por lo mismo, no encuentro razones suficientes para aceptar —aunque tampoco para rechazar— que el universo tuvo un origen. La base científica para la proposición del origen es la recesión de las galaxias, fenómeno que, como hemos visto, tiene como principal asidero el ser la única explicación factible que por el momento se cuenta para el caso del corrimiento hacia el rojo de la luz de las galaxias.

Una particularidad más nos induce a pensar en el origen del universo. Nuestro entorno se compone de un sinnúmero de fenómenos físicos, químicos y biológicos que indefectiblemente transitan de un «estado inicial» a un «estado final»; al menos así nos lo enseña la experiencia sensorial. Antes de que se desarrollara la Termodinámica, no

había razón para pensar que el Cosmos no fuera perenne (el único fin que se postulaba era el debido a la intervención divina). Mas una vez que fue establecida la segunda ley de la Termodinámica, en la que se define la degradación térmica de la energía, o como lo establecieron BOLTZMAN y PLANCK, la ocurrencia del aumento neto de la entropía, se extendió la noción de envejecimiento para el universo (por no hablar de la *evolución* de éste, que acarrea disímiles connotaciones filosóficas). Es de opinión generalizada que nuestro universo tiende hacia una muerte térmica, a la que se llegará cuando ya no exista energía aprovechable para producir trabajo, fenómeno que acaecerá una vez que la materia llegue al máximo de desorden. Sin embargo, la tendencia hacia el aumento de entropía es estadística, y no absoluta. En un reordenamiento exotérmico, no todas las moléculas involucradas en la reacción aumentan su desorden; hay algunas que incluso lo disminuyen. Este margen de excepcionalidad crea un espacio para dar cabida a la posibilidad de que la tendencia neta que localmente observamos de la entropía se modifique estadísticamente al estar involucradas situaciones físicas sustancialmente diferentes a las locales. Lo que con ello quiero decir es que sobre entropía y sobre la validez universal de la ley de ésta, sabemos muy poco.

Por la aparente inexpugnabilidad que presenta hoy en día el abordar científicamente el tema del origen del universo, nos encontramos en una situación análoga a la que se enfrentaron hace más de un siglo los científicos con respecto al estudio de las estrellas. En las consideraciones que COMTE tuvo a propósito de los límites absolutos del conocimiento humano, incluyó al problema de la constitución química de los cuerpos celestes como un fenómeno que rebasa la capacidad cognoscitiva del hombre. Fue equívoca la suposición de COMTE; y no siendo pesimistas, podemos suponer que también lo sería de nosotros el considerar al origen del universo como el paradigma de lo inalcanzable. La solución definitiva parece una remota contingencia. Pero como cualquier otro fenómeno probabilístico, sólo es cuestión de tiempo. Tiempo para desarrollarnos cósmicamente.

CAPÍTULO SEGUNDO SOBRE EL ORIGEN DE LAS ESPECIES QUÍMICAS

Pero era capaz de reflexionar sobre el misterio de su origen, de estudiar el extraño y tortuoso sendero por el cual había surgido desde la materia estelar. Era material del Cosmos contemplándose a sí mismo. Consideró la enigmática y problemática cuestión de su futuro. Se llamó a sí mismo hombre. Y ansió regresar a las estrellas.

C. SAOAN, *Conexión Cósmica.*

A gran escala, nuestro origen es incierto. Opino que pronto debemos estar a reconocer que el origen del universo sigue siendo un perfecto misterio. Pero, ¿qué hay acerca de la historia de la materia? ¿La coyuntura actual de ser *terra ignota* el origen primerísimo de la energía de la que nos conformamos, nos orilla a no poder inquirir y desmadejar la trama evolutiva de la cual devenimos? ¿Estamos condenados a desconocer nuestro origen en escala íntima por la circunstancia de desconocerlo a gran escala?

No, ese no es el caso. Los científicos están convencidos de que la *vida* tiene como precedente un —como reza a la letra el epigrafe de esta sección— «extraño y tortuoso sendero por el cual ha surgido desde la materia estelar». Un sendero inquirible y descifrable, al que se le puede aislar parcialmente del enigmático origen primero del universo. Un sendero denotado en el ámbito de los cuerpos estelares.

En el capítulo anterior, nuestro objeto de estudio fue el universo como un todo; en el corriente, lo es el gran

«zoológico estelar». Incursionamos en Cosmología; toca ahora hacerlo en Astrofísica. Como podremos apreciar, el marco de lo cognoscible es mucho más alentador en tanto abandonamos el ámbito especulativo de la Cosmología y dirigimos nuestros pasos al terreno más firme que proporciona la Astrofísica.

Resulta de por demás significancia que para la transición del campo cosmológico al astrofísico, no se requiera de arduos malabares. Afortunadamente, en el paso trashumante es evadible el tropezar con excesivas y pesadas inconsistencias. Es el caso, como si dijéramos, de que no ha sido posible detectar registros fósiles que nos permitan desentrañar acertadamente los eventos que se suscitaron en la etapa previa a la formación de las estrellas; nada, o casi nada, sabemos sobre la prehistoria del universo (esto, en buena medida, revela el parco desarrollo de nuestra «paleontología cósmica»). Mas por lo que atañe a las estrellas, la situación es completamente disímil. Presumiblemente, como será revelado más adelante, el estudio estadístico de los cuerpos estelares ha develado un mensaje en el que está detallado el camino evolutivo de la materia a partir de la formación de las primeras estrellas. Y, por fortuna, todo parece indicar que la «criptografía estelar» creada por los científicos para descifrar el mensaje es, en esencia, la adecuada^[1].

En este capítulo, el objetivo es bosquejar y analizar diversas hipótesis que, conjuntamente, constituyen el

{1} Claro está que no es posible soslayar el que la Astrofísica está indisolublemente vinculada a la Cosmología; menos aún que tal concatenación no es del todo afortunada. El astrofísico ha estado condenado a considerar o incluir en sus proposiciones teóricas factores de los cuales desconoce su procedencia primigenia: ¿de dónde derivaron el momento angular, el hidrógeno imprescindible para el inicio de la secuencia evolutiva estelar, las cuatro fuerzas elementales? Desde esta perspectiva, las principales dolencias que sufre la Astrofísica son producto de la ignorancia transmitida por la Cosmología.

De entre todos los intentos por explicar el origen de los factores dinámico-energéticos requeridos en las teorías astrofísicas, resalta el realizado por algunos científicos a propósito del momento angular galáctico. La hipótesis más conocida es, sin duda, la de la adquisición del momento angular debido a la interacción gravitatoria entre sistemas pregalácticos [70]. Tal hipótesis, no obstante, pronto fue evidenciada como incapaz para explicar las verdaderas características del comportamiento y de la disposición rotacional de las galaxias [71].

panorama teórico de lo que está considerado como un eslabón fundamental en la historia de la materia: la evolución estelar. Hemos de analizar, para poder proseguir la línea por la que, muy probablemente, la materia ha sufrido un desdoblamiento evolutivo para adquirir niveles de mayor complejidad, la apasionante y, en no pocas ocasiones, espectacular ruta que recorren los cuerpos estelares desde su nacimiento hasta su muerte. Y es que creemos que esta ruta, tácitamente, bien pudo haber conllevado a la formación de todos los elementos químicos de los cuales está constituido nuestro entorno próximo y lejano, elementos de los cuales nosotros mismos somos expresiones gregarias sofisticadas. En efecto, se tiene la fuerte sospecha de que casi el total del espectro de especies químicas conocidas, ha sido nucleosintetizado en los dantescos escenarios intraestelares.

No es deseable, en aras del positivismo, caer en las presuntuosidades hechas gala mediante el modelo de la Gran Explosión, de que estamos en condiciones de explicar el origen de ciertos elementos (fundamentalmente el del hidrógeno y el del helio) que, como veremos a lo largo de este capítulo, la teoría distingue como «materia primigenia» de la cual han derivado las restantes especies químicas. No obstante, podemos dar un paso sobre seguro en relación a la evolución de la materia, afirmando que la composición química cósmica no es estática, sino que está siendo continuamente trastocada. Tenemos buenas razones para pensar que en este preciso momento están entablados procesos, insidiosos de los cuerpos estelares, que, a partir de elementos ligeros, enriquecen paulatinamente de elementos complejos al universo. Recientemente, han sido desarrollados modelos que, para el caso de las galaxias elípticas, permiten explicar la abundancia global de elementos [29] sólo a partir de hidrógeno y de helio como materias primas, y de los procesos estelares como alquimistas que transmutan unos elementos químicos en otros. Son estos procesos, a los cuales haremos referencia continua a lo largo del capítulo, los que nos permiten concebir una línea plausible y suficiente (aunque no necesariamente única) para explicar el surgimiento de las especies químicas que nos conforman.

Aún no existe razón, por contra, para barruntar sobre la posibilidad de que a tales procesos confectionadores de especies químicas se les contrapongan, *equilibradamente*, procesos de destrucción de especies complejas para generar variedades más ligeras, manteniendo de tal forma constante la composición global del universo —aunque, por supuesto, la posibilidad, no por desconocida está vetada. Como sea, la composición química del universo es dinámica. Y aún en el caso extremo de que la composición fuera estacionaria, el

estado dinámico debe, y así es *de facto*, ejercer profunda influencia en un nivel íntimo de la evolución de la materia.

Seguramente algo muy significativo ocurrió hace algún tiempo finito. Algo que hubo de trastornar profundamente la realidad cósmica. Los métodos de radiofechaje, los estudios sobre el Sistema Solar, sobre las estrellas, sobre los cúmulos globulares, sobre la entropía del universo; todos sugieren un inicio para la historia de la materia y del orden cósmico del que formamos parte. Por doquier que hurguemos, encontraremos que los componentes de «nuestro universo» son —si acaso— de unas cuantas decenas de evos de antigüedad. Así, todas las observaciones parecen confabularse para conducirnos a la conclusión de que hubo un *initio* cósmico. (Un *initio* relacionable, por supuesto, sólo con el *statu quo* que conocemos. Que tal proposición pueda ser imputable al universo en general y a cualquier tiempo pretérito de éste; estoy convencido de que no estamos en condiciones de dictaminar al respecto).

Parece muy probable que uno de los fenómenos de trascendencia mayor ocurrido hace algunos evos, es la formación de las galaxias. ¿A partir de qué hemos ganado certeza al respecto de que ese fenómeno ocurrió hace algún tiempo; de que las galaxias no son estructuras existentes desde siempre? Por un lado, justo es reconocerlo, la conclusión es subjetiva e indirecta, derivada del fechaje de fenómenos más discretos que una galaxia, como es el caso de la edad de las estrellas o la de la Tierra. Aunque, de otra parte, existen algunas evidencias, como el hecho de que los componentes estelares de la Vía Láctea aún no hayan logrado la energía cinética de equipartición [69], que sugieren una edad actual finita para nuestra galaxia.

§2.1.

LAS GALAXIAS

Se tiene la arraigada creencia de que la diferenciación y el proceso de colapso de las grandes nebulosas de las cuales derivaron las galaxias fueron factores causales del surgimiento de fluctuaciones de densidad que más tarde habrían de constituirse en las primeras estrellas ^{2}. Infortunadamente, a pesar de ser esta

{2} Evidentemente, el que las estructuras pregalácticas hayan sido nubes inmensas de gas es una premisa que por el momento es indemostrable.

idea ya añeja, no ha podido ser esclarecida la forma mediante la cual los sistemas predecesores de los cuerpos galácticos influyeron en la aparición de los cuerpos estelares primordiales. Una razón de tal situación ha sido, simplemente, la falta de estudios sistemáticos. Hasta donde es de mi saber, estudios específicos que versen en detalle sobre tal tópico no han sido desarrollado sino hasta fechas muy recientes, siendo todos ellos aún preliminares (ver, *verbi gratia*, el trabajo pionero de MÜCKER y HAUBOLD [127]).

Casi meramente intuitiva es la idea sobre la relación causal entre la formación de las galaxias y la de las estrellas primitivas. Mas se trata de una idea por demás atrayente y seductora. Teniendo en mente esta relación causal, y sin poder hacer el compromiso de correlacionarlo directamente con el surgimiento de las primeras estrellas, concedamos un espacio para apuntar algunas ideas que han sido forjadas al respecto del tan significativo acontecimiento de la formación galáctica.

La información de la cual provino el primer esbozo hipotético sobre la formación^{3} de las galaxias derivó de las cuidadosas observaciones realizadas por HUBBLE sobre estas unidades celestes [102,104]. Después de haber caracterizado un nutrido número de cuerpos galácticos, HUBBLE propuso el agrupamiento de éstos en tres clases morfológicas generales, a saber: elípticas (E), espirales (S) e irregulares (I) (figura 2.1).

Las galaxias de tipo elíptico, como su nombre lo indica, son de forma manifiestamente esferoidal. Entre ellas están contados los miembros galácticos de mayor brillo y tamaño [100]; algunas llegan a contener varios centenares de miles de millones de estrellas. Una característica que a la postre ha resultado fundamental desde el punto de vista morfológico, es que las galaxias elípticas poseen cantidades exiguas de material interestelar^{4}. Las estrellas que

{3} Aunque muchos autores utilizan el término «origen», me parece más cabal el de «formación» para describir el objetivo del astrofísico al respecto del estudio de las galaxias. De esta manera, semánticamente queda deslindado el objetivo y el enfoque entre la Cosmología y la Astrofísica sobre el tópico galáctico.

{4} Recientemente, ha sido demostrado que la riqueza de material interestelar de las galaxias elípticas no es tan parca como la que en un inicio había sido estimada. No

predominan en este tipo de galaxias son rojas, poco masivas, pobres en elementos químicos pesados y vetustas (tales estrellas constituyen la parte fundamental de lo que se conoce como la Población Estelar II (PII)) [143,175].

Las galaxias E están subdivididas, en virtud de su elipticidad, en ocho clases⁽⁵⁾. Las E₀ representan a la subclase elipsoidal en la que están agrupadas las galaxias con semiejes idénticos (galaxias redondas). En el otro extremo yacen las E7 (nunca ha sido encontradas galaxias con $e > 0.7$), galaxias lenticulares en las que está presente un conspicuo achatamiento de uno de los ejes. [102]

En todas las galaxias E, el movimiento estelar predominante es el caótico. Por el contrario, la cinética principal de las galaxias espirales es la rotacional: muchas de las estrellas que integran este tipo de galaxias presentan un desplazamiento claramente orbital sobre un plano de simetría.

Las galaxias S consisten en un núcleo (cuyas características son fundamentalmente las mismas que distinguen a las galaxias E) del cual se extienden, a manera de brazos, filamentos estelares enrollados alrededor de aquél. HUBBLE [102] distinguió dos variedades de galaxias espirales: las «normales» (SA) y las «barradas» (SB). Las galaxias SB tienen como característica distintiva el que cada brazo está conectado al núcleo por senda proyección de estrellas que se aglutinan en forma de barra.

Tanto las galaxias normales como las barradas han sido subdivididas en función de la disposición de los brazos y de la prominencia del núcleo [102]. A las galaxias con brazos enrollados laxamente y con núcleo pequeño se les suele simbolizar con una c. A las galaxias de mayor enrollamiento y con núcleos conspicuos les corresponde una α . Una b es asignada a galaxias intermedias de estos patrones. (Clasificaciones ulteriores incorporaron un tipo d para galaxias con brazos muy distendidos, y un tipo m para

obstante, se piensa que este componente no es, como es creído para el caso de las galaxias espirales, un remanente que date desde la época de la formación galáctica. Se ha apelado a la pérdida de masa sufrida por cierto tipo de estrellas y/o a la interacción de la galaxia con material intergaláctico circundante, para explicar la inesperada abundancia de material interestelar en las galaxias elípticas. [113]

{5} La elipticidad está definida como el producto $10E$, donde E está determinada por $1-a/b$. a y b guardan información sobre el tamaño de los semiejes galácticos [100].

galaxias que, si bien identificables como espirales, su estructura pareciera estar difuminada, tendiendo a una apariencia irregular, como la de las Nebulosas de Magallanes. Existen, además, los tipos *ab*, *bc*, *cd* y *dm* para formas galácticas intermedias de los patrones principales [1831].

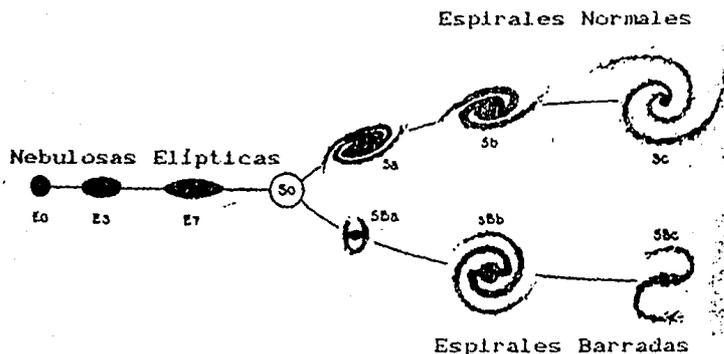


FIGURA 2.1. Esquema de la clasificación morfológica de las galaxias (horquilla de Hubble) según HUBBLE [104].

Nuestra galaxia, la Vía Láctea, es del tipo Sc. Su diámetro es de aproximadamente 100,000 años luz [4]. El núcleo está conformado, fundamentalmente, por estrellas PII. El medio interestelar en esa zona es pobre en gas y en polvo; por el contrario, la densidad estelar es particularmente alta (se calcula que alrededor del 90% de la masa total de la Galaxia está congregada en el núcleo [175]). En los brazos está aglutinada la mayor parte de las estrellas del tipo gigante azul (las cuales, masivas, muy brillantes, jóvenes y relativamente ricas en metales, conforman una fracción muy relevante de la Población Estelar I (PI)), así como la mayor parte del gas y del polvo interestelar de la galaxia (el cual comprende entre el 1 y el 2% de la masa total). El Sol está ubicado en uno de los brazos, a una distancia galactocéntrica de 30,000 años luz; gira con velocidad de 220 km/seg con respecto al centro de la galaxia, y tarda casi 240 millones de años en completar una revolución. Además de los brazos y el núcleo, nuestra galaxia (así como, se piensa, todas las espirales [45])

posee un halo galáctico difuminado en forma de un gran balón que la envuelve; en este halo predominan racimos de estrellas (cúmulos globulares) con conspicua presencia de gigantes rojas *P11*.

Las galaxias irregulares son, casi siempre, las más pequeñas de la comunidad galáctica. Están caracterizadas por la carencia de núcleo central y de plano de simetría rotatoria, y, en particular, por su amorficidad. En este tipo de galaxias el gas y el polvo interestelar oscilan entre el 20 y el 50% de la masa total. Aunque es posible detectar en ellas estrellas *P1* y *P11*, no ha podido ser apreciado, como en el caso de las galaxias *S*, algún patrón de distribución preferencial de las poblaciones estelares.

La clasificación galáctica precedente está resumida en el esquema, ya clásico, conocido como la *horquilla de Hubble* (figura 2.1). El esquema, de izquierda a derecha, proyecta la sucesión de las galaxias elípticas en función del grado de achatamiento, desde las *E0* hasta las *E7*. A continuación aparece un (por el tiempo en que HUBBLE realizó su clasificación) hipotético tipo *S0*, en el que quedarían englobadas galaxias que poseyeran propiedades características tanto de elípticas como de espirales. A partir de las *S0*, la secuencia se bifurca, desplegándose, por un extremo, las espirales normales y, por el otro, las barradas, ambos tipos dispuestos en función del aumento de laxitud del enrollamiento de los brazos (i.e., *Sa* → *Sc*). [102]

Esta disposición para los diferentes tipos galácticos terminó seduciendo a los astrónomos para proponer por vez primera una hipótesis evolutiva de las galaxias. Ciertamente, a tal esquema nunca se le adscribió explícitamente el rango de hipótesis formal; como sea, tan atrayente concepción perduró por más de una década en el pensamiento de muchos hombres de ciencia.

La propuesta que fue planteada en la década de los 1920's es la siguiente: se parte con la preexistencia de una colosal nube de gas, cuyo origen no es sugerido, de forma cuasiesférica, autogravitante, dotada de cierto momento angular y con la suficiente masa como para dar origen a 100,000 millones de estrellas. A tal estructura se le denominó *protogalaxia*.

Súbitamente, dos procesos fundamentales se suscitan: en el interior de la protogalaxia, inicia el surgimiento de inhomogeneidades que derivan en la formación de estrellas, a más de que la misma protogalaxia comienza a colapsar. De acuerdo a la hipótesis, en el momento en que se lleva a efecto el nacimiento galáctico, la morfología global no ha variado sensiblemente de la ostentada inicialmente por la protogalaxia, de lo que se sigue que el estadio juvenil de las galaxias es del tipo *E0*. Al irse compactando la galaxia,

los astros, en virtud de la ley de la conservación del momento angular, ganan progresivamente velocidad de traslación, por lo que en vez de tender directamente hacia el centro galáctico, se desvían para formar un disco. Así que toda vez que el proceso de contracción prosigue, la galaxia transita desde su condición originaria de EO hasta la de $E7$. Después de acaecida la fase $E7$, ocurre el momento en el que la «fuerza centrífuga» sobrepasa a la fuerza centripeta, por lo que la galaxia se torna dinámicamente inestable. El proceso ha de manifestarse con mayor intensidad en las zonas cercanas a la periferia ecuatorial. Esta nueva situación desencadena la eyección de millones de estrellas: habrán surgido por este fenómeno los brazos, quedando así constituida una galaxia espiral del tipo α .

Debido a la progresión del colapso, la galaxia sigue ganando velocidad, por lo que los brazos continúan fugándose del centro galáctico. De esta manera, la fase c corresponde al estadio evolutivo más avanzado de las espirales. Probablemente, el hado final de toda galaxia es el 1 , al cual se llega por el intenso efecto deformador debido a la gran velocidad que adquiere la unidad galáctica en etapas dinámicas tardías.

Para la validación de esta hipótesis es necesario, aunque no suficiente, que exista un aumento paulatino de la razón $\xi(S\alpha)/\xi(Sc)$ (donde $\xi(i)$ representa la abundancia del tipo morfológico i) a medida que sean tomadas en consideración regiones del espacio más distantes de nosotros. Sin embargo, los datos indican que tal gradiente de abundancia no está presente en el universo [45]. De otra parte, en el marco de esta hipótesis, el achatamiento galáctico está relacionado fundamentalmente con el momento angular; ha sido demostrado, sin embargo, que la dote de momento angular de las galaxias elípticas no es suficiente ni mucho menos como para poder explicar la elipticidad que se les observa [22,169].

Ahora se piensa que no sucede transición alguna entre los diferentes tipos de galaxias. Como señaló HOYLE [100] hace ya más de dos décadas, una vez formadas las estrellas, la conformación geométrica de la galaxia queda sustancialmente definida bajo la forma que poseía la protogalaxia justamente antes de entrar a la etapa de galaxia, sin que después sufra transformaciones morfológicas importantes. Argumentos que refuerzan esta aseveración, serán apuntados un poco más adelante.

Por lo pronto, tratemos con un dato observacional relacionado con las galaxias espirales que, analizado aisladamente, pareciera refutar lo dicho en el párrafo anterior. *La distribución de velocidades en una galaxia espiral indica que los brazos tienden a ser enrollados al*

núcleo. En efecto, la curva de rotación típica de una galaxia espiral revela un patrón de rotación diferencial [169]. Esto es: el centro galáctico se comporta como un cuerpo rígido en el que la velocidad de rotación (V_{rot}) aumenta linealmente con el radio (r) (hasta llegar a un valor máximo de 200-300 km/seg, el cual coincide con el límite espacial del núcleo), en tanto que en las regiones extranucleares las velocidades no se alteran proporcionalmente a la distancia galactocéntrica. Este tipo de rotación diferencial significa que la velocidad angular de las zonas internas de la galaxia es mayor a la de las externas, de manera que el período de revolución de las primeras es menor al de las segundas [6]. Así, es de esperar que después de algunos años galácticos, en unos 10^8 — 10^{10} años terrestres [148] (una galaxia espiral tarda aproximadamente 10^8 años en completar una revolución [169]), los brazos se confundieran con el núcleo. A esta estimación se le conoce como el dilema del enrollamiento.

Sería de esperar, luego entonces, que las galaxias espirales transiten, indefectiblemente, de Sc a Sa. A este escolio le subyace un problema de igual o mayor envergadura que el problema de la transición de un tipo morfológico a otro. Si se parte del consenso de que todas las galaxias se formaron aproximadamente en la misma época, ¿cómo es explicable la presencia de galaxias espirales en el Grupo Local, si la naturaleza de los brazos es tan efímera? Y, sin embargo, más del 80% del total de galaxias son (entre normales y barradas) de tipo espiral [183].

Ambos problemas, el dilema del enrollamiento (connotado con el cambio de tipo morfológico) y la ocurrencia de miembros espirales en nuestras vecindades

{6} La rotación diferencial de las galaxias espirales, por otro lado, no se ajusta al de un cuerpo no rígido cuyo movimiento esté regido fundamentalmente por el momento angular y el campo gravitatorio global del sistema [67]. La teoría establece que la velocidad de rotación de un cuerpo no rígido disminuye en función de la fórmula kepleriana $V_{rot} \propto r^{-1/2}$ (100) (esto es exactamente lo que sucede en el Sistema Solar). En las espirales, por el contrario, la velocidad de rotación a lo largo de los brazos es casi constante. De entrada, esta situación sugiere acusadamente que el patrón dinámico (y tal vez el propio origen morfológico) de estas galaxias no puede ser función privativa del campo gravitatorio y de la distribución del momento angular, parámetros éstos que aquí y allá, dentro del terreno astrofísico, son considerados como variables principales.

galácticas, pueden quedar subsanados si no es considerada exclusivamente la curva de rotación.

Se sabe que los brazos galácticos son filamentos brillantes embebidos en un gran disco de estrellas y material interestelar [45]. Si aquéllos sobresalen ópticamente, se debe a que cuentan en su haber con la mayoría de las estrellas más brillantes de la galaxia. Ahora bien, hay argumentos para suponer, como veremos más adelante, que tales estrellas, que pertenecen a un tipo específico del «zoológico estelar», perduran apenas unos cuantos millones de años. De tal suerte que muchísimo antes de que los brazos completaran una convulsión, habrían languidecido luminicamente. No existiría tiempo para el enrollamiento^{7}.

Así las cosas, parece evidente que las galaxias espirales, una vez generadas, deben estar regidas por algún fenómeno que conserve cuasiestacionariamente la estructura espiral. Un fenómeno que sea capaz de contribuir continuamente con estrellas brillantes, y que las aglutine en forma de brazos espiralizados. Existe una gran variedad de hipótesis (y de modalidades de tales hipótesis) con las cuales se ha intentado dar respuesta a la manutención de la estructura espiral. A continuación están descritas, con cierto lujo de detalle, tres de estas hipótesis; ellas son un vívido ejemplo de lo disímiles que llegan a ser las diversas proposiciones que se tienen sobre las galaxias espirales. Permítaseme adelantar que, a pesar del gran número de hipótesis planteadas hasta la fecha, y de los serios esfuerzos prodigados por los investigadores, no existe algún prospecto que se muestre como fuerte candidato para la resolución de la cosa galáctica.

En la década de los 1960's, LIN y SHU prohicieron y desarrollaron la hipótesis de la *onda de densidad* [118], propuesta originalmente por LINDBLAD. En esta hipótesis, los brazos están concebidos como estructuras que se regeneran continuamente debido a una onda de gravedad. De acuerdo a estos científicos, una galaxia, que originalmente no posee brazo alguno, aunque sí un disco de gas y de polvo perpendicular al eje de rotación, sufre alguna influencia gravitatoria (quizá el paso cercano de otra galaxia). Este acontecimiento deriva en la formación de una perturbación

{7} Algunos hechos observacionales completan la refutación del dilema del enrollamiento. Por ejemplo, el paulatino constreñimiento de los brazos implicaría la intensificación de las fuerzas magnéticas de la galaxia, fenómeno que no ha sido detectado [118].

gravitatoria (onda) que gira como cuerpo rígido alrededor de la galaxia, provocando variaciones locales en la densidad de la materia. Si la onda de densidad es lo suficientemente intensa como para lograr un aumento del 5% en la densidad inicial del medio interestelar, se desencadena, localmente, la formación de estrellas. De éstas, es de esperarse que una pequeña parte sean gigantes azules, astros responsables de otorgar estructura óptica a los brazos. De otra parte, los brazos espiralizados, propiamente dichos, serán delineados en virtud de la rotación diferencial, por lo que se sigue que el ángulo subtendido por los brazos dependerá fundamentalmente de la curva de rotación de cada galaxia.

Ahora bien, ya que las gigantes azules son las responsables de la apariencia óptica de los brazos, éstos desaparecen en un breve intervalo temporal, por ser aquéllas de vida efímera. Sin embargo, ello no implica que la galaxia pierda la forma espiral. Análogamente a cualquier otra onda, la onda de densidad se desplaza —en particular, la hipótesis postula que el desplazamiento de la onda se efectúa desfasado con respecto al movimiento del material que compone el disco, de forma que la región inicialmente afectada recupera su densidad original (con la diferencia de que el polvo y el gas interestelar están ahora empaquetados formando nuevos cuerpos estelares), en tanto que zonas contiguas, debido a la afección que les imprime la onda, acrecientan su densidad material. Al forjarse nuevas estrellas brillantes, se generan los sustitutos de las efímeras estrellas masivas creadas anteriormente. Así las cosas, la hipótesis pareciera lograr dar cuenta sobre la permanencia prolongada de los brazos espirales. Por otro lado, siendo éstos estructuras que se renuevan y que a la vez se desplazan, nunca se apreciará su convulsionamiento hacia el centro galáctico, hecho que subsana el problema del enrollamiento.

A tan apreciable panorama teórico, sin embargo, le son imputables algunos serios inconvenientes. El primero de ellos es referente al origen de la onda. La sugerencia de LINDBLAD y de sus émulos de la perturbación gravitatoria debida a otra galaxia es altamente insatisfactoria; ha sido observado que en la mayoría de casos, la disposición espacial actual entre las galaxias no favorece en algo la hipótesis de que en alguna ocasión éstas estuvieron lo suficientemente cercanas como para interaccionar en satisfacción de los requerimientos establecidos por la hipótesis de la onda de gravedad [45]. Mas sin duda, el estorbo que con mayor desacreditación ha dañado a la hipótesis de la onda de gravedad, es la demostración, forjada por TOOMRE, en 1969, de que dichas ondas de densidad no pueden perdurar más allá de una vigésima parte de la vida de una galaxia [180].

Una propuesta alternativa sobre la adquisición y la conservación de la estructura espiral la dieron a conocer, en 1978, GEROLA y SEIDEN [73]. La hipótesis, conocida como la de la formación de estrellas por autopropagación estocástica, está centrada en la suposición de que los propios cuerpos estelares, en particular por la acción clave de las supernovas, pueden activar y sostener un mecanismo en cascada para la formación de estrellas^(a). Una supernova, al explotar, contamina con el material que expelle, aleatoriamente, nubes de gas y polvo interestelar circunvecinas al punto en donde se efectúa la explosión. El aumento de densidad en las nubes conlleva a la formación de nuevas estrellas, de las cuales cierta porción son tan masivas, que logran alcanzar la fase supernova, cerrándose así el ciclo.

El modelo está basado en diversos parámetros y circunstancias de carácter fundamental. Todo comienza en un núcleo poblado de estrellas P_{II} , al cual está dispuesto, en forma perpendicular a su eje de rotación, un disco de gas y polvo. El modelo matemático de GEROLA y SEIDEN divide al disco en un número finito N de celdas bidimensionales de idéntica área (la tercera dimensión del disco es despreciada). Por razones no contempladas por el modelo, en el disco se da el surgimiento de estrellas, de las cuales cierta cantidad es del tipo masivo. Fue estimado que el 1% de las celdas albergó a por lo menos una estrella masiva y brillante. Posteriormente, con el propósito de rastrear la evolución del disco, son considerados tres tipos de probabilidades fundamentales en la formación de estrellas del tipo brillante con mucha masa: la de la surgencia en forma espontánea (P_{sp}), la de que una celda contamine e incite el surgimiento en otra celda (P_{st}) y el llamado periodo refractario (τ_r), referente a la probabilidad de que en una misma celda ocurran dos eventos supernova en un determinado periodo temporal. [73]

Existen algunos resultados por demás espectaculares que se derivan de este modelo. En función de P_{sp} , de P_{st} y de la curva de rotación, fueron corridas pruebas en

{a} Existen poderosas razones para pensar que en la actualidad existen operando procesos de formación de estrellas; las razones fundamentales de ello están explicitadas en §2.2. Por otra parte, existen también buenas razones para concluir que los remanentes de supernova (véase §2.4) pueden disparar la formación de estrellas (una concisa y clara exposición de motivos al respecto del papel de las supernovas en el nacimiento estelar puede ser encontrado en el artículo de HERBEST y ASSOUSA (94)).

ordenadores, obteniéndose *ipso facto* e invariablemente, estructuras de semblante espiral. Y aún más: la estructura espiral resulta perdurable por 30 evos, el doble de la edad actual estimada para la Via Láctea; el modelo predice la producción de brazos múltiples (tal como es observado en muchas de las galaxias espirales); el ángulo subtendido por los brazos, así como la densidad y el número de éstos, son casi constantes a lo largo del tiempo; y quizá lo más impresionante: los diferentes patrones morfológicos de tipo espiral son reproducibles en función de la variación de un sólo parámetro: la curva de rotación. Así, por ejemplo, GEROLA y SEIDEN simularon la formación de brazos considerando las curvas de rotación de las galaxias M101 (Sc) y M81 (Sb). Para ambos casos, los parámetros fueron de la misma magnitud, excepto la curva de rotación, que correspondió a la forma real de cada galaxia. Los resultados pueden ser apreciados en las figuras 2.2 y 2.3. Como puede ser apreciado, la concordancia entre observación y teoría, al menos para estos casos, resulta altamente satisfactoria.

Mas en contra de tan sorprendentes resultados, debe ser denunciado que el modelo peca por exceso de simplificaciones y por ambigüedades. Por ejemplo, se parte de la consideración de que el gas y el polvo interestelar están distribuidos homogéneamente en la galaxia, lo cual es, simplemente, falso [45]. Aún no han sido realizados cálculos sobre la probabilidad de que el patrón de propagación en espiral sea drásticamente modificado, o incluso inhibido, dada la posibilidad de que, en cierto momento, una fracción significativa del total de supernovas, por carencia de material interestelar circunvecino, ya no pudiera originar estrellas. No obstante, es posible adelantar que es de esperarse, con base en la marcada inhomogeneidad del medio interestelar [63], que tal contingencia no sea del todo despreciable.

El modelo, por otro lado, es muy sensible al rango de variación de P_{st} . Se tiene que para $P_{st} < 0.24$, los brazos resultantes son poco desarrollados y muy inestables. En el otro extremo, si $P_{st} > 0.3$, el disco termina llenándose de estrellas brillantes [73]. Ahora bien, P_{st} depende fundamentalmente de dos fenómenos: la frecuencia de ocurrencia de supernovas, y la tasa entre el tipo de supernovas [5]. Determinaciones recientes de la frecuencia de

{o} En realidad, depende de varios factores fundamentales. Uno de ellos, por ejemplo, son las condiciones de homogeneidad y propiedades en general del medio interestelar. Sin embargo, tales factores no son del todo medibles, y, por lo tanto, incluyen en modelos analíticos.

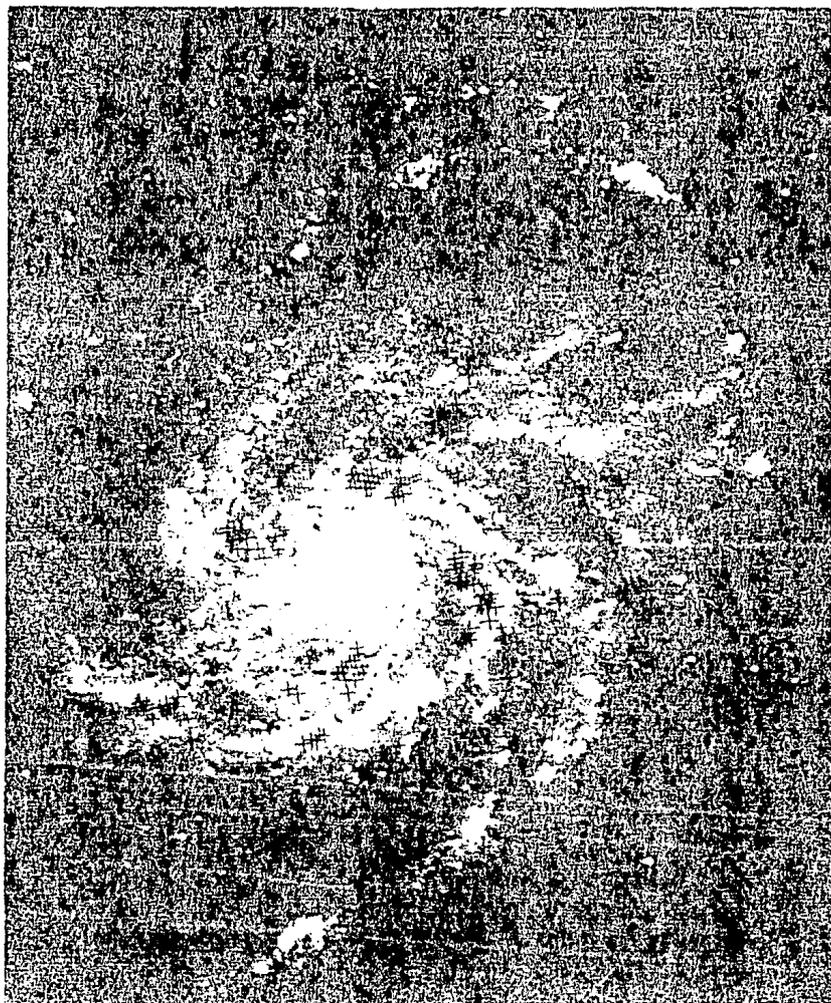


FIGURA 2.2. Superposición de un modelo galáctico derivado de la hipótesis de la formación de estrellas por autopropagación estocástica y la galaxia M101. La curva de rotación utilizada en el modelo corresponde a la de M101. (Tomado de GEROLA Y SFIDEN [73]).

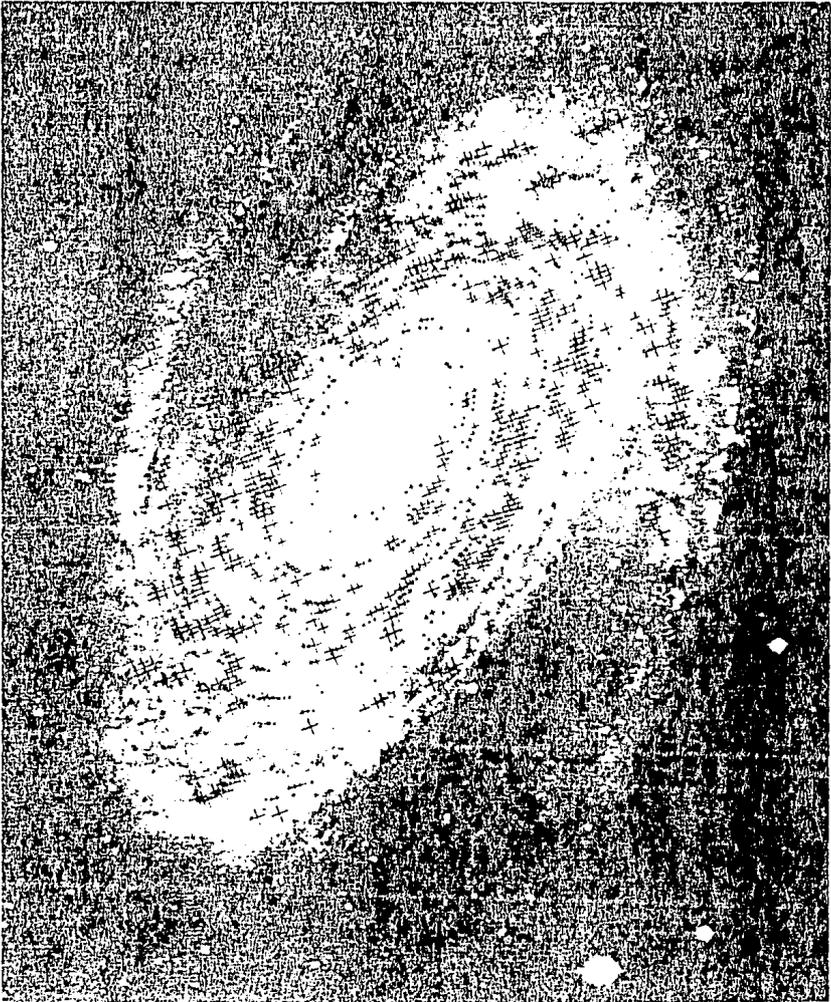


FIGURA 2.3. Superposición de un modelo galáctico derivado de la hipótesis de la formación de estrellas por autopropagación estocástica y la galaxia M81. La curva de rotación utilizada en el modelo corresponde a la de M81. [Tomado de GEROLA Y SEIDEN [73]].

supernovas [39] arrojan un valor no muy lejano al utilizado por GEROLA y SEIDEN en sus estimaciones (alrededor de una supernova cada 100 años). Sin embargo, ha sido encontrado una variación sistemática e importante de la tasa del tipo de supernovas a lo largo de toda la secuencia morfológica de HUBBLE [157]. Y aún cuando esta variación no resultara muy significativa, lo que, repito, no es el caso, existen ciertos tipos de galaxias espirales que experimentan una tasa «explosiva» de formación estelar, y que, no obstante habérseles detectado tasas de producción de supernovas hasta cien veces superior a las observadas en galaxias espirales con tasas de formación estelar «normales» [157], presentan una estructura espiral que no se aleja de los tipos morfológicos comunes.

Un grave inconveniente de la hipótesis de la formación estelar por autopropagación estocástica, es referente al agente causal de que las estrellas brillantes se aglutinen preferencialmente en los brazos espirales. GEROLA y SEIDEN mencionan que la curva de rotación diferencial es tal agente [37]. Sin embargo, no existe argumento que sustente tal aseveración. El último reducto de los defensores de esta hipótesis ha sido la declaración de que las estructuras espirales en realidad no existen: la realidad es que ¡nuestro sentido de la vista nos engaña, al tratar de otorgar a estructuras amorfas características de figuras comunes para nosotros!

Finalmente, cabe mencionar que los modelos de autopropagación estocástica no son capaces de rendir galaxias con brazos bien definidos. Es dable el explicar, mediante este tipo de modelos, las estructuras de las galaxias de brazos de forma difusa, más no así las de las galaxias denominadas «de gran diseño» [45,96].

El tercer modelo sobre la evolución de la estructura espiral que aquí es analizado, y que por el tiempo en que vio a la luz resultó innovador, fue propuesto al principio de la década de los 1960's por PIŞMIŞ [145,146]. El modelo tiene el distintivo de hacer del campo magnético un parámetro fundamental en el surgimiento de los brazos galácticos. El escenario propuesto por esta científica comienza con un núcleo y un halo preexistentes, y con un disco de polvo y de gas perpendicular al eje de rotación de la galaxia, con campo magnético también paralelo al eje de rotación. El subsistema de polvo y gas comienza a contraerse, por lo que las líneas magnéticas se intensifican y la velocidad de rotación de las partículas aumenta. Al contraerse el disco, y al hacerse más intensas las líneas magnéticas, el material ionizado tiende a fluir por las zonas de menor intensidad neta del campo gravitatorio: los polos magnéticos. Pareciera que la galaxia comenzara a

eyección de material cósmico; este material, que es la materia primordial de la cual se forman las primeras estrellas que constituirán a los brazos, y que no participa más en el colapso global del disco, comienza a rezagarse en virtud del aumento de velocidad angular del disco. La eyección y el rezago prosiguen, en tanto toman forma espiralizada las proyecciones, quedando finalmente construidos los brazos.

Przmiś, partiendo del caso simple de un dipolo magnético, simuló la formación de los brazos de una galaxia con atributos semejantes a los de M31. Para un período de 3×10^6 años de contracción, obtuvo dos brazos de 1.5 convulsiones en el intervalo de 5 a 20 kpc de distancia galactocéntrica [146]. Los resultados concuerdan favorablemente con la estructura observada de M31.

Algunos otros puntos se cuentan a favor de esta hipótesis. Una consecuencia esperada es que las estrellas distales al núcleo sean más viejas que las proximales, lo que al parecer ha sido detectado en algunos casos [145]. También ha sido posible detectar, tal como lo establece la hipótesis, el eyección en forma de material ionizado proveniente del elipsoide central.

Un hecho relevante es que en el marco de la hipótesis de Przmiś se a de esperar, dado el comportamiento global de la galaxia, que el núcleo experimentara cierta distorsión (léase «alargamiento») en las regiones alineadas a los polos magnéticos, por lo que todas las galaxias espirales deberían poseer, en mayor o menor grado de desarrollo, barras: parece ser éste el caso [148]. Por otro lado, la hipótesis es una forma elegante de solucionar la circunstancia de que no todas las galaxias hayan desarrollado brazos: o bien por carecer de material interestelar, o bien porque el campo magnético está muy alejado con respecto a su orientación a la paralela del disco nebular. Así, no es exigida la carencia de material interestelar para las galaxias elípticas.

Sin embargo, existe un dato observacional que, creo, rebate poderosamente lo planteado en la hipótesis precedente: como ya ha sido mencionado, los brazos espirales son simples estructuras que deben su realce a las estrellas por las cuales están constituidos, pero que en realidad son parte de un gran sistema de estrellas y de polvo difuminado en forma de disco. La hipótesis de Przmiś resulta incompatible con toda esa materia de poca relevancia óptica que, sin embargo, forma la parte dominante de los discos de las galaxias espirales. De otra parte, con la hipótesis del campo magnético no es posible abordar algunas particularidades galácticas como el que en uno de los extremos de cada brazo exista una tasa de formación estelar mayor a la del resto del brazo. Esta característica, en cambio, puede ser explicada satisfactoriamente mediante la

hipótesis de la onda de gravedad [118].

En las tres últimas décadas, ha sido concedido un entusiasmo desbordado al estudio de la formación y evolución de los brazos de las galaxias espirales. Infortunadamente, el problema sigue rebasando los alcances de la ciencia moderna.

Alguien comentó, con respecto a las hipótesis sobre la formación del Sistema Solar, que no era tiempo de formular grandes proposiciones, sino de entregarse a la cada vez más detallada observación de las propiedades globales y particulares de nuestro Sistema, para así poder decidir por alguna de las hipótesis propuestas. En materia galáctica espiral, la situación es bastante diferente. Cada hipótesis ha logrado dar razón de propiedades *aisladas* de las galaxias espirales, sin considerar, y a veces entrando en franca discordancia, con otros atributos de índole fundamental. La naturaleza *ad hoc* de estas hipótesis es innegable. No obstante, los resultados derivados por cada una de ellas son tan apegados a una realidad parcial de la propiedad que se intenta explicar, lo que sería caer en la suspicacia extrema, por no decir en la necedad, al pensar en la inconexión total entre observaciones e hipótesis. ¿Cómo negar, por ejemplo, que las supernovas, y la formación en cascada de estrellas inherente a ellas, tienen un papel preminente en la dinámica galáctica? Las figuras 2.2 y 2.3 son expresiones por demás elocuentes de la importancia de las supernovas en relación a la cosa galáctica. Y así se puede decir de la onda de gravedad y de los campos magnéticos; parámetros que no pueden ser despreciados así como así.

Me parece que en materia galáctica, es momento preciso para una etapa de síntesis y de globalización de las hipótesis hasta la fecha propuestas. De lograrse la integración de éstas en una «*suprahipótesis*», es muy probable que entonces contemos con una aproximación bastante acertada sobre la formación y la manutención de la estructura espiral. Por supuesto que la realización de tal propósito nada tiene de trivial y de sencillo. El reto es formidable, pero muy seductor.

Por otro lado, no es deseable que una hipótesis global sobre las galaxias espirales esté circunscrita exclusivamente a las particularidades atacadas por las tres hipótesis aquí dictadas. Ha sido encontrada continuidad en la variación de algunos parámetros globales de las galaxias espirales, que bien necesario es contemplar. Es observada una tendencia estadística bastante acusada en la disminución de masa de las galaxias *SO* a las *Sc* [147]. También ha sido observado que, por regla general, las galaxias de un tipo específico de las *SA*, son de mayor masa que sus congéneres

de las SB [147]. Existe una clara correlación entre la forma y amplitud de la curva de rotación y el tipo morfológico [67]. Este último también está íntimamente vinculado con la razón entre tipos de supernovas, y la frecuencia de ocurrencia de éstas [157]. Todo esto, indudablemente, habla de que la adquisición de tal o cual tipo morfológico depende para cualquier galaxia espiral de diversos factores causales comunes expresados en diferente grado.

No creo que haya científico que sea de la opinión de que la formación de los brazos es un factor independiente de las propiedades primigenias de las galaxias (aunque es por el momento imposible decidir qué tanto son los brazos un atributo congénito y qué tanto lo son uno adquirido). Como sea, la suposición de que las brazos galácticos se compactan o se desprenden del núcleo (i.e., el que las galaxias espirales transiten de un tipo morfológico a otro), debe ser desechada. De entre los atributos que varían sistemáticamente de un tipo de espiral a otro, existen algunos, como el de la masa o el de la razón de las frecuencias de tipos de supernovas, que hacen de tal transición un evento prácticamente prohibido.

Existen problemas ligados a la estructura espiral que reclaman fuertemente nuestra atención. Uno de ellos, sin duda de los más importantes, es la circunstancia por la que ciertas protogalaxias (las protoelípticas) quedaron libres de polvo y de gas (sea por haberlos transformado completamente en cuerpos estelares, o bien por no haber logrado retener el exceso que no pasó a constituir estrellas), mientras que otras (las protoespirales) conservaron un remanente de polvo y gas que evolucionaría para conformar el disco galáctico. Al respecto de la respuesta de esta tan simple interrogante de formular, no se tiene ni la más remota idea. La respuesta cualitativa más evidente sería el postular diferencias en las condiciones ambientales. Sin embargo, como ha sido demostrado recientemente, no se aprecia influencia estadística significativa del ambiente hacia ciertas propiedades de las galaxias espirales, como es el caso de la distribución de masas [67].

El núcleo de las galaxias espirales y el disco donde se desarrollan los brazos son, cada uno de ellos, subsistemas que poseen características que los delimitan puntualmente [22,157]. Ya hemos indicado algunas de ellas: el tipo de población estelar, la riqueza de material interestelar, el tipo de cinemática. Este último atributo reviste un particular interés. Evidentemente, el subsistema que constituye el núcleo debió sufrir un colapso gravitatorio sustancialmente diferente al sufrido por el subsistema del disco, ya que mientras que en aquél dominan

los movimientos caóticos, en éste rige un movimiento preferencial a lo largo de un plano de simetría. ¿Qué pudo ser el motivo de que en una misma zona espacial, se hayan diferenciado dos subsistemas que a la postre presentarían diferencias tan marcadas? Tentativamente, se tiene una respuesta [22]: todas las protogalaxias sufrieron un colapso no disipativo hasta que germinaron las primeras estrellas. Así, las primeras galaxias fueron del tipo elíptico. Mas cierta porción de galaxias preservó una parte de su masa original en forma de gas y de polvo (otra posibilidad es que muy tempranamente las galaxias hayan interactuado y retenido material intergaláctico). Tal masa proseguía la ruta del colapso sin disipación (inicialmente pudo ser el caso de que esta masa estuviera en expansión, debido al calentamiento sufrido en virtud del nacimiento de la galaxia, pero que finalmente fue detenida por la gravedad), hasta que perturbada cinemáticamente. El factor perturbador pudo haber sido el «viento», proveniente del núcleo galáctico, de las primeras supernovas acaecidas en la galaxia, o la colisión entre dos galaxias. En cualquier caso, el subsistema gaseoso pasó de un colapso no disipativo a uno con disipación, de lo cual fue marcado el camino para la formación del disco.

Hasta el momento, hemos hecho referencia, fundamentalmente, al origen de las estructuras espirales. ¿Qué hay acerca del resto de la comunidad galáctica? Por principio, cabe señalar que siempre ha existido un consenso tácito entre los astrofísicos al respecto de un origen común para todas las galaxias. Y una vez que fueron detectadas galaxias que se ajustan al inicialmente hipotético SO de la horquilla de Hubble [31], fue más claro para los científicos que los factores que dieron forma a las espirales son los mismos que operaron, pero con diferente expresión, en las galaxias elípticas.

Por desgracia, el problema de la formación de las galaxias es mucho más complejo de lo que parece. Por ejemplo, se piensa que la temperatura primigenia fue uno de los factores determinantes en cuanto a la masa de las galaxias. Llegar a tal conclusión, sin embargo, no nos aporta mucho; si acaso, nos proporciona un límite mínimo [100]. Ya adquirida por la galaxia la masa definitiva^[10], ésta no pudo ser la única que determinara la evolución

{10} En efecto, se tiene prácticamente la certeza de que la masa actual de las galaxias debe ser idéntica a la primeval (v. gr. 147); pensar lo contrario, conduciría a proponer ganancia o pérdida de masa, cuyos mecanismos necesarios no resultan de naturaleza evidente, además de no existir un acusado indicio observacional sobre ellos.

ulterior de aquélla. Es sabido de galaxias elípticas que poseen la misma masa total que la de algunas espirales. Por otro lado, la dispersión de masas para un mismo tipo de galaxia elíptica es muy considerable [1]. Ha sido intentado apelar al momento angular para explicar diferencias globales entre los tipos morfológicos galácticos, mas tal factor no siempre es del todo útil; por ejemplo: la cantidad de momento angular de las E no es suficiente como para que sea justificado el grado de achatamiento. Un factor global más que se ha tratado de integrar al contexto explicativo, como ya hemos indicado, es el campo magnético, mas los datos no son tan abundantes como para tener una buena aproximación de su importancia real.

Existe la creencia de que la etapa de la formación de las galaxias conforma un eslabón importante en el esquema global de la evolución de la materia. La razón de ello es lo natural que resulta la postulación de la contemporaneidad del nacimiento entre las galaxias y las primeras estrellas que las conformaron. Desafortunadamente, lo cierto es que, sea desde las conjeturas cosmológicas, sea desde las perspectivas astrofísicas, la cosa galáctica continúa infranqueable. El tópico que vincula a la Astrofísica con la Cosmología es, a la vez, la primera gran discontinuidad en nuestro conocimiento sobre la historia de la materia.

§2.2.

LA GESTACIÓN ESTELAR

Más de dos siglos ha, que LAPLACE barruntó la posibilidad de que los cuerpos celestes deriven del colapsamiento de nubes de gas y polvo cósmico (particularmente, sus especulaciones las encauzó al intento de explicar el origen del Sol y del Sistema Planetario (véase el capítulo tercero)). Esta idea, que desde entonces ha gozado de amplia aceptación por parte de los científicos, ha sido, durante las últimas décadas, objeto de intenso estudio teórico por parte de los astrofísicos. Meticulosos estudios han rendido el delineamiento de lo que algunos han nombrado como el *abordamiento teórico* sobre la formación de las estrellas [7].

El marco teórico de la hipótesis de la formación estelar a partir del colapso gravitatorio de material interestelar^[11], fue desarrollado por HAYASHI [91,92], en la

{11} En el Apéndice A se dan sumarias algunas de las principales propiedades del material interestelar.

década de los 1960's. HAYASHI encontró que la contracción desde una nube molecular a una estrella se verifica en dos etapas principales: una etapa de «colapso dinámico», caracterizada por la contracción vertiginosa del sistema y por amplios movimientos convectivos del material en colapso, y una fase de contracción lenta (*fase Helmholtz-Kelvin*), a lo largo de la cual los movimientos convectivos se vuelven cada vez menos significantes, y durante la cual, en general, el colapso se distingue por la sucesión de estados de cuasiequilibrio entre las fuerzas expansivas, la fuerza gravitatoria y la tasa de radiación de la protoestrella.

El modelo de HAYASHI [92] parte de una nube molecular autogravitante^{12}, esférica, simétrica, sin rotación y sin campo magnético, que por algún motivo comienza, lentamente, a colapsar.

Inicialmente, la nube molecular es transparente a diversas fuentes energéticas interestelares que le mantienen a un cierto nivel térmico constante (en este tenor, los rayos cósmicos son, con mucho, la fuente de inyección energética más importante para las nubes moleculares). Empero, el colapso, o, para ser precisos, el aumento de densidad, va haciendo a la nube cada vez más opaca hacia estos agentes energéticos, fenómeno que, inicialmente, constriñe a aquélla al enfriamiento. Ciertamente, la contracción del sistema gaseoso provoca un aumento efectivo en el estado térmico. Mas la nube permanece transparente a las radiaciones de longitud larga. Así que sin fuente externa de energía, y con una fuerte proclividad a irradiar energía calorífica, el saldo neto es el descenso de la energía cinética interna de la nube, de lo que el componente gravitatorio resulta ampliamente favorecido, iniciándose así la etapa del colapso dinámico (etapa que, por lo demás, una vez iniciada, conlleva al logro de mayores estados térmicos).

Como la distribución de densidad de la nube varía en proporción directa a la distancia al centro de la nube (como precisamente es de esperarse de una masa gaseosa autogravitante) las zonas interiores de la nube, en su colapso, evolucionarán mucho más rápido que las capas externas. Ppr ende, la temperatura del centro de la protoestrella será incrementada vertiginosamente en relación al incremento experimentado por las capas exteriores. La energía térmica generada en el interior, que por diferencia de presiones tenderá hacia las zonas exteriores, ejercerá

{12} Esto es, la forma y la densidad de la nube definida fundamentalmente por su gravedad, siendo despreciable la presión externa.

presión efectiva en contra del material que cae hacia el centro, hasta que llegue el momento en que sería producido un rebote de las capas exteriores. No obstante, la energía de este primer rebote será absorbida rápidamente por las moléculas de hidrógeno molecular, por lo que pronto nuevamente la protoestrella seguirá colapsándose como un todo.

En virtud del pronunciado gradiente térmico, desde muy temprano en la protoestrella se entablarán procesos convectivos. Esto favorecerá ampliamente el colapso de la protoestrella, pues, como es bien sabido, la convección resulta un medio excelente para el transporte de energía.

Para estas alturas, el material todo se encontrará ionizado. Alcanzada esta etapa, la temperatura de radiación superficial de la protoestrella se mantendrá casi constante, en alrededor de los $4,000^{\circ}\text{K}$ (la razón de ello es muy simple: por encima de esta temperatura, los átomos están ionizados, y los electrones libres, junto con el aumento pronto de la densidad, provocan que disminuya severamente la zona de libre desplazamiento para los fotones, por lo que el material se vuelve casi completamente opaco a la radiación; por debajo de esta temperatura, los núcleos atómicos son capaces de retener electrostáticamente a los electrones, por lo que el ambiente deja de ser opaco y la radiación escapa con facilidad).

El colapso desbocado continúa, hasta que nuevamente es creada la barrera térmica alrededor de las zonas centrales de la protoestrella, de tal suerte que un segundo rebote de material periférico será generado. Como ahora ya el material en colapso está completamente ionizado, nada impedirá que la protoestrella experimente un súbito aumento de temperatura y luminosidad. El fenómeno que sufrirá el futuro astro, parecerá un virulento «rafagazo», cuya duración será de aproximadamente 100 días.

Una vez superado este evento, y dada la redistribución de presión y temperatura posterior a él, la protoestrella entrará de lleno a la fase Helmholtz-Kelvin. El inicio de esta fase estará acompañado por una temperatura central de $1.5 \times 10^5^{\circ}\text{K}$.

El aumento de densidad logrará niveles en los que, debido a la presión, los movimientos convectivos comenzarán, paulatinamente, a ser inhibidos, manifestándose el proceso primeramente, por supuesto, en las regiones centrales. La protoestrella, así, será cada vez menos luminosa. Esta disminución de luminosidad proseguirá acoplada a la temperatura superficial constante, hasta que una tercera parte de la masa quede liberada de movimientos convectivos.

Minimizada la influencia de los movimientos convectivos, la protoestrella aumentará su temperatura interna, hará crecer el gradiente de temperatura y aumentará

de luminosidad, todo ello lenta y progresivamente, hasta llegar a la Secuencia Principal (figuras 2.4 y 2.5).

Para una estrella de una masa solar ($M_{\odot} = 1.989 \times 10^{33}$ g), la etapa de contracción Helmholtz-Kelvin habrá durado $\sim 3 \times 10^7$ años.

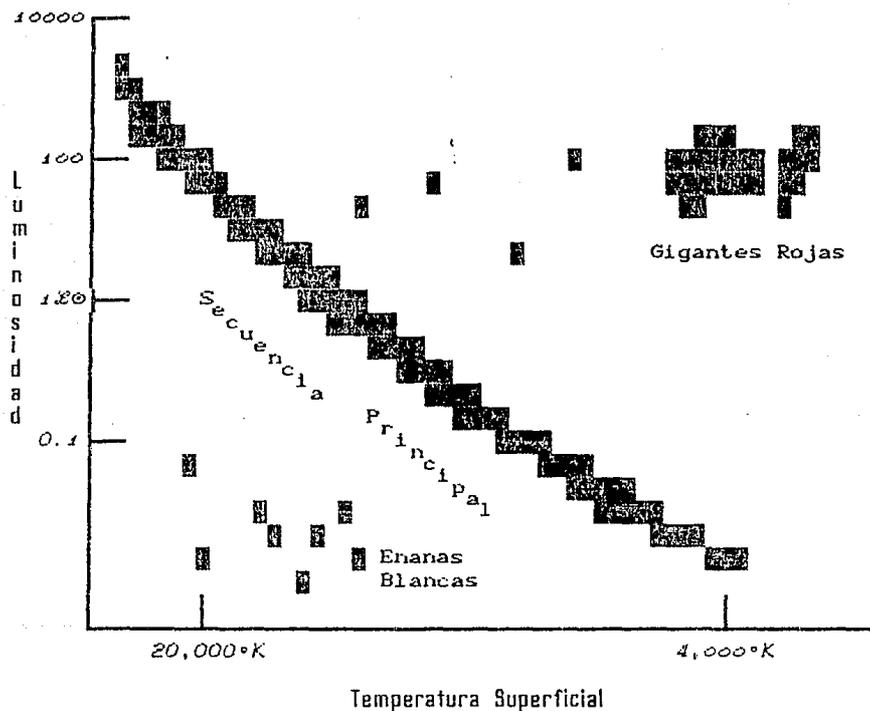


FIGURA 2.4. Esquema del diagrama Hertzsprung-Russell, en el que son graficadas las estrellas en virtud de su temperatura superficial (eje de las abscisas) y de su luminosidad (eje de las ordenadas). Las escalas son arbitrarias. [Tomado de MENDOZA [123]].

¿Qué características luminicas y de temperatura superficial se desenvuelven a lo largo del colapso de la protoestrella? Inicialmente, debido a los amplios movimientos convectivos, la protoestrella es muy luminosa, en tanto que su temperatura superficial es de aproximadamente $4,000^{\circ}\text{K}$. Así, durante las fases tempranas, la protoestrella es ubicable arriba y a la derecha del diagrama H-R^[13], en la región poblada por las gigantes y por las supergigantes rojas [91]. Toda vez que la temperatura superficial permanece constante, y que, progresivamente, en virtud de la disminución de los movimientos convectivos y del decremento de la superficie total de irradiación, se pierde luminosidad, la protoestrella desciende verticalmente en el diagrama H-R. Una vez logrado el núcleo radiativo (i.e., cuando una tercera parte de la masa de la protoestrella pierde todo movimiento de convección), el protoastro eleva su temperatura y su luminosidad, desplazándose, en el diagrama H-R, hacia la izquierda y ligeramente hacia arriba, hasta alcanzar la Secuencia Principal (figura 2.5).

El primer paso para esclarecer si las estrellas provienen o no del material interestelar, y, por lo tanto, para poder confrontar la teoría de HAYASHI, es el inquirir sobre la factibilidad de que en la actualidad se esté verificando el proceso de gestación estelar. De ser negativa la respuesta, se correría el peligro de que haya desaparecido la información necesaria para tal elucidación, sin más por hacer por parte de los científicos, que el aceptar el vedo observacional que el tiempo ha decretado sobre la formación de las estrellas.

FRANCO [65], así como muchos otros astrofísicos (ver, v.g., [92]), esgrimen, con un matiz de sustentación, aunque seguramente sin la intención de demostrar rigurosamente, el siguiente razonamiento como prueba de que aún continúa la formación de estrellas: de acuerdo con la Teoría de la Evolución Estelar (de aquí en adelante TEE), la vida de una estrella es

$$t \sim 10^{10} M^{-2}$$

(6)

(donde M es la masa de la estrella, expresada en unidades de

[13] En el Apéndice B están apuntados algunos comentarios sobre la temperatura superficial y la luminosidad de las estrellas, así como una somera descripción del diagrama H-R (figura 2.4).

masa solar, y t el tiempo en años). De acuerdo a esta relación, una estrella como el Sol tiene una longeva vida de alrededor de 10^{10} años; en cambio, a una estrella 30 veces más masiva que el Sol, le corresponde tan sólo un período de $\sim 10^7$ años. La edad de la Galaxia es del orden de $\sim 10^{10}$ años, por lo que «el simple hecho de que observemos estrellas masivas implica que en nuestra Galaxia existe formación estelar reciente» [65].

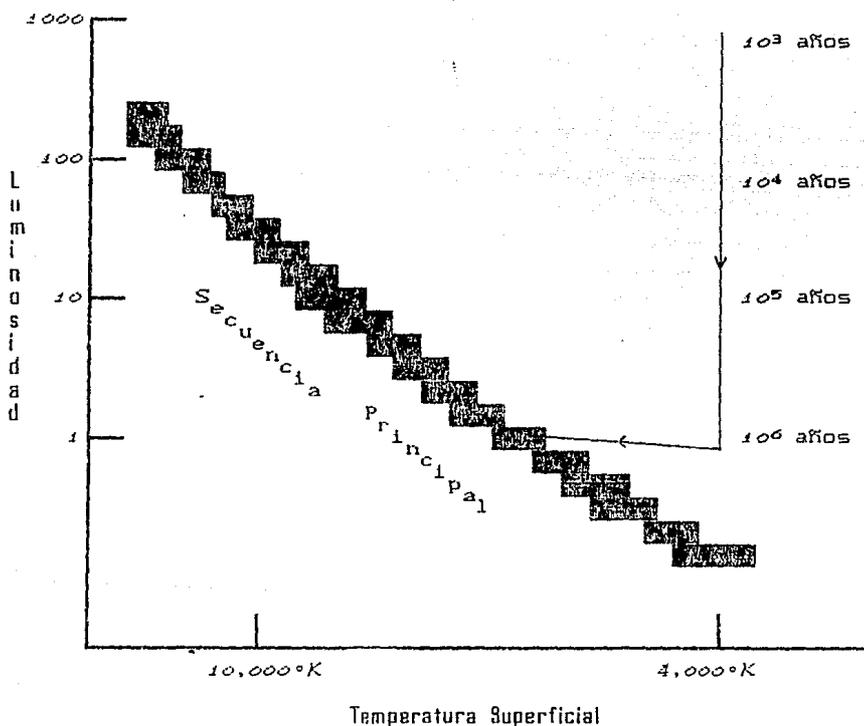


FIGURA 2.5. Ruta de colapso de una protoestrella en el Diagrama H-R, de acuerdo con la teoría de HAYASHI [92]. La luminosidad está en escala arbitraria. [Tomado de NARLIKAR [13]].

El razonamiento anterior parte de un marco teórico (la TEE) para demostrar la existencia de un proceso al que —precisamente— se le pretende demostrar mediante la observación: es pues claro que el aforismo es circular, por lo que a partir de él, *stricto sensu*, no es viable sustentar alguna respuesta sólida sobre la pesquisa que nos ocupa.

No obstante, es posible aducir, dada la cantidad de información empírica y teórica actual, argumentos más sólidos, que no reten tan abiertamente a la suspicacia, para demostrar que aun se gestan estrellas en el espacio cósmico:

(a) Existen ciertas agrupaciones de estrellas, a las que se les conoce como *asociaciones estelares*, que se particularizan por ser sistemas dinámicamente inestables [7,123]. Detallados estudios sobre los vectores de desplazamiento de los componentes de las asociaciones estelares revelan, en forma incontrovertible, que éstas se expanden vertiginosamente, tendiendo a su desintegración en no más de 10 millones de años. El que las asociaciones estelares sean observables en la actualidad, es indicativo de que tanto ellas, como, necesariamente, sus miembros, son de formación reciente [5,7].

(b) Las estrellas del tipo T Tauri son cuerpos de tipo solar [66] ($\approx 2M_{\odot} \leq M \leq 3M_{\odot}$ [44]) que muestran, con respecto a las estrellas de la misma masa pero ubicadas en la Secuencia Principal, exceso de color en el infrarrojo y en la región ultravioleta [123]. Su espectro está caracterizado por líneas de emisión (siendo, generalmente, las líneas del calcio monoionizado y las del hierro neutro las más conspicuas) [86,94]. Son variables erráticas [94] de tipo espectral K o más tardío, y de luminosidad entre III y V [44]. Su radio puede ser mayor que el de una estrella de la Secuencia Principal con la misma masa, hasta por un factor de 4 [132]. Generalmente, las estrellas de tipo T Tauri ostentan rápidas velocidades de rotación [158]. El viento estelar que producen es intenso (100-300 km/seg) y, se sospecha, sufren de pérdida considerable de masa ($\sim 10^{-6} M_{\odot}/año$) [158]. Todas las estrellas T Tauri están asociadas espacialmente con nebulosas, y sucede generalmente que se hallan embebidas en éstas [86,94].

Existen razones que acusan que las T Tauri son estrellas jóvenes que aun no han alcanzado el estado de equilibrio hidrostático de las estrellas de la Secuencia Principal. Generalmente se les detecta en asociaciones estelares [7]. Se cree que los fenómenos violentos que en ellas son observados, tales como los rápidos vientos y la copiosa pérdida de masa, son sintomáticos de la etapa precoz por la que atreviesan. Los astrofísicos dan cuenta de la variación luminica de tipo errante de las T Tauri, mediante la suposición de que tales protoestrellas aún no han logrado

alcanzar el equilibrio hidrostático que distingue a las estrellas de la Secuencia Principal [94]. El exceso de color bien podría ser debido a que aún el colapso de estas estrellas no ha finalizado, por lo que no han logrado el estado de opacidad de las estrellas de la Secuencia Principal [123].

Para no faltar a la sinceridad, es justo reconocer que, a excepción del primero de los argumentos precedentes (i.e., el de que las T Tauri son miembros de asociaciones estelares), los demás no son más que interpretaciones subjetivas —bastante seductoras, por cierto— que no mucho demuestran el que las estrellas de tipo T Tauri sean cuerpos neonatos.

No obstante, para demostrar la juventud de las T Tauri nos quedan por presentar dos últimos argumentos: en primer lugar, la inequívoca asociación espacial de todas las T Tauri con nubes de material interestelar. Podríase, ciertamente, pensar que la asociación entre este tipo de estrellas y el material interestelar es casual [5]; sin embargo, ha sido demostrado que, a más de no encontrarse estrellas T Tauri fuera de nubes de gas y polvo, su abundancia a lo largo de éstas es estadísticamente mayor que la de las estrellas de la Secuencia Principal [94]. Así las cosas, es difícil de pensar que la asociación T Tauri—material interestelar sea un fenómeno fortuito. La interpretación más viable, y, por lo demás, la más simple, es que la asociación sea congénita. Ahora bien, como la edad cinemática de la mayoría de nubes asociadas a las T Tauri no sobrepasa 1 ó 2 millones de años [5], se sigue que éstas deben ser cuerpos jóvenes. Un último argumento está relacionado con el fechaje de las estrellas a partir de su riqueza de litio. Se sabe que el litio es una especie muy susceptible a la temperatura. En las condiciones físicas que reinan en las estrellas, este elemento se torna muy inestable, tendiendo a fotodisociarse paulatinamente. Ha sido encontrado que las estrellas T Tauri poseen hasta 100 veces más litio que el Sol [95].

Además de los argumentos (A) y (B), pueden ser esgrimidos otros que, si bien no tan cerca de la contundencia; sí son engastables apropiadamente en la noción de gestación reciente de cuerpos estelares:

(c) Un dato observacional análogo al del inciso (A) está relacionado con la existencia de las regiones ultracompactas de hidrógeno ionizado (UCHII). Las UCHII son nebulosas fotoionizadas, de dimensiones pequeñas (diámetros no mayores que 0.1 pc), con densidades electrónicas muy elevadas ($\rho_e \geq 10^4/\text{cm}^3$) [197] y con temperaturas características de aproximadamente de $10,000^\circ\text{K}$ [70]. Estas regiones, compactas y calientes, están rodeadas por

nebulosas moleculares cuya temperatura no rebasa los 100°K [70]. Si se supone, en primera aproximación, que el volumen de la nube molecular circundante a una UCH_{II} es igual al volumen de ésta, se deduce (por la simple relación $P = nRT$) que la UCH_{II} posee una presión efectiva 100 veces mayor que la de la primera. Luego entonces es de esperarse, y de hecho así ha sido encontrado, que las UCH_{II} estén en plena expansión.

Asumiendo que la velocidad de expansión de una región UCH_{II} es constante (la cual ha sido determinada en ~10 km/seg), es posible computar la edad cinemática de ésta:

$$t = \frac{r}{10 \text{ km/seg}} \quad (1)$$

El tamaño máximo de una UCH_{II} es de 0.1 pc, por lo que se deduce que ninguna de tales regiones sobrepasa la edad de 1,000 años. [70]

Wood y Churchwell [198] han determinado recientemente, a partir de métodos diferentes al de la edad cinemática, que ninguna de las regiones UCH_{II} por ellos estudiada, posee una vida mayor a 30,000 años, por lo que, muy probablemente, ese tiempo sea la cota máxima del intervalo en el que las UCH_{II} se enfrían y se expanden al grado de que llegan a confundirse con el medio interestelar circunvecino.

En conclusión: las regiones UCH_{II} son fenómenos de formación reciente.

Ahora bien, ¿qué provocó que tales nebulosas comenzaran a expandirse? Existen cuatro argumentos a favor de que es una estrella masiva y neonata el agente causal de tal fenómeno. Primero: todas las regiones UCH_{II} están asociadas espacialmente con estrellas masivas del tipo O-B. Segundo: los objetos estelares masivos cercanos a las regiones UCH_{II} producen exhuberantemente fotones de longitud de onda menor o igual que 912 Å [158], los cuales son necesarios, y suficientes, para explicar el estado de ionización de tales regiones. Tercero: la mayoría de UCH_{II} presentan cavidades centrales que pueden ser explicadas por la acción del viento y de la presión ejercida por estrellas masivas [38], agentes que a la vez pueden dar cabal respuesta sobre cómo una región tan caliente como lo es una UCH_{II}, sea a la vez tan densa (fenómeno que contrasta notoriamente con las nubes coronales, que son también calientes, pero muy diluidas (ver apéndice A)).

Por supuesto, estos tres argumentos, que delatan la inequívoca relación causal entre cuerpos estelares masivos y los fenómenos UCH_{II}, carecerían de peso en relación a la búsqueda de pruebas palmarias sobre la formación reciente de estrellas, si fuera como caso la falta de un cuarto argumento que establezca que la asociación entre las

nebulosas y las estrellas no es casual, sino congénita (esto es, que las UCHr no son el derivado del encuentro fortuito entre una estrella y una nebulosa molecular):

La velocidad de una estrella, cuyo movimiento sea referido a la cavidad local de flotación, es del orden de 10 km/seg. Considerando el décimo de la edad total que teóricamente es calculada para una estrella masiva, digamos 10⁶ años, se deduce que la estrella, desde su nacimiento hasta cumplido ese periodo, ha recorrido ~30 años luz. El ángulo que subtende tal intervalo espacial a una distancia de 1,000 años luz es de 1°⁽¹⁴⁾. Es decir, la estrella debe estar ubicada, poco más o menos, donde «nació». [175]

El cómputo anterior, de otra parte, es consistente con el tiempo de vida de las regiones UCHr, el cual cae en el intervalo del 10 al 20% de la vida en la Secuencia Principal de la estrella relacionada [197]. El cálculo resulta también consistente con el hecho de que todas las estrellas masivas que son consideradas como astros jóvenes, están proyectadas o embebidas en grandes nubes de gas y de polvo interestelar [70].

(b) Los objetos Herbig-Haro (objetos HH) son nebulosidades compactas (~0.01 pc) que, al igual que las T Tauri, están propincuas o embebidas en nubes moleculares. Poseen velocidades radiales que llegan a superar los 300 km/seg. Su desplazamiento siempre es de forma tal que se alejan de la nube molecular asociada. Los objetos HH son, además, intensas fuentes puntuales de radiación infrarroja. [37]

Al parecer, los objetos HH son nebulosas de reciente formación que son producto de estrellas jóvenes (generalmente del tipo T Tauri). Se cree que la emisión intensa en el infrarrojo de estos objetos responde al proceso de enfriamiento de un gas supersónico que originalmente fue calentado e ionizado por ondas de choque producidas por estrellas T Tauri. Por otro lado, los objetos HH, a los que siempre se les encuentra formando asociaciones, sufren entre ellos de movimientos de dispersión considerables en intervalos tan cortos como 500 años. [37]

Se tiene idea, por lo anterior, y apeándonos a la teoría del colapso, que la relación entre las T Tauri y los objetos HH es una clara manifestación de la interacción, *post partum*, entre el vástago estelar y la nube progenitora [37].

{14} Está siendo considerado el caso extremo, en el cual el movimiento de la estrella es perpendicular a la línea visual.

(e) Argumentos del mismo rasero que los de (c) y (d) están relacionados con los flujos moleculares y con los máseres de H_2O , de OH , de SiO y de CH_3OH [70]. Procesos recientes, en decadencia, que pueden ser asociados a fuentes luminicas estelares que, por la juventud de estos fenómenos, deben ser consideradas de formación reciente.

(f) Es observado que mientras más joven es el grupo estelar, mayor es la densidad de la nebulosa asociada [66].

Parece, pues, habida cuenta de todo, poco probable que sea errónea la conclusión de que el nacimiento de estrellas es un fenómeno de ocurrencia reciente. Es, además, segura la relación congénita entre las estrellas y el material interestelar.

De acuerdo a la teoría del colapso, la relación exacta entre las estrellas jóvenes y el gas y el polvo cósmico es la de éstos como materia primigenia de aquéllas. ¿Tenemos alguna evidencia observacional que dé soporte a tal suposición? La respuesta es, inequívocamente, un rotundo no.

Por doquier que ha sido hurgado, nunca ha sido detectada la susodicha transición de un estado diluido a uno de densidad estelar. A lo más que se ha logrado, es a aducir algunas pruebas indirectas del colapso. Por ejemplo, ha sido argumentado que tanto las líneas de emisión de las estrellas de tipo T Tauri como el viento que de estos astros es originado, son fenómenos explicables mediante la suposición de que aún prosigue la caída de material de baja densidad [20]. (Por lo demás, fuera de esta suposición, el fenómeno causal de las características espectrales de las estrellas de tipo T Tauri resulta un perfecto misterio). Sin embargo, la caída de material debería reflejarse claramente en el espectro de la estrella. ¿En qué forma? Simplemente, como líneas espectrales corridas hacia el extremo rojo del espectro. Nadie ha detectado tal cosa [7].

Otro tipo de evidencia a favor de la hipótesis del colapso, que a mi parecer es más sólida que la anterior, aunque no deja de ser indirecta, está relacionada con la aparente detección de una fuente estelar dentro de un glóbulo de Bok [112]. Los glóbulos de Bok están contados entre las unidades nebulares más pequeñas y densas que son conocidas [65]. Todos ellos, a excepción del glóbulo B335, son nebulosas carentes de fuente propia de energía, siendo sus únicos sostenes térmicos la radiación interestelar y los rayos cósmicos. La luminosidad de B335 es muy superior a la del resto de los glóbulos, al grado de que solamente el 30% de la radiación puede ser arrojable a fuentes externas. Por ende, es muy probable que en B335 esté embebida una fuente luminosa, presumiblemente, una estrella en formación [112].

Esta suposición está reforzada por el hecho de que la densidad tiene un pico precisamente en el centro nebuloso.

Ahora bien, hemos dejado establecida la indudable conexión entre el nacimiento de las estrellas y el material interestelar de alta densidad. Hemos también indicado que, basándonos en las estimaciones teóricas para la edad de las estrellas, podemos asertar que *todos los astros «jóvenes»* están asociados con nubes densas de gas y polvo. Mas, por contra, es posible detectar nubes moleculares tan densas como los glóbulos de Bok tanto asociadas con estrellas —putativamente— neonatas como libres de ellas. Es, como si dijéramos, el encontrar mujeres solas y mujeres ofreciendo su regazo a niños recién nacidos.

Sin embargo, para que deje de ser una hipótesis el que las mujeres engendran niños, es requerido observar que éstos se gestan en el vientre de aquéllas, o el observar, en el mejor de los casos, el parto. En relación a las estrellas, en virtud de las escalas temporales, la observación del parto está, por lo pronto, ajeno a una probabilidad razonable de ocurrencia. Mas para la gestación, la probabilidad no tiene por que ser tan despreciable, al menos en cuanto a la posibilidad de observarla en escalas temporales humanas.

Existen argumentos que para muchos astrónomos son suficientes como para justificar el motivo por el cual hasta el momento ha sido imposible detectar la fase del colapso gravitatorio de la evolución estelar. En primer lugar, es de esperar que el proceso de contracción evolucione rápidamente en las partes centrales de la nebulosa, en tanto que la dinámica de las capas externas (que son las regiones asequibles mediante los instrumentos astronómicos) sea mucho más tarda [131]. En segundo lugar, el aumento progresivo de la densidad hace de la nebulosa molecular un cuerpo cada vez más opaco, por lo que la intensificación del colapsamiento engendra dificultades cada vez mayores para detectar el cuerpo en gestación [65]. Ello sin contar la barrera observacional que nos resulta la propia nube molecular en la cual se forma el astro.

Sin embargo, la carencia observacional no es tan fácil de justificar como es pretendido. La diferencia de densidad entre una nebulosa a la cual se le cree apta para formar una estrella (por ejemplo, un glóbulo de Bok) y una estrella es del orden de 10^{20} veces [27]. Es, pues, motivo de suspicacia con respecto a la validez de la teoría de HAYASHI el que nadie haya podido observar, ya no digamos el susodicho proceso contractivo, sino al menos estados intermedios de densidad entre una nube molecular y una estrella.

Antes bien, lo único que ha sido detectado en el universo son procesos que testifican con asiduidad la decadencia y la expansión de la materia: las asociaciones

estelares, las regiones UCH_{II}, los flujos moleculares, los profusos procesos de pérdida de masa de las estrellas del tipo T Tauri y de las estrellas jóvenes O-B, los objetos HH, las envolventes de las novae, las remanentes de las supernovas, las nubes planetarias, las ráfagas estelares, las eyecciones galactocéntricas. [7]

De otra parte, los prospectos más prometedores para detectarse el tan buscado colapso, están muy lejos de manifestar síntomas de tal proceso. Hemos aducido el caso del glóbulo B335 como probable prueba a favor del modelo del colapso gravitatorio. Sin embargo, cabe argüir que antes que detectarse en este glóbulo el colapso de material, han sido encontrados indicios de expansión del sistema [112]. Claro que podría ser argumentado que la expansión es debida a la energía que la protoestrella inyecta, desde el centro de la nube, a las capas circunvecinas. Mas vale contrargumentar sobre cómo es que dominan, *absolutamente* en cuanto a la apariencia exterior se refiere, fenómenos expansivos en sistemas que, supuestamente, deberían hallarse en pleno colapso.

Recientemente, fueron descubiertas cinco estructuras nebulares que son, por mucho, las nebulosas moleculares más pequeñas que son conocidas. Estas nubes poseen un diámetro de entre 0.1 y 1 pc, masas de 0.02 a 1 M_⊙ y temperatura $\leq 20^{\circ}\text{K}$. Así, dichas estructuras son los candidatos más fuertes de los cuales esperar sea observable el colapso. Sin embargo, a juzgar por los vientos de alta velocidad asociados a ellas, dichas nebulosas sufran una flagrante proceso de dispersión. [114]

AMBARSTUMIAN [7], desde hace ya más de 30 años, ha sostenido la opinión de que las estrellas no se forman por el colapsamiento de sistemas gaseosos de baja densidad, sino que, por el contrario, tanto las estrellas como las nubes moleculares son productos de la transición de cuerpos muy densos (protoestrellas, digamos) a formas más difusas. AMBARSTUMIAN [7] basa esta sugerencia en el hecho de la sola presencia de fenómenos de expansión y decadencia a lo largo del universo observable. A tal hipótesis se le ha nombrado como el *abordamiento observacional* sobre la formación de las estrellas.

Existe el consenso entre los astrónomos de que la fase temprana de toda estrella está caracterizada por su inestabilidad, fase en la cual siempre existe emanación de materia. Esta conclusión está sustentada en la identificación de flujos de materia que, al parecer, son pérdidas de masa por parte de las estrellas O-B jóvenes ($\sim 10^{-5}$ – 10^{-6} M_⊙/año) y de las T Tauri ($\sim 10^{-6}$ M_⊙/año). De acuerdo con lo que colige AMBARSTUMIAN [7], las nubes moleculares asociadas a estas estrellas son el producto de

tal actividad de decadencia^{15}. Consistente con tal suposición es el hecho de que los vientos estelares, además de aportar elementos ligeros al medio circunestelar, contribuyen con ciertas cantidades de polvo y de otro tipo de sustancias, de tal suerte que, en principio, el modelo de la decadencia y eyección está en condiciones de dar cuenta de la compleja constitución química del material interestelar. De otra parte, a las estrellas de tipo T Tauri y, en general, a las estrellas que se cree son muy jóvenes, les están asociados fenómenos de expansión como las UCHII, los objetos HH, los flujos moleculares, materia toda que podría provenir de etapas tempranas de desintegración del cuerpo protoestelar.

Evidentemente, la hipótesis de AMBARTSUMIAN implica que las nebulosas deben ser discretas: bajo este marco, el contacto entre nebulosas es concebido como un fenómeno *a posteriori*, que se efectúa por la evolución expansiva de las nebulosas; he aquí un punto con el cual la teoría convencional sobre formación estelar está en franca discordancia, y del cual quizá sea observacionalmente posible discernir entre ambas hipótesis. Por lo pronto, el propio AMBARTSUMIAN ha establecido que, con base en el estudio de distribución de las nubes moleculares, debe ser concluido que el material interestelar es, fundamentalmente, discontinuo [7].

Un punto del que está lejos de dar cuenta la teoría de la contracción es el fenómeno de las nebulosas cometarias. La morfología de tales nebulosas sólo es explicable bajo la premisa de que existe un flujo de materia desde la estrella relacionada hacia el exterior [38]. Es claro que la teoría de la contracción no puede asimilar tal observación: ¿cómo explicar que una estrella joven, que supuestamente sigue en contracción, tenga acoplado a la vez un proceso de emanación de materia? AMBARTSUMIAN [7] opina que tal fenómeno es fácilmente explicable si se recurre a la hipótesis de expansión y decadencia.

Un dato muy interesante sobre la teoría de la expansión y decadencia está relacionado con los objetos HH y los máseres de agua. Se cree que los objetos HH provienen de la evolución de los máseres de agua, los que a su vez provienen de la excitación de gas debida al denso hábito radiativo liberado por un cuerpo masivo. La hipótesis de

{15} El origen del total del espectro de material interestelar es explicable, según AMBARTSUMIAN, mediante una vasta gama de procesos de decadencia y eyección, procesos tales como los fenómenos nova, las nebulosas planetarias y los eventos supernova.

AMBARTSUMIAN [7] establece que los máseres son el primer producto de la decadencia de las protoestrellas. Luego entonces, detectar máseres de agua puede ser el estar observando la fase más temprana del nacimiento de una estrella. No existe, bajo los términos de esta hipótesis, veda observacional de esta fase de la evolución estelar.

En el marco de la hipótesis de la decadencia ha sido postulado, en virtud de que nunca se les ha detectado, que los cuerpos primordiales de los cuales derivan las estrellas y el material interestelar son de bajísima luminosidad, de dimensiones muy pequeñas y de ingentes densidades energéticas. Con estas características, queda agotado el conocimiento que se tiene sobre estos hipotéticos cuerpos protoestelares. AMBARTSUMIAN [7] es de la idea de que las leyes físicas y químicas que rigen la evolución de estas protoestrellas, son leyes completamente desconocidas. *Mysterium magnum ex kosmo*. Por demás está decir que esto choca con el pensamiento científico moderno. Es postulada la existencia de cuerpos inasequibles, al menos por el momento, mediante la observación; pero no sólo éso: tales cuerpos son del todo inescrutables mediante las herramientas teóricas que poseemos.

Fascinante resulta la hipótesis de AMBARTSUMIAN en el sentido de involucrar leyes y situaciones físicas completamente nuevas y desconocidas. Desconcertante y desmotivante desde el afirmar que tales leyes y situaciones están más allá de las posibilidades actuales de indagar.

Para finalizar esta sección, deseo hacer mención de una ruta de evolución para estrellas pre-Secuencia Principal de baja masa, la cual ha sido determinada exclusivamente del análisis de datos empíricos.

El principal criterio para definir a una *estrella ráfaga* es el súbito aumento de luminosidad, hasta de 10 magnitudes, en períodos de segundos o de minutos [85]. HARO demostró que muchas de las características de las estrellas ráfaga son traslapables con características de las estrellas de tipo T Tauri [6,84,85,86,87]:

(1) Durante los períodos de máxima luminosidad («rafagazo»), el espectro de las estrellas ráfaga es prácticamente indistinguible del de las estrellas de tipo T Tauri.

(2) Estrellas T Tauri componentes de asociaciones estelares muy jóvenes, presentan, sobrepuesto al comportamiento de variables erráticas, el fenómeno de rafagazo en forma por demás conspicua.

(3) En todo cúmulo estelar donde estén ubicadas estrellas de tipo T Tauri, también serán encontradas, invariablemente, estrellas ráfaga, y

(4) El patrón de distribución espacial de las T Tauri

es similar al de las ráfaga. Esto es, la densidad respectiva es mayor en el centro del cúmulo estelar.

En suma, HARO [87] puntualizó que las estrellas de tipo T Tauri y las ráfaga pertenecen a un mismo grupo, siendo que sus diferencias son en virtud de hallarse en diferente grado de evolución. En opinión de HARO, las estrellas de tipo T Tauri tienden a perder gradualmente sus propiedades características, para transitar a una forma propia de las estrellas ráfaga, mismas que representan el último paso evolutivo, antes de pasar a poblar la banda de la Secuencia Principal^[16].

El establecimiento de esta secuencia evolutiva derivó en argumentos y contrargumentos referentes a las dos hipótesis sobre la formación de los cuerpos estelares. POVEDA [151] encontró que si es trazada una curva que una los puntos de intersección de la ruta puramente convectiva con la ruta puramente radiativa para estrellas de diferente masa, resulta que la línea tangente vertical a esta curva cae en el tipo espectral K_1 . Este hallazgo resulta en asombrosa coincidencia con el hecho de que, como todo lo parece así indicar, el inicio del período de estrella ráfaga de una protoestrella coincide con el tipo espectral K_1 [85]. Sin embargo, aún no se tiene idea de cómo conectar causalmente la transición de la fase convectiva a la fase radiativa de una protoestrella, y el que ésta comience a manifestar propiedades de las estrellas ráfaga. Sin forma teórica de explicar tal conexión, el descubrimiento de POVEDA no supera la categoría de coincidencia.

En alguna ocasión había sido argumentado que la posición en el diagrama H-R [91] y las características globales de las estrellas de tipo T Tauri [132] coinciden con la posición y las características de las gigantes y de las supergigantes rojas [91] (cuya zona la hipótesis del colapso establece, precisamente, para las protoestrellas). Sin embargo, posteriormente fue demostrado que las T Tauri, a más de poblar la zona de las estrellas frías y superluminosas, se dispersan profusamente por otras zonas del diagrama H-R, incluso en y hasta por debajo de la

[16] La razón por la cual HARO concluyó que las estrellas ráfaga representan una fase más tardía en la evolución pre-Secuencia Principal que las de tipo T Tauri es muy simple: estrellas de tipo T Tauri que puedan ser consideradas «típicas» de su género, son inexistentes en cúmulos de edad mayor a un millón de años, en tanto que en esos mismos cúmulos son aún detectable estrellas ráfaga «típicas». De otra parte, mientras más joven la T Tauri, menos conspicuo el fenómeno del rafago. [86]

Secuencia Principal [85].

Un argumento más a favor de la hipótesis de HAYASHI que a la postre fue refutado, se refiere al rafagazo que teóricamente sería de esperar que sufriera toda protoestrella en algún momento durante de su gestación [92]. HAYASHI argumentaba que de ello derivan sus fenómenos de rafagazo estrellas del tipo UV Ceti, las cuales posteriormente fueron consideradas como prototipos de las estrellas ráfaga. Es evidente que la proposición de HAYASHI es insostenible. Es prácticamente seguro que tales tipos de estrella sufren en más de una ocasión el fenómeno del rafagazo. Además, representan una etapa tardía (posterior a la de la fase T Tauri) en la ruta hacia la Secuencia Principal, en tanto que en la hipótesis del colapso es establecido que el rafagazo ocurre a los 100 días de iniciado el colapso [92].

§2.3.

EN LA SECUENCIA PRINCIPAL

De entre los muchos puntos que dan realce a la significancia histórica del diagrama H-R, se distingue la trascendencia de éste como punto de partida de la primera disquisición en torno a la evolución de los cuerpos estelares. En efecto: RUSSELL, en 1913, edificó una hipótesis sobre la evolución estelar, la primera en su género, con la cual hizo propósitos de encontrar un sentido evolutivo global al espectro de distribución de los astros en el diagrama H-R, hipótesis que, *grosso modo*, versa lo siguiente [11,12]: una ingente y fría nube de gas y de polvo cósmico, por alguna circunstancia, comienza a colapsarse gravitatoriamente. Este proceso, en tanto que se mantiene progresivo, aumenta la temperatura del sistema, provocando que en cierto momento la nube comience a radiar: primero con el pico de radiación en la región del infrarrojo, después, en la del rojo. La estrella comienza así su existencia como una supergigante infrarroja, que por el calentamiento y la disminución de su tamaño, discurre hacia una gigante primero, enana después, del tipo rojo. Siempre encauzada por el colapso gravitatorio, la temperatura continúa en incremento, por lo que el astro se desplaza paulatinamente a lo largo de la Secuencia Principal, hasta alcanzar la fase de gigante azul.

In promptu, cuando la estrella como gigante azul plenamente manifestándose esta, el proceso contractivo es bloqueado. A tal extremo la estrella ha sido compactada, que ha derivado en un cuerpo «solidificado», siéndole ya imposible continuar con el proceso de colapsamiento.

Todo cuerpo no adiabático, caliente con respecto a su entorno y desprovisto de fuente interna de energía, tiende espontáneamente a enfriarse. Atado su sino a este principio, la estrella, ya sin más posibilidad de transformar energía gravitatoria en energía térmica, pierde sistemáticamente temperatura y, consecuentemente, brillo; toca al astro por tal hado desandar el camino que había recorrido, en su época juvenil, a lo largo de la Secuencia Principal. Inexorablemente, el enfriamiento le conduce hacia la zona de las enanas rojas y, en su postrer forma, a la de las enanas negras.

A este singular esquema evolutivo se le conoce como la *Teoría del Deslizamiento de la Evolución Estelar*. Con los conocimientos —que en breve discutiremos aquí— que surgieron a partir de la siguiente década a la que fue propuesta esta hipótesis, fue revelada como inconcebible la posibilidad de que una estrella con las características propias de las de la Secuencia Principal, pueda transitar de un lado a otro de esta secuencia, o de que toda enana roja represente una fase muy temprana, o bien una muy tardía, en la evolución de los cuerpos estelares, o de que las estrellas giganteazuladas estén a punto, si no es que logrado lo han, de solidificar su núcleo, o de que la fuente energética de las estrellas sea la conversión de energía gravitatoria en cinemática.

Efectivamente, como lo marca el intento visionario de RUSSELL, en el diagrama H-R es posible trazar líneas generales de la evolución estelar. Esto es algo casi intuitivo. Por ejemplo, es claro que aún cuando no existen zonas prohibidas en el diagrama [175], la conspicua tendencia estadística de las estrellas por ocupar preferentemente ciertas zonas, no puede ser incidental. Una conclusión obvia es que si el 99% de todas las estrellas caen en la Secuencia Principal [12], significa que los astros pasan la mayor parte de su vida ubicados en ésta. Sin embargo, las líneas evolutivas tan afanosamente buscadas por RUSSELL son en realidad ajenas a las propuestas en la Teoría del Deslizamiento; sucede, además, que no son de naturaleza tan evidente como de primera mano pudiera ser pensado.

Las estrellas evolucionan. Tal escolio se deriva de la simple contextualización del intercambio energético neto de las estrellas con su entorno, en el ámbito de la segunda ley de la Termodinámica. No existe razón, ni mucho menos, que haga constar que un sistema abierto y refulgente no deje a la sazón de radiar —a no ser, por supuesto, que sea asistido por suministros energéticos provenientes del exterior. Y si bien es cierto que una estrella recibe energía desde el exterior, sea en forma continua a través de la absorción de la radiación que le alcanza proveniente de

otros cuerpos brillantes, o ya porque eventualmente captura materia de su entorno próximo inmediato, es, por otro lado, que su colosal tasa de radiación provoca un balance neto que le marca una intensa decadencia energética.

Todavía a principios del S. xx pululaban dentro del ámbito científico sendas incertidumbres y regias desorientaciones al respecto del cómo y del por qué la gran mayoría de estrellas brillan en forma tan pródiga, sin que con el tiempo sean sensibles, al menos a escala humana, decrementos de las tasas de radiación. Consecuentemente, no menor caos y oscuridad reinaban en la atmósfera del conocimiento sobre la evolución estelar.

Por esa época sufría una aguda crisis de credibilidad una hipótesis confeccionada por H. von HELMHOLTZ, la cual, sólo medio siglo antes, había pasado por ser un fuerte prospecto en punto de la solución del enigma del suministro energético estelar. Esta hipótesis, en su línea toral, argumentaba que el Sol y demás estrellas deben el sostén de su radiación al orden contractivo generado en virtud de su gravedad. Von HELMHOLTZ advirtió que el trabajo suscitado por llevar una capa de materia de grosor dr y de masa $dM(r)$, desde el infinito hasta un radio r es [174]

$$d\Omega = \frac{-GM(r)dM(r)}{r}, \quad (2)$$

de donde se sigue que la energía potencial liberada por una masa estelar de radio R es

$$\Omega = -G \int_0^R \frac{-GM(r)dM(r)}{r}. \quad (3)$$

Dada esta relación, y considerando los parámetros solares actuales ($R_{\odot} = 6.9399(7) \times 10^{10}$ cm, $M_{\odot} = 1.989(2) \times 10^{33}$ g [4] y la distribución de densidades), von HELMHOLTZ derivó el valor de $\Omega_{\odot} \sim 6.6 \times 10^{48}$ erg como el total del trabajo que ha construido el Sol, a expensas del campo gravitatorio, desde que comenzara a contraerse hasta haber logrado su estado actual.

Antes de von HELMHOLTZ, las pesquisas teóricas para dar cuenta de la fuente energética de la que se vale el Sol para sostener luminosidad tan grande ($L_{\odot} = 3.826 \times 10^{33}$ erg/seg), habían resultado fútiles. En cambio, la propuesta de von HELMHOLTZ hizo posible postular el suministro apropiado para que el Sol haya rutilado con constancia durante

$$\frac{\Omega_{\odot}}{L_{\odot}} = \frac{6.6 \times 10^{48} \text{ erg}}{3.8 \times 10^{33} \text{ erg/seg}} \sim 5.5 \times 10^7 \text{ años.}$$

Para el pensamiento reinante en 1854, año en el que vio la luz esta hipótesis, el intervalo temporal rendido fue altamente satisfactorio. Sin embargo, los importantes progresos que poco después fueron logrados en Biología acerca de la comprensión de la evolución de los seres vivos, y en Geología sobre los procesos geomórficos, derrocaron la hipótesis de la gravedad como fuente energética primordial a lo largo de la historia de los astros. Y es que para el caso resultó insoslayable apelar a procesos energéticos que permitan una vida muchísimo más elongada para el Sol⁽¹⁷⁾.

Desde mediados de la década de los 1920's comenzó a ser forjada una idea bastante precisa sobre qué es, cómo se desarrolla y cuál es el sino último de una estrella de la Secuencia Principal. El logro de tal empresa está indisolublemente vinculado a 4 nombres: EDDINGTON, primer científico en deducir las condiciones internas de los astros [56], BETHE, cuyos cálculos apuntaron a la transmutación de las especies químicas como la principal fuente energética de las estrellas de la Secuencia Principal, y HOYLE y SCHWARZSCHILD [101,166,167], quienes se encargaron de forjar la lanzadera que después propulsionara diferentes consideraciones para la elucidación de las etapas estelares *post*-Secuencia Principal.

Absolutamente todos los estudios en punto de las estrellas de la Secuencia Principal, parten de una premisa fundamental, a saber: ante todo, una estrella de la Secuencia Principal es una ingente masa de gas incandescente que cumple con ciertas formas de estabilidad. Una de tales formas, plasmada en la ecuación del equilibrio hidrodinámico desarrollada por EDDINGTON [56], reside en el exacto balance que se entabla entre la presión gravitatoria y las fuerzas expansivas (principalmente la térmica y la radiativa) en cada punto de la estrella.

Con fines de apuntar la importancia del equilibrio hidrodinámico, supongamos por cierta la hipótesis de la formación estelar sustentada por HAYASHI [92]. Como ha sido indicado en §2.2, una vez que una nebulosa se involucra en un proceso contractivo, sus partículas, por la aceleración que les imprime la caída gravitatoria, producen energía térmica. Aproximadamente la mitad del potencial gravitatorio

(17) No obstante, la hipótesis de VON HELMHOLTZ se figuró tan atractiva, y el conocimiento sobre los astros era tan vago, que aquella perduró en la estima de los científicos por algunos decenios. Mirándolo bien, la Teoría del Deslizamiento de la Evolución Estelar hizo de la hipótesis de la contracción su principal marco teórico.

converso se conserva dentro de la estrella; la fracción complementaria se pierde en forma de radiación [168]. Toda vez que paulatina y sistemáticamente se acrecienta el nivel energético de la estrella, se consolida en ésta un cada vez más efectivo agente de frenado del proceso contractivo.

Las zonas internas de la protoestrella, por ser las de más pronta evolución, conquistan temperaturas mucho mayores que la concha envolvente. De manera que mientras se desarrolla el colapso, se diferencia un gradiente térmico que es inverso al radio, y que, a su vez, corresponde en forma directamente proporcional al gradiente de la presión gravitatoria. (Cabe recordar que no sólo la aceleración diferencial es responsable de tal estratificación; otros factores, como el decremento de los movimientos convectivos, el incremento de la absorción de fotones estibado en el aumento de la densidad, y la intensificación de la dispersión luminica por parte de los electrones libres, favorecen ampliamente el gradiente térmico^[18]).

Siguiendo el colapso de la protoestrella, es de esperarse el momento en el cual la presión térmica y la radiativa sean capaces de nulificar —balancear—, en cada punto, la presión ejercida por el campo gravitatorio, *id est*,

$$\frac{dP}{dr} = \frac{-GM(r)}{r^2} \rho \quad (4)$$

Logrado este estado, se dice que la protoestrella (a la que es más propio llamarle ya estrella) se encuentra en equilibrio hidrodinámico. Evidentemente, las condiciones específicas en las que se levanta este orden de equilibrio pueden variar ampliamente de un astro a otro [168]. El momento angular, el campo magnético y la composición química

[18] Cálculos realizados sobre la transferencia de energía radiativa dentro del Sol indican que un fotón generado en la zona central demora ~300 años en alcanzar la superficie. Esta dilación es comprensible si es considerado que cada fotón es absorbido y reemitido, azarosamente, 10²⁰ veces, antes de que logre abandonar al Sol [131]. Este fenómeno es, a lo largo del Sol, un excelente aislante térmico; con base en ello es dado explicar por qué en sólo un radio solar de distancia es posible encontrar un rango de temperaturas de 5770 a 1.5x10⁷°K.

El valor de la temperatura central es derivado de la ecuación de la transferencia energética (o su inverso, la opacidad) que fue desarrollada originalmente por EDDINGTON [56].

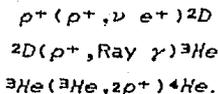
son factores que pueden otorgar su influencia para que el equilibrio se suscite en tales o cuales condiciones de densidad y de temperatura. No obstante, el factor primordial en este rubro es la masa. La masa determina la presión gravitatoria «bruta» del sistema, y es, por tanto, la responsable primaria de dictar los requerimientos específicos para la satisfacción del equilibrio hidrodinámico. [54]

Aún después de alcanzado el equilibrio mecánico dictado en la ecuación (4), la vida de una estrella sigue siendo un constante bregar contra su campo gravitatorio. Si una estrella fuera un sistema que no sufre de pérdidas de energía, al alcanzar el equilibrio hidrodinámico lograría un estado sempiterno. Mas siendo todo lo contrario, la estrella debe recurrir a cambios internos para aliviar el decremento energético debido a la radiación emitida desde su superficie, y, de esta manera, poder mantener a raya a la presión gravitatoria. Si bien aún le es posible generar más energía mediante el proceso contractivo, un astro en equilibrio hidrodinámico, por un largo tiempo, la mayor parte de su vida, adopta como suministro un proceso mucho más energético, que no le provoca, mientras éste perdura, variaciones drásticas en sus parámetros globales. Tal proceso es la generación de energía termonuclear.

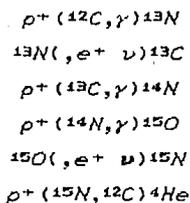
BETHE y VON WEIZSÄCKER encontraron que en el discurrir del colapso protoestelar, una vez que la temperatura central supera el valor umbral de $1.9 \times 10^7 \text{K}$, se igniciona la fusión de hidrógeno en helio. Dependiendo de la masa y de la composición química de la estrella, esas condiciones pueden presentarse incluso mucho antes de que haya sido alcanzado el equilibrio hidrodinámico. Ulteriormente, cuando el equilibrio hidrodinámico es alcanzado, queda definida la tasa de generación de energía bajo la cual la estrella transcurre en la Secuencia Principal (10). [168]

La ruta específica de transmutación de hidrógeno a helio que se sigue en los centros estelares depende de la masa particular de cada astro. Para las estrellas de la Secuencia Principal con masa similar a la del Sol, el proceso predominante es el de la cadena $p^+ - p^+$ [185]:

{10} De acuerdo con los cálculos que se obtienen a partir de las ecuaciones de EDDINGTON, cualquier estrella con masa mayor que $0.07 M_{\odot}$ es capaz de propiciar una temperatura central adecuada para la gestación de reacciones de fusión nuclear (174).



En cambio, en las estrellas masivas, propiciado por las altas temperaturas centrales que se alcanzan dentro de aquellas, se entabla un proceso de fusión mucho más eficiente, en el cual el carbono, el nitrógeno y el oxígeno fungen como catalizadores. A tal proceso se le conoce como el *ciclo del carbono* o el proceso *cCNO* [16,17]:



Desde que en la protoestrella comienzan los procesos de fusión nuclear, aquella adquiere valores de radio, de temperatura y de luminosidad que semejan mucho a los de una estrella de la Secuencia Principal con la misma masa. Una vez que alcanza el equilibrio hidrodinámico, lo cual coincide con el arribo a la Secuencia Principal, se considera al cuerpo como una estrella propiamente dicha.

El cambio en composición química que sufre la estrella en forma paulatina, en virtud de la combustión de hidrógeno y de la emergencia de helio, le conduce, *a fortiori*, a la consecución de nuevos estados para que sea satisfecho el equilibrio hidrodinámico. Como la abundancia de hidrógeno en las zonas centrales disminuye progresivamente, la estrella debe compensar la variación contrayéndose, para que la tasa de generación de energía global logre contrarrestar en todo momento a la presión gravitatoria.

La ecuación (5) es una relación donde está expresada la dependencia teórica de la luminosidad, en donde ϵ_0 es la tasa de producción de energía local, $f(\omega)$ es una función de la composición química a través del tiempo, ρ es la densidad y ν es una constante que adquiere el valor de 4 cuando el proceso de fusión predominante es el de la cadena $p-p$ o el de ${}^16-22$ cuando lo es el del *cCNO* [168].

$$L = \int_0^M \epsilon_0 f(\omega) \rho T^\nu dM r. \quad (5)$$

El seguimiento de esta relación ha revelado que con el

tiempo, la luminosidad total y el radio de una estrella durante su estancia en la Secuencia Principal aumentan «ligeramente» [174]. Esto es debido a que en la contracción requerida para aumentar la temperatura y la densidad centrales a valores adecuados para la generación de energía suficiente para sostener el equilibrio hidrodinámico, no participan todas las capas estelares, sino sólo las centrales. Al contraerse éstas, y elevar, por tanto, su temperatura y la cantidad de energía que emanan hacia el exterior, las capas envolventes se calientan y se expanden, lo que determina el aumento de la luminosidad. (Esto resulta consistente con el diagrama observacional de la figura 2.4, en donde se manifiesta que la Secuencia Principal es en realidad una franja).

Para finalizar esta sección, hagamos una acotación. La tasa de radiación no depende de la tasa de reacción nuclear, ni viceversa. Ambos factores están supeditados, en última instancia, a la masa total del astro. Se tiene que para dos estrellas de diferente masa, la más masiva sufre de requerimientos más altos para lograr el equilibrio hidrodinámico, lo que se traduce en mayores tasas de combustión nuclear y en el desplegamiento, por tanto, de un más acusado gradiente de presión, del cual depende en forma directa el gradiente de temperatura, factor que a su vez es el principal responsable de la luminosidad [168].

La función masa-luminosidad de una estrella está dada por

$$L \propto M^n$$

(6)

Esta relación es una forma empírica en donde $n=1.6$ para estrellas de masa semejante a la del Sol, y $n=5.4$ cuando se trata de estrellas muy masivas [131]. El que n sea mayor que una estriba en que las exigencias del equilibrio hidrodinámico crecen en forma exponencial con el incremento de la masa. Por lo que respecta al cambio abrupto del valor de n , su causa reside en que las estrellas masivas desarrollan conspicuos núcleos convectivos [174] que facilitan el transporte hacia el exterior de la energía generada termonuclearmente, a más de sufrir pérdidas considerables de energía vía emisión de neutrinos [16] y de desarrollarseles predominantemente procesos de fusión dirigidos por el «CNO» [174].

Así las cosas, el mayor requerimiento energético para el equilibrio hidrodinámico determina, por otro lado, que las estrellas masivas consuman su dotación de hidrógeno en una tasa mucho más pródiga que las estrellas poco masivas. Esto es razón por lo que la vida promedio de las estrellas en su fase de combustión de hidrógeno descienda en forma

exponencial con la masa, en concordancia con la ecuación (6).

§2.4.

LA ALQUIMIA ESTELAR

¿Y una vez que en el centro estelar decaiga la abundancia de hidrógeno al grado de que ya no sea posible generar energía termonuclear a partir de la transmutación de hidrógeno a helio? Al astro poca vida como cuerpo energénico le restará. La implacable presión gravitatoria le exigirá el colapso, provocándole, por ende, mayores niveles de densidad y de temperatura centrales, hasta ocasionar la ignición de especies químicas más pesadas, las cuales pronto serán consumidas, suscitándose por tanto un nuevo colapso que engendrará las condiciones requeridas para la incineración de especies químicas aún más complejas, mismas que al consumirse..... y así. Empero, la fusión de núcleos atómicos, principal proceso radiagénico de las estrellas, es, por naturaleza, finito: por un lado, taxado por una cantidad finita de materia prima; por otro, avenido a un escalafón de posibles reacciones nucleares exoenergéticas cuya cota máxima es la formación de los núcleos más estables de la naturaleza (esto es: especies semejantes al ^{56}Fe [185] a partir de los cuales es infactible generar más energía). La consecución de esta cota será lograda, una vez la estrella abandona la Secuencia Principal (i.e., cuando en el núcleo de la estrella ha sido incinerado casi por completo la dote inicial de hidrógeno ($X < 0.02$) [96]), en tiempos relativamente cortos (10^7 - 10^8 años, a lo sumo). La razón de ello habita en la circunstancia de que la energía liberada por la fusión nuclear de reactantes transhidrogenoceanos es apenas una pequeña fracción de la generada mediante la cadena $p^+ - p^+$ o mediante el αCNO , de manera que las reacciones nucleares ulteriores a las de la Secuencia Principal, para alcanzar niveles de producción energética equivalentes a los logrados a través de la combustión de hidrógeno, deben desdoblarse a un ritmo muy acelerado relativo al consumo de aquél [131].

No siempre ha de cumplirse que el fenecimiento de una estrella acaezca cuando el astro alcanza una muerte termodinámica. O en otras palabras: no todas las estrellas llegan a agotar su potencial energético. El sino de toda estrella queda delineado, casi en su totalidad, por la propiedad más importante de los cuerpos celestes: la masa. Las estrellas de poca masa (o estrellas de masa solar ($M \leq 1.4 M_{\odot}$)), antes que agotar sus reservas termonucleares, logran estados de densidad suficientes como para sostener su

propio peso por siempre [40]. El gran peso gravitatorio de las estrellas de gran masa, por el contrario, obliga a éstas a consumir completamente su combustible nuclear [117].

Más aún: si la masa rebasa ciertos valores umbrales ($M > 8-10 M_{\odot}$), la estrella termina derrumbándose ante su propia presión gravitatoria, para alcanzar estados de densidad máximos de la materia, a más de sufrir un virulento fenómeno explosivo. [137]

Consideremos, primeramente, el caso de la evolución de estrellas de masa solar, para después pasar revista a la evolución de las de masa intermedia (i.e., $1.4 M_{\odot} < M < 8-10 M_{\odot}$) y, finalmente, a la de las estrellas muy masivas.

HOYLE y SCHARWZSCHILD [101], siguiendo el trabajo de este último y de SANDAGE para una estrella de masa $M = 1.3 M_{\odot}$ [163], establecieron que la ruta evolutiva *post*-Secuencia Principal está distinguida por el paulatino, aunque veloz, desplazamiento del astro hacia la región de las gigantes rojas (*rama de las gigantes rojas*) (figura 2.6). Desprovista del proceso de fusión de hidrógeno —que hasta el momento había fungido como la fuente principal de energía cinemática para sostener el equilibrio hidrostático—, la estrella nuevamente se contrae por causa de su presión gravitatoria. El rápido colapso suscita un brusco incremento de la temperatura central, por lo que las capas envolventes son calentadas a punto de que comienzan a expandirse y, consecuentemente, a enfriarse: de allí que en el diagrama H-R sea observado el desplazamiento de la estrella hacia la derecha, amén del incremento de su luminosidad, en vista del aumento de temperatura central. [101]

El colapso engendra tan acusado incremento termal en el centro de la estrella, que en la envolvente inmediata al núcleo, la cual es aún rica en hidrógeno, son propiciadas las condiciones energéticas para que el hidrógeno comience a arder. Esta delgada envolvente «alimentará» sostenidamente, en lo sucesivo, de helio «fresco» al núcleo estelar. El núcleo estelar, por su parte, al mantenerse inerte, desarrolla la degeneración parcial de los electrones que contiene, manteniendo así su propio peso [20].

[20] Hasta aquí hemos concedido a la presión térmica el papel principal en la oposición física que desarrollan los cuerpos estelares para contrarrestar el colapso gravitatorio. Esto es prácticamente cierto en las primeras fases estelares. Empero, el aumento de densidad sufrido por la estrella a lo largo de su evolución *post*-Secuencia Principal, conlleva a que, gradualmente, en el centro

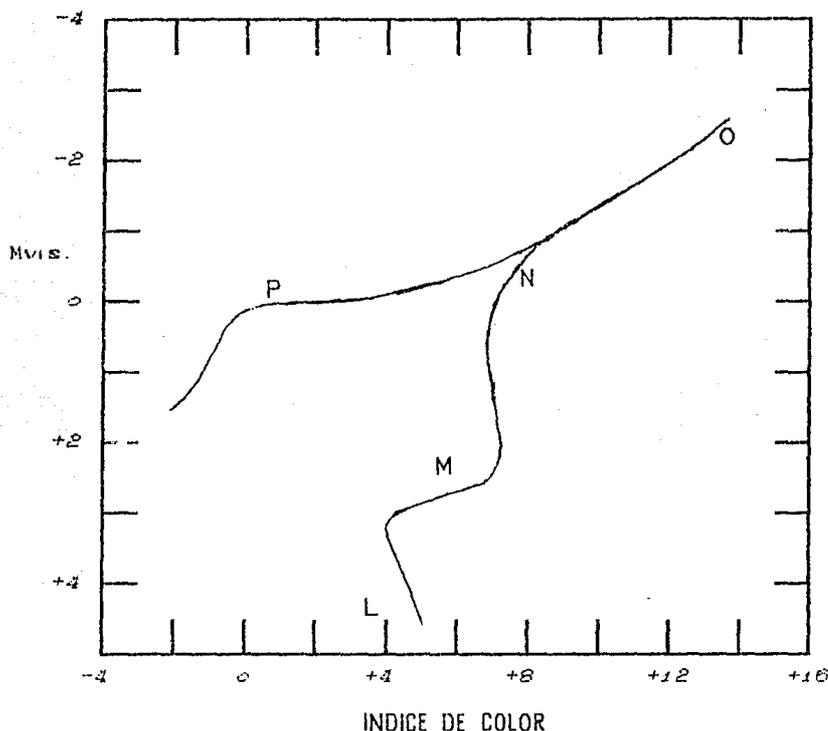


FIGURA 2.6. Diagrama esquemático Hertzsprung-Russell para un cúmulo globular. Las letras en el gráfico indican los puntos de inflexión en la ruta de una estrella por la rama de las gigantes rojas (ver el texto para explicación). (Tomado de ROYLE y SCHWARZSCHILD [101]).

estelar adquiere mayor importancia otro factor anticolapsante: la presión degenerativa de los electrones libres (P_{e^-}). Esta presión adicional, que equivale a $\sim n_e kT^{2/3}$ (donde n es la densidad electrónica), no es otra cosa que una expresión tangible del principio cuántico de exclusión establecido por PAULI. En efecto, la presión degenerativa de los electrones es el fenómeno físico por el cual un electrón se opone a poseer los mismos atributos cuánticos que otro cualesquiera electrón [131].

De lo anterior, la estrella transcurre del punto L al punto M en la rama de las gigantes rojas (figura 2.6). La evolución de M a N comparte básicamente los mismos procesos manifiestos en el trayecto $L-M$. El punto de inflexión M ocurre, no obstante, debido a que a lo largo de la estrella, en virtud de la expansión y del enfriamiento de la envolvente y del colapso y del calentamiento del centro, se desarrolla un pronunciado gradiente térmico que deriva en la presencia de amplias zonas convectivas, factor que hace más eficaz el transporte energético hacia el exterior.

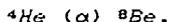
Llegada que ha la estrella a la vecindad de N , su núcleo sufre un súbito aumento de temperatura. La razón de ello es lo siguiente. En el discurrir del tiempo, la densidad de la envolvente en donde se consume el hidrógeno disminuye sistemáticamente. Alrededor del punto N , la densidad de esta envolvente ha disminuido hasta un nivel crítico, en el cual es requerido el aumento del ritmo en el consumo de hidrógeno para poder contrarrestar el peso gravitatorio de las capas que no generan energía termonuclear. El incremento del ritmo se logra por el aumento de temperatura del centro, aumento devenido de la presión transmitida desde las capas envolventes a través de la capa de hidrógeno ardiendo, una vez que ésta se vuelve incapaz de mantener el equilibrio hidrostático.

Para una estrella de masa similar a la del Sol, HOYLE y SCHARVZSCHILD encontraron que la transición de L a O toma efecto durante ~24 millones de años, intervalo al final del cual los parámetros de la estrella quedan sumamente alterados con respecto a los que poseía en el estadio de Secuencia Principal [101,167]: la temperatura central incrementada a 80 millones de grados, el radio engrandecido hasta por un factor de 100, la densidad global duplicada, y la luminosidad mil veces más intensa.

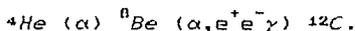
HOYLE y SCHARVZSCHILD [101] apuntaron la posibilidad de que cuando la estrella arribe al pico de la rama de las gigantes rojas (punto O), la temperatura central raye los $\sim 3.5 \times 10^8$ K y la densidad central sea de $\sim 10^5$ g/cm³, impulsándose así por vez primera la combustión de helio [21].

{21} La fase de combustión de helio es, en escala cósmica, bastante efímera: si acaso, perdura 10^7 años (105). Esto es de esperarse si es tomado en cuenta que la eficiencia de la producción energética del proceso de combustión de helio es apenas el 9% de la lograda en el proceso de la cadena protón-protón [12]. Por otra parte, ya que la temperatura central en la fase de consumo de helio es mucho mayor que en

Bajo estas condiciones, los núcleos de ${}^4\text{He}$ se desplazan con una velocidad tan grande, que es factible que franqueen su repulsión coulombica:



Como fue señalado en el capítulo anterior, el modelo de la Gran Explosión establece que en la fase nucleosintética acontecida tempranamente en el universo, las condiciones físicas no fueron las adecuadas como para superar la zanja del ${}^7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$ y ${}^{11}\text{B}$. No obstante, en el núcleo de una estrella ubicada en el extremo superior de la rama de las gigantes rojas, tal zanja no significa mayor cosa. La frecuencia de colisiones entre los núcleos atómicos es lo suficientemente alta como para que al inestable y efímero ${}^8\text{Be}$, antes de que decaiga radiactivamente, se le anexiona una partícula α para constituir un núcleo de ${}^{12}\text{C}$:



A este proceso, por razones obvias, se le conoce como el proceso *triple α* (3α) [17], aunque su nombre original es el de *reacciones de Salpeter* [16].

La ignición del helio (*flash* del helio, como suele nombrarsele) se realiza en un ambiente de materia degenerada, lo que repercute como un comportamiento, como si dijéramos, «anómalo» de las propiedades del núcleo estelar. En un estado de materia degenerada, la presión anticolapsante es función, casi exclusiva, de la densidad electrónica, manteniéndose, por ende, prácticamente independiente de la temperatura. Así las cosas, con el disparo del proceso 3α se incrementa la temperatura central de la estrella, sin que por ello el núcleo sufra de una expansión proporcional al calentamiento. De otra parte, en un marco de degeneración, la pequeña dependencia de la presión hacia el estado cinemático de la materia hace que el núcleo se expanda ligeramente; sin embargo, como puede ser fácilmente demostrado, la expansión de materia degenerada implica incremento de la temperatura, no enfriamiento [101].

En suma, al iniciarse la fusión de helio, los núcleos atómicos están enmarcados por temperaturas cada vez mayores, sin que, por compensación, existan cambios significativos de

la fase de hidrógeno, la tasa de radiación para la primera es mayor que el de la segunda; tales exigencias energéticas por concepto de disipación provocan que el helio sea consumido aún más rápido.

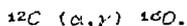
densidad. Así, la tasa de fusión nuclear se incrementa rápidamente.

Este estado de anomalía finaliza cuando la temperatura acrecienta lo suficiente como para que el núcleo abandone el estado de degeneración.

Ahora bien, una vez la materia deja de ser degenerada, la presión vuelve a depender fundamentalmente de la temperatura. Por ende, la tensión térmica acumulada en tanto el núcleo deja de ser degenerado, súbitamente es liberada, siendo transmitida a las capas envolventes, y provocando a éstas, finalmente, una rápida expansión [166].

A partir de aquí, la historia de la estrella se vuelve más compleja, caracterizada por «pulsos térmicos», por expansiones y colapsos sucesivos de las capas envolventes de la estrella, y por desarrollos de zonas convectivas responsables del mezclado de material incinerado con material rico en hidrógeno [99,105].

La súbita expansión de la envoltura disminuye la densidad de la capa de hidrógeno que ardió durante toda la rama de las gigantes rojas, hasta el grado de cesar por completo la fusión de hidrógeno. Por lo que a la zona de consumo de helio respecta, ha quedado confinada a una concha que envuelve una zona central paulatinamente enriquecida de ^{12}C y de ^{16}O , este último producto de la reacción



El gradiente térmico generado a lo largo de la estrella por la pérdida de la condición degenerada por parte del núcleo estelar, engendra amplias zonas convectivas que «dragan» material de la capa rica en productos del consumo del hidrógeno y del helio, para después mezclarlo con las capas exteriores. Suceso de relevante importancia, como veremos en breve, es que la mayoría del carbono y del oxígeno que quedan engolfados en la zona donde se encuentra ardiendo el helio, es transformado a ^{14}N .

Por su parte, la concha ardiendo de helio, también influenciada por la liberación de energía producto de la pérdida del estado degenerativo, se expande gradualmente, llegando al punto en el que el helio ya no sigue más fusionándose.

Sin apartar las reservas pertinentes, vale la afirmación de que la secuencia evolutiva apuntada hasta aquí, la sufren en forma semejante estrellas de muy diferentes órdenes de masa. Las estrellas de masa solar, una vez desarrollan un núcleo rico en carbono y oxígeno (el cual, por cierto, pronto adquiere condiciones de degeneración), logran un estado de densidad en el que les es posible sostener su propio peso sin necesidad de recurrir a

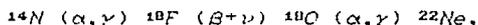
procesos exoenergéticos [40]. En cambio, estrellas de mayor masa son exigidas aún más por su gravedad, por lo que tienen que experimentar procesos más extremos para equilibrarla.

Para reseñar estadios de evolución allende de los estadios máximos de las estrellas de masa solar, consideremos una estrella de masa $M \approx 2M_{\odot}$ [98,105]. Para tal propósito, partamos del cese de combustión en la capa de helio debido a la expansión originada por el *flash* de helio:

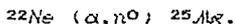
La expansión del sistema prosigue hasta que el profuso proceso de pérdida de energía experimentado por la estrella en virtud de los movimientos convectivos, logra las condiciones adecuadas para que la estrella nuevamente colapse. Como es natural suponer, con el gradual incremento de temperatura y densidad, el primer combustible en encender es el hidrógeno, el cual, durante un breve período ($\sim 10^7$ años), funge como el principal aporte energético del astro.

El helio producido por esta capa de hidrógeno ardiendo, va siendo depositado, ininterrumpida y gradualmente, en la capa rica en helio, hasta que ésta acumula la suficiente masa para la ignición de su material, generándose, así, un *pulso térmico* que provoca nuevamente la expansión de las capas envolventes. Una vez más, el hidrógeno dejará de arder; una vez más, se desarrollarán movimientos convectivos.

Uno de los sucesos relevantes desencadenados por este pulso térmico es que, a poco tiempo, el núcleo estelar, rico en carbono y en oxígeno, pasa a condiciones de degeneración. Uno más, está relacionado con el hecho de que los correspondientes movimientos de convección arrastran al ^{14}N hacia el exterior, especie que, durante el siguiente interpulso, es transmutada en ^{22}Ne ,



núcleo considerado como importantísima fuente de neutrones. En efecto, el ^{22}Ne , una vez la temperatura de la base de helio ardiendo supera los $3-3.5 \times 10^8 \text{K}$, logra franquear la barrera coulombica para experimentar un proceso α :



Esta reacción nuclear, por lo que enseguida es señalado, resulta fundamental en la historia química de las estrellas y en la del universo.

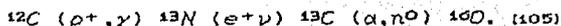
Existen diversos procesos nucleares por los cuales una especie química puede ser transformada en otra (v.gr, captura de neutrones, procesos α y 3α , procesos de equilibrio estadístico nuclear, beta decadencia (β^-), proceso foto- β). Uno de los más relevantes es, sin duda, la

captura de neutrones por núcleos atómicos preexistentes, que permite la formación de los elementos más complejos de la naturaleza. La fusión entre un neutrón y un núcleo atómico está ampliamente favorecida con respecto a, por ejemplo, la captura de protones o de partículas α , por la no entrada en escena de las fuerzas de repulsión coulombica. De hecho, más allá de la barrera de los elementos cercanos al hierro, el potencial electrostático es tan alto, que el único proceso viable para forjar especies transféricas es el de la captura de neutrones [17,185].

La captura de neutrones rinde especies de diferente índole en función del tiempo que media entre dos capturas sucesivas. Se dice que se entabla un proceso *s* (*slow*) si el tiempo entre dos capturas sucesivas de neutrones en un mismo núcleo, es mayor al tiempo que tarda éste para sufrir una β decadencia. En este caso, es favorecida la formación de los isótopos más ligeros de un elemento dado. Por el contrario, si el flujo neutrónico es lo suficientemente célere como para que antes de que el núcleo decaiga radiactivamente, sea anexionado otro neutrón (proceso *r*), el resultado serán los isótopos más pesados. Por razones de estabilidad de los productos, los procesos *s* tienen como cota máxima el $200\beta t$, en tanto que los *r* son capaces de sintetizar algunas especies transbismutanas. [17]

En virtud de los menores requerimientos para que la captura de neutrones puede llevarse a efecto incluso hasta la construcción de las especies más pesadas de la naturaleza, tal reacción puede estar presente bajo las condiciones energéticas de las estrellas *post*-Secuencia Principal, con el único requisito de que éstas sean capaces de agenciarse una fuente adecuada de neutrones y de especies químicas que sirvan de «semilla» para la forjación de núcleos más complejos. Las estrellas de masa intermedia son capaces de satisfacer tales requerimientos. Muy probablemente, la fuente de neutrones es la combustión del ^{22}Ne ; la semilla, el ^{25}Mg [22]. [105].

{22} En realidad, ha sido encontrado que en estrellas de menor masa ($M < 8-10 M_{\odot}$) existen especies frescas producto de la captura de neutrones. El candidato más fuerte en cuanto al origen de los neutrones para este tipo de estrellas es el ^{13}C , el cual, se cree, aunque todavía no es muy clara la forma por la que se podría llevar a efecto, proviene del ^{12}C , siendo la reacción global:



Existe fuerte evidencia observacional de que, efectivamente, en muchas estrellas gigantes rojas ocurren procesos de captura de neutrones. En dichas estrellas han sido detectadas diversas especies de vida media corta que sólo pueden ser confeccionadas mediante la captura de neutrones (como, por ejemplo, el ^{90}Tc , de $\tau_{1/2} \sim 2 \times 10^5$ años). Por otra parte, los modelos teóricos son concordantes con la realidad en el sentido de que predicen que los procesos s son los dominantes en estrellas de masa similar a las que aquí han sido consideradas. [99]

Para las estrellas de masa muy cercana al límite $M \approx 8-10 M_{\odot}$, se cree que los sucesivos pulsos térmicos amplían la zona convectiva hasta lograr material del núcleo estelar. De tal suerte, la superficie estelar se enriquece de carbono (fenómeno al cual deben su origen las estrellas conocidas precisamente como estrellas de carbono [15]).

Aún no han sido logrados modelos analíticos que precisen la evolución ulterior a los primeros pulsos de las estrellas de $M \approx 8-10 M_{\odot}$ [71]. No obstante, se tiene cierta evidencia de que acoplado a los procesos hasta aquí reseñados, un cada vez más intenso viento estelar se desarrolla en el astro. Se piensa que, a la postre, un régimen de superviento, cuyo fenómeno causal es desconocido, se manifiesta, provocando que la estrella pierda la capa envolvente. Al ir quedando el núcleo estelar paulatinamente al desnudo, la temperatura superficial va en incremento. Cuando ésta llega a ser de $\sim 30,000^{\circ}\text{K}$, el material eyectado (el cual aún se encuentra en expansión), es ionizado, adquiriendo el expelido las propiedades típicas de una nube planetaria [71, 173, 185].

Así las cosas, al finalizar la etapa de consumo de helio para una estrella de poca masa o de masa intermedia, el resultado es una eyección de material rico en hidrógeno, contaminado con algunas cantidades de elementos productos de los procesos $p^+ - p^+$, cNO , α , 3α y s , así como un remanente estelar que, dependiendo, entre otros factores, de la masa original, de la tasa de pérdida de masa, y de la cantidad de material eyectado en el régimen de superviento, puede ser un cuerpo (de masa generalmente mucho menor que la masa ostentada durante su estancia en la Secuencia Principal ($M \ll M_{sp}$)) constituido en su totalidad por carbono y oxígeno, o por un núcleo rico en tales elementos cubierto por una capa de helio, o, incluso, para el caso de las estrellas de masa intermedia mayor, ser un cuerpo rico en oxígeno, en neón y en magnesio (i.e., que la estrella logró la ignición de su carbono central) [105].

CHANDRASEKHAR [40] demostró que la presión degenerativa del electrón es, por sí sola, suficiente para

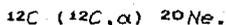
que en cierta fase sea neutralizada la tendencia colapsante de una estrella de $M \approx 1.44 M_{\odot}$ (a este valor crítico se le conoce como el límite de Chandrasekhar y se simboliza con M_{ch}). Por supuesto, la fase en la que la estrella queda hidrostáticamente definida depende de su masa. La densidad adecuada con la cual la repulsión electrónica inhibe la fuerza gravitatoria de una estrella de $M \approx 0.5 M_{\odot}$, se logra antes de que sea iniciado el proceso de fusión de helio. Las enanas de $M \approx 0.07 M_{\odot}$ no alcanzan la ignición del hidrógeno, transformándose simplemente en cuerpos oscuros [12]. Una estrella como el Sol no va más allá de la fase de combustión del helio [21].

Sin importar en qué fase sea alcanzada la estabilidad debida a la presión degenerativa, toda estrella de $M_{sp} \approx M_{ch}$ muere de una manera sosiega: en forma de enana blanca (§2.5) —a no ser, como se señala más adelante, que la estrella, de alguna manera, logre agenciar materia y superar el límite de Chandrasekhar. En cambio, la suerte de una estrella de $M_{sp} > 1.44 M_{\odot}$ depende, fundamentalmente, de la cantidad de masa perdida a lo largo de su evolución hasta alcanzar (para el caso de estrellas de $M_{sp} \approx 8-10 M_{\odot}$) la fase de *mater* de una nebulosa planetaria. Si se diera el caso de que la estrella no satisfaga la condición de $M \approx M_{ch}$, la evolución de sus constituyentes físicos y químicos le depara un discurrir en condiciones energéticas mucho más extremas que las propias de las enanas blancas. Antes de revistar las circunstancias en las cuales el remanente estelar de la combustión de helio puede superar el límite de Chandrasekhar, es pertinente dar paso a la evolución de estrellas de mayor masa.

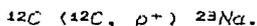
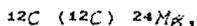
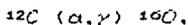
En particular, tengamos por caso una estrella de $M_{sp} \approx 20 M_{\odot}$, con el fin de reseñar la evolución máxima que puede sufrir un astro hasta que le acontece una muerte termodinámica.

En el detalle burdo, se puede decir que la evolución de estrellas muy masivas desde el abandono de la Secuencia Principal hasta la fase de gigante roja no dista demasiado de la sufrida por estrellas de menor masa [93, 117]. En efecto, aquellas, al igual que éstas, al agotar el hidrógeno en su zona central, contraen su núcleo, rico en helio (de $\sim 6 M_{\odot}$ para una estrella de $M_{sp} \approx 20 M_{\odot}$ [89, 138]), en tanto las envolventes son calentadas y expandidas. Análogamente a las estrellas de menor masa, en las muy masivas la contracción cesa cuando se logra el *flash* del helio.

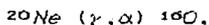
Una vez que los procesos termonucleares han generado una cantidad en exceso de ^{12}C , y estando en defecto el ^4He (la fase de consumo de helio perduró 6×10^5 años [138]), la estrella nuevamente cede terreno a la gravitación. La reactivación nucleosintética se logra esta vez a una temperatura de $\sim 1.5 \times 10^8 \text{K}$ [155], cuando es que:



El proceso anterior corresponde a la principal ruta nucleosintética de esta fase estelar; no obstante, de aquí en adelante la generación de energía no es privativa de algunas cuantas formas de transmutación nucleica, puesto que la cada vez mayor variedad y complejidad de núcleos atómicos dentro de la estrella conduce a la diversificación de las rutas de fusión [17]. Para la fase de consumo de carbono se cuentan las siguientes como algunas rutas que también rinden primicias a la alquimia estelar [17, 155]:



La escasez de carbono comienza a ser ostensible apenas 450 años después de haberse iniciado la combustión de tal elemento [88]. Nuevamente, el colapso hace acto de presencia. El incremento energético que es generado paulatinamente por esta contracción provoca que, en cierto momento, los fotones disocien una cantidad significativa del ^{20}Ne (aproximadamente por un intervalo de 0.25 años [88, 154]):



De esta manera, el núcleo estelar es enriquecido, subitamente, por oxígeno, especie que a su vez se convierte en combustible estelar, durante unos años [88, 154], una vez que la temperatura central alcanza los $2 \times 10^8 \text{K}$ [154].

Las posibles reacciones de consumo de oxígeno, así como otras secundarias en las que éste no interviene, hacen un conjunto tan amplio, que sería requerido un vasto espacio para proyectarlas. Así, que baste señalar que se tiene certeza de que las diferentes rutas de construcción química recurren a procesos análogos a los que hasta aquí han sido introducidos. En particular, se tiene la idea de que la transmutación química hacia elementos más pesados opera, desde aquí, mediante la captura de neutrones ^[23], proceso

{23} Ha sido conjeturado que durante las fases previas a la combustión del oxígeno en estrellas de gran masa, se entablan, al igual que en las estrellas de baja masa y de masa intermedia, procesos que enriquecen de neutrones al medio intraestelar [16, 88], como, por ejemplo:

apoyado por la fusión directa entre especies complejas, y conjuntado de cuando en vez con procesos de captura de protones y fotoeyección de neutrones [16]. Como ya de algún modo hemos indicado, el que a los neutrones se les atribuya el papel fundamental en estos niveles es algo bastante sensato si se considera la creciente resistencia de fuerzas coulómbicas que se opone a los procesos de fusión de núcleos cuando éstos son muy complejos.

El caso es que, eventualmente, es formado, debido a la combustión del oxígeno, un núcleo estelar rico en silicio, elemento que rinde elementos semejantes al hierro una vez que la temperatura alcanza los $3 \times 10^9 \text{K}$.

HASHIMOTO *et al.* [88] y NOMOTO *et al.* [137] han calculado que cuando la región nuclear alcanza la densidad de $\sim 2 \times 10^{10} \text{ g/cm}^3$, la distribución de las especies químicas a lo largo de una estrella de $M_{\text{SP}} = 20 M_{\odot}$ le confiere a ésta la siguiente estructura bulbiforme:

- (1) Núcleo de Fe y especies semejantes de $M(r) \approx 1.4 M_{\odot}$.
- (2) Capa rica en Fe-Si de $1.4 M_{\odot} < M(r) \approx 1.48 M_{\odot}$.
- (3) Capa rica en Si de $1.48 M_{\odot} < M(r) \approx 1.67 M_{\odot}$.
- (4) Capa rica en O de $1.67 M_{\odot} < M(r) \approx 3.66 M_{\odot}$.
- (5) Capa rica en C-O de $3.66 M_{\odot} < M(r) \approx 3.76 M_{\odot}$.
- (6) Capa rica en Ne-C de $3.76 M_{\odot} < M(r) \approx 6.0 M_{\odot}$.
- (7) Capa rica en H de $6.0 M_{\odot} < M(r) \approx 20 M_{\odot}$.

La acumulación del hierro en la zona central de la estrella marca el último eslabón de la primera —y compleja— cadena de la alquimia estelar. El ^{56}Fe se distingue como el núcleo más estable de la naturaleza. Cualquier proceso que lo altere, sea de fusión o de fisión, requiere de la inversión de energía [176]. En otras palabras, el pródromo del fin de la fase radiativa por generación espontánea de energía a través de procesos nucleares se pone de manifiesto una vez el núcleo estelar se enriquece de ^{56}Fe . Se considera que el siguiente paso en la carrera evolutiva de una estrella masiva es catastrófico: por inestabilidad gravitatoria, la estrella explota (la «fulgurante apoteosis de las grandes estrellas», como le ha nombrado REEYES [155] a este evento).

-
- (1) ^{12}C ($^{12}\text{C}, n^0$) ^{23}Mg .
 - (2) ^{12}C (p^+, γ) ^{13}N ($^-, \beta^+ \nu$) ^{13}C (α, n^0) ^{16}O .
 - (3) ^{13}C ($^3\text{He}, p^+$) ^{15}N ($^3\text{He}, n^0$) ^{17}F .
 - (4) ^{15}N ($^3\text{He}, p^+$) ^{17}O (α, n^0) ^{20}Ne .
 - (5) ^{14}N (α, γ) ^{18}F (β^+) ^{18}O (α, γ) ^{22}Ne (α, n^0) ^{25}Mg .

Como es evidente, el límite de Chandrasekhar hace alusión a aquella materia dominada por su componente gravitatorio, que bajo ciertas condiciones se comporta inerte en cuanto a la producción termonuclear de presión expansiva se refiere, y que, por otra parte, no tiene forma de agenciarse energía externa. Por ende, de entre toda la estructura bulbiforme que desarrollan las estrellas muy masivas, sólo importa, para la definición de la suerte del astro, la masa de hierro acrecentada en la región central. Las capas adyacentes a esta región están en plena combustión, por lo que su masa no contribuye efectivamente (al menos en forma significante e inmediata) en la presión gravitatoria sufrida por el centro estelar, en tanto que las capas exteriores, que, al igual que el núcleo estelar, no son energéticas, son sostenidas gracias a la energía generada en las zonas inferiores.

Una vez que la estrella desarrolla un núcleo rico en hierro de masa igual a M_{ch} , explota en cuestión de milisegundos [21]. El producto de tal evento es una *Supernova del Tipo II* (SNII). Por la explosión, la estrella eyecta ingentes cantidades de materia que forman una gran nebulosa de emisión; la emanación de radiación es tan profusa, que hace de un evento SNII algo tan brillante como una galaxia entera [24,25]^[24]. En el material eyectado por eventos SNII han sido observadas abundantes cantidades de hidrógeno y una metalicidad similar a la de las estrellas ordinarias [176]^[25].

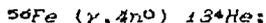
La formación de una zona central rica en hierro, cuya masa sea igual a $1.4M_{\odot}$, se lleva a efecto en sólo ~ 13 días de combustión del silicio [88]. Rebasado el límite de Chandrasekhar, la presión degenerativa de los electrones es incapaz de soportar la presión gravitatoria de la masa estéril. La estrella, por tanto, es arrojada a un fenómeno

{24} En efecto, la magnitud bolométrica promedio de las SNII es de -18.05 [39], lo que implica que es tan luminosa como 1.4×10^5 Soles.

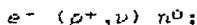
{25} Observaciones en el infrarrojo de la SN 1987A de la Nube Grande de Magallanes (la supernova con la que mayormente ha sido posible cotejar los modelos teóricos) han revelado líneas de emisión de H, He, S, Ar, Ca, Ni, Co y Fe [88]; los datos son aún preliminares y actualmente se siguen invirtiendo esfuerzos para resolver la composición química, en detalle fino, de este remanente.

de implosión, que se desarrolla a una velocidad inconmesurable. Vertiginosamente, son alcanzados valores críticos de densidad y temperatura bajo los cuales desdoblan procesos que retroalimentan el hundimiento gravitatorio del núcleo estelar:

- (1) la fotodesintegración del hierro, proceso endotérmico que merma el estado cinético del centro estelar [13]:



- (2) la neutronización de los electrones, efectuada mediante el proceso *Urca*, que desploma la presión degenerativa total [21]:



- (3) la profusa pérdida de energía por concepto de escape de los neutrinos formados por el proceso *Urca*, partículas que al abandonar el núcleo estelar, disminuyen la energía expansiva del medio (tal pérdida pierde importancia una vez que el medio es lo suficientemente denso ($\rho \sim 5 \times 10^{11}$ g/cm³ [176]) como para ser opaco al flujo neutrínico).

Toda vez que el colapso desemboca en el defecto del número de electrones y en el exceso de nucleones libres (neutrones, principalmente), el límite de Chandrasekhar disminuye hasta $\sim 0.82 M_{\odot}^{1.26}$. Este límite adquiere una nueva connotación física cuando la densidad es de $\sim 4 \times 10^{14}$ g/cm³ (2/3 de la densidad nuclear). A esa densidad, los nucleones se disponen tan estrechamente, que interactúan por medio de la fuerza nuclear fuerte [153] para formar grandes agregados (colosales «núcleos atómicos»). La materia está así tan en íntimo contacto, que cualquier información de variación de densidad y temperatura generadas en algún punto es inmediatamente transmitida a las otras regiones a través de ondas sonoras. De esta manera, la implosión es no caótica: se forma un núcleo homólogo. El total de materia que participa en este tipo de colapso es, precisamente, el nuevo

{26} El valor de *Mch* depende del cociente del número de electrones libres y del número de nucleones libres. Es obvio que mientras exista menor riqueza en electrones, se contará con menor presión degenerativa, por lo que podrá ser nulificado el influjo gravitatorio de menor masa. Por ende, se sigue que el proceso *Urca* ($e^- (\rho^+, \nu) n^0$) y la fisión del 56Fe ($56\text{Fe} (\gamma, 4n^0) 13^4\text{He}$) provocan el paulatino abatimiento del límite de Chandrasekhar.

límite de Chandrasekhar {27}.

El punto de máxima compresibilidad es alcanzado cuando la densidad del núcleo homólogo es igual a la de la densidad nuclear ($\sim 7 \times 10^{14}$ g/cm³). En este punto, la materia responde a la tendencia colapsante con la emisión de una fuerte cantidad de ondas (consideradas como sonoras, por propagarse a una velocidad muy cercana a la velocidad sónica del núcleo estelar [170]), las cuales son la primera contribución energética para la ulterior explosión de la estrella.

Ahora bien, como el núcleo colapsa en bloque (en forma homogénea) se cumple que la velocidad de caída de la materia aumenta con el radio estelar. Por ende, la propagación de las ondas de sonido emanadas del núcleo homólogo se efectúa en un material cada vez más rápido —y de dirección contraria— conforme aquéllas se desplazan. En donde la velocidad de caída es igual a la velocidad del sonido, se edifica un *punto sónico*, en el que, para todo efecto, las ondas sonoras se mantienen estáticas con respecto al núcleo estelar. [21]

Durante este compás de espera (que perdura milésimos de segundo), en el punto sónico aumenta la densidad energética en virtud de la acumulación de ondas sonoras, las cuales son efecto de la constante caída de material sobre el núcleo homogéneo. Cuando la densidad central alcanza el valor de ~ 1.5 veces la densidad nuclear, se llega al instante de «máximo quebranto». El nuevo material acrecentado después de ese instante, provoca un rebote elástico en el cual es generada una ingente cantidad de ondas sonoras. La densidad energética que se acumula en el punto sónico por este nuevo y más energético aporte de ondas, crea una discontinuidad energética con respecto a las zonas allende el punto sónico: se genera una onda de choque. Esta onda, cuya velocidad depende sólo de su energía, logra superar fácilmente el punto sónico [24], propagándose a una velocidad del orden de 30,000 km/seg. En fracción de segundos, la onda alcanza la superficie del núcleo de hierro y continúa expandiéndose a lo largo de la estructura bulbiforme. Al entrar la onda en contacto con las capas exteriores, se produce una formidable eyección de material: la estrella explota como un petardo. [21]

El esquema anterior corresponde a los meticolosos y complejos cálculos que han sido desarrollados desde la

{27} Nótese que por los eventos sucedidos en la implosión, el núcleo de hierro ha sido subdividido en dos regiones de condiciones ostensiblemente diferentes, i. e., una capa rica en hierro rodeando a una zona dominada por nucleones.

década de los 1960's [176]. Sin embargo, los modelos no arrojan resultados tan satisfactorios como a primera vista pareciera. Durante la simulación en ordenador de la propagación de la onda de choque, ha sido observado que ésta se diluye antes de provocar la explosión de la estrella. La razón de ello es doble: el decremento energético de la onda debido a la escisión de núcleos de hierro y al escape de los neutrinos. La onda de choque es, a fin de cuentas, un fenómeno altamente energético; por tanto, está en posibilidad de sostener, a expensas de su energía, procesos endotérmicos como la fisión del hierro. Por otro lado, la densidad del medio de propagación desciende paulatinamente conforme la onda avanza, y llega un momento en que se abandona al medio opaco para los neutrinos; éstos, expeditos de obstáculos, se alejan de la onda de choque, ocasionando el decremento energético de la misma. En suma, la combinación de ambos factores, la fisión del hierro y la pérdida de neutrinos, provoca que la onda de choque se desvanezca en una región entre 100 y 200 km de distancia del centro [25].

Se ha tratado de subsanar el dilema anterior con la postulación de algún mecanismo que produzca ondas de choque mucho más energéticas. En particular, ha sido barruntado sobre la factibilidad de que el instante de «máximo quebranto» suceda a una densidad mayor. Estudios teóricos realizados por Brown [21] han sugerido que, en efecto, ese instante puede ser logrado a una densidad ~2.5 veces mayor que la nuclear.

Cuando fueron realizadas simulaciones incluyendo este nuevo límite de compresibilidad, fue encontrado que la estrella logra explotar siempre y cuando el valor de su masa sea de $8M_{\odot}$ a $12M_{\odot}$. Toda estrella que cae en este rango, desarrolla un núcleo constituido de hierro no mayor de $1.35M_{\odot}$; consecuentemente, la onda debe de franquear una masa de hierro no mayor que $0.55M_{\odot}$. El dispendio de energía debido a la escisión de hierro en este tipo de estrellas no logra debilitar a la onda de choque al grado de que sea inhibido el proceso explosivo.

Mas para estrellas muy masivas, la onda de choque resulta del todo infructuosa. El núcleo de material inerte que desarrolla una estrella de $\sim 25M_{\odot}$ es de $\sim 2M_{\odot}$. En este caso, la onda de choque debe renar contra $1.2M_{\odot}$ de material absorbente de energía, en el cual termina diluyéndose.

Se ha apelado a la acción de neutrinos para posibilitar la regeneración de la onda en estrellas muy masivas. Ha sido calculado que a unos 150 km del centro de la estrella, la densidad de la materia puede ser lo suficientemente alta como para mantener un alto índice de absorción de neutrinos, a más de ser la temperatura lo bastante baja como para que la propia materia no emita

profusamente neutrinos. En virtud de que la deposición de material inerte no cesa aún después del instante de «máximo quebranto», constantemente están siendo generados neutrinos a través del proceso Urca. En menos de medio segundo, la cantidad de neutrinos liberados por este proceso corresponde a $\sim 10^{53}$ ergs. Es creído que esta energía transportada y acumulada en la zona de los 150 km en forma de neutrinos, genera la discontinuidad requerida para desbocar la explosión de la estrella. [21]

Es claro que el esquema no es del todo convincente. Y, por desgracia, aún no se cuenta con una propuesta alternativa de mayor peso. Sigue incólume el enigma de como en fracciones de segundo, la energía gravitatoria logra generar un impulso cinemático que desemboque en la explosión de las capas exteriores de la estrella. ¿Cómo convertir una implosión en una explosión? He aquí uno de los más grandes enigmas en los estudios teóricos sobre la formación de supernovas.

No obstante tan grande incertidumbre, en algunos aspectos los modelos sobre SNII han sido espectacularmente corroborados por la observación. En los estudios que se han realizado a propósito de SN 1987A, ha sido encontrada consistencia entre los valores observados y los teóricos obtenidos para: (1) el flujo de rayos X y de rayos γ , (2) el comportamiento de la curva de luz del remanente, (3) la masa sintetizada de ^{56}Co y de ^{56}Fe , (4) la masa total del eyectado, (5) la emanación de neutrinos, (6) las velocidades de expansión de la nebulosa, y (7) la masa remanente de la estrella después de la explosión [89,138].

Finalmente, apuntemos un aspecto más de carácter fundamental en torno a las explosiones de estrellas muy masivas. Durante un evento SNII, la onda de choque debe propiciar el desarrollo de procesos de nucleosíntesis explosiva [88,137] (i.e. grandes tasas de transmutación nuclear debidas a escenarios de alto nivel energético). Ha sido calculado que una estructura bulbiforme como la indicada en esta sección, experimentará procesos de nucleosíntesis explosiva en varias de sus capas internas (hasta $M(r) \sim 2.0 M_{\odot}$), siendo los productos de cada capa función del pico de temperatura y de densidad ^[28] [137]. Las

{28} De acuerdo a los cálculos realizados por KOMOTO et al. (1981), el producto nucleosintético de la explosión de una estrella de $20 M_{\odot}$, es, para el eyectado:
 (1) ^{56}Fe y especies semejantes, de $1.59 M_{\odot} < M_{\text{Fe}} < 1.69 M_{\odot}$, productos de la combustión explosiva del silicio del

capas exteriores, en cambio, no activarán su combustible nuclear por nunca lograr condiciones energéticas propicias para ello. De otra parte, se tiene la fuerte sospecha de que los escenarios supernova ambientan la posibilidad de que se lleven a efecto procesos r [16], esto a través de la intensa producción de neutrones generados explosivamente mediante las reacciones que ya hemos considerado. Así, habida cuenta de todo, las supernovas resaltan como fuentes muy significantes de una gran variedad de especies químicas.

Retornemos ahora a las estrellas de menor masa. Para el caso de estrellas de $M_{sp} < M_{ch}$ y el de estrellas de $M_{sp} > M_{ch}$ que en algún punto de su evolución *post*-Secuencia Principal, debido a los procesos de pérdida de masa que experimentan, logran la condición $M < M_{ch}$, dos son las posibles vertientes para su senectud como enanas blancas. El trazo final de enanas blancas aisladas, como será la situación del Sol, consiste, simplemente, en el paulatino enfriamiento, sin mayores alteraciones. Mas para una enana blanca que conforme un sistema binario estrecho, el sino puede ser drásticamente alterado, al erigirse la posibilidad de superar el límite de Chandrasekhar mediante el acrecentamiento de masa proveniente de la estrella compañera. En este caso, lo más frecuente es que la enana blanca explote, aunque por medio de un mecanismo muy disímil al de las estrellas que se convierten en SNII [133, 134, 178].

Más de la mitad de las estrellas de la Galaxia son componentes de sistemas binarios. Si bien es obvio que para cada sistema sus componentes son coetáneos, no es de esperarse, ni así se observa, que ambas estrellas se encuentren en la misma etapa evolutiva. Lo anterior es, sencillamente, sintomático de la diferencia de masas iniciales. Un ejemplo clásico de componentes desfasados es el sistema de Sirio: mientras que el componente estelar B ha alcanzado la etapa de enana blanca, el A es aún una estrella de la Secuencia Principal. [110]

En algunos sistemas constituidos por una gigante roja y por una enana blanca, ha sido detectada una fuerte emisión

oxígeno.

(2) $28Si$, $32S$, $30Ar$, $40Ca$ y trazas de $56Ni$ y de $54Fe$, de $1.69M_{\odot} < M_{r} < 1.75M_{\odot}$, productos de la combustión explosiva del oxígeno.

(3) $16O$ y trazas de $28Si$ y de $32S$, de $1.75M_{\odot} < M_{r} < 1.88M_{\odot}$, productos de la combustión explosiva del neón.

(4) En $1.88M_{\odot} < M_{r} < 2.06M_{\odot}$, los picos de temperatura y densidad apenas son los suficientes como para provocar el consumo de algunas cantidades traza de carbono.

de rayos X que no es atribuible a la radiación intrínseca de cualquiera de los miembros estelares. Ahora se sabe que el fenómeno responsable de tal emisión es un flujo de material que se verifica desde la gigante roja hacia la compañera compacta [110]. El gran campo gravitatorio de la enana blanca, al interactuar con las inestables capas envolventes de la gigante roja, provoca una ola de materia, la cual es acelerada conforme más se acerca a la enana. Debido a la alta velocidad adquirida por la aceleración gravitatoria, el material, en tanto cae, describe órbitas de decadencia alrededor de la estrella. Es en este disco de acrecentamiento desde donde se emite la cantidad adicional de rayos X observados [54].

Se ha encontrado que dependiendo de la tasa de acrecentamiento y de las condiciones de la enana blanca, ésta puede sufrir de un colapso o de una explosión SNI^[29] [136].

Una enana blanca que posea una abundancia central de carbono de por lo menos 10%, es susceptible, al estar sometida a una ganancia relativamente rápida de materia, de sufrir la ignición de su carbono. La forma en que tal evento se lleva a cabo, y la manera en que la enana blanca se convierte en una SNI, ha sido descrita mediante los modelos desarrollados por Nomoto y sus colaboradores [133, 134, 136, 178]. Tales modelos son, hasta el momento, la mejor aproximación que se tiene con respecto a las propiedades desarrolladas en el remanente de una SNI.

La caída de material sobre la superficie de la enana blanca genera tres fuentes energéticas (el calor derivado del choque, el establecimiento de procesos de fusión del material recién acrecentado^[30] y la energía de compresión)

{29} De entre la gran gama de propiedades que diferencian a las supernovas de tipo I (SNI) de las de tipo II (SNI^{II}), se particulariza el hecho de que los remanentes de las primeras son extremadamente pobres en hidrógeno [25].

{30} Se estima que el material acrecentado puede ser hidrógeno, helio, carbono y oxígeno. En el caso de que dominen los dos últimos, la masa acrecentada se suma directamente en la relación de la masa inerte de la estrella con respecto al límite de Chandrasekhar. En el caso de que sean los primeros los dominantes, ha sido encontrado que si la tasa de acrecentamiento es lo suficientemente grande ($M \approx 10^{-8} M_{\odot}/\text{año}$), se logra el flash de tales especies, generando, finalmente, carbono y oxígeno. [136]

que provocan que la densidad y la temperatura del centro de la estrella (el cual está en condiciones de degeneración) se incrementen paulatinamente, hasta que es inducido el *flash* del carbono. Los cálculos numéricos indican que la liberación de energía nuclear debida a este evento es apenas el 20% de la cantidad que es menester dispendiar para superar las condiciones de degeneración. Así, estos cálculos sugieren que la combustión de carbono, y la consecuente sobrecompresión térmica asociada, se desplazan a una velocidad subsónica, i.e., no se forma una onda de choque. Más pareciera que la combustión se efectúa en forma análoga a como se incendia un reguero de pólvora, por lo que a tal proceso se le conoce como la *deflagración del carbono*.

Como la velocidad de propagación del frente de combustión es subsónica, la materia exterior logra sufrir reacomodos antes de que aquél la alcance: esto es, se permite la expansión de las capas envolventes antes del paso de la onda de deflagración a través de ellas. De tal suerte, la onda se desplaza por un medio cada vez menos denso y caliente, hasta que logra una zona en donde las condiciones ($T \approx 2 \times 10^8 \text{ K}$ y $\rho \approx 10^7 \text{ g/cm}^3$) ya no son las propicias para continuar con la combustión nuclear.

Naturalmente, el material que sufre los efectos de la onda de deflagración es combustionado a ritmo explosivo. Las regiones centrales resultan, después del paso de la onda, ricas en elementos como el hierro, mientras que en capas intermedias sólo son incineradas especies menores al silicio (el espectro varía desde la combustión parcial de silicio, en las capas más internas, hasta la combustión parcial de carbono, en las más externas), por lo que dichas zonas acaban ricas en elementos de masa intermedia. Las capas más exteriores de la estrella permanecen con su composición original. Es muy probable que en estos escenarios también se desarrollen procesos s y r .

El producto de la deflagración de la estrella es un fenómeno espectacular. El remanente es una gran nube de gas, rica en ^{56}Ni y pobre en hidrógeno, con velocidades radiales de hasta $10,000 \text{ km/seg}$. La desintegración radioactiva del $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$, cuya producción por la deflagración es de $0.5 - 0.8 M_{\odot}$, es la causa de que el remanente sea tan luminoso y de que su curva de luz presente un descenso regular después de haber sido alcanzado un máximo de luminosidad (que puede llegar a ser hasta de $10^4 M_{\odot}$). El material eyectado es abundante en elementos semejantes al hierro y en varias especies de masa intermedia (como el calcio, el argón, el azufre, el silicio, el magnesio y el oxígeno). De otra parte, ha sido encontrado que la energía liberada a lo largo de la deflagración es mayor a la energía de unión que poseía la enana blanca, por lo que entre las reminiscencias no figura un remanente estelar. (Todo lo

indicado en este párrafo, en amplia concordancia con la observación). [133,134,178]

Nos resta por revisar el caso de estrellas de masa intermedia que desarrollan el núcleo de carbono de masa mayor a la masa de Chandrasekhar. Al no ser capaz la presión degenerativa central de sostener a la masa de carbón, el colapso se desarrolla hasta la ignición de este elemento, con la consecuente formación de un núcleo rico en oxígeno, neón y magnesio. Este *flash* del carbono provoca que material externo, rico en helio y en hidrógeno, sea transportado a zonas centrales, en donde es combustionado. En este tipo de estrellas, la presión gravitatoria no es la suficiente como para que se provoque la ignición del neón. No obstante, se estima que las condiciones llegan a ser propicias para que se entable la captura de electrones por parte del ^{20}Ne y del ^{24}Mg , de tal suerte que se desploma la presión degenerativa, desembocándose, por tanto, un colapso dinámico. Finalmente, el colapso conduce a la estrella a una explosión de tipo SNII. La explosión de esta clase de estrellas, no obstante, resulta de mucho menor relevancia energética y de desprendimiento de masa que la explosión que experimentan estrellas de mayor masa. [135]

Si el caso es que una estrella de $1.25-1.0M_{\odot}$ forma parte de un sistema binario estrecho, el sino es drásticamente trastocado. La gran pérdida de masa que le acontece durante la etapa de gigante roja, le conduce a constituirse en una estrella de helio de $M=2.2-2.5M_{\odot}$, llegando, en su forma postrera, al estado de enana blanca rica en oxígeno, neón y magnesio. La pérdida de masa imposibilita el logro de condiciones para la captura de electrones, por lo que la enana permanece en su condición hasta que su compañera evoluciona a gigante roja. La enana blanca logrará acrecentar masa. Si la tasa de captación de materia es alta, la estrella explotará como SNII. De lo contrario, derivará en un cuerpo mucho más denso, quizá en un agujero negro [135]. Pero esto último ya es materia de la siguiente sección.

\$2.5.

SENECTUD Y MUERTE ESTELAR

El cese definitivo de la generación de presión termonuclear por parte de una estrella, es el pródromo de la inminente muerte de ésta; convertida en un cuerpo inerte, incapaz para producir más energía radiante mediante los procesos de fusión nuclear, la estrella está condenada a dejar de rutilar.

Para una estrella de $M \approx M_{\odot}$ la Teoría de la Evolución Estelar predice que una vez que las fuerzas autogravitantes están balanceadas con la conducta cuántica del gas electrónico, el astro alcanza, de una vez y por todas —por supuesto, si algo extraordinario no le acontece, algo como el acrecentamiento de masa—, una fase de estabilidad perenne y absoluta. La Teoría también indica que la estrella llega a tal estado en forma de un cuerpo muy denso, caliente y pequeño (y, por ende, de tenue luminosidad); si se le ubicara en el diagrama H-R, le correspondería, precisamente, en la región de las enanas blancas⁽³¹⁾ (figura 2.4). [131]

Desde hace varias décadas no existe mayor duda al respecto de que las enanas blancas corresponden a la fase senil de las estrellas poco masivas y de masa intermedia. Se cree que de allí en adelante, a las estrellas solitarias sólo les queda el exhalar, con toda parsimonia, las reminiscencias energéticas de su actividad previa, para después fenecer como un cuerpo frío y oscuro.

Para el Sol está deparada una suerte similar a la anterior. Dentro de ~ 6 epos habrá agotado el helio de su región central. Poco después, por causa de un nuevo colapso, la presión degenerativa crecerá lo suficiente como para inhibir la acción gravitatoria; no será necesario el recurrir a la siguiente fase de combustión nuclear. De esta manera, el Sol alcanzará la fase de enana blanca como una estrella de núcleo rico en carbono y en oxígeno. A partir de ese momento, a nuestro astro le quedarán por transcurrir varios epos de agonía, antes de que enfrie y oscurezca —casi— totalmente [24].

Hemos visto que para estrellas de $M \gg M_{\odot}$ la senectud no es tan sosiega: antes de sucumbir, han de experimentar la «fulgurante apoteosis». El proceso Urca, invocado por la implosión, genera en el centro de la estrella un bloque de materia constituido predominantemente por neutrones (99%) y por cantidades traza de protones y de electrones [199]. Al efectuarse la explosión, las capas envolventes son eyectadas, quedando así develada la zona de la estrella que

(31) Sirio B, que fue descubierta desde 1862, es el miembro más famoso —si bien no el más asombroso— del grupo de las enanas blancas. Esta estrella, cuya masa es muy similar a la del Sol ($\sim 0.98 M_{\odot}$), posee una luminosidad de $10^{-2.20}$, un radio de $0.022 R_{\odot}$, una densidad de $\sim 60,000 \text{ g/cm}^3$ y una temperatura superficial de $\sim 10,000^{\circ} \text{K}$ (12,54). A título de comparación, la densidad media y la temperatura superficial del Sol son $\sim 1.4 \text{ g/cm}^3$ y $\sim 5,800^{\circ} \text{K}$, respectivamente [4].

sufrió la neutronización^[32]. Se estima, por tanto, que, invariablemente, el rescoldo estelar inmediato de un evento SNr es una estrella de neutrones [160].

En forma análoga al comportamiento de los electrones, los neutrones manifiestan, en un ámbito de gran densidad, el efecto cuántico estipulado en el Principio de Exclusión. Es, hasta la actualidad, empresa muy difícil determinar la cantidad exacta de masa inerte que es capaz de soportar la presión degenerativa de los neutrones. Siendo que cuando libres en condiciones de baja densidad son muy inestables, aún no se tiene idea clara sobre el comportamiento y propiedades de los neutrones como partículas independientes [131]. Mucho más difícil es barruntar sobre su comportamiento en estado degenerado. No obstante, se cuenta con estimaciones, en las cuales también han sido incluidos el efecto de la compresión del campo magnético, el de la redistribución del momento angular y el de la resistencia a la compresión de partículas como los quarks y los gluones, que indican que la presión degenerativa de los neutrones es capaz de contraponerse a la acción autogravitante de una estrella de masa no mayor que $3M_{\odot}$ ^[33] [160].

Existen ciertos tipos de estrellas, conocidas como pulsares, que son fuentes de radiación que en intervalos muy regulares y cortos (de hasta 33 milisegundos) intensifican su emisión a modo de pulsación [199]. La explicación más plausible que se tiene al respecto de las «pulsaciones» y de todas las propiedades de los pulsares está relacionada con las condiciones extraordinarias de las estrellas de neutrones.

La contracción que sufre el núcleo de una estrella masiva en su transición a una estrella de neutrones provoca que varíen sustancialmente las propiedades globales. El radio disminuye por un factor de 10^5 (el radio característico de una estrella de neutrones es de ~ 10 km); la velocidad de rotación se incrementa por un factor de 10^{10}

{32} El radio en el cual queda definido el tamaño del remanente estelar se le conoce como el *radio de bifurcación* y depende de la masa de la estrella progenitora así como de la intensidad de la onda de choque generada. [21]

{33} Por otra parte, no es factible la existencia de estrellas de neutrones de masa menor que $0.1M_{\odot}$, pues las condiciones de densidad permitirían la pronta decadencia de los neutrones mediante el proceso de β -transformación [22].

(el periodo de rotación puede ser de hasta una revolución por cada milisegundo); la densidad alcanza valores de 10^{13} - 10^{14} g/cm³; el campo magnético se intensifica hasta valores de 10^{12} gauss. [25,54,160,199]

De las propiedades anteriores, se piensa que el intenso campo magnético es el que juega el papel crucial en cuanto al comportamiento radiativo de las estrellas de neutrones. La atmósfera de una estrella de este tipo está pululada por un enjambre de electrones libres. Estas partículas, al estar en contacto con las intensas líneas de fuerza magnética, son aceleradas en una forma poderosa y constante. Por la experiencia que se tiene en laboratorios terrestres, se sabe que los electrones afectados de esta manera emiten intensamente un tipo característico de radiación: la radiación sincrotrón. En el escenario de una estrella de neutrones, sería de esperar que la emisión de radiación sincrotrón fuera mucho más profusa en los polos magnéticos que en el resto de la estrella.

Sucede entonces que desde sus polos magnéticos, la estrella de neutrones se comporta como una potente linterna. Pero en realidad esta linterna, junto con toda la estrella, se encuentra girando a una velocidad prodigiosa; más pareciera un faro ultrarrápido que una linterna. Es evidente que sólo es cuestión de coincidencia geométrica para que con base en lo anterior sea explicado el fenómeno de los pulsares: son estrellas de neutrones cuyos polos magnéticos, por un momento en cada período de rotación, hacen blanco en la Tierra.

No es la coincidencia anterior la única que se cuenta como argumento para demostrar que los pulsares son estrellas de neutrones. Ha sido observado que el periodo de pulsación de aquéllos aumenta paulatinamente en un factor escalonado entre 10^{-12} y 10^{-16} de periodo [199]. Esto sugiere acusadamente que la frecuencia de las pulsaciones es correspondiente al movimiento de rotación de la estrella. Para poder explicar intervalos tan pequeños de pulsación se debe presuponer que la estrella gira varias centenas de veces por segundo. La única forma verosímil de que un cuerpo que gira a esa velocidad no se desintegre, es que sea muy denso y compacto, tal como lo son las estrellas de neutrones^[34]. [25]

Por otro lado, el que haya sido observada radiación

[34] Una enana blanca, que es el cuerpo más denso que se conocía hasta 1967, no puede desarrollar un período más rápido de 1 ó 2 vueltas por segundo, so pena de quedar desintegrada *ipso facto* [25].

sincrotrón proveniente de pulsares, es un fenómeno que puede ser aducido como elemento probatorio de que los pulsares y las estrellas de neutrones son el mismo ente físico. Finalmente, cabe señalar que han sido detectados pulsares en el centro geométrico de nebulosas de emisión [54], así como en sistemas binarios [136], lo cual resulta consistente con los escenarios de formación de estrellas de neutrones propuestos por la teoría.

No toda estrella de neutrones es el remanente de un virulento evento explosivo. Existen fuertes razones, de índole empírica, para concluir que algunos radiopulsares provienen del colapso de enanas blancas [136]. Sin embargo, aún no queda claro como es que puede lograrse tal transición. Se conjetura en que una enana blanca rica en oxígeno, neón y magnesio, que sea componente de un sistema binario (de hecho, como hemos apuntado, las enanas de este tipo se forman en sistemas binarios), pueda captar materia de su compañera. El acrecentamiento eleva la temperatura y la densidad central, hasta que comienza la captura de neutrones por el ^{24}Mg y por el ^{20}Ne . El colapso dinámico devenido por tal acontecimiento, lleva a la estrella a la ignición del oxígeno. En el caso de que la tasa de acrecentamiento sea muy pequeña y la enana sea masiva y fría, el frente de combustión se extinguirá rápidamente, dejando como resultado un núcleo rico en especies semejantes al hierro. El núcleo, al colapsar, provoca la eyección de ~0.1M \odot . El resultado final es una estrella de neutrones [133, 136].

Existen razones para pensar que no siempre se cumple que una estrella masiva explota^[35] [25]. Razones también las hay para suponer que el remanente estelar de una explosión supernova sea muy masivo [131]. Tampoco está vedada la posibilidad de que una estrella de neutrones, si forma parte de un sistema doble, pueda capturar una considerable cantidad de masa [54]. Así las cosas, pareciera que no es una lejana contingencia el que ocurra un cuerpo inerte de masa superior a la que la presión degenerativa de los neutrones puede soportar.

De acuerdo con los conocimientos que se tienen en

[35] De hecho, como fue apuntado en §2.4, el principal problema insito de los modelos de SNII es que no logran plantear un mecanismo satisfactorio mediante el cual la implosión del núcleo de la estrella detone la explosión de las capas externas.

Física, nada hay que pueda evitar el desplome gravitatorio de un cuerpo inerte de $M \gg M_{\odot}$ [54]. Durante su inexorable paso contractivo, una estrella de estas características superará un radio crítico debajo del cual se torna indescriptible mediante la Física actual.

Aunque existen modelos relativistas muy elaborados para describir a ese radio crítico, es fácil obtener su característica principal mediante un algoritmo que realizó LAPLACE haciendo uso de relaciones muy simples de la Física Clásica. La velocidad de escape de un cuerpo está definida por

$$V_0 = \sqrt{2GM/R} \quad (7)$$

Si se sustituye el valor de la velocidad de la luz, c , por V_0 y se despeja el radio estelar, R , se obtiene el radio de gravedad (o lo que se conoce en la jerga de la Física Relativista como el *horizonte de los eventos*) [54]:

$$r_g = 2GM/c^2 \quad \text{ó} \quad r_g \sim 3M/M_{\odot}.$$

Siempre que sucede que $R < r_g$, se tiene que $V_0 > c$, o lo que es lo mismo, debido a la gran curvatura del espaciotiempo (para expresarlo en términos relativistas), nada, absolutamente, ni siquiera un haz luminoso, puede abandonar al cuerpo relacionado. Por definición, a un cuerpo del que la luz sólo puede entrar se le denomina *agujero negro*; una definición equivalente es la de aquel cuerpo cuyo extensión espacial es menor a r_g [160].

Es claro que un observador que esté colocado por fuera de r_g jamás podrá obtener información alguna sobre lo que acontece en el agujero negro. Mas ni siquiera los modelos matemáticos relativistas son capaces de aportar algún detalle sobre el interior de un agujero negro: simplemente, se trata de una singularidad espaciotemporal [36]. Se conjetura que un cuerpo en colapso, al rebasar el radio r_g , continúa contrayéndose, sin que alguna fuerza logre contraponerse, hasta que toda su masa queda compactada en un

[36] Nos encontramos nuevamente con un caso en el cual la Teoría General de la Relatividad se desploma. Al igual que la singularidad en el $t=0$ del universo, la singularidad del espaciotiempo de un agujero negro es interpretada como una densidad infinita de la materia. ¿Es esta recurrencia de la singularidad una premonición sobre circunstancias físicas que aún nos son ininteligibles?, o acaso ¿es una admonición sobre la invalidez —sea parcial o total— de la TGR?

punto del espacio [90, 187].

Evidentemente, si los agujeros negros existen, no hay esperanza alguna de detectarlos en forma directa. Desde hace varios años la búsqueda de estos entes ha sido centrada en la detección de perturbaciones gravitacionales sufridas en un cuerpo visible por parte de otro muy masivo e invisible. La cantidad y variedad de casos que pueden ser explicables, al menos en primera aproximación, bajo la suposición de la influencia de agujeros negros es muy notoria. La intensidad de radiación de ciertos discos de acrecentamiento [25], de cúmulos estelares [35], de núcleos galácticos activos y de quasares [54], y la estabilidad de los cúmulos de galaxias han sido atribuidos a la presencia de agujeros negros de muy diferentes masas.

Evidencias indirectas de la existencia de agujeros negros se tienen desde otra perspectiva. Existen motivos para suponer que el remanente estelar de SN 1987A es un cuerpo que evoluciona hacia un agujero negro [89]. Después de ocurrida la explosión, se monitoreó por fotometría rápida el centro geométrico del eyectado en busca de un pulsar. El resultado fue negativo; en cambio, fueron detectados dos picos de emisión de neutrinos, separados por un intervalo de ~5 horas, provenientes del remanente estelar. La interpretación que se ha dado de estos datos es que la primera emisión corresponde a la formación de la estrella de neutrones (debida al proceso Urca), la cual evolucionó rápidamente hacia un estado más denso (de allí la no detección del pulsar), y que la segunda emisión es indicio de la transición de la estrella de neutrones a una estrella en estado de excitación plónica o a una estrella de quarks (ambos tipos estelares, estados especulativos de los que prácticamente nada se conoce). A pesar de ser desconocidas las ecuaciones de estado para tales estadios de la materia, la mayoría de autores coinciden en que este estado es transitorio y que la estrella terminará formando un agujero negro. [89]

\$2.6.

EPÍLOGO

Infortunadamente, no ha sido posible, al menos hasta el momento en que fueron escritas estas líneas, el consolidar o el desacreditar fehacientemente, por medio de la observación, a la Teoría de la Evolución Estelar.

En relación a esto, aquí es pertinente traer a colación un rubro muy trillado en los textos de Astronomía general, aunque no por ello carente de gran significancia. Los modelos astrofísicos se fundamentan en muchos parámetros

de primera importancia; sin embargo, los astrofísicos están imposibilitados, salvo en escasísimas ocasiones, para cotejar sus predicciones teóricas con mediciones directas de los parámetros involucrados. Prácticamente todos éstos son inferidos a través de una sola unidad física: la luz. A partir de las «improntas» que los diferentes elementos físicos y químicos de los cuerpos celestes sellan en la luz que emanan, es posible deducir y cuantificar tales parámetros. Sin embargo, esto sólo es viable en tanto son consideradas las capas exteriores de los cuerpos. Las condiciones internas de, por ejemplo, una estrella, ¡solamente son cognoscibles mediante las hipótesis teóricas que postulan las condiciones internas propicias para que las capas externas se comporten tal como es requerido para generar las características espectroscópicas que son observadas! Así, la ciencia que estudia los cuerpos celestes está caracterizada por la conspicua presencia de hipótesis *ad hoc*. Este fantasma de las construcciones *ad hoc*, en no pocas ocasiones sobresalta a los investigadores, al traer del recuerdo el que todo el gran aparato teórico de la Astrofísica está construido a partir de factores parametrizados en forma indirecta.

Además de las características que se derivan del análisis espectral de los cuerpos celestes, dos son los parámetros de éstos que más importan para ponderar la validez de la TEE: uno intrínseco: la masa; el otro extrínseco: la distancia. (Del primero, qué decir de su importancia; del segundo, resulta fundamental en tanto permite averiguar propiedades tan cruciales como el tamaño y la luminosidad). Y al respecto de ambos, hay serias limitaciones técnicas para su determinación. No obstante, existe la alternativa del tratamiento estadístico. El cielo es habitado por un zoológico tan diverso y numeroso de cuerpos estelares, que bien pueden ser aplicadas técnicas que den luz sobre el comportamiento estadístico de los parámetros de las estrellas; además, de esta manera se cuenta con la ventaja de tener conciencia del rango de incertidumbre e incongruencia —el cual, generalmente, es despreciable— con respecto a las magnitudes reales.

A pesar de las grandes incertidumbres, y de la profunda naturaleza *ad hoc* de la Astrofísica, existen muy buenas razones para suponer que los científicos van por buen camino. Para sustentar tal aseveración, podríamos esgrimir un sinnúmero de casos de amplia coincidencia entre la observación y la teoría. Sin embargo, quisiera hacer referencia a una sola corriente de trabajo que resulta, simplemente, impresionante por la magnitud de la empresa y por la asidua constatación de la teoría por parte de las observaciones.

Recientemente, ha sido desarrollada una línea de

investigación con la que es pretendido construir, mediante el modelaje de la evolución de los componentes estelares de las galaxias elípticas, las características fotométricas globales de éstas (un artículo bueno y reciente al respecto de tal tipo de estudios, puede ser encontrado en Brocato *et al.* [29]).

El que se haya escogido a las galaxias elípticas sobre las espirales para este tipo de estudios se debe a razones evidentes. Las galaxias elípticas, dinámicamente hablando, están constituidas por un solo sistema, en tanto que las espirales lo están por dos (el núcleo y los brazos). A diferencia de éstas, se cree que las galaxias *E* abandonaron la etapa de formación estelar desde hace varios evo. Esto último deriva en varios rubros que simplifican considerablemente los modelos: (1) el que no exista formación estelar reciente, implica que no es necesario contemplar a estrellas de masa mayor; (2) por lo tanto, tampoco es menester incluir en los cálculos, salvo para un periodo inicial, la actividad de los eventos supernova del tipo II; y (3) el hecho mismo de no requerir modelar la tasa de formación estelar, así como la función de masa inicial, a lo largo del tiempo. [29]

Sin embargo, estas simplificaciones no implican, en absoluto, que los modelos sean simples. Los modelos parten con una masa gaseosa de forma esférica, en la cual se lleva a cabo un periodo (el único) de formación estelar. Esta formación, que depende de una función de masa inicial, deriva en un gran zoológico de estrellas de muy diversa masa. Las estrellas más masivas pronto agotan su potencial energético, y derivan en eventos SN_{II} que, en conjunto, hacen un régimen de viento que causa la pérdida del material interestelar. Al quedarse la galaxia desprovista de material interestelar (lo cual se estima ocurrió hace unos 14 evo), queda vetada la posibilidad de continuar con la gestación de nuevos cuerpos estelares. [29]

De los astros de menor masa que perduran con vida, no todos evolucionan a la misma velocidad. Por tanto, en los modelos se incluye, en función de la distribución de masas inicial, y con respecto al tiempo, una estimación de la abundancia de estrellas en un estadio evolutivo determinado (i.e., en la Secuencia Principal, como gigantes rojas, durante el periodo de pulsos térmicos y como núcleos estelares de nebulosas planetarias), a más de considerar el enriquecimiento químico que la galaxia ha experimentado durante las fases previas de tales cuerpos. De otra parte, es necesario tomar en cuenta la influencia de los eventos SN_{I} , que pueden originarse aún en tiempos tan tardíos como 15 evo de haber nacido los progenitores estelares correspondientes. [29]

Obtenida la abundancia para los diferentes estadios

evolutivos, se estima el aporte fotométrico de cada uno de ellos para diferentes bandas del espectro. Estas estimaciones, finalmente, son cotejados con los valores obtenidos de la observación. Sin ocultar el carácter *ad hoc* de los modelos y de la selección de los valores iniciales, es posible decir que se ha llegado a resultados teóricos cuyo grado de incongruencia con respecto a la realidad es poco significativo [29].

La importancia de este tipo de trabajos estriba en su carácter integral. Directa o indirectamente, se involucra prácticamente a todos los tópicos relacionados con los astros y su evolución. El que la integración de tan vastos y variados tópicos rinda resultados favorables, habla por sí sólo del camino por el cual van los científicos con respecto al estudio de la evolución de las estrellas.

Aunque, de otra parte, en detalle fino no es posible enmascarar el *statu quo* real: aún quedan en antecala problemas formidables para los que los astrofísicos no tienen respuesta. Sin duda, uno de los más regios es la formación y evolución de las estructuras galácticas. Siguen insolutas cuestiones tan primordiales como el por qué algunas galaxias poseen material interestelar y otras carecen de él. Líneas atrás apuntamos, aunque sin señalarla explícitamente, una solución a tal cuestión: las galaxias elípticas perdieron su material interestelar durante el régimen de viento galáctico que experimentaron tempranamente [22]. Sin embargo, esta respuesta es meramente parcial, en el sentido de que lo único que hace es trasladar el dilema a otro plano. ¿A qué factor se le debe que las galaxias espirales si hayan podido retener su material interestelar aún después del soplo tumultuoso de las primeras supernovas?

Problemas del mismo rasero se tienen con respecto a la formación y a la muerte de las estrellas.

El mecanismo de formación estelar propuesto por AMBARTSUMIAN [7] ha colocado un estoque de incertidumbre tanto a la hipótesis convencional de la gestación estelar como a la TEE. De ser correcta la hipótesis de la expansión y decadencia, sería necesario encontrar una adecuada concatenación entre el equilibrio hidrostático de una estrella de la Secuencia Principal y el nacimiento explosivo de la misma. Empresa por demás formidable.

Ciertamente, la hipótesis de HAYASHI [92] resulta bastante seductora; involucra mecanismos físicos «convencionales», situaciones descriptibles por la teoría, y un engaste por demás satisfactorio en el panorama de la TEE. Sin embargo, y por lo indicado en §2.2, esto no es razón suficiente como para desear de antemano la hipótesis de AMBARTSUMIAN; hacerlo, dadas las dudas e incertidumbres existentes, sería algo tan insipiente como el laurear a la

ignorancia.

Por lo que respecta a la muerte estelar, la observación ha adicionado mayor número de problemas a los detectados *a priori* en los modelos de supernovas. Por ejemplo: Todos los modelos teóricos de explosiones de tipo SNr estipulan que la estrella presupernova no es de la Secuencia Principal. ¡Cuán grande fue la sorpresa de los astrónomos al encontrar que la progenitora de SN 1987A fue una gigante azul de la Secuencia Principal, específicamente una B3! Nomoto *et al.* [138] han intentado subsanar este problema planteando que la estrella previamente habiase transformado de gigante azul a gigante roja (tal como lo predice la teoría) para después retornar a un tipo similar de gigante azul. El perfil que muestra tal hipótesis, la cual está basada en mecanismos de convección y mezclado de las capas superficiales de la progenitora, aún no es convincente, por lo que la contradicción persiste.

Sin embargo, pese a todos aquellos problemas que pronto saltan a la vista al considerar a la TEE, estoy convencido de que la descripción de las etapas que median entre el nacimiento y la muerte de una estrella es adecuada, aunque, pronto también estoy a reconocerlo, incompleta.

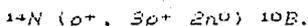
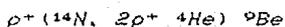
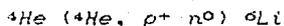
Una conclusión de primerísimo descuelle que se deriva del estudio de las estrellas es la ocurrencia de la transmutación química del universo. Debido a los procesos nucleosintéticos que discurren en los escenarios estelares, el universo paulatinamente se enriquece de especies químicas pesadas. Esto clarifica un importante trecho de la ruta evolutiva de la materia: partiendo de una nube de gas, la TEE brinda una modalidad para dar cuenta del origen, presumiblemente a partir del hidrógeno, de todos los elementos químicos.

Sería de mucho interés el disertar sobre si mediante los mecanismos propuestos por la TEE es posible explicar la composición química fina de nuestra Galaxia. Para este propósito, por principio, está la ventaja de que se poseen estimaciones confiables sobre la frecuencia de ocurrencia de nebulosas planetarias, de novae [170] y de supernovas [39], que son los fenómenos que más pesan en cuanto a la contribución de metales. Mas por desgracia, existen serias incertidumbres en cuanto a las tasas de producción de las reacciones nucleosintéticas [88], en cuanto a la composición química de la galaxia [65], y en cuanto a lo profundamente complicado que resulta la simulación de la evolución química de una galaxia del tipo espiral [9]. Tal reto comparativo entre teoría y observación es, por desgracia, algo aún ineluctable.

Un asidero de una realización no muy remota para la confrontación entre teoría y observación puede ser esperado

del estudio de las galaxias elípticas. Resulta que los modelos que recorren la probable evolución global de las galaxias E no pueden ser enfrentados a las abundancias químicas de tales galaxias por la sencilla razón de que no ha sido posible desentrañar la composición química real de tales cuerpos galácticos. El espectro de éstos nos llega tan tenue, que prácticamente son imperceptibles las líneas espectrales de las cuales poder derivar la presencia y abundancia de las diferentes especies químicas. Sin embargo, no suena a tan lejano futuro el desarrollo de técnicas ópticas que permitan un mayor grado de definición de tales espectros.

Como indicamos en §2.4, la evolución de los distintos tipos de estrellas pueden conducir, bajo diferentes circunstancias, a la formación de la gran mayoría de elementos químicos que conforman la tabla periódica. Empero, los escenarios estelares han sido evidenciados como infructuosos para la forjación del litio, del berilio y del boro. No obstante, el derrotero específico que lleva a la formación de tales especies ha dejado de ser, desde hace algunos años, un enigma [185, 186]. Experimentalmente ha sido demostrado que si a una nube de gas de ^1H , ^4He , ^{12}C y ^{14}N (los elementos más abundantes del universo) se le bombardea con especies semejantes, pero de gran velocidad, se obtiene la formación de ^7Li , ^9Be , ^{11}B y de algunos isótopos de éstos:



Es factible que estas reacciones se lleven a efecto en el interior de las estrellas; sin embargo, siendo estos núcleos químicos tan frágiles, quedan inmediatamente desintegrados en la región central de una estrella. Ha sido observado que, en cambio, esas especies en condiciones de baja densidad pueden ser perdurables. De aquí se desprende que el escenario más probable para la formación del Li, Be y B sea el medio interestelar [186]. La fuente de partículas aceleradas es fácil de postular: los rayos cósmicos. En particular, los rayos cósmicos que son lo suficientemente energéticos para efectuar las reacciones anteriores han sido detectados provenientes de los remanentes de supernova [25].

Cabe, finalmente, apuntar un aspecto más sobre la

evolución estelar y su papel en la transmutación química del universo —un aspecto de gran obviedad, aunque, de otra parte, de fundamentalidad primerísima. Si las estrellas fueran entes que no interaccionan con el medio circunestelar, al menos en cuanto a flujo de materia se refiere, la transmutación del universo sería espacialmente discreta. Pero hemos visto que esto no es así. Los vientos y las erupciones estelares, las nebulosas planetarias, las novae y los remanentes de supernovas son fenómenos mediante los cuales las estrellas «contaminan» al material interestelar. Es de fácil aquilatación la valía que por este concepto tiene la TEE cuando se hacen consideraciones sobre el Origen del Sistema Solar.

A P É N D I C E A:

EL MATERIAL INTERESTELAR

El material interestelar fue puesto en evidencia por vez primera por HARTMANN, en 1904, mientras estudiaba el desdoblamiento de los espectros del sistema binario δ Orionis [63]. La órbita del sistema δ Orionis se encuentra de «canto» con respecto a la línea visual terrestre, por lo que los espectros de sus componentes estelares muestran, alternativamente, corrimientos Doppler hacia el azul y hacia el rojo. HARTMANN detectó, sin embargo, que dos líneas espectrales permanecían a una longitud de onda casi constante ($\sim 3,934$ y $3,968$ nm); estas líneas corresponden al calcio en estado monoionizado (CaII). HARTMANN concluyó que esas líneas de absorción, al no presentar corrimiento, tienen que ser debidas a un sistema ajeno a los movimientos del sistema binario, ubicado entre este último y la Tierra.

Los progresos científicos han permitido la detección de cada vez más zonas y características del material interestelar. En 1937, REBER construyó el primer radiotelescopio, aparato capaz de captar fotones de longitud de onda pertenecientes a la región de radioondas del espectro electromagnético [1]. En 1944, VAN DE HULST predijo que el átomo de hidrógeno con arreglo magnético paralelo, observa una tendencia estadística a «descender» al arreglo de disposición paralela (el estado más estable), emitiendo en el acto un fotón de 21 cm de longitud de onda. VAN DE HULST declaró, guiado por sus conclusiones de índole teórica, que esta transición es muy rara —sucede una vez cada 11 millones de años, en promedio—, mas habida cuenta de la ingente cantidad de hidrógeno existente en la Galaxia, la cantidad de fotones emitidos son los suficientes como para ser detectados por la Tierra. La contribución de REBER facultó a los científicos para estudiar de manera más amplia a las nubes de material interestelar ionizado; VAN DE HULST amplió el espectro hasta las nebulosas oscuras constituidas por átomos neutros.

El intenso desarrollo de la Radioastronomía, sobre todo en la detección de ondas en el infrarrojo (específicamente en la región de $1 \mu\text{m}$ a $30 \mu\text{m}$ [158]), ha permitido que en la actualidad se cuente con tupida información sobre el medio interestelar.

Gracias al prolífico trabajo de observación realizado por los astrónomos durante las últimas décadas, sabemos que

el espacio interestelar está «lleno» de gas y de polvo cósmico, que en total constituyen alrededor del 10% de la masa de las estrellas [63], i. e., la masa de gas y polvo es del orden de $\sim 4 \times 10^6$ masas solares [65]. Resulta una empresa ardua y, hasta el momento, no muy exitosa, el intento de determinar la composición química relativa de la materia interestelar [63,65]. No obstante, se piensa que la composición de tal materia debe ser análoga a la de la materia circunsolar [65]. El polvo, que constituye una cantidad exigua de la materia interestelar, está muy probablemente compuesto por granos de grafito, por silicatos y por hielo [70], con algunas pocas cantidades de alúmina y de óxidos de calcio, de titanio y de hierro [63].

Las condiciones del medio interestelar no son homogéneas, ni mucho menos, a lo largo de la Galaxia [37]. El gas interestelar está presente en dos formas: en fase atómica y en fase molecular^[37]. La fase atómica corresponde a las nubes de gas más difusas, menos compactas y más calientes. Dentro de la fase atómica están las nubes coronales, las nubes internube y las nubes difusas (ver cuadro A-1). Se piensa que las nubes coronales, las cuales alcanzan temperaturas hasta de $1,000,000^{\circ}\text{K}$, están sostenidas por las ondas de choque que se producen en eventos virulentos como las explosiones de tipo supernova [66]. La fase atómica (en particular las nubes coronales) se distingue por ser un material ionizado; se ha logrado detectar, en el ultravioleta lejano, líneas de absorción de oxígeno pentaionizado y, en la región de Rayos X, las correspondientes al oxígeno hexa y heptaionizado [63].

La fase molecular engloba a las nubes de gas más opacas, frías y a la vez las más densas y masivas de la Vía Láctea. La temperatura promedio de las nubes moleculares oscila entre 10 y 60 grados sobre el cero absoluto, intervalo en el cual el átomo de hidrógeno es estable en su estado neutro (a estas regiones también se les conoce como regiones HI, en tanto que a las nubes en las que el hidrógeno se presenta ionizado se les denomina regiones HII). Las principales propiedades del material interestelar en fase molecular están presentadas en el cuadro A-2.

[37] El parámetro de criterio para distinguir material interestelar en fase molecular de material en fase atómica está basado, casi por completo, en el estado del hidrógeno, por ser esta especie química la más abundante.

CUADRO A-1. Características generales del gas interestelar, según FRANCO [29].†

NUBE	INDICADOR	T(°K)	ρ (cm^{-3})	FRACC. DE MASA (%)
Coronal	D ⁺ 5, rayos X	10 ⁵ -10 ⁶	10 ⁻² -10 ⁻³	pequeña
Inter-nube	21 cm (Hz)	10 ³ -10 ⁴	~ 0.1	~ 10
Difusa	21 cm (Hz)	~50-100	1-50	~ 40
Molecu-lar	CO, NH ₃	10-60	10 ² -10 ⁶	~ 50

† Las determinaciones son sólo aproximaciones. Las cuantificaciones de masa y temperatura son particularmente inciertas.

CUADRO A-2. Características del gas interestelar en fase molecular, según FRANCO [29].†

PROPIEDAD	RANGO
Masa	10-10 ⁶ M _⊙
Radio	1-10 ⁷ pc
Temperatura	10-60 °K
Vida media	10 ⁷ -10 ⁹ años
Masa en Galaxia	~ 2x10 ⁹ M _⊙

† Las cuantificaciones son inciertas.

APÉNDICE B:

LAS CLASES ESPECTRALES DE LAS ESTRELLAS

La primera clasificación construida a propósito de los cuerpos estelares, la desarrolló HIPARCO DE NICEA en función de la luminosidad. HIPARCO definió seis clases (*magnitudes*) de luminosidad; en la sexta magnitud aglutinó a las estrellas que apenas son perceptibles por el ojo humano, en la quinta las un poco más brillantes, y así, sucesivamente, hasta las estrellas de primera magnitud, en las que incluyó a las más brillantes del «firmamento». [1]

Los astrónomos modernos han adoptado y depurado el sistema de clasificación de HIPARCO. Una vez que fue posible cuantificar el brillo de las estrellas, se procedió a sistematizar la escala de las magnitudes lumínicas. POISSON, en 1850,² propuso que al valor lumínico de 2.48×10^{-8} vatios/m² le correspondiera la magnitud aparente de cero. Por otro lado, fue convenido, arbitrariamente, en que entre cada cinco magnitudes mediara un factor de 100, de manera que una estrella de magnitud uno fuera cien veces más brillante que una de magnitud seis^[3a]. [1]

En esta clasificación suele ocurrir que a una determinada estrella sea necesario asignarle una magnitud que desborde cualquiera de los límites originarios del sistema de HIPARCO. Así lo, la estrella más brillante del firmamento, tiene una magnitud aparente de -1.42 ; la de la Luna es de -12.6 y la del Sol de -26.8 . Por el otro extremo, la luz que proviene de los cuasares más brillantes nos llega tan disminuida, que su magnitud es de $+12.8$; los objetos más tenues que es posible detectar con los telescopios más potentes son de magnitud $+28$. [11,143]

Hasta el momento, hemos hecho referencia a las magnitudes aparentes de las estrellas, esto es, a la intensidad con la que la luz de éstas llega a la Tierra, información que generalmente no dice mucho. Al comparar la cantidad de energía lumínica que llega a la Tierra proveniente del Sol y de Sirio, pareciera que éste es 1.42 billones (1.42×10^{10}) de veces más tenue que aquél, siendo

[3a] El uso de esta graduación de magnitudes tiene la ventaja de que se ajusta a una relación tan simple como

$$m_a - m_b = 2.5 \log I_a / I_b,$$

en donde m y I son, respectivamente, la magnitud y la luminosidad aparentes de las estrellas.

que intrínsecamente Sirio es, aproximadamente, 22.5 veces más brillante que el Sol. La diferencia entre las magnitudes aparentes y las reales entre estos astros radica en que el Sol está a apenas 149.5 millones de km de nosotros, en tanto que Sirio lo está a 8.2128×10^{13} km, casi 550,000 veces más lejos que el Sol. [1,143]

Los astrónomos han creado la *magnitud absoluta* como parámetro en el que se excluye la desvirtuación de la luminosidad debida al efecto de la distancia. Esta magnitud está definida como el brillo aparente con el que se percibiría una estrella si ésta fuera colocada a 10 parsecs de distancia de nosotros.

La magnitud absoluta de una estrella (M) puede ser calculada considerando su distancia real a la Tierra (d) y su magnitud aparente, a partir de la simple relación

$$M = m - 5 \log d + 5. \quad (81)$$

Con base en esta fórmula, al Sol se le asigna una magnitud absoluta de +4.8 y a Sirio de +1.42 [131]⁽³⁰⁾.

La temperatura superficial de las estrellas es otra propiedad intrínseca que a la postre resultó dato fundamental en el estudio de los cuerpos estelares. A fines del siglo pasado, ya se tenía la certeza de que el tipo e intensidad de radiación que emite un cuerpo es característico de su temperatura. Estudiando este fenómeno, WIEN encontró la relación empírica

$$\lambda_{\text{máx}} T = 2.9 \times 10^7. \quad (82)$$

A $\lambda_{\text{máx}}$ se le conoce como el pico de radiación de un cuerpo, y representa la longitud de onda en la que radia preferentemente un cuerpo de temperatura T . La ecuación del

{30} La luminosidad aparente de una estrella es fácilmente cuantificable; actualmente se cuenta con equipo que determina confiablemente hasta centésimos de unidad de magnitud. Por desgracia, para la determinación de la distancia aún no existen formas tan confiables. Para estrellas no más lejanas de 100 años luz, el método del paralaje funciona adecuadamente; empero, la distancia de estrellas más lejanas sólo es mensurable con métodos estadísticos en los cuales se involucra un grado de incertidumbre [12]. No obstante, no se requiere una posición muy optimista para aceptar que tales métodos arrojan cuantificaciones no muy alejadas de las distancias reales.

deslizamiento de Wien funciona óptimamente cuando se trata de describir el comportamiento de un cuerpo que actúa como un receptor o emisor perfecto de radiación (en el *argol* de la Física, a este caso idealizado se le denomina *cuerpo negro*). No obstante, es posible considerar a las estrellas como cuerpos negros imperfectos que poco se desvían del comportamiento ideal. [13]

Ha sido encontrado, a través del análisis espectral, que el Sol radia predominantemente en la longitud de onda de aproximadamente 5000 Å (si no fuera por la labor de dispersión lumínica efectuada por la atmósfera terrestre (*dispersión Rayleigh*), al Sol le veríamos de color verde). De acuerdo a la ley de Wien, la temperatura superficial de nuestro astro debe ser de $\sim 5,800^{\circ}\text{K}$. [13]

En 1896, CANNON caracterizó a las estrellas de acuerdo a su espectro. Asignó una A a las estrellas cuyos espectros muestran con mayor intensidad las líneas de absorción del hidrógeno; usó la B para las que presentan líneas menos intensas; y así, sucesivamente. Una vez fue determinada la temperatura a cada clase espectral, fue evidenciado que la clasificación de CANNON no se ajusta a un continuo de variación térmica. La nomenclatura de CANNON ha sido conservada; empero, la secuencia de clases espectrales fue modificada, quedando finalmente establecida, con base en el gradiente de temperatura, como se señala en el cuadro B-1. Cada clase se subdivide en diez subclases, las cuales se simbolizan con un número que puede ser del 0 al 9 (el 0 para la subclase más caliente) y que se coloca a continuación del símbolo de la clase. El Sol, por ejemplo, es del tipo espectral G2.

En 1913, HERTZPRUNG y RUSSELL, en forma independiente, expusieron un gráfico en el que relacionaron la temperatura superficial (dispuesta en forma decreciente en el eje de las abscisas) con la magnitud absoluta de un nutrido número de estrellas [175] (figura 2.4). A este gráfico se le conoce como el *diagrama Hertzsprung-Russell* o, simplemente, *diagrama H-R*. En él ocurre una franja, que corre del ángulo superior izquierdo al ángulo inferior derecho, en la que se aglutinan alrededor del 99% del total de estrellas; dicha franja lleva el nombre de *Secuencia Principal*. El grupo más conspicuo que es excepcional a esta secuencia, lo conforman las enanas blancas, estrellas muy calientes y pequeñas, cuya disposición en el diagrama es en el flanco izquierdo de la Secuencia Principal. Las estrellas gigantes rojas, ubicadas en el flanco derecho de la Secuencia, constituyen otra excepción significativa; son estas estrellas frías que emiten gran cantidad de energía debido a su descomunal tamaño. Se estima que el número de enanas blancas es 100

veces menor al de la Secuencia Principal, y que el de las gigantes rojas es a su vez 100 veces menor que el de las enanas blancas. [175]

CUADRO B.1. Clases Espectrales Estelares, ordenadas en virtud de su temperatura superficial. (Tomado de NARLIKAR [13]).

CLASE	TEMPERATURA SUPERFICIAL (°K)	LÍNEAS ESPECTRALES CARACTERÍSTICAS
O	Superior a 30,000	helio ionizado
B	11,000— 30,000	helio neutro
A	7,200 — 11,000	hidrógeno
F	6,000 — 7,200	calcio ionizado
G	5,200 — 6,000	calcio ionizado y metales neutros
K	3,500 — 5,200	metales neutros
M	Inferior a 3,500	metales neutros y bandas de absorción de moléculas

CAPÍTULO TERCERO SOBRE EL ORIGEN DEL SISTEMA SOLAR

¡Gran Astro! ¿Si te faltasen aquellos
a quienes iluminas, cual sería tu
felicidad?

F. NIETZSCHE, *Así Hablaba Zaratustra*

La transición desde el amplio campo de lo astrofísico al particular campo de la formación del Sistema Solar, está enmarcada, análogamente a como lo está la transición desde la Cosmología a la Astrofísica, con ciertas particularidades que hacen del sentido otorgado a los objetos de estudio relacionados algo marcadamente disímil.

El estudio de la formación del Sistema Solar hace indefectiblemente alusión al vasto terreno de la Astrofísica: los motivos son por demás evidentes. No obstante, es frecuente que los investigadores consagrados al estudio de la cosa solar y planetaria declinen a la consideración de muchos problemas astrofísicos, dejándolos, en todo caso, a la disposición de aquéllos que se dedican al estudio de las estrellas en general, y han preferido, en cambio, encauzar sus esfuerzos exclusivamente a la solución de problemas no menos formidables que se erigen en el confeccionamiento de modelos de formación de sistemas planetarios. Ciertamente, imposible es dejar al soslayo que el Sol es una estrella, y que sobre el debate de la formación y las etapas precoces de las estrellas están aún engarzadas grandes incertidumbres entre los modelos y la observación. Mas por la envergadura de los problemas inherentes tanto al nacimiento de los astros como al de la formación de cuerpos planetarios, el deslinde entre la formación de una estrella y la formación de un sistema planetario, siempre parcial y arbitrario, es, hasta el

momento, inexpugnable. La actitud, casi generalizada, en torno a las pesquisas sobre la construcción del Sistema Solar, es que más que investigar sobre la formación de un astro y algunos planetas asociados, el problema debe quedar definido como la indagación sobre la formación de un conjunto de cuerpos menores que giran alrededor de un cuerpo masivo [32]. Siguiendo esta línea es por lo que en el presente capítulo, a diferencia del anterior, el factor secundario de investigación —aunque no por ello secundario en importancia— es el astro.

Esta fórmula epistemológica trae a colación un aspecto de suma relevancia. Por desgracia, sólo es conocido un ejemplo de sistemas planetarios: el nuestro. Los esfuerzos que han sido invertidos en la detección de otros sistemas no han rendido las primicias esperadas. No obstante, el disminuir cierta importancia al cuerpo central, y el atender primordialmente a los cuerpos que lo circundan, permiten la suficiente flexibilidad como para tratar a los sistemas de satélites que existen en el Sistema Solar como «sistemas planetarios en miniatura» (siempre y cuando, por supuesto, en tal parangón sean tomadas en cuenta diferencias por demás evidentes). Así, la construcción de modelos aplicables a sistemas constituidos por un cuerpo masivo y otros pequeños orbitándole a éste, hace posible incluir a cuando menos cinco sistemas con los cuales cotejar las predicciones teóricas [121] ^{1}.

{1} Se tienen dos importantes elementos de naturaleza observacional que muy probablemente en un futuro no muy lejano redundarán en un considerable avance de nuestro conocimiento al respecto de la formación de sistemas planetarios.

Uno de esos elementos es referente a la detección de lo que al parecer son «discos planetarios» asociados a estrellas neonatas, sobre todo de los tipos espectrales A, F y G. La detección es inferida del exceso de radiación infrarroja proveniente de ciertas estrellas jóvenes. Tal exceso ha sido atribuido a un disco de polvo asociado a la estrella, que al ser calentado por la estrella, reemite la radiación en forma de calor. (El caso de β Pictoris es de especial interés para los astrónomos, puesto que a tal estrella, a más del profuso exceso infrarrojo, se le ha logrado fotografiar una concha de gas). Aunque aún es desconocido el intervalo y distribución de tamaños para los granos componentes de tales discos, para algunos casos se tiene la certeza de la ausencia de partículas de tamaño submicrónico ($\varnothing < 1\mu$). De otra parte, ha sido sugerida la

Haciendo eco a los delineamientos establecidos en §2.2, cabe aquí cuestionar sobre cuál es el mecanismo de formación estelar con el cual debiera ser investigado el problema de la formación de una estrella cuando es abocado al de la formación de planetas. Aunque cierto es que no existe forma de dirimir la controversia conceptual entre la hipótesis de AMBARTSUMIAN [7] y la de HAYASHI [91], me parece que la escasez de conocimientos hace que la respuesta no tenga vuelta de hoja. Que la hipótesis de AMBARTSUMIAN pueda siquiera insinuar cómo un planeta puede ser formado por medio de procesos de decadencia y expansión, es algo aún inconcebible. Podriase, ciertamente, barrantar en torno a una concatenación ecléctica entre la hipótesis de decadencia y eyección y algunos mecanismos que fungan como directriz en la transición de formas de baja densidad a cuerpos compactos. Postular, acaso, que el Sol fue formado de un cuerpo superdenso, y que los planetas derivaron del colapso del gas y del polvo eyectados durante la gestación solar. Es interesante especular, pero para no construir castillos en el aire, son requeridos datos o evidencias que permitan dar soporte (directo o indirecto, pero soporte al fin) a tales especulaciones, evidencias o datos de los cuales aún carecemos.

Así, por lo antedicho, y por factibilidad teórica de escrutación ^{2}, queda entonces el ceñir las consideraciones

interesantísima posibilidad de que algunas de las propiedades detectadas en los discos puedan ser atribuibles a cuerpos de tamaño planetario. Existe una lamentable escasez de datos al respecto de tales sistemas; no obstante, todo parece indicar que no lejana está la ocasión en que sea posible incluir en los modelos teóricos propiedades de discos planetarios directamente determinadas mediante la observación. (139)

El segundo elemento está relacionado con la factibilidad de detectar cuerpos planetarios no pertenecientes al Sistema Solar. En opinión de algunos científicos, ya se está en posibilidad de construir aparatos telescópicos que no sólo permitan distinguir planetas asociados a otras estrellas, sino de que incluso posibiliten la detección de algunas propiedades suficientes como para poder averiguar si tales planetas ostentan un tipo de vida similar al terrestre! (10)

{2} Recuérdese que la hipótesis de la decadencia es incapaz de ofrecer algún mecanismo teórico para tratar el nacimiento estelar: *misterium magnum*.

sobre la cosa solar a la hipótesis ortodoxa de la formación estelar. Mas es de tenerse en cuenta que en esta transición teórica de un ámbito general —el conjunto de estrellas— a uno particular —el Sol— subyacen un fardo de incertidumbres que son arrastradas con el peligro latente de que las indagaciones se derrumben debido al desmoronamiento de la hipótesis que les sustenta. Dada esta advertencia, de aquí en adelante se tomarán los tópicos tratados en §2.2 como prolegómenos a lo discutido en este capítulo a propósito de la formación del Sistema Solar. A lo largo del capítulo, tomaremos como premisa fundamental el postulado, aún por demostrar, de que el Sol, así como el resto de los integrantes del Sistema Solar, provienen de la diferenciación de un material que en alguna ocasión estuvo disperso formando una gran nebulosa: la *nebulosa solar* (de aquí en adelante NS) ^{1a)}.

Los modelos forjados sobre la formación del Sistema Solar han sido agrupados en dos vertientes generales: en la vertiente *dualística* o *catastrófica* a aquéllos en los que el origen es hipotetizado a partir de una perturbación gravitatoria que pudo haber sufrido un Sol preexistente por parte de otro cuerpo masivo, y en la vertiente *monística* o *nebulosa* a las hipótesis con las que es pretendido explicar la formación mediante el colapso de una nebulosa. [33,184]

La tradición monística fue concebida originalmente por DESCARTES, en su *hipótesis de los vórtices* [50]. Esta hipótesis, que para el pensamiento moderno puede resultar

^{1a)} A lo largo de este capítulo, una y otra vez recurriremos a la contextualización de los diversos rubros relacionados con la formación del Sistema Solar en las diferentes materias tratadas en el capítulo anterior. Pensar que la *Astrofísica* solamente está relacionada con la cosa solar en tanto al tratamiento del origen del Sol como un astro, sería de nuestra parte una visión harto limitada. Como veremos más adelante, esta rama nos permite desde el poder postular plausibles rutas para la formación y el desencadenamiento de la diferenciación de la NS, hasta el predecir la historia verdadera de nuestro astro y del Sistema en general. Además, mediante ella nos es posible participar en el juego doble de especular en torno al comportamiento estelar en función de un caso particular: el Sistema Solar, y viceversa, desentrañar la explicación de las particularidades de nuestro Sistema mediante el estudio de la trama escenificada por el gran zoológico estelar. Todo ello enmarcado en una compleja historia de la materia.

llena de términos oscuros y de razonamientos endebles, fue retomada y desarrollada, un siglo después de su aparición, en forma independiente, y con una conceptualización ya postrenacentista, por KANT y por LAPLACE. A esta versión monística se le conoce, generalmente, como la hipótesis laplaceana.

Según KANT y LAPLACE, la materia primigenia de la cual fueron formados el Sol y los planetas fue una gran nube de gas y de polvo cósmicos, amorfa y de masa un poco mayor que 1 M_⊙. La nube, que originalmente estaba dotada de cierta cantidad de momento angular, comenzó a contraerse, de tal suerte que el gas y el polvo se desplazaron paulatinamente hacia el baricentro nebular. Naturalmente, el proceso contractivo encadenó un aumento paralelo de la velocidad angular. Hubo un momento en que el cuerpo en colapso —por decir: el protosol— giraba tan rápido que se tornó altamente inestable, fundamentalmente en la región del ecuador. Una contracción ulterior suscitó que la «fuerza centrífuga» ecuatorial superara a la atracción gravitatoria, por lo que de esa zona se desgajó un anillo de materia. El desprendimiento tomó lugar cuando el protosol tenía un diámetro similar al de uno de los semiejes de la órbita de Neptuno. La hipótesis indica que a la postre, la materia eyectada se congregó en un solo cuerpo que llegó a ser un planeta. En tanto, el colapso del protosol avanzaba; por el mismo fenómeno de colapso-inestabilidad, subsecuentes anillos fueron emitidos del ecuador, cada uno de los cuales rindió un nuevo planeta. [154]

Realmente, es extraño que la hipótesis de KANT y LAPLACE, por lo menos en su forma original, haya perdurado por tanto tiempo (alrededor de dos siglos) como válida en la palestra científica. Inicialmente, se tuvo la impresión de que era satisfactoria la aproximación rendida para las órbitas coplanares de los planetas y de los satélites. Sin embargo, fue demostrado que si es considerada la estructura real de una nebulosa molecular (esto es, un cuerpo asimétrico e inhomogéneo), resulta prácticamente infactible que el proceso laplaceano rinda un disco uniforme del cual, hipotéticamente, puedan derivar cuerpos planetarios [3] ^[4].

{4} Algunos laplaceanos modernos sostienen que la coplanaridad y cuasiesfericidad de las órbitas planetarias son evidencia, *per se*, de que la NS, al menos en la fase inmediata anterior a la formación del Sistema Solar, posea una constitución no caótica [152]. Por supuesto, se trata de científicos que no tienen empacho en desdeñar y soslayar a los datos empíricos, con tal de que la postura plasmada en

La hipótesis erra también al ser confrontada con otras propiedades de carácter fundamental del Sistema Solar. De acuerdo a la velocidad cada vez mayor con la que debieron ser emitidos los anillos, los sentidos de rotación de los planetas deberían de ser retrógrados, y no prógrados [1]. La hipótesis laplaceana no tenía explicación alguna sobre la dimensión de los planetas. El mecanismo de emisión de anillos estipulado por esta hipótesis resulta del todo inconducente [5], además de que no se da razón por la que la emisión haya tenido que ser espaciada, y no continua. Ninguna sugerencia es proporcionada en torno al vehículo por el cual el material componente de los anillos pudo ser colectado en cuerpos planetarios.

Con todo, el hecho observacional que ocasionó la desacreditación de esta hipótesis es lo referente a la distribución del momento angular. Sería de esperarse que al final del proceso de contracción del Sol, éste, que acapara el 99.8% de la masa total del Sistema, girara rápidamente, por lo que en él también tendría que estar concentrado el grueso del momento angular total. Esta predicción es, evidentemente, insostenible, puesto que los planetas portan ~98% de tal magnitud. [126]

La decadencia de la hipótesis laplaceana propició el refloramiento de la hipótesis dualística de BUFFON, la cual, para fines del S. XIX, obtuvo nuevos exponentes en CHAMBERLIN y en MOULTON. La hipótesis fue figurada en términos de la interacción del Sol con un astro que se le acercó lo suficiente como para generarle una perturbación gravitatoria —BUFFON había propuesto a un cometa como el objeto masivo perturbador. La fuerza de marea que fue provocada entre los astros por el acercamiento, originó que el Sol eyectara una gran «ola» de materia que formó un puente entre éste y el astro visitante. Durante la separación de los dos cuerpos estelares, éstos tuvieron que invertir energía para lograr la ruptura del puente, lo cual

sus hipótesis prepondere. Estamos a fines del siglo XX y aún no hemos podido superar actitudes que rememoran las concepciones místicas del pitagorismo.

{5} En efecto, considerando la cantidad de momento angular total que posee el Sistema Solar, resulta imposible que el protosol haya emitido un anillo cuando poseía el tamaño de la órbita de Neptuno; la cantidad de momento angular es insuficiente como para que en un cuerpo en colapso de dimensiones tan colosales, haya sido generada la inestabilidad prescrita por la hipótesis (33,152).

tomó efecto a costa del momento angular. Después de que aquéllos quedaron definitivamente separados, la ola de materia (quizá en virtud del momento angular que ésta agenció durante el proceso) no retornó al Sol, sino que se mantuvo en órbita alrededor de éste, para después congregarse y conformar los embriones planetarios. El Sol, por su parte, adquirió su parco valor actual de velocidad de rotación. Por lo que toca al tamaño de los planetas, JEANS y JEFFREYS [184] hicieron una variante adecuada de la hipótesis proponiendo que la ola eyectada adoptó una forma de huso (el centro más ancho que los extremos). [33,122]

Sin embargo, esta hipótesis acusó serios problemas con el avance de la ciencia. Estudios geológicos y astronómicos sugieren que el Sol y los planetas son coetáneos [1]. El estudio de hidrodinámica de plasmas revela que si fuera lograda una ola como la señalada por la hipótesis catastrófica, el material eyectado se disiparía debido a su alta temperatura, en lugar de condensar en planetas [184]. Por otro lado, la presencia de deuterio en algunos meteoritos evidencia que tal material nunca ha estado sometido a un ambiente en donde la temperatura fuera superior a $7 \times 10^5 \text{ K}$ [95]. En la hipótesis dualística es sugerido, aunque nunca fue enunciado explícitamente, que el momento angular de todo el Sistema Solar estuvo alguna vez concentrado en el Sol. Cálculos numéricos, sin embargo, indican que si al Sol le fuera transferida tal cantidad de momento angular, quedaría desintegrado *ipso facto* [78]. Finalmente, cabe señalar que este tipo de eventos tienen una probabilidad escasa de ocurrencia, lo que entra en pugna con la esperanza de que en el futuro sea posible hallar otros sistemas planetarios y, quizá, vida inteligente [98,172].

Desde principios del S. xx sólo una vertiente ha trascendido, y ésta es la nebular. Además de las diversas modalidades desarrolladas a partir de la hipótesis laplaceana, que hasta el momento forman un número considerable, se han significado algunos modelos «no laplaceanos», los cuales gozan actualmente de muchos adeptos. El distintivo de estos modelos reside en afirmar que el material del cual se forjaron los planetas fue un remanente de la NS que no participó en el colapso global del cual tuvo lugar la formación del Sol, sino que recorrió una ruta independiente hacia la formación del disco planetario (ver, e. gr., [34]). En las siguientes secciones es tratada la formación del Sistema Solar desde esta perspectiva *nebular no-laplaceana*. Simplemente no se incluye el concepto laplaceano por ser realmente numerosas las premisas *ad hoc* requeridas para «armonizar» a la hipótesis laplaceana con algunos parámetros que están manifiestos en el Sistema Solar.

§3.1

EL PROBLEMA

Hasta hace sólo unas décadas, el tópico del origen del Sistema Solar era abordado desde una concepción simplista, en el sentido de que se poseía escasa información sobre las propiedades finas del Sistema. La ley de Titius-Bode, el tamaño de los planetas, la distribución del momento angular y lo relacionado con las órbitas y el sentido de giro de los planetas, eran las principales cuestiones a resolver. Sin embargo, el análisis de meteoritos [32,80], los frutos de las misiones espaciales [126,162], el desarrollo de técnicas experimentales y el sofisticamiento de las técnicas espectrofotométricas, han socavado estas cuestiones, llevándolas a profundidades en las que incluso su planteamiento ya no parece tan claro, además de que han agregado nuevas interrogantes de difícil solución.

A continuación están desglosados los principales rubros que deben ser considerados en una teoría sobre la formación del Sistema Solar.

Rubro 1. PROVENIENCIA DE LAS ESPECIES QUÍMICAS. Es estimado que ~70% de la masa del Sistema Solar es hidrógeno, que ~28% es helio y que el resto (~2%) lo conforman los demás elementos de la Tabla Periódica [11]. Con cierta flexibilidad, es dado el considerar que la Teoría de la Evolución Estelar es capaz de resolver la construcción del helio y demás elementos pesados (*supra*, §2.3-§2.6) [100]. Queda entonces por averiguar sobre los fenómenos causales puntuales que hicieron posible que a una nube, la cual a la larga sería germen de la NS, llegaran en proporciones adecuadas las especies químicas cuyo escenario nucleosintético fue el estelar.

Rubro 2. CONSTRUCCIÓN DE LA NS E INICIO DEL COLAPSO. La edad del Sistema Solar es apenas un tercio de la edad de la Galaxia [69]. Es necesario entonces esclarecer: (1) qué fenómenos, actuando varios evos después del nacimiento galáctico, condujeron a la formación de una nebulosa molecular autogravitante que, presumiblemente, adquirió un equilibrio hidrodinámico, y (2) qué fenómeno perturbó a tal nebulosa, propiciándole la detonación del colapso.

Rubro 3. FORMACIÓN DEL SOL. Aunque si bien es cierto que es necesario dejar al soslayo diversas incertidumbres relacionadas con el nacimiento solar, existen otras que resultan de máximo interés en la comprensión de la cosa planetaria. Por ejemplo, ha sido determinado observacionalmente que la mayoría de estrellas están relacionadas espacialmente con, por lo menos, otra estrella [98,110]. (En este sentido, el Sol, como miembro solitario,

no es una estrella representativa^{6}). Incluso, en los modelos de formación estelar es concluido, generalmente, que las nebulosas colapsantes llegan a conformar sistemas estelares múltiples [27]. Es, pues, necesario determinar cuál fue el mecanismo que permitió el aislamiento del Sol y de la masa residual de la cual se formaron los planetas.

Rubro 4. TIEMPO DE FORMACIÓN DEL SISTEMA SOLAR. El análisis de las abundancias de ^{129}Xe y de ^{26}Mg en algunos meteoritos ha permitido concluir que el intervalo entre el último período nucleosintético que contribuyó para la composición de la NS y la formación de tales meteoritos no fue mayor de algunos millones de años [32,36]. Los procesos físicos que sean postulados en la hipótesis deben ser lo suficientemente breves como para ajustarse a tal período.

Rubro 5. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LOS METEORITOS. Los procesos y condiciones que sean hipotetizados deben acotarse hacia la satisfacción de las condiciones de construcción de los meteoritos [126], los cuales, de otra parte, mediante el análisis de su composición mineralógica, permiten una primera aproximación hacia las condiciones que reinaron en la NS [3,80].

Por otro lado, esa composición mineralógica indica que el proceso de formación del Sistema Solar no fue lineal, sino que durante él acontecieron fenómenos complejos y variantes para los cuales es requerida una explicación [80,97].

Rubro 6. PROPIEDADES DE LA NS. Además de la

{6} Si bien el consenso actual es de que el Sol es una estrella dinámicamente libre [78], existe, sin embargo, una conocida hipótesis sobre la extinción masiva de especies biológicas, en la se ha recurrido a la existencia de una compañera del Sol (llamada Némesis) para dar explicación a lo que aparentemente se trata de extinciones masivas periódicas. Esta hipotética estrella, que proyecta con respecto al Sol una órbita muy excéntrica y que demora ~26 millones de años en cubrir una revolución, durante su perihelio causa disturbios gravitatorios a diversos cuerpos menores del Sistema Solar (tales como cometas). Muchos de estos cuerpos son precipitados hacia el centro del Sistema Solar y algunos llegan a intersecar con la Tierra. Estas colisiones, según la hipótesis, han sido el agente causal de gran parte de las extinciones biológicas masivas. [18,150]

De otra parte, debe tenerse presente que es muy probable que Júpiter sea una estrella que no alcanzó a desarrollarse plenamente. Así que quizá este planeta y el Sol conforman un sistema binario como si dijéramos frustrado.

temperatura y de la presión, la teoría debe dar señal, entre otros factores, de la cantidad de momento angular, del campo magnético y del gravitatorio. Establecer, en suma, cuál fue el papel de cada uno de ellos durante la gestación del Sistema Solar.

Ahora bien, si el período principal de formación de estrellas en la Vía Láctea sucedió hace más de 10 evos, vale como razonable la extrapolación de que las condiciones interestelares actuales son sustancialmente semejantes a las de hace 4.7 evos, cuando el Sistema Solar fue formado [33,34,126]. Por ende, una aproximación más para la determinación de los componentes físicos y químicos primitivos de la NS debe ser efectuada mediante el análisis de las nubes moleculares actuales [126].

Si es supuesto que la NS, *grosso modo*, poseía una composición química homogénea, entonces es evidente que su masa fue mayor a la que ahora posee el Sistema Solar [33]. Un punto a lograr es la determinación de la masa mínima de la cual derivó el Sistema Solar, a más de elucidar el cómo es que fue perdida la masa que no logró anexionarse a los cuerpos finalmente formados.

Rubro 7. LAS IMPLICACIONES DEL ISOCRONISMO DE LA FORMACIÓN DE LOS CUERPOS QUE INTEGRAN AL SISTEMA SOLAR. Es sabido que las estrellas de tipo T Tauri presentan en su espectro líneas de emisión de litio. Como esta especie química es sumamente sensible a altas temperaturas, se sigue que tales estrellas tienden a perder gradualmente su litio [95]. Resulta que los meteoritos poseen cantidades de litio semejantes a las de las estrellas T Tauri, en tanto que el Sol presenta cantidades deficientes con respecto a éstos. Esto ha permitido concluir que el material con el cual fue formado el Sol —si es que este realmente transitó por una etapa T Tauri— fue el mismo del cual fueron originados los meteoritos [95]. Otras razones de ello, se derivan del análisis de composición química y del fechamiento tanto del Sol como de los cuerpos meteóricos [126].

Se tiene el cómputo de que la diferencia máxima de tiempo entre la formación del Sol y la de los meteoritos es no mayor que 10⁹ años. Métodos numéricos, por otra parte, indican que este intervalo pueber ser menor por algunos órdenes. Esta coetanidad implica que los fenómenos intempestivos que fueron suscitados durante el nacimiento de nuestro astro hubieron de interferir (sin inhibir) en la formación de los planetas. Queda entonces por determinar la influencia que el joven Sol tuvo a nivel de diferenciación hacia los embriones de los planetas mientras éstos se desarrollaban.

Rubro 8. DISTRIBUCIÓN DE MASAS. Resulta un punto inevitable y fundamental el poder explicar por qué el Sol posee el 98% de la masa del Sistema, en tanto que con el

exiguo resto están conformados los planetas, satélites, anillos, asteroides y cometas [1,126]. Aquí, el meollo del problema radica en poder explicar cómo fue posible que una pequeña cantidad de material quedara detrada del colapso general en el que estaba inmersa la NS, para seguir un derrotero independiente hacia la constitución de un disco planetario, primero, y de un sistema planetario, finalmente.

Rubro 9. DISTRIBUCIÓN DEL MOMENTO ANGULAR.

Similarmente, es necesaria la explicación del por qué en el 2% de la masa del Sistema Solar está concentrado el 99.8% del momento angular total [1,126].

Rubro 10. DINÁMICA PLANETARIA Y SOLAR. Bajo este enunciado se incluye a las siguientes propiedades [122]:

- (A) Órbitas cuasiplanares (la órbita de Plutón es la de mayor inclinación con respecto a la eclíptica, siendo el ángulo de 17.2°);
- (B) Sincronía en los sentidos de traslación y rotación del Sol y de los planetas y satélites (a excepción de Venus y Tritón, que son de rotación retrógrada); y
- (C) Perpendicularidad de los ejes de rotación hacia su órbita (la excepción a la regla son Urano y Plutón, que están inclinados $82^\circ 05'$ y $28^\circ 48'$, respectivamente).

Rubro 11. LA LEY BODE-TITIUS. En 1772, BODE publicó una relación empírica que TITUS había descubierto en relación a la distancia de los planetas al Sol [184]. La relación establece que si a cada uno de los miembros de la sucesión geométrica 0,3,6,12,24,48,... se le adiciona un 4 y se le divide por 10, son obtenidas las diferentes distancias de los planetas al Sol (cuadro 3.1). Aunque para muchos esta serie no representa más que una coincidencia, algunos otros la han tomado como un hecho necesario de explicar y han intentado proponer el marco teórico para dar cuenta de su origen [152].

Rubro 12. FORMACIÓN DE LOS PLANETAS Y DE LOS SATÉLITES. Teóricamente, dos son los procesos que podrían conducir a la formación de los planetas. Inestabilidades gravitatorias pudieron haber actuado para que en ciertas regiones del disco planetario la materia empezara a caer sobre sí misma, creciendo los focos de acumulación hasta dimensiones planetarias [192,193]. La otra alternativa es que los planetas hayan derivado de la acumulación de diversos cuerpos de tamaño menor originados en el medio nebular [74,192]. En cualquiera de los casos, el problema estriba en la forma en la que pudo ser «colectado» el material disperso para lograr un espacio cuasivacío, sólo ocupado por cuerpos que en relación al estado de la NS resultan muy densos y compactos. Ambas posibilidades de formación, así como el problema referente a la colecta, están relacionados con los satélites.

CUADRO 3.1. Distancia de los diferentes planetas al Sol según la Ley Bode-Titius (tomado de VIDAL [184]).

PLANETA	DISTANCIA REAL (u. a.)†	DISTANCIA ESTIMADA (u. a.)
Mercurio	0.39	0.4
Venus	0.72	0.7
Tierra	1.00	1.0
Marte	1.52	1.6
Asteroides	2.65 ‡	2.8
Júpiter	5.20	5.2
Saturno	9.54	10.0
Neptuno	19.19	19.6
Urano	30.07	38.8
Plutón	39.52	77.2

† Una unidad astronómica (u. a.) = 150,000,000 km.

‡ Valor promedio.

Rubro 13. DIFERENCIAS ENTRE LOS PLANETAS TERRESTRES Y LOS JOVIANOS. Desde hace algún tiempo es un hecho bastante evidente que los planetas jovianos (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno) comparten características que los diferencian del grupo de los planetas terrestres [106]. Comparados con éstos, los primeros son planetas muy ricos en elementos ligeros, masivos, poco densos, que giran muy rápido sobre sí mismo y que poseen satélites y anillos [106,126] (realmente, el sistema Luna-Tierra es una irregularidad a la regla de los planetas terrestres). ¿Qué motivó tales diferencias entre terrestres y jovianos?

Rubro 14. FORMACIÓN DE LOS ASTEROIDES. De acuerdo a la relación Bode-Titius, a ~2.8 u.a. del Sol debería estar ubicado un planeta; en lugar de éste, está localizado un gran cinturón de asteroides cuyo origen es deseable establecer.

Rubro 15. ORIGEN Y DINÁMICA TRASLACIONAL DE LOS COMETAS. Los cometas poseen una composición química que es estimada como muy semejante a la que poseyó la NS primitiva. Sobre estos cuerpos se cierne la duda de en qué parte de la NS condensaron y de qué factores se conjugaron (y se siguen conjugando) para que sus órbitas sean de excentricidades tan pronunciadas.

§3.2.

LA HIPÓTESIS

ALFVÉN [3] hizo la propuesta, con el propósito de que fuera tomada en calidad de hilo conductor en la indagación sobre la formación del Sistema Solar, de que los eventos sean reconstruidos en un sentido cronológico negativo. La teoría que explique la historia evolutiva del Sistema Solar (y, en general, cualquier teoría) debe ser originada de manera retrospectiva, analizando el presente y desandando, paso a paso, a través de las derivaciones de este análisis, hacia el pasado. Así, sería reducida grandemente la recurrencia al juego audaz, y a veces temerario, de forjar hipótesis *ad hoc* en las que, frecuentemente, son postulados fenómenos y condiciones fisicoquímicas que a la postre son evidenciados como líneas puras de la «abstracción» (léase: «imaginación») de los científicos, y que, *a priori*, no necesariamente tienen vínculo con la verdadera historia y naturaleza del fenómeno inquirido. Bajo esta perspectiva, sería extirpada la inclinación de algunos científicos por buscar en las relaciones matemáticas y en las predicciones teóricas el verdadero sentido del cosmos, búsqueda en la que, frecuentemente, las excepciones no importan, ni las contradicciones con respecto a la experiencia trascienden.

Como primer factor para aplicar esta epistemología, sería necesario contar con el suficiente número de datos empíricos que hagan viable la reconstrucción. (Esto restringe en un alto grado su aplicación hacia diversos tópicos de la cosa celeste, e. g., el conocimiento que se tiene en detalle fino sobre el universo es tan escaso, que realmente es infraguable una hipótesis que retrospectivamente delinee el presente hasta llegar al origen del universo). Al parecer, tal factor puede ser satisfecho para el caso del Sistema Solar. El Sistema Solar constituye el entorno más inmediato de nuestro planeta-hogar. Conocemos más sobre las condiciones de los planetas o sobre las propiedades del Sol, que sobre las profundidades de los océanos terrestres. Este nivel cognoscitivo ha brindado la preciosa oportunidad de, por lo menos, hacer el intento de entablar un vínculo estrecho entre las postulaciones teóricas y los datos empíricos.

Independientemente del ámbito particular en el cual las pesquisas sean iniciadas, el análisis de los datos observacionales revela una evidencia muy clara: por lo menos durante los últimos 4 mil millones de años el Sistema Solar ha sufrido alteraciones dinámicas y de composición poco significantes. No existe observación alguna que sugiera, al menos remotamente, que durante ese intervalo temporal las

órbitas planetarias sufrieran perturbaciones sensibles o que la composición química y la estructura de los planetas y demás cuerpos menores sufrieran algún cambio. De hecho, de hacer andar en reversa al aparato matemático de la mecánica clásica que describe la dinámica planetaria, sería encontrado que ^{7} la configuración actual se conserva indefinidamente. Podemos, así, partir del presente y desandar un largo período muy semejante al orden planetario en el que vivimos.

¿Qué fue del Sistema Solar en una época más temprana? Existen buenas razones para creer que antes de que entrara a esa etapa de tarda evolución, el Sistema Solar transitó por una rápida e intensa transformación. Al respecto convergen diversos hechos, tanto teóricos como observacionales, que así lo indican. Por lo pronto, cabe mencionar a dos de éstos, los cuales marcan una edad máxima para el Sistema Solar: (1) el análisis de depósitos en meteoritos, en rocas terrestres y en muestras lunares, tanto de plomo radiagénico como de los isótopos radiactivos de los que éste se deriva,

{7} Cierta es que la órbita de la Luna crece algunos centímetros secularmente y que el movimiento lunar evolucionó hasta adquirir un estado de rotación capturada; también lo es que la atmósfera terrestre ha sufrido importantes cambios y que la composición química de los cometas varía cada vez que están próximos al Sol. No obstante, estas variaciones son despreciables con respecto al grueso del Sistema Solar.

Sin duda, de los cambios de dinámica planetaria más importantes que han ocurrido en los últimos 4 evos es el fenómeno que motivó, al parecer conjuntamente, la gran inclinación del eje de rotación de Neptuno, la importante excentricidad e inclinación de la órbita de Plutón y la traslación anómala de Tritón, uno de los satélites neptunianos. No obstante, estos fenómenos han sido atribuidos a cambios dinámicos esporádicos y excepcionales, y no a una tendencia sistemática de los cuerpos del Sistema Solar. Algunos científicos opinan que en tiempos ya idos, el eje de rotación de Neptuno era de una parca inclinación, que Tritón tenía sincronizado su movimiento de traslación con el de rotación (ambos prógrados), y que Plutón era uno más de los satélites neptunianos. Mas en alguna ocasión, Neptuno, Tritón y Plutón tuvieron un acercamiento orbital crítico. La resonancia de tal evento causó que Neptuno se inclinara, que Tritón adoptara un movimiento de traslación negativo, y que Plutón, el más afectado en el encuentro, abandonara el ámbito neptuniano. [184]

indica una edad máxima de ~ 4.7 evos para los cuerpos correspondientes [1261; (2) la TEE establece que la vida total del Sol en la Secuencia Principal es de ~ 15 evos, de los cuales ha transcurrido la tercera parte (un valor similar para la edad del Sol arroja el fechamiento por el método de la abundancia de litio [95]).

Parece bastante probable que ningún cuerpo mayor del Sistema Solar posea una edad superior a los 5 evos, por lo que desde la formación de los primeros cuerpos del Sistema hasta la etapa cuasiestable transcurrieron no más de algunos cientos de millones de años. Durante ese breve periodo hubieron de ocurrir, entre otros eventos, la formación de los planetas y de los satélites, la condensación de núcleos cometarios, la adquisición de las órbitas keplerianas y la gestación y las fases tempranas de vida del Sol.

Basados en los datos empíricos y en los principios físicos menos controvertibles, ¿cuál es la reconstrucción más factible para el escenario de ese período? Comencemos la marcha hacia el pasado tomando como vehículo a la formación de los planetas y de los satélites. En particular, tomemos el caso de los planetas terrestres, por ser el grupo celeste del cual más conocimiento es tenido.

Se sabe de dos mecanismos en virtud de los cuales, teóricamente, los planetas pudieron ser formados [193]. Uno de ellos es el proceso de la *inestabilidad gravitatoria* [192]. Este proceso podría entablarse una vez ocurriera una variación local de la densidad que permitiera que el campo gravitatorio ejercido entre las partículas superara a los factores locales de disipación (e.g., momento angular, temperatura y campo magnético). Se trata, en otras palabras, del mismo principio, sólo que operando en una escala mucho más íntima, del que se valió HAYASHI [91] para proponer la manera en que se forman las estrellas.

El valor crítico de longitud de onda (λ_c) para que una perturbación produzca una inestabilidad gravitatoria está determinado por

$$\lambda_c = \left[\frac{\pi \gamma R T}{\mu G \rho} \right]^{-1/2} \quad (4)$$

(donde G es la constante gravitatoria universal, T la temperatura, γ el radio de calor específico, μ el peso molecular promedio, y ρ la densidad). En esencia, esta relación (conocida como el *Criterio de Jeans*) provee información sobre la masa y la dimensión mínimas de un planeta que surgiría a partir de una perturbación $\lambda \approx \lambda_c$, en ausencia de campo magnético y bajo condiciones específicas de temperatura y de densidad. [192]

El criterio de Jeans puede ser expresado en función de

la temperatura y de la masa. La densidad de un cuerpo esférico de masa M y de radio igual a λc es

$$\rho = 6M/\pi\lambda c^3. \quad (2)$$

Sustituyendo esta ecuación en la del criterio de Jeans (1), es tenido que

$$\lambda c = \frac{6MG\mu}{\pi^2\gamma RT}. \quad (3)$$

Infortunadamente, la aproximación que es factible hacer hacia la temperatura que reinó durante la etapa de formación de los planetas y hacia la masa inicial es poco precisa, siendo actualmente estos dos parámetros importantes fuentes de incertidumbre. Analicemos por separado cada variable.

Con base en la composición química, los miembros del Sistema Solar pueden ser separados en tres grandes grupos: en un grupo a los planetas terrestres (en el que también están incluidos los asteroides y otros cuerpos rocosos), los cuales están singularizados por ser deficientes en elementos ligeros; en otro, a los de composición química similar a la cósmica (como es el caso del Sol y de los núcleos cometarios); y, finalmente, en un tercer grupo a aquéllos que como los planetas jovianos, si bien no tan ricos en elementos ligeros como el Sol, poseen una cantidad considerablemente mayor de tales especies que los terrestres. [33]

Si fuera estimado que la composición química de la NS no fue muy diferente a la actual constitución química del Sol y de los cometas [48], resulta que la masa de los planetas terrestres constituye apenas el 0.44% de la masa que hubo de estar dispuesta para la formación de aquéllos; la constitución de los jovianos representa desde un 15% (Urano) hasta un 80% (Júpiter) de la composición original [33,106]. Así, es evidente que la masa de la NS fue superior a la simple masa aditiva de los cuerpos actuales {8}.

Al ser extrapoladas las proporciones de cada uno de los cuerpos a la que, teóricamente, debió ser su composición

{8} Apoyando la suposición de que todos los planetas derivaron de material de composición similar, está el hecho de que al extrapolar la masa y la composición rocosa de cada uno de los 6 planetas principales a la composición que poseyó la NS, el resultado son planetas de características constitucionales y de masa básicamente semejantes [121].

inicial, es obtenido que la masa mínima de la NS fue de $\sim 1.03M_{\odot}$ [120]. Sin embargo, este valor es verosímil sólo en condiciones muy idealizadas, puesto que sería menester que los procesos de agregación para la formación de planetas terrestres hubiesen sido eficaces en un 100%. El frente de choque producido entre el gas y el polvo debido a la aceleración diferencial que estos componentes sufren durante un colapso en el que está involucrada la influencia del momento angular, es un ejemplo notable de los factores que pudieron intervenir para que los embriones planetarios no hayan sido capaces de colectar el grueso del material disponible [33]: la aceleración diferencial como causa del roce de los gránulos con el gas, provocaría la decadencia orbital de aquéllos, por lo que ese material, en lugar de pasar a formar parte de los planetas, quedaría integrado al gran cuerpo gestante en el baricentro nebular. Tomando en cuenta procesos de este corte, diversos científicos han propuesto masas mínimas de hasta $2M_{\odot}$ para la NS, aunque los valores más comunes son de $1.1-1.2M_{\odot}$ [126] ^{0}.

En lo referente a la temperatura, la estimación es derivada, fundamentalmente, de métodos analíticos. Experimentos numéricos de nubes de gas en colapso indican que en la zona que dista 1 u.a. del Sol, después de algunos millones de años de haber iniciado el colapso, la temperatura no debió ser muy diferente de 300°K [192].

Una aproximación que puede realizarse hacia la temperatura de la NS es derivada del análisis de la composición química de los cometas y de los meteoritos. Por ejemplo, en la parte volátil de algunos cometas ha sido posible captar la presencia de moléculas de H_2O , HCN , CH_3CN y CO_2 . Ello es índice de que la formación de tales cuerpos tomó efecto a una temperatura menor que 100°K [48]. Por otro lado, el que no haya sido revelada la presencia de grandes

{0} La proposición de modelos que suponen una NS muy masiva arrastra diversas dificultades teóricas. Una de ellas, como lo ha mencionado CAMERON, es que en tales modelos se presenta la tendencia hacia la formación de sistemas binarios, en lugar de una estrella solitaria rodeada por un disco delgado de materia [33]. Una más, es el fracaso para encontrar un mecanismo apropiado por el cual el Sistema Solar pudo perder tanta masa. Al respecto, ha sido evocada la posible pérdida de masa durante la etapa T Tauri del Sol. Sin embargo, aún no se tiene prueba alguna que indique fehacientemente que tales estrellas realmente pierden masa, y, mirándolo objetivamente, cabe la probabilidad, nada despreciable, de que tal proceso no acontezca [17].

cantidades de CH_4 , sugiere que la formación de los cometas ocurrió a una temperatura superior a los $50^\circ K$ [48]. Sin embargo, existe la seria incertidumbre sobre en qué fase de la evolución de la NS los cometas comenzaron a forjarse. Como será visto un poco más adelante, existen razones teóricas para suponer que para el entonces en el que la temperatura fue inferior a un centenar de grados absolutos, la configuración de la NS ya apuntaba hacia la del Sistema Solar. Por otro lado, es de esperarse un gradiente radial de temperatura en la NS. Así que, ¿de qué zona de la NS los cometas revelan las condiciones térmicas?

WETHERILL [192] calculó M para la formación de la Tierra multiplicando la masa actual de ésta ($M_0 = 6 \times 10^{27}$ g) por 375 como factor de compensación de los elementos volátiles que, es estimado, fueron circunvecinos en la zona donde fue formada la Tierra y que, por algún motivo, no pudieron ser capturados. Bajo esta suposición, y considerando una temperatura de $\sim 300^\circ K$, se deduce, a partir de la ecuación (a), que la λ_0 para originar a un planeta en la región donde ahora está ubicada la Tierra es de ~ 0.35 u.a. De ello se sigue, al sustituir los valores respectivos en (2), que la ρ equivale a $\sim 3.1 \times 10^{-8}$ g/cm³. [192]

Ahora bien, para establecer si la susodicha inestabilidad pudo realmente proliferar, es requerido considerar los efectos de marea que el protosol (o el Sol neonato) le pudo ejercer. La densidad crítica (densidad de Roche) para que un cuerpo sea estable ante la influencia gravitatoria de un cuerpo masivo es

$$\rho_R = 3M_0/2\pi a^3 \quad (4)$$

(donde a es la distancia al Sol en u.a.). Para una distancia de 1 u.a., resulta que la densidad de Roche es $\sim 2.9 \times 10^{-7}$ g/cm³. Así que un protoplaneta terrestre que apenas satisficiera el criterio de Jeans, quedaría hecho añicos por las fuerzas de marea. Por otro lado, si la densidad hubiese sido igual o superior a la densidad de Roche, el planeta obtenido se parecería más a Júpiter o a Saturno que a la Tierra [192]. Según los cálculos de WETHERILL, la masa necesaria para que la Tierra naciera de una inestabilidad gravitatoria es de 30 veces el valor de M . No es conocido mecanismo alguno por el cual haya podido perderse tanta masa. De otra parte, solamente se lograría evadir el requerimiento de tanta masa postulando condiciones térmicas ($T \approx 0.04^\circ K$) que, por lo demás, resultan inadmisibles [74].

En suma, parece poco probable que los planetas terrestres deban su origen a una estabilidad gravitatoria.

Podríase pensar que el mecanismo gravitatorio jugó un papel trascendente en la región de los planetas jovianos.

Por un lado, seguramente en esos lugares la temperatura fue mucho menor a la de las zonas más próximas al Sol, por lo que la densidad fue mayor y la λ_c menor a la de la zona donde fueron construidos los planetas terrestres. Por otro lado, la fuerza de marea en esa zona es considerablemente menor a la ejercida en la zona de los planetas terrestres. Sin embargo, ha sido demostrado que ni siquiera en la zona joviana pudo fructificar una inestabilidad para conducir a la condensación de un cuerpo planetario [120].

Una segunda alternativa propuesta para la formación de los planetas, y que con particular énfasis ha sido aplicada a la de los planetas terrestres, es el *proceso de acumulación de planetesimales*. La teoría fue desarrollada originalmente por SAFRONOV [161]. A grandes rasgos, el mecanismo propuesto es la progresiva acumulación, mediante colisiones coherentes, de cuerpos pequeños (*planetesimales*) con órbitas keplerianas.

Por lo menos existe un argumento relacionado con la observación que sugiere la factibilidad de tal proceso. Como ya ha sido indicado, de acuerdo con la relación Bode-Titius, en la zona donde está ubicado el cinturón de asteroides debería encontrarse un planeta [122]. Durante algún tiempo fue la creencia entre los científicos de que en un pasado remoto los asteroides estuvieron hacinados en un cuerpo planetario, el cual, debido a los intensos efectos de marea ejercidos por Júpiter, quedó desintegrado en miríadas de pequeños cuerpos. Sin embargo, existen razones de dinámica y de estabilidad que sustentan la imposibilidad de tal fenómeno catastrófico. Simplemente, la distancia entre Júpiter y el cinturón asteroidal es demasiado grande como para que los efectos gravitatorios de aquél hayan escindido a un planeta ya constituido, ubicado en la zona ocupada actualmente por los asteroides [41].

Los asteroides son, en general, cuerpos de dimensiones reducidas. La gran mayoría de ellos caen en el intervalo de unas cuantas decenas a centenas de kilómetros de diámetro [126]. Son cuerpos rocosos con órbitas de gran excentricidad (0.3-0.35)^{10} y con inclinaciones con respecto a la eclíptica de hasta $\pm 30^\circ$. Esta acusada disparidad geométrica es motivo de que los asteroides colisionen frecuentemente entre sí. Algunas veces, el producto de los encuentros es la

{10} Hidalgo, el asteroide de mayor excentricidad, en su afelio rebasa la órbita de Júpiter; otros asteroides de gran excentricidad logran, en ocasiones, invadir la órbita terrestre.

fragmentación de los asteroides; en otras, los cuerpos cohesionan y forman unidades mayores. Muchos científicos estiman que el segundo proceso, el de acumulación, es el que domina en el cinturón asteroidal. Así lo sugiere el hecho de que a pesar de la existencia de un número muy nutrido de asteroides, son sólo tres de estos los que, en conjunto, acaparan el 80% de la masa total. La interpretación más socorrida sobre el actual estado del cinturón reside en atribuir a los efectos gravitatorios jovianos el demoramiento de la conformación de un planeta. La mayoría de asteroides, en este sentido, son cuerpos preplanetarios que están sujetos a una lenta evolución cuyo desenlace será la congregación asteroidal en, quizás, un cuerpo único. [2]

La inferencia que es otorgada al respecto de los datos observacionales del cinturón de asteroides es consistente con una abundante cantidad de material teórico de simulación. Siguiendo el tratamiento analítico concebido por SAFRONOV [1911], en la mayoría de simulaciones se parte con una masa similar a la del conjunto de planetas terrestres ($\sim 1.2 \times 10^{28}$ g) dispersa en un disco plano de $0.7-1.1$ u.a. de distancia heliocéntrica. La masa es portada en 10^{12} planetesimales de ~ 1 km de diámetro y de densidad similar a la de los planetas terrestres ($\rho \sim 3$ g/cm³) [11]. [74]. Los cálculos están centrados en establecer la evolución de un sistema de tales características, y determinar la factibilidad de que por procesos de acumulación surja una configuración planetaria similar a la que ostentan los planetas terrestres desde hace 4 evos.

El que resulten fusionados dos cuerpos al colisionar, depende fundamentalmente de la velocidad relativa (V_r) con la que se produce el impacto y de la velocidad de escape de los cuerpos (V_e). Bajo la premisa de elasticidad total, sólo en los choques con $V_r < V_e$ sería lograda la cohesión. Mas como en un choque se desenvuelven procesos de disipación

{11} Dos cuerpos, al interactuar, pueden coalescer por sus fuerzas electromagnéticas o por su atracción gravitatoria. Ha sido demostrado que en cuerpos de diámetro menor que 1 cm, las atracciones electrostáticas son las dominantes, en tanto que para los de diámetro mayor que 1 km lo son las gravitatorias [1921]. En los procesos de acumulación de planetesimales están figuradas, fundamentalmente, interacciones de índole gravitatoria, por lo que ha sido tomado 1 km como el valor umbral inferior. (Más adelante están indicadas razones que dan mayor apoyo a la premisa de 1 km de diámetro como dimensión de partida en el proceso de acumulación planetesimal).

energética, ha sido calculado que en un sistema como el precedente existiría la probabilidad de coalescencia para los planetesimales cuya $V_r \leq 2$ ó $3V_0$. [193]. Este tipo de colisiones son las que, supuestamente, posibilitarían la acumulación progresiva del enjambre planetesimal. En general, los modelos parten con intervalos de excentricidad que aseguren, al menos en un inicio, el dominio de los choques de cuerpos de $V_r \leq 2$ ó $3V_0$.

Como el proceso de acumulación concentra cada vez mayor masa en menor número de cuerpos, se sigue que la velocidad de escape promedio del sistema (\bar{V}_0) debe aumentar paralelamente. Ello implica una extensión progresiva del intervalo de parejas potenciales de cohesión. No obstante, el aumento del campo gravitatorio provoca, a la vez, la intensificación de un factor que en cierta medida se opone al proceso de acumulación. Las interacciones gravitatorias entre dos cuerpos que no llegan a colisionar generan disturbios orbitales, de lo que es esperado un aumento neto de V_r . De ser el caso de que la V_r incremente a una tasa muy superior a la de la V_0 , la evolución del sistema estaría inclinada hacia la fragmentación, y no hacia el hacinamiento de los cuerpos. Así pues, la evolución de la acumulación de planetesimales tiene como primer factor de dependencia el comportamiento entre \bar{V}_r y \bar{V}_0 . [161]

Las estimaciones de SAFFRONOV le llevaron a concluir que, en forma global, los efectos antagónicos entre colisiones y perturbaciones quedan balanceados, de tal suerte que a lo largo de la evolución del proceso de acumulación, V_r permanece muy cercana a V_0 . Estos resultados han sido ratificados por numerosos estudios [192], por lo que, al parecer, no existe impedimento físico, al menos por lo que atañe a la probabilidad de coherencia al efectuarse un impacto, para la continuidad de los procesos de acumulación en un sistema de planetesimales.

Sin embargo, existe un segundo factor de dependencia, el cual es no menos importante, que impone generalmente límites tempranos para los procesos gregarios. Como es lógico suponer, la posibilidad de coalescencia entre planetesimales sólo se erige cuando las órbitas de éstos se intersecan. Ahora bien, la disposición relativa entre las órbitas keplerianas depende de la excentricidad inicial y de las colisiones (que circularizan las órbitas) y acercamientos (que aumentan la excentricidad) de los cuerpos. La evolución acoplada que se desarrolla entre V_r y V_0 en el modelo de SAFFRONOV, permite el aumento en el número de parejas potencialmente interactuantes debido al aumento del enfoque gravitatorio de los cuerpos y a las alteraciones orbitales de éstos (específicamente, al aumento de la excentricidad) [195]. No obstante, en el modelo original de SAFFRONOV la norma ha sido que el valor de V_r nunca llega a

ser lo suficiente como para quedar posibilitada la interacción entre planetesimales distantes. De tal suerte, tanto SAFRONOV como otros investigadores han obtenido por resultado de la simulación miríadas de cuerpos de algunos cientos de kilómetros de diámetro que geoméricamente quedan aislados, todo ello ocurrido una vez hubieron transcurrido alrededor de 10,000 años. [194]

Ha sido evidenciado, no obstante, que es posible llegar a resultados mucho más satisfactorios si son tomados en cuenta fenómenos que en la teoría de SAFRONOV tuvieron que quedar al soslayo por motivos de simplificación. En este sentido, ha sido fundamental el que los modelos dejaron de estar basados en la teoría del movimiento aleatorio de las partículas (con lo cual el propósito era tratar a los planetesimales como «partículas en una caja») y considerar, a éstos, en cambio, como cuerpos con rutas heliocéntricas^[12]. Un paso más hacia adelante fue logrado cuando en los cálculos orbitales de los planetesimales fue incluida la tercera dimensión. Estos refinamientos revelaron que en los modelos iniciales había sido subestimado el papel perturbador de los encuentros gravitatorios. [192,194,195]

Nuevamente se produjo un gran avance cuando fue posible realizar el seguimiento de la formación multiplanetaria. En virtud de tales superaciones teóricas, los modelos han derivado configuraciones finales que mucho semejan a la actual configuración planetaria.

Ha sido estimado que en los primeros 1.8 millones de años tomaron forma, en la región de 0.7-1.1 u.a. de distancia al Sol, cuerpos tan masivos como la Luna. Además, se encontró que la excentricidad promedio inicial del sistema se amplificó por un factor de 100, lo que resultó un claro indicio de la factibilidad para que prosiguiera el proceso de acumulación. A los 9.4 millones de años, se habían diferenciado claramente dos cuerpos de $M=3 \times 10^{27}$ g, en tanto que aún existían numerosos cuerpos de $M=10^{26}-10^{27}$ g. A estas alturas, la Tierra hablase conformado en un 71%. 200 millones de años fueron requeridos para que el proceso de acumulación colectara casi todo el material disperso en dos cuerpos con masas y órbitas similares a las de la Tierra y a las de Venus. [194]

Partiendo de diferentes intervalos de excentricidad, de distribución radial y de masas de los planetesimales, ha

[12] En etapas tempranas de la simulación, el tratamiento de los planetesimales como «átomos gaseosos» con movimiento aleatorio es estadísticamente válido por la gran cantidad de planetesimales y por la cercanía entre ellos [194].

sido obtenido, por norma general, el surgimiento de tres o cuatro planetas en la zona que ocupan actualmente los planetas terrestres. En algunos casos (3 de 10 simulaciones), fueron obtenidos dos cuerpos con $M > 10^{27}$ g. En otros (los 7 restantes de 10), resultaron planetas presumiblemente correspondientes a Venus y a Marte, pero con una masa de 2 a 4 veces mayor a la de éstos. En un caso, hizo presencia un planeta de un tercio de la masa lunar que quedó situado entre las órbitas de Venus y de la Tierra.

Hasta aquí, hemos reseñado la hipótesis para un sistema planetesimal libre de gas. Sin embargo, sería más realista suponer que por lo menos las etapas primarias de acumulación tuvieron efecto en un medio gaseoso [129,140]. Una de las consecuencias de incluir el medio gaseoso es que, por regla general, el tiempo requerido para la formación de planetas ha resultado considerablemente menor (del orden de 1×10^7 años) al obtenido mediante los modelos no gaseosos [140].

La inclusión del gas en las simulaciones ha implicado la realización de modelos mucho más complejos. Un tópico de particular interés ha sido el efecto del gas que se opone al movimiento de los cuerpos sólidos. Este efecto, además de circularizar las órbitas de los planetesimales, se esperaría que provocara que los planetesimales de tamaño intermedio cayeran hacia el Sol describiendo espirales. En buena medida, la decadencia orbital pudo haber favorecido la acumulación de planetesimales. [129,140]

Infortunadamente, los cálculos se complican tanto en este tipo de modelos, que aún no ha sido posible forjar simulaciones de formaciones multiplanetarias.

Poco es sabido al respecto de la forma y la etapa en la cual el grueso del gas del disco planetario fue perdido. Como ha sido indicado, no es firme la sugerencia de que el gas haya sido disipado debido a la fase T Tauri del Sol. Como sea, la pérdida gaseosa ocurrió, presumiblemente, después de la formación de los planetesimales. La razón es simple: indudablemente, los planetas jovianos fueron formados en un medio rico en elementos ligeros. Y para llegar a tal formación, fue menester la construcción de los planetesimales.

Ahora bien, lo anterior no implica ni mucho menos que necesariamente los planetas terrestres completaron su formación en un medio rico en gases. Cálculos numéricos indican que la formación de Júpiter se completó con gran celeridad debido a la involucración de un componente gravitatorio intenso que catalizó la acumulación de planetesimales y la captura de elementos ligeros. En cambio, en la zona de los terrestres, aún cuando inicialmente el medio fuera rico en gas, la formación y acumulación

planetesimal pudo haber ocurrido a un paso más sósiego, por no ser el componente gravitatorio neto tan intenso como el de la zona joviana. Así, este desfasamiento habría permitido que la pérdida de gas ocurriera antes de la formación de los planetas terrestres y después de haberse completado la de los planetas gigantes.

Aún perdura el debate sobre el tipo de medio en el cual se desarrolló la simiente de los planetas terrestres. Como sea, tanto los modelos que no consideran el factor gaseoso como los que sí lo hacen han derivado en algunos tópicos en común:

- (A) El proceso de acumulación de planetesimales es un mecanismo viable por el cual los planetas pudieron ser gestados [192].
- (B) Existe un buen margen de probabilidad para obtener la configuración y las dimensiones planetarias actuales [2,193]. (La importancia de este enunciado está por demás resaltarla).
- (C) Una partícula de los anillos circunsaturnianos, un asteroide mayor (quizá de dimensiones similares a Fobos, uno de los satélites de Marte), Mercurio, la Luna, Marte y la Tierra pueden conformar una colección representativa de los distintos estadios que hacen la cadena evolutiva del proceso de acumulación de planetesimales [2,3].
- (D) Muchos de los rasgos topológicos de la Luna y de Mercurio, así como de algunos satélites de los planetas mayores, encuadran perfectamente con la noción de una fase en la que tales cuerpos acrecentaron su masa mediante colisiones coherentes con otros cuerpos [3].
- (E) El proceso de formación de planetesimales no sólo solucionaría el problema de las fuerzas de marea en la región de los planetas terrestres, sino que también lo haría con respecto a los satélites de los planetas jovianos. En el caso de los anillos, existe la explicación de que el material que los conforma se ubicó muy próximo a los grandes planetas, por lo que las fuerzas de marea no les permitió abandonar la fase de particulado (es clara la analogía existente entre los anillos y el caso de los asteroides) [3,64].
- (F) Es muy probable que en los últimos estadios de acumulación se produjeran choques entre cuerpos gigantescos [194].

Con respecto a este último enunciado, deben ser indicados algunos puntos que resultan de la mayor relevancia en la comprensión de muchas particularidades del Sistema Solar.

En efecto, la plausibilidad teórica de que en una fase avanzada del proceso de acumulación tomaran a efecto

colisiones entre cuerpos de gran envergadura, da cabida a una explicación (aunque sea parcial) sobre:

- (1) EL ORIGEN DE LA LUNA. Hasta el momento, cuatro han sido las principales teorías propuestas, al respecto del origen de la Luna. Tres de ellas^{13} pronto fueron evidenciadas como infactibles. La cuarta, que de hecho es la más reciente, estipula que un cuerpo tan masivo como Marte colisionó con la prototierra [34]. La virulencia del evento determinó que una considerable cantidad de corteza terrestre se evaporara y saliera eyectada. Tal eyectado, en tanto se alejaba de la Tierra, se enfriaba y condensaba. Los condensados finalmente acumularían para dar origen a la Luna.
- (2) LA TOTAL CARENCIA DE ESPECIES LIGERAS LIBRES EN LOS PLANETAS TERRESTRES. La profusa liberación energética de tales colisiones, pudo ser responsable de la pérdida de las atmósferas primarias de los planetas terrestres. [194]
- (3) EL COMPORTAMIENTO ROTACIONAL ANÓMALO DE VENUS. El sentido retrógrado de rotación de Venus quizá sea el resultado de la afección recibida por un protoplaneta que colisionó con un planetesimal gigante (de hasta tres veces la masa de Marte). [194]
- (4) EL MOMENTO ANGULAR DEL SISTEMA TIERRA-LUNA. Se ha sugerido que, a la vez, este tipo de eventos pueden ser el agente causal de la inusitada riqueza de momento angular compartido entre la Tierra y la Luna. [194]
- (5) LAS CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS (valga el pleonasma) DE LA TIERRA. Indudablemente, las implicaciones de la ocurrencia de choques superenergéticos (a más de la energía calorífica de radioisótopos de vida corta) encajan apropiadamente en postulados como la diferenciación química estratificada derivada de la fusión parcial de la Tierra, en explicaciones como la que permita dar cuenta de la adquisición de especies ligeras como el carbono y en hipótesis como la del mecanismo de pérdida de la atmósfera primitiva. [194]

{13} Conocidas como la «hipótesis hija», la «hipótesis hermana» y la «hipótesis de la captura». La primera hace alusión al origen de la Luna como un cuerpo que se desprendió del manto terrestre. La segunda postula que la Tierra y la Luna son cuerpos que se gestaron en la misma zona. La tercera habla de que la Luna se formó en un lugar lejano al de la formación de la Tierra, y que en alguna ocasión estos cuerpos tuvieron una aproximación que motivó la captura de la Luna. [126]

Dos cuestiones referentes a las premisas de la hipótesis planetesimal nos conducen un tramo más hacia el pasado remoto del Sistema Solar: ¿cómo es que los planetesimales fueron formados?, y ¿cómo es que lograron disponerse en órbitas keplerianas?

La primera interrogante ha sido parcialmente resuelta a través de consideraciones de termodinámica, de procesos de condensación y de inestabilidades gravitatorias. Tales consideraciones están fundamentalmente enmarcadas en la confección de modelos que delineen la construcción de algunos cuerpos que, se cree, representan la colección de objetos más antiguos del Sistema Solar, cuerpos que muy probablemente conservan la información original sobre las condiciones fisicoquímicas de la época en que se produjo el surgimiento de los primeros cuerpos sólidos, en la NS: un tipo de meteoritos denominados «condritas»^{14}.

Por principio, es importante señalar que en alguna fase del colapso de la NS debió estar presente la oportunidad térmica para que emergieran pequeñas partículas a partir de procesos de condensación. TER HAAR [182] demostró que una vez forjado el disco planetario, éste no pudo tener la capacidad energética como para mantener a la temperatura, por un intervalo superior a 1000 años, por encima de la temperatura de condensación de los silicatos. En general, los modelos de formación del Sistema Solar convergen en la estimación de que en una fase temprana del colapso de la NS, la temperatura había descendido a unos cuantos cientos de grados Kelvin [34,74,120].

La composición mineralógica particular de cada tipo meteórico [80,126] corresponde a condiciones específicas de condensación que, por lo demás, no necesariamente hubieron de sucederse en una secuencia simple. Los modelos de condensación nebular están basados, en lo fundamental, en tratamientos termodinámicos de una nebulosa de composición solar que paulatinamente pierde temperatura. Los resultados son obtenidos en términos de la distribución, tanto en la

{14} De entre los diversos argumentos esgrimidos a favor de la naturaleza primitiva de los condritas, resalta la composición en especies no volátiles de estos cuerpos, que se asemeja en alto grado a la composición solar. De otra parte, la inusitada ausencia de evidencias de alteraciones físico-químicas en los condritas, sugiere acusadamente que éstos conservan la estructura original con la cual fueron formados [80,126]. Finalmente, cabe acotar que los condritas están contados entre los cuerpos más antiguos de todo el Sistema Solar [126].

fase gaseosa como en la sólida, de las diversas especies químicas, todo ello a una temperatura determinada y bajo hipotéticas condiciones de presión total. (Utilizando el razonamiento inverso, esto es, partiendo de determinados minerales (en particular de los que componen a los condritas) es posible llegar a una aproximación sobre la presión que pudo haber reinado en la etapa correspondiente de la NS, valor que ha sido ubicado entre 10^{-2} - 10^{-4} atm (como paso alternativo, la presión puede ser propuesta a partir de las condiciones promedio de las nebulosas moleculares [65] y de las predicciones de modelos de nebulosas en colapso) [80]. De tal manera, es posible trazar secuencias de condensación susceptibles de ser cotejadas con la composición mineralógica de los meteoritos. Esta primera aproximación, posteriormente es mejorada iterativamente considerando las condiciones finas requeridas para las diferentes composiciones meteóricas.

Por desgracia, aún persisten serias limitantes para poder establecer, con alto grado de confiabilidad, la secuencia de condensación de los diferentes componentes químicos de la NS en tanto ésta enfriaba. Existe escasez de datos termodinámicos tan fundamentales como la constante de equilibrio y la energía libre entre los elementos y los posibles compuestos de condensación. Se tiene desconocimiento de la abundancia real de especies químicas de la NS. Un factor restrictivo de no menor peso es la incertidumbre sobre la presión total y las presiones parciales del sistema.

Como sea, los estudios de condensación nebular avenidos a la composición mineralógica de condritas han permitido establecer una secuencia de condensación tentativa de la NS, para condiciones específicas de presión (10^{-3} atm) [80]:

- (1) Arriba de los $1,679^{\circ}\text{K}$, comenzaron a condensar elementos traza refractarios como el Os, el Re y el Zr.
- (2) A los $1,679^{\circ}\text{K}$, condensan los primeros elementos mayores. Se produce la cristalización del Al_2O_3 .
- (3) Todos los compuestos de Ti y la mayoría de los de Ca (entre los que resaltan el CaTiO_3 y el Ca_2SiO_7) hicieron aparición a los $1,500^{\circ}\text{K}$. Probablemente a esta temperatura también condensaron ciertas cantidades de compuestos de V, de Th, de Ta y de Rb.
- (4) A los $1,387^{\circ}\text{K}$, la mayoría de Mg y de Si ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) habían condensado. A su vez, lo comenzaron a hacer compuestos de Fe, de Ni y de Co.
- (5) El Mg_2SiO_4 y todo el Fe quedaron en condensados a los $1,370^{\circ}\text{K}$.
- (6) Abajo de $1,250^{\circ}\text{K}$ condensaron Cu^0 , Ge^0 y Ga^0 .
- (7) A los $1,200^{\circ}\text{K}$ lo hicieron el Na, el K y el Rb.
- (8) Cuando la temperatura disminuyó de los $1,000^{\circ}\text{K}$,

terminaron de condensar los metales alcalinos.

- (v) Abajo de los 750°K, parte del Fe fue oxidado, y a los 700°K reaccionó con H₂S (Fe⁰ + H₂S → FeS + H₂) y con H₂O (Fe⁰ + H₂O → FeO + H₂).

Las predicciones de composiciones mineralógicas, e incluso de características texturales, en algunas ocasiones coinciden asombrosamente con la composición de los condritas [40]. Empero, como es de esperar, en otras ocasiones la teoría discrepa considerablemente de la observación. Difícil sería el suponer que la ruta de diferenciación de la NS, y la de sus embriones gestantes, haya sido un proceso de enfriamiento lineal, sin mayores alteraciones. Realmente, son aún muchos los casos para los que la teoría no tiene respuesta.

Los cóndrulos son pizcas de material imbuidas en meteoritos. La principal diferencia entre los cóndrulos y el resto del meteorito (matriz) radica en que los primeros son productos de un rápido enfriamiento (así lo hace constar la presencia de minerales como el olivino y el piroxeno). Se tiene idea de que algún tipo de fenómeno (posiblemente descargas eléctricas) calentó zonas localizadas de los meteoritos, de lo cual fueron construidos los cóndrulos [80]. Estos pequeños cuerpos, que por su composición global parece que condensaron a alta temperatura, poseen especies minerales que para las condiciones de equilibrio en una nebulosa de composición solar, resultan de baja temperatura de condensación. La presencia de algunos de estos minerales en los cóndrulos, como es el caso de FeS, ha sido explicada satisfactoriamente mediante la suposición de que el coeficiente P_{H₂}/P_{H₂X} fue 10²-10³ veces menor al de la composición solar [97]. Así, en la ecuación



el equilibrio estaría notablemente cargado hacia la derecha, permitiéndose, por tanto, la emersión del FeS a una temperatura más alta que la esperada en un medio de composición solar ^{15}.

{15} Por supuesto que restaría el determinar cómo y por qué sucedió la pérdida de hidrógeno.

No obstante, existen algunos otros elementos que acusan a tal proceso como suficiente (aún es muy temprano para decidir si necesario) para explicar algunas anomalías en la composición química de diversos cuerpos. Por ejemplo, la rica presencia entremezclada de HCN y de CH₃CN (compuestos

Aún sin restar las incertidumbres, parece por demás probable que la pérdida de temperatura en la NS suscitó la condensación de pequeñas partículas de composición específica⁽¹⁰⁾. Ahora bien, tal proceso hubo de conducirse mediante interacciones electrostáticas y fuerzas de van der Waals, por lo que es de esperarse que la media de los condensados fuera de alrededor de 1 cm de diámetro [74].

Existen dos poderosas razones para pensar que los pequeños condensados no pudieron dar origen, mediante colisiones coherentes, a los planetesimales requeridos en la teoría de SAFFRONOV. En primer lugar, una de las premisas básicas para que sea lograda la viabilidad de los procesos que estipula tal teoría, es el tratar con cuerpos «gravitatoriamente activos». Por otro lado, el tiempo requerido para que los procesos de acumulación construyan cuerpos de 1 Km de diámetro a partir de granos de cuando máximo algunos centímetros de diámetro, sería muy superior al tiempo de decadencia orbital de estos últimos [74]; en otras palabras, la oposición que el gas ofrecería al desplazamiento de los pequeños condensados determinaría que el grueso de las partículas, antes que lograr formas gregarias más avanzadas, cayera al Sol en un tiempo muy corto (≈ 1000 años). Es requerido, por tanto, de un proceso más vertiginoso, que permita la formación de cuerpos lo suficientemente grandes como para que el efecto del gas no influya importantemente en la estabilidad orbital.

Aquí se hace pertinente, para poder proseguir con la hipótesis que explica la formación de planetesimales a partir de pequeños condensados, dar cabida a un rubro que nos aboca directamente a la cuestión de la adquisición de

que en una nube de composición solar condensarían a $\sim 1000^\circ\text{K}$) de algunos cometas de los que, por lo demás, el resto de constituyentes hablan de una temperatura de formación baja ($< 100^\circ\text{K}$), puede ser explicada si se postula que el gas del cual derivaron fue algunos órdenes menor en riqueza de hidrógeno que el Sol [48].

(10) Recientemente, han sido postulados algunos fenómenos que pudieron influir positivamente para eficientizar el enfriamiento del disco solar, como es el caso de la disminución de la opacidad debido a la evaporación parcial de pequeños sólidos [25]. Aún está por verse que trascendencia tuvieron estos procesos en cuanto a la diferenciación química de los cuerpos planetarios y demás cuerpos menores.

las órbitas keplerianas por parte de los planetesimales (o, en su defecto, por parte de los sólidos precursores de los planetesimales): el rubro de la conformación del disco planetario. Sin duda alguna, tal interrogante es uno de los puntos de mayor controversia que se yerguen en el debate sobre la formación del Sistema Solar. Y es que en ella están engarzadas cuestiones tan añejas como la distribución del momento angular y la sincronía de los sentidos de rotación y de traslación.

Podemos hablar de dos tipos de postulaciones que han permitido rendir un esquema coherente sobre la formación del disco planetario. En un primer tipo, todo ha sido éxito y sencillez. La clave de ello ha radicado en la consideración de la evolución de un subsistema de polvo con movimiento kepleriano en un medio gaseoso. En un segundo tipo, lo característico son las hipótesis *ad hoc* poco convincentes, y la postulación de fenómenos de no muy clara viabilidad y espontaneidad.

Analicemos el primer tipo. Es sabido que en cualquier momento en que colisionen dos cuerpos de órbitas heliocéntricas, se produce tanto la circularización de las órbitas (por la inelasticidad del choque) como, por ende, una disposición más estrecha entre éstas que la original. En general, es de esperar que, paulatinamente, un sistema de granos de órbitas heliocéntricas tienda a coordinar y a agrupar los vectores de desplazamiento en una sola región. El disco solar, de esta manera, pudo haber sido resultado espontáneo de simples interacciones de pequeños granos.

En adición favorable al espontáneo surgimiento del disco, ha sido demostrado, mediante el problema de la inestabilidad de movimientos tridimensionales entre tres cuerpos, que los cuerpos cuyas órbitas poseyeron una inclinación superior a los 52° con respecto al grueso del disco solar, tendieron, por simples inestabilidades dinámicas, a separarse del sistema. [78]

En suma, si bien no un disco perfectamente plano como el estipulado por la hipótesis laplaceana, sí resulta de fácil obtención un disco cuasiplano que, por lo demás, mejor rememora las propiedades del Sistema Solar (en particular, un disco de esta índole es consistente con el cinturón de asteroides y con los diversos sistemas de anillos) [64,120].

En principio, valdría la suposición de que tal disco pudo forjarse en cualquier posición con respecto al Sol. No obstante, bastaría con que la NS haya poseído un movimiento preferencial definido, para que, espontáneamente, surgiera el disco planetario colocado en el plano ecuatorial solar. Al disminuir la distancia entre las partículas y el baricentro protosolar, la velocidad angular de aquéllas debió incrementar. Esto provocó exactamente el proceso inverso al de decadencia orbital: las partículas se

desviaron de su línea de caída libre, describiendo espirales. Preferencialmente, las órbitas del polvo quedaron proyectadas precisamente en la zona más alejada del eje de rotación solar (i.e., en el plano ecuatorial), por ser en esa disposición donde más estables estuvieron con respecto al vector gravitatorio.

La idea anterior, sin embargo, aún no es muy clara y convincente, por el hecho de que está basada en supuestos (entramos ahora al segundo tipo de postulaciones) sin evidencia observacional que los apoye. Es evidente que una premisa toral para el espontáneo surgimiento del disco solar es el movimiento kepleriano de las partículas. ¿De qué manera el sistema protosolar pudo adquirir movimientos de tal índole?

Para muchos científicos, el hecho de que exista sincronía en el movimiento de los cuerpos del Sistema Solar es indicativo de un movimiento ancestral que compartía en general la materia integrante de la NS. Ciertamente, partir de una hipótesis como ésta facilita grandemente la indagación. Sin embargo, en cualquiera de las nebulosas moleculares que han sido observadas, está de manifiesto un claro dominio de los movimientos caóticos. Por ningún lado ha sido detectado ese movimiento común.

Y aún cuando fuera cumplido lo del movimiento ancestral, quedan algunas interrogantes de carácter basal en lo tocante a la formación del disco planetario. ¿Cómo poder dar cuenta de que sólo el 0.005% de la masa que conformó a la postre el Sistema Solar, quedara traída de la ruta colapsante de la NS? ¿Por qué? Más aún: ¿por qué esa insignificante cantidad de masa terminó poseyendo la gran mayor parte del momento angular del sistema?

El problema del momento angular es una interrogante para la cual aún se carece de respuesta. Quizá el intento más significativo para dirimirlo ha sido desarrollado ALFVÉN [2,3], quien se ha basado en complejos procesos de transferencia de momento angular mediante fenómenos hidromagnéticos.

La hipótesis de ALFVÉN [2,3] parte de la consideración del comportamiento de un plasma en colapso ante la acción de fuerzas electromagnéticas. De acuerdo a esta hipótesis, el momento angular pudo haber sido transferido al material protoplanetario mediante un proceso similar al del *frenado magnético* que es postulado para el caso de las estrellas^{17}.

{17} Se piensa que, generalmente, una nube en contracción transfiere parte de su momento angular inicial mediante el proceso de *frenado magnético*. Ya que las líneas del campo

Dos son las cuestiones cruciales para la validez de la propuesta de ALFVÉN. En primer lugar, ¿qué tan adecuado es el tratar a una nube molecular en colapso desde una perspectiva hidromagnética? ALFVÉN atacó parcialmente este cuestionamiento, esgrimiendo que la NS debió estar en mayor grado de ionización que el que estipulan la mayoría de hipótesis de colapso de nebulosas moleculares. Éstas, por lo general, sólo consideran como fuentes de ionización a los rayos cósmicos, a las especies radiactivas y a la luz estelar. Olvidan el tomar en cuenta una muy importante fuente: la transformación de energía potencial a cinética durante el colapso nebular. Incluyendo este parámetro térmico, es inferida la plausibilidad de que el material de la NS tuviera propiedades características de un plasma. [3]

En segundo lugar, cabe objetar sobre la factibilidad de que casi el total del momento angular haya podido ser trasladado a la exigua cantidad de materia protoplanetaria. Esta simple objeción aún es de gran envergadura. En este sentido, los resultados de ALFVÉN son poco claros y convincentes.

El problema de la distribución de momento angular, el punto por el cual se desmoronó la hipótesis laplaceana, sigue todavía sin vislumbres de solución.

GOLDREICH y WARD [74] señalaron, a partir de experimentos numéricos, la factibilidad de que los planetesimales pudieran crecer desde granos de polvo por medio de inestabilidades gravitatorias, siempre y cuando tales granos estuvieran congregados en un disco solar delgado. El proceso de la inestabilidad gravitatoria, que resultó prohibitivo para la formación de un cuerpo de dimensiones planetarias, pudo ser viable, en cambio, para el surgimiento de cuerpos de algunos kilómetros de diámetro en el seno de un delgado disco solar.

La fuerza de marea que ejerce el Sol a un cuerpo es

$$F_m = 2GMR^{-3}r, \quad (5)$$

donde R es la distancia al Sol y r el diámetro del cuerpo.

magnético de una nube molecular están acopladas a las del medio circunvecino, el aumento de velocidad de rotación de la nube provoca tensiones entre los campos magnéticos en contacto, fenómeno que se opone al propio movimiento de rotación. De esta manera, la nube es «frenada» (i. e., pierde momento angular), en tanto que el medio circundante adquiere, por el «tirón» de las tensiones generadas, mayor velocidad. (65)

En el caso de una inestabilidad gravitatoria en un medio gaseoso que condujera a la formación de la Tierra, sería requerido (de acuerdo con la ecuación (3)) que $r \sim 0.175$ u.a., por lo que la F_m para tal caso (de acuerdo con (5)) resultaría intensa en demasía. En cambio, para cuerpos de tan sólo unos kilómetros de diámetro, la fuerza de marea sería despreciable aún a distancias tan cortas como $r \sim 0.3$ u.a. [74]

En opinión de algunos autores, el crecimiento de los planetesimales por medio de inestabilidades gravitatorias pudo desencadenarse cuando el diámetro de los precursores fue del orden de 1 m. Es creído que tales precursores fueron formados a través de colisiones coherentes entre los pequeños condensados, colisiones ocurridas en tanto éstos poblaban la zona donde quedaría conformado el disco solar⁽¹⁸⁾. Para las etapas en que ya estuvieron formados los cuerpos de 1 m, el disco había adelgazado considerablemente (teniéndose, por tanto, una alta densidad de materia). En estas condiciones, dichos cuerpos, mediante inestabilidades gravitatorias, pudieron haber rendido cuerpos de 100 m en tan sólo un año. El resultante, un disco planetario con una primera generación de planetesimales, pudo ser aún susceptible de sufrir inestabilidades gravitatorias que condujeran, en un intervalo del orden de 1000 años, a la construcción de planetesimales de hasta 5 km. [74]

Así, el «mecanismo de inestabilidad gravitatoria GOLDREICH y WARD» resulta de tan rápido desenvolvimiento, que bien pudo dar oportunidad para que, antes de que fuera de importancia la decadencia orbital, los granos llegaran a congregarse en planetesimales propiamente dichos.

Guiándonos por los procesos que intervinieron en la formación de los planetas (i.e., la condensación de la nebulosa, la inestabilidad gravitatoria del disco planetario y la acumulación planetesimal), resulta evidente que a lo largo del disco planetario hubo un gradiente operacional de los procesos de diferenciación, cuyas repercusiones son apreciadas actualmente en la composición y características de los planetas. Indudablemente, la densidad y la composición de los condensados no fue homogénea a lo largo de la NS. Las zonas más internas de la NS, por ser las más calientes, debieron desarrollar granos más pequeños y una

{18} En misiones especiales de gran altitud, han sido colectados granos interplanetarios que muy probablemente representan muestras inalteradas de esta etapa de acumulación [126].

abundancia menor de los mismos que lo desarrollado en zonas exteriores. Por otro lado, existe la estimación de que en la región donde fueron formados los planetas terrestres, nunca hubo la oportunidad para la condensación de elementos volátiles. En contraste, en las zonas externas del disco planetario, en virtud de las bajas temperaturas, estuvo disponible mucho más material para la formación de planetesimales, lo que favoreció la aparición pronta de grandes planetesimales y de un vertiginoso proceso de acumulación. [126]

Para el caso de las regiones jovianas, una vez que los embriones planetarios superaron cierta masa crítica, empezaron a captar gravitatoriamente el gas circunvecino, entablándose un efecto de «bola de nieve». En cambio, en las zonas internas del disco planetario, los planetesimales fueron formados, fundamentalmente, de especies refractarias (principalmente silicatos), por lo que el tamaño de aquéllos fue más pequeño y la evolución de la acumulación más pausada. Por disponer de menor material, y por ser requerida en la zona donde se formaron una masa crítica mucho mayor debido a la alta temperatura, los planetas terrestres no lograron retener gravitatoriamente el gas, hecho que marcó su extrema pobreza en elementos ligeros.

Al parecer, hubo oportunidad para que algunos cuerpos planetesimales formados en las regiones jovianas, en virtud de su gran excentricidad, penetraran a la zona terrestre y fueran capturados por los embriones que allí estaban en gestación. Con este evento, es dado el explicar la presencia de, por ejemplo, agua en Venus, compuesto que por la ubicación del planeta, sería de esperar que no hubiera condensado ni haber pasado a formar parte de éste. Para la invasión de planetesimales exteriores a la zona de los planetesimales terrestres fue requerida la existencia de movimientos turbulentos a lo largo del disco solar, eventos cuya factibilidad no es difícil de establecer [34]. Por otro lado, la decadencia orbital de cuerpos de tamaño intermedio pudo también ser contribuyente para que los planetesimales terrestres captaran material de baja temperatura de condensación [33].

Un fenómeno, aún muy poco comprendido, que pudo tener efecto en la diferenciación de los planetas fueron los fenómenos intempestivos del Sol recién formado. Aún queda por analizar y determinar en qué forma los fenómenos energéticos del Sol durante su fase T Tauri y ráfaga (ha sido sugerido que las estrellas de masa intermedia también transitan por el estado de «fuor» (acrónimo de la estrella *FU Orionis*, a la cual se le detectó una variación lumínica de un factor de 250 en tan sólo un año [95])) contribuyeron a que los planetas adquirieran sus actuales características.

¿Cómo podría ser explicado en este contexto el caso de los núcleos cometarios?

OORT [141] apuntó, valiéndose del estudio de las órbitas de algunas cometas «nuevos», la posible existencia de una gran nube de núcleos cometarios (*nube de Oort*) que rodea al Sistema Solar. De acuerdo con los cálculos de Oort, la nube se extiende desde 50,000 hasta 150,000 u.a. de distancia heliocéntrica, y está compuesta por $\sim 10^{11}$ núcleos cometarios, que en conjunto suman una masa del orden de $1/10$ a $1/100$ de la masa terrestre. Al parecer, esos cometas «nuevos» que son observados de cuando en vez, son exmiembros de la nube de Oort que fueron expulsados de sus inmensas órbitas debido a la resonancia gravitatoria producto de la aproximación de algunas estrellas al Sistema Solar. [141]

Oort propuso que los cometas fueron formados cerca del anillo de asteroides, y que, ulteriormente, debido a los efectos gravitatorios jovianos, fueron arrojados en largas órbitas, las cuales tomaron su configuración actual gracias a las perturbaciones por parte de estrellas cercanas [141]. Sin embargo, esta hipótesis enfrenta dos grandes adversativos: (1) habría sido requerida la formación de una inmensa cantidad de núcleos cometarios para que tuviera peso estadístico el que tantos cuerpos hayan sido retenidos en órbitas tan distantes; y (2) las características de composición química cometarias no corresponden, en absoluto, a los cuerpos que pudieron ser construidos en la región asteroidal [34].

Podríase pensar que los cometas surgieron de alguna zona de la región de los planetas mayores. Sin embargo, esto dejaría sin resolver el primer adversativo. Los cometas difícilmente pudieron tener origen en algún punto de las zonas planetarias. La posibilidad alternativa es que hayan sido constituidos en la propia nube de Oort. Mas el problema en este caso es que prácticamente es improbable que en tal zona existiera la densidad material propicia para que condensaran los cometas.

CAMERON [33,34] ha propuesto que los cometas derivaron de un fragmento nebular de tamaño menor proveniente de la gran nebulosa de la cual se escindió el Sol (escisión que a poco más analizaremos). Este fragmento, en el cual las condensaciones habían comenzado a surgir, fue capturado por el campo gravitatorio protosolar, obligando a sus componentes a adquirir movimientos preferencialmente heliocéntricos. Una vez el Sol comenzó a radiar, el gas fue disipado, permaneciendo únicamente los núcleos cometarios.

El descender un estribo más hacia el pasado nos hace encarar un problema doble: cuál fue el agente causal del colapso de la NS, y en virtud de qué el fragmento-embrión del Sistema Solar pudo adquirir su índole de unidad

dinámicamente libre.

Para el caso de la NS, existen razones para suponer que fue el aumento de la presión del medio circunvecino lo que, finalmente, quebrantó el equilibrio, propiciando el colapso gravitatorio.

En inclusiones del meteorito Allende han sido detectadas abundancias anómalas de ^{26}Mg atribuibles al decaimiento radiactivo del isótopo de vida media corta ^{26}Al ($t_{1/2} \sim 7.2 \times 10^5$ años). LEE *et al.* [116] han hallado evidencia de que ese ^{26}Al existió en la NS durante el período de solidificación (los efectos energéticos de la decadencia de ^{26}Al son suficientes como para dar cuenta de los procesos de diferenciación por calentamiento que son inferidos de la composición mineralógica de Allende). Ahora bien, estos científicos llegaron a la conclusión de que entre el período nucleosintético durante el cual fue construido el ^{26}Al y el colapso de la NS medió un intervalo que como máximo fue de algunos cuantos millones de años [116]. A un resultado análogo conduce el análisis de las abundancias de ^{129}Xe detectado en el meteorito Richardson [32] (^{129}Xe es una especie hija del radioisótopo de vida corta ^{129}I ($t_{1/2} \sim 1.72 \times 10^7$ años)) [10].

Solamente es conocido un escenario donde se satisfaga tanto la nucleosíntesis de tales isótopos radiactivos como el que sea viable la transferencia de ellos a material interestelar en un tiempo lo suficientemente breve: el que se edifica durante la explosión de una estrella muy masiva. En particular, CAMERON y TRURAN [36] llegaron a la conclusión de que una explosión de tipo SNII provee las

[10] Ya hemos hablado del cómo pudieron ser formados planetesimales del orden de kilómetros de diámetro y del por qué éstos son requeridos con tales dimensiones en los modelos de acumulación. Sin embargo cabe el cuestionamiento sobre ¿por qué no partir de planetesimales de mayor dimensión?, ¿no estaría favorecido el proceso de acumulación si se parte con planetesimales de mayor tamaño? En efecto, así sería. Empero, existen razones que prohíben el que los planetesimales producto de la inestabilidad gravitatoria hayan sido superiores a unos cuantos kilómetros. Cuerpos de mayor envergadura habrían sido altamente ineficientes en la disipación de energía calorífica generada en su interior por las especies radiactivas como el ^{26}Al y el ^{129}Xe , factor que los tornaría altamente inestables, conduciéndolos, finalmente, a la fragmentación [12]. Así, en etapas tempranas debió existir una fuerte tendencia hacia la no emersión de grandes planetesimales parentales.

condiciones más adecuadas para la construcción de ^{26}Al y de ^{129}I (este último producto de procesos r) en las cantidades isotópicas que son observadas en el Sistema Solar.

Basado en esta información, y examinando las implicaciones de los trabajos de JURA [109] sobre el papel potencial de la presión del medio intersidial en el colapso de nubes moleculares, CAMERON figuró la siguiente sucesión de eventos que, plausiblemente, discurrieron hasta el inicio del colapso de la NS [34,36]:

Hubo algún momento, en alguna región de uno de los brazos de la Vía Láctea, en que fue formada una estrella masiva de tipo O . Las impetuosas precocidades radiativas de la estrella neonata generaron un aumento significativo de la presión de la materia internebular local. Tal presión, que durante 3 ó 4 millones de años fue sostenida por la pródiga tasa de radiación de la estrella en estado hidrodinámicamente equilibrado, suscitó que a unos 15 pcs de la estrella, en una zona en donde los efectos energéticos disipadores de ésta llegaban muy menguados debido a la dispersión lumínica y a los procesos de fotoionización del material internebular, quedara aglomerado material interestelar de baja densidad para constituir una nebulosa molecular. El sistema parental de la NS había nacido. Cuando la estrella explotó, el material circunestelar fue calentado intensamente, por lo que la presión del medio nuevamente incrementó. Esta nueva condición intersidial local propició que el potencial gravitatorio neto de las partículas de la NS superara a la energía expansiva interna. Por otra parte, debido a la cercanía entre el punto en donde ocurrió la explosión y la NS, el remanente de la supernova interactuó con ésta. En suma, la intensificación de la presión internebular y el incremento de densidad en la Nebulosa contribuyeron a que dentro de ésta predominara el componente autogravitante, de tal suerte que fue disparada la ruta colapsante hacia la formación del Sol y de los planetas. Una vez entablado el colapso, la temperatura de la NS incrementó, haciéndolo, muy probablemente, al punto de que fue superada la temperatura de fusión de los granos. (Así, se explica que hasta el momento, haya sido imposible detectar dentro del Sistema Solar, partículas de edad mayor a 5 evos [126]).

Bajo condiciones típicas ($\rho_{\text{NM}} \sim 10$ átomos H/cm^3 , $T_{\text{NM}} \sim 100^\circ\text{K}$ y $P_{\text{ext}}/k \sim 10^3 \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}$ [65]), una nube molecular puede colapsar si su masa es superior a $\sim 1.5 \times 10^4 M_{\odot}$. JURA [109] encontró que si la presión del medio internebular aumentara por un factor de 100, la masa umbral para satisfacer el criterio de Jeans sería apenas superior a $1 M_{\odot}$. Sin embargo, como el propio JURA lo reconoció, su modelo presupone en este caso condiciones muy idealizadas en las que son ignorados los componentes de turbulencia y de

hidromagnetismo. Así que aún cuando fuera lograda una presión externa del orden de 10^5 , lo cual es factible dada la presión que pueden ejercer los eventos supernova, es muy dudoso que una nebulosa molecular tan pequeña pueda ser inducida al colapso.

CAMERON [152] concluyó que la masa de la NS fue de alrededor de $10^3 M_{\odot}$, ya que este valor es suficiente para superar el campo magnético bajo densidades características de nubes moleculares que estén asociadas geoméricamente con estrellas masivas. Mas si es considerada la intensificación de los efectos hidromagnéticos debido a la ionización del material interestelar por la energía cinética generada durante el colapso [3], la masa crítica resulta 2 ó 3 órdenes mayor al valor derivado por CAMERON [152]. Sea como fuere, y asumiendo las incertidumbres del caso, parece muy probable que la NS fue varios órdenes superior a la masa del Sol. Cabría, por tanto, esperar, en primera instancia, que durante el colapso de la masiva NS, ésta se fragmentara (la fragmentación pudo devenir del choque del remanente de supernova con la NS) para rendir, a su vez, múltiples unidades en colapso. Quizá, el proceso desembocó, finalmente, en la formación de un cúmulo o de una asociación estelar [20].

No está vedada la posibilidad de que el fragmento del cual se formó el Sistema Solar quedara, en alguna etapa del colapso, aislado de los otros fragmentos-embriones. Sin embargo, las observaciones [78] y los experimentos numéricos [27] sugieren como mucho más probable que el Sol haya llegado a una etapa avanzada del colapso integrando un sistema estelar múltiple.

Durante la década de los 1970's fue evidenciada, a través de experimentos numéricos, la forma en la que un astro, que originalmente constituye un sistema múltiple, puede llegar a ser un cuerpo dinámicamente libre. El futuro dinámico de los sistemas estelares múltiples queda prescrito por el estado inicial del movimiento de sus miembros. Si el componente inercial superara al gravitatorio, el sistema, tan pronto es formado, queda fragmentado (por supuesto, el número de estrellas que son liberadas depende del vector inercial de cada estrella con respecto al campo gravitatorio global del sistema). En el caso contrario (cuando el campo gravitatorio supera al componente inercial), ha sido

{20} Estas conclusiones, que parecen tan evidentes, están apoyadas en un terreno más bien incierto, puesto que no existe evidencia observacional alguna que haga constatar la fragmentación jerárquica de las nebulosas moleculares [17].

encontrado que, generalmente, las estrellas poco masivas son expulsadas del sistema mediante un proceso al que se le ha denominado *movimiento elíptico-hiperbólico* [78]:

Evidentemente, al quedar forjado un sistema estelar múltiple, la disposición entre las órbitas iniciales de los astros es arbitraria. Esta relación geométrica aleatoria es causa de que apenas completadas algunas revoluciones, algunos miembros del sistema se perturben mutua y sensiblemente debido a sus campos gravitatorios. Estadísticamente, ha sido evidenciado que si en la interacción interviniera una estrella poco masiva, es muy probable que el influjo gravitatorio le perturbe a tal grado que le arrojaría a una órbita *elíptica* de gran excentricidad. Los experimentos numéricos (centrados en sistemas de tres cuerpos) muestran que existe una probabilidad de 9/10 de que después de algunos cientos de revoluciones, esta pequeña estrella de gran excentricidad reciba una nueva perturbación que le obligue a abandonar la órbita elíptica para adoptar una hiperbólica, de tal suerte que abandone, finalmente, el sistema. (En el caso de sistemas estelares muy numerosos, esta ruta puede generar el desprendimiento de subsistemas). Parece, pues, bastante sensato suponer que si el Sol inicialmente formaba un sistema multiestelar, tuvo ocasión temprana para escapar y convertirse en un cuerpo dinámicamente libre. Por supuesto, no es difícil imaginar que junto con él pudo escapar el disco en el cual los planetas serían estados. [78]

Sobre el colapso de la NS cabe apuntar, finalmente, un cariz que ha sido estudiado por CAMERON [33,34]. De acuerdo con este científico, el material que constituía a la NS fue llevado al colapso de una manera dinámicamente violenta. Esta compresión, rápida y anisotrópica, provocó la agitación del gas, por lo que fueron generadas grandes turbulencias. La compresión se encargó de amplificar las velocidades de las turbulencias, y una vez que el protosistema solar quedó escindido del resto de la nebulosa molecular, aquél, así como cada fragmento, se desprendió ya con cierta dote de momento angular neto.

Es claro que mediante este mecanismo por el cual una nebulosa molecular pueda agenciar momento angular, CAMERON contribuye a poner un atajo a las oscuridades cognoscitivas que son rememoradas como las «inescrutables condiciones iniciales». Por supuesto, CAMERON no propone que el colapso de la NS fue la fuente primigenia y única del momento angular que anima actualmente al Sistema Solar. A fin de cuentas, el material del cual fue formada la NS tenía algún tiempo de existencia cuando fue afectada por el proceso colapsante para el surgimiento del Sistema Solar, por lo que es natural suponer que ya poseía cierta cantidad de movimiento angular.

Resta, finalmente, por averiguar la proveniencia de la materia prima que hubo de involucrarse en el intrincado proceso hacia la formación del Sistema Solar. Al respecto, la TEE representa una poderosa herramienta de la cual valerse para deshilar el período previo al colapso de la NS y entretejer la forma en que ésta quedó constituida químicamente.

La evidencia de que en la etapa en la que fueron edificados los meteoritos existieron diversos radioisótopos de vida corta (e. g., ^{16}O , ^{26}Mg , ^{40}K , ^{129}Xe , ^{146}Sm , ^{202}Hg) es, *per se*, un elemento probatorio de que un remanente de supernova trastocó la composición química de la NS. Es más, para las abundancias que son deducidas de estas especies a partir de las abundancias de sus isótopos hijos, resulta que las predicciones teóricas a partir de nucleosíntesis explosivas de SNII son consistentes con los datos observacionales [32]. Sin embargo, no es el caso que para todas las especies químicas exista armonía entre las abundancias del Sistema Solar y los datos teóricos de nucleosíntesis explosiva en SNII , por lo que ha sido necesario apelar a otros contribuyentes.

En términos de abundancias solares, los remanentes de SNII resultan pobres en elementos de peso intermedio (desde el Si hasta el Ni), en tanto que para el resto de los elementos pesados, las proporciones resultan aproximadas a los solares. Este tipo de composición puede ser llevado a valores más cercanos a proporciones solares si es combinada con las abundancias producto de eventos SNI [133,178]. En efecto, se tiene la estimación de que a diferencia de las SNII , las explosiones producto de la deflagración del carbono contribuyen con copiosas cantidades de elementos en el intervalo del silicio al níquel.

Son conocidos muchos procesos complementarios por los cuales la NS pudo haberse agenciado helio y metales. Además de los eventos supernova, el medio interestelar es enriquecido de átomos complejos gracias a las nebulosas planetarias [173], vientos estelares [7] y novae [170], y por la acción de los rayos cósmicos [186] (*supra*, §2.4-2.6). Aunque gravitan incertidumbres mayores, existe el consenso entre los científicos de que la acción de cada uno de estos procesos, en mayor o menor grado, permitió la constitución química de la NS^[21].

[21] Por la multiplicidad de contribuyentes estelares que pudieron aportar para la formación de la NS, es que al Sol, desde una perspectiva de la historia de la materia, se le podría considerar como una estrella de segunda generación.

Las marcadas variaciones de composición isotópica entre los cuerpos meteóricos nos informan que quizá el tipo de mezclado que tomó a efecto entre el remanente de supernova y la NS fue inhomogéneo. Sin embargo, aún no es clara la forma mediante la cual el remanente pudo horadar en una forma no uniforme a la NS.

El material eyectado en una explosión de supernova es un plasma supercaliente de temperatura muy superior a 10^6 °K. Cuando, inicialmente, el remanente interacciona con el material interestelar, la diferencia de temperatura es tan profunda que es producida una discontinuidad térmica que impide el mezclado. Mas cuando el eyectado ha recorrido apenas unas 1,000 u.a., su temperatura se ha reducido lo suficiente ($\approx 10^5$ °K) como para que incluso dentro de él se lleven al cabo procesos de condensación [36]. En tales condiciones, los niveles energéticos son los propicios para el mezclado entre el remanente y el material intersidereal.

Hasta hace poco, el estudio de la dinámica de plasmas había revelado que un remanente de supernova, después de haber recorrido 15 pcs, efectivamente pudo mezclarse con la hipotética NS, aunque la alcanzaría con una temperatura todavía muy alta como para difundir por toda la superficie. El eyectado estelar, no obstante, pudo haber penetrado en forma de lenguas que horadaron diferentes regiones de la NS. De haber ocurrido de esta manera el mezclado, las inhomogeneidades regionales fueron «capturadas» una vez fue producida la nucleación de granos [36]. Infortunadamente, ha poco que fue demostrado que este mecanismo no tiene probabilidad de ocurrencia [128]. Sería más de esperar que una vez que fueran logradas las condiciones energéticas para la mezcla de un remanente con una nebulosa molecular, el proceso se efectuara uniformemente.

No obstante, en fechas muy recientes fue indicada la salvedad, obtenida de observaciones del comportamiento del remanente de SN 1987A, del surgimiento de inhomogeneidades producto de procesos de mezclado entre las diferentes capas del remanente [134]. Así, cabe la posibilidad de que las inhomogeneidades pudieron ser transmitidas a la NS, y no generadas, por el proceso de mezclado.

CAPÍTULO CUARTO

SOBRE LA EVOLUCIÓN EN EL UNIVERSO

El efecto de aquel monstruoso espectáculo era indescriptible, pues desde el primer momento apareció como una violación terrible de las leyes naturales conocidas.

H. P. LOVECRAFT, *En las Montañas de la Locura*.

Llegados a éste, cuarto y último capítulo, hemos de abandonar el hilo temático y de presentación que predomina en los capítulos precedentes. No más puntos particulares que den consistencia o desacreditación a hipótesis relacionadas con el origen y la historia de la materia. En cualquier caso, con lo expuesto en las secciones anteriores ha sido llevado a cumplimiento aquel objetivo señalado en el prólogo de este trabajo consistente en compendiar y analizar en lo particular las principales hipótesis que han sido confeccionadas en relación al largo e intrincado sendero evolutivo que discurre entre —lo que con la hipótesis de la Gran Explosión es postulado como— el origen del universo y la formación de la Tierra, medio de cultivo donde fue escenificado el surgimiento, la proliferación y la evolución de lo vivo. Ciertamente, podríamos traer a colación, y detenernos a analizar, con lujo de meticulosidad, un sinnúmero de rubros que rebatan o que den solidez a cada una de las hipótesis detalladas y discutidas en los tres primeros capítulos. Al respecto, el tema, de ninguna manera, ha sido agotado. Sin embargo, abordar aquí en forma particular a cada uno de los que componen el global de tales rubros (y más aún: abordarlos con detenimiento) nos conduciría a un nivel de especificidad desde el cual,

difícilmente, podríamos contemplar ciertos carices globales relacionados con la evolución de la materia, carices que son el propósito toral en el capítulo corriente.

Prohijemos, ahora, una perspectiva global e integral para considerar el discurrir evolutivo en el cosmos. Primeramente, concentremos en la conjugación del modelo de la Gran Explosión con el devenir de la materia conjeturado a partir de la Teoría de la Evolución Estelar. Derivemos de esta conjugación formulaciones que atiendan a la siguiente interrogante: ¿qué implicaciones, en cuanto al inicio y al fin de nuestro universo se refiere, se pulsan en la concatenación del modelo de la Gran Explosión con la TEE? Seguidamente, aboquemos momentáneamente nuestra atención hacia los elementos de la historia de la materia que nos permiten desentrañar del orden cósmico subyacente la «tendencia global» de la materia en virtud de su «evolución fisicoquímica». Finalmente, confrontemos a la «evolución fisicoquímica» con la «evolución biológica», obedeciendo al propósito de derivar la conexión, la coherencia y la mutua causalidad entre las leyes fisicoquímicas y las biológicas. En este contexto, intentemos establecer, de una parte, la negación del azar como un comportamiento inherente y sustancial de la materia, negación que pueda ser concebida en términos de la tendencia evolutiva de la materia perteneciente a un universo autocontenido; y, de otra parte, a los niveles de «alta organización» como «propiedades del universo» (necesarias para la conservación del devenir de la materia) que no implican la cúspide de lo evolutivo, sino simples eslabones en una sucesión cíclica.

Desde hace algún tiempo, en mí han germinado ciertas incertidumbres (o quizá cabría nombrarles «desacuerdos») en torno a la concepción que del desdoblamiento evolutivo de la materia es enseñada en los libros y en las aulas. He de confesar que inicialmente, y aún buen tiempo después, mis desacuerdos obedecieron exclusivamente a impulsos intuitivos, meros presentimientos de que algo al respecto del devenir cósmico, algo quizá muy simple, está siendo formulado con cierta imprecisión, por decir lo menos. Sin poderme explicar, tenía la sensación de que el problema que yo intuía mora en los cimientos de nuestra epistemología actual. A mucho de reflexionarlo, ahora puedo ver —o al menos creo poder ver— que tales incertidumbres están articuladas a la que colijo como una necesidad de replantear y de clarificar el carácter basal del «azar», por un lado, y el de los diferentes «niveles de organización», por el otro, dentro de la trama evolutiva; necesidad desprendida del objetivo de intentar arribar a la premisa —indispensable para toda teoría materialista— de absoluta autocontención del universo.

En lo que sigue, trayendo al «azar» y a los «niveles de organización» a la mesa de los debates (junto con otros factores que serán apuntados a poco más), no pretendo ni mucho menos establecer un esquema teórico que permita dar con una adecuada concepción de la evolución. A lo más que aspiro en esta oportunidad es a dejar de manera explícita, con una formulación ligeramente menos oscura a la que me hiciera a mí mismo inicialmente, esas incertidumbres que me han inquietado.

§4.1.

HISTORIA DE LA MATERIA

Como punto para dar entrada a los planteamientos anteriores (en particular para emprender la discusión sobre el «origen y fin del universo») describamos, en forma lacónica, la historia de la materia que la actualidad científica nos permite construir. Teniendo presente el propósito de indagar la concatenación entre la evolución biológica y la fisicoquímica, introduzcamos en nuestra historia elementos que hagan alusión directa a la ruta de la materia en su carácter de «viva».

Y en el principio fue la nada^{1}.

Súbitamente, el silencio fue invadido por el fragor del explosivo nacimiento cósmico. Con el espacio y la energía, en vertiginosa huida expansiva, el universo emergía desde un punto infinitamente pequeño. Los volúmenes espaciáronse desde el umbral del imperio de la nada para habitar lo que no existía. Y el tiempo desperezó su andar.

El universo nació sin ser habitado por la diversidad. No existían estrellas, ni planetas circunnavegadores de estrellas. Todo era energía, sólamente energía, indiferenciada energía que en esplendorosa brillantéz iluminó el curso del primer instante de existencia del universo.

{1} Aquí quepa lo siguiente como advertencia: en esta sección he intentado plasmar el sentir y la concepción de muchos científicos en relación a la historia de la materia; sin embargo, el que gran parte de los rubros de tal historia estén favorecidos por diversos autores, no significa ni mucho menos que aquéllos sean correctos e incontrovertibles. Los tres primeros capítulos de este trabajo, bien pueden ser una base para sopesar el valor de gran parte de los elementos que enseguida son presentados.

Pero a un ritmo celeré dictado por las efímeras fracciones del primigenio segundo, la energía, simétrica y homogénea, tendió en progresiva diferenciación hacia fuerzas y partículas cada vez más complejas. Ardides en la conversión entre partículas, antipartículas y energía hubieron de ganar para el universo la cristalización de un número bariónico y leptónico diferente de cero. Instantes después, tuvieron ocasión de emerger los neutrones, los protones y los electrones, estructuras a la postre pilares de los átomos, de las moléculas, de los organismos.

Disminuida considerablemente la temperatura por la expansión del universo, los neutrones y los protones pronto manifestaron su capacidad de hacinamiento: colisionando mutuamente produjeron los primeros núcleos complejos. Transcurridos apenas algunos minutos desde la Gran Explosión, finalizó el primer período de cocinamiento cósmico, resultando una población material constituida por hidrógeno y por helio, elementos que nadaban en un denso mar de fotones arrastrado tenazmente por la expansión universal.

Así pasó desde esos tiempos, la materia desplazándose inexorablemente por la expansión del espacio, y la temperatura y la densidad en ruta decreciente. Hasta que, de pronto, a la energía le fue imposible evitar la combinación estable entre especies nucleares y electrones. Y se hicieron los átomos neutros.

Corrían los primeros cien mil años del universo.

Habría de pasar mucho tiempo después de terminado el breve intervalo del desacoplamiento de la materia con la energía luminica, para que algo relevante hubiera de suceder. Salvo la expansión y el gradual enfriamiento universal, la trascendencia cósmica estuvo silenciosa.

Hasta que, aquí y allá con viabilidad, surgieron inestabilidades gravitatorias que agruparon grandes masas en sistemas protogalácticos. En el interior de esos sistemas, pequeñas inestabilidades condujeron a pequeñas masas a recorrer procesos de colapso, generando en el centro protoestelar de éstas las condiciones para la fusión nuclear del ubicuo hidrógeno en helio, suceso suficiente para nulificar el colapso y sostener el peso gravitatorio por algún tiempo.

Las estrellas primigenias más masivas consumieron con mayor voracidad su hidrógeno interior que las de menor masa. Agotado el hidrógeno central, recurrieron al helio para contrarrestar equilibradamente su potencial gravitatorio; al consumir helio, confeccionaron los primeros núcleos de carbono. Una vez en defecto el helio, utilizaron carbono, y después a las cenizas del carbono: oxígeno, elemento que al ser incinerado rindió silicio como nuevo combustible. Hasta que, ineludiblemente, construyeron una gran masa central de hierro inerte, incapaz de brindarles energía mediante

procesos de fusión. Sin mayor capacidad exoenergica, la gravedad les hizo implotar las zonas centrales. Explotaron sus capas exteriores. En apoteótica desintegración, las primeras estrellas masivas, y desde entonces la gran mayoría de estrellas de masa gigantesca, enriquecieron al material interestelar (compuesto originalmente por hidrógeno y por helio) con especies transhelianas.

Pero en la historia de la materia no habrían de ser las estrellas que explotan espectacularmente las únicas responsables de la creación y dispersión del complejo espectro de especies químicas. Desde el inicio de la era estelar, estrellas de masa mucho más modesta, actuando, proporcionalmente, con contribuciones más modestas, han fertilizado al medio interestelar con especies complejas. Así han sido, desde tiempos inmemoriales, diezmeros las novas y las progenitoras de las nubes planetarias.

Evos habían transcurrido de actividad estelar, cuando en una pequeña región de uno de los brazos de una galaxia sin algún atributo excepcional dentro de la comunidad galáctica, por la presión ejercida por una estrella neonata de gran masa, primero, y por la de una supernova, ulteriormente, una nube de gas, enriquecida de especies complejas por la actividad nucleosintética estelar, cobró mayor fuerza gravitatoria, rebasó con creces la fuerza de sus componentes expansivos, y colapsó hacia una forma astral.

El Sol, estrella amarilla y enana, individuo perteneciente por sus atributos a uno de los grupos más numerosos del zoológico estelar, nació, análogamente a como otros muchos astros lo han hecho, como secuela de la infortunada lucha de otras estrellas por contrarrestar su gravedad. Fruto cimentado en las cenizas de otros frutos. Fruto cuyas cenizas fertilizarán el alrededor interestelar para dar origen a otros frutos. Rutilante fruto estelar al cual se le dispusieron, en órbitas elípticas cuasiplanares, pequeños conglomerados residuos de la gran nube solar. Y entre ellos, la Tierra, bañada, desde entonces, por la radiación solar; la Tierra, vehículo espacial, desde entonces, de sistemas que desafían a la progresión entrópica en el universo.

Y la Tierra, cuerpo incandescente acabado de surgir desde lo inmensamente pequeño merced a la etapa de agregación planetesimal, exhaló su primer hálito vital. De sus entrañas surgieron gases primordiales que como materia prima se encargaron de dar continuidad al devenir de la materia, antepasados gaseosos de lo vivo que —paradoja de lo evolutivo— resultarían especies letales para la gran mayoría de sus descendientes. Y así, junto con el ácido cianhídrico y el metano, afloraron el hidrógeno, el monóxido y el bióxido de carbono, y el gas del disolvente universal:

el vapor de agua, el que, al enfriar la Tierra por debajo del punto de ebullición, se precipitó hacia la superficie terrestre en un verdadero diluvio noaico, para que fluyera la historia de los ríos, los lagos y los mares.

Los volcanes vomitaban fuego. Las nubes vertían violentas tormentas eléctricas. Con sus rayos, el Sol desde su distancia flagelaba a la Tierra desnuda. Y las moléculas de la primitiva atmósfera, sacudidas en todo momento por esos poderes energéticos, combináronse y precipitaron en forma de azúcares, de lípidos, de nucleótidos y de aminoácidos. Los precipitados, capturados por el medio líquido que se les interpuso en su caída hacia el centro de la Tierra, temprano tuvieron ocasión para dar confeccionamiento a complejas macromoléculas que, propensas a la formación de congregaciones, prontas edificaron a los primeros coacervados.

En algunas de un sinnúmero de ocasiones, los procesos engendadores de macromoléculas dieron forma a polímeros de ribonucleótidos capaces de replicarse y de autorreplicarse. Algunos de estos ácidos tuvieron la suerte de quedar aislados del resto del medio acuoso por una membrana semipermeable. De tal sino surgidos, los nuevos sistemas acumulaban cada vez mayor energía, siempre «alimentándose» de las especies que, sintetizadas en la atmósfera, «nadaban» en el medio acuoso. Crecieron poco a poco. Se reprodujeron y dejaron descendencia semejante a ellos.

Pero desde los albores de la vida, el material genético de los descendientes siempre ha resultado ligeramente diferente al de los progenitores. La vida, desde el umbral de su aparición, se multiplicó, y al hacerlo se diversificó, y diversificándose evolucionó. En uno de sus intentos por perpetuarse, descubrió que para replicarse y crecer era mejor ceder el papel catalítico a los eficientes polímeros de los aminoácidos, y que para conservar su información genética, información acumulada a lo largo de un sinnúmero de generaciones, era mejor confiarla a una doble hilera autocomplementaria de ácido desoxirribonucleico.

Con el tiempo, guiada y enriquecida por su explosiva diversificación, la vida aprendió a sintetizar su propio alimento mediante procesos de fotoexcitación. Ciertos organismos unicelulares aprendieron a sustraer el máximo de energía oxidando completamente su alimento: respiraron. Después, los hubo quienes absorbieron en asociación simbiótica a algunos de los que respiraban. Los hubo también que, a más de con los que sabían respirar, quedaron asociados en beneficio mutuo con algunos de los que fotosintetizaban. Surgieron las células eucariontes. Algunas de ellas, adquiriendo ventajas por trabajar en conjunto, fueron los organismos multicelulares ancestrales del reino metazoario. Otras más, congregándose, originaron la parte

basal filogenética de los metafitos.

Durante evos, los sistemas vivos continuaron en plena diversificación, inventando nuevas estructuras, experimentando con innovadoras ventajas adaptativas, pactando nuevas asociaciones, arriesgando para invadir nuevos habitats. Hasta que la Tierra comenzó a ser poblada, modificada y dirigida por un tipo singular de sistemas vivos; organismos que, precedidos por miles de millones de años de ininterrumpida evolución, desde su aparición han luchado con afán por desentrañar del presente su historia, y de su historia el significado de su presente, y del presente los pilares de su futuro y el sentido primero y último de su existencia.

§4.2.

LOS LÍMITES TEMPORALES DEL UNIVERSO

Al respecto de la historia cósmica dictada en §4.1, cabe, por principio, formular algunos enunciados de carácter aclaratorio. En el primer capítulo indicamos cualquier cantidad de incertidumbres y de contradicciones insitas del modelo de la Gran Explosión, elementos que hacen de éste, ciertamente, una hipótesis débil. No obstante ello, en la sección anterior hemos tomado a este modelo como un miembro de lo que quedó esbozado como una historia de la materia.

Dicha inclusión obedece a dos razones principales. Una de ellas es de orden coyuntural: por el momento, no contamos con alguna hipótesis alternativa al modelo de la Gran Explosión (de probabilidad no despreciable de factibilidad, por supuesto) con la cual hacer el intento de dar respuesta a la inveterada pregunta sobre el origen del universo.

El que el modelo de la Gran Explosión esté sólidamente establecido o el que esté debilitado por las contradicciones que le acosan es un asunto para medir con otro rasero^{2}. De sopesar nuestra situación actual, debemos tener en claro que el negar en absoluto este modelo, nos orillaría a un terreno

{2} Rasero que ni por un momento podemos dejar al olvido. A lo largo de la historia humana, ha sido común que el hombre adopte adhesión —en no pocas ocasiones ciega adhesión— a la hipótesis que pasa por ser la única explicación del fenómeno inquirido. Paradigma de ello, ejemplo en no pocas ocasiones aciago y lamentable de ello, ha sido la posición de los pueblos hacia la religión.

llano. Vale más analizar las secuelas de un modelo que puede ser el correcto, antes que quedarnos con las manos vacías. La suspicacia es un elemento conveniente de enarbolar en las indagaciones realizadas por el ser humano, pero debe ser ocupada con moderación, so pena, en el caso contrario, de caer en el más recalcitrante de los escepticismos.

Por supuesto que el tener una sola respuesta para dar esclarecimiento sobre el período que precede a hace —digamos— 15 evos, no es más que un hecho revelador, tomando ponderadamente los puntos flacos del modelo que es base de la respuesta, del parco entendimiento que tenemos sobre la cosa cosmológica. Más que una ruta de la materia, tenemos frente a nosotros un conjunto de vericuetos muy difusos, que en ocasiones pareciera, conducen a abismales e infranqueables incógnitas. No obstante, creo que no resulta del todo impertinente seguir discutiendo en torno al modelo de la Gran Explosión: en todo caso, de resultar incorrecto, tarde o temprano caerá por su propio peso. Y de entre sus escombros, quizá sea posible erigir la respuesta acertada.

La segunda razón estriba en un aspecto de profundo peso epistemológico: erre o acierte en lo que predice, el modelo de la Gran Explosión está sustancialmente subordinado a un componente cósmico irrecusable: la evolución. Más allá de que logre ajustar su estructura al corrimiento galáctico, más aún que el que sus predicciones concuerden globalmente con la composición en elementos ligeros del universo, más basal que el ser la única hipótesis coincidente con la radiación isotrópica de fondo, el modelo de la Gran Explosión manifiesta como virtud radical el que incluye en su filosofía la no estaticidad del cosmos. La hipótesis de la Gran Explosión cumple con la premisa del devenir de la materia como epíteto por excelencia del modelo. Premisa total en cualquier discusión sobre la cosa cósmica, que conecta basalmente al modelo con una realidad fundamental: la evolución en el universo. Premisa que hace al modelo de la Gran Explosión (en conjunto, evidentemente, con el margen de probabilidad de ser correcto que le es atribuible) comparecer como una hipótesis atractiva en el marco de la indagación de lo universal.

Con respecto a la toma de las hipótesis de la TEE como sillares de una parte importante de la historia de la materia, debe ser señalada la confiabilidad que puede inspirar tal postura. Aun cuando son desconocidos los mecanismos formadores y explotadores de estrellas, aún cuando no sea posible obtener evidencia directa de lo que acontece en los centros estelares, aún cuando los cambios significativos de los parámetros de un astro son evidentes a tiempos muy superiores a los de la escala humana, por lo que es necesario recurrir a métodos estadísticos, aún cuando la cosa galáctica sigue incólume en su misteriosa formación,

tenemos fuertes evidencias del papel de las estrellas en la transformación y devenir del universo. No sabemos si la formación de las estrellas opera por la ruta del colapso o por la de la decadencia y expansión o por algún otro mecanismo desconocido, pero estamos ciertos de que al nacer, los astros comienzan a consumir especies ligeras; no ha sido esclarecido el mecanismo por el que una implosión puede desatar la expansión explosiva de las capas exteriores de una estrella, pero tenemos evidencias que hacen constar con asiduidad la ocurrencia de nucleosíntesis explosiva de especies pesadas en escenarios supernova; quedan dudas sobre la conglomeración de partículas para la formación de planetas, pero no cabe duda de que el origen y la transformación de los sistemas planetarios están causalmente vinculados con el origen y la transformación de las estrellas, además de existir sólidas razones para suponer la ubicuidad de los sistemas planetarios. Consecuentes con esta perspectiva es por lo que en §4.1 la TEE fue tomada como un factor fundamental para delinear la historia de la materia.

La ley de Hubble nos enseña que hace algún tiempo finito, la materia estuvo congregada en un volumen muy pequeño. El modelo de la Gran Explosión nos dice que hubo un momento en el cual la materia comenzó a separarse debido a la expansión universal, y que desde entonces discurrió el tiempo físico que nos gobierna.

Para decirlo todo en un solo enunciado: el origen del universo. Es algo pasmoso concebir al gran cosmos partiendo de un estado inicial. ¡Cuánto sosegaría al pensamiento materialista el ser demostrada la espuridad del corrimiento radial galáctico!

Evidentemente, el problema filosófico que tal conclusión emana es mayor. Decir, junto con EDDINGTON [57], que el tiempo que cuenta para nosotros es el forjado por los sucesos del universo, por lo que ninguna importancia en cuanto a la historia de la materia tiene la etapa previa a la expansión universal, o decir, junto con GAMOW [69], que ante la absoluta imposibilidad de hallar vestigio alguno de lo ocurrido en los tiempos preexplosivos, podemos sentirnos tranquilos de abandonar nuestra investigación de esa época universal pretérita, o el afirmar, como lo han hecho muchos cosmólogos (e.gr., [181]), que antes de la Gran Explosión no existía tiempo ni espacio, sólo la «nada», absolutamente adimensional y atemporal, no hace algo por dejar satisfecha la interrogante sobre la causalidad del origen del universo. ¿Cuál fue la causa de que los eventos comenzaran a discurrir, de que la Gran Explosión haya ocurrido hace 15 evos? ¿Por qué el tiempo está acotado en un punto del pasado, a consecuencia de qué, por qué no es ilimitado? ¿De dónde proviene el universo, por qué hubo de formarse, cómo

pudo surgir de lo que no existe? Aún poniendo por caso, al hacer eco a la sugerencia de EDDINGTON, que el universo siempre ha existido y que nuestro tiempo discurrió una vez comenzaron a sucederse los eventos físicos (un comienzo no tan inestéticamente abrupto), no dejan de aflorar interrogantes como el ¿por qué el universo no ha devenido desde siempre, qué fue lo que dictó que «comenzara» la evolución? Como sea que el inicio del universo es concebido, inestéticamente abrupto o pausado como los evos, siempre se tienen «molestas» preguntas que calan hondo.

Es clara la conclusión, que de carácter medular se inviste, y que resulta imposible de paliar o de dejar al soslayo, de que para el estado actual del pensamiento humano, es irreconciliable un origen del universo con la noción de «universo autocontenido». Es difícil entrever la razón suficiente que nos permita desligar de la postulación del inicio del tiempo la pregunta sobre la causa de ese inicio. Por el momento, nada nos puede hacer dejar de evocar la intervención divina cuando de concebir un origen para el universo se trata, en tanto el agente originador del universo no puede ser a la vez causa y parte de éste: he aquí un serio dilema para los que por medio del modelo de la Gran Explosión quieren obtener buena zafra.

Una mirada teórica a los tiempos idos a través de la lente del modelo de la Gran Explosión nos perturba científicamente al ser sugerido el inicio cósmico. ¿Qué nos enseña tal lente cuando la dirigimos en dirección contraria: hacia el futuro? El panorama mostrado adquiere diferentes matices en virtud de lo que es denominado como los tres parámetros del universo, todos ellos dependientes, en última instancia, de la densidad promedio actual de la materia.

Al tiempo de mencionar tales parámetros, consideremos brevemente los argumentos que han conducido a su postulación.

Es falso eso de que todo lo que sube ha de bajar. La suerte de un objeto que arrojemos en un sentido contrario al del centro de la Tierra dependerá de la fuerza con que lo impulsemos. El objeto no caerá si al arrojarlo logramos que supere la velocidad de escape de la Tierra. Algo similar puede ser establecido con respecto a la Gran Explosión. Si la Explosión dio a la materia el impulso necesario para superar la «velocidad de escape» del universo, la expansión continuará por siempre, tendiendo la densidad de la materia a un valor nulo. De una expansión perpetua, se dice que el universo es abierto (pudiendo ser de geometría hiperbólica ($\Lambda = -1$) o euclideana ($\Lambda = 0$)⁽³⁾). En el caso contrario, si

el componente gravitatorio universal es superior a la fuerza de desplazamiento radial, la expansión será frenada, y el universo comenzará a «caer» sobre sí mismo: colapsará. Para esta situación, con $\Lambda = +1$, se sigue que el universo es cerrado, con geometría esférica.

El que el impulso expansivo que posee el universo sea capaz de llevar a la materia a un corrimiento de alejamiento perpetuo depende del componente gravitatorio universal, componente que es función, a fin de cuentas, de la densidad de la materia. Si el universo posee una densidad superior a un valor crítico, se sigue que aquél es cerrado. De otra parte, evidencias indirectas sobre la geometría del universo pueden ser obtenidas de los factores de deseleración de la velocidad de expansión, del de la edad del universo y del de la cantidad de deuterio existente. A mayor potencial gravitatorio del universo, mayor será el factor de deseleración, menor la edad del universo y menor la abundancia de deuterio. En virtud del valor de estos parámetros con respecto a valores críticos establecidos por el modelo, es posible testificar el tipo de geometría (y por tanto el futuro del movimiento radial) del universo. [77,187]

Ahora bien. Aparentemente, el caso $\Lambda = +1$ puede evitarnos severas dificultades de orden lógico. Imaginemos que pasados algunos epos, la expansión por fin es detenida por el campo gravitatorio, y revertida a un proceso de «colapsamiento universal». El universo será cada vez más denso, hasta llegar a un estado de máxima compactación de la materia. Arribado a este estado, el universo «estallará» y comenzará, nuevamente, a expandirse [90].

Con este tenor, tendríamos una respuesta sobre la causalidad del origen de nuestro universo: simplemente, representa el inicio de una de tantas fases expansivas. Pasado algún tiempo, el universo en el que vivimos colapsará, y volverá a explotar para dar paso a un nuevo universo expansivo, y así, *ad infinitum*. A lo largo del vector temporal, el universo, debido a su propiedad de «pulsante u oscilatorio» [90], carecería de límite alguno, tanto en el pasado como en el futuro.

Sin embargo, la elegante respuesta del «universo pulsante» se enfrenta a diversos y grandes impedimentos.

Por principio de cuentas, debe ser denunciado que el modelo no tiene forma para explicar como podría ser logrado un «rebote elástico» que permitiera a un universo en colapso el comenzar a expandirse [26]. Y, algo no menos importante a lo anterior, es que la observación ha evidenciado, para

{8} Véase la ecuación (5) del primer capítulo.

infortunio del modelo pulsante, que los valores de los cuatro parámetros (i.e., los tres indirectos y la densidad promedio de la materia) corresponden a un universo abierto [77].

Aparte las secuelas que enraizan en el seno del modelo de la Gran Explosión, existen motivos adicionales que no permiten evadir así como así la postulación de límites temporales para el devenir del universo. Uno de ellos, sin duda alguna el de mayor envergadura, es el comportamiento entrópico de la materia. Consideremos, a través de lo delineado en §4.1, la información que al respecto nos brinda la TEE.

Pábulo imprescindible de la actividad estelar son las reacciones de fusión nuclear, por mucho los principales procesos generadores de energía en el universo. Desde el inicio de la era estelar, el universo, en marcha progresiva en virtud de los procesos nucleosintetizadores, agotando paulatinamente su reserva de especies ligeras, ha enriquecido el espacio de especies complejas. El universo, paso a paso, está consumiendo el arsenal de especies químicas generadoras de energía. El fin de la era estelar alcanzará al cosmos una vez haya inexistencia de especies exoérgicas disponibles. Agotado el último núcleo de masa atómica menor a la del hierro, el total de los cuerpos aún rutilantes tenderá a un proceso de enfriamiento ininterrumpido, hasta quedar éstos convertidos en cuerpos negros, en vestigios de una era dinámica en la que abundaron los gradientes de potencial. Quizá nuevas inestabilidades, semejantes a las que antes llevaron a la materia a formas estelares, engendrarán cuerpos que rápidamente consumirán su potencial gravitatorio. Entre el inicio de la fase protoestelar y el inicio de la fase de enana blanca sólo mediarán algunos cientos de millones de años. Hasta que ya no sea posible producir cuerpos *pseudoestelares*. Entonces, no lejana estará la época en la que la población cósmica esté compuesta de estrellas y de galaxias, todas incapaces de generar energía.

De acuerdo a la ley de la entropía, en tanto el universo agota su potencial energético, se degrada termodinámicamente al generar energía calorífica inaprovechable (y en un sentido mucho más amplio, como lo hicieron notar BOLTZMANN y PLANCK, al generar mayor desorden [119]). Siendo el núcleo la principal fuente de energía, si se llegara a un estado de imposibilidad de generar energía mediante procesos de nucleosíntesis, el universo muy cercano estaría a un estado de máximo desorden de la materia. Sólo sería cuestión de tiempo para que todo acabara, incluso el tiempo mismo.

Así, explorando las consecuencias de la TEE contextualizada en la segunda ley de la termodinámica, nos

encontramos con un elemento más que señala el origen y el fin del universo. Yuxtapuestas a la causalidad sobre el límite temporal del universo, tenemos ahora preguntas como el motivo por el cuál el universo comenzó con un alto grado de organización, así como el por qué a la par de que el espacio se expande, aumenta el grado de desorganización de la materia. Y dentro del contexto de la hipótesis del universo pulsante, se yergue ahora, además, la necesidad de explicar cómo es posible regenerar el nivel entrópico.

Incluimos la TEE y enseguida nos encontramos en puerta con una noción de origen del universo robustecida. Navegando con tales derroteros, es difícil entrever alguna forma de sostener la afirmación materialista de que el universo es autocontenido. Nos encontramos ante una curiosa disyuntiva: si incluimos el devenir conjeturado a partir del modelo de la Gran Explosión y de la TEE en nuestra concepción sobre el universo, tenemos que arrostrar conclusiones con las cuales el único favorecido es la filosofía idealista; de otra parte, está el hacer caso omiso de las evidencias evolutivas, y el inclinarnos por un universo estático: las contradicciones a la filosofía materialista y a la ciencia en general que conlleva esta posición son de lo más gigantescas y palpables.

Creo que una forma para paliar este escabroso asunto, es mediante la postulación de un universo cerrado en todos sus parámetros y estacionario en cierta cantidad de evos. La sugerencia original puede ser extraída de la hipótesis del universo pulsante (o, para ser exactos, del tipo de geometría ostentado por un universo cerrado), pero ahora pensemos en que no es sólo el sentido de corrimiento galáctico lo que cada tanto se invierte. La clave del éxito para postular un universo de este carácter es un nuevo enfoque epistemológico al respecto del comportamiento de la materia. El elemento conducente a ese nuevo enfoque: las propiedades desplegadas por la materia «viva». La premisa fundamental: un universo autocontenido.

§4.3.

LA EVOLUCIÓN EN EL UNIVERSO

Debemos entender como «universo autocontenido» a aquel sistema en el que todo, absolutamente, está incluido dentro de él. Aparte lo que compone al universo nada existe, ni espacio, ni tiempo, ni energía, ni entes sobrenaturales capaces de alterar los eventos materiales. Nada.

Para un universo autocontenido es requerido llenar algunas exigencias fundamentales, como lo es, evidentemente, la absoluta observancia de la primera ley de la

termodinámica: no creación, no destrucción de la energía (o para formularlo en otros términos: que nada de lo que compone el universo tenga carácter de facultativo en cuanto a su existencia y no existencia dentro de aquél). Pero aquí no paran los requerimientos. Para varios parámetros de carácter continuo es necesario que se les pueda asociar el atributo de ilimitados. Pongamos por caso al espacio. El conferir un límite al espacio, traería como secuela la existencia de una «zona de separación» entre el «espacio» y el «no espacio». Algún espacio del que compone al universo debería estar, en contacto con el «no espacio», con lo que «no existe»! ⁽⁵⁾ Quiérase o no aceptar, lo limitado del espacio da peso de existencia a lo que «no existe» y que no pertenece al universo.

Como ya de alguna manera hemos indicado en el capítulo primero, existen dos formas de satisfacer un espacio ilimitado: ya sea por medio de un espacio euclideo o hiperbólico (ambos infinitos) o por medio de un espacio esférico y finito. Ahora bien, de algo infinito sólo podemos decir la cruda verdad de que es inacoplable al pensamiento humano. A lo largo de esta tesis, hemos tenido ocasión de mostrar testimonios acerca de ello. A como están las cosas en la ciencia actual, mientras menos tengan que ver nuestras hipótesis con lo infinito, más honestos seremos en cuanto a los planteamientos que formulemos ⁽⁶⁾. No es un mero decir por parte de varios estudiosos, que la grandeza intelectual más encomiable de EINSTEIN es la postulación de la geometría esférica para su modelo cosmológico. De una sola vez, EINSTEIN desterró de su modelo lo limitado y lo infinito como propiedades del espacio.

Tengamos ahora por caso a otro elemento continuo: el tiempo (no es necesario indicar las implicaciones de que el tiempo tenga inicio y/o fin). La teoría especial de la relatividad, con base en el intervalo de Minkowski,

{5} Por otro lado, un espacio limitado nos haría lidiar con problemas de orden lógico análogos a los que enfrentaron las primeras culturas al imaginar una Tierra plana en la que si alguien aventuraba a acercarse al límite corría con el peligro de caer de ella.

{6} No obstante, tengo la fuerte impresión de que sobre lo infinito todavía hay mucho que decir, y que quizá cuando el ser humano haya desarrollado mayor capacidad para comprender este escabroso concepto, será lo infinito tomado como una piedra miliar en la ruta evolutiva del saber humano.

establece que tiempo y espacio son expresiones de un mismo ente físico: el espaciotiempo. Las diferencias entre el espacio y el tiempo ocurren en virtud de las condiciones del observador; por tanto, cabría decir que son diferencias de circunstancia. Si de alguna manera pudiera ser demostrado que la propiedad de esfericidad del espacio la comparte el espaciotiempo, quizá entonces tendríamos algún motivo para pensar que el tiempo es también finito e ilimitado: en este caso, los sucesos del universo se desplazarían por un vector temporal circular^{7}. Así como un rayo de luz en el universo einsteniano podría pasar más de una vez por el mismo lugar sin necesidad de cambiar de dirección, así lo podría hacer con respecto a pasar dos veces por el mismo tiempo.

Sin embargo, existe un poderoso argumento que hace negar la posibilidad de que el tiempo sea ilimitado. Podemos establecer diferentes tipos de tiempo (e. gr., el tiempo psicológico, el tiempo cósmico), pero sólo uno es el fundamental, del cual dependen el resto de los tiempos: el tiempo físico, subordinado, de acuerdo con lo que hemos expuesto en la sección anterior, a la segunda ley de la termodinámica. Y de este tipo de tiempo, ya tenemos una clara conclusión: globalmente, el devenir de lo físico apunta hacia una sola dirección: hacia la muerte termodinámica del universo.

Es evidente que un análisis tocante a la historia del universo que quedara circunscrito exclusivamente en el devenir de la materia «inerte», de ninguna manera podría arribar a conclusiones que permitan evadir a los etéreos postulados metafísicos. Omnimoda en los eventos físicos y químicos del universo (al menos en todos aquéllos que el hombre ha tenido oportunidad de estudiar), la tendencia global de la materia hacia el aumento de entropía es un atributo de gran significancia en eso que solemos nombrar como evolución fisicoquímica. Secuela inmediata de este tipo de evolución: los límites temporales del universo; escolio ineludible: el debilitamiento de la concepción materialista al quedar en tela de juicio la propiedad de autocontenido para el universo.

Así, la evolución fisicoquímica, tomada aisladamente, impone la interdicción hacia el establecimiento de las

{7} Partiendo de consideraciones muy complejas y realmente originales, HAWKING ha logrado forjar un modelo de un universo imaginario en el que el espacio y el tiempo, al formar un continuo circular, finito e ilimitado, cumplen con el criterio de lo que HAWKING llama como «de no frontera» (90).

propiedades de finito e ilimitado para el tiempo. De acuerdo a uno de los elementos teóricos que son la base para la reconstrucción de la historia de la materia que los científicos han propuesto, el tiempo termodinámico comenzó hace algunos epos, cuando el universo tuvo un máximo de orden, y terminará epos adelante, cuando se llegue a un estado de máximo desorden.

Algunos pensadores, arrostrando las implicaciones filosóficas que tal conclusión arroja, han buscado la forma de que la derrota materialista —temporal, si así se quiere pensar— sea lo menos dura posible. Haciendo eco a los señalamientos que hiciera alguna vez DESCARTES [50], ha sido afirmado que con las leyes que rigen al universo, la intervención divina sobra del todo en el devenir de la materia. El estudio científico de los fenómenos naturales ha revelado que los dioses son perfectamente prescindibles en el acontecer y desenvolvimiento causal de nuestro universo. En este derrotero, también ha sido esgrimido que Dios, si deseoso estaba de que con el tiempo surgieran seres capaces de adorarle, no tuvo oportunidad de elegir las características del universo que creó. Las leyes y propiedades del universo no pudieron ser diferentes a como lo son. De haber sido ligeramente diferente alguna de las propiedades fundamentales de la materia, como, por ejemplo, la constante de gravedad, jamás habrían sido alcanzadas las condiciones propicias para el surgimiento de la vida, al menos como la que conocemos.

No obstante, puede haber para quienes no baste con atarle las manos y la voluntad a Dios, y que prefieran a éste del todo reducido, sin alguna relación —ni ahora, ni nunca— con el universo. ¿Qué restaría por hacer a éstos de espíritu indómito? La respuesta puede ser perfectamente formulada: encontrar la forma para postular la reversión del comportamiento entrópico de la naturaleza; encontrarle al universo la capacidad para regenerar el orden perdido.

Impongámonos como propósito para lo que resta de esta sección el escrutar en busca de argumentos que permitan reforzar, si no la hipótesis en sí, al menos sí la esperanza de que no todo está perdido para los partidarios del universo autocontenido.

Los sistemas biológicos y la implosión de un núcleo homólogo estelar están contados entre los raros sistemas en el universo dentro de los cuales, en forma global, no aumenta la entropía. Por la efimeridad de las implosiones estelares, por las condiciones tan difíciles de conquistar para producir un núcleo homólogo y dada la dificultad que estaría presente en tanto se tratare de tener al colapso de una estrella masiva y senil como una de las tendencias principales de la materia, tengamos por suposición que el universo no podría cambiar el sentido de evolución

entrópica por medio de procesos análogos al colapso de un núcleo de hierro de una estrella que explota como supernova.

Los sistemas vivientes han sido calificados como sistemas que violan la ley de la entropía. En efecto, es innegable que los seres vivos son capaces de mantener una tendencia entrópica inversa a la de su entorno físico. A pesar de las complejas reacciones químicas que operan dentro de un organismo, el estado de los componentes de éste, por lo general, conserva o aumenta el nivel de organización. En contra de la ley de la entropía, nosotros somos capaces de limpiar y acomodar los objetos de una habitación o de rearmar un rompecabezas que por accidente se nos revuelve.

¿Qué significado tiene, en cuanto al presente y el futuro del universo, este comportamiento como si dijéramos «antidesorden» de lo vivo? De peso nada significativo es que parece del todo inequívoca la conclusión de que conforme ha evolucionado lo vivo, los organismos han alcanzado niveles de organización más altos, algo que resulta ciertamente contrapuesto al comportamiento de lo no vivo. ¿Qué papel juega en el contexto universal la evolución biológica? ¿Será que al incluir la evolución biológica en nuestras consideraciones sobre la evolución de la materia tendremos un marco que nos permita establecer lo ilimitado para el tiempo?

Infelizmente, si contestáramos tomando apego a los preceptos evolutivos y termodinámicos de mayor boga y solidez en la actualidad, tendríamos que reconocer que lo vivo, aunque en forma sutilmente diferente a lo no vivo, obedece con ciega subordinación a la tendencia hacia el aumento de entropía. El nivel de organización de los seres vivos es sostenido a costa de la mayor degradación entrópica del entorno. Los sistemas vivos extraen del ambiente que les rodea la energía necesaria para generar orden; pero a cambio de ello, el ambiente es degradado en mucho mayor proporción que el orden obtenido. Por ejemplo, al ser leído un libro, son gastadas por lo menos mil calorías de energía ordenada en forma de alimento, energía que desordenada, en forma de calor, es cedida al aire. Como producto neto, el acto de leer un libro genera aproximadamente diez millones de veces más unidades de desorden que de orden [90].

Sin embargo, aún teniendo en todo momento presentes todas estas palmarias evidencias del aumento neto de entropía, ¿podemos a estas alturas del desarrollo científico comprobar que el universo tuvo origen y tendrá fin? ¿Podemos sentirnos realmente seguros de que estamos interpretando correctamente el comportamiento de lo vivo?, —y, sobre todo— ¿podemos estar ciertos de que la dependencia termodinámica de los sistemas biológicos hacia su entorno es irreversible, de que el comportamiento que ahora observamos es extrapolable a cualquier tiempo y condiciones del

universo?

¿Y si fuera el caso de que el aumento de orden conquistado por la evolución biológica a través de las generaciones es sintomático de la emergencia de un nuevo tipo de tendencia que acabará por revertir (una vez la materia logre niveles de organización quizá aún insospechados por nosotros) la flecha termodinámica que gobierna en forma global al universo?

Por supuesto que por el momento no existe manera conocida para demostrar tal suposición. De ser ése el caso, la tendencia antidesorden estaría aún en un estado muy incipiente como para poder ser demostrado plenariamente que es capaz de desplazar a la tendencia termodinámica que, al parecer, ha preponderado en los eventos naturales durante los últimos evos. Sin embargo, a pesar de que todo apunta en contra, ¿debemos sin más adherirnos a un total escepticismo con respecto a la probabilidad de encontrar un modo de evadir el comienzo del universo? ¿Es que debemos quedar desde ahora, en los albores de la ciencia, condenados a la idea de que habitamos un universo no autocontenido? Creo que antes que abandonar a tan prematura conclusión, no está por demás ataviarnos con el manto de la especulación, y comenzar a aventurar hipótesis que nos den esperanza de evadir el escollo que representa la segunda ley de la entropía. Quizá, por el momento a lo que podríamos aspirar es a hallar fórmulas que nos permitan cuestionar el escepticismo que nos siembra la observación al respecto de que la materia logre ajustar su comportamiento al requerido para satisfacer un universo autocontenido.

Partamos de la suposición de que la materia es capaz de transformar, de trastocar, de invertir el comportamiento entrópico global establecido actualmente en el universo. ¿Cómo podría lograr tal cosa? Contestemos que por medio de la evolución.

Dicen por allí los partidarios de una conocida teoría sobre evolución biológica que el devenir de lo vivo está sustentado, en lo más basal, en una causalidad dual: el azar y la adaptación: caos y anticaos. El azar, ese raro concepto que nadie ha acertado a definir con precisión, es tomado como la fuente primera y única de variabilidad para las especies vivas. El azar ejerce su fortuita influencia a través de transtornos en el material genético de las especies. De entre los diferentes organismos obtenidos en la reproducción, surgen algunos cuyas características son las más favorables para adaptarse a su entorno: la selección natural los conserva, eliminando o reduciendo a los menos aptos. Anastomosados de tal manera el azar y la adaptación, se dice que los afortunados organismos sobrevivientes han evolucionado.

A lo largo de este transcurso evolutivo, la materia es concebida como subordinada a dos elementos de índole fundamental que —así creo entenderlo— nos hacen que veamos a lo vivo como incapaz de desviar su comportamiento para rivalizar con el de la materia en niveles de organización inferiores. En consecuencia con la teoría evolutiva acabada de mencionar, es dado el decir que (1) la materia es afectada en todo momento de su historia por el azar, fuente única de variabilidad; y que (2) la materia está regida por leyes universales (como es el caso de la ley de la entropía) de las cuales no vale desviación. De otra parte, a poco de ser meditado, es evidente que desde la perspectiva planteada mediante las teorías evolutivas actuales, existe una clara inconexión entre la tendencia fisicoquímica y la biológica: ¿por qué la materia biológica, que teóricamente es sumisa a las leyes fisicoquímicas, comporta una tendencia diametralmente opuesta a la materia fisicoquímica?; y más intrigante aún es ¿por qué precisamente un comportamiento inverso? Tratemos de analizar tan delicadas premisas.

Comencemos con la siguiente acotación: la materia no está comprometida a avenirse a ninguna ley. La materia presenta comportamientos definidos que nosotros abstraemos y que denominamos como leyes⁽⁸⁾. Por extraño que parezca, en algunos científicos aún vive la creencia de que existen leyes absolutas que la materia no puede violar. Creo que es completamente equivoco concebir a los componentes del universo como entes que se ajustan ciegamente a unas etéreas e implacables leyes, y, en este sentido, concebir que la materia tenga la prohibición de exhibir otro tipo de comportamiento al establecido en tales leyes. No. Las leyes como dictadoras del comportamiento de la materia sólo existen en el papel. La materia por nadie está regida, sino es que por sí misma. Antes que sostener que la materia no viola leyes, vale la afirmación de que a la materia sólo se le han observado ciertos comportamientos. Por ende, más que cercarnos en la concepción de que la materia no puede violar en lo global a la ley de la entropía, debemos preguntarnos

(8) De esta discusión he dejado al soslayo, intencionalmente, algunos puntos al respecto de las leyes y en general del hacer ciencia, como es el caso de la perfectibilidad de las leyes o como la certeza de que las relaciones obtenidas estén sustentadas en premisas correctas, puntos que, dicho sea de paso, han reforzado el escepticismo de los científicos hacia la validez de diversas leyes que son pilares de la ciencia actual.

si es capaz de cambiar en lo global su comportamiento.

Ahora bien, existen comportamientos que toda la materia manifiesta de manera prácticamente idéntica (e. gr., la respuesta hacia los campos gravitatorios). De estos casos son derivadas leyes que permiten establecer una relación cuantitativa bastante aproximada entre los antecedentes y los consecuentes de sistemas con ciertas características restrictivas. Empero, existen otras leyes que solamente pueden ser deducidas por el método estadístico. Las leyes de la tasa de decadencia radiactiva, del comportamiento cinemático de los gases, de la entropía, son leyes que en realidad representan la media (a la cual se le caracteriza con un número adicional de parámetros estadísticos) del comportamiento de la población analizada. En este tipo de leyes, el promedio es el meollo del enunciado. ¿Qué quiere decir esto? Que son sacrificadas (por necesidad) los individuales en aras de obtener parámetros globales. Significa que la ley describe un comportamiento que no todos los componentes del sistema comparten. Así por ejemplo, en el caso del derrotero entrópico de las moléculas que intervienen en una reacción química, la ley establece el aumento neto de desorden del sistema, más resulta que no todo lo que compone a dicho sistema aumenta de desorden. ¿Acaso aquí no tenemos una evidencia de que la materia no necesariamente tiene que aumentar de desorden? ; Ah! —podría contestarse—, así es, pero existe una bajísima probabilidad de que un determinado grupo de moléculas, después de haber reaccionado, conserve o aumente su grado de orden. —Cierto, más debe tenerse en mente que la probabilidad de los eventos depende de las condiciones del sistema, del determinismo que impone el sistema [53]. Y esto es axiomático.

Así, tenemos ya tres argumentos que hacen mella a la aseveración de que el universo inexorablemente se dirige hacia su muerte termodinámica: *a priori*, no existe forma de sustentar que la materia está constreñida por siempre a un determinado tipo de comportamiento; no todo lo que compone al universo aumenta de desorden; está abierta la perspectiva de que sea más probable obtener entropía retrógrada al cambiar las condiciones del universo.

¿Qué es el azar? Dicho sea de paso, esta pregunta es de una importancia crucial, pues implica una respuesta hacia la existencia de la diversidad en el universo. Es posible distinguir por lo menos dos tipos de azar (me refiero a los diferentes toques semánticos que se le da a esta palabra): el azar epistemológico y el azar ontológico. Ambos implican impredecibilidad. El primero es inversamente proporcional al desarrollo de la ciencia. El segundo es irreductible, y es concebido como la casualidad que actúa en los eventos universales de manera causal (!) [188,189]. ¿Qué tanto de lo

que nos es impredecible es por falta de escrutación de nuestra parte y qué tanto es por un —como lo han llamado— «derecho de la naturaleza» de no ser reducida a un algoritmo?

De antemano, es necesario tener en claro que aún desarrollando al máximo nuestro conocimiento, existe una imposibilidad física para que seamos capaces de llegar a predecir con absoluta precisión los eventos físicos (i. e., de que seamos capaces de reducir hasta un valor nulo al azar epistemológico). Tal imposibilidad es inferida de lo plasmado en el principio cuántico de incertidumbre. La explicación es la siguiente: el único medio para medir tanto la velocidad como la posición del electrón es la luz. En tanto de menor longitud de onda sea el fotón, será posible saber con mayor precisión la posición del electrón en un momento dado. Pero mientras de menor longitud de onda es el fotón, es más energético, por lo que mayormente afectará la velocidad del electrón y menos precisa será la determinación de ésta. Y tenemos el caso opuesto: si queremos medir con mayor precisión la velocidad, requerimos de fotones de longitud de onda grande para afectar en lo menos posible el momento del electrón, pero en este caso tendremos una vaga información sobre la posición.

El ingreso del principio de incertidumbre a la ciencia significó el desterramiento perpetuo del determinismo laplaceano. Existe la imposibilidad física, que por lo demás es insuperable por su carácter de intrínseca, de establecer todas las propiedades del universo en un momento dado. De otra parte, tener la esperanza de hallar algún método que permita evadir el principio de incertidumbre suena a algo tan insipiente como el esperar que existan las partículas superlumínicas (taquiones).

Sin embargo, el principio de incertidumbre elimina sólo un tipo de determinismo: el epistemológico, más no así el ontológico. Como es evidente, la existencia de éste depende de la inexistencia del azar ontológico.

Si queremos demostrar la existencia de algo, primero debemos tener una idea clara sobre qué es ese algo. Empero, resulta que no poseemos alguna definición satisfactoria sobre el azar ontológico. Desde aquí, ya tenemos un severo inconveniente para poder demostrar si éste existe o no. No habiendo otra alternativa, permítaseme señalar lo que creo que algunos autores entienden —por intuición— como azar: algo etéreo, absoluto, no inherente a la materia, inafectable, que ejerce sobre la materia, en el momento preciso, su influencia para dictarle lo que debe hacer, la alternativa a la cual debe inclinarse. Resulta interesante notar que dentro de todas estas características que en mayor o menor grado le han sido atribuidos al azar, se particulariza una que de mantenerla nos haría adoptar una

posición retrógrada. Nadie de los que sostienen la existencia de ese «derecho de la naturaleza» han siquiera insinuado la opinión de que el azar sea afectable por los eventos materiales. La unidireccionalidad de esta relación entra en franca discordia con la filosofía machiana, por decir lo menos. Podría decirse, desde una falsa perspectiva existencialista, que aún cuando el azar ontológico resulta antipositivista, es útil al permitirnos entender más sobre la naturaleza. Mas esta afirmación es completamente falsa. En mi opinión, el azar, cualquier tipo que sea, significa ignorancia, y no veo gran ventaja de que nos impongamos un límite que amplíe aún más la ignorancia que jamás podremos superar.

De ser tomado mucho en cuenta con respecto a esto último, es que históricamente el azar surgió en el pensamiento humano como un equivalente de impredecibilidad, de falta de conocimiento. Han pasado siglos, y seguimos sin la forma de tenerlo como una propiedad insita del universo. No podemos relacionarlo con la materia como lo hacemos con propiedades (no menos misteriosas) como la gravedad. Así que fuera de algunos argumentos de orden estético (que no tiene caso mencionar aquí) y de la intención de inventar una propiedad que disimule nuestra ignorancia, no encuentro razones de peso para incluir al azar ontológico en el devenir universal, azar que, de otra parte, engendra algunos problemas de orden considerable, como los dos que a continuación están señalados:

(1) Si dispusiéramos una Tierra idéntica en todo a la Tierra primitiva, y dejáramos que la evolución darwinista operase sobre los componentes del planeta, el resultado más probable es que obtendríamos, pasados algunos evos, algo muy diferente a la configuración actual de la biósfera. A partir del azar, es extremadamente incómodo explicar la factibilidad de que la evolución biológica se haya dirigido (o haya sido dirigida, como se le quiera ver) hacia los sistemas vivos que nosotros conocemos.

(2) Han sido distinguidos dos tipos de azares en función del papel que juegan en la evolución de la materia. El uno es el azar que domina en el comportamiento de lo inerte: un azar que desorganiza. El otro, un azar creador de sistemas cada vez más organizados, opera en el devenir de lo vivo. Es curioso: no sabemos qué es el azar, y sin embargo hacemos subclasificaciones de él y creemos identificarlo en diferentes ambientes, no obstante que sus manifestaciones lleguen a ser diametralmente opuestas!

Como a poco señalaremos, la negación del azar puede tanto permitirnos evadir estos molestos inconvenientes como ganar puntos para el propósito de reforzar la hipótesis del universo autocontenido, que es lo que aquí nos ocupa. Pero antes de formular tales puntos, debemos llenar algunos

vacios que deja el desplazamiento del azar.

¿A qué es debida la diversidad en el universo? Una forma muy cómoda de resolver esta interrogante es echándole la culpa al azar. No obstante, rechacemos esta placidez negando cualquier tipo de influencia del azar en los eventos físicos y veamos a qué nos conduce tal negación.

De acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, todo tiempo pretérito fue de mayor nivel de organización que el actual. Extrapolando lo suficiente con esta ley, obtendríamos un estado de absoluto orden, todo homogéneo y simétrico. ¿Cómo fue posible que un sistema de tales características pudiera desequilibrarse y evolucionar? Podríamos contestar, a la manera de varios panegiristas del modelo de la Gran Explosión, diciendo que el desequilibrio fue producto de heterogeneidades derivadas del principio de incertidumbre (las llamadas fluctuaciones cuánticas). Ya hemos visto que esto es perfectamente falso. El principio de Heisenberg sólo significa imposibilidades «técnicas» de medición. Nada más. La otra forma de responder sería mediante el azar, produciendo éste movimientos aleatorios de las partículas.

Planteémos de otra manera el dilema de la diversidad. Muchos físicos han afirmado que en la complejidad manifiesta en el universo subyace una gran simplicidad [72]. Esta afirmación tiene mucho más que un interesante valor estético. Por medio de potentes aceleradores de partículas (sincrotrones), ha sido demostrado que conforme el ambiente aumenta de nivel energético, la materia y las fuerzas elementales se simetrizan. Evidencia en lo particular de ello, ha sido el logro de la unificación de las interacciones electromagnéticas y las interacciones débiles [72]. La Teoría de la Gran Unificación predice que a energías tan grandes como 10^{15} GeV sería lograda la unificación de las fuerzas electromagnética, nuclear débil y nuclear fuerte y de los quarks y los leptones [190]. En estas condiciones, existiría un sólo tipo de partícula y un sólo tipo de fuerza (prescindiendo, por supuesto, de la gravedad). Los físicos actualmente están trabajando para lograr una teoría que unifique a todas las fuerzas, y que no permita la existencia de diferencias entre fuerza y partícula. Llegamos, así, a otra concepción de un estado de absoluta simetría que puede derivar en amplia diversidad. ¿Cómo explicar la factibilidad de esa derivación? Nuevamente, son recurridas las fluctuaciones cuánticas y el azar como respuestas.

¿De negar el azar, qué alternativa nos queda para explicar la diversidad del universo? En otras palabras, ¿qué otro fenómeno diferente a la aleatoriedad puede ser el responsable de que el universo sea asimétrico y diferenciado?

Antes que responder a lo anterior, deberíamos estimar la validez de las interrogantes. Y es que preguntas de tal tenor están cimentadas en una premisa, por supuesto *a priori*, completamente infundada: que el universo puede llegar a ser absolutamente simétrico y homogéneo. Aparte el gusto histórico del hombre hacia los absolutismos, ¿qué motivos —ya no digamos argumentos o evidencias— pueden conducirnos a pensar que puede existir lo absolutamente homogéneo en el universo?

Si vivimos en un universo que puede ser caracterizado por su diversidad, no sería concordante con lo que observamos el pensar que en algún momento, bajo ciertas condiciones, el universo pueda quedar privado de tal atributo. Quizá una premisa menos lejana a la realidad cósmica —que no por ello carente de carácter *a priori*— es que en el universo hay diversidad por el simple hecho de que la materia en lo fundamental es diversa; que la diversidad es un atributo intrínseco e imborrable del universo. Lo menos que ganaríamos con esta proposición, es librarnos de postular incómodos mecanismos para lograr la ruptura de simetría.

Quizá el postulado que menor cantidad de problemas acarrearía sería el de que toda la materia comparte propiedades por las cuales manifiesta comportamientos idénticos (la unidad de la diversidad), pero que cada una de las «partículas fundamentales» posee una propiedad, en la cual es portada la información de «diversidad fundamental», que hace que esa partícula —y, por consiguiente, el comportamiento de ella— sea diferente al resto de las partículas (la diversidad de la unidad). Esa información de diversidad fundamental, esa individualidad, esa heterogeneidad, haría posible estimar que en el universo nunca ha existido, y nunca existirá, el estado de absoluta homogeneidad, por lo que (al menos en lo que se refiere a no llegarse a un estado como éste) siempre habrá pábulo para el devenir.

¿Qué visión resultaría de tal proposición sobre la diversidad? Digámoslo sin ambages: la de un universo de determinismo ontológico. Ya lo dijimos, pero vale volver a mencionarlo: esto no implica que el desarrollo científico algún día llegue a encarnar en los científicos al demonio de Laplace. Por lo que ya hemos expuesto, el determinismo epistemológico está fuera de toda verosimilitud¹⁰⁾.

10) Aunque, de otra parte, con un universo sin azar el hombre estaría en posibilidad (al menos teórica) de conocer con mucho mayor aproximación el devenir cósmico. De hecho,

El tipo particular de determinismo aquí postulado, nos conduce a algunos puntos que revisten peculiaridad. Al quedar el azar descartado, el surgimiento y evolución de lo vivo hasta alcanzar la configuración de la cual formamos parte, no resultaría un fenómeno de bajísima probabilidad; por el contrario, tal configuración sería la única a la cual podría haberse llegado. ¿Esto implica que si en otras partes del universo se han formado planetas sumamente semejantes a la Tierra primitiva, en ellos se desarrollarán —si no es que ya existen— formas vivientes muy semejantes a nosotros? En lo sustancial: sí. En lo accidental: de ninguna manera. Porque aún cuando dispusiéramos una Tierra primitiva con las mismas condiciones que cuando nuestro planeta fue neonato, la materia interactuante sería diferente (recuérdese la diversidad fundamental), por lo que aunque sí bien es cierto que de ella sólo podría obtenerse un resultado, éste sería disímil a nuestro sistema biológico.

Con el análisis precedente sobre el azar, tenemos ya algunos nuevos puntos de interés. Eliminando el azar, los sistemas biológicos engendrados en la Tierra dejarían de ser un caso cósmico peculiar de escasa probabilidad de ocurrencia. La imposibilidad de que el universo llegara a ser perfectamente homogéneo y simétrico abriría la perspectiva (aunque en forma parcial) para pensar en la factibilidad de que siempre exista devenir. La proposición de universo de determinismo ontológico sentaría como piedra angular en la de universo autocontenido, al quedar establecida la mutua y exclusiva causalidad entre todos los componentes del universo.

Hemos tratado las proposiciones sobre el azar y las leyes de la materia; nos resta por tratar un punto que puede resultar de gran controversia: el establecer la naturaleza fundamental que une causalmente a la tendencia fisicoquímica con la biológica. Como es indicado enseguida, la dilucidación de este tipo de conexión entre las tendencias de la materia podría llegar a ser parte medular en la imagen que nos hagamos sobre el universo y su devenir.

Es evidente que la generalización de que para todo momento, ya en el pasado, ya en el futuro, la estructura actual de dependencia que guardan entre sí los diferentes comportamientos de la materia (i.e., que la tendencia cultural está subordinada a la biológica, así como ésta lo está a la fisicoquímica) es la misma, da cuerpo al principal

gran parte de la ignorancia insuperable estaría dictada exclusivamente por simples problemas «técnicos» de medición y de manipulación de datos y de variables.

argumento que sustenta la conclusión de la imposibilidad de invertir la segunda ley de la termodinámica. ¿Cabe algún tipo de cuestionamiento hacia esta generalización? La respuesta es, inequívocamente, sí.

¿Cómo es explicable que un tipo de tendencia sea causa completa de otro tipo de tendencia, siendo que no sólo los comportamientos exhibidos pueden resultar de total inconexión, sino que, además, como es el caso entre la tendencia biológica y la fisicoquímica, las tendencias son exactamente contrapuestas? De otra parte, concebir a lo fisicoquímico como el nivel del cual dependen los otros niveles de organización, es dar entrada al universo a lo lineal y finito, puesto que se estaría en la posición de defender la existencia de un punto o nivel de origen que representa un inicio causal en el devenir. ¿Hay cupo en un universo autocontenido para los consecuentes que no sean antecedentes, y los antecedentes que no sean consecuentes?

Teniendo en mente tales preguntas, y reconociendo que cabalgamos en el corcel de la especulación, hagamos una proposición para integrar los diferentes tipos de evolución en uno solo, de forma tal que podamos proyectar en un plano común a los diversos comportamientos manifiestos en los diferentes niveles de organización de la materia. Venga, pues, el barrunto:

Iniciemos formulando una premisa: las leyes sociales y

{10} Sobre la inconexión causal entre los comportamientos de los diversos niveles de complejidad, considérese lo siguiente: ¿cómo es que la materia, para nosotros en muchos sentidos misteriosa en sus atributos, puede hacer consigo interrelaciones causales —ciertamente inexplicables mediante la doctrina científica que nos apunta— que devengan en portentosas manifestaciones como la capacidad de escrutar a sí misma, interrelaciones que por su forma antecedente creemos comprender, pero que por su fenomenología consecuente nos hace caer en absorción sorpresa, como es lo que nos provoca la capacidad que manifiesta la especie humana para adoptar una disposición contemplativa? ¿Cómo es que el ser humano, producto natural, elemento de la naturaleza como lo es cualquier molécula inorgánica, cuyos orígenes están tan indisolublemente fundidos a la naturaleza como cualquier galaxia o cuanto de luz, denota en su tendencia evolutiva la capacidad de plantearse objetivos, capacidad que el resto de sistemas no dan vislumbres de poseer? Seguramente, nuestra impotencia de entender esto es debida a nuestra ignorancia. ¿Qué no estamos viendo, o qué de lo que vemos estamos interpretando equívocamente?

culturales, las biológicas y las fisicoquímicas son diferente expresión de un mismo tipo de ley en la que es engastable un comportamiento fundamental del universo. Debe quedar sentado que con esta premisa, cualquier tendencia de la materia no es consecuencia directa ni mucho menos de otra tendencia.

Para explicar esta premisa, valga la siguiente comparación: los diferentes tipos de evolución son manifestaciones de una propiedad fundamental, como la luz y la materia lo son de la energía.

Para el pensamiento de siglos pasados, hubiese resultado del todo inconcebible alguna unión fundamental entre la materia y la luz. ¿A qué atribuir que la materia y la luz sean el mismo ser expresado en diferente forma? ¿Cómo imaginarse —lo que de hecho nosotros somos incapaces de hacer, sino es mediante el abstracto lenguaje de las matemáticas— que las partículas posean propiedades de onda, o viceversa? Sin embargo, así es. La cuestión es que nuestros sentidos, para muchos casos, nos tienen limitados a sólo captar la propiedad que con mayor intensidad se manifiesta, por lo que en ocasiones tendemos en forma tan espontánea como inconsciente a separar como entes individuales a diferentes expresiones de lo mismo.

Así como la luz y la materia son expresiones particulares de la energía, el comportamiento biológico y el fisicoquímico son expresiones de una misma propiedad. ¿De qué propiedad? De la tendencia del universo a ser cerrado e ilimitado en su devenir.

Como cuando al observar un cuanto de luz encontramos que en él predominan las propiedades de onda, así observamos en la actualidad que en el universo la propiedad dominante es el aumento de entropía. Pero podría ser que el universo llegara a adquirir como forma predominante, por el simple hecho de cambiar su *statu*, tal como lo hace la energía, la propiedad alternativa: la disminución de entropía. ¿En qué momento tocará producirse tal revés?: lo dictarán los niveles de organización. Es la evolución biológica y la evolución que a ella le sigue las que están encargadas de edificar las condiciones propicias para que en el universo llegue a regir en lo global la tendencia antientrópica.

Un aspecto medular en esta perspectiva es que el origen de la vida queda como el punto de inflexión entre la degradación entrópica y la reconstrucción entrópica. La tendencia desde las nubes moleculares hasta la Tierra estaría matizada por el aumento de entropía. Desde los sistemas vivos hasta los niveles más altos de organización dominaría la disminución de entropía. El origen de la vida quedaría como el fenómeno crucial para que el universo conserve su calidad de estacionario y, por lo tanto, su condición de autocontenido.

Ahora bien, tal reversión solucionaría el problema a medias. El cambio de tendencia global en el universo nos llevaría a un nuevo proceso lineal: el aumento de entropía. Así que la materia, en algún punto de su devenir, tendría que comenzar a evolucionar hacia el aumento de entropía, hasta que fuera necesario revertir esa tendencia. ¡Por cierta cantidad de tiempo, la tendencia reconstitutiva del *statu* del universo sería lo que nosotros ahora denominamos como la tendencia de degradación!

Es preciso subrayarlo: lo anterior son acendradas especulaciones^{41}. Éstas darían alas a nuestra imaginación para entrever la solución del grave problema que se deriva de concluir que el universo está acotado por límites temporales; sin embargo, también es preciso subrayarlo, esas mismas especulaciones nos pueden construir severos problemas. No obstante, la intención al haber entablado una disertación de tal nivel, ha sido mostrar que lo metafísico, en este caso fundamentado en la segunda ley de la entropía, está lejos de un firme establecimiento; quede también como intención de ello el intento de construir una elucubración en torno a un claro indicio de que la materia es capaz de cambiar de comportamiento entrópico: ese indicio lo representa lo vivo, y, en una forma más aguda, lo científico.

Restaría esperar que sean encontradas evidencias para demostrar la proposición (actualmente indemostrable) de que la materia, en forma neta, puede exhibir un comportamiento disímil al establecido en la segunda ley de la termodinámica. De encontrar esas evidencias, la discusión aquí presentada contaría como una aportación al conocimiento. En el peor de los casos, creo que contribuye enriqueciendo los planteamientos al respecto de uno de los temas de mayor interés para el pensamiento humano: el devenir de la materia y el papel cósmico del hombre.

{41} Aunque también es requerido no perder de vista que tales especulaciones son en buena medida consistentes con los cuestionamientos que ha poco forjamos con respecto al azar y a las leyes de la materia.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]▶ ABELL, G. O. 1984.
Exploration of the Universe. Saunders,
Philadelphia.
- [2]▶ ALFVÉN, H. 1978.
Origin of the Solar System. In: DERMOTT, F.
(Ed.), *The Origin of the Solar System*.
Wiley, New York.
- [3]▶ ——— y G. ARRHENIUS. 1975.
Structure and Evolutionary History of the
Solar System. D. Reidel, Dordrecht.
- [4]▶ ALLEN, C. W. 1973.
Astrophysical Quantities. The Athlone Press,
London.
- [5]▶ AMBARTSUMIAN, V. A. 1957.
Stars of T Tauri and UV Ceti Types and the
Phenomenon of Continuous Emission. In:
HERBIG, G. H. (Ed.), *Non-Stable Stars*. IAU
Symposium No. 3. Cambridge University.
London.
- [6]▶ ———. 1975.
Flare Stars in Star Clusters and
Associations. In: SHERWOOD, V. E. y L. FLAUT
(Eds.), *Variable Stars and Stellar
Evolution*. IAU Symposium No. 67. D. Reidel,
Dordrecht.
- [-7]▶ ——— y L. V. MIRZOYAN. 1982.
An Observational Approach to the Early
Stages of Stellar Evolution. *Ap. and Space
Sci.* 84: 317.
- [8]▶ ANDER, P. y A. J. SONESSA. 1971.
Principles of Chemistry. Collier-Macmillan,
Honk Kong.
- [9]▶ ANDREANI, P., E. VANGIONI-FLAM y J. AUDOUZE. 1988.
Evolution of Fe, R and S Elements in Our
Galaxy. *Institut D'Astrophysique de Paris*.
Pré-Publication No. 241.

- [10]▶ ANGEL, J. R. P. 1987.
Searching for Extrasolar Life with Space Telescopes. *Steward Observatory*. Preprint No. 816.
- [11]▶ ASIMOV, I. 1977.
El Universo. Alianza Editorial, Madrid.
- [12]▶ ————. 1986.
Soles en Explosión. Planeta, Barcelona.
- [13]▶ AUDOUZE, J. 1986.
¿Por Qué Explotan las Supernovas?. En: LEQUEUX, J. (Comp.), *Astrofísica*. Orbis, Barcelona.
- [14]▶ ————, S. DELBOURGO, H. REEVES Y P. SALATI. 1988.
Early Nucleosynthesis, Particle Physics and the Quark-Lithium Connection. *Institut D'Astrophysique de Paris*. Pré-Publication No. 213.
- [15]▶ AZZOPARDI, M., J. LEQUEUX Y É. RETROTROT. 1985.
Las estrellas de Carbono. *Mundo Científico* 5(51): 1053.
- [16]▶ BASHKIN, S. 1965.
The Origin of the Chemical Elements. In: ALLER, L. H. Y D. B. McLAUGHLIN (Eds.), *Stellar Structure. Stars and Stellar Systems*, Vol. VIII. The University of Chicago Press, Chicago.
- [17]▶ BENNET, G. 1988.
The Cosmic Origin of the Elements. *Astronomy* 16(8): 18.
- [18]▶ BERGH, S. VAN DEN 1988.
Life and Death in the Inner Solar System. *Dominion Astrophysical Observatory*. Preprint.
- [19]▶ BERNAL, J. D. 1979.
La Ciencia en la Historia. Nueva Imagen, México.
- [20]▶ BERTOUT, C. 1988.
Observations of Young Stellar Objects. *Institut D'Astrophysique de Paris*. Pré-Publication No. 217.
- [21]▶ BETHE, H. A. Y G. BROWN. 1985.
Así Explota una Supernova. *Investigación y Ciencia* 106: 18.
- [22]▶ BINNEY, J. Y J. SILK. 1978.
Enriched Gas in Clusters and the Dynamics of Galaxies and Clusters: Implications for Theories of Galaxy Formation. *Comments Ap.* 7(5): 139.
- [23]▶ BOESGAARD, A. M. Y G. STEIGMAN. 1985.
Big Bang Nucleosynthesis: Theories and Observations. *Ann. Rev. Astron. Astrophy.*

- 23: 319.
- [241] ▶ BOHIGAS, J. 1985.
Muerte y Transfiguración: El Fin de las Estrellas. En: Rodríguez, L. F. (Comp.), *La Astronomía Contemporánea*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- [251] ▶ ——— y M. ROSADO. 1984.
Explosiones de Supernova y sus Remanentes. En: PEIMBERT, M. (Comp.), *Temas Selectos de Astrofísica*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- [261] ▶ BONDI, H., W. B. BONNOR, R. A. LYTTLETON, y G. J. WHITROW. 1962.
El Origen del Universo. Fondo de Cultura Económica, México.
- [271] ▶ BOSS, A. P. 1985.
Colapso y Formación de Estrellas. *Investigación y Ciencia* 37: 62.
- [281] ▶ BOUQUET, A. 1985.
La Inflación del Universo. *Mundo Científico* 5(59): 610.
- [291] ▶ BROCATO, E., F. MATTEUCCI, I. MAZZITELLI, y A. TORNAMBÈ. 1989.
Synthetic Colours and the Chemical Evolution of Elliptical Galaxies. *European Southern Obs. Sci. Preprint No. 639*.
- [301] ▶ BURNS, J. O. 1986.
Macroestructuras del Universo. *Investigación y Ciencia* 130: 18.
- [311] ▶ BURSTEIN, D. 1979.
Structure and Origin of SO Galaxies. I. Surface Photometry of SO Galaxies. *Ap. J. Suppl.* 41: 435.
- [321] ▶ CAMERON, A.G.W. 1962.
The Formation of the Sun and Planets. *Icarus* 1: 13.
- [331] ▶ ———. 1975.
The Origin and Evolution of the Solar System. *Sci. Amer.* 233(3): 22.
- [341] ▶ ———. 1978.
The Primitive Solar Accretion Disk and the Formation of the Planets. In: DERMOTT, S. F. (Ed.), *The Origin of the Solar System*. Wiley, New York.
- [351] ▶ ———. 1986.
¿Existen los Agujeros Negros? En: LEQUEUX, J. (Comp.), *Astrofísica*. Orbis, Barcelona.
- [361] ▶ ——— y J.W. TRURAN. 1977.
The Supernova Trigger for Formation of the Solar System. *Icarus* 30: 447.

- [371] CANTÓ, J. 1984.
Objetos Herbig-Haro. En: PEIMBERT, M. (Comp.), *Temas Selectos de Astrofísica*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- [381] ———, L. F. RODRÍGUEZ, J. F. BARRAL Y P. CARRAL. 1981.
Carbon Monoxide Observations of R Monocerotis, NGC 2261 and H-H39, the Interstellar Nozzle. *Ap. J.* 244: 102.
- [391] CAPPARELLO, E. Y M. TURATO. 1988.
A New Determination of the Frequency of Supernovae. *Astron. Astrophys.* 190: 10.
- [401] CHANDRASEKHAR, S. 1931.
The Highly Collapsed Configuration of a Stellar Mass. *M.N.R.A.S.* 91: 456.
- [411] CHAPMAN, C. R. 1975.
The Nature of Asteroids. *Sci. Amer.* 232(1): 24.
- [421] CHINCARINI, G., G. VETOLANI Y R. E. SOUZA. 1987.
Large Scale Structures: On their Form and Orientation. *Milano Preprint Series in Astrophysics*. No. 23.
- [431] COHEN, B. I. 1981.
El Descubrimiento Newtoniano de la Gravitación. *Investigación y Ciencia* 56: 111.
- [441] COHEN, M. Y L. V. KUH. 1979.
Observational Studies of Pre-Main-Sequence Evolution. *Ap. J. Suppl.* 41: 743.
- [451] COMINS N. Y L. MARSCHALL. 1987.
How Do Spiral Galaxies Spiral?. *Astronomy* 15(12): 7.
- [461] COPLESTON, F. C. 1960.
El Pensamiento de Santo Tomás de Aquino. Fondo de Cultura Económica, México.
- [471] DAVIES, P. C. W. 1977.
Space and Time in the Modern Universe. Cambridge University Press, London.
- [481] DELSEMME, A. H. 1978.
Comets and the Origin of the Solar System. In: DERMOTT, S. F. (Ed.), *The Origin of the Solar System*. Wiley, New York.
- [491] DEMARET, J. Y J. VAMDERMEULEN. 1982.
Cosmología y Partículas. *Mundo Científico* 2(20): 1212.
- [501] DESCARTES, R. 1986.
El Mundo o Tratado de la Luz. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- [511] DICKSON, F. P. 1968.
La Bóveda de la Noche. Fondo de Cultura Económica, México.

- [52] ▶ DISNEY, M. J. y F. VÉRON. 1977.
Objetos BL Lacertae. *Investigación y Ciencia*
13: 14.
- [53] ▶ DUCROCA, A. 1966.
La Aventura del Cosmos. Labor, Barcelona.
- [54] ▶ DULTZIN-HACYAN, D. Y S. HACYAN. 1984.
Los Agujeros Negros. En: PEIMBERT, M.
(Comp.), *Temas Selectos de Astrofísica*.
Universidad Nacional Autónoma de México,
México.
- [55] ▶ DURING, I. 1987.
Aristóteles. Universidad Nacional Autónoma
de México, México.
- [56] ▶ EDDINGTON, S. A. 1932.
The Internal Constitution of the Stars.
Cambridge University Press, London.
- [57] ▶ ————. 1932.
The Expanding Universe. Cambridge University
Press, London.
- [58] ▶ EINSTEIN, A. 1980.
Mi Visión del Mundo. Tusquets Editores,
Barcelona.
- [59] ▶ ————. 1984.
Sobre la Teoría Especial y General de la
Relatividad. Alianza Editorial, Barcelona.
- [60] ▶ ————. 1985
El Significado de la Relatividad.
Origen-Planeta, México.
- [61] ▶ ELIADE, M. 1964.
The Quest for the Origins of the Religion.
History of Religions 4: 154.
- [62] ▶ ————. 1967.
Cosmogonic Mythe and Sacred History.
Religious Studies 2: 171.
- [63] ▶ FERLET, R. 1984.
El Medio Interestelar Difuso. *Mundo
Científico* 4(32): 34.
- [64] ▶ FERRÍN V. I. R. 1980.
Planetas con Anillos. *Investigación y
Ciencia* 43: 80.
- [65] ▶ FRANCO, J. 1984.
Las Nubes Moleculares y la Formación
Estelar. En: PEIMBERT, M. (Comp.), *Temas
Selectos de Astrofísica*. Universidad
Nacional Autónoma de México, México.
- [66] ▶ ———— y J. CANTÓ. 1985.
El Nacimiento de las Estrellas. En:
RODRÍGUEZ, L. F. (Comp.), *La Astronomía
Contemporánea*. Universidad Nacional Autónoma

- de México, México.
- [67] ▶ GAHATHAKURTA, P., J. H. VAN BORKOM, C. G. KOTANGI y C. BALKOWSKI 1988.
A VLA Survey of the Virgo Clusters Spirals. II. Rotation Curves. *Princeton Obs. Preprints* POP-269.
- [68] ▶ GALE, G. 1982.
El Principio Antrópico. *Investigación y Ciencia* 65: 94.
- [69] ▶ GAMOW, G. 1952.
The Creation of the Universe. The Viking Press, New York.
- [70] ▶ GARCÍA BARRETO, J. A. y L. F. RODRÍGUEZ. 1984.
Fuentes Compactas de Ondas de Radio en Regiones de Formación Estelar. En: PEIMBERT, M. (Comp.), *Temas Selectos de Astrofísica*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- [71] ▶ GATHIER, R. y S. R. POTTASCH. 1988.
Properties of Planetary Nebulae. II. Central Star Evolution. *European Southern Obs. Sci. Preprint* No. 619.
- [72] ▶ GEORGI, H. 1981.
Teoría Unificada de las Partículas Elementales y las Fuerzas. *Investigación y Ciencia* 75: 18.
- [73] ▶ GEROLA, H. y P. E. SEIDEN. 1978.
Stochastic Star Formation and Spiral Structure of Galaxies. *Ap. J.* 223: 129.
- [74] ▶ GOLDBREICH, P. y W. W. WARD. 1973.
The Formation of Planetesimals. *Ap. J.* 183: 1051.
- [75] ▶ GOLDSMITH, D. 1975.
The Quasar Dilemma. *Astronomy* 3(9): 18.
- [76] ▶ GOTT III, R. J. y TRINH X. T. 1978.
Angular Momentum in the Local Group. *Ap. J.* 223: 426.
- [77] ▶ _____, J. E. GUNN, D. N. SCHRAMM y B. M. TINSLEY. 1976.
¿Expansión Indefinida del Universo?. *Investigación y Ciencia* 1: 6.
- [78] ▶ GOUDAS, C. L., G. A. KATSIARIS y A. A. HALIOULIAS. 1978.
Dinamical Considerations of the Origin of the Solar System. In: DERMOTT, S. F. (Ed.), *The Origin of the Solar System*. Wiley, New York.
- [79] ▶ GREGORY, S. A. 1988.
The Structure of the Visible Universe. *Astronomy* 16(4): 42.
- [80] ▶ GROSSMAN, L. y J. W. LARIMER. 1974.
Early Chemical History of the Solar System.

- Rev. Geoph. Spa. Phys. 12(1): 71.
- [81] ▶ GUTH, A. y P. J. STEINHARDT. 1984.
El Universo Inflacionario. *Investigación y Ciencia* 94: 66.
- [82] ▶ HAAR, D. TER. 1950.
Further Studies On the Origin of the Solar System. *Ap. J.* 111: 179.
- [83] ▶ HAMMER, F. 1985.
Galaxias de Aumento. *Mundo Científico* 5(57): 461.
- [84] ▶ HARO, G. 1957.
The Possible Connexion between T Tauri Stars and UV Ceti Stars. In: HERBIG, G. H. (Ed.), *Non-Stable Stars*. IAU Symposium No. 3. Cambridge University, London.
- [85] ▶ ————. 1968.
Flare Stars. In: MIDDLEHURST, B. M. y L. H. ALERN (Eds.), *Stellar Structure, Stars and Stellar Systems*, Vol. VIII. The University of Chicago Press, Chicago.
- [86] ▶ ————. 1976.
An Observational Approach to Stellar Evolution (Flare Stars and Related Objects). *Bol. Inst. Tonantzintla* 2(1): 3. (Un resumen de este artículo puede ser encontrado en SHERWOOD, V. E. y L. PLAUT (Eds.), *Variable Stars and Stellar Evolution*. IAU Symposium No. 67. D. Reidel, Dordrecht).
- [87] ▶ ———— y E. CHAVIRA. 1966.
Flare Stars in Stellar Aggregates of Different Ages. *Vistas in Astron.* 8: 89.
- [88] ▶ HASHIMOTO, M., K. NOMOTO y T. SHIGEYAMA. 1988.
Explosive Nucleosynthesis in SN 1987A. *Inst. D'Astrophysique de Paris*. Pré-Publication No. 254.
- [89] ▶ HAUBOLD, H. J., B. KAENPFER, A. V. SERATOROU y D. D. VOSKRESENSKI. 1987.
A Tentative Approach to the Second Neutrino Burst of SN 1987A. *Inst. D'Astrophysique de Paris*. Pré-Publication.
- [90] ▶ HAWKING, S. 1988.
Historia del Tiempo. Crítica, México.
- [91] ▶ HAYASHI, CH. 1961.
Stellar Evolution in Early Phases of Gravitational Contraction. *Publ. Astron. Soc. Japan.* 13: 450.
- [92] ▶ ————. 1966.
Evolution of Protostars. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 4: 171.

- [93] ▶ _____ Y R. C. CAMERON. 1962.
The Evolution of Massive Stars. III. Hydrogen
Exhaustion through the Onset of
Carbon-Burning. *Ap. J.* 136: 166.
- [94] ▶ HERBIG, G. H. 1957.
On the Nature and Origin of the T Tauri
Stars. In: HERBIG, G. H. (Ed.), *Non-Stable
Stars*. IAU Symposium No. 3. Cambridge
University, London.
- [95] ▶ _____ . 1978.
Some Aspects of Early Stellar Evolution that
May Be Relevant to the Origin of the Solar
System. In: DERMOTT, S. F. (Ed.), *The Origin
of the Solar System*. Wiley, New York.
- [96] ▶ HERBST, W. Y G. E. ASSOUSA. 1979.
Supernovas y Formación de Estrellas.
Investigación y Ciencia 37: 62.
- [97] ▶ HERNDON, J. M. 1975.
Chondrites and Chondrules-Macroscopic
Chemical Aspects of their Origins. In:
DERMOTT, S. F. (Ed.), *The Origin of the
Solar System*. Wiley, New York.
- [98] ▶ HOHLFELD, R. G. Y Y. TERZIAN. 1977.
Multiple Stars and the Number of Habitable
Planets in the Galaxy. *Icarus* 30: 598.
- [99] ▶ HOLLOWELL, D. Y I. IBEN, JR. 1987.
Nucleosynthesis and Mixing in Low and
Intermediate-Mass AGB Stars. *Illinois
Astronomy Preprints IAP 87-18*.
- [100] ▶ HOYLE, F. 1965.
El Universo: Galaxias, Núcleos y Quasares.
Alianza Editorial, Madrid.
- [101] ▶ _____ Y M. SCHWARZSCHILD 1955.
On the Evolution of Type II Stars. *Ap. J.*
Suppl. 2: 1.
- [102] ▶ HUBBLE, E. 1926.
Extra-Galactic Nebulae. *Ap. J.* 64: 321.
- [103] ▶ _____ . 1929.
A Relation between Distance and Radial
Velocity among Extra-Galactic Nebulae. *Proc.
Nat. Acad. Sci.* 15: 168.
- [104] ▶ _____ . 1936.
The Realm of the Nebulae. Yale University
Press, Haven.
- [105] ▶ IBEN, I. Y A. RENZINI. 1983.
Asymptotic Giant Branch Evolution and
Beyond. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 21:
271.
- [106] ▶ INGERSOLL, A. P. 1982.
Júpiter y Saturno. *Investigación y Ciencia*
65: 42.

- [107]▶ JAMES, O. E. 1956.
Historia de las Religiones. Alianza
Editorial, Barcelona.
- [108]▶ JEAGER, W. 1961.
Cristianismo Primitivo y Paldeia Griega.
Fondo de Cultura Económica, México.
- [109]▶ JURA, M. 1976.
Cloud Collapse and Star Formation. *Ast. J.*
81(3): 178.
- [110]▶ KAFATOS, M. y A. MICHALITSIANOS. 1984.
Estrellas Simbióticas. *Investigación y*
Ciencia 96: 58.
- [111]▶ KANIPE, J. 1988.
Quest for the Most Distant Objects in the
Universe. *Astronomy* 16(6): 20.
- [112]▶ KEENE, J., J. A. DAVIDSON, D. A. HARRER, R. H.
HILDEBRAND, D. T. JAFFE, R. F. LOEWENSTEIN, F. J. LOW
Y R. PERNIC. 1983.
Far-Infrared Detection of Low-Luminosity
Star Formation in the Bok Globule B335. *Ap.*
J. 274: L43.
- [113]▶ KIM, D. -W., P. GUHATHAKURTA, J. H. VAN GORKOM, M.
JURA Y G. R. KNAPP. 1988.
HI Observations of the Elliptical Galaxies
NGC2974 and NGC5018. *Princeton Obs.*
Preprints POP-247.
- [114]▶ KNAPP, G. R. Y P. F. BOWERS. 1988.
Small Scale Structures in the Interestellar
Medium. I. Discovery of very Small Molecular
Clouds toward α Orionis. *Princeton*
Obs. Preprints. POP-250.
- [115]▶ KOESTLER, A. 1985.
Kepler. Salvat Editores, Barcelona.
- [116]▶ LEE, T., D. A. PAPANASTASSIOU Y G. J. WASSERBURG.
1976.
Demostration of ^{26}Mg Excess in Allende and
Evidence for ^{26}Al . *Geophys. Res. Lett.* 3:
109.
- [117]▶ LEQUEUX, J. 1982.
Las Estrellas de Gran Masa. *Mundo*
Científico 2(10): 15.
- [118]▶ LIN, C. C., C. YUAN Y F. H. SHU. 1969.
On the Spiral Structures of Disk Galaxies.
III. Comparison with Observations. *Ap. J.*
155: 721.
- [119]▶ LOVETT CLINE, B. 1965.
The Questioners. Physicist and the Quantum
Theory. Thomas Y. Crowell, New York.
- [120]▶ LYTTLETON, R. A. 1972.
On the Formation of Planets from a Solar

- Nebula. *M.N.R.A.S.* 158: 463.
- [121] ▶ MCCREA, W. H. 1978.
The Formation of the Solar System: A Protoplanet Theory. In: DERMOTT, S. F. (Ed.), *The Origin of the Solar System*. Wiley, New York.
- [122] ▶ MEHLIN, T. G. 1960.
Astronomy. John Wiley & Sons, New York.
- [123] ▶ MENDOZA, E. E. 1984.
Estrellas Jóvenes de Brillo Variable. En: PEIMBERT, M. (Comp.), *Temas Selectos de Astrofísica*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- [124] ▶ MOLES VILLAMATE, M. 1981.
Cosmología y Observación. Un Análisis Crítico. *Investigación y Ciencia* 58: 110.
- [125] ▶ MORFILL, G. E. 1988.
Protoplanetary Accretion Disks with Coagulation and Evaporation, *Icarus* 75: 371.
- [126] ▶ MORRISON, D. y T. OWEN. 1988.
The Planetary System. Addison-Wesley. Reading.
- [127] ▶ MÜCKER, J. P. y H. J. HAUBOLD, 1988.
The Formation of Primordial Stars Triggered by the Evolution of Large-scale Density Perturbations. *Max Planck Institut für Physik und Astrophysik MPA* 361.
- [128] ▶ MÜLLER, E., HILLEBRANDT, W., ORIO, HÖFLICH, P., MÖNCHMEYER, R. y B. A. FRYXELL. 1989.
On Mixing and Fragmentation in Supernova Envelopes. *Max Planck Institut for Physik und Astrophysik MPA* 433.
- [129] ▶ NAKAGAWA, Y., CH. HAYASHI y K. NAKAZAWA. 1983.
Accumulation of Planetesimals in the Solar Nebula. *Icarus* 54: 361.
- [130] ▶ NARLIKAR, J. V. 1982.
The Lighter Side of Gravity. World Scientific, Singapore.
- [131] ▶ _____, 1985.
From Black Clouds to Black Holes. World Scientific, Singapore.
- [132] ▶ NERI, L. y C. CHAVARRÍA. 1988.
On the Sizes of T Tauri Stars, and Immediate consequences in their Evolution. Preprint.
- [133] ▶ NOMOTO, K. 1984.
Evolution of Accreting White Dwarfs, Type I Supernova Explosion, and White Dwarf Collapse. In: BANCEL, D. y M. SIGNORE (Eds.), *Problems of Collapse and Numerical Relativity*. D. Reidel, Dordrecht.
- [134] ▶ _____, 1984.
Nucleosynthesis in Type I Supernovae: Carbon

- Deflagration and Helium Detonation Models.
In: CHIOSI, C. y A. RENZINI (Eds.), *Stellar Nucleosynthesis*. D. Reidel, Dordrecht.
- [135]▶ _____ . 1984.
Type II Supernovae from 8-10 M_{\odot} Progenitors.
In: CHIOSI, C. y A. RENZINI (Eds.), *Stellar Nucleosynthesis*. D. Reidel, Dordrecht.
- [136]▶ _____ . 1986.
Accretion-Induced Collapse of White Dwarfs.
Plática invitada al 13o. Symposium de Texas sobre Astrofísica Relativista, Chicago, 14-19 Diciembre 1986.
- [137]▶ _____, M. HASHIMOTO, K. ARAI y K. KAMINISI. 1988.
Stellar Evolution and Nucleosynthesis. *Inst. D'Astrophysique de Paris*. Pré-Publication No. 256.
- [138]▶ _____, T. SHIGEYANA, S. KUMAGI, M. ITOH, J. NISHIMARA, M. HASHIMOTO, H. SAIO y M. KATO. 1989.
Current Understanding of Supernova 1987A.
In: TANAKA, Y. (Ed.), *Physics of Neutron Stars and Black Holes*. Universal Academy Press, Tokyo.
- [139]▶ NORMAN, C. A. y F. PARESCÉ. 1989.
Circumstellar Material Around Nearby Stars: Clues to the Formation of Planetary Systems.
In: WEAVER, H. A. y L. DANLY (Eds.), *The Formation and Evolution of Planetary Systems*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [140]▶ OHTSUKI, K., Y. NAKAGAWA y K. NAKAZAWA. 1988.
Growth of the Earth in Nebular Gas. *Icarus* 75: 552.
- [141]▶ OORT, J. H. 1950.
The Structure of the Cloud of Comets Surrounding the Solar System, and a Hypothesis Concerning its Origin. *Bull. Ast. Inst. Netherlands* XI(408): 91.
- [142]▶ PARKER, B. 1977.
The End of Time. *Astronomy*. 5(5): 7.
- [143]▶ PASACHOFF, J. M. y M. L. KUTNER. 1978.
University of Pennsylvania. *Astronomy*. Saunders, Philadelphia.
- [144]▶ PEIMBERT, M. 1984.
Evolución Química del Universo. En: PEIMBERT, M. (Comp.), *Temas Selectos de Astrofísica*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- [145]▶ PIŞMIŞ, P. 1961.
Outline of a Mechanism for the Emergence of Spiral Arms from the Nucleus of a Galaxy.

- [1461] ▶ _____ . 1963.
 Bol. Obs. Tonantzintla Tacubaya 3(21): 3.
 El Desarrollo de una Estructura Espiral en una Galaxia. Bol. Obs. Tonantzintla Tacubaya. 3(23): 127.
- [1471] ▶ _____ . 1978.
 Remarks On our Presente Knowledge of Masses of Galaxies. Rev. Mexicana Astron. Astrof. 2: 319
- [1481] ▶ _____ . 1984.
 En Torno a los Parámetros Globales y la Evolución Dinámica de las Galaxias. En: PEIMBERT, M. (Comp.), *Temas Selectos de Astrofísica*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- [1491] ▶ POINCARÉ, H. 1984.
 Filosofía de la Ciencia. CONACYT, México.
- [1501] ▶ FOUPEAU, G. 1983.
 Colisión con un Meteorito en el Cretácico. *Mundo Científico* 3(22): 190.
- [1511] ▶ POVEDA, A. 1964.
 A Theoretical Domain for Flare Stars in the H-R Diagram. *Nature* 202(4939): 1319.
- [1521] ▶ PRENTICE, A. J. R. 1978.
 Towards a Modern Laplacian Theory for the Formation of the Solar System. In: DERMOTT, S. F. (Ed.), *The Origin of the Solar System*. Wiley, New York.
- [1531] ▶ QUIGG, C. 1985.
 Partículas y Fuerzas Elementales. *Investigación y Ciencia* 105: 46.
- [1541] ▶ RECILLAS PIŞMIŞ, E. y A. SERRANO P. G. 1985.
 La Vida de las Estrellas. En: RODRÍGUEZ, L. F. (Comp.), *La Astronomía Contemporánea*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- [1551] ▶ REEVES, H. 1986.
 El Origen de los Elementos. En: LEQUEUX, J. (Comp.), *Astrofísica*. Orbis, Barcelona.
- [1561] ▶ _____, P. DELBOURGO-SALVADOR, P. SALATI y J. AUDOUZE. 1989.
 The Quark-Lithium Connection. *Institut D'Astrophysique de Paris*. Pré-Publication No. 214.
- [1571] ▶ RICHTER, O. -G. y M. ROSA. 1988.
 On Supernova Rates and Bursts of Star Formation. *European Southern Obs. Scientific*. Preprint No. 590.
- [1581] ▶ ROTH, M. y M. TAPIA. 1984.
 Observaciones Infrarrojas de Objetos Galácticos. En: PEIMBERT, M. (Comp.), *Temas Selectos de Astrofísica*. Universidad

- Nacional Autónoma de México. México.
- [159] ▶ RUSSELL, B. 1984.
El ABC de la Relatividad. Ariel, México.
- [160] ▶ SABBATA, V. DE Y M. GASPERINI. 1985.
Introduction to the Gravitation. World Scientific, Singapore.
- [161] ▶ SAFRONOV, V.S. 1969.
Evolution of the Protoplanetary Cloud and Formation of the Earth and Planets. Nauka, Moscow. (Publicado para N.A.S.A. y Nat. Sci. Foundation por el Programa de Israel para las Traducciones Científicas. TTF-667, 1972).
- [162] ▶ SAGAN, C. 1975.
The Solar System. *Sci. Amer.* 233(3): 22.
- [163] ▶ SANDAGE, A. R. Y M. SCHWARZSCHILD. 1952.
Inhomogeneous Stellar Models. *Ap. J.* 116: 463.
- [164] ▶ SCHERRER, R. 1988.
From the Cradle of Creation. *Astronomy* 16(2): 40.
- [165] ▶ SCHRAMM, D. Y G. STEIGMAN. 1988.
Particle Accelerators Test Cosmological Theory. *Sci. Amer.* 258(6): 44.
- [166] ▶ SCHWARZSCHILD, M. Y R. HARM. 1962.
Red Giants of Population II. I. *Ap. J.* 136: 150.
- [167] ▶ ————— Y H. SELBERG. 1962.
Red Giants of Population II. II. *Ap. J.* 136: 158.
- [168] ▶ SEARS, R. L. Y R. R. BROWNLEE 1965.
Stellar Evolution and Age Determination. In: ALLER, L. H. Y D. B. McLAUGHLIN (Eds.), *Stellar Structure. Stars and Stellar Systems*, Vol. VIII. The University Chicago Press, Chicago.
- [169] ▶ SERRANO, A. 1981.
Rotación de las Galaxias. *Rev. Mex. Fís.* 27: 361.
- [170] ▶ SHARA, M. M. 1988.
Recent Progress in Understanding the Eruptions of Classical Novae. *Sp. Teles. Sci. Inst. Preprint Series No.* 314.
- [171] ▶ SHARP, N. A., D. N. C. LIN Y S. D. M. WHITE. 1979.
A Test of the Tidal Hypothesis for the Origin of Galactic Angular Momentum. *M. N. R. A. S.* 187: 287.
- [172] ▶ SHKOLOVSKII, I. S. Y C. SAGAN. 1974.
Intelligent Life in the Universe. Dell Publ. Co., New York.

- [173] ▶ STASIŃSKA, G. 1985.
Las Nebulosas Planetarias. *Mundo Científico* 5(52): 1106.
- [174] ▶ STRÖNOREM, B. 1965.
Stellar Models for Main-Sequence Stars and Subdwarfs. In: ALLER, L. H. y D. B. McLAUGHLIN (Eds.), *Stellar Structure. Stars and Stellar Systems*, Vol. VIII. The University Chicago Press. Chicago.
- [175] ▶ STRUVE, D. 1962.
El Universo. Fondo de Cultura Económica. México.
- [176] ▶ SUARD, E. 1987.
La Explosión de las Estrellas. *Mundo Científico* 7(69): 502.
- [177] ▶ SUNYAEV, R. A. y Y. ZEL'DOVICH. 1980.
Microwave Background Radiation as a Probe of the Contemporary Structure and History of Universe. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 18: 537.
- [178] ▶ THIELEMANN, F. -K., K. NOMOTO y K. YOKOI. 1986.
Explosive Nucleosynthesis in Carbon Deflagration Models of Type I Supernovae. *Astron. Astrophys.* 158: 17.
- [179] ▶ THUILLER, P. 1983.
Galileo y la Experimentación. *Mundo Científico* 26: 585.
- [180] ▶ TOOMRE, A. 1969.
Group Velocity of Spiral Waves in Galactic Disks. *Ap. J.* 158: 899.
- [181] ▶ TRINH X. T. 1984.
El Big Bang Hoy. *Mundo Científico* 4(34): 326.
- [182] ▶ ————. 1985.
La Formación del Universo. *Mundo Científico* 5(57): 386.
- [183] ▶ VAUCOULEURS, G. DE. 1963.
Revised Classification of 1500 Bright Galaxies. *Ap. J. Suppl.* 8: 31.
- [184] ▶ VIDAL, J. M. 1973.
El Sistema Solar. Salvat Editores, Barcelona.
- [185] ▶ VIOLA, V. E. 1986.
Nucleosynthesis of the Chemical Elements. *Treb. Soc. Cat. Biol.* 39: 49.
- [186] ▶ ———— y G. J. MATHEWS. 1987.
The Cosmic Synthesis of Lithium, Berillium and Borum. *Sci. Amer.* 256(5): 38
- [187] ▶ WALD, R. M. 1977.
Espacio, Tiempo y Gravitación. La Teoría del Big Bang y los Agujeros Negros. Fondo de Cultura Económica, México.

- [188] ▶ WAGENSBERG, J. 1981.
La Necesidad del Azar. *Mundo Científico* 1(1): 32
- [189] ▶ _____, 1982.
El Azar Creador. *Mundo Científico* 2(12): 318.
- [190] ▶ WEINBERG, S. 1979.
Los Tres Primeros Minutos del Universo. Alianza Editorial, Barcelona.
- [191] ▶ _____, 1981.
La Desintegración del Protón. *Investigación y Ciencia* 59: 16.
- [192] ▶ WETHERILL, G. W. 1980.
Formation of the Terrestrial Planets. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 18: 77
- [193] ▶ _____, 1981.
Formación de la Tierra a partir de Planetesimales. *Investigación y Ciencia* 59: 87.
- [194] ▶ _____, 1985.
Ocurrence of Giant Impacts During the Growth of the Terrestrial Planets. *Science* 228: 877.
- [195] ▶ _____ y L. P. COX. 1985.
The Range of Validity of the Two-Body Approximation in Models of Terrestrial Planet Accumulation. *Icarus* 63: 290.
- [196] ▶ WHITROW, G. J. 1949.
The Structure of the Universe. Hutchinson Co. Publishers, London.
- [197] ▶ WOOD, D. O. S. y E. CHURCHWELL. 1988.
The Morphologies and Physical Properties of UCH_{II} Regions. *Wisconsin Astrophysics Preprints* No. 284.
- [198] ▶ _____, 1988.
Massive Stars Embedded in Molecular Clouds: Their Population and Distribution in the Galaxies. *Wisconsin Astrophysics Preprints* No. 289.
- [199] ▶ YEE C. H. 1971.
Los Pulsares, Radiofaros del Espacio. En: LEQUEUX, J. (Comp.), *Astrofísica*. Orbis, Barcelona.
- [200] ▶ ZEILIK, M. 1976.
From Big Bang to Galaxies. *Astronomy*. 4(4): 7.