

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FISICAS Y NATURALES

DISCURSO INAUGURAL

DEL CURSO 1964-1965

LEIDO EN LA SESION CELEBRADA EL DIA 11 DE NOVIEMBRE DE 1964

POR EL ACADEMICO NUMERARIO

EXCMO. SR. D. ANTONIO COLINO LOPEZ



M A D R I D
DOMICILIO DE LA ACADEMIA
VALVERDE, 22.—TELEFONO 221-25-29
1 9 6 4

Depósito Legal M. 16.154—1964.

TALLERES GRÁFICOS VDA. DE C. BERMÚDEZ. — J. GARCÍA MORATO, 122. — TEL. 233-06-19. — MADRID

EL UNIVERSO

Excmos. Sres. Académicos.

Señoras y Señores :

Al recibir de mis compañeros de Corporación el honroso encargo de la lectura del discurso de esta solemne sesión inaugural, pensé que habría de elegir un tema que siendo de interés para ustedes, pudiera también serme a mí de utilidad. Entonces decidí poner en orden las notas que sobre Cosmología había venido acumulando a lo largo de los últimos años.

Cuando he emprendido la tarea, ordenando, sistematizando y completando lagunas, me he quedado asombrado al considerar el enorme desarrollo que ha tenido la Cosmología en los últimos años : libros, notas y datos de apenas diez o doce años eran ya inservibles por anticuados.

Por obligada honradez intelectual, tengo que confesar que no soy más que un aprendiz de Cosmología, y que si algunas veces le dedico un rato es quizá porque en la moderna Cosmología han irrumpido la Física nuclear y la Electrónica, y, ¿por qué no decirlo?, que cuando en una noche de verano contemplo el cielo rutilante de estrellas y no sé cantar su belleza, me contento con menos.

LA VIDA DE UNA ESTRELLA

Siempre ha sido un gran misterio de dónde sacaba el Sol su energía radiante. Esa energía se calcula que es equivalente a aniquilar cuatro millones de Tn. de materia por segundo, y de la cual tan sólo una pequeña parte, escasamente dos Kg. por segundo, llegan a la Tierra, y estos dos Kg. son suficientes para provocar toda la evaporación de las aguas de los mares, las tormentas, la erosión de los terrenos, el haber creado el carbón mineral, los yacimientos de petróleo, la vida vegetal ; en definitiva : todo el ciclo energético de la Tierra.

La primera vez que se consideró seriamente el cálculo de dónde podría provenir esta energía lo realizó lord Kelvin, en la idea de que la energía gravitatoria de las masas del Sol, al contraerse se iba transformando en energía térmica, que era a su vez radiada. Pero un cálculo casi elemental prueba que con la masa del Sol y con la luminosidad efectiva que tiene, la vida del mismo no podría ser mayor de diez millones de años, y ya en aquel tiempo se sabía que la vida de la Tierra pasaba de mil millones de años.

En realidad, no es hasta 1938 cuando Bethe, mediante los nuevos conocimientos de la Física nuclear, trata de explicar por el proceso que se llama del ciclo del carbono, cómo se fusionan los átomos de H para formar átomos de He, produciéndose así la energía solar, y a partir de tal fecha comienzan los estudios de la evolución de las estrellas.

Los físicos necesitan tres clases distintas de campos de fuerzas para explicar la materia : las fuerzas gravitatorias, las fuerzas eléctricas y las fuerzas nucleares. Las fuerzas gravitatorias son débiles, pero se ejercen entre todas las masas ; las fuerzas eléc-

tricas son mucho más fuertes, y se ejercen entre las cargas eléctricas; las fuerzas nucleares son las más intensas, pero de muy corto alcance. Hechos empíricos, más o menos explicados teóricamente, son que la energía de enlace es de 7 Mev por nucleón de He; 7,5 por nucleón de uranio, pasando por un máximo de 8,6 Mev para el hierro, que es, según esto, el elemento más estable de la Naturaleza.

¿Por qué entonces este vaso de agua no se transforma instantáneamente en un bloque de hierro? Porque para unirse dos núcleos de H, dos protones necesitan vencer la repulsión o barrera eléctrica de sus cargas eléctricas, y solamente pueden hacerlo cuando su energía cinética sea equivalente a como si tuviesen una temperatura superior a unos millones de grados; pero esta barrera se hace tanto mayor cuanto más cargas eléctricas tiene el núcleo; así, para el He ya se necesita superar los cien millones de grados, y para el hierro es necesario que esté por encima de los miles de millones de grados.

Esas enormes temperaturas sabían los físicos que eran necesarias para que pudiese haber fusión de elementos, cosa que Eddington, en sus cálculos de los interiores de las estrellas, nunca pudo suponer, y por lo cual les dijo que si no les satisfacían las temperaturas que él podía calcular, que se fuesen y buscasen un lugar más cálido.

Hagamos ahora la sintética biografía de una estrella. ¿Cómo nace? Una gran nube diluida y extensa de H sufre una pequeña condensación; entonces la acción de la gravedad por el aumento de las densidades y la disminución de las distancias provoca un proceso de contracción que va aumentando, transformándose la energía gravitatoria en energía térmica del gas; pero como un sencillo cálculo demuestra que solamente la mitad de la energía gravitatoria se puede acumular en energía térmica, la otra mitad tiene que ser radiada, y ésta es la razón de que se regularice la contracción de la nube gaseosa a compás de la energía radiada. Este es el proceso de contracción de Kelvin y dura unos millones de años. La temperatura del centro de la estrella va subiendo hasta llegar a los millones de grados, y en este momento se inicia la

combustión de los átomos de H, pasando por fusión a átomos de He ; se ha encendido un horno nuclear y acaba de nacer una verdadera estrella.

Un cálculo elemental pone de manifiesto que la energía capaz de obtener del Sol por fusión de sus átomos de H en átomos de He, manteniendo la radiación actual, le aseguraría una vida de decenas de miles de millones de años. Si el material primitivo de una estrella es solamente H, se comprende fácilmente que toda la historia de una estrella dependa simplemente de dos parámetros : su masa y el tiempo desde que su horno nuclear se puso en funcionamiento, es decir, sus características de radios, luminosidades, temperaturas externas, temperaturas internas, etc., serán solamente funciones de su masa y del tiempo transcurrido.

Una estrella es un extraordinario reactor nuclear, sorprendente por la facilidad y suavidad de su funcionamiento. En él están en juego tres energías, nucleares, térmicas y gravitatorias, y todas ellas reguladas en su marcha equilibrada por la necesidad que tiene de radiar, y esta radiación es la que obliga a que el proceso de fusión del H en He tenga que suceder paulatinamente a lo largo de miles de millones de años. Así, para el Sol este tiempo de funcionamiento del reactor nuclear regulado es, por lo menos, de diez mil millones de años.

Como es natural, la combustión de H en una estrella se inicia en su centro ; poco a poco va quemándose el H de sus interiores hasta que llega un momento en que se forma en el centro de la estrella un núcleo de He. Esto sucede, según diferentes cálculos, cuando la estrella ha consumido aproximadamente un 12 por 100 de su H inicial ; en tal momento, la estrella pasa a un período de madurez con su núcleo de He isotérmico a alta temperatura, rodeado de una envoltente de H y la combustión de H se realiza en la superficie de separación del núcleo de He con la envoltente de H. En el núcleo, la cantidad de He aumenta, la estrella se va hinchando, la temperatura exterior disminuye, y así es como se forman las llamadas estrellas rojas gigantes, y este proceso desde que deja su edad adulta hasta transformarse en una estrella roja gigante, se calcula que es, aproximadamente, del orden de un centenar de millones de años.

El gran avance de los tiempos modernos en astrofísica, aparte de un mayor conocimiento de las reacciones nucleares, es debido al haber considerado modelos que no son homogéneos en su estructura, que complican extraordinariamente los cálculos, pero que han sido afortunadamente realizables mediante los calculadores electrónicos.

En el centro de la estrella, el núcleo de He sigue subiendo su temperatura, hasta el momento crítico que por rebasar el centenar de millones de grados se inicia la llamada reacción de Salpeter, que es la unión de tres átomos de He para producir un átomo de carbono **12**.

La subida de la temperatura central de la estrella va posibilitando sucesivas reacciones; así, de un modo directo o indirecto, se forman núcleos en los que se van agregando partículas de He.

Un tipo de reacción que ha tenido una gran importancia en la explicación de la formación de los elementos es la reacción de Cameron, que produce flujos de neutrones con ciertas reacciones nucleares posibles con centenares de millones de grados. Estos flujos de neutrones al bombardear los núcleos existentes forman escalonadamente núcleos de mayor número de nucleones.

A los tres mil millones de grados, las barreras eléctricas de los núcleos similares al hierro han perdido su efectividad, y, por tanto, la distribución de elementos a estas temperaturas se hace ya según un equilibrio termodinámico. Esto explica por qué en las curvas de abundancia de los elementos en el Universo, el hierro presenta un pico característico.

Todas estas sucesivas reacciones tan complicadas se producen muy aceleradamente en la vida de la estrella; hay que tener presente que el paso del He a hierro, produce solamente un **20** por **100** de la energía de la fusión del H en He.

Pudiera parecer todo lo expuesto, como un fácil mentir de las estrellas, ya que si las temperaturas máximas conseguidas en los laboratorios terrestres son de miles de grados, constituye una tremenda extrapolación, casi sin valor, trasladar nuestras teorías y experiencias a los millones o miles de millones de grados, como estamos suponiendo en los centros de las estrellas. Sin embargo, hemos de tener presente diversas circunstancias; una de ellas es,

que si bien es verdad que en la Tierra no se pueden conseguir dichas temperaturas, la energía cinética de las partículas correspondiente a tales temperaturas, son completamente asequibles en los laboratorios terrestres, y, por tanto, se pueden realizar experiencias y medir características físicas de estas reacciones, bien sea de un modo directo o indirecto. La reacción de Salpeter es un ejemplo típico; sabemos que es la unión de tres núcleos de He en uno de carbono 12. Evidentemente, la probabilidad de que los tres núcleos se unan en un solo encuentro es pequeñísima, no hay que considerarla; la verdadera reacción es que se unen dos He formando berilio 8, y seguidamente de dos pasan a tres; pero aquí surge una enorme dificultad, que no solamente han sufrido estas teorías sino otras teorías anteriores de formación de elementos, y es debido a que el berilio 8 es completamente inestable. Por lo tanto, quiere decir que la cantidad de berilio 8 que hay en el centro de una estrella es ínfima. ¿Cómo entonces puede encaenarse la sucesiva formación de los elementos? Pues tiene que ser porque la reacción siguiente del paso de dos a tres alfas tenga una gran probabilidad. Y esto que era necesario para poder mantener estas teorías, condujo a predecir, por Hoyle, un fenómeno de resonancia en el C^{12} , que, efectivamente, se ha confirmado experimentalmente.

Qué reacciones de los tipos citados están ocurriendo actualmente en las estrellas lo pone de manifiesto, por ejemplo, la existencia del Tecnicio, cuya vida media es doscientos mil años, y, por tanto, su presencia indica que se está formando permanentemente en los núcleos de las estrellas.

Estas hipótesis sobre las estructuras de las estrellas y el conocimiento acumulado sobre las reacciones nucleares han permitido establecer una teoría de nucleogénesis, es decir, cómo se forman en el Universo los diferentes núcleos, teoría que fue publicada como un cuerpo doctrinal en 1957 en la revista «The Modern Physics» por diversos autores. Este trabajo, notable por ser tan completo, aun siendo un primer ensayo, ha tenido que ser aceptado por todos los astrofísicos que pueden discutir sus detalles, pero no sus principios básicos. El hecho fundamental para la nucleogénesis es que las estrellas son hornos nucleares que par-

tiendo del elemento primitivo H, sintetizan todos los demás núcleos. Una medida de la corrección física de tales teorías es no solamente explicar la formación de los diferentes núcleos, sino además calcular la proporción de cada uno en el Universo.

Si continuamos teorizando, siguiendo el repertorio de las reacciones nucleares que son factibles, según se va elevando la temperatura central de la estrella, llegamos a una sorprendente consecuencia. El centro de una estrella a tres mil millones de grados estará formado por el hierro como núcleo más estable ; pero si se eleva la temperatura por encima de los tres mil millones de grados, entonces como la energía de ligazón de los núcleos de He para pasar a los de hierro es pequeña, al elevarse la temperatura se produce una descomposición, y, por tanto, a ocho mil millones de grados, la mayor parte de los núcleos de hierro vuelven a ser núcleos de He ; pero observemos que aquí se presenta completamente una nueva situación en la vida de la estrella. Hasta ahora todas las reacciones nucleares producían energía ; esta reacción es inversa, absorbe energía ; por tanto, el mecanismo de equilibrio con la energía gravitatoria ha desaparecido. La energía gravitatoria de contracción transforma núcleos de hierro en He ; pero como se absorbe energía, permite mayor contracción, es decir, en definitiva, se produce una implosión en la estrella, y posiblemente esta implosión lleva las capas exteriores de elementos no pesados, y aun de residuos de H a una explosión nuclear gigante, violentísima, colossal, aun para la propia Naturaleza.

Pero estos tremendos fenómenos, ¿son frutos de nuestra imaginación u ocurren realmente en la Naturaleza ? Se cree que sí suceden, y se han identificado con el fenómeno de la génesis de las supernovas. Las supernovas son estrellas que bruscamente aparecen en el cielo con luminosidades que son miles de millones mayores que la del Sol. Estas estrellas han sido a veces visibles en el cielo a simple vista y a la luz del día, y después su luz va decayendo, y es curioso y notable, todas con el mismo período de unos cincuenta y seis días de vida mitad.

Ha habido tres supernovas célebres en la historia de la Humanidad : una el 4 de julio de 1054, que los chinos recogieron en sus

anales ; otra que registró Tico Brahe en el año 1572, y por fin otra que también asombró a Kepler (1604). La de los chinos del año 1054, que curiosamente no fue registrada por los occidentales, fue vuelta a localizar en el año 1920, pues se observó en la nebulosa Escorpión que las velocidades actuales de sus diferentes partes en expansión provienen de la explosión de un núcleo de hace novecientos años. El hecho de que en la bomba «H» de Bikini, de noviembre de 1952, se formase el Cf. 254 con cincuenta y seis días de vida media, da la evidencia de que las supernovas son gigantescas explosiones nucleares. Hay que tener presente que no hay ningún otro elemento de fisión espontánea cuya vida media esté entre diez días y diez mil años.

Las supernovas pusieron de manifiesto a los antiguos astrónomos, que aún en el firmamento las estrellas no tienen ese carácter inalterable y perenne que siempre se les había atribuido.

La vejez de una estrella

En Sirio, que está bastante cerca de nosotros, ocho años luz, es fácil observar sus movimientos propios sobre el fondo del firmamento, y se percibió que tenía, además de un movimiento regular, una especie de zizagueo, que fue fácil de explicar achacándolo a un compañero. Efectivamente, se trataba de una estrella de igual masa, pero de tan poca luminosidad, que no es visible a ojo desnudo, y que cuando se la localizó con el telescopio se aceptó que era una estrella semi-apagada. Hubo, sin embargo, alguien que tuvo la curiosidad de hacer el análisis espectral del compañero de Sirio, encontrándose con la sorpresa de que la temperatura superficial era diez mil grados, muy por encima aún a la del propio Sirio, y entonces es cuando se desencadenó una serie de raciocinios sorprendentes ; si la luminosidad del compañero es tan baja y su temperatura de radiación tan alta, quiere decir que tiene muy poca superficie, pero si tiene muy poca superficie es que tiene muy poco volumen ($R = 0,02 R_{\odot}$), pero como su masa es equivalente a la del Sol, se llega a la conclusión de que su densidad es

cincuenta mil veces la densidad del agua, es decir, una locomotora cabría en una caja de zapatos.

Este tipo de estrellas se llaman enanas blancas ; blancas por su brillante luz, enanas por su pequeño tamaño. Existe la teoría física de este estado especial de la materia, el estado degenerado. Se funda en la vieja impenetrabilidad de la materia y en su moderna versión, el principio de exclusión de Pauling : en cada estado cuántico sólo cabe un electrón, como un hotel está lleno cuando en cada habitación hay un solo huésped. En este principio general no sólo se basa la teoría de la constitución del átomo, sino además la de sistemas más complejos, como son los sólidos ; la única y exclusiva teoría de los metales y semiconductores y hasta la muy reciente para explicar el misterio impenetrable, pero extraordinariamente sugestivo, de la superconductividad. Es por consiguiente una extrapolación atrevida, pero no sin fundamento, aplicar el mismo principio al interior de las estrellas. La materia en tal estado tiene propiedades muy especiales ; por ejemplo, la presión no depende de la temperatura del gas, y de su estudio se desprenden consecuencias que tienen un valor extraordinario para la Astrofísica. Si se calcula el radio de la esfera de masa M , se llega a un resultado sorprendente : que hay un colapso gravitatorio de la materia cuando la masa sobrepasa el 40 por 100 de la masa del Sol, y esto es una consecuencia teórica que restringe el tamaño y la masa de las enanas blancas, fácil de comprobar experimentalmente.

Una estrella enana blanca ha consumido ya todas sus posibilidades energéticas nucleares, casi todas sus posibilidades gravitatorias y únicamente le queda la energía térmica almacenada. La ventaja que goza una enana blanca es tener una superficie radiante muy pequeña y, por consiguiente, su proceso de enfriamiento en los espacios siderales es muy lento, casi de centenares de millones de años ; y poco a poco al enfriarse se convierte en el cadáver de una estrella.

En resumen, en la vida de una estrella pueden reconocerse los siguientes períodos :

1) El inicial de concentración de su masa hasta el encendido central del horno nuclear, unos millones de años.

2) La combustión de los átomos de H transformándose en átomos de He hasta la formación de un núcleo central de He. Este es el período más largo de su vida, alrededor de diez mil millones de años.

3) El hinchamiento de su núcleo y su transformación en estrella roja gigante, unas cuantas decenas de millones de años.

4) Un período nuclear agitadísimo de grandes transformaciones, pero en que las energías en juego son muy pequeñas.

5) La posible o no posible transformación en supernova y por fin la última fase, la de enana blanca.

Si nos referimos a la evolución de nuestro astro rey, parece que está quemando H desde hace unos seis mil millones de años y que le quedan otros cinco mil millones de años antes de pasar al siguiente régimen, a partir del cual empezará a hincharse, transformándose en una voluminosa estrella roja, de treinta veces el diámetro actual y de luminosidad también extraordinaria. Si alguien quisiera tener una visión escatológica, se podría decir que será el Infierno para la Tierra, después se contraerá y terminará su vida muy posiblemente sin pasar por el estado de supernova, ya que su masa es inferior a la crítica, y terminará como una enana blanca.

Es curioso que, según los cálculos actuales, si el Sol tuviese un 10 por 100 más de masa, en este momento estaría ya en la época de expansión y sería imposible la vida en la Tierra.

¿Cómo coordinar estas teorías de una gran riqueza imaginativa, biológica, con nuestros reducidos y fragmentarios conocimientos experimentales? Hasta hace pocos años era una especulación gratuita e inútil divagar científicamente sobre la evolución de las estrellas, y su dificultad se comprende, pues mientras los tiempos de evolución de las estrellas hemos visto son de millones o de miles de millones de años, la duración de la vida, no de un astrónomo, sino la de toda la humanidad astronómica ha sido de unos centenares de años, es decir, nuestra visión del universo es

casi una foto instantánea ¿Cómo saber entonces si los diferentes tipos de estrellas que observamos son evolución de un mismo tipo y cuál es el orden de sucesión en esta evolución? Este grandioso misterio de la evolución de las estrellas parece haberse resuelto por lo menos en una gran parte. El hecho fundamental es haber reconocido que hay agrupaciones de estrellas, llamadas cúmulos, que puede suponerse que han tenido un origen común, y como las estrellas más másicas tienen las reacciones nucleares más aceleradas, pasa a ser la ordenación por masas equivalente, hasta cierto punto, a la ordenación de tipos por edades. En un cúmulo de cierta edad hay un reparto de estrellas en sus diferentes períodos de evolución de acuerdo con sus masas, por lo tanto el reajuste de la distribución teórica a los datos observables permite hallar la edad del cúmulo y hasta qué punto la descripción teórica se ajusta a la real.

Así se obtiene que los cúmulos globulares tienen edades de más de miles de millones de años, mientras que los galácticos son más jóvenes, de sólo millones de años. Si se ha podido reconstruir la vida individual de una estrella o su colectiva en un cúmulo, puede haber esperanzas de que se llegue a la reconstrucción de la vida de una galaxia, y esto es uno de los caminos más prometedores que actualmente se han emprendido.

Aunque los avances han sido extraordinarios, quedan muchas cuestiones que son fundamentales y que, sin embargo, no se vislumbra su respuesta. Hablemos, por ejemplo, de las cefeidas; se llaman cefeidas a ciertos tipos de estrellas variables y muy brillantes, cuya luminosidad varía periódicamente. Su importancia estriba no sólo en ser un tipo de características más o menos especiales, sino por una particularidad sensacional que descubrió Miss Leavitt en 1912, cuando estudiaba las cefeidas de la nebulosa de Magallanes, pues llegó a la conclusión de que la luminosidad era una función directa del período, por lo que inmediatamente diversos astrónomos vislumbraron la posibilidad de un nuevo método de medir distancias. Identificada una cefeida era fácil medir su período y conocer su luminosidad absoluta, la que comparada

con la percibida sería una medida de su distancia. Este método de medir distancias es impresionante por su relativa sencillez y seguridad.

Volviendo al tema de la evolución, nos encontramos que todavía no se sabe qué tipos de estrellas y en qué circunstancias se transforman en variables y cuál es la verdadera causa de su pulsación energética.

LAS DOS VENTANAS AL UNIVERSO

Nuestro conocimiento del Universo lo obtenemos contemplándole a través de dos ventanas : la clásica o de la luz natural, muy elaborada a lo largo de los siglos, hoy con los enormes y modernos telescopios, los análisis espectrográficos, la fotografía en color, etc., y la nueva, que apenas existe hace veinte años, la de las radioondas, que ha producido, sin embargo, fecundísimos resultados trabajando en colaboración con la anterior.

Nuestra visión ingenua del firmamento es una bóveda tachonada de relucientes estrellas, que gira maravillosa y armónicamente alrededor nuestro. Al ir avanzando en los conocimientos astronómicos, reconocemos que es más fácil explicar lo que sucede si suponemos que es nuestra Tierra la que gira diariamente y que estamos contemplando el grandioso espectáculo en un lugar privilegiado, lugar que posteriormente se cede al Sol como centro del Universo.

El total de las seis mil estrellas visibles a ojo desnudo (a una máxima distancia de cien años luz), aumenta enormemente al descubrir y perfeccionar los telescopios, y sobre todo se deduce la idea de profundidad : que estamos inmersos en un gigantesco enjambre de estrellas. Herschel con sus ideas astrofísicas y Kant con sus ideas metafísicas se preguntan si no habrá en el espacio infinito multiplicidad de islas-universo como en el que estamos nosotros inmersos. En 1917 ya hay ideas concretas de la forma y de las dimensiones que puede tener nuestra Isla-Universo, la «Vía Láctea» en latín, la «Galaxia» en griego. El descubrimiento de Miss Leavitt (1912) de las relaciones entre las luminosidades absolutas y los períodos de las estrellas variables, contribuye a que puedan fijarse distancias y formas. Nuestra «Vía Láctea» es un disco formado por miles de millones de estrellas, por poivo-

tenue y gases. Según se van refinando las medidas hemos de humillarnos abandonando no sólo nuestro geocentrismo, sino aún el heliocentrismo y pasar a estar en un arrabal de la Vía Láctea. Las dimensiones aceptadas para nuestro disco son de cien mil años-luz de diámetro y un espesor central de quince mil años-luz y cien mil millones de estrellas.

En 1924 el nuevo telescopio del monte Wilson permitió obtener por primera vez la foto maravillosa de la nébula Andrómeda. Hubble identifica unas estrellas cefeidas que permiten medir la distancia y, por consiguiente, los tamaños, luminosidades, etcétera, de sus diferentes partes, y por primera vez se ha identificado un objeto metagaláxico, más allá de nuestra isla-universo. Sus dimensiones, aunque estimadas al principio incorrectamente, nos ponen de manifiesto que es similar a nuestra galaxia y, por consiguiente, es otra Isla-Universo.

La galaxia Andrómeda es el objeto más lejano que podemos ver a simple vista, como una pequeña y tenue nebulosidad. Los astrónomos pueden dar gracias a Dios que habiéndola colocado a una distancia prudencial, a un millón de años-luz, sea a su vez una réplica de nuestra propia galaxia. Por esta razón ha contribuido extraordinariamente a ampliar y a hacer asequible muchos conocimientos cosmológicos que nos eran imposible de percibir en nuestra propia galaxia, por estar en ella inmersos.

Una vez descubierta la existencia del espacio metagaláxico, es cuestión de telescopios, técnica y trabajo ir a la gran aventura exploradora de los años 30, del descubrimiento de otras islas-universo. Nuestra isla-universo no es más que una entre cien millones. Tirando por el atajo que acorte nuestro tiempo, aunque nos dejemos de lado las bellas e interesantes incidencias que esmalan los descubrimientos científicos, exponamos las ideas actuales acerca de la estructura de la totalidad del Universo :

1.º En el espacio infinito están repartidos al azar racimos de galaxias. Cada racimo puede tener de cien a mil galaxias. Con el telescopio de 200'' pueden registrarse unos cien millones de galaxias.

2.º La distancia media entre estos racimos es de unos veinte millones de años-luz. No parece haber grupos de racimos, como si la gravedad no actuase entre ellos o no se propagase a esas distancias.

3.º Las galaxias pueden ser esféricas, elípticas o espirales ; sus masas, como media, son del orden de 10^{11} masas solares ; sus radios de treinta mil años-luz, y sus períodos de giro de unos cien millones de años. Así, nuestro sistema solar da una vuelta completa alrededor del centro de nuestra galaxia cada doscientos millones de años. Hay diversas teorías de la evolución de las galaxias, es decir, en realidad no hay ninguna que sea indiscutible. Si ordena usted los diferentes tipos en línea como hizo Hubble, hay astrofísicos que dicen que la evolución va de la izquierda a la derecha, y otros que opinan que va de la derecha a la izquierda, aunque haya otros que afirmen que no hay tal evolución entre tipos diferentes. Ahora que ya se conoce bastante sobre la evolución de las estrellas, elementos componentes de las galaxias quizás se pueda estudiar cómo evolucionan las mismas, pues por sus estrellas podrá conocerse la edad de sus diferentes partes.

4.º La distancia entre las galaxias es alrededor de un millón de años ; una galaxia tiene 10^{10} estrellas, y éstas están entre sí, generalmente, enormemente separadas ; así de la Tierra a la Luna hay un segundo de distancia, al Sol cuatro minutos ; sin embargo, a la estrella más próxima estamos a cuatro años-luz.

LA SEGUNDA VENTANA

Radioastronomía

Un ingeniero electrónico que se llamaba Jansky estaba en 1931 estudiando los ruidos que perturbaban a los radio-receptores, con el fin de aumentar su sensibilidad y aumentar las distancias de las radiocomunicaciones, y descubrió que había una clase de ruido que después de muchos trabajos localizó que provenía del exterior de los cielos, por la parte del centro de nuestra galaxia. En 1941 otro ingeniero electrónico, conociendo las experiencias

de Jansky publicadas en el *The Bell System*, realizó por su cuenta una serie de ensayos y descubrió que había puntos brillantes de radio en el cielo. Los astrónomos realmente no prestaron ninguna atención a estos resultados experimentales, porque consideraban que dada la enorme desproporción que hay entre las longitudes de onda de la luz y de la radio, cualquier radio-telescopio sería un instrumento muy burdo que no diría más que lo que ya decían los refinados telescopios ópticos. No se sabe qué hubiese acaecido con la radioastronomía si no hubiese sido por el incidente que llamamos Segunda Guerra Mundial.

Los ingleses tenían su red de radares para detectar los aviones alemanes a grandes distancias, y los alemanes también tenían los artificios para cegar los radares. En febrero de 1942, durante dos días fue tan intenso el bloqueo de los radares ingleses, que les obligó a sospechar que se iba a desencadenar una ofensiva aérea desmesurada fuera de todo lo que había sido conocido hasta entonces. Cundió la alarma, pero pasaron los días y nada sucedió; un cierto tiempo después se descubrió que los alemanes no habían tenido nada que ver con lo que había sucedido en los radares ingleses; era el Sol el que había tenido una actividad extraordinaria en aquellos días. A partir de entonces se supo ya separar lo que era de origen cósmico de lo que era terrestre, pero así había quedado de manifiesto la importancia que tenían los fenómenos cósmicos en las señales recibidas.

Dado el avance científico que tuvo la Electrónica durante la guerra, una de las actividades posteriores de ella es la radioastronomía. En 1947 se localizan ya dos fuentes radio muy intensas en los cielos; una que es de fácil identificación, la supernova de los chinos, y otra que pasa sin identificar varios años. En un principio se creyó que todas las fuentes radio eran de objetos muy próximos, cercanos a la Tierra. La nebulosa Escorpión es fácil de identificar, y su mismo origen como supernova pone de manifiesto algo singular, pero a pesar de todo hay una desproporción tremenda entre su potencia radio y su potencia luminosa, y pasa a ser un verdadero misterio esta terrible desproporción. Mientras.

tanto se realiza otro descubrimiento aún más sensacional : la otra fuente intensa no se puede identificar con cualquier objeto astronómico óptico. Hay que decir que el poder resolvente de los radiotelescopios es muy pequeño, y por lo tanto la zona que marcan en el cielo es muy amplia ; sin embargo, una mejora realizada en los métodos de radiolocalización permite al astrónomo Baade en 1954 localizar la fuente, que son dos nebulosidades en colisión (la llamada Cisne A). Minkosky efectúa el análisis espectral de su luz y se encuentra con un efecto Doppler, equivalente a una distancia de doscientos millones de años-luz, que después se confirma que son setecientos, y, por lo tanto, aquellas pequeñas nebulosidades no son más que dos galaxias en colisión. Pero aún ahora el misterio se hace mayor : la potencia que tiene que radiar es de 10^{34} kw., cifras que aún para los astrónomos son superastronómicas.

Las imaginaciones se desatan, y se habla de la colisión de una galaxia contra una antigalaxia, es decir, el aniquilamiento de la materia contra la antimateria. Afortunadamente, por las mismas fechas surge una explicación menos tremendista: el ruso Shkloosky establece la hipótesis de que tal radiación debe ser debida al efecto Sincrotrón, por primera vez puesto de manifiesto en el acelerador de partículas de la General Electric.

Cualquier aprendiz electrónico conoce que un electrón guiado por un campo magnético tiene que radiar, pero nadie cree que la Madre Naturaleza se haya provisto de tan gigantescos aceleradores de partículas. Pero la dirección del campo magnético introduce una dirección privilegiada, y por consiguiente la radiación tiene que ser polarizada : un contraste experimental para la hipótesis de Shkloosky. De esta prueba sale tan victoriosa que hoy día se acepta que la mayor parte de las fuentes de radiación cósmicas son producidas por el efecto Sincrotrón.

El misterio de la radio-radiación retrocede, pues ya sabemos cómo se origina, pero no sabemos cómo la Naturaleza construye sus aceleradores de partículas y muchos menos de dónde saca tales energías, pues aún las energías nucleares andan escasas.

¿Una radio galaxia es una explosión por simpatía de una cadena de supernovas?

El descubrimiento de la Cisne A pone de manifiesto la importancia trascendental de la radioastronomía para entender el Universo. Aun con los imperfectos radiotelescopios de aquel momento la Cisne A hubiera sido descubierta, aunque hubiera estado a una distancia de ocho mil millones de años-luz, fuera del mundo visible de los telescopios y justamente en la zona crítica para cualquier teoría cosmológica en donde el Universo esconde sus secretos. Pero la radioastronomía no ha parado de dar grandes sorpresas a los astrónomos. Durante el año 1963 ha dado una tan tremenda, que todavía dura la conmoción. Las estrellas tienen tan poca radio-radiación que el Sol, por su proximidad, es la única verdadera radio estrella detectada ; por esta razón cuando se descubrieron diferentes fuentes de radiación que podían identificarse como estrellas, pareció interesante su estudio. Las estrellas identificadas eran de magnitud 13, vulgares y visibles aun para los telescopios de los aficionados, y supuestas de pertenecer a nuestra galaxia ; sin embargo, algo especial habían de tener cuando radiaban.

El primer paso fundamental era el análisis espectral de su luz, y es aquí cuando empezaron las sorpresas, pues no eran identificables sus líneas con las de los elementos conocidos. Solamente después de muchas tentativas de asimilarle a diferentes elementos en especiales circunstancias, alguien se atrevió a suponer que las líneas tenían un enorme corrimiento Doppler, el que Hubble descubrió en el Universo en expansión. El corrimiento significa distancia, y por la distancia que había que atribuir a tales estrellas eran las más lejanas del Universo, siete mil millones de años-luz.

El límite actualmente admitido es de trece mil millones de años-luz, pero si brillan como estrellas cercanas y están a tan enormes distancias, es que su luminosidad real es equivalente a la de billones de soles y centenares de galaxias, y están fuera de toda concepción e imaginación hasta ahora posibles. Pero ¿qué son estas colosales radio estrellas? ¿Galaxias esféricas en formación? ¿Algo por

lo que se penetrará en los misterios cosmológicos hasta ahora desconocidos? Esta pregunta no es vana literatura, sino que viene suscitada por muchas cuestiones como ésta, por ejemplo: Supongamos una sola masa compacta de muchos millones de soles. Entonces su campo gravitatorio sería enorme, el efecto Doppler tan grande que no podría escaparse ningún fotón y, por lo tanto, este objeto a fuerza de ser grande distorsionaría de tal modo el espacio que le rodease que se transformaría en invisible y solamente detectable por la deformación del espacio cercano. Esto es por lo menos lo que dice la teoría de la gravitación de Einstein, a lo que se añadiría otro efecto no menos importante: la terrible implosión que sucedería por su colapso gravitatorio.

Como electrónico no puedo evitar hablarles de una de las más brillantes realizaciones en radioastronomía. Van de Hulst, joven holandés, se le ocurrió en 1944, durante la guerra, que podía ser detectable la emisión producida por el paso entre los dos estados energéticos más bajos del átomo H, cuando los espines del protón y electrón son paralelos y pasan a ser antiparalelos, lo que produce un fotón de 21,1 cm. de longitud de onda, es decir, en el dominio que hoy llamamos de las microondas. Pero si se calcula la potencia que podría llegar a la Tierra de todas las fuentes cósmicas, queda uno decepcionado, pues es sólo de unos cuantos vatios (de 2 a 4). Sólo merced a los grandes adelantos habidos en la técnica de las microondas y los nuevos dispositivos de la electrónica cuántica, como el Masser, han permitido que tan insignificantes energías sean detectables y medibles, la primera vez en 1951.

Démonos cuenta de las extraordinarias posibilidades que ofrece este «canto» del H repartido por el Universo.

La variación de su canto o susurro nos delata por su efecto Doppler, las velocidades de las regiones en que se encuentra y por su intensidad, la cantidad en que abunda, permitiendo así levantar mapas de los movimientos y densidades de los objetos espaciales. En menos de diez años hemos aprendido acerca de la estructura, del detalle y de los movimientos de nuestra galaxia,

mucho más que en los centenares de años que existe la astronomía convencional. La figura de la galaxia Andrómeda es una buena imagen de la nuestra propia, aunque la nuestra tiene ciertas peculiaridades como son anillos centrales de gases que giran a grandes velocidades (270 Km. por segundo), a la vez que se expansionan, poniendo de manifiesto en las galaxias la existencia de redes de tubos magnéticos en los que circulan grandes flujos de iones libres.

Hoy es evidente que hay un gran problema astrofísico : cómo se transforman las energías gravitatorias y nucleares cósmicas en electromagnéticas. El problema físico que se presenta es muy difícil, pues es conocido por los tanteos que se han hecho en los laboratorios terrestres para la transformación directa de diferentes tipos de energía, que tal transformación es de muy bajo rendimiento.

Neutrinoastronomía

Sabemos que el neutrino es una de las partículas más interesantes e incomprensibles de la Física. Por no tener masa, por no tener carga eléctrica, por no tener casi interacción con las otras partículas, puede atravesar como un fantasma directamente la materia. Una neutrinoastronomía podría proporcionar unos datos directos del centro de las estrellas que los datos ópticos o de radio no nos pueden suministrar, pues proceden exclusivamente de su superficie.

Con esto se podría «meter el termómetro» hasta el centro de una estrella y podría corroborarse las diversas teorías astrofísicas, y poder así en muchos casos ser una premonición de sucesos que habrían de acaecer seguidamente como en las supernovas. Un fotón producido en el interior del Sol tarda un millón de años en salir ; un poco estropeado con las absorciones y emisiones que necesita sufrir para escapar ; un neutrino sólo necesitaría cuestión de segundos, pues saldría directamente.

COSMOLOGIA

Hasta aquí hemos hablado de los componentes del Universo, pero ahora deseamos hablar del Universo como una unidad única en el espacio y en el tiempo. ¿Cuáles son las peculiaridades que como tal tiene? ¿Tuvo un principio? ¿Cómo evoluciona? ¿Es finito? ¿Cuál es su estructura general? Es curioso que durante la época newtoniana no hubo una cosmología científica; lo más que se llegó es a la idea de un principio cosmológico de uniformidad. Cada progreso conceptual cosmológico ha consistido en uniformar generalizando el anterior. Hay un progreso, si consideramos que la Tierra no es el centro del Universo alrededor del cual gira todo el firmamento; progreso es cuando se abandona la idea del astro rey como centro para pasar a ser una estrella más en la inmensidad de los espacios; progreso hay e inmenso, cuando concebimos el Universo como un espacio ilimitado, terriblemente vacío, en el que la materia está distribuida con una densidad media uniforme. En 1826 surge en Cosmología la paradoja de Olbers con la misma fuerza intelectual que tuvieron las paradojas de los griegos en lógica y matemáticas. Olbers divide el espacio sideral que nos rodea en capas esféricas concéntricas de espesor uniforme y con centro en la Tierra. En cada capa hay un número de estrellas proporcional a su volumen, es decir, al cuadrado de la distancia. Como la intensidad luminosa decae también con el cuadrado de la distancia, el resultado neto luminoso que cada capa produce en el centro es una constante, y por lo tanto, la luz resultante, suma de todas las capas, es proporcional al espesor total de las mismas. Si el espacio es infinito, la cantidad de luz

que se recibiría en la Tierra sería también infinita y entonces, ¿cómo por la noche hay oscuridad? Es extraordinario que un raciocinio tan simple plantee un problema tan trascendente y difícil. Todos los argumentos para evitar la paradoja se estrellan ante la simplicidad del razonamiento, y tan sólo cien años después hay un argumento. una explicación concluyente.

En 1917, después que Einstein obtiene sus éxitos con la teoría de la gravitación, es cuando inicia con toda su audacia intelectual las teorías cosmológicas. Einstein se plantea la existencia, dentro de sus ecuaciones, de un Universo uniforme y estático. Como las ecuaciones son entre derivadas parciales, se encuentra con el problema de los bordes. Es como si tratase de describir la superficie de la Tierra y dijese que era plana. Entonces se le presentaría el problema de los bordes y habría que describir abismos, cataratas, infiernos, etc.; pero si se dice que es una superficie esférica desaparece el problema de los bordes. Por esta razón Einstein introduce su célebre término cosmológico para que el espacio sea cerrado y como además el dichoso término está ligado con la densidad media, le parece que ha reafirmado el carácter «marchiano» de la teoría gravitatoria. Es cuando aparecen las discusiones sobre el universo finito, su radio, la masa, etc.

Sitter halla otra solución sin término cosmológico, pero de un espacio sin materia, como si pudiese existir tal espacio. La utilidad de esta solución es poner de manifiesto que las ecuaciones de la teoría de la gravitación ofrecen otra multiplicidad de soluciones.

En 1920 el matemático y astrónomo ruso Friedman descubre una solución con densidad de materia uniforme pero sin término cosmológico. Para obtener esa solución tiene que admitir la extraña concepción de un Universo en expansión. El espacio es isótropo, no hay observador ni dirección privilegiada, pero la distancia entre las partículas libres aumenta con una velocidad que es proporcional a su distancia.

La imagen más apropiada en dos dimensiones es pintar en un globo elástico motas, y al hincharle la distancia entre las mo-

tas aumenta proporcional a su distancia primitiva. Afortunadamente estos resultados teóricos coinciden con los obtenidos experimentalmente por Hubble en su conquista del Reino de las Galaxias. Hubble descubre que el efecto Doppler de la luz que proviene de las galaxias es tanto más marcado cuanto mayor es su distancia, y llega a enunciar la ley conocida con su nombre (1932) : la velocidad de huida entre diferentes partes del Universo es proporcional a su distancia. Esta ley está tan aceptada, que hoy se aplica inversamente, es decir, la medida del efecto Doppler es lo que establece la distancia.

Tenemos que la cosmología del Universo en expansión, fruto teórico experimental, es la solución de la paradoja de Olbers : Si una fuente luminosa huye, su potencia luminosa disminuye por dos causas :

1.^a El fotón emitido de energía $h \nu$ por efecto Doppler reduce su energía $h \nu'$.

2.^a El tiempo propio de la emisión es alargado en la recepción por el movimiento relativo de los observadores.

Esto provoca que la intensidad luminosa no sólo disminuya con el cuadrado de la distancia, efecto tenido en cuenta por Olbers, sino además, por un doble factor que proviene de los efectos relativistas de la huida.

A las distancias en que las velocidades de expansión son superiores a la velocidad de la luz, todos los efectos electromagnéticos se desvanecen y son inexistentes para el mundo físico. Esta explicación que les puede parecer a ustedes enormemente rebuscada, es la única explicación científica de por qué la noche es oscura.

Otra de las sorprendentes consecuencias de la teoría relativista de la expansión es la de la creación del Universo. Si el espacio está en expansión podemos imaginarnos volver el proceso hacia atrás y hallar cuando tal expansión se inició, es decir, cuando se arrancó de la Nada. El tiempo que ha pasado no es más que la constante de Hubble y es verdaderamente maravilloso que pueda fijarse cuando se creó el Universo, por una serie de

medidas experimentales, que aunque sean delicadas de técnica, sin embargo, son simples en su concepción.

Desgraciadamente el tiempo que daba el propio Hubble como resultado de sus medidas experimentales (del orden de 1.000 millones de años), fue acogido escépticamente, pues era conocido por otra serie de medidas experimentales (como es por la proporción entre el Uranio 235 y 238), que la edad de la Tierra tenía que ser mucho mayor y por lo tanto era completamente inaceptable que la edad de la Tierra fuese inferior a la del Universo.

Esta contradicción provocó una tensión intelectual que produjo dos consecuencias :

1.ª Una nueva teoría cosmológica de la creación continua.

2.ª El descubrimiento por Baade en 1942, aprovechando el bloqueo luminoso de Los Angeles, de que hay dos tipos de estrellas : viejas y nuevas. Y en 1954 de que había un error en la calibración de las cefeidas, pues se habían calibrado las viejas cefeidas y se medían las distancias por las nuevas. Esto hizo que todas las distancias se duplicasen y la constante de Hubble también se doblase, y después de diversas correcciones se ha estimado que son trece mil millones de años, desapareciendo así la contradicción con los otros datos, también experimentales.

Estamos situados en el día de la Creación. ¿Por qué no participar en ella? Según dice Gamow, el más antiguo documento arqueológico de que disponemos es el de la proporción de los diferentes elementos que componen la materia, al dar por supuesto que no ha podido haber formación posterior. Un cálculo simple pone de manifiesto las relaciones fundamentales del «huevo cósmico» en los principios de la Creación.

Como vemos, la fórmula de la temperatura $T = \frac{15 \cdot 10^9}{t^{1/2}}$ (*)

limita la creación de los elementos a media hora, a la primera media hora del Universo. Se han hecho muchos esfuerzos para poder cocinar en esa media hora decisiva todos los elementos que co-

(*) T en grados y t en segundos.

nocemos y en las proporciones que el documento arqueológico de Gamow exige.

Creo que hoy piensan todos los físicos nucleares que con tales procesos no se hubiese podido pasar del He y en todos los casos estas teorías de la Creación habría que acoplarlas con las nuevas teorías de la nucleogénesis de las estrellas.

Ya hemos dicho que la contradicción entre el tiempo de Hubble obtenido por los datos cosmológicos y los tiempos obtenidos por los datos terrestres, fue una motivación para que surgiese la teoría de la creación continua. La teoría de la Creación continua se funda en el «principio cosmológico perfecto» al menos, como lo llaman sus autores. No sólo se admite que el espacio es isótropo y uniforme, sino además que no hay tiempo privilegiado, pues el Universo está en un régimen dinámico estacionario, es decir, no hay principio ni fin en el Universo; todo es presente y las leyes de la Física son inalterables en el espacio y en el tiempo. Pero como el Universo está en expansión, esto significa que si se considera un volumen fijo se está escapando materia por la superficie y para que sea, sin embargo, permanente y rigurosamente estacionario, ha de crearse continuamente una nueva materia que sustituya la ida. Es fácil echar la cuenta de lo que se necesita: un átomo de H por litro cada billón de años. No es mucho en cantidad, pero sí lo es terriblemente en concepto, porque supone romper el más querido principio de la Física, el de la conservación de la energía, por lo menos localmente, ya que en el Universo, como unidad, podría suponerse como si la materia fuese bombeada otra vez dentro.

Un retoque perfeccionista a la teoría de la creación continua, es suponer que las cargas eléctricas del protón y del electrón difieren muy ligeramente, una parte en un trillón, y esto sería lo que originaría por repulsión la expansión.

Es evidente que de tal violación, la creación de la materia de la nada, no pueda haber una confrontación directa, por su pequeñísima magnitud, pero sí la puede haber por sus consecuencias. La teoría de una creación única supone que todas las galaxias vienen

a ser de la misma edad, y por consiguiente se nos aparecerán tanto más jóvenes cuanto más lejos estén, por el retraso con que recibimos su luz, mientras que en la teoría de la creación continua, la distribución de edades no dependerá de la distancia. El poder tener una teoría de la evolución de las galaxias que permita determinar su edad, como se ha conseguido con las estrellas, es fundamental para el avance cosmológico. Igualmente la cuenta de las radiofuentes hacia el borde del universo, que los modernos radiotelescopios podrán realizar serán capaces de poner de manifiesto si hay uniformidad en profundidad, que la teoría de la creación continua postula.

Uno de los mayores triunfos de la teoría de la creación continua estriba en haber espoleado las teorías de la nucleogénesis poniendo de manifiesto que los elementos se pueden formar permanentemente en los hornos nucleares de las estrellas, sin necesidad de recurrir a las condiciones especiales del día de la Creación.

Evidentemente, estamos en una encrucijada de la Cosmología, y de la Física. Hasta ahora la Cosmología ha ido tomando conceptos y teorías de la Física para sus hipótesis y especulaciones, pero quizás haya llegado el momento en que los problemas cosmológicos influyan decisivamente en el desarrollo de las teorías físicas : la creación de la materia y la interpretación de las partículas elementales y pueda suceder, como dijo Jeans, que la historia del átomo esté escrita en los cielos.

* * *

Hace poco tiempo los periódicos publicaron que un norteamericano había batido el récord de la visita del Museo del Prado. ¡Había tardado menos de diez minutos! También hoy nosotros hemos batido muchos récords. En menos de una hora hemos tratado de llegar al borde inescrutable del Universo; retroceder en tiempo miles de millones de años en el intento de entender lo que pudo ser la Creación; hemos tratado de penetrar en las entrañas más profunda de los astros y hemos hecho el intento vano de reducir en una píldora los conocimientos penosamente elaborados en siglos.

Alguna vez he esperado que aquel norteamericano, aquel hombre, pudo captar con el rabillo del ojo alguna figura, alguna imagen de color que no podrá olvidar en toda su vida. Así también espero que esta somera y torpe lectura, que se tituló «El Universo», sirva para despertar una curiosidad o anhelo científico, y sobre todo que nos recuerde que : *Los cielos pregonan la gloria de Dios y el firmamento anuncia las obras en su poder.*