

## GÉNESIS DE LA MATERIA: DEL BIG BANG AL UNIVERSO<sup>1</sup>

Jaime JULVE PÉREZ<sup>2</sup>

RESUMEN.—Se traza una historia de la evolución del Universo, tal como la concibe el "Modelo cosmológico estándar", hoy comúnmente aceptado en sus rasgos generales. En este cuadro se ilustra la síntesis primordial, estelar y explosiva (Supernovas) de los elementos químicos, hasta la aparición de las primeras moléculas orgánicas.

ABSTRACT.—*The origin of matter: from the Big Bang to the Universe.* The evolutionary history of the Universe is outlined, as conceived by the nowadays widely accepted Standard Cosmological Model. In this scenario the primordial, stellar and explosive (Supernovae) synthesis of the chemical elements is described, ending with the appearance of the first organic molecules.

KEY WORDS.—Standard Cosmology, primordial and stellar nucleosynthesis.

---

<sup>1</sup> Esta conferencia contiene una parte importante de la pronunciada en Ciudad Real (Universidad de Castilla-La Mancha), el 26 de octubre de 1989, y publicada bajo los auspicios de la Diputación Provincial de dicha ciudad.

<sup>2</sup> Instituto de Física Fundamental, CSIC-Universidad Complutense. E-28006 MADRID.

## INTRODUCCIÓN

Sólo en los últimos decenios el hombre ha alcanzado evidencia teórica y experimental de que la mirada que se adentra en la estructura ultramicroscópica de la materia es la misma que se pierde en las inconmensurables profundidades del cosmos viajando hacia atrás en el tiempo. El cuadro que emerge de todo ello es una espectacular sucesión de eventos que desde las increíbles condiciones del violento origen nos llevan poco a poco hasta el panorama del Universo que conocemos. A lo largo de este proceso se crearon las diferentes sustancias básicas –los elementos químicos– que constituyen los materiales de nuestra vida cotidiana. De esta historia nos vamos a ocupar en las páginas siguientes.

En todo lo que diremos a continuación es preciso distinguir dos sectores importantes. Desde la física nuclear, que involucra energías del orden de la decena de MeV por partícula, hasta los experimentos de física de altas energías que alcanzarán hasta 1 TeV con la nueva generación de aceleradores, somos capaces de reproducir en laboratorio las condiciones del universo inicial remontándonos atrás en el tiempo hasta los  $10^{-14}$  sg posteriores al Big Bang, momento en que la temperatura estaba comprendida entre  $10^{16}$  y  $10^{17}$  K. Así pues, desde ese instante hasta hoy, la observación astrofísica y los laboratorios de investigación nuclear y de altas energías nos permiten estudiar experimentalmente el universo. Entre los  $10^{-43}$  sg y los citados  $10^{-14}$  sg estamos en cambio en el ámbito de la teoría, una teoría bastante convincente en la medida en que consigue, además de la autoconsistencia lógico-matemática, predecir muchos y sutiles detalles accesibles hoy a la observación. Se trata en concreto de las GUT's, las Teorías de Gran Unificación de las partículas y fuerzas elementales, junto con la teoría de la gravitación de Einstein conocida como Relatividad General. Antes de los  $10^{-43}$  sg la densidad de energía es tan alta que los efectos de la gravitación son importantes a las pequeñas distancias de las partículas elementales y se hace necesaria una versión cuántica de la teoría de la gravitación que aún no existe, si bien las Teorías de Cuerdas son el mejor candidato que tenemos hoy por hoy. En la medida en que esta promesa parece todavía problemática, la historia desde la singularidad inicial (el

instante “cero”) hasta los citados  $10^{-43}$  sg es altamente especulativa y cada vez más “metafísica” a medida que nos acercamos al origen.

Varias evidencias observacionales, entre las cuales la más importante es el ritmo de expansión del Universo medido hoy, sitúan en unos 15 mil millones de años atrás el momento de la Gran Explosión inicial, el “Big Bang”. Preguntarse el “dónde” y el “cuándo” tuvo lugar este acontecimiento presupone que acaeció EN algún instante de un tiempo y EN algún lugar de un espacio preexistentes, espectadores externos e imperturbables. Para la cosmología moderna sin embargo tales proposiciones carecen de sentido, ya que el tiempo y el espacio se conciben como magnitudes físicas que SE CREARON con el universo mismo y como parte sustancial de él. Por qué, para qué y por quién son preguntas que no puede contestar la ciencia.

Antes de adentrarnos en el tema, rogamos que el lector no iniciado se detenga en un rápido estudio del Apéndice final. En él hemos recogido algunos conceptos fundamentales, unidades de medida básicas, símbolos y abreviaturas empleados con profusión en estas páginas. La aridez que se introduce así redundará en beneficio de la brevedad y eficacia, en nuestro deseo de ofrecer una información concreta y cuantitativa.

#### LOS PRIMEROS TRES MINUTOS Y LA NUCLEOSÍNTESIS PRIMORDIAL

Del periodo anterior a los  $10^{-43}$  sg, conocido como “Era de Planck”, se pueden trazar sólo unas líneas muy generales. La temperatura es superior a  $10^{33}$  K y cada partícula individual poseía una energía superior a  $10^{23}$  MeV. Con tales concentraciones de energía los efectos de la gravitación a corta distancia (no olvidemos que masa y energía son equivalentes a los efectos de producir atracción gravitacional) se hacen importantes. La curvatura del espacio-tiempo que corresponde a esos efectos hace que a la escala típica de unos  $10^{-33}$  cm, el espacio-tiempo no aparezca suave y continuo sino con la textura granulosa de una espuma (fig. 1). Las burbujas tendrían por pared superficies no bidimensionales sino cuadrimensionales. Los valores  $10^{33}$  K,  $10^{23}$  MeV y  $10^{-33}$  cm son respectivamente la temperatura, energía y longitud de Planck. Si las teorías de cuerdas corresponden

a la realidad, el propio campo gravitatorio, como las otras partículas elementales, no sería sino una de las excitaciones posibles de pequeñas cuerdas cerradas vibrantes de longitud típica del orden de la de Planck y, a esta escala, el propio universo una “sopa de cuerdas”.

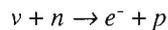
Prosigue la expansión y enfriamiento y entre los  $10^{-43}$  sg y los  $10^{-32}$  sg estamos en la “Era de la Gran Unificación” en la que la simetría entre las fuerzas y las partículas elementales se halla regida por las GUT’s. A estas temperaturas los bariones existen sólo como quarks libres, junto con electrones y neutrinos de varios tipos. Las fuerzas de atracción entre ellos (la gravitación es ya despreciable) son las que corresponden al intercambio de unas partículas intermediarias muy especiales llamadas bosones X y partículas “de Higgs”, además de los “gluones” productores de las fuerzas nucleares, los fotones de luz y los bosones W y Z. La temperatura, la energía (siempre por partícula) y el radio del universo observable, evolucionan en este período como se indica en la figura 2.

Nos detenemos en estos detalles porque en este periodo tiene lugar el importantísimo fenómeno de la “Inflación” del universo. Durante el enfriamiento que va de los  $10^{-35}$  sg a los  $10^{-32}$  sg los campos de Higgs no disipan su energía al mismo tiempo que los demás bosones intermediarios y partículas y al “quedarse atrás” llega un momento en que acaparan la fracción más importante de la energía total del universo. Por sus peculiares características dan origen a una brutal expansión del universo, la “inflación”, en la que éste aumenta su radio exponencialmente con el tiempo en más de  $10^{50}$  veces. Es inútil tratar de obtener una imagen intuitiva de tales cifras. Durante la inflación la temperatura cae muy bruscamente, pero se recupera por el recalentamiento debido a las partículas energéticas (quarks, electrones, neutrinos, etc.) producidas por los campos de Higgs al desintegrarse. La secuela final es que la GUT sufre una transición de fase en la que gran parte de su simetría, por ejemplo la igualdad de intensidades entre las fuerzas nucleares fuertes y las electro-débiles, se pierde. La inflación es la más convincente de las explicaciones teóricas propuestas hasta hoy de hechos de observación cosmológica tales como la distribución y valores de la inhomogeneidad del universo por ejemplo.

El siguiente momento importante tiene lugar hacia los  $10^{-28}$  sg (fig. 2). Reinando una temperatura de unos  $10^{24}$  K, los bosones X empiezan a

desintegrarse dando quarks, leptones y sus antipartículas. Sin embargo quarks y antiquarks no se producen en igual número: hay un exceso de los primeros sobre los segundos de una parte en  $10^8$ . Esto sería crucial más tarde pues al aniquilarse las partículas y las antipartículas sólo el exceso de las primeras sobrevivirá para dejar un universo constituido predominantemente por materia y no por antimateria o por sólo radiación. Los bosones X y los campos de Higgs citados tienen pues la característica importantísima de estar asociados a procesos que pueden violar la conservación del número bariónico. Finalizada la era GUT y hasta los  $10^{-10}$  sg la temperatura se mantiene todavía por encima de los  $10^{15}$  K (energías superiores a  $10^5$  MeV) y en este régimen las fuerzas electromagnéticas y las nucleares débiles son aún simétricas en el sentido de que sus intensidades son parecidas. Es la “Era electro-débil”. Su fin queda sentenciado por la llamada transición electrodébil, en la que se termina también por perder la simetría citada. Los bosones W y Z se desintegran al descender la temperatura de los  $10^{15}$  K y la energía de los 200 GeV, quedando un universo constituido por un gas de fotones en equilibrio con quarks, leptones y sus antipartículas (fig. 3).

A los  $10^{-6}$  sg y a una temperatura de unos  $10^{13}$  K los quarks y antiquarks se aglutinan por separado (una transición llamada confinamiento de los quarks) para dar respectivamente bariones y antibariones. El exceso primigenio de quarks sobre antiquarks se traduce en que ahora tenemos un poco más de bariones que de antibariones. Este exceso es el que sobrevive cuando a los  $10^{-4}$  sg ( $T \sim 10^{12}$  K) los unos se aniquilan con los otros dando fotones de luz. Realmente quedan muy pocos supervivientes: sólo uno por cada  $10^8$  fotones de modo que el periodo que comienza entonces puede bien describirse como “Era de la radiación” ya que ésta encierra la mayor parte de la energía del universo. Los bariones son protones y neutrones en número aproximadamente igual, transformándose los unos en los otros según la reacción



y su inversa. Este equilibrio se rompe cuando la temperatura baja de los  $10^{10}$  K de modo que el proceso  $p \rightarrow n$  se hace más improbable al tener los electrones insuficiente energía para provocarlo.

Una importantísima consecuencia, como veremos poco más adelante, es que al final queda una proporción de un 14% de neutrones frente a 86% de protones, mientras los neutrinos inician una vida independiente al colisionar poquísimos con la materia (desacoplo de los neutrinos). En estas postrimerías de la era de la radiación, hacia los 14 sg de vida del universo, con una temperatura de unos  $4 \times 10^9$  K, los fotones al tener una energía de sólo 0,5 MeV no son capaces de crear ya parejas de  $e^+e^-$ . Así pues domina el proceso inverso de aniquilación electrón-positrón, sobreviviendo sólo unos pocos electrones en exceso que había: precisamente igual al número de protones supervivientes, pues el universo es eléctricamente neutro.

Estamos a punto de superar los tres primeros minutos de vida del universo, más exactamente hacia los 200 sg (temperatura de mil millones de grados Kelvin todavía), cuando se produce el nacimiento de la química. Los protones y neutrones se unen para formar los núcleos de los primeros elementos químicos. Es la nucleosíntesis primordial. Las proporciones entre ambos tipos de nucleón se traducen en la aparición de un 24% de núcleos de  ${}^4\text{He}$  quedando algo más de un 75% de protones libres, que químicamente no son sino núcleos de Hidrógeno. Además se producen trazas de otros isótopos de gran importancia cosmológica: un  $10^{-5}$  de Deuterio (o sea  ${}^2\text{H}$ ) y otro tanto de  ${}^3\text{He}$ , junto con un pequeñísimo  $10^{-10}$  de  ${}^7\text{Li}$ . Estas abundancias primordiales observables de manera ubicua en el universo fijan límites muy restrictivos a los parámetros de las posibles teorías de las partículas elementales y a las temperaturas de los procesos hasta aquí descritos.

#### ERA DE LA MATERIA: HASTA HOY

Primera hora del universo. Está finalizando la era de la radiación y aún no hay átomos: los fotones son muy energéticos (la temperatura supera todavía el centenar de millones de grados) y no permiten que los electrones orbiten en torno a los núcleos recién formados pues los arrancan de sus órbitas. El estado de la materia es un plasma recalentado en equilibrio con fotones. Hay que esperar el primer centenar de miles de años (nada, en comparación con la duración de la historia que sigue hasta el presente) y que la temperatura baje de los 4.000 K para ver los primeros átomos

neutros. Los fotones apenas chocan entonces con ellos e inician una vida independiente llevando consigo sólo una parte pequeña de la energía total, que queda en forma de masa de los átomos y otras posibles partículas. De aquí el nombre de “Era de la materia” para el nuevo periodo que dura hasta hoy. Al producirse este desacople de los fotones el universo, aunque incandescente todavía, se vuelve transparente a la luz. Esta luz al enfriarse independientemente tiene hoy una temperatura media de sólo 2,7 K: es la famosa radiación de microondas de fondo descubierta por los premios Nobel R. Wilson y A. Penzias en 1965, que llena el universo como testimonio del Big Bang. Recientemente se está midiendo con gran precisión (fig. 4).

Las primeras estrellas y galaxias se forman al condensarse nubes de Hidrógeno y Helio por efecto de su propia atracción gravitatoria. Para ello han de transcurrir los mil primeros millones de años de un universo que es ya frío y oscuro. La compresión eleva la temperatura en el centro de estas nubes hasta los  $10^7$  K necesarios para producirse la ignición nuclear que da nacimiento a cada estrella. Un nuevo milagro se produce. El universo vuelve a resplandecer pero esta vez en forma de los tinticantes puntitos luminosos que pueblan la serenidad de la noche, crisol de nuevos elementos químicos. Es la historia que contaremos en la segunda parte de nuestra exposición.

Ahora añadiremos sólo que las estrellas más masivas han terminado su ciclo vital sólo algunos miles de millones de años después, dando lugar a las primeras supernovas. Éstas difunden por el espacio toda la variedad de elementos químicos pesados que han sintetizado en su interior, enriqueciendo con ellos las nubes de polvo y gas de las que se formarán las estrellas de segunda generación como nuestro sol, y planetas como nuestra tierra. Uno y otra tienen una antigüedad de unos 4.500 millones de años, casi un tercio de la edad total del universo.

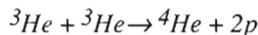
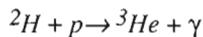
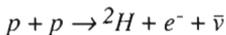
#### NUCLEOSÍNTESIS PACÍFICA: EL SOL

Tal como acabamos de apuntar, la síntesis de los elementos químicos prosigue hoy en los hornos nucleares de las estrellas. Con su masa crece la presión y la temperatura en el interior y por tanto la velocidad con que

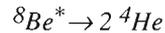
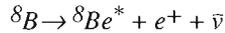
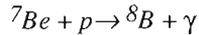
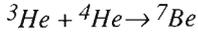
consumen su combustible. Se calcula en unos diez mil millones de años la vida del sol, que ahora estaría a su mitad, mientras una estrella de por ejemplo  $18 M_{\odot}$  tendría una longevidad mil veces menor. Del ritmo de vida depende también la muerte. Por debajo de  $2 M_{\odot}$  terminan, tras alguna pequeña convulsión, convirtiéndose en tranquilas enanas blancas, habiendo fabricado pacíficamente en su interior hasta el Carbono, Oxígeno y Nitrógeno. Las más pesadas en cambio llegan en la fase pacífica hasta el Hierro para morir en una tremenda explosión de Supernova en la que en breves instantes se sintetizan los elementos más pesados. Trazaremos a continuación una breve biografía de un ejemplar representativo de estas dos categorías, empezando por nuestro sol.

Comienza su historia en la contracción gravitatoria de la tenue nube protosolar a la que la rotación acaba confiriendo forma de disco. Al principio lentamente y luego más rápida hasta que el calor debido a la compresión en el centro, que mientras se ha hecho opaco, frena nuevamente el ritmo del colapso. No obstante éste prosigue hasta que el centro supera la decena de millones de grados y comienza de repente la ignición nuclear del Hidrógeno. Ha nacido el sol. Al mismo tiempo, condensaciones locales del disco dan origen a los planetas. Los más internos (hasta Marte) son rocosos pues el viento y la presión de la radiación del recién nacido sol barren los materiales volátiles hacia el exterior en que se formarán los gigantes gaseosos (Júpiter, Saturno, etc.). En la figura 5 se ha representado la evolución temporal del radio de la nube (en unidades del radio solar) en las últimas fases del colapso.

En esta situación vivirá el sol la mayor parte de su vida, una esfera de Hidrógeno en su mayor parte, con una temperatura superficial de unos 6.000 K y un pequeño núcleo interior a  $14 \times 10^6$  K en el que se produce la fusión termonuclear del Hidrógeno para dar Helio. Dos tipos de reacción nos llevan de los núcleos de Hidrógeno (protones) a los de Helio a través de varios isótopos intermedios. En la primera, llamada “cadena  $p-p$ ” tenemos:

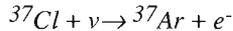


Los neutrinos  $\nu$  producidos aquí tienen una energía de unos 0,4 MeV. La otra es la “cadena lateral”

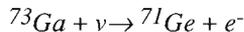


que da neutrinos  $\nu$  de 14 MeV.

Se ha intentado medir los flujos de estos neutrinos para comprobar la exactitud de las hipótesis. Esta moderna “astronomía de neutrinos” es subterránea, para aislarse de otros tipos de partículas que pudieran enmascararlos, pues los neutrinos atraviesan la tierra tan fácilmente como salen del centro del sol. En el fondo de la mina de oro abandonada de Homestake, en Colorado, 100.000 galones de  $\text{C}_2\text{Cl}_4$  capturan algunas pocas de estas elusivas partículas mediante la reacción



que se reconoce por el Argón producido. Pero es sensible sólo a los neutrinos de la cadena lateral que son menos numerosos. Todavía se ignora por qué se detecta sólo una tercera parte de los esperados. Para resolver esta “anomalía de los neutrinos solares” está en fase de ultimación el experimento GALLEX, que bajo las rocas del Gran Sasso en Italia emplea 30 toneladas de Galio en forma de  $\text{GaCl}_3$ . La reacción de captura es



midiéndose el Germanio producido, y es sensible a los neutrinos de la cadena  $pp$ .

Cuando el sol entra en su vejez, tiene un núcleo con poco Hidrógeno que “quemar” y mucho Helio (fig. 6). La temperatura ha subido en su interior algunos millones de grados por causa de la contracción gravitatoria y comienza la “combustión” del Helio que produce Carbono, Oxígeno y Nitrógeno, mientras que la conversión  $H \rightarrow He$  continúa en un estrato más periférico. Cuando esto suceda, las partes más externas del astro se

expandirán enormemente, abarcando hasta la órbita de Marte, entrando en la fase de “gigante roja”. Las estrellas Antares (en el Escorpión) y Aldebarán (en el Toro) son ejemplos actuales.

Finalmente, agotado el combustible nuclear, con poco H y He en su interior a cambio de mucho C, N y O (fig. 7), volverá a contraerse para convertirse en una enana blanca que se enfriará a su vez en un apagado rescoldo.

Sin embargo si la masa de la estrella se acerca a  $2 M_{\odot}$  la temperatura interior alcanzará los 740 millones de grados necesarios para iniciar la fusión del Carbono que produce Ne, Mg y Na. Pero esta combustión es inestable y generalmente se traduce en explosiones que eyectan al espacio los estratos externos de la estrella. Vistas al telescopio corresponden a las llamadas “nebulosas planetarias”, con la estrellita protagonista del estornudo generalmente visible al centro. Para los primeros telescopios tenían la apariencia del disco de un planeta, lo que explica su nombre.

#### NUCLEOSÍNTESIS VIOLENTA: LAS SUPERNOVAS

La noche del 23 de febrero de 1987, una gran conmoción sacudió el mundo de los astrofísicos. La discreta estrella de Sanduleak -69° 202, una supergigante azul de masa  $18 M_{\odot}$  situada en la Nube Grande de Magallanes a 160.000 años luz de distancia en el hemisferio austral, había explotado convirtiéndose en una Supernova visible a simple vista. Durante algunas semanas brilló como cientos de millones de soles juntos para luego apagarse progresivamente tras dispersar por el espacio casi todo su material.

Las estrellas de masa superior a  $2 M_{\odot}$  llevan en efecto una vida breve, frenética y peligrosa, abocada a una catástrofe apocalíptica final, como la que hemos descrito, en menos de 500 millones de años. Veamos su historia. Para comenzar, la temperatura y densidad centrales en la fase de fusión  $H \rightarrow He$  son superiores a las del sol: unos  $40 \times 10^6$  K y  $6 \text{ gr/cm}^3$ . Por lo tanto la combustión agota el Hidrógeno en  $10^7$  años (mil veces menos de tiempo que el sol).

El núcleo de He al final de este periodo se contrae hasta la densidad  $\rho = 1.100 \text{ gr/cm}^3$  calentándose hasta  $190 \times 10^6$  K. En el sol sería ésta la

fase de gigante roja. Comienza aquí la fusión del Helio con la formación de C, N y O formándose un núcleo aún más pequeño con estos elementos. Al superarse los  $740 \times 10^6$  K entra a su vez en ignición el Carbono, produciéndose Ne, Mg y Na como en las fases convulsas finales de las estrellas de masa  $< 2 M_{\odot}$ . Sin embargo, para una estrella tan masiva como ésta, la historia no se detiene aquí. En efecto la temperatura y densidades centrales siguen creciendo y toca el turno a la fusión del Neón, después al Oxígeno, y por último al Silicio y al Azufre que dan elementos del grupo del Hierro (Fe, Ni, Co, Mn, Cr, Ti, V), los más estables de la tabla periódica. Cada una de estas combustiones nucleares en el centro tiene lugar a un ritmo progresivamente más rápido debido a la temperatura y densidad cada vez más elevadas a que tienen lugar. La combustión del Helio en el centro dura un millón de años, la del Carbono 12.000, la del Neón 12 años, la del Oxígeno sólo cuatro y la del Silicio y Azufre una fatídica semana final. Las anteriores fusiones prosiguen mientras tanto, pero en estratos cada vez más externos. Así pues la estrella adquiere una estructura de capas de cebolla que contienen los distintos grupos de elementos químicos sintetizados, como hemos presentado en la figura 8.

Estamos en la fase final de una batalla que ha durado  $11 \times 10^6$  años. La gravitación ha ido contrayendo las partes centrales y el núcleo se ha defendido aumentando la presión y la temperatura, desencadenando nuevas reacciones de fusión. Pero llegados al Hierro y sus compañeros ya no se puede obtener más energía por este procedimiento: la gravitación vence al fin y el núcleo colapsa bajo su propio peso. De tener un tamaño la mitad de la tierra con una densidad  $\rho \approx 5 \times 10^7$  gr/cm<sup>3</sup> y una masa de  $1,4 M_{\odot}$ , se comprime en pocas décimas de segundo en una bola de 100 Km de radio, en cuyo centro se alcanzan densidades como las del núcleo atómico ( $\rho \approx 2,7 \times 10^{14}$  gr/cm<sup>3</sup>, casi trescientos millones de toneladas por cm<sup>3</sup>). Con este grado de empaquetamiento los protones y neutrones forman un material incompresible debido a la “presión de degeneración” y se produce un tremendo rebote que se propaga hacia el exterior, a través del material que sigue cayendo, en forma de onda de choque. Se calcula que sólo un 10% de su energía alcanza la superficie de la estrella, pero basta para que su brillo pase de ser 40.000 veces el del sol que tenía Sanduleak -69° 202, en su última fase, hasta 200 millones y expulse al espacio exterior el resto de la estrella a altísima velocidad. Es la supernova.

Del total de la increíble energía producida (unos  $3 \times 10^{53}$  ergios) la casi totalidad sale en forma de un *flash* de neutrinos de unos 10 segundos de duración. Ellos se llevan de 200 a 300 veces más energía que los materiales eyectados y 30.000 veces más que la luz emitida. En los breves instantes del proceso de expulsión, una parte importante de la energía de la onda de choque se invierte en la síntesis de los elementos más pesados que el Hierro, mediante la intensa irradiación por neutrones de los más ligeros, y todos ellos se dispersarán por el espacio.

Los neutrinos producidos por la supernova SN1987A se observaron en varios experimentos subterráneos proyectados originalmente para detectar la hipotética desintegración de los protones. Es un volumen de agua del tamaño de una piscina en el que, al golpear los neutrinos algún protón o neutrón, se produce un debilísimo *flash* de luz que detectan unos tubos fotomultiplicadores. Algunas horas antes de verse con el telescopio se observó el chaparrón de neutrinos en el detector del túnel del Mont-Blanc, en el del fondo de la mina de plomo Kamioka en Japón, en el del grupo IMB (colaboración de las universidades de Irvine, Michigan y el laboratorio de Brookhaven) en una mina de sal cerca de Cleveland (Ohio), y finalmente en el de Baksan, en la Unión Soviética.

Hemos visto la historia típica de una Supernova de tipo II. Las de tipo I son resultado de la inestabilidad explosiva que se produce al caer, en una enana blanca, nuevo material procedente de la estrella compañera en un sistema binario orbitante. ¿Qué es lo que queda después de la explosión? Tras el rebote, la masa de  $1,4 M_{\odot}$  del núcleo se comprime en una compacta estrella de neutrones en rápida rotación de sólo 10 km de radio y densidad nuclear (o un agujero negro si la estrella es aún más masiva). Los pulsos de ondas de radio que emite en su giro (30 o más vueltas por sg) llegan a nuestros radiotelescopios. Cuando se descubrieron por primera vez, se llamó "púlsares" a estos objetos (de *pulsating stars*). La observación muestra una reconfortante correspondencia entre púlsares y restos de supernova catalogados. El ejemplo más popular corresponde al púlsar detectado en el centro de la Nebulosa del Cangrejo, identificada como los restos de la "Supernova de los chinos" cuya aparición registraron sus astrónomos en el año 1054. Occidente parece ser que dormía. Eventos de supernova como éste, acaecidos en nuestra Galaxia, son sumamente raros.



Como puede verse, además del agua los radiotelescopios han detectado las emisiones características del monóxido de carbono, del amoníaco y del metano entre tantas otras. Es una química lejana todavía de las sustancias precursoras de la vida, pero reveladora de la fertilidad del universo.

## EL FUTURO DEL UNIVERSO

Tras este largo periplo siguiendo la pista de los elementos químicos nos encontramos en el año  $15 \times 10^9$  de la creación, con un universo en expansión ricamente poblado de galaxias, incontables estrellas rutilantes y planetas en torno a muchas de ellas. En uno pequeño y azulado habita la especie inteligente “homo sapiens” que se pregunta a dónde va todo esto.

La expansión prosigue de modo que las galaxias llevan una velocidad de fuga proporcional a la distancia. En el momento actual este valor es de unos 50 Km/sg por cada MPc de distancia, la constante de Hubble. Pero este ritmo se está frenando por causa de la atracción gravitacional entre las propias galaxias. La pregunta es: ¿llegará a frenarse del todo haciendo marcha atrás para terminar en una infernal implosión, el “Big Crunch”, o proseguirá eternamente? (fig. 9). Todo depende de si la masa del universo alcanza el valor crítico necesario, que se calcula que corresponde a una densidad media de  $\rho_c \sim 5 \times 10^{-27}$  kg/m<sup>3</sup>. Es poquísimo, apenas tres átomos de hidrógeno por metro cúbico, pero la densidad media que se observa directamente (estrellas y gas luminiscente) e indirectamente, alcanza no más del 10% de ese valor. Existe un gran debate científico sobre la posibilidad de existencia de otras formas de materia oscura que colme la diferencia, pero la respuesta está envuelta todavía en los velos del misterio.

## EPILOGO

Sin duda alguna mientras los procesos de nucleosíntesis y la dinámica de las estrellas y galaxias descritos son verosímiles, todo lo referente a la evolución global del cosmos es mucho más especulativo. La propia noción del Big Bang es la hipótesis más simple que mejor explica nuestras observaciones, pero es sólo una hipótesis, aunque obligada por ciertos teoremas de los británicos S. Hawking y R. Penrose, válidos para espacio-

tiempos homogéneos, y materializados por la solución de las ecuaciones de Einstein que se conoce como métrica de Friedmann-Robertson-Walker (F-R-W). Pudiera incluso no haber habido singularidad inicial, como ha pretendido también Hawking en un contexto que utiliza una métrica euclídea. O bien que la ausencia del Big Bang haya que achacarla a que la métrica global del universo no sea la de F-R-W, sino la no homogénea hallada recentísimamente (mayo 1990) por el físico español J. M. Senovilla de la Universidad de Salamanca, pero que contempla de todos modos una etapa densa y caliente (parecida en muchos aspectos a los instantes posteriores al Big Bang) entre dos estados fríos, planos y diluidos, en el pasado remoto el uno y en el futuro lejano el otro. Nadie puede asegurarlo todavía.

Pudiera ser también que el hombre sea sólo un resultado accidental y que cuanto más comprensible se muestra el universo, más parece no tener sentido. O por el contrario que todo esté proyectado para que en un determinado planeta se diesen las condiciones idóneas para la aparición de la vida inteligente. Tampoco aquí faltan propuestas alternativas fundadas en modelos teóricos, como la del soviético A. D. Linde, del Instituto Lebedev de Moscú. En ella, la dinámica de los “campos de Higgs” de las GUT haría posible que los episodios de tipo Big Bang y Big Crunch no fuesen sino los túneles que conectan entre sí universos (fig. 10) regidos por leyes eventualmente distintas. En esta distribución caótica de universos múltiples coexistentes, conectados o no entre sí (fig. 11), nosotros estaríamos en aquel en el que las leyes físicas reinantes permiten la evolución hacia la vida inteligente.

Sea cual sea, el mecanismo empleado para propiciarla es ciertamente sutil y grandioso, y desata como ningún otro nuestra imaginación. Sin embargo de lo que podemos estar seguros es de que, con palabras del gran escritor de ciencia-ficción Arthur Clarke, *“la realidad es, por supuesto, mucho más fantástica”*.

## BIBLIOGRAFÍA

- S. WEINBERG, *Los tres primeros minutos del Universo*, Alianza Universidad, Madrid, 1978.
- G. GIACOMELLI, *Dal Quark al Big Bang*, Editori Riuniti, Roma, 1988.
- S. W. HAWKING, *Historia del tiempo*, Ed. Crítica, Barcelona, 1988.
- P. DAVIES, *The new physics* (Capítulos 3, 4 y 6), Cambridge University Press, Cambridge U. K., 1988.
- J. AUDOUZE & G. ISRAËL, *The Cambridge Atlas of Astronomy*, Cambridge University Press, Cambridge U. K., 1985.
- L. BADASH, "The Age-of-the-Earth Debate", en *Scientific American*, august 1989, p. 78.
- S. WOOSLEY & T. WEAVER, "The Great Supernova of 1987", en *Scientific American*, august 1989, p. 24.
- E. SURAUD, "La explosión de las estrellas", en *Mundo Científico*, vol. 7, p. 502.
- A. BURROWS, "The birth of neutron stars and black holes", en *Physics Today*, sept. 1987, p. 28.

## APÉNDICE

*Unidades de energía*

1eV*	=	1,6 x 10 <sup>-19</sup> Joule
1KeV	=	10 <sup>3</sup> eV
1MeV	=	10 <sup>6</sup> eV
1GeV	=	10 <sup>9</sup> eV
1TeV	=	10 <sup>12</sup> eV

\* Un electrón-voltio es el trabajo necesario para hacer superar a la carga eléctrica de un electrón la diferencia de potencial de un voltio.

*Masa*

La fórmula relativista  $E = mc^2$ , donde  $c = 3 \times 10^8$  m/s es la velocidad de la luz, proporciona la energía equivalente a una masa en reposo  $m$ . Las masas de las partículas elementales suelen darse en unidades de energía. Así el electrón, que pesa  $9,1 \times 10^{-31}$  Kg, corresponde en estas unidades a

$$m_e = 0,511MeV$$

A los efectos de producir atracción gravitacional la forma en que se halle la energía (masa, energía cinética o radiación) es indiferente.

### Temperatura

Es conveniente utilizar temperaturas absolutas o Kelvin, que se cuentan a partir del cero absoluto que corresponde a  $-273^{\circ}\text{C}$  aproximadamente. O sea,  $0^{\circ}\text{C}$  equivalen a  $+273\text{ K}$ . La temperatura es una manifestación de la energía cinética de las partículas de un gas y en este sentido son equivalentes. La fórmula es una relación de proporcionalidad que involucra la constante de Boltzmann que vale  $8,6 \times 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$ . Aproximadamente se tiene

$$1\text{MeV} \approx 10^{10} \text{ K}$$

### Fuerzas o interacciones fundamentales

Cuatro tipos de fuerza conocidos gobiernan el universo.

#### 1. Interacción nuclear fuerte.

Es la más intensa de todas y mantiene unidos los protones y neutrones (nucleones) que constituyen los núcleos atómicos. Es la responsable de la energía atómica. Es de corto alcance (unos  $10^{-13} \text{ cm}$ ) y viene a ser una manifestación residual de las fuerzas que ligan a los quarks, componentes a su vez de los nucleones.

#### 2. Interacción electromagnética.

Más de cien veces más débil que la anterior, mantiene a los electrones girando en torno a los núcleos y es responsable de la luz, de la electricidad, del magnetismo y de las reacciones químicas. Es de largo alcance por lo que se manifiesta a distancias macroscópicas: imanes y atracción electrostática.

#### 3. Interacción nuclear débil.

Unas mil veces más débil que la anterior. Es responsable de fenómenos atómicos como la radiación beta, por ejemplo la desintegración del neutrón (vida media de unos 12 minutos fuera de los núcleos):



Como la fuerte, es también de corto alcance.

#### 4. Gravitación.

La más débil de todas ( $10^{-39}$  veces la fuerte), y la más vieja conocida del hombre. Siendo de largo alcance y siempre atractiva es observable a distancias macroscópicas cuando hay grandes acumulaciones de masa, como en los cuerpos celestes.

La intensidad de estas interacciones depende de la energía involucrada en los procesos (o de la temperatura equivalente, si se prefiere). A muy alta energía tienden a igualarse. Así la electromagnética y la débil convergen en la “electrodébil” por encima de 200 GeV ( $1,5 \times 10^{15}$  K), y ésta a su vez con la fuerte en la “fuerza gran-unificada” por encima de  $10^{15}$  GeV ( $10^{26}$  K). Se cree que la unificación total con la gravitatoria tiene lugar a la energía de Planck ( $10^{19}$  GeV, unos  $10^{30}$  K).

### *Partículas y antipartículas elementales*

Por cada partícula existe su antipartícula –que tiene carga eléctrica opuesta– con la excepción de algunas pocas neutras que son antipartículas de sí mismas ( $\gamma$  y  $Z^0$  por ejemplo). Se designan con la misma letra y signo eléctrico opuesto o una barra encima. Damos la lista de las relevantes en nuestra exposición:

- Los quark no existen en estado libre a energías de laboratorio, por lo que su masa se estima de manera muy indirecta.
- Los bosones W y Z se observaron por primera vez hace pocos años en los laboratorios del CERN en Ginebra.

Partículas		Antipartículas	Masa	
Bariones (sienten la interacción fuerte)	Nucleones	p (protón)	$\bar{p}$	938,3 MeV
		n (neutrón)	$\bar{n}$	939,6 MeV
	Están constituidos por quarks:	q	$\bar{q}$	variable > 300 MeV
Leptones (no la sienten)		$e^-$ (electrón)	$e^+$ (positrón)	0,511 MeV
		$\nu$ (neutrino)	$\bar{\nu}$	< 14 eV (probablemente nula)
Intermediarios de las interacciones fundamentales:				
-Fuerte	$\Gamma$ (glutones)	$\bar{\Gamma}$	0	
-Electromagnética	$\gamma$ (fotón)	$\gamma$	0	
-Débil	$W^+$ (bosones	$W^-$	81 GeV	
	$Z^0$ electrodébiles)	$Z^0$	92 GeV	
-Gran Unificada	X (bosones de GUT's)	$\bar{X}$	> $10^{15}$ GeV	
-Gravitación	g (gravitón)	g	0	

- Las GUT's (Grand Unified Theories) se manifiestan por encima de  $10^{15}$  GeV y ven a los quarks y leptones como estados distintos de un mismo tipo de partícula.
- La práctica totalidad de la masa de la materia ordinaria reside en los bariones, e implícitamente se alude a la materia bariónica cuando se habla de materia.
- Partículas y sus antipartículas se aniquilan entre sí dando fotones directamente o partículas y antipartículas más ligeras que terminan aniquilándose dando el mismo resultado final. Recíprocamente un fotón suficientemente energético puede crear una pareja partícula-antipartícula.

### *Distancias*

Unidades usadas por su comodidad:

Fermi <sup>1</sup> .....	1 fm. = $10^{-13}$ cm
Unidad astronómica <sup>2</sup> .....	1 UA $\approx 1,5 \times 10^{11}$ m
Año-luz <sup>3</sup> .....	1 Ly $\approx 10^{13}$ Km
Parsec <sup>4</sup> .....	1 Pc $\approx 3,26$ Ly
	1MPc $\approx 10^6$ Pc

<sup>1</sup> Tamaño de un protón.

<sup>2</sup> Radio de la órbita de la tierra en torno al sol.

<sup>3</sup> Distancia recorrida por la luz en un año.

<sup>4</sup> Distancia desde la que 1 UA subtende un ángulo de 1" de arco.

Valores típicos:

Nucleón .....	$\sim 1$ fm.
Átomo.....	$\sim 10^{-8}$ cm
Sistema solar.....	$\sim 40$ UA
Distancia a la estrella más cercana .....	$\sim 4$ Ly
Galaxia típica.....	$\sim 100.000$ Ly diámetro x $10.000$ Ly espesor
Distancia a la más cercana (Andrómeda) ..	$\sim 2 \times 10^6$ Ly
Radio del universo observable.....	$\sim 4.500$ MPc $\approx 15 \times 10^9$ Ly
	$\approx 1,5 \times 10^{25}$ m

### *Masas de cuerpos celestes*

Masa de la Tierra .....

Masa del sol  $M_{\odot}$  .....

Masa visible de una galaxia típica .....

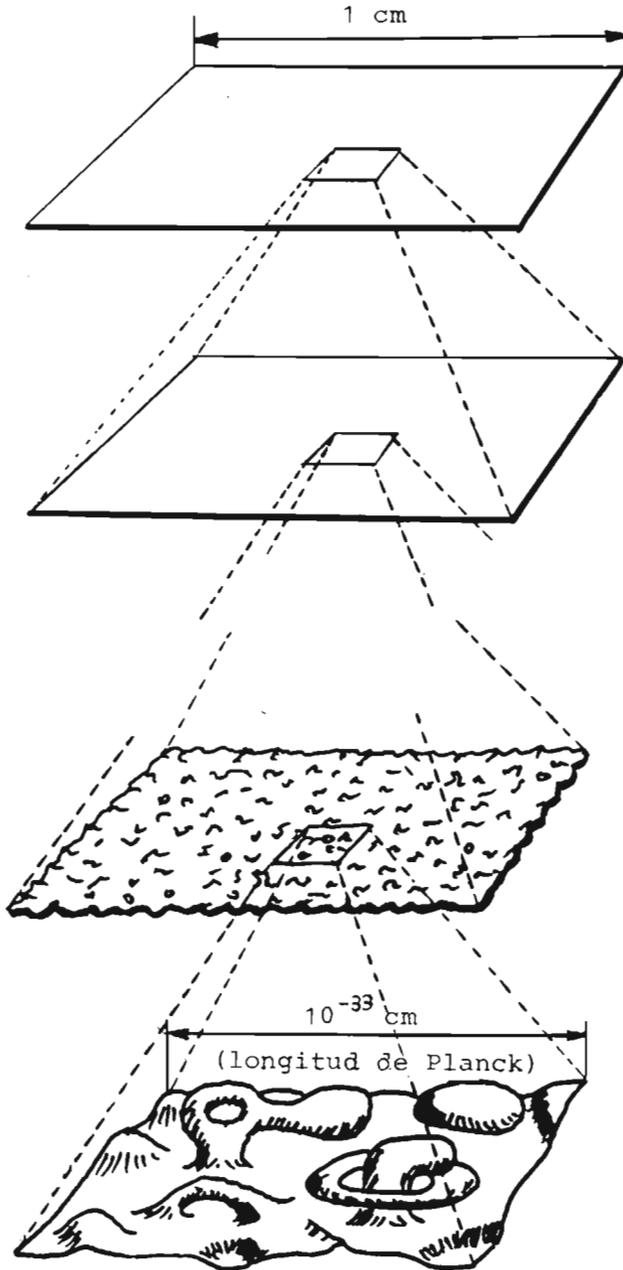
Masa observable del universo.....

$$\approx 6 \times 10^{24} \text{ Kg.}$$

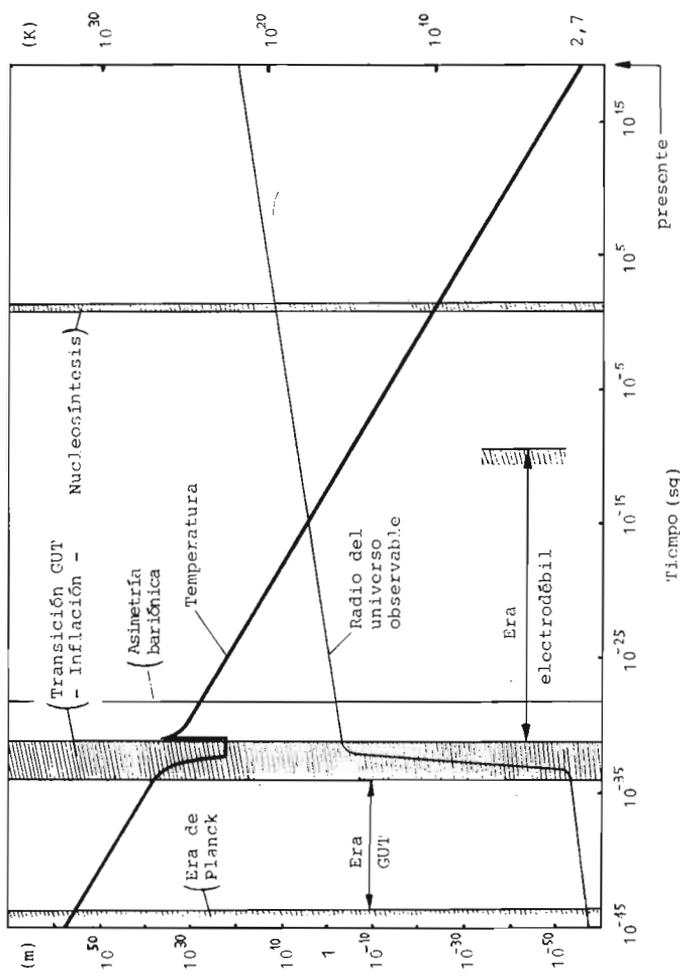
$$\approx 1,9 \times 10^{30} \text{ Kg.}$$

$$\approx 10^{11} M_{\odot}$$

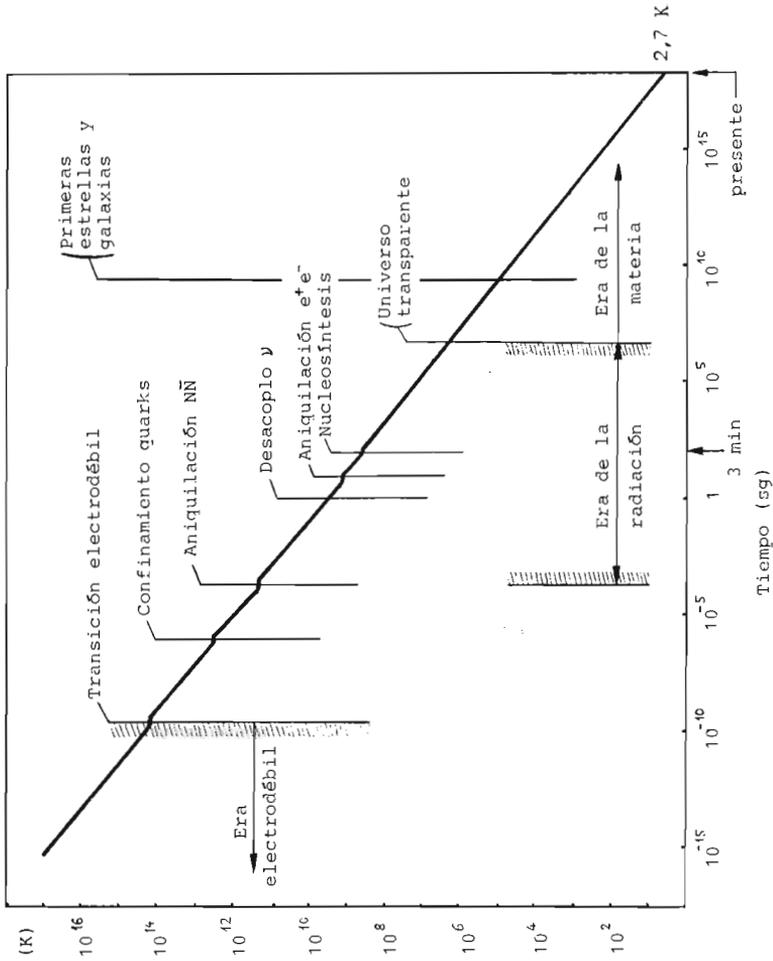
$$\geq 10^{55} \text{ gr.}$$



**Fig 1.** Efectuando 33 ampliaciones sucesivas de diez aumentos el espacio-tiempo, representadas aquí sus cuatro dimensiones en las dos de un plano, muestra una estructura espumosa.



**Fig. 2.** Evolución de la temperatura (en grados Kelvin) y diámetro del universo observable (en metros) desde la Era de Planck hasta hoy.



**Fig. 3.** Evolución de la temperatura del universo y transiciones más notables hasta el presente.

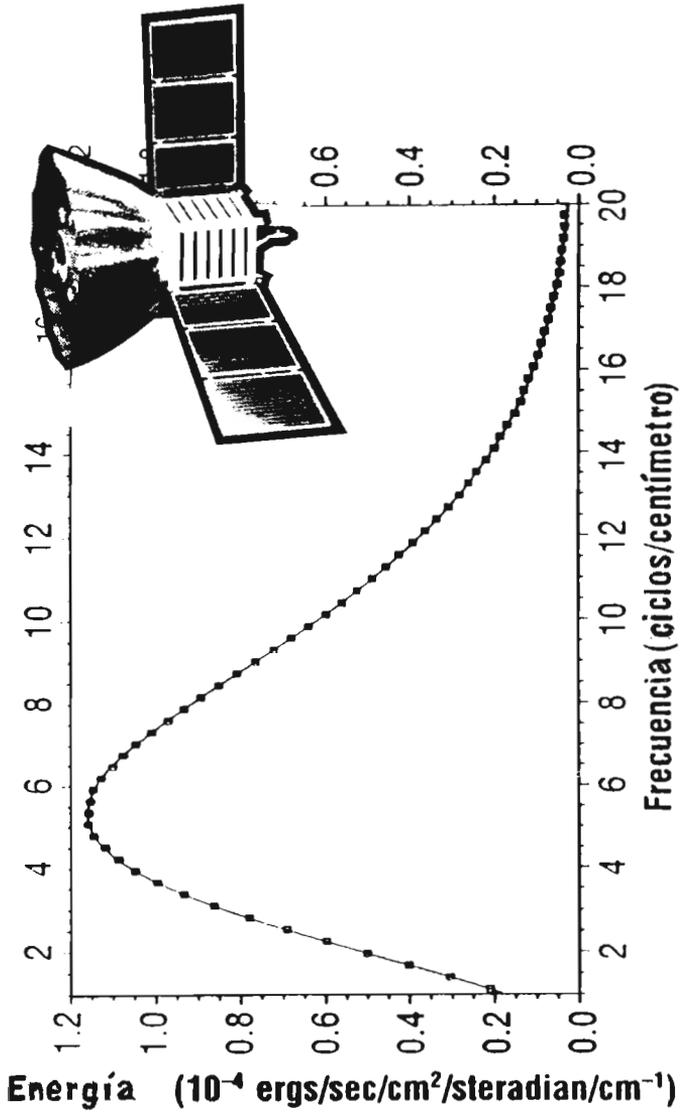
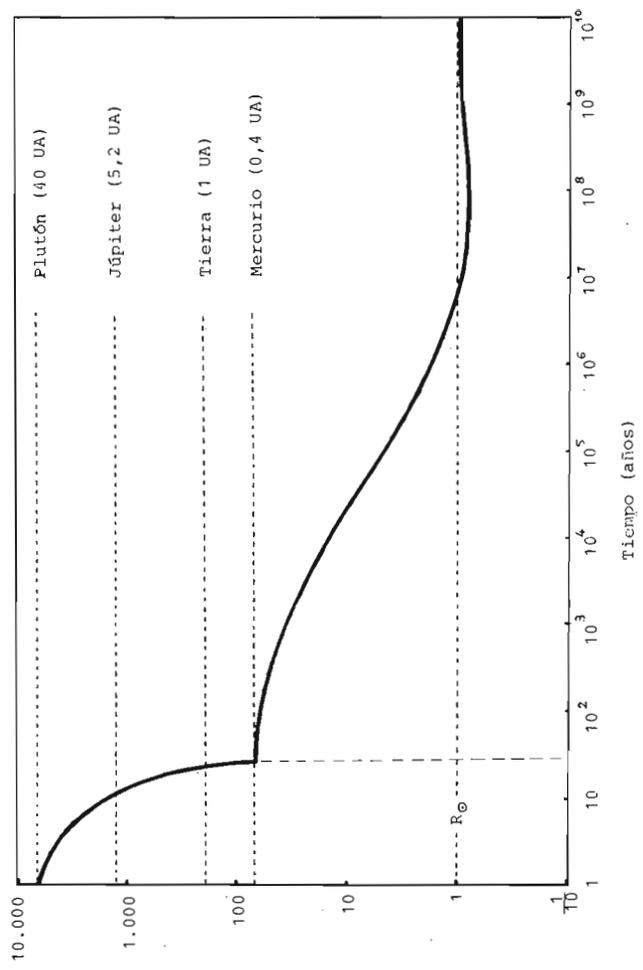
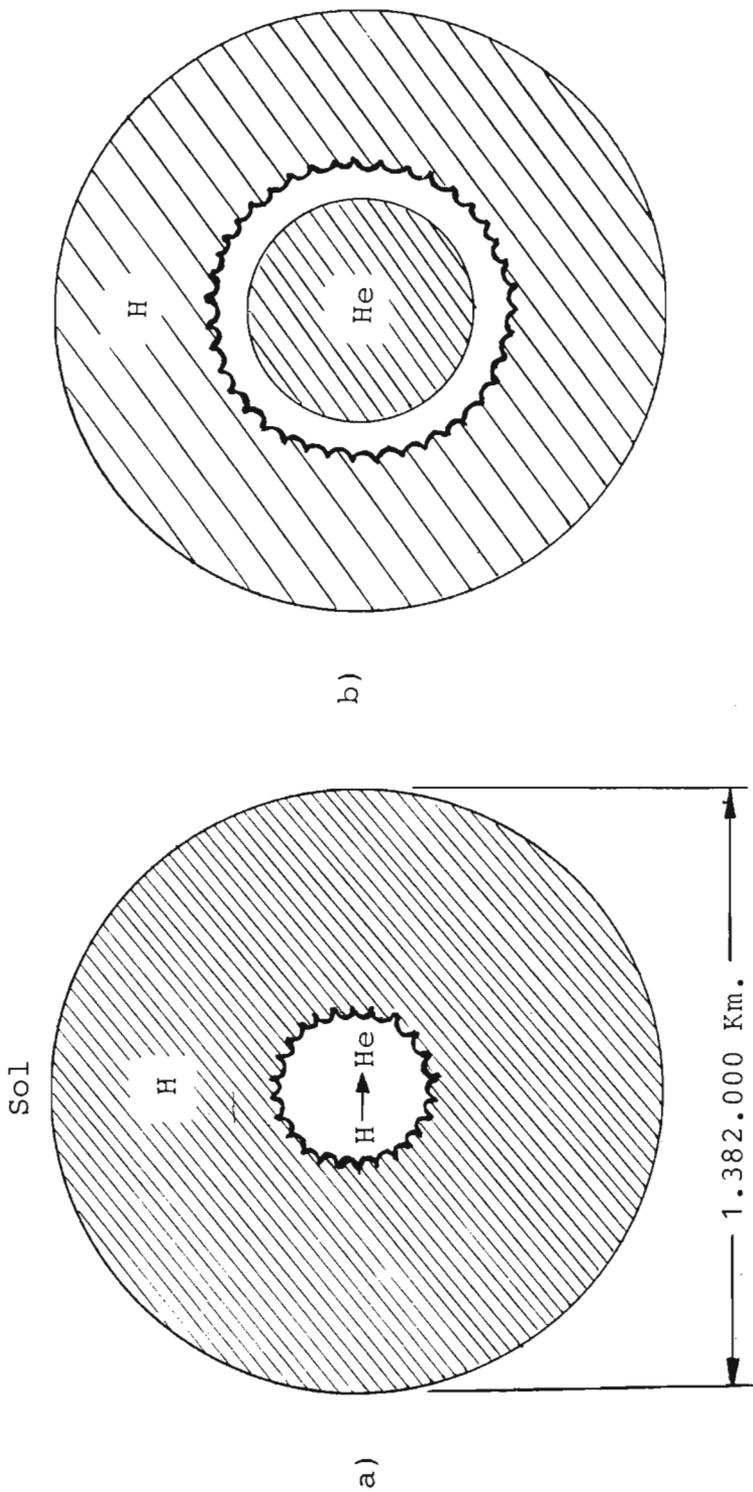


Fig. 4. Medidas del fondo de microondas por el satélite COBE (Cosmic Background Explorer) de la NASA hasta enero de 1990 en la dirección del polo norte galáctico. La distribución observada de energía en frecuencias (puntos) no se desvía más del 1% de la teórica de un "cuerpo negro" a 2,735 K (línea continua), y no más de una parte en 10<sup>4</sup> en las distintas direcciones del cielo.



**Fig. 5.** Evolución temporal del radio de la nube protosolar durante las últimas fases del colapso gravitatorio (en unidades del radio solar  $R_{\odot}$ ) comparado con los radios de algunas órbitas planetarias.



**Fig. 6.** a) Fusión del Hidrógeno en el sol en su fase actual.  
b) Formación del núcleo de Helio.

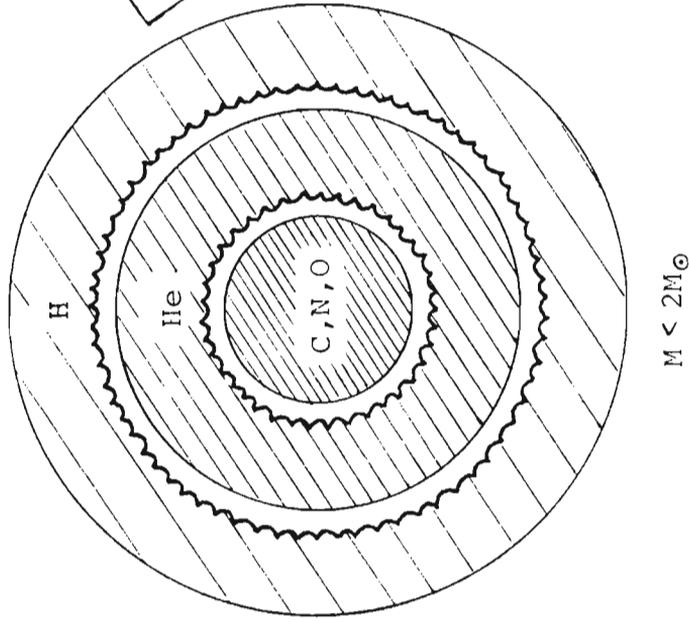


Fig. 7. Fase de gigante roja.

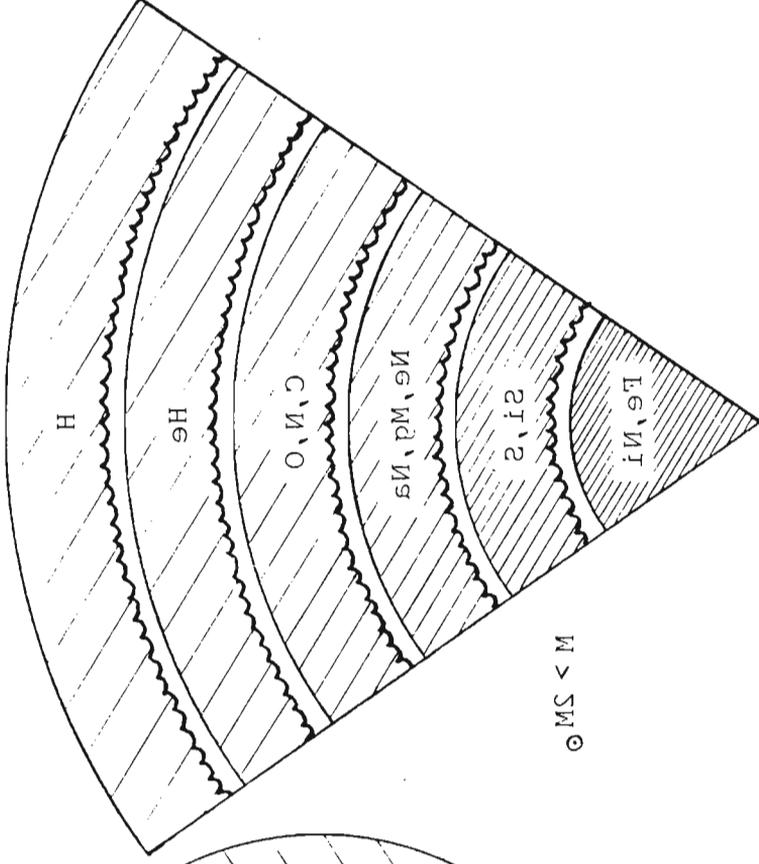


Fig. 8. Estructura en capas diferenciadas de elementos progresivamente más pesados en fases avanzadas de evolución de estrellas masivas.

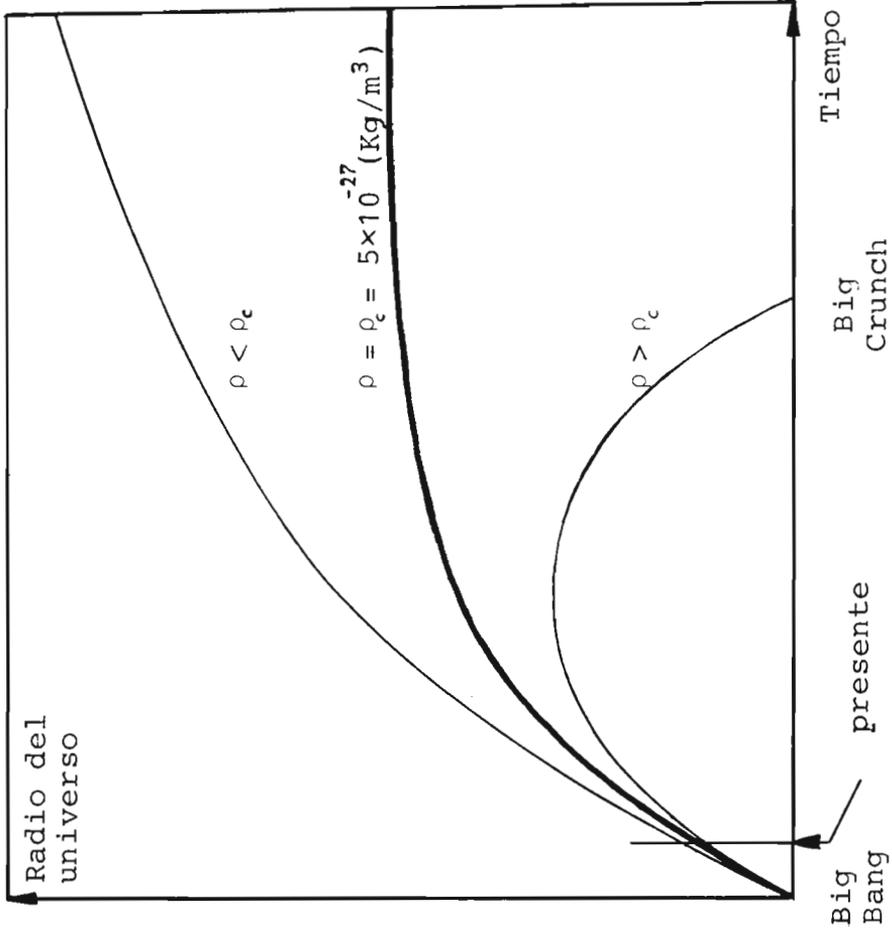
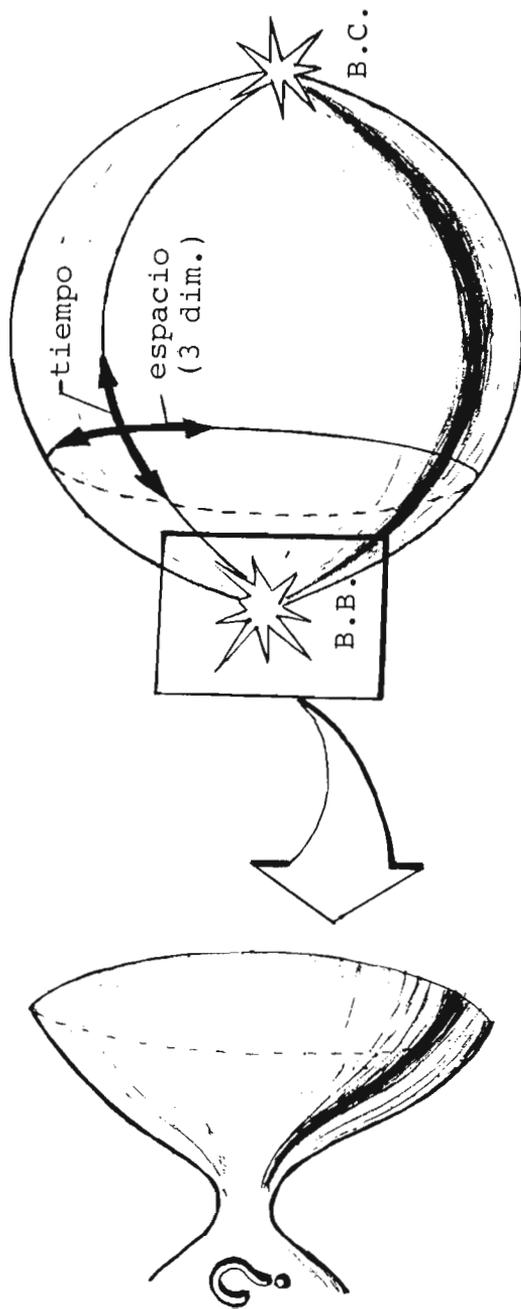
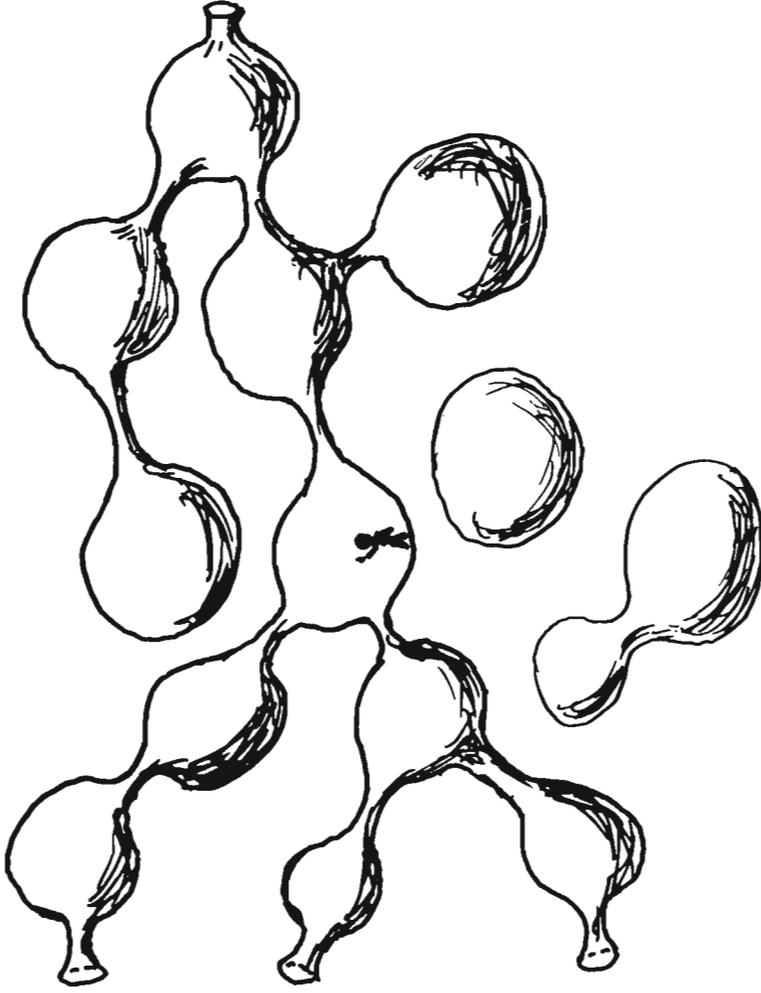


Fig. 9. Posibles evoluciones futuras de la expansión del universo dependientes de su masa total.



**Fig. 10.** El Big Bang y el Big Crunch pudieran corresponder no a singularidades sino a estrechos cuellos de comunicación con otros hipotéticos universos.



**Fig. 11.** Escenario caótico de universos conectados o aislados entre sí. Sólo algunos permitirían la vida inteligente en su seno.