

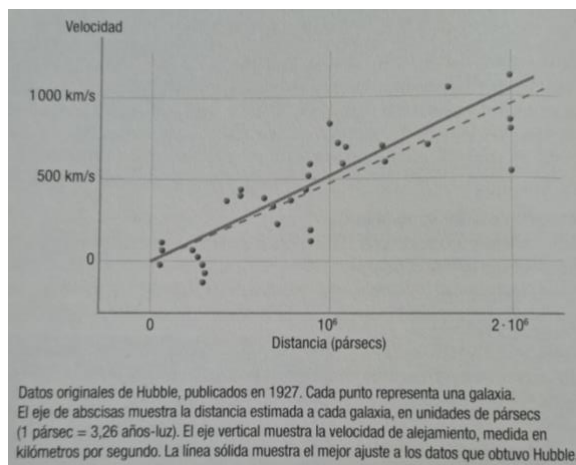
## **Big Bang – Inflación:**

### **La expansión del universo:**

Que el universo este en expansión quiere decir que, en las escalas suficientemente grandes en las que observamos la homogeneidad, la distancia promedio entre cualesquiera dos galaxias aumenta con el tiempo. Esta afirmación es consecuencia de uno de los resultados observacionales del siglo XX: las galaxias se alejan de nosotros, y cuanto más alejadas están, mayor es su velocidad de alejamiento. Este resultado se suele representar con la denominada Ley Hubble:

$$v = H_0 r$$

Donde  $v$  representa la velocidad “aparente” de alejamiento, y  $r$  es la distancia entre dos galaxias. La constante de proporcionalidad,  $H_0$ , se denomina constante de Hubble en honor a Edwin Hubble (1889-1953) (figura 1)

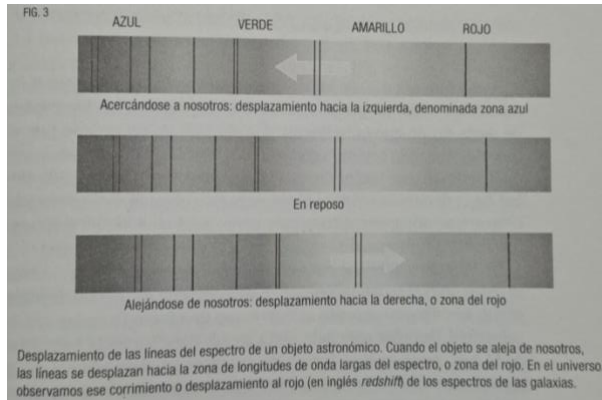


Concretamente se observa que la velocidad de alejamiento de una galaxia aumenta en unos 20 km/s por cada millón de años-luz de distanciamiento (por ejemplo, una galaxia situada a 2000 millones de años-luz se aleja de nosotros a unos 40000 km/s).

La Ley de Hubble relaciona dos cantidades astrofísicas que, desde la perspectiva observacional, eran muy complicadas de medir. Por un lado, las distancias a objetos distantes se basaban en el método de las estrellas Cefeidas. Estas estrellas son muy brillantes y muy variables. En 1912 se descubrió una relación entre la luminosidad y el periodo de variación de estas estrellas. Esta relación constituye la base del método que usó Hubble para calcular distancias a galaxias más lejanas en las que fue capaz de detectar cefeidas. De hecho, la medida de Hubble de la distancia a M31 (la galaxia espiral de Andrómeda) en 1923, demostró que estaba más allá de nuestra galaxia, y supuso una enorme revolución en nuestra concepción del cosmos. Hasta entonces, la visión predominante era que el universo estaba especialmente formado por nuestra galaxia, La Vía Láctea. La medida de Hubble nos asomaba por primera vez a un cosmos descomunadamente grande.

La otra cantidad que aparece en la Ley de Hubble es la velocidad “aparente” de alejamiento de cada galaxia. Observacionalmente, dicha cantidad se determina a partir del desplazamiento de sus líneas espectrales (figura 2). Cada galaxia tiene un espectro (energía emitida a cada

longitud de onda) con una serie de rasgos o líneas características. Si esa galaxia que emite luz se está aproximando hacia nosotros, observaremos los rasgos espectrales desplazados y comprimidos hacia valores de longitud de ondas más cortos (es decir, hacia el azul), mientras que si la galaxia se aleja de nosotros, los rasgos se desplazarán y se expandirán hacia longitudes de onda más largas (hacia el rojo). Este fenómeno constituyó una de las herramientas clave para establecer la Ley de Hubble.



En astronomía se define el desplazamiento al rojo (redshift, en inglés) como:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda obtenida de la Tierra y  $\lambda_0$  es la longitud de onda que mediríamos si la galaxia no se moviese. Para  $z = 0$ , la longitud de onda permanece inalterada.

Es habitual encontrar que el desplazamiento al rojo se exprese como una velocidad. Esto proviene del hecho de interpretar ese desplazamiento al rojo como un efecto Doppler. Así la velocidad asociada sería  $v = zc$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz. Esta forma de expresar el desplazamiento al rojo puede ser útil para mostrar el orden de alejamiento. Cuando  $z$  es mayor que 1, las velocidades son superiores a la de la luz, la interpretación que hacemos en cosmología del desplazamiento al rojo no es un efecto Doppler, sino que se *trata de un efecto de expansión del universo*.

Una propiedad esencial del desplazamiento al rojo es que el cociente no depende de la longitud de onda del rasgo espectral que usemos para medir. Dicho de otra forma, ese cociente dependerá únicamente de una cierta función del tiempo (o de distancia) de emisión de la señal, y del tiempo de recepción de la misma. Es decir:

$$1 + z = \frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{a(t_0)}{a(t)}$$

A esa función  $a(t)$  se la denomina factor de escala cósmico, y cuantifica el factor por el cual se han expandido las longitudes de onda desde que la radiación fue emitida en un tiempo  $t$  en el pasado, y ha sido recibida en tiempo  $t_0$  hoy día.

En las ecuaciones de Friedman, ese factor de escala aparece como una medida global de la distancia entre dos objetos ( $r = R \cdot a(t)$ ). Las soluciones de esas ecuaciones, encontraremos como será su evolución futura. En nuestro universo en expansión,  $a(t)$  crece con el tiempo.

Si se normaliza el factor de escala adoptando  $a(t_0) = 1$ , es decir, usando como referencia el tamaño del universo actual, tenemos:

$$1 + z = \frac{1}{a(t)}$$

De forma de  $a(t)$  indica el tamaño relativo del universo respecto al momento actual. Por ejemplo, si una galaxia se encuentra en  $z=1$ , entonces  $a=1/2$ , es decir, su luz se emitió cuando las distancias características entre todos los objetos del universo eran la mitad que el momento actual.

Si extrapolamos las ecuaciones de la Relatividad General hacia atrás en el tiempo, las ecuaciones predicen que, en algún momento del pasado, el factor de escala sería nulo ( $a = 0$ ), o equivalentemente, el desplazamiento al rojo sería infinito. Es nuestro origen del tiempo. A esa extrapolación hacia un tiempo cero es lo que llamamos **Big Bang**.

En año 2001, y usando los datos del telescopio espacial Hubble mostrados en la figura, un grupo de treinta científicos liderados por la astronomía de origen canadiense Wendy L. Friedman publicó la primera determinación de la constante de Hubble con un error inferior al 12%:  $H_0 = 72 \pm 8 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}}$ . En la actualidad, ese valor se puede determinar con errores menores del 1%.

#### Los elementos ligeros:

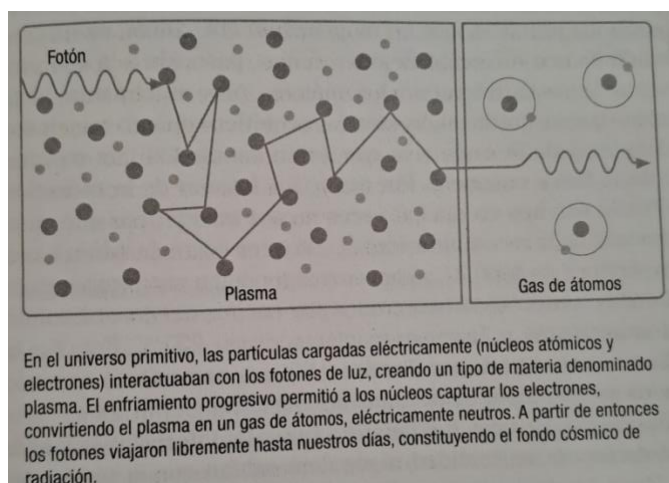
El hidrógeno es el elemento químico más abundante en el universo, seguido del helio. Aproximadamente tres cuartas partes de la masa de los bariones del universo están en forma de hidrógeno, mientras que el helio contribuye prácticamente con el cuarto de la masa restante. El resto de los elementos químicos son apenas una fracción. En un famoso artículo que publicaron en 1957, se demostraba que en el interior de las estrellas se pueden sintetizar todos los elementos químicos más pesados que el helio, y que contribuyen la base de los materiales que encontramos en la Tierra: carbono, nitrógeno, oxígeno.... Todos estos elementos “pesados” se “cocinaron” en algún pasado, en el interior de las estrellas. Sin embargo, la Teoría no podía explicar ni el origen ni la abundancia observada en el universo de los elementos ligeros: hidrógeno y helio.

La solución a ese problema vino de la mano del físico y astrónomo ucraniano George Gamow (1904-1968), que en 1946 propuso la idea de que los elementos químicos más ligeros podían sintetizarse a partir de reacciones nucleares de neutrones y protones en el cosmos primitivo, en el contexto de un modelo de Big Bang caliente. La teoría de Gamow fue esencial para entender un proceso que tiene lugar en un universo en expansión y fuera de condiciones de equilibrio.

La teoría de Gamow constituye hoy día uno de los pilares fundamentales del modelo de Big Bang. Si nuestro universo atravesó en el pasado por una fase caliente tal como está descrita, entonces en la época actual deberíamos ser capaces de encontrar restos fósiles de ese pasado remoto: hidrógeno y helio. El modelo predice que durante los tres primeros minutos del universo se debieron formar hidrógeno, helio y pequeñas cantidades de otros núcleos.

atómicos (deuterio, helio-3 y litio, justamente en la proporción que somos capaces de observar en la actualidad.

Cuando el universo tenía unos 300 seg, su temperatura había descendido a unos 600 millones de grados y el proceso de nucleosíntesis de elementos ligeros había concluido. El universo había quedado lleno de núcleos atómicos (cargados positivamente), fundamentalmente de hidrogeno y helio, electrones, además había gran cantidad de fotones (partículas de luz). Este tipo de materia, formado por partículas cargadas interaccionando con fotones, es lo que se denomina plasma. La mayor parte de materia ordinaria se encontraba en forma de plasma. En aquel plasma primitivo, los fotones no podían recorrer mucha distancia sin ser interrumpidos por las partículas cargadas. Esto se debe a que la luz es radiación electromagnética, que interacciona fuertemente con las partículas cargadas (Figura 3).



Por tanto, el universo era luminoso, dado que había muchos fotones, pero no era transparente, ya que cambiaban continuamente de dirección. Podemos decir que el universo era translúcido, como si estuviera lleno de una niebla luminosa y muy homogénea. A medida que siguió enfriándose, las partículas fueron frenándose y los fotones haciéndose menos energéticos. Cuando el universo

tenía 380000 años, la temperatura había descendido hasta unos 3000 °C, y los electrones ya eran suficientemente lentos para ser capturados por los núcleos para formar átomos.

### Historia térmica del Universo:

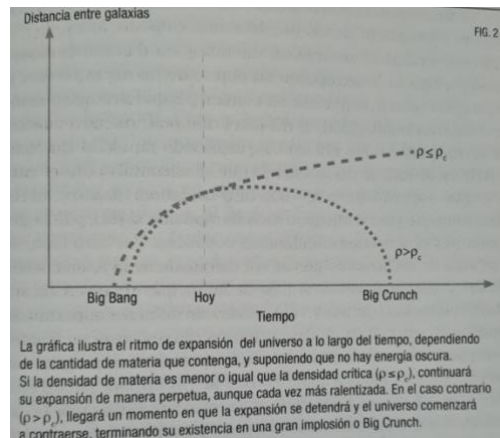
Las ecuaciones de Friedman:  $\frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G\rho}{3}$ , completadas con la descripción física de los constituyentes del cosmos, permiten explicar cómo ha evolucionado el universo (en modelos homogéneos e isótropos) desde su origen hasta la actualidad. La idea esencial es que en un universo en expansión, la densidad de energía (cantidad de energía por unidad de volumen) de cualquier constituyente (exceptuando la energía oscura) disminuye con el tiempo, y también su temperatura característica. Es decir, cuando el universo se expande, se enfría. Por lo tanto, si damos marcha atrás en el tiempo, nos encontraremos con un medio cada vez más caliente y también más denso. Gracias a nuestro conocimiento actual de la física de partículas y la física atómica, somos capaces de extrapolar hacia el pasado la evolución del universo, hasta una pequeña fracción del primer segundo justo después del Big Bang.

La densidad de energía existente en el momento actual esta denominada por la energía oscura, que da cuenta de un 68,5% del total; la materia oscura constituye con un 26,6%, la materia ordinaria con un 4,9% y 0,009% de radiación electromagnética.

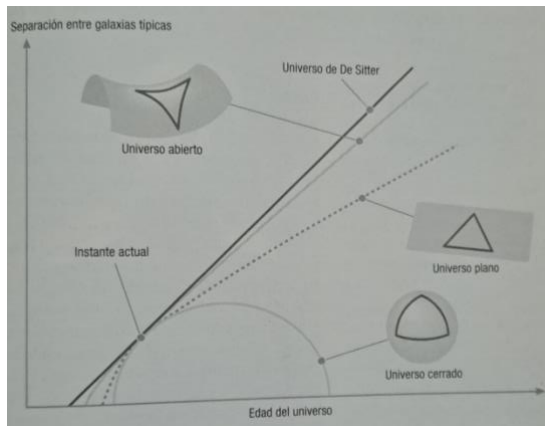
La energía oscura se caracteriza por tener una densidad de energía que es independiente de la expansión (en realidad, esto es estrictamente cierto si se trata de una constante cosmológica:

$\Lambda$ ). Sin embargo, el resto de los constituyentes disminuyen su densidad de energía con la expansión. Por lo tanto, cuanto más vayamos pasado, la energía oscura será cada vez menos importante, y por lo contrario, la materia y la radiación lo serán cada vez más. La teoría permite responder: en el futuro ¿el universo continuara expandiéndose al mismo ritmo? La principal ecuación de la relatividad general de Einstein, que describe cómo evoluciona el espacio y el tiempo en un sistema físico.

Recordemos que, según esa ecuación, la geometría del espacio-tiempo (y, por tanto, la forma espacial del universo y su evolución temporal) está determinada por la materia y la energía que contiene. La ecuación predice que para un universo lleno de radiación y materia (da lo mismo que sea ordinaria u oscura), el ritmo de expansión debe ralentizarse con el tiempo. (no estamos considerando todavía la posibilidad de que el universo contenga también energía oscura). Esto es bastante intuitivo. Las galaxias se alejan unas de otras por efecto de la explosión inicial, pero su atracción gravitatoria hace que la expansión se frene, igual que una piedra lanzada hacia arriba es frenada por la acción gravitatoria. De hecho, si la cantidad de materia fuera suficiente, la atracción gravitatoria sería tan grande que llegaría un momento en que el proceso se invertiría, y las galaxias retorcerían sobre sí mismas, como le sucedería a nuestra piedra anterior. Friedman demostró que el radio de curvatura del universo podía ser una función, creciente o decreciente con el tiempo. La magnitud que controla una u otra solución es la densidad media del universo. Todo depende de si la densidad de energía del universo  $\rho$ , es menor o mayor que la densidad crítica,  $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$ . Si fuera menor, el universo continuara eternamente en expansión, su geometría sería similar a la de una silla de montar y curvatura negativa,  $k=-1$ , *si bien cada vez mas ralentizada*. Si fuera mayor, llegaría un momento en que el espacio dejaría de estirarse y empezaría a contraerse: las galaxias se acercarían unas a otras y todo acabaría en una gran implosión “Big Crunch”, que marcaría en instante final del universo, su geometría será una superficie esférica, con curvatura positiva,  $k=1$ , y su tamaño será finito. Si fuera igual, su geometría sería plana, sin curvatura,  $k=0$ . (Figura 4 y 5).



al



Las dos curvas, representan dos posibilidades, deben coincidir en el momento actual (marcado como hoy) y también debe coincidir su pendiente, que refleja el ritmo en expansión que observamos. Sin embargo, si A:  $\rho > \rho_c$ , el ritmo de expansión en el pasado tuvo que ser mayor que si B:  $\rho < \rho_c$ , es decir, para A el Big Bang tuvo que ocurrir hace menos tiempo que B.

Consideremos ahora el punto de vista observacional. Naturalmente no podemos observar el futuro para comprobar si la expansión continuara eternamente o se producirá un Big Crunch.

Naturalmente, si el universo está acelerando su expansión, “algo falla” en el razonamiento teórico inicial, que predecían que la expansión debería frenarse. ¿Es que están mal las ecuaciones de Einstein?

#### Interpretación Teórica: energía oscura

Einstein modificó la forma original de sus ecuaciones, añadiendo un término a las mismas (llamado constante cosmológica) para que pudieran acomodar un universo estático; modificación de la que luego se arrepintió, cuando observó que el universo no era estático sino que se expandía. Lo asombroso es que la constante cosmológica es capaz de explicar porque el universo se expande aceleradamente. La ecuación modificada con el término de la constante cosmológica es:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = -8\pi GT_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} \quad (1)$$

No vamos a precisar el significado de los símbolos de esta ecuación, pero se observa que en el miembro de la derecha se ha introducido un término adicional,  $\Lambda g_{\mu\nu}$ .  $\Lambda$  es la llamada constante cosmológica. Una interpretación de  $\Lambda$  es que contribuye a la cantidad  $T_{\mu\nu}$  (llamado tensor momento-energía), que representa la materia y energía del universo. Así la  $\Lambda$  puede interpretarse como una contribución constante a la densidad de energía del universo. Su significado físico es de una energía que se extiende de manera uniforme por todo el universo, incluso por los espacios aparentemente vacíos. Dado que no conocemos su origen, y ni siquiera si es exactamente constante, actualmente se prefiere la denominación energía oscura para referirse a esta misteriosa  $\Lambda$ .

Al resolver la ecuación (1) resulta:  $\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G(\rho + \frac{3p}{c^2})}{3} + \frac{\Lambda c^2}{3}$ , es decir, que el universo se expande acelerándose. Esto sucede por que  $\Lambda$  produce una repulsión gravitatoria, idea que ciertamente choca con nuestra intuición habitual de que la gravedad es siempre una fuerza atractiva. Hay que pensar que las ecuaciones de relatividad general implican que las fuerzas gravitatorias no son están originadas por la materia y la energía, sino también por la presión que esta materia y energía ejercen, lo que supone una modificación conceptual importante con respecto a la Ley de Gravitación de Newton. Y esto sucede si la presión es negativa, da lugar a una fuerza repulsiva.

Considerando el modelo de universo en el que exista solo materia (ordinaria y oscura) y radiación podemos encontrar una explicación a la aceleración de su expansión. Si consideramos una galaxia lejana a una distancia  $d$  de nosotros, según la ley de Hubble se alejara de la Tierra a una velocidad  $v = Hd$ . La distancia  $d$  tiene que ser una distancia de escala cosmológica, mayor que los mil millones de años-luz que representa el tamaño de las mayores estructuras del universo. Por un lado, todo el fluido (gas) de materia ordinaria, materia oscura (para mantener la estructura de la galaxia) y radiación que hay entre nosotros y esa galaxia ejerce una atracción gravitatoria sobre ella que tiende a hacer disminuir la velocidad con la que se aleja de nosotros. La atracción gravitatoria de ese gas es proporcional a la masa total del gas  $M$  contenida en un esfera de radio  $d$  centrada en nosotros e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia  $d$  que nos separa de la galaxia, es decir la atracción gravitatoria es proporcional a  $\frac{M}{d^2}$ . La masa se puede encontrar multiplicando la densidad del gas  $\rho$  por el volumen de la esfera, que es proporcional a  $d^3$ ; el resultado es que la atracción gravitatoria es proporcional a  $\rho \cdot d$ . Sin embargo, el resultado que es obtenido no es completo: en relatividad general la presión de un gas también genera gravedad. Es debido a que cuando un gas está a una cierta presión almacena energía. Como a toda energía le corresponde una masa ( $E = mc^2$ ), a la presión de un gas también le corresponde una masa que genera gravedad, de hecho, a una presión  $P$  le corresponde una masa equivalente igual a  $p/c^2$ . Cuando se hacen la cuentas según la relatividad general resulta que la atracción gravitatoria que experimenta la galaxia lejana que estamos considerando es proporcional a  $d(\rho + \frac{3p}{c^2})$ . El factor 3 que multiplica a la presión aparece durante los cálculos para llegar al resultado y se puede interpretar como una presión más eficiente generando atracción gravitatoria que una densidad de materia.

Como la densidad y presión son cantidades positivas, la atracción gravitatoria resultante es positiva y tiende a reducir la velocidad con la que se aleja de nosotros la galaxia.

En conclusión para poder explicar las expansión acelerada del universo necesitamos admitir que existe en el universo otro componente con el que no hemos contado y con tal combinación de valores de la densidad de energía y la presión que hace que la combinación de  $\rho + \frac{3p}{c^2}$  sea negativa para que su presencia produzca repulsión gravitatoria. Ese componente es la energía oscura. La causa concreta de esa energía es, por ejemplo, crear un espacio vacío (lleno de partículas virtuales) se necesita un costo energético.

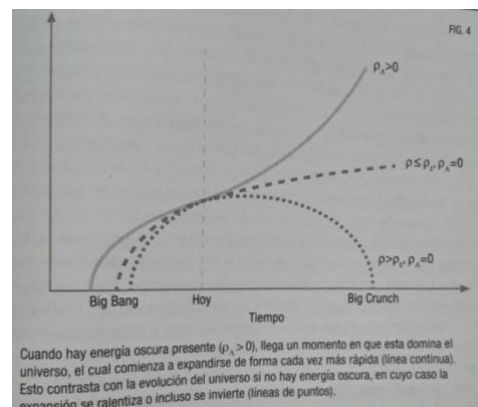
El universo de De Sitter, dominado por una constante cosmológica

Admitiremos que el valor de la densidad correspondiente a la energía oscura es  $\rho_v = \frac{\Lambda c^2}{8\pi G}$  tiene que ser positivo para crear un espacio vacío. Usando la equivalencia entre masa y energía el valor de la densidad de energía correspondiente a la energía oscura sería  $\rho_v c^2$ . El símbolo “v” hace referencia al vacío, ya que suponemos que la energía oscura es una energía asociada al espacio vacío.

Entonces para que  $\rho_v + \frac{3p_v}{c^2}$  tenga signo negativo es necesario que la presión de la materia oscura tenga un valor negativo. Un valor negativo en la presión indica que hay que hacer una fuerza hacia afuera para que no se contraiga sobre sí mismo.

También podemos ver que si en espacio vacío este lo “más vacío posible” aunque tenga una presión y una densidad de energía, entonces la densidad equivalente a la materia total sea cero, es decir, hacer que la presión  $p = -\rho_v c^2$ .

La existencia de la energía oscura hace que podamos predecir con solvencia el futuro del universo. Esto se representa en la figura (6), que es idéntica a la figura(4), pero tiene una línea adicional (la línea continua), que representa la evolución del universo cuando contiene una cierta densidad de energía oscura, llamada  $\rho_\Lambda$ .



Podemos observar que en el futuro la expansión continuara a un ritmo cada vez mayor. La evolución descrita por las líneas de puntos sería la real si no hubiera densidad de energía oscura,  $\rho_\Lambda = 0$ . Sin embargo las observaciones indican que la energía oscura está realmente ahí, con  $\rho_\Lambda > 0$ . Si el universo contiene energía oscura, el tiempo transcurrido entre el Big Bang (momento en el que la distancia entre galaxias es cero) y el momento actual es mayor que si no la hubiera. Si hay energía oscura, el cálculo indica que la edad del universo es de unos 13800 millones de años. Si no hay, el cálculo indica que la edad del universo es inferior a 12000 millones de años. Esto es interesante por lo siguiente: la edad del universo ha de ser mayor, lógicamente, que la de cualquier objeto que contenga. En particular, ha de ser mayor que la edad de las estrellas más viejas conocidas, que son las estrellas de los llamados cúmulos globulares (pequeñas aglomeraciones esféricas de estrellas en la periferia de la Vía Láctea). Esas estrellas tienen más de 12000 millones de años, por lo que si no hubiera energía oscura serían más antiguas que el propio universo, una situación inverosímil.

### Inflación:

En los años setenta del siglo pasado, el modelo del Big Bang se encontró con una serie de problemas conceptuales muy complejos de resolver. El reciente descubrimiento del fondo cósmico de microondas suponía una prueba sólida de la existencia de un pasado caliente para el universo, y una demostración de evolución del cosmos. Sin embargo, la homogeneidad de la radiación de fondo planteaba también una serie de problemas para el modelo:

Problema del horizonte: surge en el marco de un universo finito en el tiempo. Partimos de la base de que la velocidad de la luz es finita y representa, además, la velocidad máxima de

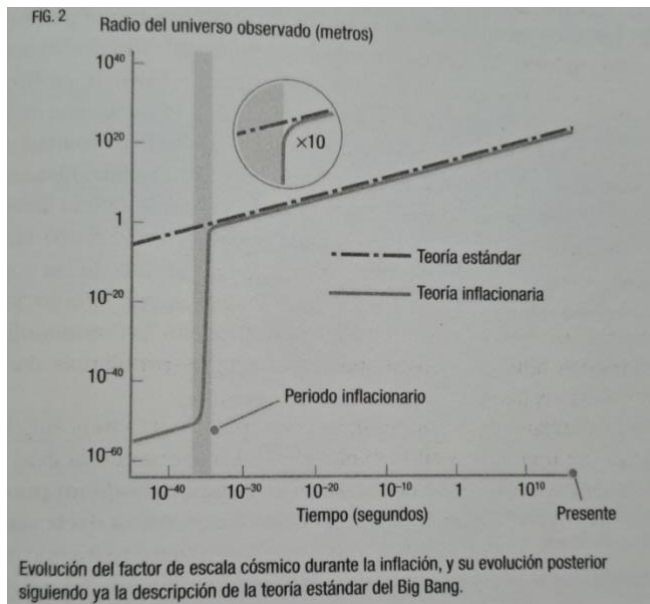


propagación de cualquier señal en la naturaleza. Por ello, para un tiempo  $t$ , medido desde el inicio de los tiempo (el Big Bang), desde cualquier posición del universo, existe una distancia máxima a la que ha podido viajar la luz y, por tanto, un tamaño máximo en el que ha podido estar en contacto físico o casual. Es decir que, a priori, dos puntos cualesquiera del universo que se encuentren más alejados de esa distancia concreta no habrán podido nunca intercambiar entre ellos ninguna señal. ¿Cómo pudieron “ponerse de acuerdo” en la misma temperatura de 2,725K esas regiones que, en principio, nunca han estado en contacto causal?

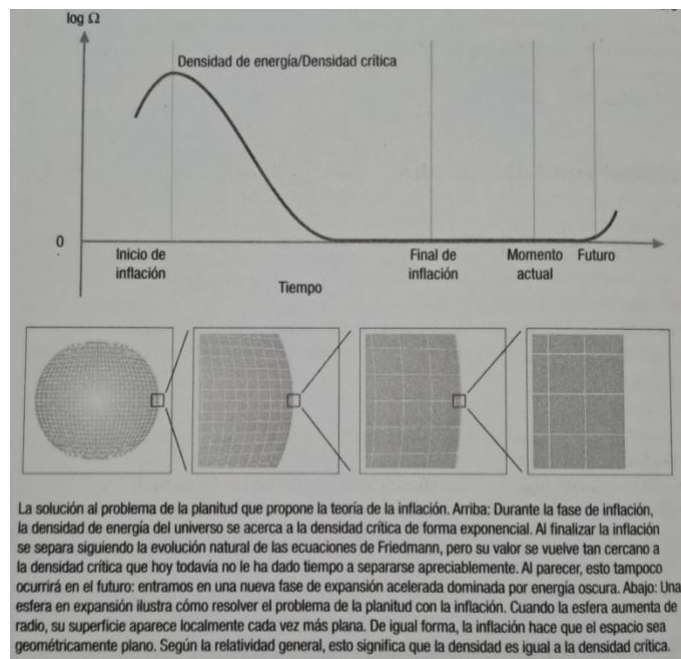
Problema de la planitud: estudiando las soluciones de Friedman a las ecuaciones de Einstein, se demuestra que la solución del universo plano, es decir, aquella en la que la densidad de energía del universo es igual a la crítica, es una solución inestable. Esto quiere decir que, si en cualquier instante  $t$  de la evolución del universo nos encontramos que la densidad total de energía,  $\rho(t)$ . Por lo tanto extrapolando hacia atrás en el tiempo, implica que al principio del universo la densidad de energía  $\rho$  tuvo que ser muy cercana a la densidad crítica. Por ejemplo, si en el momento actual la densidad de energía constituye el 80% de la densidad crítica, entonces en el momento de la nucleosíntesis, pocos minutos después del Big Bang, la densidad de energía tendría que diferenciarse de la densidad crítica en menos de una parte en diez mil billones ¿existe entonces un mecanismo físico que fija la densidad de energía al valor adecuado en el universo primitivo? ¿o es que, por alguna razón, el universo se ha generado con el valor justo de la densidad crítica?

Problema de los monopolos magnéticos: está relacionado con la fundamentación física de lo que ocurre cerca del origen del tiempo en un universo descrito por un modelo de Big Bang caliente. Extrapolando hacia atrás en el tiempo, en algún momento del pasado cerca del instante inicial, llegarían a darse las condiciones físicas de energía que sugieran las Teorías de Gran Unificación (GUT) en los años setenta. Estas teorías proponen una extensión del modelo estándar de la física de partículas para describir la unificación de tres de las fuerzas fundamentales de la naturaleza: la electromagnética, la fuerte y la débil. Una predicción inevitable de ese tipo de teorías era la generación de un tipo de partículas elementales hipotéticas llamadas monopolos magnéticos, que se comportarían como imanes aislados con un único polo magnético. Estos objetos exóticos jamás se han observado en la naturaleza. De haberse creado en el inicio del universo, esas partículas dominarían la densidad de energía en el momento actual por muchos ordenes de magnitud, con lo que el cosmos sería muy diferente a como lo conocemos hoy. En la actualidad, las teorías más recientes de física fundamental predicen otro tipo de partículas de esos instantes iniciales, como los gravitones que, esencialmente, producen el mismo tipo de problemas que los monopolos magnéticos.

El mecanismo de inflación es conceptualmente simple: se trata de una época en la evolución del universo en la cual el factor de escala  $a(t)$ , se acelera con el tiempo. Desde un punto de vista matemático, el término “inflación” equivale a decir “aceleración del factor de escala cósmico”. Sin embargo, para que eso ocurra durante una determinada época en la evolución del universo, es necesario que en ese momento se cumpla la desigualdad  $(\rho + \frac{3p}{c^2}) < 0$ . Para conseguir que esa combinación sea negativa, necesitamos que la presión sea negativa. Cuando se dan esas condiciones, el factor de escala del universo se expande de forma exponencial (figura 7). Tras esa breve fase de expansión acelerada, el cosmos continuara su expansión decelerada, tal como indican las ecuaciones de Friedman.



Una expansión tan rápida durante una pequeña fracción de segundo resuelve de forma natural los tres problemas que se habían planteado. Por un lado, este tipo de expansión descomunal “aplana” la curvatura del universo, acercando exponencialmente la densidad de energía a la densidad crítica, proporcionando así una solución al problema de la planitud (figura 8). El problema del horizonte se resuelve también de forma natural: todas las regiones que observamos en el mapa del fondo de microondas con la misma temperatura estuvieron en contacto causal antes de la inflación y, por tanto, tenían la misma temperatura. La inflación separó enormemente esas regiones, pero como la homogeneización ocurrió antes de la inflación, hoy día las observaciones con la misma temperatura. Por último, esa expansión tan dramática del factor de escala cósmico diluye en un volumen descomunal las posibles partículas de esas teorías GUT y, por lo tanto, hoy deberían ser indetectables por su densidad despreciable.



¿Cuánto debe durar la inflación para resolver estos problemas? Se puede usar como referencia el problema de la planitud para realizar esa estimación. Dada la edad actual del universo, de unos 138000 millones de años, el valor de la densidad total de energía al final de la inflación, en un tiempo  $10^{-34}$  seg, no podía diferenciarse en más de una parte de en  $10^{53}$  con respecto a la densidad crítica. De lo contrario, la densidad en el momento actual sería muy diferente a la crítica. Así que el factor de escala del universo debió crecer en la inflación, en un factor  $10^{26}$ .

Como se suele decir en cosmología, el cosmos creció en apenas una fracción de segundo desde un tamaño muchísimo menor que el radio de un átomo hasta el tamaño de un melón.

Nuestra visión actual del universo está recogida en el denominado modelo del Big Bang, y queda representada de forma esquemática en el figura 9.

