

Modelo Estándar de la Cosmología

¿El modelo del Universo?

Wembley Emmanuel Ibarra Tepato

Departamento de Física, Universidad Autónoma Metropolitana, México

wembleibarra@gmail.com — +54 (9) 11 2276 6711

1. Introducción

Una de las primeras observaciones de la cosmología fue que el contenido del cosmos parece distribuirse de manera homogénea e isotrópica (principio cosmológico). A partir de ello y de ciertas suposiciones, se ha logrado desentrañar la cronología del Universo; sin embargo, el avance en las observaciones muestra que los cimientos de este modelo estándar no coinciden con la realidad por lo que la motivación de este trabajo es presentar dichas contradicciones e interrogantes no resueltas.

2. Teoría general

2.1. Espacio-tiempo de FRW

La métrica de Friedmann, Robertson y Walker es una solución de la ecuación de campo de Einstein que representa la geometría que mejor se adapta al principio cosmológico y a las observaciones de la expansión del Universo. Este espacio-tiempo está dado por

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right]$$

donde $a(t)$ es conocido como el factor de escala, el cual es una medida de la tasa de crecimiento de las distancias en el Universo. La constante k representa el tipo de curvatura en el espacio pues si $k = 1$ el universo es cerrado, si $k = 0$ es plano y si $k = -1$ es abierto.

En ese sentido y bajo la suposición de que el contenido del cosmos puede ser modelado como un fluido perfecto, es posible englobar al tensor de energía-momento ($T_{\mu\nu}$) de la ecuación de Einstein en función de la presión del fluido (P) y la densidad de energía (ρ) que se distribuye entre la radiación (Ω_r), materia (Ω_m) y energía oscura (Ω_λ).

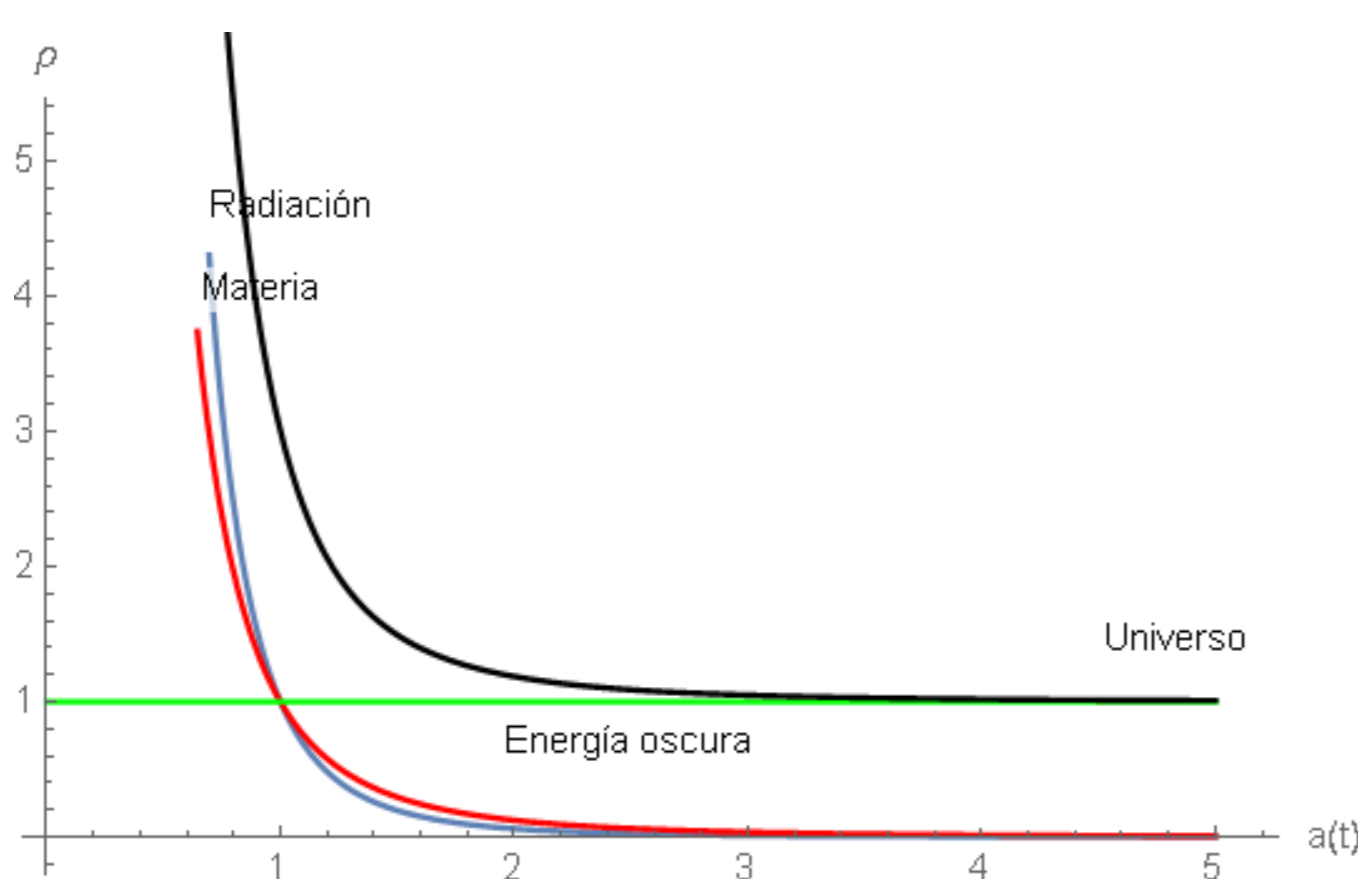


Figura 1: Densidad de energía del Universo a lo largo de su crecimiento

Así, es fácil ver que ρ disminuye a medida que el Universo se expande a menos de que la energía de vacío (consecuencia de la mecánica cuántica) sea la mayor parte de su contenido y que, además, en un futuro la radiación desaparecerá antes que la materia, lo que sugiere que al persistir la energía oscura, el cosmos entrará en un periodo de expansión acelerada sin límites.

2.2. Ley de Hubble

El análisis del corrimiento al rojo gravitacional que se origina como producto del efecto Doppler aplicado a un rayo de luz que es emitido por una fuente en la posición r al tiempo t y detectado en $r = 0$ al tiempo $t = t_0$ conduce a la expresión

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

donde z es la velocidad de recesión.

En el caso de una luz emitida a $t > t_0$ tal que se pueda aproximar $d \approx t_0 - t$ se satisface que

$$z \approx H_0 d$$

Esta ecuación se conoce como la ley de Hubble y establece una relación lineal entre la velocidad de las galaxias cercanas y su distancia a la Tierra a través de la constante $H_0 \equiv H(t_0) \approx 67,8 \text{ km/sMpc}$.

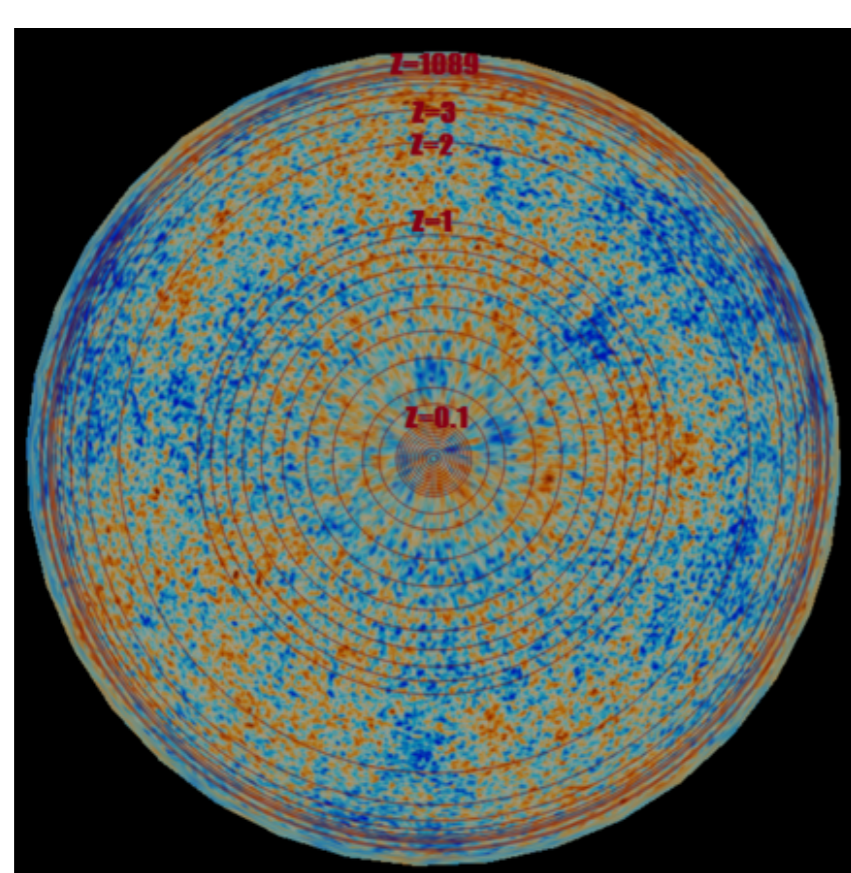


Figura 2: Fluctuaciones de temperatura por corrimiento al rojo en el CMB.

3. Contradicciones de la teoría

3.1. Universo plano

La teoría actual considera que, en sus orígenes, el Universo fue plano ($k = 0$) pues su contenido se puede caracterizar como materia o radiación. Curiosamente este modelo crece más rápidamente si contiene exclusivamente materia a que si solo contiene radiación, pero si H es lo suficientemente grande, entonces solo el caso de la energía oscura hace posible una expansión acelerada. Aquí es donde se encuentra la primera interrogante ya que dado que la evidencia indica que en el pasado ρ_λ no predominaba en el Universo, entonces ¿por qué justamente en la época actual si se presenta la situación contraria?.

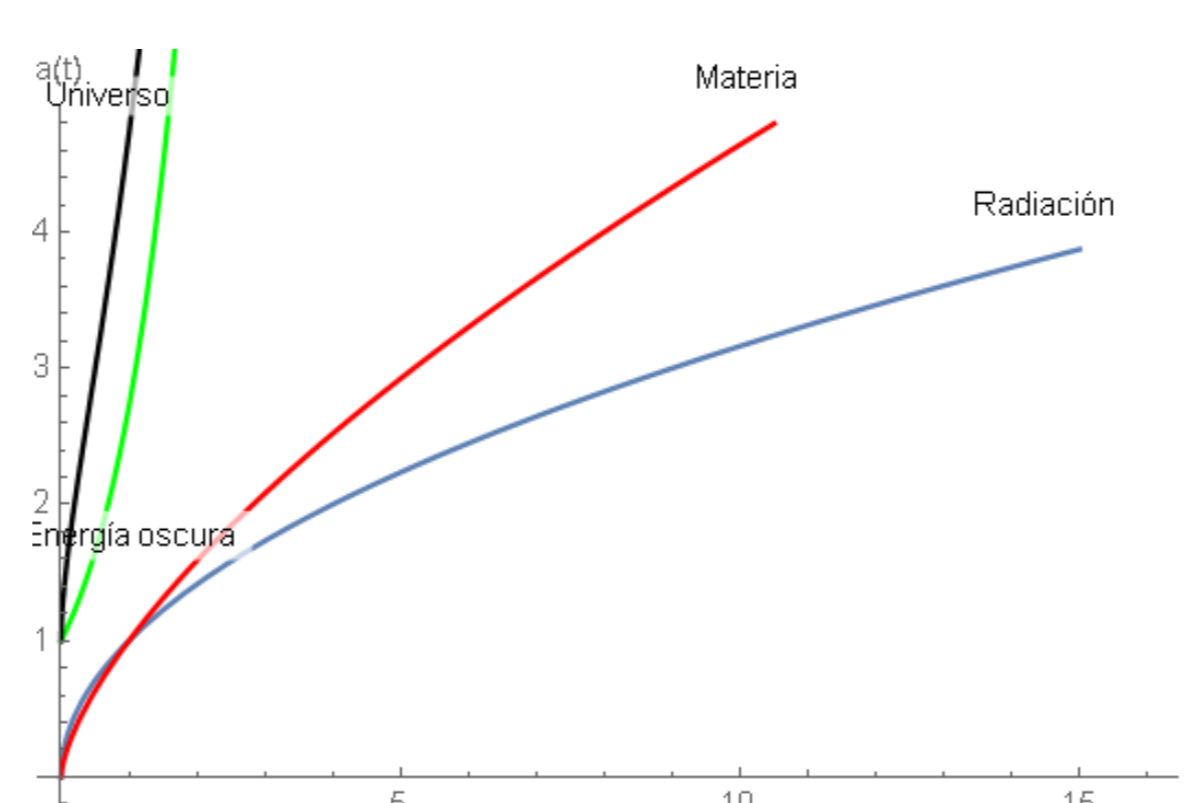


Figura 3: Tasa de crecimiento del Universo.

Este hecho también marca una seria contradicción (problema de planitud) a la hipótesis de que el Universo experimentó hace casi 14 mil millones de años un proceso de expansión exponencial con duración de aproximadamente 10^{-34} s y que permitió que la región observable del Universo escalara su tamaño entre 10^{25} y 10^{30} veces (inflación cosmológica).

3.2. Edad del Universo

Manteniendo la hipótesis de que Universo es y ha sido plano, se puede obtener la edad del Universo observable a través de las abundancias de energía y de materia. De esta forma

$$t(z) = \int_0^{\frac{1}{z+1}} \frac{dx}{H_0 \sqrt{\Omega_{0,r} x^{-2} + \Omega_{0,m} x^{-1} + \Omega_{0,\lambda} x^2}}$$

Las observaciones más recientes realizadas por la sonda Planck han revelado que dichas abundancias actualmente son $\Omega_{0,r} \approx 5,38 \times 10^{-5}$, $\Omega_{0,m} \approx 0,308 \pm 0,012$ y $\Omega_{0,\lambda} \approx 0,692 \pm 0,012$ por lo que la edad del cosmos resulta ser de $t_0 \equiv t(z_0 = 0) \approx 13,8 \times 10^9$ años.

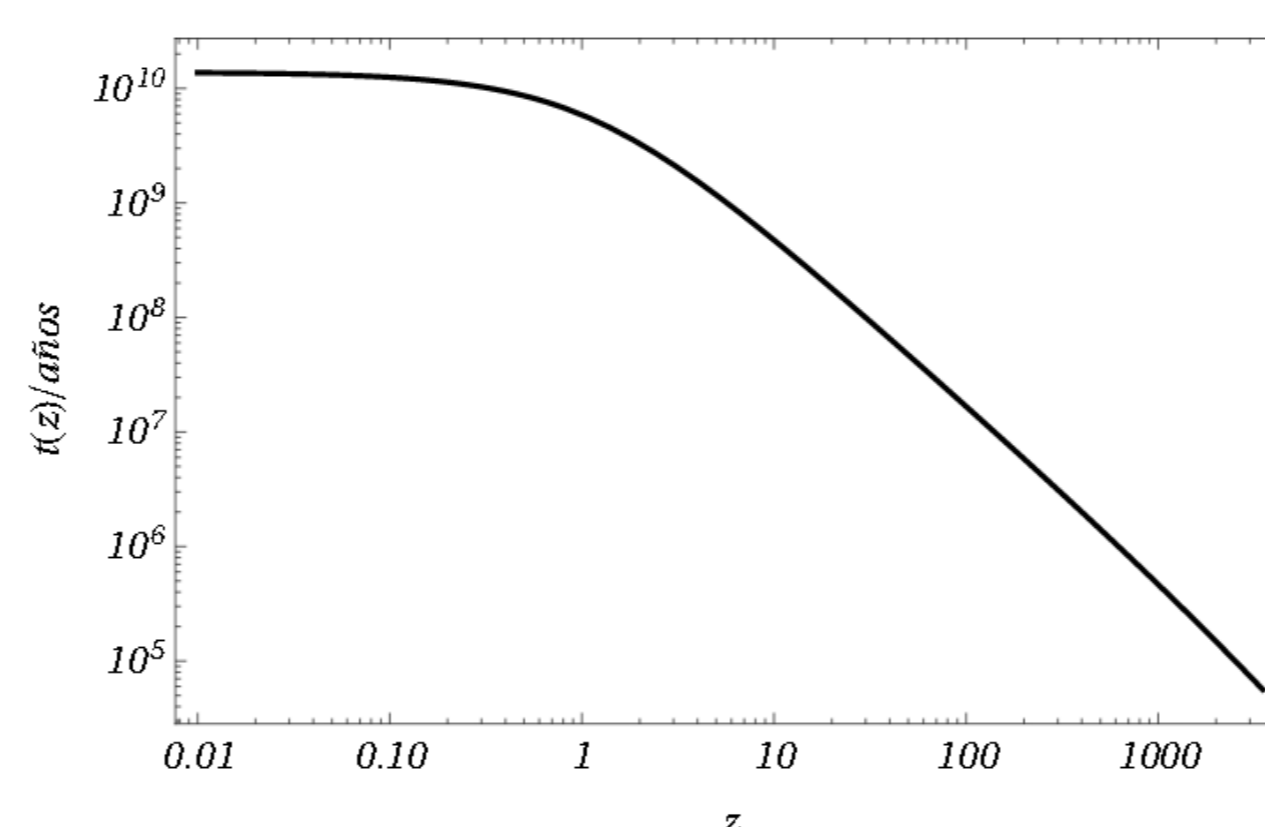


Figura 4: Edad en años del Universo para distintos valores de z con $t(0) = 1,8 \times 10^{10}$ años.

Uno de los principales problemas que enfrenta esta concepción es que el máximo corrimiento al rojo posiblemente detectable es alrededor de $t(3500) \approx 60000$ años, por lo que imposible saber que sucedió antes de ese instante. Esta limitación se debe a la radiación generada en épocas anteriores que era absorbida y reemitida por la enorme masa de partículas ultra-energéticas que habitaban el Universo, impidiendo que la luz se desplazara libremente en nuestra dirección. La única radiación que logró escapar y que hoy representa la fuente más importante que se tiene sobre el Universo temprano es la que se conoce como radiación cósmica de fondo (CMB por sus siglas en inglés); sin embargo, esta fue emitida en la época correspondiente a $z \approx 1100$.

Por otro lado, las mediciones de rayos X de cúmulos de galaxias han permitido notar que sólo un 16% de $\Omega_{0,m}$ puede vincularse con la materia bariónica ($\Omega_{0,BM}$) que emite y refleja luz, por lo que debe existir una materia oscura ($\Omega_{0,DM}$) que no se puede observar mediante telescopios. Así, uno de los mayores cuestionamientos de la cosmología es el origen y la naturaleza de esta materia oscura. Las propuestas actuales especulan que podría estar conformada por partículas elementales con masas frecuentemente por encima de las de todas las partículas ya conocidas.

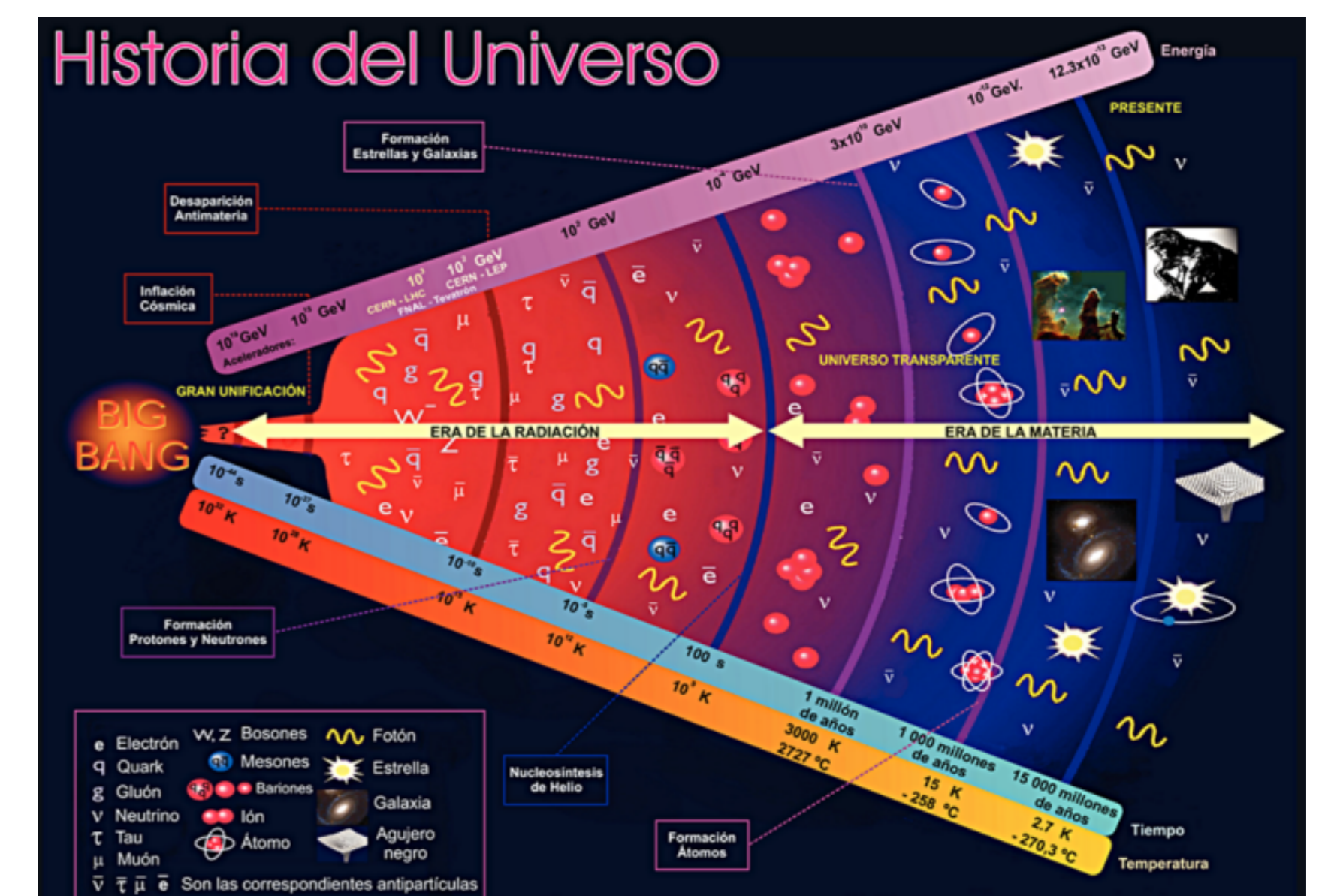


Figura 5: Breve cronología cosmológica.

3.3. Horizonte cosmológico

Las mediciones del CMB han mostrado que es bastante homogéneo lo que implica que, si bien hoy distintas regiones del cosmos no se encuentran en estado causal, debieron haber estado en contacto en el pasado. No obstante, ¿qué región del espacio-tiempo de FRW pudo estar en esta condición antes de la emisión del CMB? Para responder tal incógnita se tiene que definir al concepto de horizonte cosmológico ($h(t)$) como la mayor distancia a partir de la cual un observador puede recibir un rayo de luz emitido en el Universo de FRW.

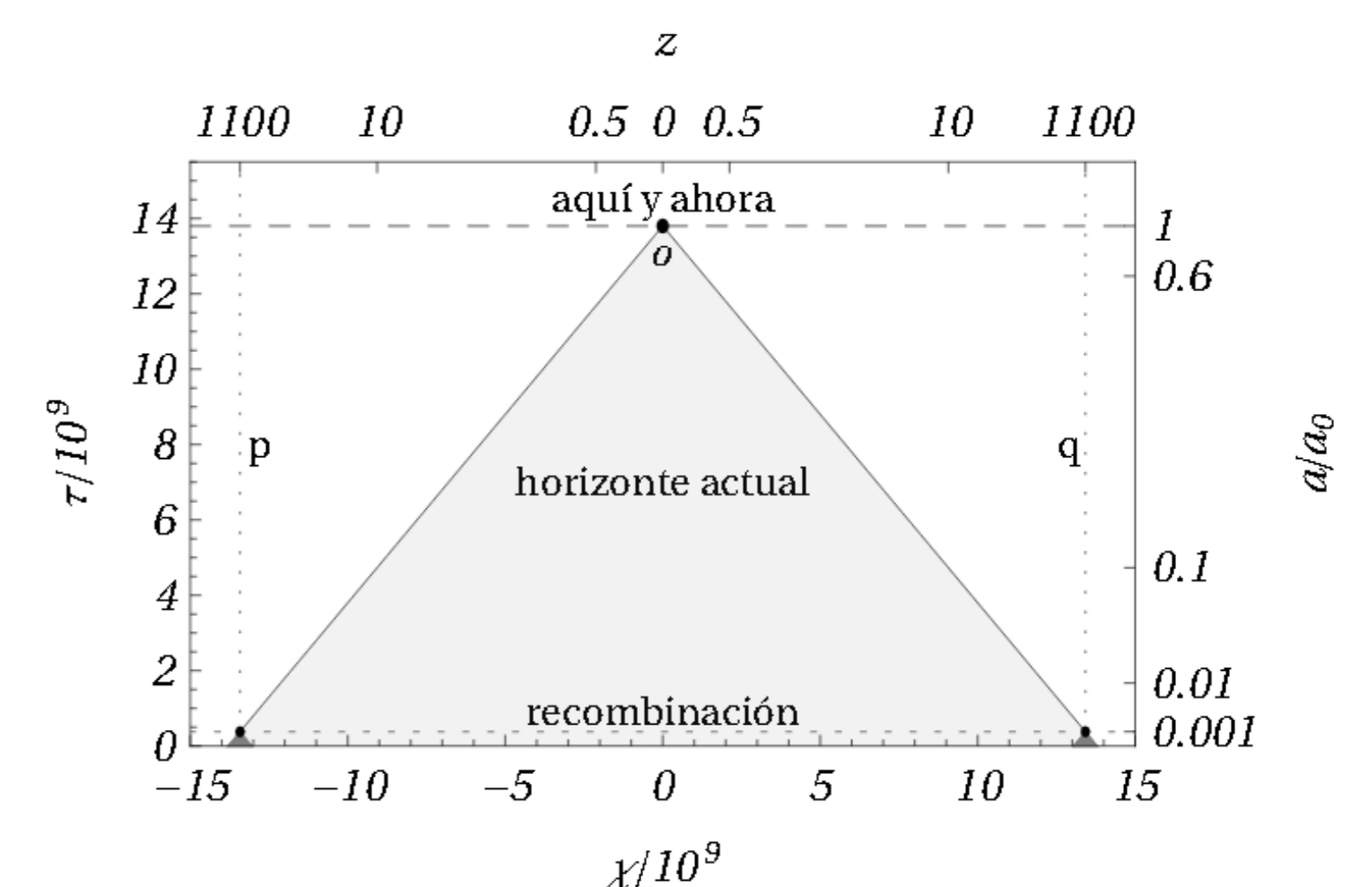


Figura 6: Horizonte cosmológico desde que se originó el CMB hasta hoy.

Tal y como se vislumbra en la anterior imagen, en el aquí y ahora están todas las partículas y eventos en una esfera de radio $h_0 \equiv h(t_0)$; sin embargo, podría existir otro observador distante con un panorama compuesto de diferente forma, lo que a su vez sugiere que cada observador tiene su propio horizonte de eventos y que sólo en la medida en la que estos observadores coinciden (cuando los horizontes se intersecan) pueden ambos tener una conexión causal. No obstante, debido al tiempo en el que se originó el CMB y a su factor de escala, se pueden apreciar regiones en las que el tiempo desde ese evento no es suficiente para que ocurra tal intersección. Por esta razón, uno esperaría que la radiación emitida entre estas regiones del CMB sin relación causal tengan temperaturas diferentes. Esto último da origen al problema del horizonte pues nada de lo anterior concuerda con las observaciones ya que dos regiones sin conexión causal (necesario para que se dé el equilibrio térmico) SI tienen temperaturas iguales.

4. Conclusiones

No cabe duda que en la concepción del modelo estándar de la cosmología definitivamente se deben revalorar las suposiciones que se han hecho con anterioridad o se tienen que encontrar los mecanismos físicos que permitan entender cada uno de los conflictos teóricos aquí mencionados y, muy probablemente, la solución a esos problemas exijan ir más allá de la misma cosmología hasta un punto en el que la física de partículas, la termodinámica y la gravedad cuántica entren en acción.

Referencias

- [1] Calahorrano Antonina y Marín Carlos. Edad del Universo y la densidad de energía de radiación. Universidad San Francisco de Quito, 2015.
- [2] Quiroz María de Jesús. Cálculo de la constante cosmológica y la edad del Universo. Universidad Nacional Autónoma de Honduras, 2021.
- [3] Ramos Sánchez Saúl. Relatividad para futuros físicos. Universidad Nacional Autónoma de México, 2019.