



Universidad
Zaragoza

Trabajo de Fin de Grado

MULTIVERSO

MULTIVERSE

Autor:

Ana del Molino Bello

Director:

Antonio Seguí Santoja

(Departamento de Física Teórica)

Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza

Febrero 2016

Índice general

1. Nuestro Universo	3
1.1. Los problemas de la Cosmología moderna	3
1.2. El nacimiento de la inflación	5
1.3. ¿Cómo funciona la teoría inflacionaria?	6
1.3.1. Resolución de los problemas	8
1.4. La Inflación Caótica eterna	8
1.4.1. Las fluctuaciones cuánticas y la autorregeneración	9
2. Caracterizando el Multiverso	12
2.1. El problema de la constante cosmológica	12
2.1.1. ¿Cuál es el problema?	12
2.1.2. Resolución del problema	13
2.2. Jerarquía en el multiverso	16
2.2.1. Nivel I. Los universos paralelos	16
2.2.2. Nivel II. Más burbujas	17
2.2.3. Nivel III. El mundo cuántico	17
2.2.4. Nivel IV. Más estructuras y posibilidades	18
2.3. Los “muchos mundos”	18
3. Conclusiones finales	20
Bibliografía	20
Índice de figuras	22

Capítulo 1

Nuestro Universo

Durante los años 60 la teoría del Big Bang se proclama como la teoría estrella en la explicación del origen de Universo. De acuerdo con ella, el Universo se habría generado a partir de una *gran explosión* en la que el espacio - tiempo habría surgido a partir de una singularidad, un único punto de alta densidad y temperatura. Sin embargo, en los años 70 aparecen una serie de problemas al relacionar el estado actual del Universo con el supuesto origen que esta teoría no es capaz de explicar, y que aún hoy suponen algunos de los retos de la Cosmología moderna.

1.1. Los problemas de la Cosmología moderna

Los satélites desarrollados por la NASA y la ESA desde 1989: COBE, WMAP (hasta 2008) y Planck (en la actualidad) han recopilado datos de la radiación cósmica de fondo y permiten reconstruir una imagen que proporciona un “mapa térmico” del universo temprano.

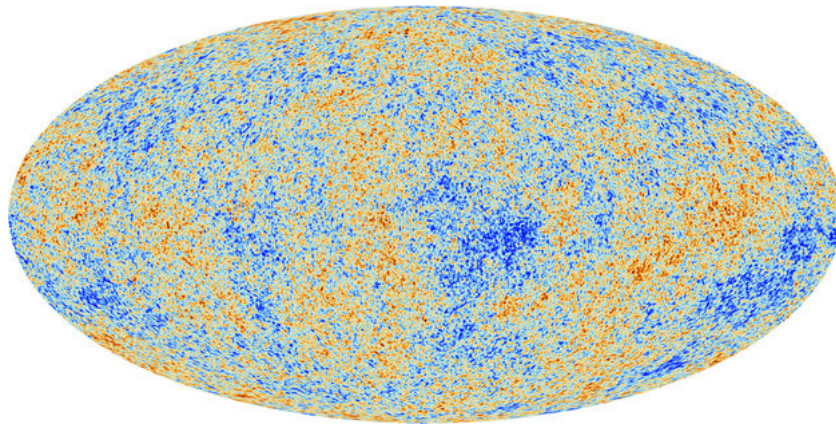


Figura 1.1: Imagen observacional del universo primigenio recogida por el satélite Planck hasta 2013.

Estas observaciones revelan que el universo observado presenta una gran homogeneidad; es decir, existen regiones extremadamente distantes que poseen las mismas propiedades físicas, y más en concreto, la misma temperatura. La temperatura media calculada a partir de estos datos es del orden de $T_0 \simeq 2,3^\circ K$, y las diferencias entre los puntos más calientes y más fríos aparecen en el quinto decimal, $\frac{\Delta T}{|T|} \lesssim 10^{-5}$. A priori esto puede no resultar problemático pero para que dos cuerpos o regiones se encuentren en equilibrio térmico es necesario que entre ellas haya existido contacto de alguna forma.

La teoría de la relatividad enunciada por Albert Einstein a principios del siglo XX establece que no existe mensajero más rápido que la luz, lo que significa que nada puede viajar a una velocidad superior. Sin embargo, el universo no es lo suficientemente antiguo como para que la luz haya podido conectar las regiones más aisladas igualando su temperatura. Esto es lo que en

Cosmología se entiende como el **problema del horizonte**, y es que el modelo del Big Bang no es capaz de explicar el porqué de un universo tan homogéneo.

El segundo de los problemas es el **problema de los monopolos**. La teoría del Big Bang predice que a temperaturas tan elevadas como las que se dieron en el universo temprano se producen una gran cantidad de partículas pesadas y estables entre las que se encontraría el monopolio magnético. Dada la estabilidad de estas partículas, deberían haber persistido durante la evolución del universo y dominarían energéticamente el universo actual pudiendo ser observadas, y sin embargo, aún no han sido detectadas.

El **problema de la planicie** es el último de los grandes problemas que se resuelven al abandonar la teoría del Big Bang y está relacionado con las conclusiones de las medidas actuales del universo que nos permiten asegurar con gran precisión que éste es espacialmente plano, es decir que la curvatura (espacial) es nula. El verdadero problema es que la curvatura del universo se relaciona con la densidad de energía, según las ecuaciones de Einstein empleando la métrica de FLRW (Friedmann - Lemaître - Robertson - Walker),

$$ds^2 = -dt^2 + R(t)^2 \left\{ \frac{dr^2}{1 - \kappa r^2} + r^2 d\Omega^2 \right\} \quad (1.1)$$

se considera que tanto la velocidad de la luz como la constante de Planck son igual a 1 ($c = \hbar = 1$). $R(t)$ es el factor de escala, $d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2$ es el diferencial de una esfera \mathbb{S}^2 de radio unidad, κ es la curvatura del espacio: nula si el espacio es llano, positiva si el espacio es esférico \mathbb{S}^3 o negativa cuando el espacio es pseudo-esférico \mathbb{H}^3 y las coordenadas polares tienen los siguientes límites:

$$r \in [0, +\infty) \quad \theta \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right] \quad \varphi \in [0, 2\pi] \quad (1.2)$$

La ecuación de Einstein, de forma general, es

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (1.3)$$

siendo $R_{\mu\nu}$ el tensor de curvatura de Ricci, R el escalar de curvatura de Ricci, Λ la constante cosmológica y $T_{\mu\nu} = (\rho + p)u_\mu u_\nu + p g_{\mu\nu}$ el tensor energía-momento expresado para un fluido ideal donde u_α son las cuadrivelocidades del fluido. Aplicada esta expresión a la métrica de Robertson - Walker:

$$\ddot{R}(t) = -\frac{4\pi G}{3} (\rho + 3p) R(t) \quad (1.4a)$$

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{\kappa}{R(t)^2} \quad (1.4b)$$

siendo ρ la densidad de energía, p la presión y H el parámetro de Hubble que se define como el cociente $\dot{R}(t)/R(t)$ y sirve como medida del ritmo de expansión del universo.

La segunda de las ecuaciones (1.4b) relaciona la densidad, curvatura y el ritmo de expansión del universo. Esto significa que para que actualmente se observe un universo plano (con $\kappa = 0$) es necesario un valor muy concreto de la densidad de energía, conocido como “densidad crítica ρ_c ”. Las condiciones necesarias para que el universo tras la “gran explosión” fuese espacialmente llano, de forma que se habría mantenido plano, son tan precisas como improbables. La otra opción es que las condiciones no hubieran sido las adecuadas, entonces necesariamente debe existir un mecanismo que permita que aún con otros valores de la densidad ρ la evolución lleve al universo al estado actual.

1.2. El nacimiento de la inflación

Con la aparición de estos problemas, la teoría del Big Bang no era suficiente para explicar el universo que observamos. Durante los años 80 se desarrollaron teorías que proponen una etapa de expansión acelerada en algún momento de la historia, en la que el universo habría crecido alrededor de 100000 billones de veces en apenas una milésima de segundo.

La evolución del universo puede dividirse en distintas etapas. Inicialmente, en lo que se conoce como “universo primigenio” las interacciones se encontraban unificadas en una única fuerza, es la etapa de *Gran Unificación*, GUT. El universo es entonces tan caliente (del orden de $T \gtrsim 10^{15} GeV$) y denso que los protones y electrones se encuentran separados moviéndose a altas velocidades; esto impide que los fotones se propaguen en línea recta a lo largo de grandes distancias pues interactúan con las partículas cargadas. A medida que el universo ($T \lesssim 10^{15} GeV$) se enfría las interacciones se separan según el modelo standard en la interacción electrodébil y la interacción fuerte. Durante esta transición de fase se producen, de forma masiva, los monopolos magnéticos.

El descenso de la temperatura lleva acompañado la disminución del movimiento de las partículas cargadas, con lo que las fuerzas de atracción entre ellas se hacen efectivas y dan lugar a los primeros átomos. Esta época se denomina **recombinación**. Los electrones apantallan el núcleo, con lo que el conjunto parece ser neutro y los fotones no interactúan con las cargas neutras. Es lo que se conoce como el desacople de la luz y la materia, que desde entonces evolucionan de forma diferente.

Desde el momento del desacople, los fotones pueden viajar por el vasto espacio durante millones de años hasta llegar a nuestros detectores. Este es el fondo de microondas. Las mediciones de la CMB muestran la gran homogeneidad e isotropía que entonces presentaba el universo. Las nuevas teorías acerca del origen y evolución del universo proponen un periodo inflacionario que habría tenido lugar en un momento muy anterior a este desacople de la luz y la materia.

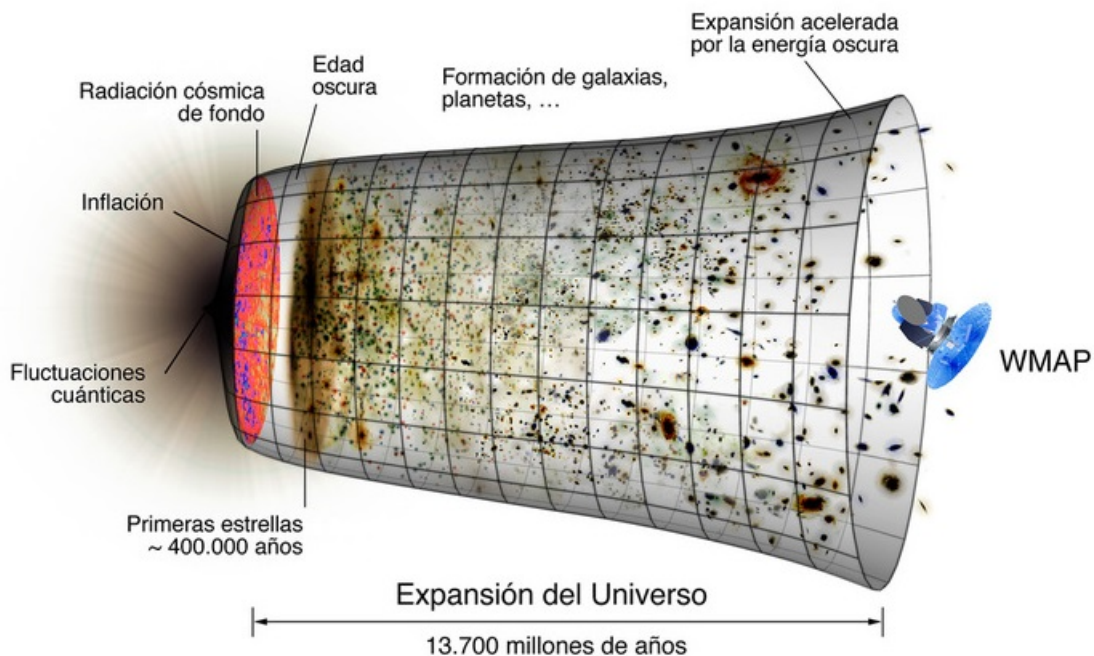


Figura 1.2: Representación de la evolución del universo.

Entre los primeros cosmólogos que trabajaron en una teoría inflacionaria destacan Alexei Starobinsky, Alan Guth y Andrei Linde. Las ideas inflacionarias se basaban en adoptar el universo como un fluido perfecto en el que la densidad del vacío podría representarse como

$$p = -\rho = cte \propto G\Lambda;$$

sin embargo, Starobinsky [18] proponía una constante cosmológica Λ dinámica, que dependiese del tiempo. Fueron las propuestas de Guth [6] y Linde [10] las que mayor repercusión tuvieron.

- ▷ Old Inflation. Desarrollada por Alan Guth en 1981 y basada en el *super - enfriamiento* durante la transición de fase cosmológica. El modelo no resultó válido porque daba lugar a un Universo inhomogéneo, pero sentó las bases para el desarrollo de nuevas teorías que se corresponden más con los datos observacionales.
- ▷ New Inflation. La teoría de Andrei Linde surge en 1982 como solución a los problemas que presentaba la teoría de Guth. Aunque sí solucionó algunos de los problemas, el modelo no resultó concluyente porque el universo resultante no concordaba con las observaciones. Sin embargo, otras teorías (incluso desarrolladas por el propio Linde) se basan en la idea de un potencial para el campo escalar $V(\phi)$ que propone la Nueva Inflación para explicar la expansión acelerada.

1.3. ¿Cómo funciona la teoría inflacionaria?

Desde las primeras teorías se asume la existencia de un campo escalar, denominado **inflatón** que, dado un universo homogéneo, inicialmente no puede depender de la posición, únicamente del tiempo (por tanto, también de la temperatura)

$$\phi(\vec{x}, t) \quad \rightarrow \quad \phi(t)$$

Además pueden definirse las expresiones para la densidad de energía ρ y la presión p , en función de este campo escalar:

$$\rho = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi) \quad p = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V(\phi) \quad (1.5)$$

Un modelo inflacionario se caracteriza por la forma de su potencial $V(\phi)$. Diferentes potenciales dan lugar a distintas expansiones del universo que pueden variar el comienzo, final y/o la radiación de fondo que producen. En la primera teoría, la **Old Inflation** de Alan Guth se propone un campo escalar que comenzaría en un estado en el que el potencial es prácticamente llano.

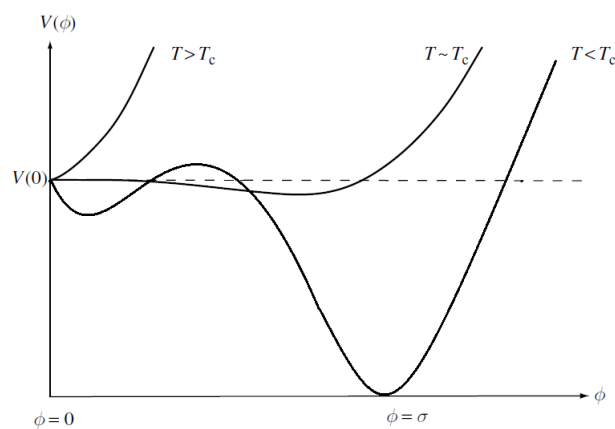


Figura 1.3: Evolución del potencial $V(\phi)$ con la temperatura.

Para que la inflación sea viable es necesario un potencial que presente un mínimo local en el que el campo escalar queda atrapado, es lo que se conoce como “falso vacío”. A medida que la temperatura disminuye, aparecen nuevos estados de mínima energía, que se denominan “vacíos verdaderos” separados de los mínimos locales por una barrera de potencial. En temperaturas por debajo de la crítica el sistema se encuentra en un estado de “falso vacío” pese a que existe un estado de mínima energía. Siguiendo la física clásica este estado

sería estable y no es posible solventar la barrera de potencial al no haber energía suficiente para alcanzar el mínimo local. Sin embargo, aplicando la física cuántica el sistema podría llegar al “vacío verdadero” mediante el efecto túnel cuántico.

El paso de un estado de vacío a otro no tiene lugar en todo el universo al mismo tiempo sino que se da en pequeñas regiones del espacio, es lo que se conoce como **nucleación de burbujas**. Durante esta transición de fase se crean de forma aleatoria burbujas que, según la teoría inflacionaria de Guth, deberían encontrarse y fusionarse una vez alcanzado el estado estable, conformando el universo que hoy se observa.

Sin embargo, los cálculos posteriores demostraron que estas burbujas no llegarían a encontrarse en el “vacío verdadero” y que su formación durante la transición de fase darían lugar a grandes inhomogeneidades que no son consistentes con las observaciones actuales. Como solución a estos problemas y a los del Big Bang, Andrei Linde propone la **New Inflation**, con un potencial $V(\phi)$ que presenta un *plateau* lo suficientemente plano como para que la inflación sea exitosa.

De igual manera que en la inflación de Guth, el universo se encuentra inicialmente en un estado de “falso vacío” y la transición hacia el estado de mínima energía tiene lugar por regiones, que dan lugar a distintas burbujas inflacionarias. Sin embargo, el paso al estado de “verdadero vacío” no se realiza por túnel cuántico sino por el decaimiento del campo escalar a lo largo de una suave pendiente del potencial $V(\phi)$. La transición desde la zona de *plateau* debe ser lo suficientemente lenta como para que las burbujas inflacionarias se expandan alcanzando un tamaño semejante al de nuestro universo, requisito que se conoce como **condición de Slow-Roll**.

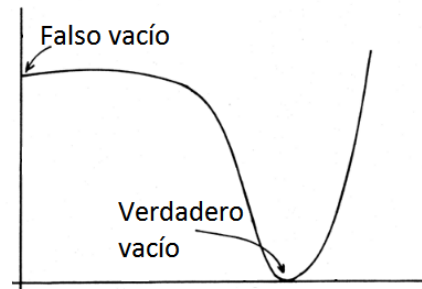


Figura 1.4: Potencial típico de “New Inflation”.

La inclinación del potencial entre los dos estados de mínima energía puede caracterizarse por dos parámetros, denominados parámetros de Slow - Roll y que se definen a partir de la pendiente y la curvatura de $V(\phi)$:

$$\epsilon(\phi) \propto \left(\frac{\dot{V}}{V} \right)^2 \quad \eta(\phi) \propto \frac{\ddot{V}}{V} \quad (1.6)$$

Algunas teorías consideran el universo como un fluido perfecto, en cuyo caso la densidad ρ puede escribirse como $\rho = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi)$ y llevarse a las expresiones del modelo de Friedmann (1.4). Así se obtienen las condiciones para un Slow - Roll adecuado,

$$\epsilon(\phi) \ll 1 \quad \eta(\phi) \ll 1 \quad (1.7)$$

Dado que en el estado de “falso vacío” el universo es altamente homogéneo, la expansión exponencial conservaría esta homogeneidad de manera que en la burbuja resultante no se podrían generar las estructuras que hoy en día se observan. Durante la caída hacia el “verdadero vacío” se suceden una serie de fluctuaciones (cuánticas) que generan pequeñas inhomogeneidades acordes con las observaciones y responsables de la generación de estructuras.

Son las dos primeras teorías, que sirvieron como base para el desarrollo de las nuevas versiones. En las próximas páginas se profundizará en algunas de las teorías inflacionarias más modernas que dan lugar al multiverso.

1.3.1. Resolución de los problemas

Las teorías inflacionarias resuelven los problemas que aparecen en la teoría del Big Bang. La idea original de una gran expansión acelerada evita la condición de que en un inicio el universo fuese espacialmente plano, pues aunque existiese cierta curvatura, la expansión rápida hace que la percepción que hoy en día existe de nuestro universo sea llana.

El problema del horizonte se soluciona de forma sencilla: las regiones que actualmente presentan las mismas propiedades físicas pero que se encuentran tan separadas que ni siquiera la luz ha podido viajar entre ellas estuvieron conectadas en el origen del universo y la expansión acelerada las separó bruscamente. Esto puede observarse en la figura contigua, los dos conos de luz de las zonas con propiedades similares se entrecruzan en un punto del pasado, es la inflación la que desconecta estas zonas.

Por último, el problema de los monopolos se resuelve de manera similar mediante dos supuestos. En primer lugar, aunque la creación de estas partículas pesadas fuese masiva en el origen, una expansión tan grande como la que proponen los modelos inflacionarios haría que la densidad de éstas fuese tan pequeña que hoy en día sería inapreciable. Y, además, la etapa en la que estas partículas se crean, conocida como la “etapa GUT”, coincide en el tiempo con el momento de la expansión, por lo que los monopolos se dispersarían a medida que fuesen creados.

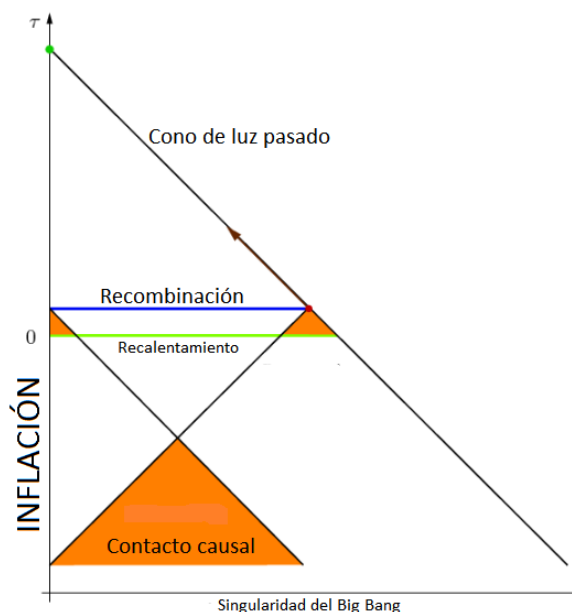


Figura 1.5: *Problema del horizonte.*

1.4. La Inflación Caótica eterna

La idea de la inflación caótica surge en 1983 de la mano de Andrei Linde, tan sólo un año después de haber presentado su primera teoría, la “New Inflation” como solución a los problemas que presentaba la teoría de Guth. Si bien, estas dos teorías sentaron las bases para el desarrollo de las teorías más modernas, teorías como la inflación natural o la inflación híbrida tienen como base la idea de la inflación caótica. La “New Inflation” resuelve algunos de los problemas de la teoría de Guth, sin embargo fue el propio Linde quien la descartó por ser aún muy complicada e inverosímil.

En esta nueva versión, no se exigen transiciones de fase, superenfriamientos ni debe asumirse el universo en un estado inicial muy caliente, solamente debe considerarse que en el universo primigenio existían todos los posibles valores y formas del campo escalar distribuidos a lo largo del espacio - tiempo y comprobar si alguno de ellos conduce hacia un proceso inflacionario. Es por ésta condición por la que la teoría recibe el nombre de **inflación caótica**: el universo primordial se divide en distintas regiones o dominios que poseen diferentes valores del campo escalar, determinando su evolución.

El modelo caótico presente un potencial en forma de parábola, dado por $V(\phi) = \frac{1}{2}m^2\phi^2$, que

llevado a las expresiones (1.4) del modelo FLRW las transforma en,

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} = -m^2\phi \quad (1.8a)$$

$$H^2 + \frac{\kappa}{R^2} = \frac{8\pi G}{6} (\dot{\phi}^2 + m^2\phi^2) \quad (1.8b)$$

El valor del campo escalar en el momento inicial determinará el desarrollo del dominio inflacionario; si el valor es muy pequeño nunca llegará a expandirse. Pero si sucede lo contrario y ϕ es muy elevado el dominio tendrá un periodo inflacionario.

Esta expansión rápida ($H \uparrow\uparrow$) continúa en el tiempo pero cada vez de forma más suave, es decir, existe un término de frenado que resulta ser más dominante que la propia aceleración de la expansión ($\ddot{\phi} \gg 3H\dot{\phi}$). Además, para que en el dominio inflacionario se produzcan las fluctuaciones necesarias para la creación de estructuras, el movimiento del campo escalar a lo largo de la caída del potencial debe ser muy lento, lo que se traduce en que $\phi \gg \dot{\phi}$. Condiciones que pueden aplicarse a las expresiones según

$$\left. \begin{array}{l} \ddot{\phi} \ll 3H\dot{\phi} \\ H^2 \gg \frac{\kappa}{R^2} \\ \dot{\phi}^2 \ll m^2\phi^2 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} 3H\dot{\phi} = -m^2\phi \\ H^2 = \frac{8\pi G}{6} m^2\phi^2 \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} H = \frac{\dot{R}(t)}{R(t)} = m\phi\sqrt{\frac{8\pi G}{6}} \Rightarrow H \propto m\phi \\ \dot{\phi} = -\frac{3}{m}\sqrt{\frac{8\pi G}{6}} \Rightarrow \dot{\phi} \propto \frac{-1}{m} \end{array} \quad (1.9)$$

Las dos últimas expresiones determinan que la expansión del dominio inflacionario es exponencial y dependiente tanto del tiempo como del campo escalar y su masa,

$$R(t) \propto \exp(Ht) \propto \exp(m\phi t) \quad (1.10)$$

y que ésta terminará cuando el valor de ϕ , que se deduce disminuye con el tiempo ($\phi \sim \phi_0 - \frac{t}{m}$), sea lo suficientemente pequeño.

Así como los modelos anteriores no eran capaces de obtener un dominio inflacionario con un tamaño acorde al esperado al final de la inflación, en este modelo una región cuyo radio sea menor que la longitud de Planck* se expande hasta alcanzar un tamaño de $l \sim 10^{10^{12}} cm$ en apenas 10^{-35} segundos de inflación. Esta inflación tan inmensa como rápida consigue estirar las inhomogeneidades, dando lugar a un universo espacialmente llano y homogéneo a grandes escalas.

El universo primigenio se divide en una infinidad de regiones en las que la distribución de los valores del campo escalar es caótica. Una región del espacio - tiempo con valor del campo escalar ϕ grande se desarrollará como un dominio inflacionario expandiéndose hasta alcanzar un tamaño superior al del universo observable ($10^{28} cm$). Esto significa que no todo el universo tuvo que evolucionar al mismo tiempo, ni siquiera tuvo que tener un mismo comienzo. De manera que la inflación caótica elimina la necesidad de un “Big Bang” como origen.

1.4.1. Las fluctuaciones cuánticas y la autorregeneración

Una expansión tan grande como la que propone el modelo caótico destruye cualquier tipo de inhomogeneidades presentes en el dominio primigenio, lo cual impide la creación de estructuras de gran escala, como las galaxias, que se observan hoy en día. La solución son las **fluctuaciones cuánticas**, variaciones en el campo escalar que tienen lugar durante el proceso de expansión y que, si bien el universo final es homogéneo e isótropo, permiten pequeñas inhomogeneidades para la formación de estructuras.

*Longitud de Planck, $l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \sim 10^{-33}$ centímetros

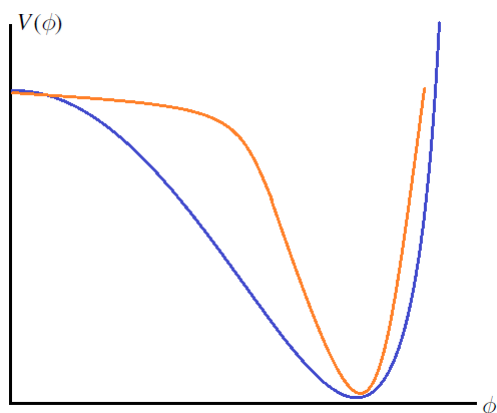


Figura 1.6: $V(\phi)$ con distintas formas de *Slow - Roll*.

Estas fluctuaciones tendrían lugar durante la caída del campo escalar desde el “falso vacío” al “verdadero vacío” en el proceso que denominamos *Slow - Roll*. La cantidad o la forma de estas fluctuaciones dependerán de la forma del campo, así un potencial cuya caída hacia el mínimo sea más pronunciada dará lugar a un descenso más rápido del inflatón y por tanto menor cantidad de fluctuaciones. Las diferentes pendientes del potencial $V(\phi)$ darán lugar a diferentes inhomogeneidades y, en consecuencia, a distintas estructuras de gran escala.

Además de durante el proceso de *Slow - Roll*, las fluctuaciones cuánticas pueden aparecer cuando el dominio inflacionario se esté expandiendo o se haya expandido afectando al campo escalar en alguna región espacial. Estas fluctuaciones sobre el inflatón son las responsables de la creación (o no) de nuevos dominios que inflacionarán dando lugar a nuevas burbujas.

Si las fluctuaciones son suficientemente grandes pueden aumentar localmente el valor del potencial $V(\phi)$ en algunas regiones dentro del propio dominio inflacionario. Estos aumentos de la energía potencial, aunque no son altamente probables, suponen un incremento de la densidad de energía en algunas regiones que se expandirán mucho más rápido que los dominios de los que provienen. Es decir, dentro de un dominio inflacionario pueden crearse otros nuevos que se expandan velozmente; en lo que se denomina **proceso de autorregeneración**.

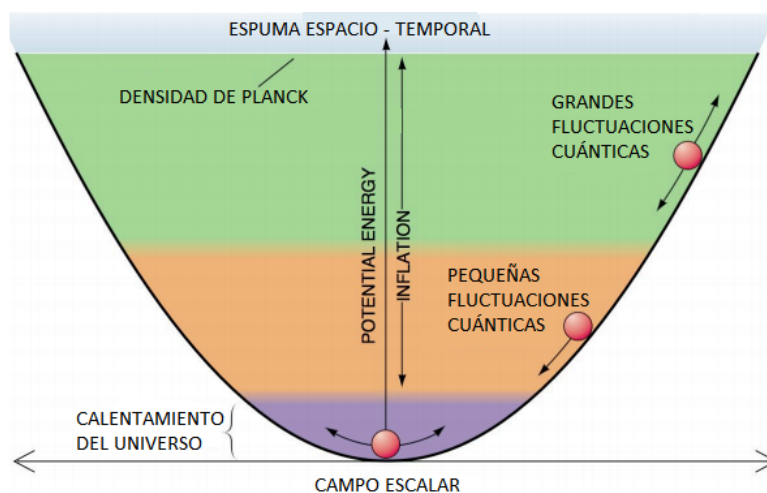


Figura 1.7: Representación del campo escalar en el potencial del modelo caótico.

Dentro de las posibles fluctuaciones se distinguen tres regiones según el proceso que desencadenan. Una zona inmediatamente inferior a la densidad de Plack, donde las fluctuaciones son grandes y darían lugar a nuevas burbujas inflacionarias dentro del dominio. Una zona intermedia, donde aunque más débiles, las fluctuaciones seguirían permitiendo la autorreproducción del universo; y una última zona cerca del mínimo del potencial $V(\phi)$ en la que el campo escalar permanece oscilante entorno a este mínimo calentando el universo sin generar nuevos dominios.

El potencial puede presentar varios mínimos locales, las fluctuaciones cuánticas pueden conseguir que el campo escalar cambie de mínimo de potencial. Esto supone un cambio en las leyes de interacción entre las partículas o, incluso podría variar el número de dimensiones del espacio tiempo.

En definitiva, tras un proceso inflacionario, el universo queda dividido en regiones exponencialmente grandes, cada una de ellas con sus leyes y constantes físicas. Además, las fluctuaciones cuánticas permiten que en cada uno de estos dominios evolucionen nuevas burbujas que pueden, o no, mantener las propiedades de su predecesor. El modelo produce un *(multi)-universo* de tipo fractal, en el que los dominios grandes podrán producir indefinidamente nuevos dominios que, a su vez, produzcan más burbujas inflacionarias.

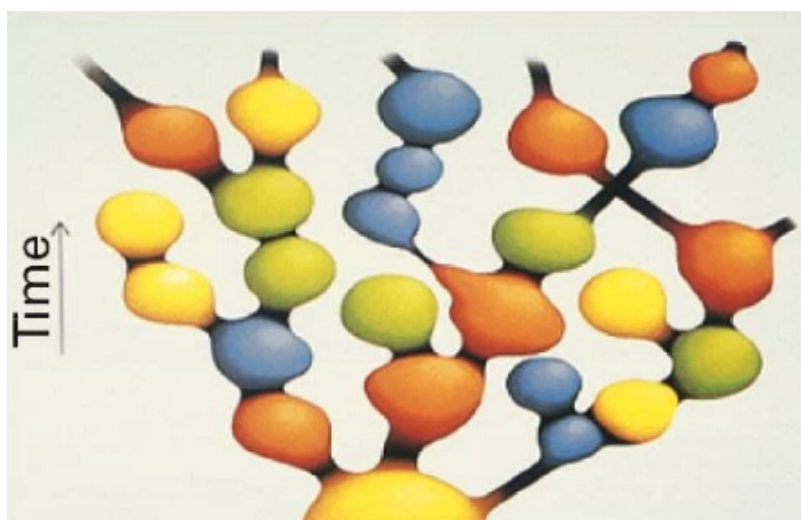


Figura 1.8: *Representación del universo resultante de un modelo inflacionario caótico, eterno y autorregenerante.*

La imagen superior representa la evolución de un primero dominio inflacionario a partir del cual aparecen nuevas burbujas o dominios creando así un entramado de burbujas inflacionarias. Los cambios de color representan los cambios en las leyes físicas debido a las fluctuaciones cuánticas que han modificado el “estado de vacío” de alguno de los campos escalares.

Se ha considerado un modelo inflacionario que, aunque caótico, es sencillo: sólo un campo escalar ϕ con un único mínimo de potencial. Pero existen modelos de partículas elementales que presentan gran variedad de potenciales, dependientes de más de un campo escalar y que poseen más de un mínimo de energía o estados de vacío. Distintos estados de vacío darán lugar a distintas evoluciones del dominio inflacionario, diferentes formas en las que las interacciones fundamentales se separan y, en consecuencia, diferentes leyes físicas.

Capítulo 2

Caracterizando el Multiverso

2.1. El problema de la constante cosmológica

Cuando, a principios del siglo XX, Albert Einstein desarrolló la teoría de la Relatividad General se encontró con el problema de conciliar esta nueva teoría con los conocimientos disponibles del universo. Entonces se consideraba que el universo era estático, no se expandía ni contraía, por lo que las ecuaciones de Einstein no eran válidas tal cual estaban desarrolladas. Por ello añadió, ad hoc, un término que compensaba la gravedad y que aceptaba la solución del universo estático: la **constante cosmológica**, Λ^* .

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

Años después Edwin Hubble descubrió que el universo está en continua expansión estudiando los datos de Henrietta Leavitt acerca del movimiento de nebulosas y estrellas. Observó como la mayoría de los espectros de las nebulosas presentaban corrimiento al rojo, que sólo podía explicarse suponiendo que se alejaban de la Tierra. Hubble concluyó que la nebulosas fuera de nuestra galaxia se alejaban, y lo hacían más rápido cuanto mayor fuese su distancia a la Tierra; esto sólo tiene sentido si todo el universo se está expandiendo. Los estudios posteriores sobre supernovas en galaxias lejanas demostraron que el universo no sólo se está expandiendo sino que lo hace de forma acelerada. [16]

La observación de Hubble hizo que Einstein se replantease sus ecuaciones llegando a asumir que la constante cosmológica había sido el “mayor error de su vida”. Sin embargo, la constante cosmológica no desapareció de las ecuaciones de Einstein sino que permaneció como un problema teórico y observacional.

En la teoría de Einstein el espacio - tiempo está caracterizado por la densidad de energía y el tipo de materia que contiene; para que esta teoría sea capaz de explicar la ya contrastada aceleración del universo es necesario que exista algún tipo de energía que sea el motor de esta aceleración, que domine la energía total y que no se diluya con la expansión: es la energía oscura, que puede entenderse como una constante cosmológica, Λ .

2.1.1. ¿Cuál es el problema?

El verdadero problema de la constante cosmológica es la diferencia que existe entre los valores deducidos de diversas teorías, ρ_{Λ}^{th} y el valor observacional, ρ_{Λ}^{obs} : alrededor de 120 órdenes de magnitud:

$$\rho_{\Lambda}^{th} \sim 10^{120} \cdot \rho_{\Lambda}^{obs}$$

*En la literatura puede encontrarse la constante cosmológica referida como $\Omega_{\Lambda} \equiv \rho_{\Lambda}/\rho_c$ en términos de densidad de vacío y la densidad crítica $\rho_c = 3H^2/8\pi G$ además de como Λ

No existe, al menos de momento, una única teoría capaz de explicar o dar cuenta de la constante cosmológica, sino que debe trabajarse con varias. Una de las formas de abordar el problema es la “naturalidad”, sin recurrir a ajustes finos permite deducir que la densidad de energía de vacío, ρ_Λ debe ser menor que la densidad de Planck: $\rho_\Lambda \lesssim \rho_P$ donde $\rho_P = \frac{M_P}{l_P^3}$, siendo $M_P = l_P^{-1**}$; y entonces

$$\rho_P \sim (M_P)^4 \sim (10^{19}\text{GeV})^4$$

Otra teoría, basada en la mecánica cuántica es la “teoría cuántica de campos”, que trabaja con vacíos cuánticos donde continuamente se crean y aniquilan electrones e^- y positrones e^+ . Y obtiene el mismo resultado que la anterior, $\rho_\Lambda \lesssim \rho_P$.

El valor experimental se deduce a partir de los datos recogidos mediante tres observaciones,

- * CMB. Los radiación de fondo de microondas (ver Figura 1.1), las fluctuaciones térmicas y las medidas de la densidad de materia del universo permitieron deducir que la materia (visible y oscura) conforma tan solo un 31,7 % de la densidad crítica ρ_c . [5]
- * Supernovas lejanas, en particular las de tipo 1A. Estas supernovas tienen la particularidad de que se forman generalmente a partir de una enana blanca que “roba” materia a una gigante roja, hasta que se produce una explosión en la que la energía liberada es siempre la misma (salvo pequeñas variaciones). Tomando el brillo de una supernova como un número standard bien conocido, puede calcularse a partir de los brillos de las supernovas observadas cuál es su distancia. [16]
- * BAO. Oscilaciones acústicas de bariones. En el universo primitivo, los protones y electrones no estaban ligados lo que mantenía la luz acoplada a la materia en un plasma a altas temperaturas. La propia gravedad comprime regiones de este plasma hasta que la radiación responde con una expansión de la región. Estas continuas compresiones y expansiones de pequeñas zonas del plasma se convierten en ondas de presión, que al enfriarse el universo consiguen comprimir la materia suficiente para formar las semillas que darán lugar a las futuras galaxias. Estos datos junto con la CMB permiten vislumbrar la evolución del universo.

2.1.2. Resolución del problema

En el artículo de 1989 [24], Weinberg estudia los valores que puede tomar la constante cosmológica basándose en las observaciones y en la teoría de la relatividad. A nivel experimental, Weinberg parte de la ecuación de Einstein (1.3), tomando $c = 1$ y distinguiendo que existen dos partes diferenciadas, la contribución geométrica, todos los términos situados a la izquierda de la ecuación; y la material, la parte derecha,

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

y asume que Λ debe ser positiva, de manera que puede relacionarse la densidad de energía con la constante cosmológica como $\rho = \frac{\Lambda}{8\pi G}$. Pero además, cualquier contribución a la energía de vacío puede actuar como una constante cosmológica, lo que le obligó a considerar un valor efectivo Λ_{eff} como la suma de un término geométrico y una contribución $8\pi G\rho$, de la materia.

$$\Lambda_{eff} = \Lambda_G + \Lambda_M = \Lambda + 8\pi G\rho \quad \Rightarrow \quad \rho_V = \rho_G + \frac{\Lambda_M}{8\pi G} = \frac{\Lambda_{eff}}{8\pi G} \quad (2.1)$$

**Recordamos que se toma $\hbar = c = 1$, entonces $M_P = 1/\sqrt{G}$

Los datos recogidos sobre el corrimiento al rojo de galaxias iniciado por Hubble, proporcionan un límite superior para el valor de la densidad de vacío ρ_V a partir del valor obtenido del parámetro de Hubble $H_0 \sim 10^{-10}$ años. La ecuación de Hubble (1.4b) puede reescribirse como,

$$\dot{R}^2 = -\kappa + \frac{1}{3}R^2\rho_V = -\kappa + \frac{1}{3}R^2(8\pi G\rho + \Lambda) \quad (2.2)$$

considerando que el universo es espacialmente llano, $\kappa \sim 0$ y $\frac{\kappa}{R^2} \lesssim H^2$, deduciendo rápidamente

$$\left. \begin{array}{l} \rho_V = \frac{\Lambda_{eff}}{8\pi G} \\ \rho_V = \frac{3}{8\pi G}H^2 \end{array} \right\} \Rightarrow \rho_V^{obs} \sim \frac{H_0^2}{G} \sim 10^{-47} \text{GeV}^4 \quad (2.3)$$

Obteniendo un límite superior para la constante cosmológica. Por otra parte, Weinberg emplea la validez de la relatividad general de Einstein hasta la escala de Planck para calcular el valor teórico. Para ello establece un *cutoff* con un valor máximo del momento $K_{max} \sim M_P \gg m$ e integra

$$\langle \rho \rangle = \int_0^\infty E_0 dE_0 = \int_0^{k_{max}} \frac{1}{2} \hbar \sqrt{k^2 + m^2} \frac{4\pi k^2}{(2\pi)^3} dk \sim k^4|_0^{M_P} \sim M_P^4 \quad (2.4)$$

tomando $\Lambda \simeq 1/\sqrt{8\pi G}$, y obteniendo:

$$\rho_V^{th} \sim M_P^4 \sim 10^{71} \text{GeV}^4$$

Steven Weinberg fue de los primeros cosmólogos en estudiar los valores de la constante cosmológica que permitirían que en el universo existiesen las galaxias, estrellas y todas las estructuras observadas que dan lugar a la “vida inteligente”. Llegó a determinar un conjunto de valores permitidos, entre $\Lambda_{min} < 0$ y $\Lambda_{max} > 0$ basándose en el principio medioambiental o principio antrópico que se conoce como ventana antrópica, $-10\Lambda^{obs} \lesssim \Lambda \lesssim 10^2\Lambda^{obs}$. Aleksandr Vilenkin consiguió afinar un poco más esta ventana de valores ajustando el límite superior a $10\Lambda^{obs}$.

Para conseguir resolver el problema de la constante cosmológica se necesitan tres componentes,

1. **Landscape.** Un gran conjunto de vacíos con diferentes valores de la constante cosmológica Λ . En alguno de ellos, dado que hay infinidad de vacíos, el valor corresponderá al valor observado, Λ_{obs}
2. **Mecanismo para poblar.** Se necesita de un procedimiento por el que todos los vacíos sean explorados. Este mecanismo puede ser la Inflación Eterna, desarrollada ampliamente en la sección 1.4; por el cual de una burbuja inflacionaria pueden generarse otras nuevas con distintos valores de Λ como consecuencia de las fluctuaciones cuánticas.
3. **Criterio de selección.** Debe existir alguna forma de discriminar qué burbujas inflacionarias son viables para la vida. En concreto el principio antrópico o principio medioambiental establece que observamos el valor de Λ que observamos porque si fuese distinta no estaríamos aquí para observarla.

Landscape: conjunto de vacíos

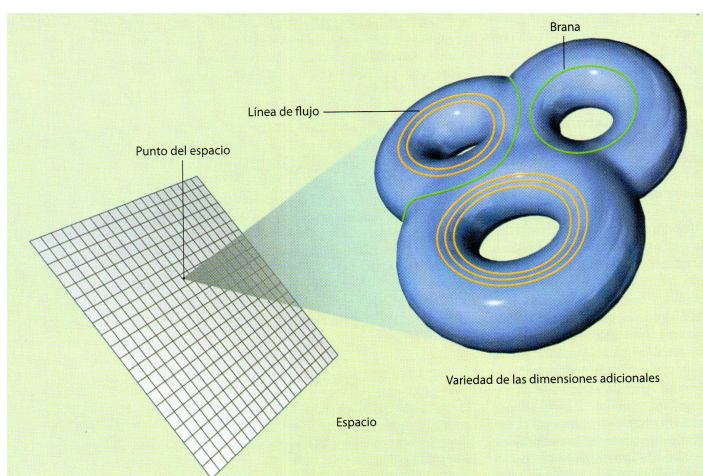
Existen distintas teorías que proporcionan un conjunto lo suficientemente amplio de vacíos como para que en alguno de ellos el valor de Λ sea el observado en nuestra burbuja. Una de estas teorías es la **teoría de cuerdas** que, además, se propone como el mejor candidato para explicar la naturaleza en general.

La teoría de cuerdas necesita más de 4 dimensiones espacio-temporales, como mínimo precisa de 10. Sin embargo, sólo somos capaces de ver las tres dimensiones espaciales más la dimensión temporal. Esto se debe a que las, como mínimo, 6 dimensiones restantes se encuentran compactificadas: es posible que estas dimensiones sean muy pequeñas para que sean detectadas a nuestra escala de energía.

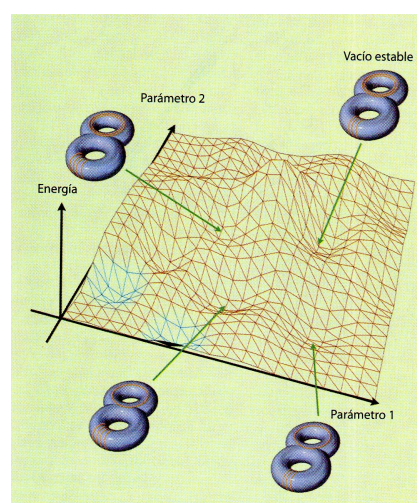
Esta idea no resulta complicada. Imaginemos un cable, como por ejemplo los de alta tensión. Vistos desde cierta distancia parecen ser unidimensionales, como líneas; sin embargo, si nos acercamos lo suficiente podríamos observar que son objetos bidimensionales en forma cilíndrica. Algo similar ocurriría con las 6 dimensiones que necesita la teoría de cuerdas.

En la teoría de cuerdas las partículas pasan de ser objetos puntuales a diminutas cuerdas extensas que en función de su vibración serán unas u otras partículas y producirán distintas interacciones. Por ejemplo, las partículas como los quarks son cuerdas abiertas, mientras que el gravitón sería una cuerda cerrada. Las branas, en cambio serían unas estructuras que llenarían el espacio y sobre las que se asentarían las cuerdas proporcionándoles propiedades físicas como la carga eléctrica o la carga de color.

Cada punto del espacio tetradimensional es realmente un toro, un toro triple o cualquier estructura geométrica. Sobre dicha estructura pueden encontrarse adheridas cuerdas o branas de distintas maneras: alrededor de uno de los anillos, sobre un toro, ... Y en cada vacío de este paisaje de cuerdas, los puntos tetradimensionales tienen estructuras y compactificaciones diferentes.



(a) Estados de vacío



(b) Paisaje de vacíos

Figura 2.1: Parámetros para el Landscape de la teoría de cuerdas.

El número de soluciones para el valor de la constante cosmológica que admite esta teoría es inmenso, se calcula que existirían hasta 10^{500} burbujas diferentes. Cada burbuja tiene una

probabilidad determinada de evolucionar mediante un periodo inflacionario, de manera que se formarán infinitas burbujas con todos los posibles valores para Λ .

El paisaje de la teoría de cuerdas es tan sólo un ejemplo, existen otros paisajes que resultan válidos como el **landscape de Einstein - Maxwell**, [3] y [17], donde junto a una parte no compacta existen un conjunto del orden de 10 esferas (S^2) en las cuales vive un campo magnético monopolar.

Mecanismo: la Inflación eterna

La inflación eterna, desarrollada en la sección 1.4, da lugar a un universo autorregenerante. Un conjunto de burbujas inflacionarias dentro de las cuales “crecen” nuevas burbujas que pueden mantener o no, en función de las fluctuaciones cuánticas, las constantes y leyes físicas del dominio del que provienen.

Criterio: el principio antrópico

El principio antrópico es un concepto que ha generado controversia desde su planteamiento, pues puede entenderse como “*las cosas son así porque no pueden ser de otra manera*”. Es decir, el universo que observamos es tal porque si fuese de otra manera no estaríamos aquí para observarlo.

Sin embargo esta explicación puede no resultar satisfactoria: el valor de la constante cosmológica es el que es porque de ser otro no podríamos existir. El propio Weinberg hace una analogía [23] con la situación de nuestro planeta: si la distancia al Sol fuera significativamente menor la temperatura sobre la superficie sería demasiado alta como para que exista agua líquida; y por el contrario, si la distancia fuese mayor, la temperatura de la Tierra sería demasiado fría. Que la distancia sea la que es porque no puede ser otra es algo que no sería aceptable de ser el nuestro el único planeta del sistema, pero dado que existen otros no resulta tan asombroso. Es más, incluso puede ser simple casualidad.

Algo así viene a explicar Weinberg con la constante cosmológica. El valor antrópico de Λ se explica porque existen infinidad de burbujas con todos los posibles valores de Λ .

2.2. Jerarquía en el multiverso

El cosmólogo sueco Max Tegmark propone [19] una taxonomía del multiverso distinguiendo cuatro niveles, tres de ellos se engloban uno dentro del otro y el cuatro se encuentra dentro de los límites de la física cuántica.

2.2.1. Nivel I. Los universos paralelos

El horizonte cosmológico o universo observable se define como la parte visible dentro del universo total. Actualmente tiene un radio del orden de 10^{26} metros y establece el límite de observación espacial del universo. Todo aquello que se encuentre más allá de esta barrera permanece invisible a nuestros ojos. Este primer nivel de los multiversos comprende todo aquello que se encuentre más allá del horizonte cosmológico. Se trata del nivel menos controvertido puesto que supone aceptar que existe “algo” más allá de lo que nuestros detectores son capaces

de ver, pero que podría detectarse cambiando el punto de observación.

El nivel está basado en la consideración de que el universo es espacialmente llano e infinito pero que la materia se confina en regiones dando lugar a un modelo de *universos isla*. Aunque a priori pueda parecer que la mayoría de estos universos isla están vacíos, los datos observacionales revelan la uniformidad a grandes escalas, es decir el universo que se encuentra más allá del radio observable debe rebosar de estructuras tipo galaxias y estrellas.

En los universos de nivel I las leyes físicas se mantienen de uno a otro pero pueden variar las condiciones iniciales. Son universos esencialmente idénticos al nuestro, cuyas diferencias se deben a cambios en la distribución de materia. El propio Tegmark afirma que la inflación predice una gran cantidad de universos con las mismas partículas, fuerzas y leyes físicas que el nuestro; pero que la forma en la que se crean las grandes estructuras varía entre ellos.

Una sencilla cuenta realizada por el cosmólogo sueco [19] argumenta que nuestro universo alberga sitio para alrededor de 10^{118} partículas subatómicas. El número de combinaciones distintas que podrían darse en un universo aleatorio es enorme, del orden de $2^{10^{118}}$; pero dado que las observaciones predicen un universo infinito, es posible que en algún punto las combinaciones se repitan, dando lugar así al **universo paralelo**.

2.2.2. Nivel II. Más burbujas

Este nivel es la consecuencia directa de la inflación eterna [13]. Según esta teoría el espacio entre universos sigue expandiéndose y formando un número ilimitado de nuevos universos con propiedades muy diferentes. Cada uno de los universos de nivel II contiene un número infinito de burbujas de nivel I, que mantienen las mismas leyes y constantes físicas aunque podrían variar las condiciones iniciales. Entre las burbujas del nivel II, en cambio, pueden variar desde las constantes físicas hasta el número o formas de las dimensiones espacio - temporales.

Estos dominios, inmersos en un espacio vacío en continua expansión nunca llegarán a conectarse, pues la velocidad con la que se expande el vacío es tan grande que ni tan siquiera viajando a la velocidad de la luz podrían alcanzarse. Desde su creación estas burbujas de nivel II han estado desconectadas, sus procesos de nucleación, de ruptura de la simetría o el desacople de las interacciones fundamentales, han tenido lugar de maneras distintas, lo que las hace independientes unas de otras.

Aunque inicialmente pueda parecer que las burbujas de este nivel no lleguen a cruzarse existen estudios [9] que consideran que si dos burbujas “nacen” lo suficientemente juntas y se expanden rápidamente es posible que puedan superar la velocidad de expansión del vacío y colisionar. Estas colisiones dejarían marca en forma de puntos calientes en la radiación de fondo de microondas que podrían observarse. Dichas medidas supondrían una demostración de la existencia del multiverso.

2.2.3. Nivel III. El mundo cuántico

Es el nivel más comprometido y complicado de asimilar. Así como los anteriores niveles se encuentran más allá de los límites actuales de observación, éste es el más próximo a nosotros. Es fruto de la mecánica cuántica, que revolucionó la física desde principios del siglo XX, y es la consecuencia de la interpretación de los “muchos mundos” que acepta esta novedosa teoría [4].

Esta teoría propone el universo en un estado que es una superposición de varios estados, modelados por un objeto matemático conocido como función de onda y cuya evolución sigue la ecuación de Schrödinger. El problema fundamental de este nivel es conseguir conectar estas funciones de onda con las observaciones. Existe un postulado según el cual la función de onda colapsa, reduciéndose a algún resultado clásico cada vez que se hace una observación; esto significa que cada vez que se haga una observación, sólo se está detectando uno de los muchos estados en los que está el universo.

En sí el nivel III no añade nada nuevo, sólo añade copias indistinguibles de los universos de los niveles I y II. En relación a este nivel se encuentra la teoría de los *Muchos Mundos* de Hugh Everett de la que se hablará a continuación.

2.2.4. Nivel IV. Más estructuras y posibilidades

El último nivel requiere una gran capacidad de abstracción, pues es un conjunto de universos donde se acepta cualquier posibilidad y que está gobernado por las matemáticas y la probabilidad. Si los niveles I y II variaban las condiciones iniciales o las constantes físicas, en este nivel se aceptan variaciones tales como universos en los que no existan procesos cuánticos sino que toda la naturaleza esté gobernada por la física clásica, universos en los que el tiempo no sea una magnitud continua, sino que esté discretizada, etc.

El nivel IV considera que existe simetría matemática completa. Esto significa que cualquier estructura matemática existe físicamente y constituye un universo. De manera que se acepta la existencia de universos en forma de toro, hélice o cualquier otra geometría representados esquemáticamente en la siguiente figura.

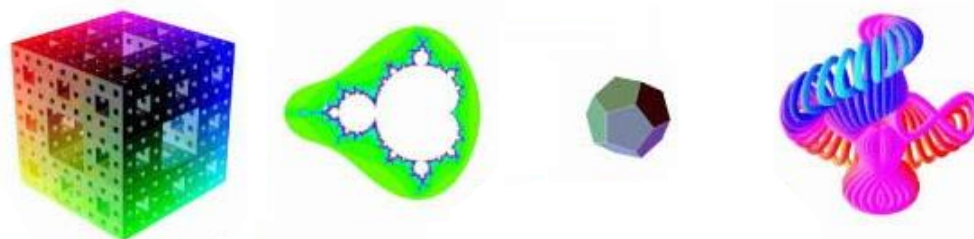


Figura 2.2: Estructuras geométricas que serían al forma de otros universos de nivel IV.

2.3. Los “muchos mundos”

A partir de los años 20 se desarrolla una de las grandes ramas de la física: la mecánica cuántica, que pretende abordar la física en escalas microscópicas. Max Tegmark considera universos cuánticos dentro de su clasificación del multiverso; sin embargo, no es el mismo concepto que propone Everett.

Hugh Everett era estudiante en la Universidad de Princeton durante los años 50 cuando comenzó a desarrollar su teoría. Todo empezó durante un debate con sus compañeros acerca de las “ridículas implicaciones de la mecánica cuántica”. Everett trata el problema en las mediciones, la contradicción que surge en el comportamiento de las partículas a nivel microscópico y a nivel macroscópico. En el mundo cuántico las partículas se encuentran en una superposición de

Capítulo 3

Conclusiones finales

La explicación del origen del universo siguiendo el Big Bang presenta diversos problemas que obligan a modificar la teoría. Los tres problemas más relevantes: la planicie, el horizonte y los monopolos se resuelven con un periodo inflacionario durante el cual el espacio-tiempo se habría expandido exponencialmente. La inflación caótica eterna, propuesta por Linde en 1983 resuelve estos problemas dando lugar a un conjunto de universos burbuja estructurados de forma ramificada: en una burbuja pueden aparecer nuevos dominios inflacionarios que se desarrollarán de forma independiente. Por lo tanto, el multiverso no es más que el resultado del proceso inflacionario.

La existencia de muchos universos facilita la resolución del problema de la constante cosmológica proporcionando una infinidad de escenarios en los que el valor de Λ puede tomar cualquier valor. Además, se aplica el principio antrópico para seleccionar qué valores de Λ darían lugar a la vida y se deduce que el valor que observamos podría ser simple casualidad, dado que existen universos con todos los posibles valores de este parámetro.

El multiverso, a su vez, puede dividirse o categorizarse en distintos niveles, tres en forma de jerarquía agrupados unos dentro de otros y un cuarto nivel situado en el mundo cuántico. Respecto a este último nivel, hemos visto que existe otra interpretación de la mecánica cuántica, los “muchos mundos” de Everett y que también da lugar a un multiverso mediante la bifurcación de la función de onda.

Bibliografía

- [1] BOUSSO, R. & POLCHINSKI, J., *El paisaje de la teoría de cuerdas*, Investigación y Ciencia 338 (Noviembre 2004)
- [2] BOUSSO, R. & SUSSKIND, L., *The Multiverse Interpretation of Quantum Mechanics* en <https://arxiv.org/abs/1105.3796>
- [3] BROWN, A. ET AL., *Compactifying de Sitter Naturally Selects a Small Cosmological Constant*, Phys. Rev. D 90, 124048 (2014)
- [4] BRYNE, P., *The Many Worlds of Hugh Everett*, Scientific American (Diciembre 2007) en <https://www.scientificamerican.com/article/hugh-everett-biography/>
- [5] ESA, *Planck revela un Universo casi perfecto* en http://www.esa.int/es1/ESA_in_your_country/Spain/Planck_desvela_un_Universo_casi_perfecto (Marzo 2013)
- [6] GUTH, A.H., *Inflationary Universe: A possible solution to the horizon and flatness problems*, Phys. Rev D23 (1981), 347 y en <http://journals.aps.org/prd/pdf/10.1103/PhysRevD.23.347>
- [7] GUTH, A. H., *Inflation*, en <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0404546v1>
- [8] HOBSON, LASENBY & EFSTATHIOU, *General Relativity: An Introduction for Physicists*, Cambridge University Press, 2006
- [9] KLEBAN, M., *Cosmic Bubble Collisions*, en <https://arxiv.org/pdf/1107.2593.pdf>
- [10] LINDE, A., *A New Inflationary Universe Scenario: A posible solution of the horizon, flatness, homogeneity, isotropy and primordial monopole problems*, Phys. Lett. B 108 (1982), 389
- [11] LINDE, A., *Chaotic Inflation*, Phys. Lett. B 129 (1983), 177
- [12] LINDE, A., *Inflation, Quantum Cosmology and the Anthropic Principle* en “Science and Ultimate Reality: From Quantum to Cosmos”, honoring John Wheeler’s 90th birthday. J. D. Barrow, P.C.W. Davies, & C.L. Harper eds. Cambridge University Press (2003)
- [13] LINDE, A., *El universo inflacionario autorregenerante*, Investigación y Ciencia 220 (Enero 1995)
- [14] LINDE, A., *A breif history of the multiverse*, en <https://arxiv.org/pdf/1512.01203v1.pdf>
- [15] MUKHANOV, V., *Physical foundations of Cosmology*, Cambridge University Press, 2005
- [16] RIESS, A. ET AL, *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant*, Astronomical Journal 116:1009-1038 (1998) <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/9805201v1.pdf>
- [17] SEGUÍ, A. & ASENSIO, C., *Consequences of Moduli Stabilization in the Einstein-Maxwell Landscape*, Phys. Rev. Lett. 110, 041602 (Enero 2013)

- [18] STAROBINSKY, A., *A new type of isotropic cosmological model without singularity*, Phys.Lett. 91B (1980) 99-102
- [19] TEGMARK, M., *Parallel Universe* en “Science and Ultimate Reality: From Quantum to Cosmos”, honoring John Wheeler’s 90th birthday. J. D. Barrow, P.C.W. Davies, & C.L. Harper eds. Cambridge University Press (2003) y en <http://arxiv.org/pdf/astro-ph/0302131.pdf>
- [20] VILENKIN, A., *Birth of inflationary universes*, Phys. Rev D27 (1983), 2848 y en <http://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.27.2848>
- [21] VILENKIN, A. & TEGMARK, M., *The case for Parallel Universes*, Scientific American (Julio 2011)
- [22] WEINBERG, S., *Gravitation and Cosmology. Principles and applications of the general theory of relativity*, John Wiley & Sons, Inc. 1972
- [23] WEINBERG, S., *The Cosmological Constant Problems* en <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0005265v1.pdf>
- [24] WEINBERG, S., *The cosmological constant problem*, Rev.Mod.Phys. 61, 1 (1989).

Índice de figuras

1.1. Imagen observacional del universo primigenio, datos de Planck hasta 2013. Fuente: ESA	3
1.2. Representación de la evolución del universo desde el Big Bang.	5
1.3. Evolución del potencial con la temperatura, basado en página 438 de [8]	6
1.4. Potencial típico de la “New Inflation” (Imagen propia)	7
1.5. Representación del problema del horizonte con los conos de luz. Fuente: Cuentos Cuánticos	8
1.6. Representación del potencial $V(\phi)$ con distintas pendientes de Slow - Roll (Imagen propia)	10
1.7. Representación del campo escalar en el modelo inflacionario, de [13]	10
1.8. Representación del cosmos autorregenerante, en [13]	11
2.1. Estados de vacío y landscape de la teoría de cuerdas, de [1]	15
2.2. Estructuras geométricas que conformarían distintos universos, de [19]	18
2.3. Bifurcación del universo en dos universos paralelos, de [19].	19