

# Transiciones de Fase en Cosmología

Rodrigo Herrera C.

Pontificia Universidad Católica de Chile  
Astronomía

## 1 Partículas Elementales y sus Interacciones

Durante el Siglo XIX, y partir de los trabajos de Faraday y Maxwell, quedo establecido que la forma más clara de describir la interacción entre cuerpos magnéticos y eléctricos era a través del campo electromagnético. Actualmente este formalismo se ha extendido a las cuatro interacciones conocidas entre partículas. Cada una de ellas es descrita por un campo y el quanta de este campo. En general, toda la materia que conocemos está formada por dos tipos de partículas elementales, leptones y quarks, los cuales son el quanta asociado a los campos de materia, mientras que las partículas responsables de las interacciones, el quanta de los campos de fuerza, corresponde a los bosones de gauge. Estos son: gravitón (gravedad), fotón (electromagnetismo),  $Z^0$ ,  $W^+$  y  $W^-$  (interacción débil) y, finalmente, gluones (interacción fuerte). De los bosones de gauge, los únicos masivos son aquellos asociados a las interacciones débiles. Las partículas elementales se diferencian en si interactuan a través de la fuerza fuerte (quarks) o si no lo hacen (leptones).

### 1.1 Ecuación de Klein - Gordon

Consideramos una campo escalar  $\phi(x)$  de spin cero. A partir de este campo estudiamos el Lagrangiano

$$L(\phi, \partial_\mu \phi) = (1/2)[\partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - m^2 \phi^2] \quad (1)$$

Si aplicamos las ecuaciones de campo al Lagrangiano  $L$  obtenemos la ecuación de Klein - Gordon

$$\partial_\mu \partial^\mu \phi - m^2 \phi = 0 \quad (2)$$

Esta ecuación describe una partícula de masa  $m$  y sin spin, que en este caso identificamos como el bosón de Higgs.

A partir del resultado anterior, resulta interesante estudiar la física de dos campos escalares reales,  $\phi_1$  y  $\phi_2$ , con la misma masa, cuyo Lagrangiano queda expresado por

$$L = (1/2)[\partial_\mu \phi_1 \partial^\mu \phi_1 - m^2 \phi_1^2] + (1/2)[\partial_\mu \phi_2 \partial^\mu \phi_2 - m^2 \phi_2^2] \quad (3)$$

Podemos introducir un campo escalar  $\Phi$  de tipo complejo tal que

$$\Phi = (1/\sqrt{2})[\phi_1 + i\phi_2], \Phi^* = (1/\sqrt{2})[\phi_1 - i\phi_2] \quad (4)$$

permita expresar el Lagrangiano  $L$  anterior en términos de  $\Phi$  y  $\Phi^*$  como

$$L(\Phi, \partial_\mu \Phi) = (1/2)[\partial_\mu \Phi^* \partial^\mu \Phi - m^2 \Phi^* \Phi] \quad (5)$$

Lo interesante de este Lagrangiano es que es invariante ante la redefinición de la fase de  $\Phi$ , revelando así una simetría interna para el campo escalar complejo. Es decir, ante la transformación de campo  $\Phi_* = e^{-i\alpha} \Phi$ , el Lagrangiano permanece inalterado,  $L(\Phi_*, \partial_\mu \Phi_*) = L(\Phi, \partial_\mu \Phi)$ . Se define entonces que el Lagrangiano tiene simetría  $U(1)$ .

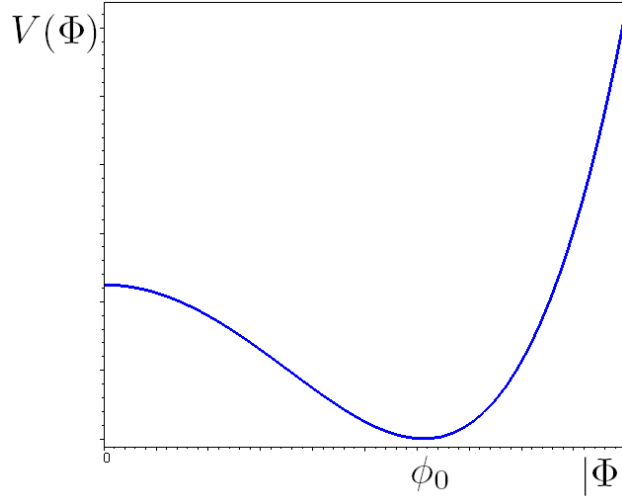
## 1.2 Ruptura Espontánea de Simetría

A partir del Lagrangiano para un campo escalar complejo libre (5), podemos extraer el potencial  $V(\Phi) = m^2\Phi^*\Phi$ , el cual es acotado por abajo si  $m^2 > 0$ . De esta forma, el estado de mínima energía cuando  $\Phi$  es constante en el tiempo y en el espacio es  $\Phi = 0$  y corresponde al estado de vacío. Este estado es la solución clásica en la que no hay partículas.

Si  $m^2 < 0$  el potencial no es acotado por abajo y se dice que el vacío es inestable. En este caso, la estabilidad del vacío se recupera si agregamos una interacción cuántica del tipo  $-1/2 \frac{m^2}{\phi_0^2} (\Phi\Phi^*)^2 - 1/2 m^2 \phi_0^2$  al potencial  $V(\Phi) = m^2\Phi^*\Phi$ , donde  $\phi_0$  es una constante arbitraria. Completando cuadrados obtenemos que

$$V(\Phi) = \frac{m^2}{\phi_0^2} [\Phi\Phi^* - \phi_0^2]^2 \quad (6)$$

por ende, ahora el estado de vacío está definido en  $(|\Phi|)^2 = \phi_1^2 + \phi_2^2 = \phi_0^2$ . Por lo tanto, existen infinitos mínimos que yacen en una circunferencia en el espacio definida por  $\phi_1$  y  $\phi_2$ .



**Figura 1.** Gráfico de  $V(\Phi)$  versus  $(|\Phi|)^2$ , en el que se aprecia el mínimo situado en  $(|\Phi|)^2 = \phi_0^2$ .

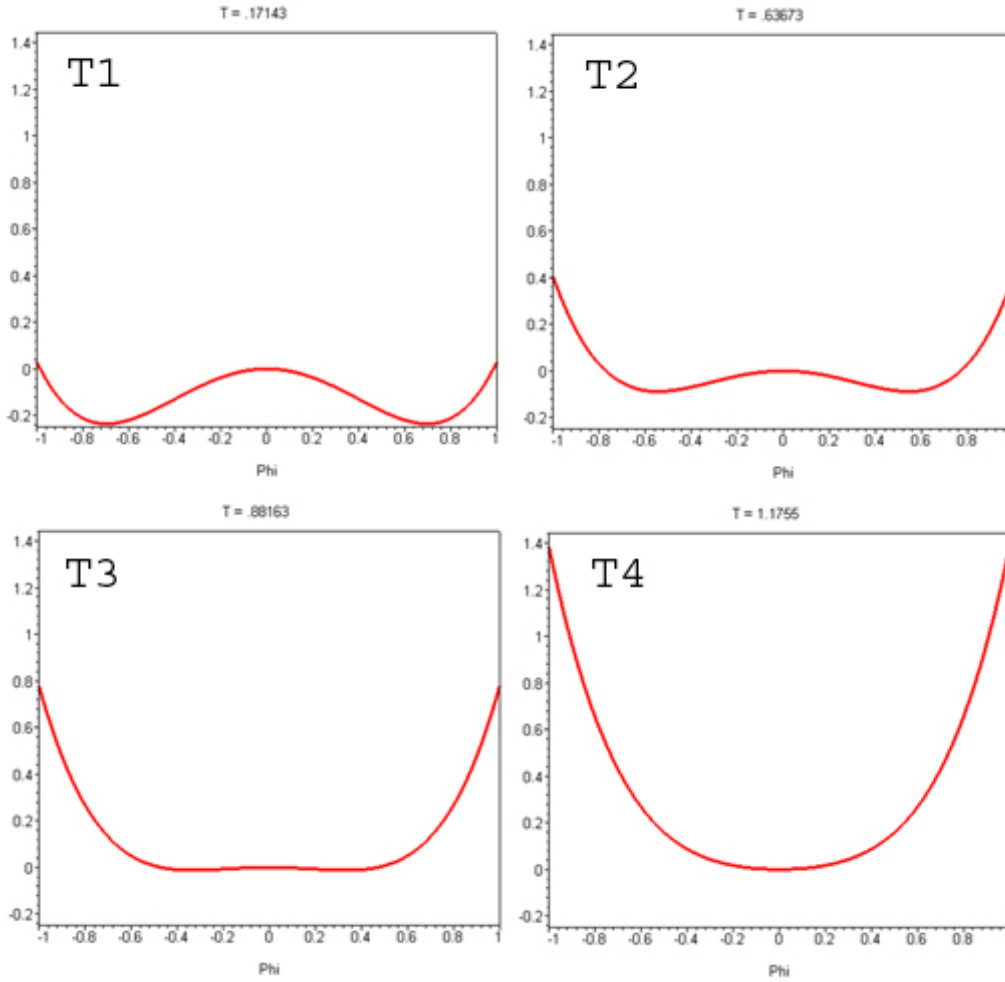
Si elegimos un estado de vacío en particular, por ejemplo,  $\Phi = \phi_0 + 0i$ , vemos entonces que este vacío no es invariante ante la simetría  $U(1)$ , es decir, una rotación cambiará el estado de vacío. Este hecho tiene profundas consecuencias en la simetría, ya que cuando un Lagrangiano es simétrico bajo alguna transformación, en este caso  $U(1)$ , pero el estado de vacío no lo es, se dice que la simetría se ha roto espontáneamente.

La forma de conectar esta descripción de ruptura espontánea de simetría con cosmología es a partir de la temperatura. Para estudiar esta relación podemos considerar un potencial similar al de la ec. (6) y modificarlo de tal forma de agregar el efecto causado por la acción de la temperatura. El resultado es

$$V(\Phi, T) = (-m^2 + \alpha T^2) (|\Phi|)^2 + \lambda (|\Phi|)^4 \quad (7)$$

donde el signo del término que acompaña a  $(|\Phi|)^2$  depende ahora del valor de  $T^2$ . Si  $T^2 > -\frac{m^2}{\alpha}$ , entonces el mínimo se encuentra en  $(|\Phi|)^2 = 0$ , la teoría es simétrica y los

bosones de gauge no tienen masa. Por el contrario, si  $T^2 < -\frac{m^2}{\alpha}$ , el mínimo del potencial no se encuentra en el origen, la simetría se rompe y los bosones de gauge adquieren masa. De esta forma podemos ver como temperaturas altas restauran simetrías, por ende, hasta épocas suficientemente tempranas del Universo, del orden de  $10^{-12}$  seg. luego el Big-Bang, la simetría de las interacciones débiles se encontraba restaurada. Hasta este punto, donde los bosones de gauge debido a la simetría no tenían masa, tal como los fotones, los físicos de partículas han demostrado que las interacciones débiles y electromagnéticas se encontraban unificadas en una interacción *electrodébil*.



**Figura2.** Evolución del potencial  $V(\Phi, T)$  a medida que aumenta la temperatura  $T$  ( $T1 < T2 < T3 < T4$ ). El efecto de esta alza es la restauración de la simetría rota. Eje de las ordenadas:  $V(\Phi, T)$ , eje de las abscisas:  $\Phi$ .

## 2 Transiciones de Fase

Las transiciones de fase en el agua son un fenómeno físico que presenciamos día a día. Cada estado/fase asociado a estas transiciones puede ser caracterizado a través del ordenamiento o "grado de simetría" que presentan las moléculas. Por ejemplo, para el estado/fase hielo las

moléculas se encuentran muy ordenadas y la simetría es baja. En el caso de la fase líquida, las moléculas se encuentran menos ordenadas pero más simétricas que en el caso anterior. Finalmente, en el estado gaseoso, las moléculas se encuentran totalmente desordenadas, por ende, existe un estado/fase completamente simétrico.

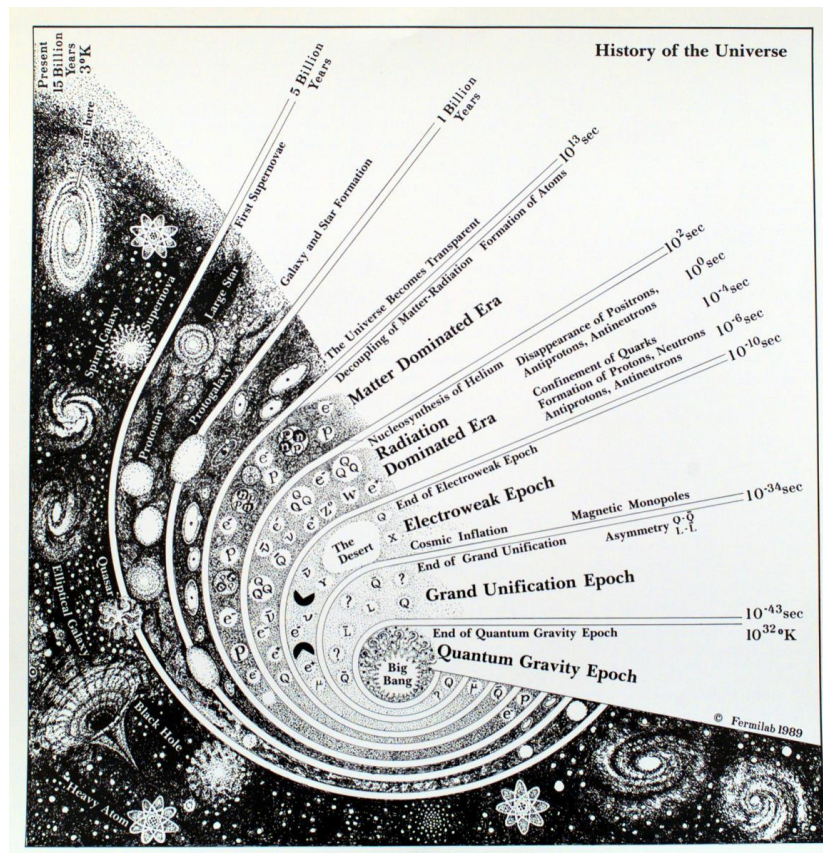
El universo, de forma similar al agua, ha experimentado una serie de cambios de fase a lo largo de su historia. A medida que evoluciona lo hace de tal forma que va de un estado más simétrico (un gas primordial de partículas elementales) a uno menos simétrico (se forman estructuras como por ejemplo galaxias), se dice entonces que hay un rompimiento de simetría. Siguiendo la analogía del agua, es como si el agua pasará de estado gaseoso a sólido. Ahora bien, el agua tiene tres fases, sin embargo el número de fases del Universo depende del modelo cosmológico que adoptemos.

## 2.1 Cronología de las transiciones de fase en el Universo

La serie de transiciones de fase que ha experimentado el Universo a lo largo de su historia han definido sucesivas eras o épocas, cada una dominada por una serie de simetrías y procesos físicos particulares. Estas son:

- **Origen del Universo**
- **Era de Planck.** ( $0 < t < 10^{-44}$  seg.). Nuestro Universo habría tenido 10 u 11 dimensiones, formadas supuestamente por un "mar" de cuerdas y branas (objetos extendidos de varias dimensiones) que interactuaban entre si mediante una sola fuerza. Al final de esta era ocurrió una transición de fase en la cual el Universo paso de 10 u 11 dimensiones extendidas a 4 dimensiones extendidas y otras 6 más pequeñas (compactificadas), o sea, el espacio-tiempo de nuestro Universo se "dividió" en dos, uno observable de 4D y uno "paralelo" de 6D muy pequeñas. La única fuerza existente se dividió en dos, la gravedad y una *fuerza unificada* (formada por la unión de las interacciones electrodébil y la fuerte).
- **Era Intermedia.** ( $10^{-44} < t < 10^{-35}$  seg.). El Universo pasa por otra transición de fase en la cual la *fuerza unificada* se subdivide otra vez en dos partes: la interacción fuerte y la interacción electrodébil. En esta era, supuestamente, surgieron varios defectos topológicos en la estructura del Universo: los monopolos magnéticos (estructuras puntuales), cuerdas cósmicas (estructuras 1-dimensionales), paredes de dominio (estructuras 2-dimensionales) y texturas (estructuras más complicadas). Estos defectos corresponden a regiones del Universo donde ha quedado atrapada materia en la fase o estado anterior.
- **Era Inflacionaria.** ( $10^{-35} < t < 10^{-24}$  seg.). El hasta entonces pequeño Universo sufrió una expansión súbita, una inflación, la cual lo hace crecer desde un tamaño infinitesimal hasta un tamaño macroscópico billones de veces mayor a su tamaño original.
- **Era Post-Inflacionaria.** ( $10^{-24} < t < 10^{-11}$  seg.). El Universo sufre otra transición de fase durante la cual la interacción electrodébil se separa en dos: la interacción débil y la electromagnética, configuración que permanece hasta el día de hoy.
- **Era Hadrónica.** ( $10^{-11} < t < 10^{-6}$  seg.). Ocurre otra transición de fase, la transición de quarks a hadrones, en la cual los quarks y gluones se agrupan para formar los hadrones (mesones y bariones). En esta era surge la asimetría entre materia y anti-materia y el Universo comienza a ser gobernado por las interacciones gravitatoria y electromagnética.
- **Era Leptónica.** ( $10^{-6} < t < 10$  seg.). Durante esta época ocurre la Nucleosíntesis.
- **Era de la Radiación.** ( $10 < t < 10^6$  seg.). El contenido del Universo es de protones, neutrones, electrones, neutrinos, ondas gravitacionales residuos de la inflación y, por supuesto, de energía y materia oscura. La temperatura ha bajado lo suficiente como para que se produzca la formación los primeros núcleos atómicos estables (Hidrógeno, Helio-3, Helio-4, Deuterio entre otros).

- **Era de la Formación de Estructuras.** ( $t > 10^6$  años). A medida que la temperatura sigue bajando ocurre la *Época de Recombinación*. Empieza la formación de las diversas estructuras que componen el Universo.
- **Era Actual.** (edad del Universo aproximada de 13.5 billones de años).



**Figura3.** Esquema de la Historia del Universo. A medida que el Universo evolucionaba experimentó una serie de transiciones de fase que permitieron la formación de estructuras que conforman el Universo actual.

### Bibliografía

- Phase Transitions in the Universe  
Gleiser, Marcelo  
1998
- El Modelo Estándar Cosmológico  
Amador, Xavier  
2003
- Defectos Topológicos  
Amador, Xavier  
2002
- Apuntes de Física de Partículas  
Díaz, Marco Aurelio  
2005