

# Las ecuaciones de Maxwell y su validez en la historia del universo

## 1 Introducción

Las ecuaciones de Maxwell, que describen el comportamiento del campo electromagnético, son una formulación clásica basada en el continuo espacio-tiempo. Su validez en la historia del universo está ligada a cuándo el electromagnetismo emergió como una interacción independiente y a cuándo el universo permitió una descripción clásica del espacio, el tiempo y los campos.

## 2 Las ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell en el vacío se expresan como:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (4)$$

Donde  $\mathbf{E}$  es el campo eléctrico,  $\mathbf{B}$  es el campo magnético,  $\rho$  es la densidad de carga,  $\mathbf{J}$  es la densidad de corriente,  $\varepsilon_0$  es la permitividad del vacío y  $\mu_0$  es la permeabilidad del vacío.

## 3 Épocas Cosmológicas y la Validez de las Ecuaciones de Maxwell

### 3.1 Época de Planck ( $t < 10^{-43}$ s)

Durante esta fase, la temperatura y la densidad de energía eran tan altas ( $\sim 10^{32}$  K) que la gravedad cuántica dominaba. No existía una descripción clásica del espacio-tiempo, por lo que ni las ecuaciones de Maxwell ni ninguna otra teoría clásica eran aplicables.

### 3.2 Época de la Gran Unificación ( $10^{-43} - 10^{-36}$ s)

Se cree que las fuerzas fundamentales (gravedad, electromagnetismo, interacción débil e interacción fuerte) estaban unificadas en una sola fuerza. El electromagnetismo, tal como lo conocemos, aún no existía de manera separada.

### 3.3 Época Electrodébil ( $10^{-36} - 10^{-12}$ s)

La fuerza fuerte se separa de la gran unificación, pero el electromagnetismo y la interacción débil siguen unificados en la interacción electrodébil. Durante esta fase, el campo electromagnético no existía en su forma moderna porque estaba ligado a la interacción débil a través de los bosones  $W$ ,  $Z$  y el fotón.

### 3.4 Transición de Ruptura de Simetría Electrodébil ( $\sim 10^{-12}$ s)

Aproximadamente  $10^{-12}$  s después del Big Bang, la simetría electrodébil se rompe mediante el mecanismo de Higgs, permitiendo que el fotón ( $\gamma$ ) emerja como una partícula sin masa. Desde este punto, las ecuaciones de Maxwell son aplicables en su forma clásica en contextos adecuados.

### 3.5 Época del Plasma Primordial ( $10^{-12}$ s - 380,000 años)

Durante esta fase, el universo era un plasma caliente en el que los fotones interactuaban constantemente con la materia cargada. Aunque la electrodinámica cuántica (QED) seguía siendo relevante, en escalas macroscópicas las ecuaciones de Maxwell ya eran una buena aproximación.

### 3.6 Recombinación y Desacoplamiento del Fotón ( $\sim 380,000$ años)

Los electrones y protones se combinan para formar átomos neutros, permitiendo que los fotones viajen libremente (origen del fondo cósmico de microondas, CMB). Desde este momento, las ecuaciones de Maxwell son completamente aplicables sin restricciones cuánticas significativas.

## 4 Conclusión

Las ecuaciones de Maxwell son plenamente válidas en el universo una vez que la simetría electrodébil se rompe ( $\sim 10^{-12}$  s después del Big Bang), permitiendo que el electromagnetismo emerja como una interacción independiente. Aunque en el plasma primordial la electrodinámica cuántica era importante a escalas microscópicas, en escalas macroscópicas las ecuaciones de Maxwell ya eran una buena aproximación.

## 5 Referencias

### References

- [1] S. Weinberg, *The First Three Minutes*, Basic Books, 1993.
- [2] L. H. Ryder, *Quantum Field Theory*, Cambridge University Press, 1996.
- [3] S. Dodelson, *Modern Cosmology*, Academic Press, 2003.
- [4] E. W. Kolb and M. S. Turner, *The Early Universe*, Addison-Wesley, 1990.