

El problema de la constante cosmológica

Diego Aristizábal

Carlos Escobar

Curso de Interacciones Electrodébiles

Facultad de Física

Universidad de Valencia

Contenido

- ★ Motivación-Revisión histórica.
- ★ Estimativo cosmológico de ρ_V .
- ★ El problema en distintos escenarios.
 - ◇ Teoría Cuántica de Campos.
 - ◇ Teorías con RES.
 - ◇ Teorías SuSy.
- ★ Conclusiones.

Un poco de historia... Einstein y Λ

1915: Rel. General para TODO el Universo?

1918: Einstein introduce Λ , la cte cosmológica, en su Teoría de la Relatividad General

Relatividad General + Universo cerrado y estático = \exists
Soluciones estacionarias sii $\exists \Lambda$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi G_N T_{\mu\nu}^m + g_{\mu\nu}\Lambda$$

$\Lambda > 0 \rightarrow$ Atracción gravitatoria de la materia ordinaria

1922: Friedmann \rightarrow Sol. para expansión con $\Lambda=0$

1929: Hubble observa un Universo en *expansión*



Einstein considera Λ como...

el ***mayor error de su vida*** $\rightarrow \Lambda=0$

Mientras tanto...

LeMaitre, De Sitter, etc sostienen que $\Lambda \neq 0$, es un parámetro libre de la RG.

Hoy se entiende como la densidad de energía del estado fundamental o de vacío

- Modelos de Inflación del Universo

70-80's: Observaciones de Supernovas Type I \rightarrow Universo acelerándose alimentado por una pequeña $\Lambda \rightarrow \exists \Lambda \rightarrow$ Compensación de la gravedad de la materia ordinaria con la antigravedad de Λ



G.Gamow: *"Lambda rises its nasty head again"*

90's: Difícil explicación del Universo si $\Lambda=0 \rightarrow \exists \Lambda \neq 0$

SUSY

1975: Si SUSY no estuviera rota (simetría boson-fermión) $\Lambda = 0$ ya que los *loops* fermiónicos cancelarían con los bosónicos pero...

Mundo Real \rightarrow Rotura de simetría \rightarrow Energía vacío $> 0 \Rightarrow$ Si Energía Vacío $\equiv \Lambda_{eff} \rightarrow$ Crisis \rightarrow Desastre

Pero y si... SUSY + Gravedad \rightarrow Teoría de Supergravedad (local) \rightarrow No arregla el problema simplemente lo cambia de contexto

80-90's: Teoría de Supercuerdas \rightarrow Al igual que la anterior, Λ no es lo suficientemente pequeña

Consideraciones Antrópicas (I)

Carter (1974) → Principio Antrópico →
 $\exists \Lambda \Leftrightarrow \exists$ la vida

Weinberg: *“if our big bang is just one of many big bangs, with a wide range of vacuum energies, then it is natural that some of these big bands should have a vacuum energy in the narrow range where galaxies can form, and of course it is just these big bangs in which there could be astronomers and physicists wondering about the vacuum energy”*

- ★ Nosotros somos un dato experimental de este principio

Las leyes de la naturaleza no están completas hasta que no hay vida inteligente. La misma ciencia no tiene sentido sin observadores (sobre todo la mecánica cuántica)

Consideraciones Antrópicas (II)

Dicke utiliza en 1961 dicho argumento en la Física Moderna.

Se realizan modelos en los que se decide que era o parte del Universo podríamos o no habitar y por tanto que valores de Λ deberíamos observar.

$\frac{\Lambda_{eff}}{8\pi G} < -10^{-43} GeV^4 \rightarrow$ Gran Fuerza Atractiva
 \rightarrow El Universo colapsaría antes de llegar a ser maduro (menos de 1 billón de años) \rightarrow NO VIDA

$\frac{\Lambda_{eff}}{8\pi G} > 10^{-43} GeV^4 \rightarrow$ Gran Fuerza Repulsiva
 \rightarrow Aceleración demasiado rápida para que se formen sistemas gravitacionales \rightarrow NO VIDA

Punto de vista cosmológico

Todo lo que contribuye a la energía de vacío hace las veces de constante cosmológica.

$$\langle T_{\mu\nu} \rangle = \langle \rho \rangle g_{\mu\nu}$$

De las ecuaciones de campo de Einstein se tiene

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} + \lambda g_{\mu\nu}$$

$$\Rightarrow \lambda_{\text{eff}} = \lambda + 8\pi G \langle \rho \rangle$$

o inversamente

$$\rho_V = \langle \rho \rangle + \frac{\lambda}{8\pi G} = \frac{\lambda_{\text{eff}}}{8\pi G}$$

Estimación de ρ_v

Universo de FRW basado en el principio cosmológico

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

Ecuación de Friedmann

$$\left(\frac{\dot{R}}{R} \right)^2 = -\frac{k}{R^2} + \frac{1}{3}(8\pi\rho + \lambda)$$

Cada término puede estimarse así

$$\left. \frac{\dot{R}}{R} \right|_{ac} = H_0$$

$$H_0 = 100 h \text{ km Mpc}^{-1} \text{ s}^{-1} \quad h \in [0,6, 0,8]$$

Densidad de energía del Universo esta dada sólo por

$$\rho = \rho_m + \langle \rho \rangle$$

Por una parte la relación entre el parámetro de densidad total y el factor de curvatura y por otro el hecho de que $\rho_m < \rho_c$

$$\frac{|k|}{R^2} < H_0^2, \quad |\rho - \langle \rho \rangle| < \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

$$|\lambda_{\text{eff}}| < H_0^2$$

$$\Rightarrow \rho_V \simeq 10^{-47} \text{ GeV}^4$$

Energía de punto cero

De la mecánica cuántica se sabe

$$E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega$$

En el caso de campos se tiene

$$\langle\rho\rangle = \int_0^\Lambda \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \frac{1}{2} \sqrt{k^2 + m^2} \simeq \frac{\Lambda^4}{16\pi^2}$$

Si el cutoff se escoge a la escala de Planck

$$\Rightarrow \langle\rho\rangle \simeq 2 \times 10^{71} \text{GeV}^4$$

Para obtener un $\langle\rho\rangle$ consistente con la predicción cosmológica se necesita un “fine-tuning” de 118 ordenes de magnitud

El problema en teorías con RES

Considerando un caso simple

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(\partial_\mu\phi)(\partial^\mu\phi) - V(\phi)$$

con el potencial dado por

$$V(\phi) = \frac{1}{2}\mu^2\phi^2 + \frac{1}{4}\lambda\phi^4$$

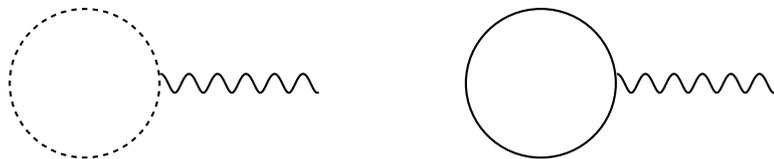
$$V(\phi) = \begin{cases} \mu^2 > 0 & \Rightarrow \langle\phi\rangle = 0 \\ \mu^2 < 0 & \Rightarrow \langle\phi\rangle = \sqrt{-\mu^4/4\lambda} \end{cases}$$

La densidad de energía de vacío no es nula

$$\langle T_{\mu\nu} \rangle = -\rho g_{\mu\nu} \Rightarrow \langle\rho\rangle = \mu^4/4\lambda$$

Conexión con gravedad cuántica

- ~> Energías de punto cero aparecen también en el caso de las interacciones.
- ~> Partícula de masa nula y espín dos, se acopla a todo lo que tenga energía



- ~> Clásicamente los tadpole se entienden como constante cosmológica

El problema en el SM

- ♣ Simetría $SU(2) \times U(1) \rightarrow U(1)_{em}$.
- ♣ Sector escalar con un doblete de Higgs.
- ♣ Es compatible con todos los datos experimentales de física de aceleradores.

Limitaciones del modelo

- ♠ Jerarquía de masa de los leptones y los quarks y masas de neutrinos.
- ♠ No dice nada acerca de gravedad.
- ♠ Gravedad cuántica \rightarrow constante cosmológica

$$\langle \rho \rangle = (300\text{GeV})^4$$

¿Resuelve SuSy el problema?

- ✓ Problema de la Jerarquía.
- ✓ Se extiende el álgebra de Poincaré

$$\{Q_\alpha, Q_\beta\} = (\sigma_\mu)_{\alpha\beta} P^\mu$$

- ✓ El vacío es invariante bajo SuSy

$$Q_\alpha|0\rangle = Q_\alpha^\dagger|0\rangle = 0 \Rightarrow \langle 0|P^\mu|0\rangle = 0$$

- ✓ SuSy está rota y las contribuciones a $\langle\rho\rangle$, aunque dependen del escenario de rompimiento, son grandes, típicamente $\langle\rho\rangle \sim m_{susy}^4$

Conclusiones

Conclusión principal → El problema de Λ tiene un muy amplio alcance. Muchas áreas de la Física afectadas.

Expansión cosmológica acelerada \Leftrightarrow Problema de Energía de vacío

- ✓ La naturaleza de la *Energía Oscura*, también conocida como *quintessence*, podría ser respondido con ayuda de Λ , sin embargo, como se ha visto un *increíble* fine-tuning se tendría que realizar. Se tienen que desarrollar teorías que incluyan esta *Energía Oscura* (observada experimentalmente) y su ecuación de estado como función de t .
- ♣ Cosmología cuántica basada en los agujeros de gusano es la más prometedora (no explicada aquí)

- ♣ SUSY no es un buen candidato aunque cuando sepamos más cosas (experimentalmente) la cosa puede cambiar
- ♣ Los Mecanismos de Ajuste se deben tener en cuenta (no explicada aquí). Tiene técnicas muy prometedoras
- ♣ Supergravedad y Supercuerdas se verían muy afectadas y deberían de ser reconsideradas. Algunos entusiastas confían en teorías de dimensiones superiores, sin embargo, nada se ha conseguido. Vivimos en un mundo 4-dimensional y el problema debería resolverse en él.
- ♣ Si todo falla siempre nos quedará el principio antrópico. Tendremos constantes y parámetros antrópicos con límites empíricos