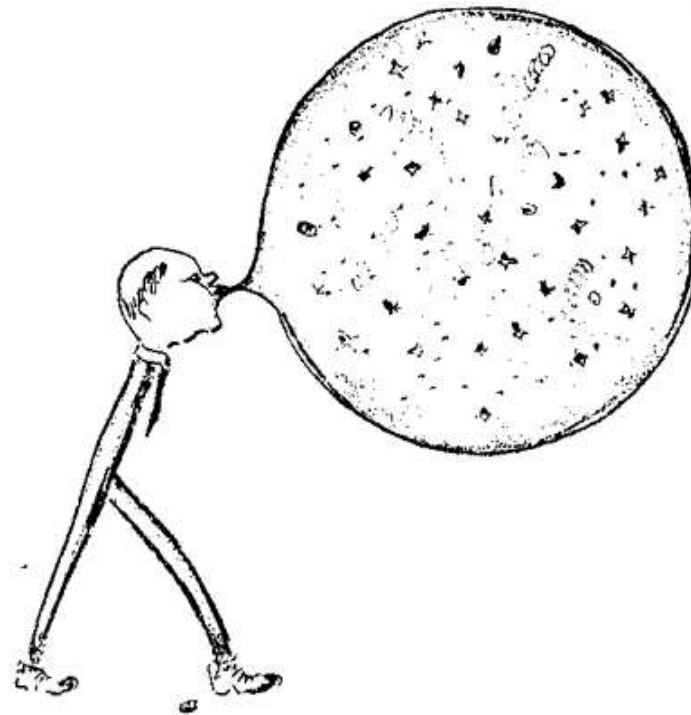




100 años de constante cosmológica

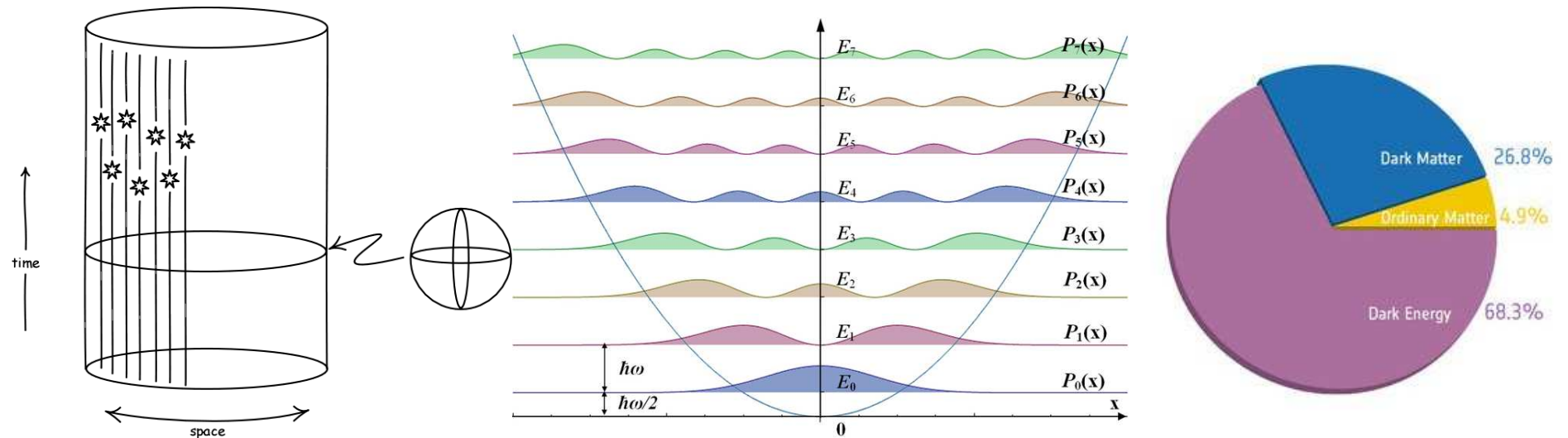


Bert Janssen

Dpto. de Física Teórica y del Cosmos &
Centro Andaluz de Física de Partículas Elementales

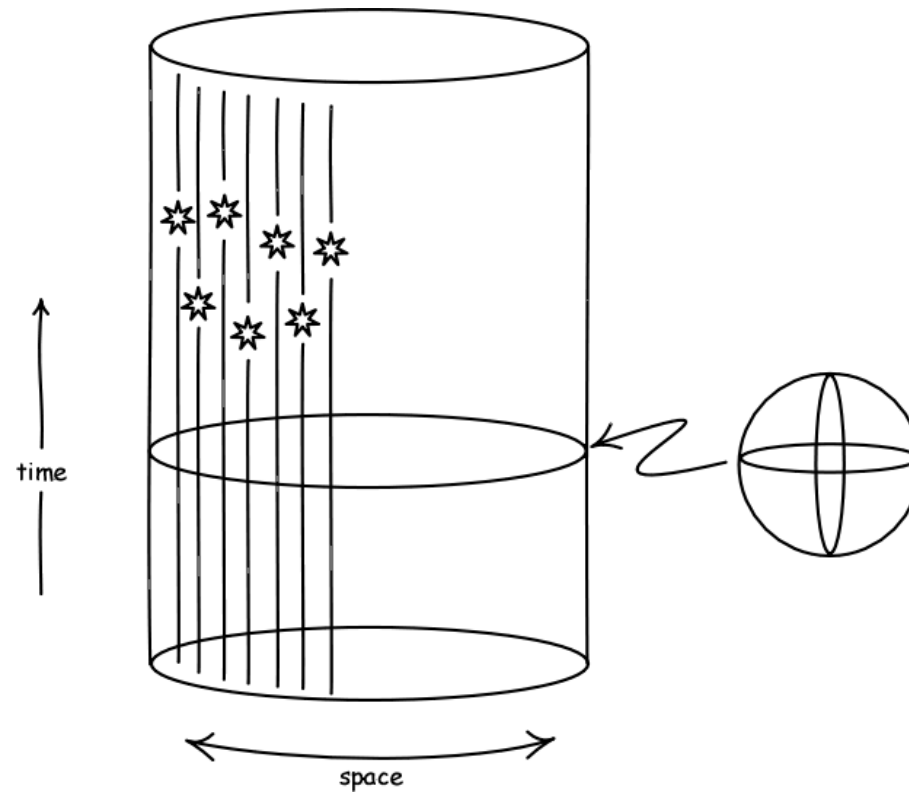
Plan de la Conferencia

1. La constante cosmológica y los modelos cosmológicos: 1917 - 1935
2. La constante cosmológica y la energía del vacío: 1968 - 1998
3. La constante cosmológica y la energía oscura: 1998 - hoy



1. Constante cosmológica y los modelos cosmológicos

1917 - 1934

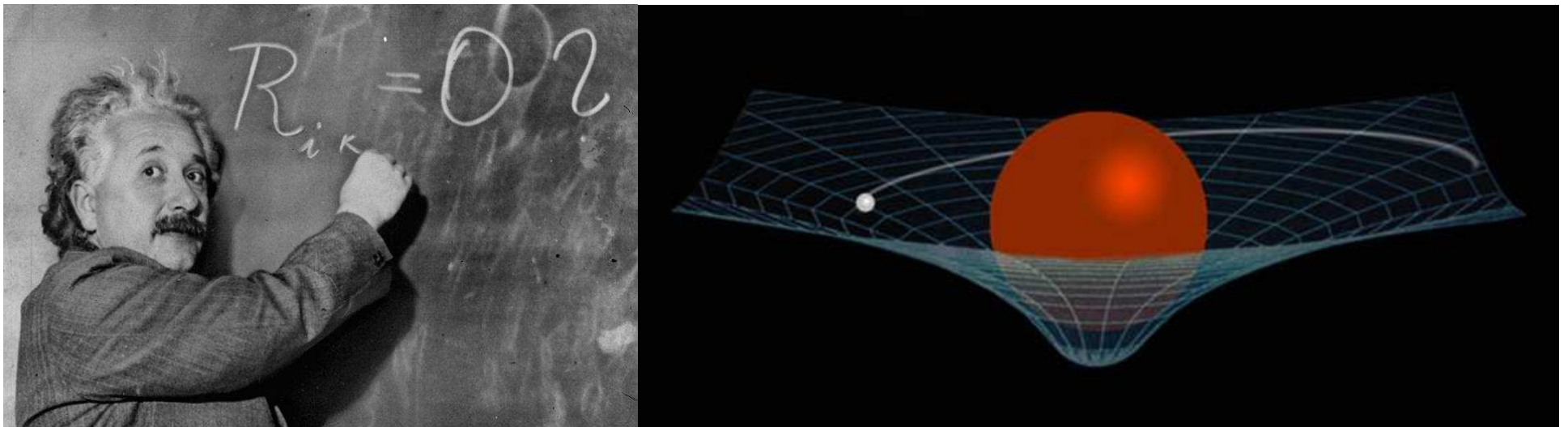


1915: Einstein presenta la Relatividad General

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = - \frac{8\pi G_N}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Gravitación es manifestación de curvatura del espaciotiempo ($R_{\mu\nu}$)

Fuente de curvatura es contenido de energía y materia ($T_{\mu\nu}$)



La materia indica cómo se curva el espacio

El espacio indica cómo se mueve la materia

Cosmología física: ecuación de Einstein aplicada al universo entero

Cosmología física: ecuación de Einstein aplicada al universo entero

Forma del universo: Métrica de Friedmann-Robertson-Walker

$$ds^2 = dt^2 - a(t) d\Sigma_3^2(k)$$

con dt^2 : tiempo cósmico

$a(t)$: factor de escala \sim “tamaño” del universo

$d\Sigma_3^2(k)$: geometría de secciones espaciales: homogéneo e isótropo

$$k = 0 : \mathbb{R}^3, \quad k = +1 : \mathbb{S}^3, \quad k = -1 : \mathbb{H}^3$$

Cosmología física: ecuación de Einstein aplicada al universo entero

Forma del universo: Métrica de Friedmann-Robertson-Walker

$$ds^2 = dt^2 - a(t) d\Sigma_3^2(k)$$

con dt^2 : tiempo cósmico

$a(t)$: factor de escala \sim “tamaño” del universo

$d\Sigma_3^2(k)$: geometría de secciones espaciales: homogéneo e isótropo

$$k = 0 : \mathbb{R}^3, \quad k = +1 : \mathbb{S}^3, \quad k = -1 : \mathbb{H}^3$$

Dinámica del universo: ecuaciones de Friedmann

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{1}{3}\kappa\rho - \frac{k}{a^2} \quad \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{1}{6}\kappa(\rho + 3P)$$

→ Ecuación diferencial para $a(t)$

→ Factor de escala dinámico: expansión del universo

Expansión del universo = expansión de las secciones espaciales

1917: Einstein aplica su ecuación al universo con materia ($P_{\text{mat}} = 0$)

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{1}{3}\kappa\rho_{\text{mat}} - \frac{k}{a^2} \qquad \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{1}{6}\kappa\rho_{\text{mat}}$$

→ No hay soluciones estáticas ($\dot{a} = \ddot{a} = 0$) con $\rho_{\text{mat}} \neq 0$: ρ_{mat} gravita!

1917: Einstein aplica su ecuación al universo con materia ($P_{\text{mat}} = 0$)

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{1}{3}\kappa\rho_{\text{mat}} - \frac{k}{a^2} \qquad \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{1}{6}\kappa\rho_{\text{mat}}$$

→ **No hay soluciones estáticas** ($\dot{a} = \ddot{a} = 0$) **con** $\rho_{\text{mat}} \neq 0$: ρ_{mat} **gravita!**

Einstein: “...que las ecuaciones de gravedad que he defendido hasta ahora necesitan una pequeña modificación...”

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \kappa g_{\mu\nu}\Lambda = -\kappa T_{\mu\nu}$$

→ **Constante cosmológica:** término que compensa la atracción gravitatoria

1917: Einstein aplica su ecuación al universo con materia ($P_{\text{mat}} = 0$)

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{1}{3}\kappa\rho_{\text{mat}} - \frac{k}{a^2} \qquad \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{1}{6}\kappa\rho_{\text{mat}}$$

→ **No hay soluciones estáticas** ($\dot{a} = \ddot{a} = 0$) **con** $\rho_{\text{mat}} \neq 0$: ρ_{mat} **gravita!**

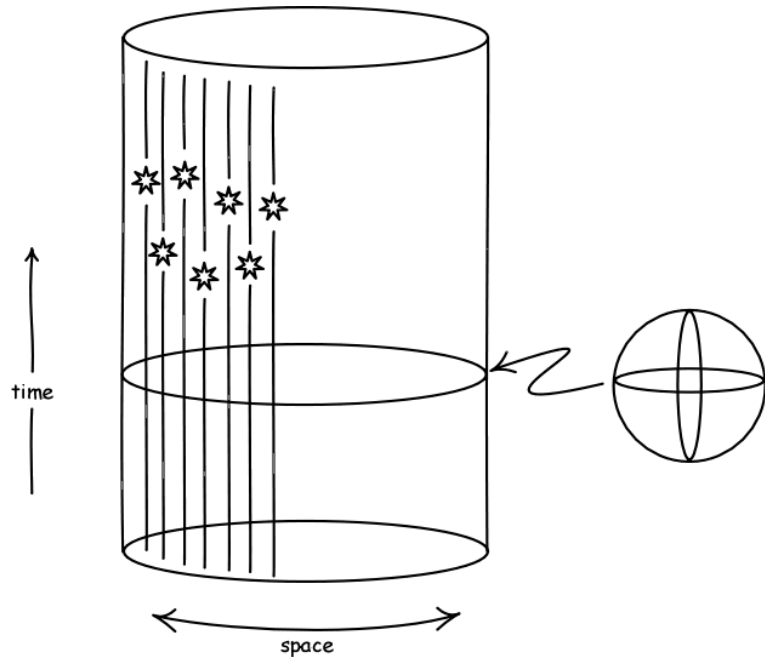
Einstein: “...que las ecuaciones de gravedad que he defendido hasta ahora necesitan una pequeña modificación...”

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \kappa g_{\mu\nu}\Lambda = -\kappa T_{\mu\nu}$$

→ **Constante cosmológica:** término que compensa la atracción gravitatoria

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{1}{3}\kappa(\rho_{\text{mat}} + \Lambda) - \frac{k}{a^2} \qquad \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{1}{6}\kappa(\rho_{\text{mat}} - 2\Lambda)$$

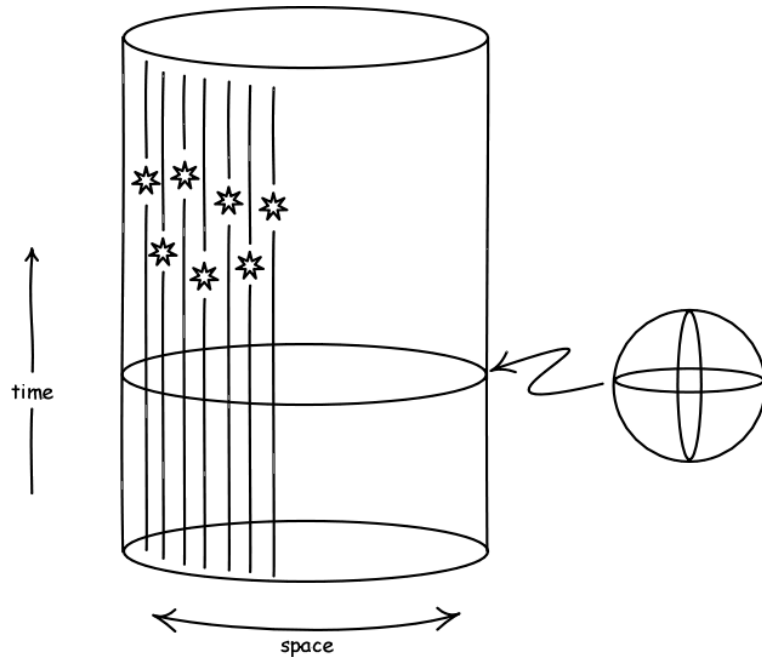
Universo estático de Einstein: $\rho_{\text{mat}} = 2\Lambda$, $k = 1$, $a^2 = \frac{2}{\kappa\rho_{\text{mat}}}$



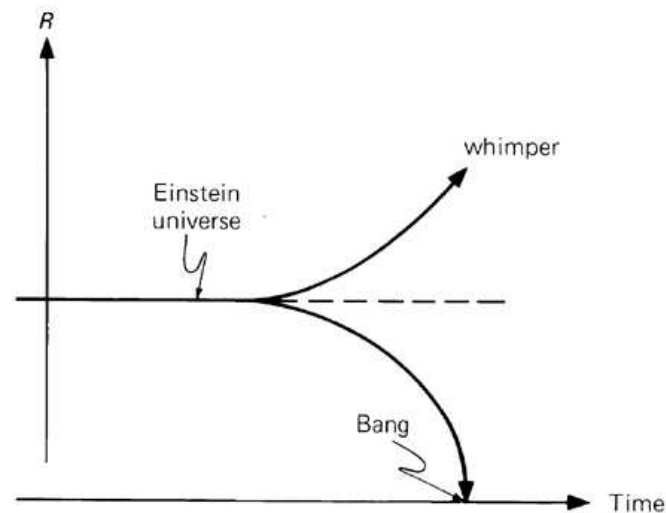
Universo Estático de Einstein:

- Única solución cosmológica estática
- Equilibrio entre materia ordinaria y materia con presión negativa
- Luz da vuelta al universo en tiempo finito
→ puedes ver parte atrás de tu cabeza
- Solución a problema de condiciones de contorno y Principio de Mach

Universo Estático de Einstein:



- Única solución cosmológica estática
- Equilibrio entre materia ordinaria y materia con presión negativa
- Luz da vuelta al universo en tiempo finito
→ puedes ver parte atrás de tu cabeza
- Solución a problema de condiciones de contorno y Principio de Mach



- Eddington (1930): Equilibrio inestable

$$\rho_{\text{mat}} = 2\Lambda$$

→ **Problema de ajuste fino!**

(pero no nos adelantemos...)

1917: Willem De Sitter busca solución con $\Lambda \neq 0$ sin materia



$$ds^2 = \left(1 - \frac{r^2}{R_0^2}\right) dt^2 - \left(1 - \frac{r^2}{R_0^2}\right)^{-1} dr^2 - r^2 d\Omega_2^2$$

$$R_0 = \sqrt{\frac{3}{\kappa\Lambda}}$$

- ... en **coordenadas estáticas** (imitando a Schwarzschild)
(Tercera solución exacta, todas estáticas...)

1917: Willem De Sitter busca solución con $\Lambda \neq 0$ sin materia



$$ds^2 = \left(1 - \frac{r^2}{R_0^2}\right) dt^2 - \left(1 - \frac{r^2}{R_0^2}\right)^{-1} dr^2 - r^2 d\Omega_2^2$$

$$R_0 = \sqrt{\frac{3}{\kappa\Lambda}}$$

- ... en **coordenadas estáticas** (imitando a Schwarzschild)
(Tercera solución exacta, todas estáticas...)
- Efecto de Sitter: **corrimiento hacia el rojo** de partículas de prueba!
 - > relación con corrimiento hacia rojo de galaxias (Slypher, 1917)?
 - > movimiento en universo vacío? O sólo efecto óptico?

1917: Willem De Sitter busca solución con $\Lambda \neq 0$ sin materia



$$ds^2 = \left(1 - \frac{r^2}{R_0^2}\right) dt^2 - \left(1 - \frac{r^2}{R_0^2}\right)^{-1} dr^2 - r^2 d\Omega_2^2$$

$$R_0 = \sqrt{\frac{3}{\kappa\Lambda}}$$

- ... en **coordenadas estáticas** (imitando a Schwarzschild)
(Tercera solución exacta, todas estáticas...)
- Efecto de Sitter: **corrimiento hacia el rojo** de partículas de prueba!
—> relación con corrimiento hacia rojo de galaxias (Slypher, 1917)?
—> movimiento en universo vacío? O sólo efecto óptico?
- **Viola Principio de Mach** (y eso frustra a Einstein)

1917: Willem De Sitter busca solución con $\Lambda \neq 0$ sin materia



$$ds^2 = \left(1 - \frac{r^2}{R_0^2}\right) dt^2 - \left(1 - \frac{r^2}{R_0^2}\right)^{-1} dr^2 - r^2 d\Omega_2^2$$

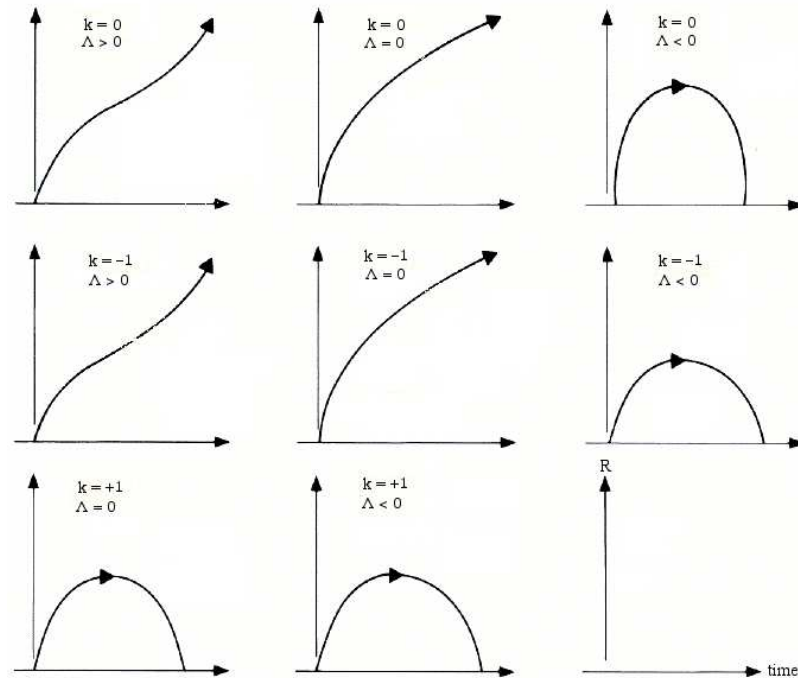
$$R_0 = \sqrt{\frac{3}{\kappa\Lambda}}$$

- ... en **coordenadas estáticas** (imitando a Schwarzschild)
(Tercera solución exacta, todas estáticas...)
- Efecto de Sitter: **corrimiento hacia el rojo** de partículas de prueba!
 - relación con corrimiento hacia rojo de galaxias (Slypher, 1917)?
 - movimiento en universo vacío? O sólo efecto óptico?
- **Viola Principio de Mach** (y eso frustra a Einstein)
- Únicos dos modelos cosmológicos hasta 1930 (a efectos prácticos)
 - **Universo Estático de Einstein**: con materia, sin corrimiento hacia rojo
 - **Espacio de De Sitter**: sin materia, con corrimiento hacia rojo

¿Cuál describe nuestro universo?

1922: Friedmann: soluciones dinámicas con materia y constante cosmológica

- Escribe la métrica FRW y deduce las ecuaciones de Friedmann
- Encuentra numerosas soluciones con ρ_{mat} , Λ , k pero no las relaciona con observaciones astronómicas



- Einstein: ... construcciones puramente matemáticas, “a las cuales a penas se puede adscribir un significado físico.”

1925: Lemaître: expansión del universo

- Repite gran parte del trabajo de Friedmann de manera independiente
- Escribe Espacio de De Sitter como universo en expansión exponencial

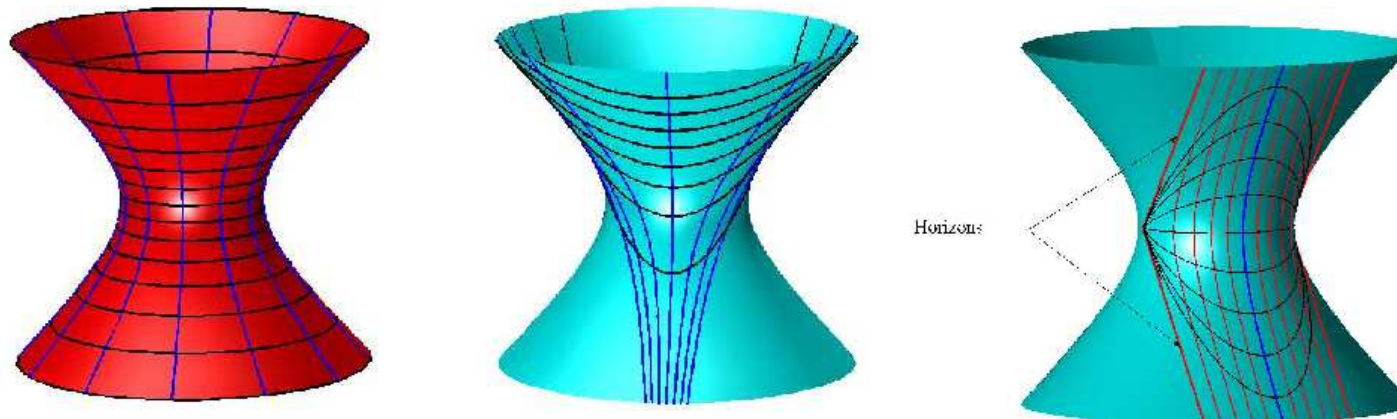
$$\begin{aligned} ds^2 &= \left(1 - \frac{r^2}{R_0^2}\right) dt^2 - \left(1 - \frac{r^2}{R_0^2}\right)^{-1} dr^2 - r^2 d\Omega_2^2 \\ &= d\tilde{t}^2 - e^{2\tilde{t}/R_0} (dx^2 + dy^2 + dz^2) \end{aligned}$$

1925 - 1930: Lemaître: **expansión del universo**

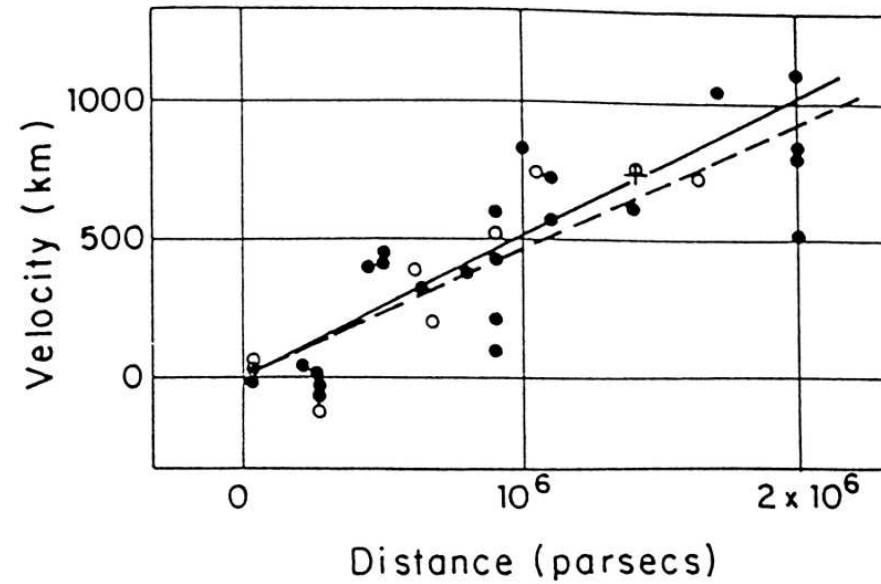
- Repite gran parte del trabajo de Friedmann de manera independiente
- Escribe Espacio de De Sitter como universo en expansión exponencial

$$\begin{aligned} ds^2 &= \left(1 - \frac{r^2}{R_0^2}\right) dt^2 - \left(1 - \frac{r^2}{R_0^2}\right)^{-1} dr^2 - r^2 d\Omega_2^2 \\ &= d\tilde{t}^2 - e^{2\tilde{t}/R_0} (dx^2 + dy^2 + dz^2) \\ &= d\bar{t}^2 - R_0^2 \cosh(\bar{t}/R_0) (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\Omega_2^2) \end{aligned}$$

→ fin de confusión sobre estaticidad: **elección de coordenadas!**

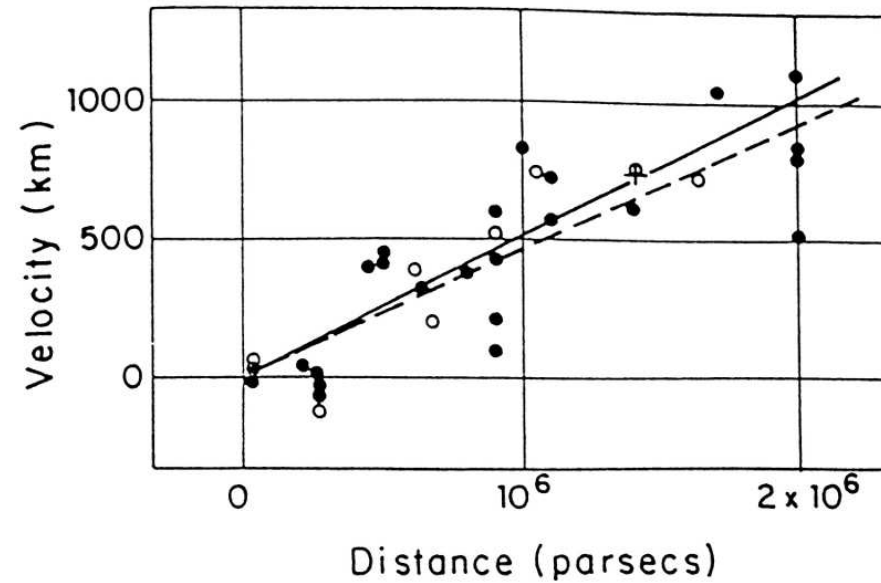


- Encuentra las soluciones de Friedmann y conecta con observaciones
- Deduce la Ley de Hubble $v_{\text{rec}} = H(t)D(t)$ de manera teórica (1927)



→ descubrimiento de la expansión del universo

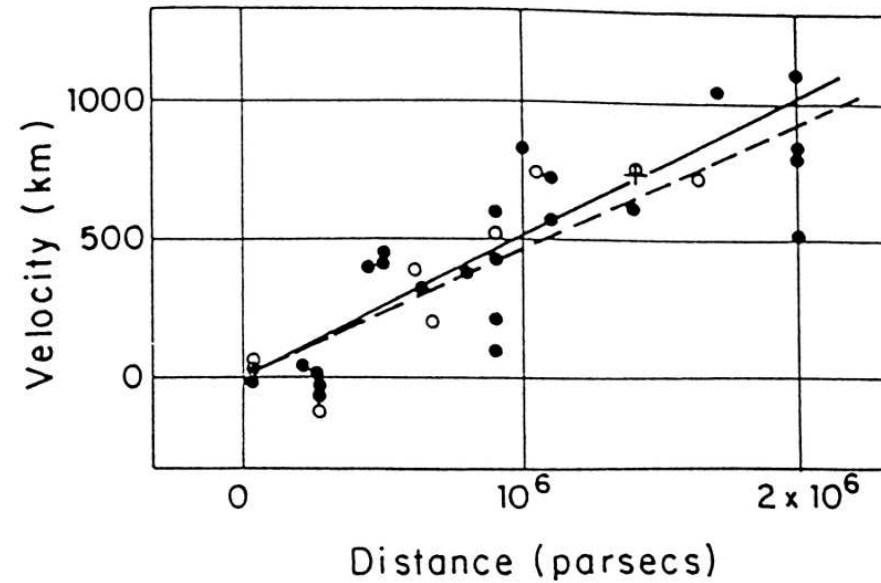
- Encuentra las soluciones de Friedmann y conecta con observaciones
- Deduce la Ley de Hubble $v_{\text{rec}} = H(t)D(t)$ de manera teórica (1927)



→ descubrimiento de la expansión del universo

- Einstein: soluciones “completamente abominables”

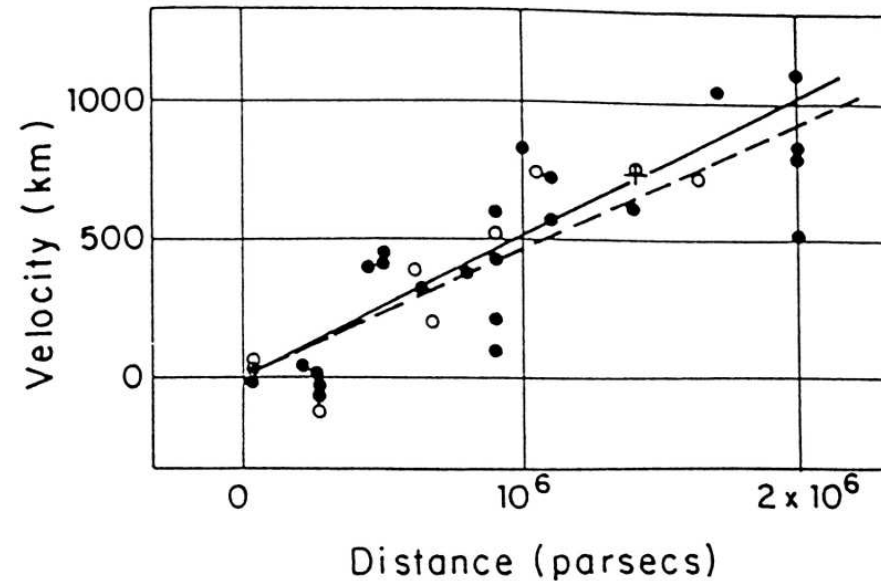
- Encuentra las soluciones de Friedmann y conecta con observaciones
- Deduce la Ley de Hubble $v_{\text{rec}} = H(t)D(t)$ de manera teórica (1927)



→ descubrimiento de la expansión del universo

- Einstein: soluciones “completamente abominables”
- En 1929, Hubble publica su Ley de Hubble empírica (pero duda a que se debe a la expansión)

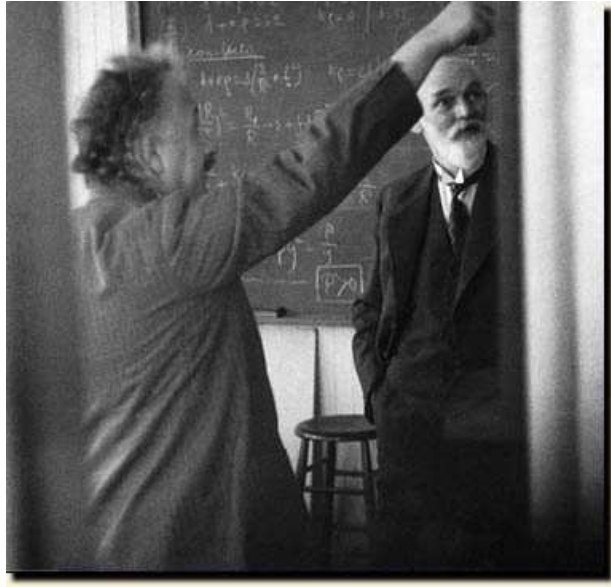
- Encuentra las soluciones de Friedmann y conecta con observaciones
- Deduce la Ley de Hubble $v_{\text{rec}} = H(t)D(t)$ de manera teórica (1927)



→ descubrimiento de la expansión del universo

- Einstein: soluciones “completamente abominables”
- En 1929, Hubble publica su Ley de Hubble empírica (pero duda a que se debe a la expansión)
- En 1930, Eddington y De Sitter discuten modelos cosmológicos en R.A.S. Lemaître lee proceedings y escribe a Eddington

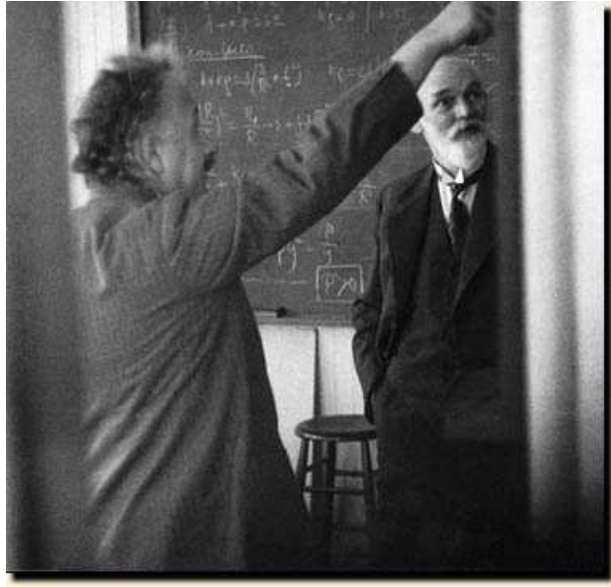
De Sitter y Eddington (y Hubble) convencen a Einstein de expansión de universo



Einstein **retira constante cosmológica:**

“Si no hay mundos casi-estáticos, fuera con la constante cosmológica”

De Sitter y Eddington (y Hubble) convencen a Einstein de expansión de universo



Einstein **retira constante cosmológica:**

“Si no hay mundos casi-estáticos, fuera con la constante cosmológica”

Gamov: *“Mucho más tarde, cuando estaba discutiendo los problemas cosmológicos con Einstein, éste comentó que **la introducción de la constante cosmológica era el error más grande que comitió en su vida.**”*

Pero las preguntas quedan...

- ¿Por qué **de todos los valores posibles**, $\Lambda = 0$ en nuestro universo?
- En 1934, Lemaître identifica Λ con la **energía del vacío**

materia fría: $\rho_{\text{mat}}(t) \sim \rho_0 a^{-3}(t)$

radiación: $\rho_{\gamma}(t) \sim \rho_0 a^{-4}(t)$

cte cosmol: $\rho_{\Lambda}(t) \sim \rho_0$

Pero las preguntas quedan...

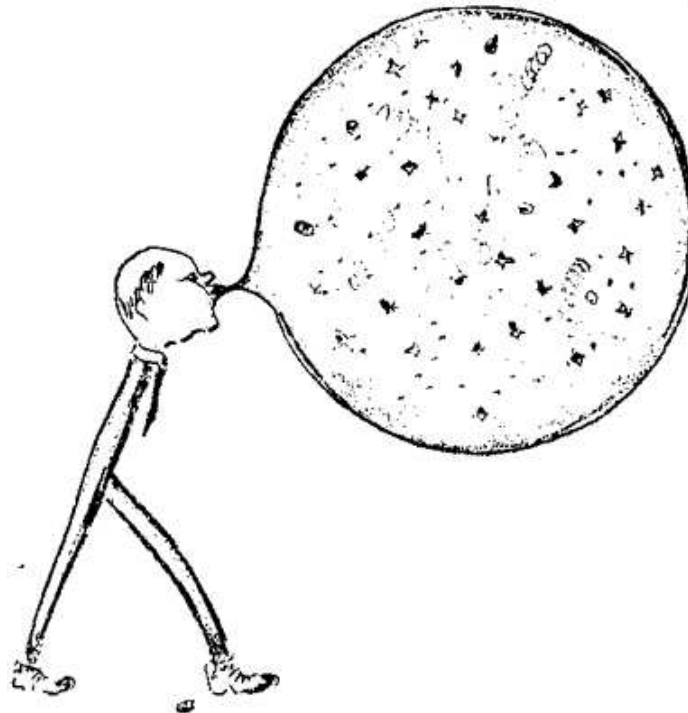
- ¿Por qué de todos los valores posibles, $\Lambda = 0$ en nuestro universo?
- En 1934, Lemaître identifica Λ con la energía del vacío

materia fría: $\rho_{\text{mat}}(t) \sim \rho_0 a^{-3}(t)$

radiación: $\rho_{\gamma}(t) \sim \rho_0 a^{-4}(t)$

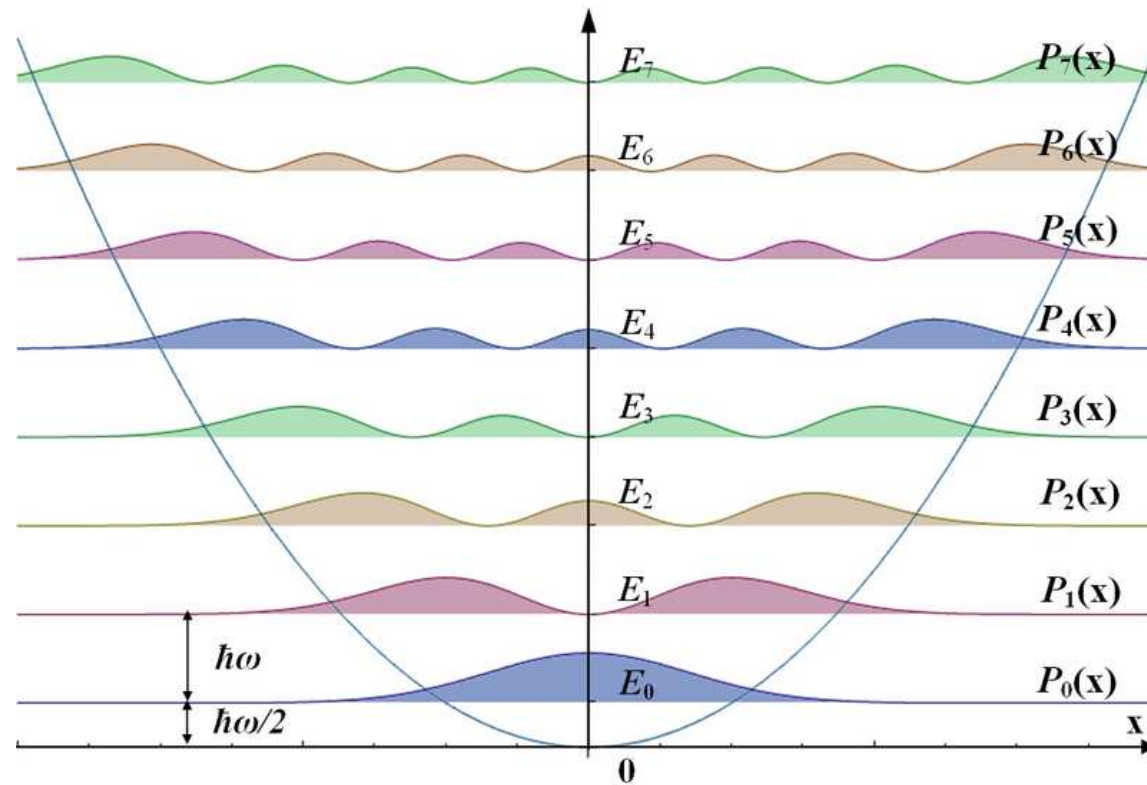
cte cosmol: $\rho_{\Lambda}(t) \sim \rho_0$

→ ¿Por qué la energía del vacío es exactamente cero?

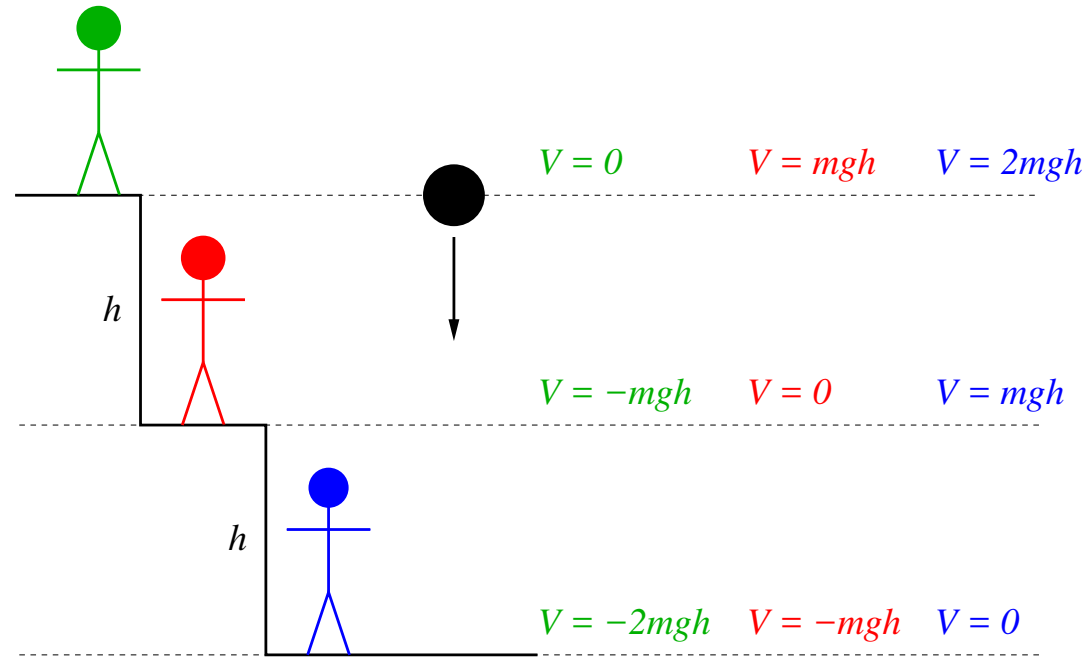


II. Constante cosmológica y la energía del vacío

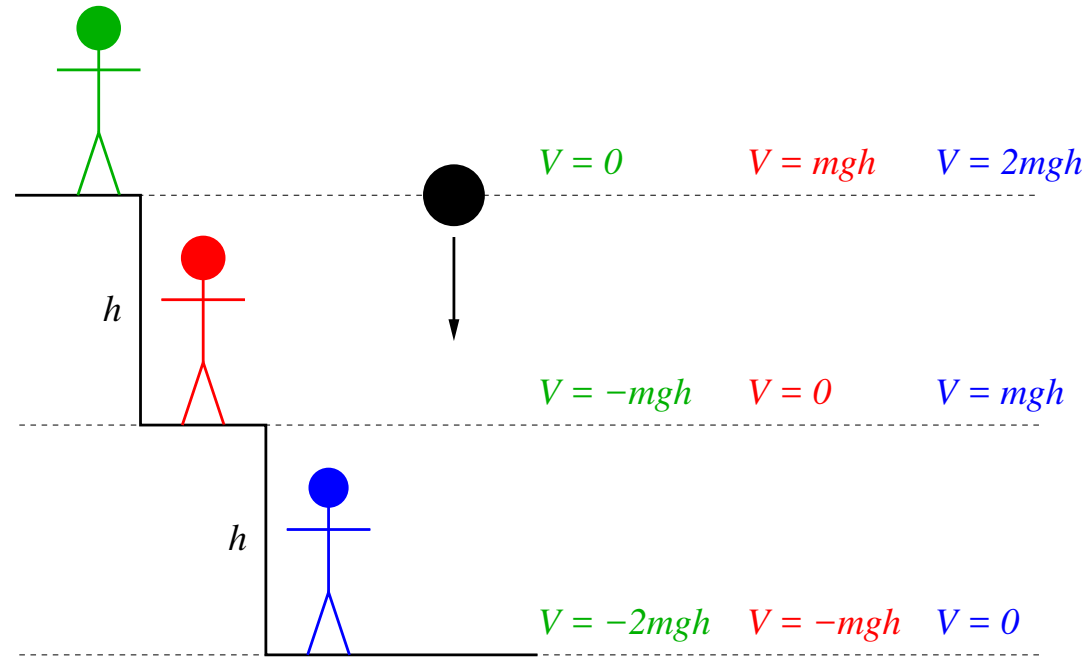
1968 - 1998



En física clásica y cuántica: energía potencial determinada módulo constante



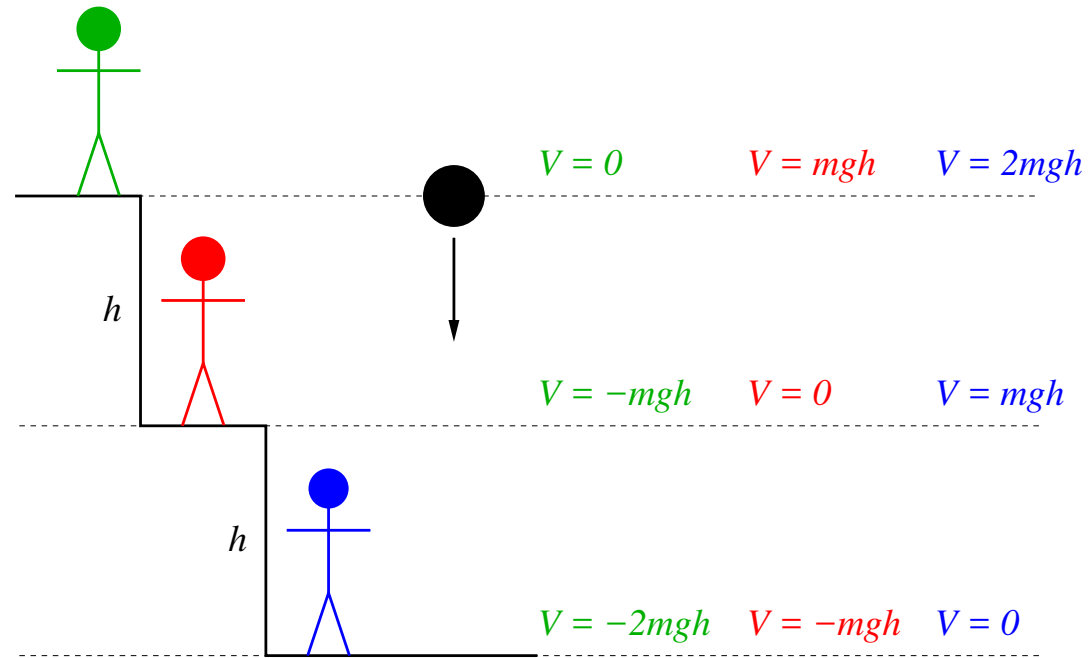
En física clásica y cuántica: energía potencial determinada módulo constante



Newton: Física **invariante** bajo $V(x) \rightarrow V'(x) = V(x) + V_0$

$$\vec{F} = -\vec{\nabla} V, \quad v = \sqrt{2 m^{-1} (V(x_2) - V(x_1))}$$

En física clásica y cuántica: energía potencial determinada módulo constante



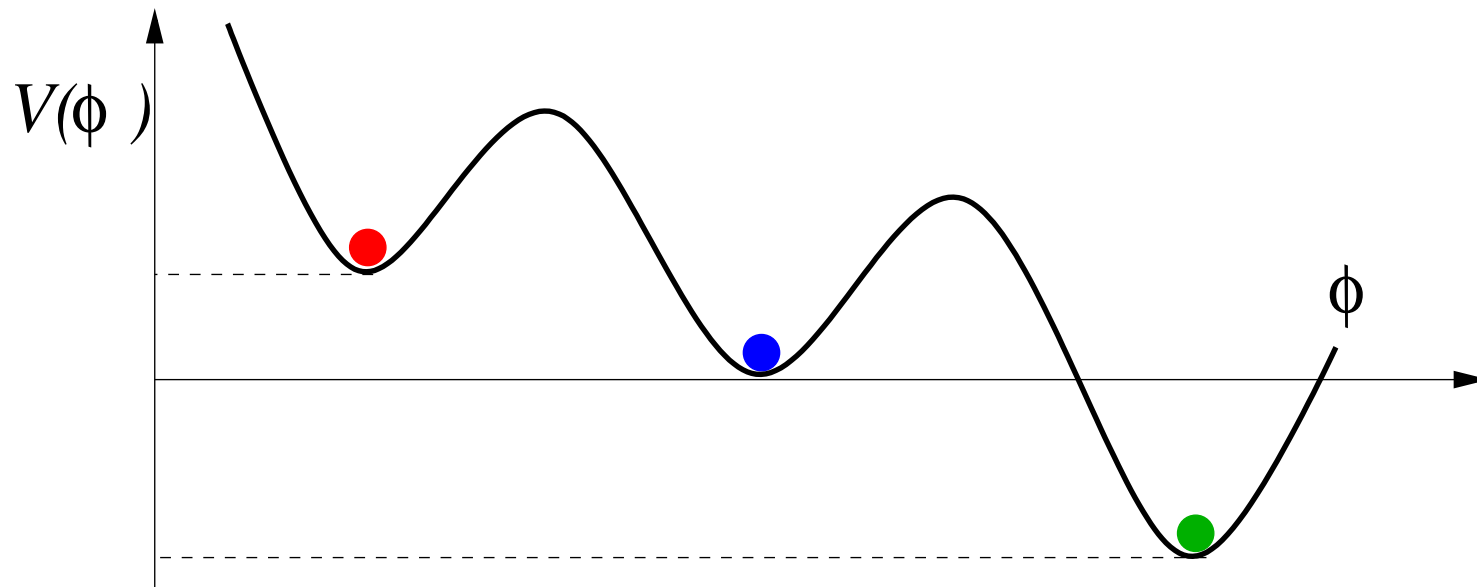
Newton: Física invariante bajo $V(x) \rightarrow V'(x) = V(x) + V_0$

$$\vec{F} = -\vec{\nabla} V, \quad v = \sqrt{2m^{-1}(V(x_2) - V(x_1))}$$

Cuántica: Añadir constante a $V(x)$ equivale a cambio de fase de $\psi(x)$

$$\begin{aligned} 0 &= -\frac{\hbar^2}{2m} \partial_x^2 \psi + V(x)\psi + V_0 \psi - i\hbar \partial_t \psi \\ &= \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \partial_x^2 \left(e^{-V_0 t / i\hbar} \psi \right) + V(x) e^{-V_0 t / i\hbar} \psi - i\hbar \partial_t \left(e^{-V_0 t / i\hbar} \psi \right) \right] e^{V_0 t / i\hbar} \end{aligned}$$

En relatividad general: cualquier tipo de energía contribuye a $T_{\mu\nu}$
 incluso energía potencial...

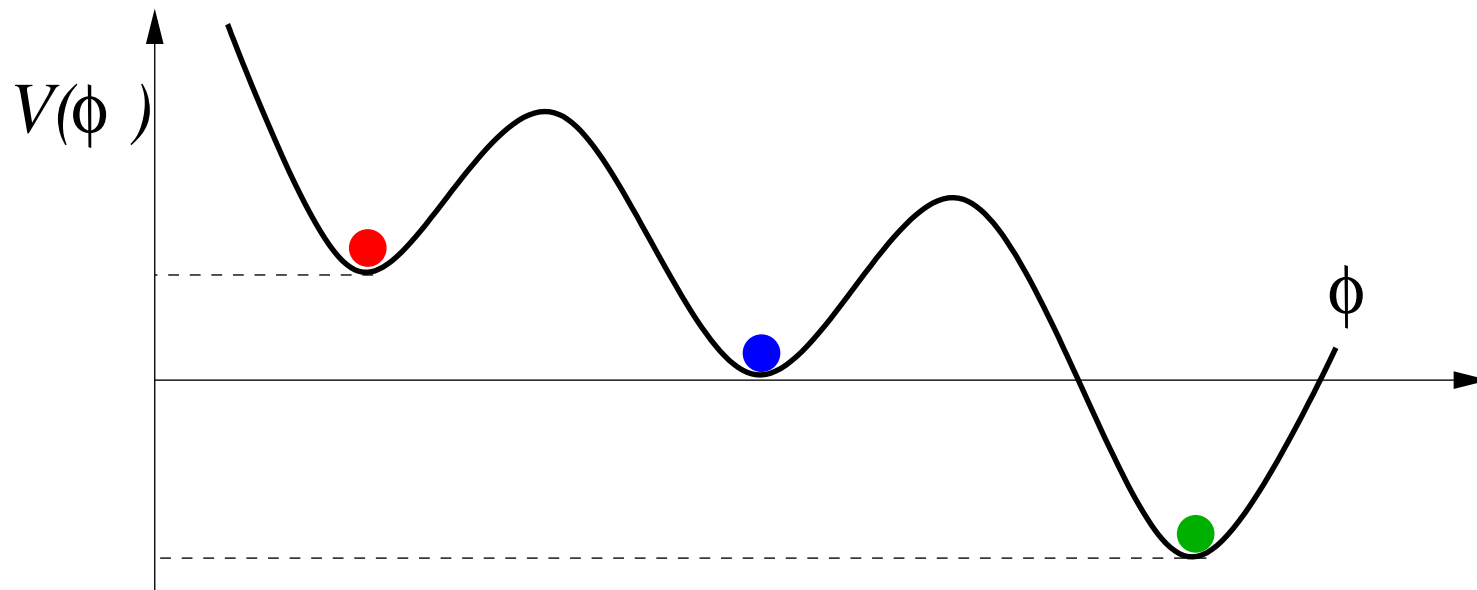


Ejemplo: Gravedad & escalar mínimamente acoplado

$$S = \int d^4x \sqrt{|g|} \left[\frac{1}{2\kappa} R + \frac{1}{2} (\partial\phi)^2 - V(\phi) \right]$$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\kappa \left[\partial_\mu \phi \partial_\nu \phi - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} (\partial\phi)^2 + g_{\mu\nu} V(\phi) \right], \quad \nabla^2 \phi = -V'(\phi)$$

En relatividad general: cualquier tipo de energía contribuye a $T_{\mu\nu}$
 incluso energía potencial...



Ejemplo: Gravedad & escalar mínimamente acoplado

$$S = \int d^4x \sqrt{|g|} \left[\frac{1}{2\kappa} R + \frac{1}{2} (\partial\phi)^2 - V(\phi) \right]$$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\kappa \left[\partial_\mu \phi \partial_\nu \phi - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} (\partial\phi)^2 + g_{\mu\nu} V(\phi) \right], \quad \nabla^2 \phi = -V'(\phi)$$

Solución particular: escalar congelado comporta como constante cosmológica

$$\partial_\mu \phi = 0, \quad V(\phi_0) = V_0 \quad \implies \quad R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\kappa g_{\mu\nu} V_0$$

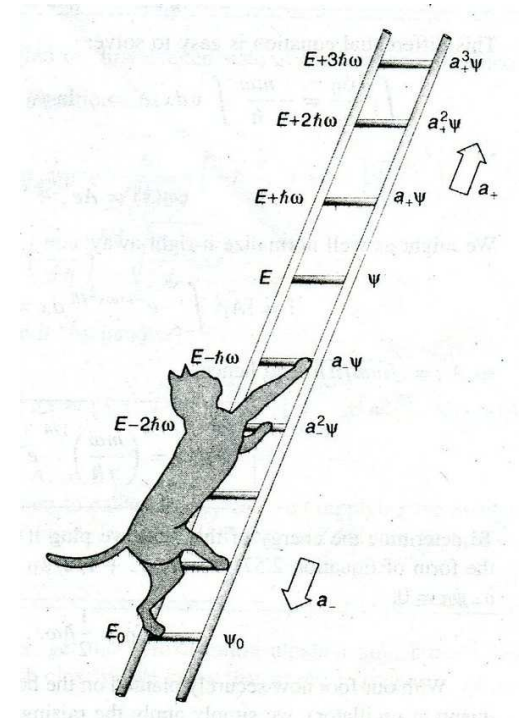
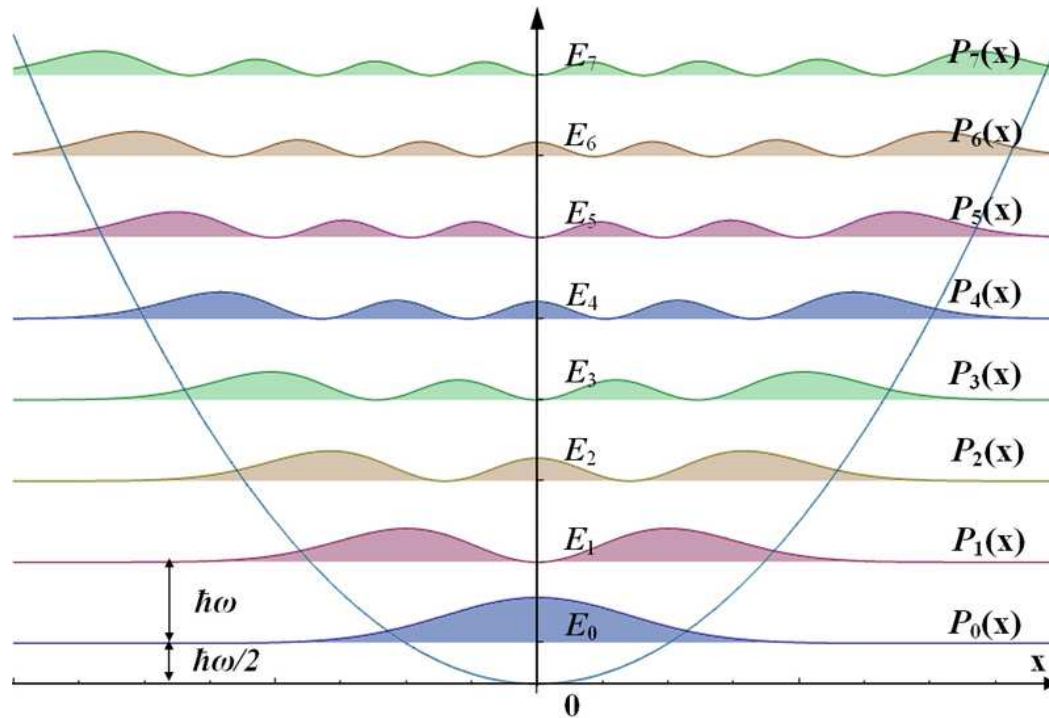
Constante cosmológica = energía del espacio vacío

—→ Por qué la energía del espacio vacío va a ser diferente de cero?

Constante cosmológica = energía del espacio vacío

→ Por qué la energía del espacio vacío va a ser diferente de cero?

Oscilador armónico cuántico: $H = \frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + \frac{1}{2} m \omega x^2$

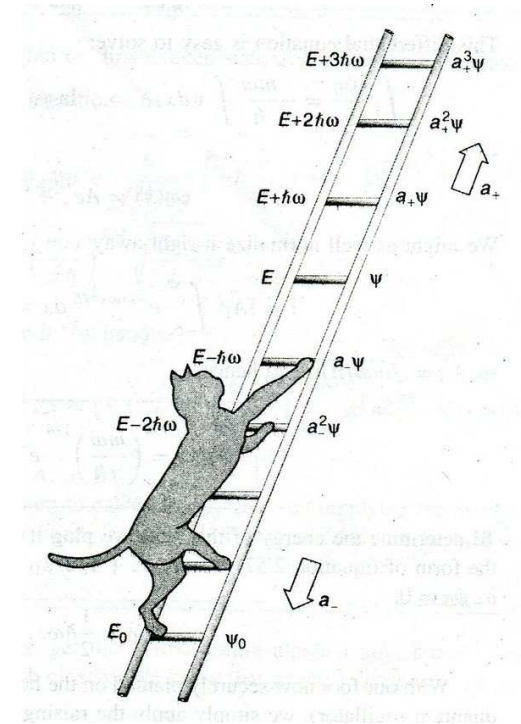
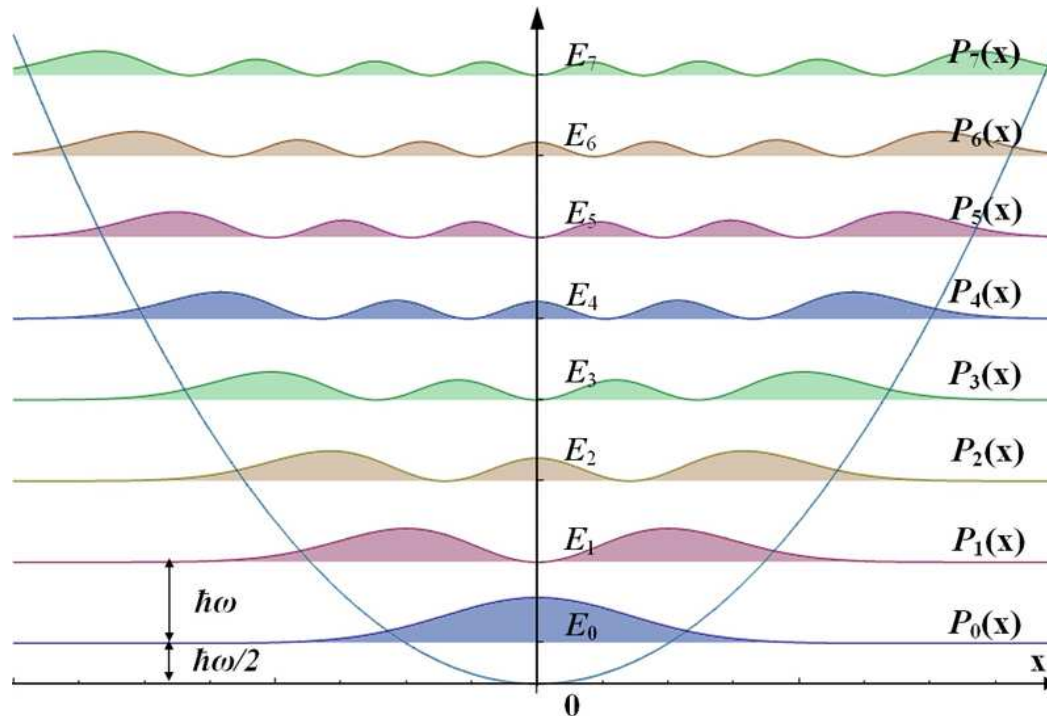


- Niveles de energía cuantizados: $E_n = \hbar\omega (n + \frac{1}{2})$

Constante cosmológica = energía del espacio vacío

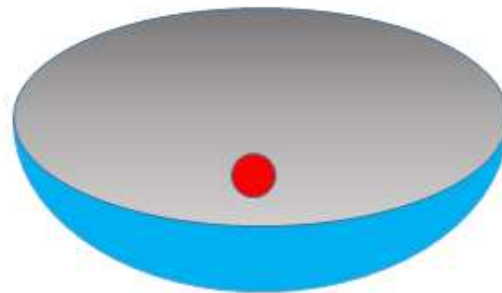
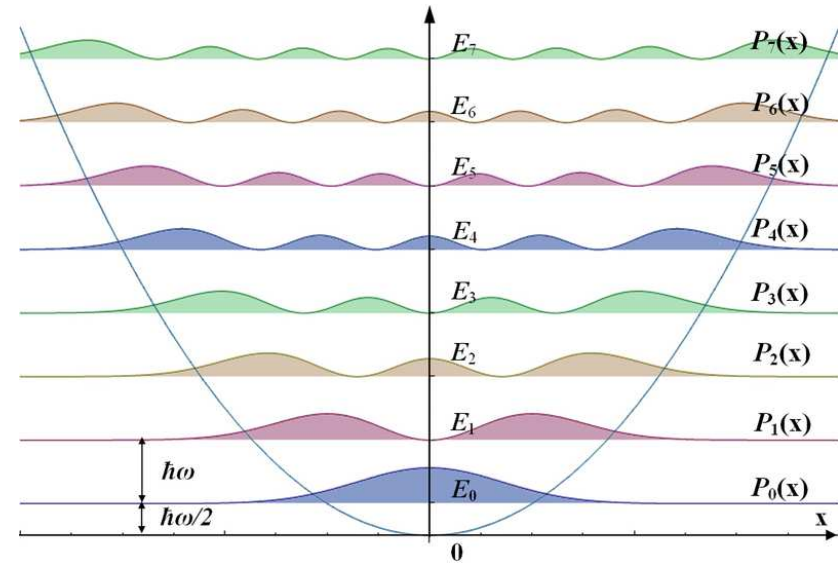
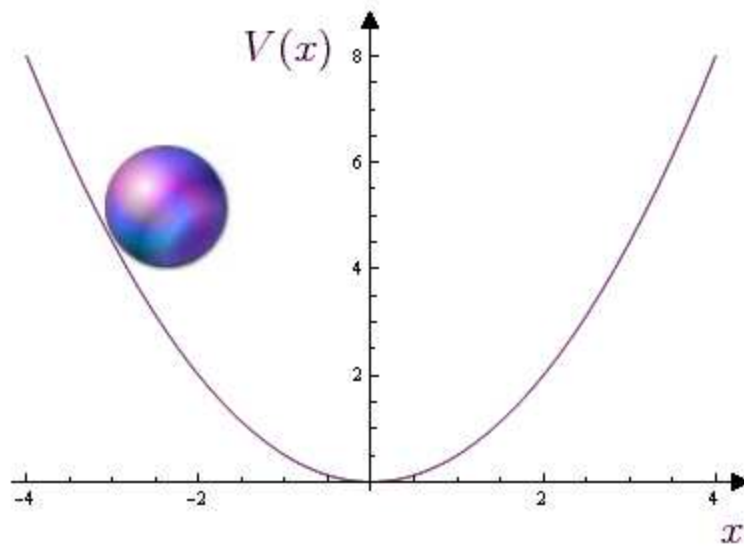
→ Por qué la energía del espacio vacío va a ser diferente de cero?

Oscilador armónico cuántico: $H = \frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + \frac{1}{2} m \omega x^2$

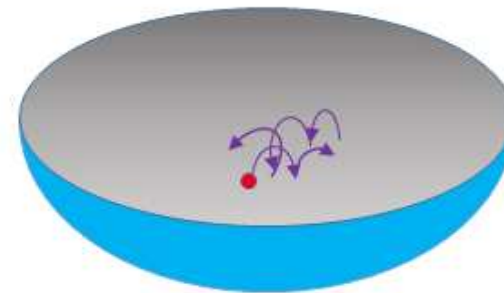


- Niveles de energía cuantizados: $E_n = \hbar\omega (n + \frac{1}{2})$
- **Energía del punto cero:** estado más bajo tiene energía $E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega$
→ **Energía del vacío positivo!**

Explicación intuitiva: Principio de Incertidumbre $\Delta x \cdot \Delta p > \frac{1}{2}\hbar$



Naïve Expectation
(ordinary experience)



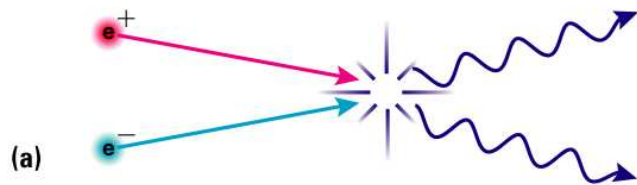
Quantum Fluctuation
(imperfect representation)

M. Strassler 2013

→ Principio de Incertidumbre induce fluctuaciones cuánticas con $E_0 \neq 0$

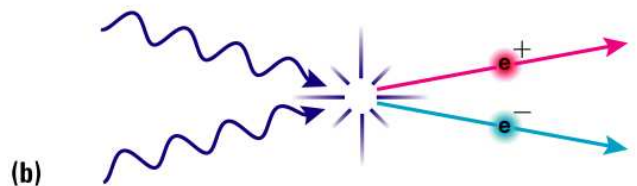
Teoría Cuántica de Campos = Mecánica Cuántica & Relatividad Especial

Einstein: $E = mc^2$



Aniquilación de electrón y positrón:

$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma \quad \text{con } E_\gamma \geq m_e$$



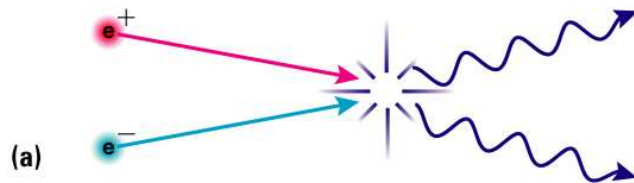
Creación de electrón y positrón:

$$2\gamma \rightarrow e^- + e^+ \quad \text{cuando } E_\gamma \geq m_e$$

Copyright © Addison Wesley

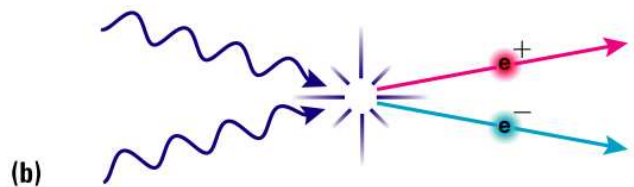
Teoría Cuántica de Campos = Mecánica Cuántica & Relatividad Especial

Einstein: $E = mc^2$



Aniquilación de electrón y positrón:

$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma \quad \text{con } E_\gamma \geq m_e$$

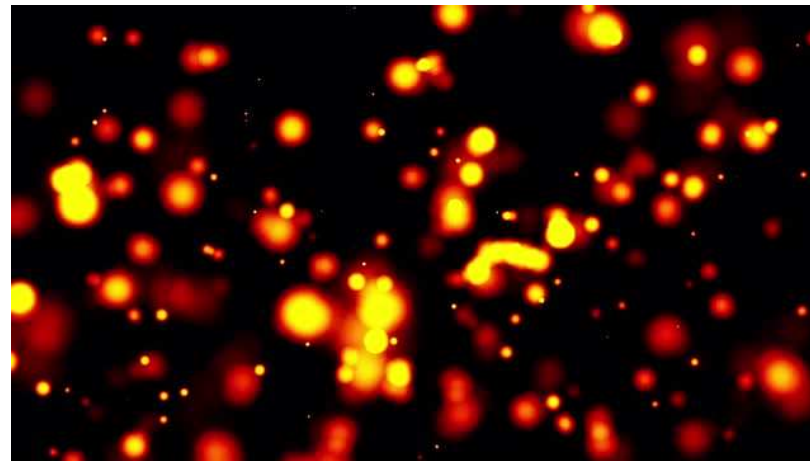
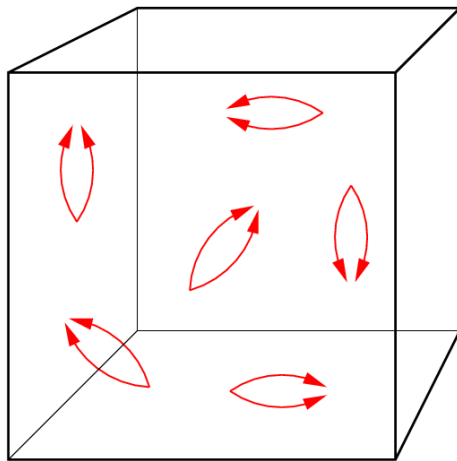


Creación de electrón y positrón:

$$2\gamma \rightarrow e^- + e^+ \quad \text{cuando } E_\gamma \geq m_e$$

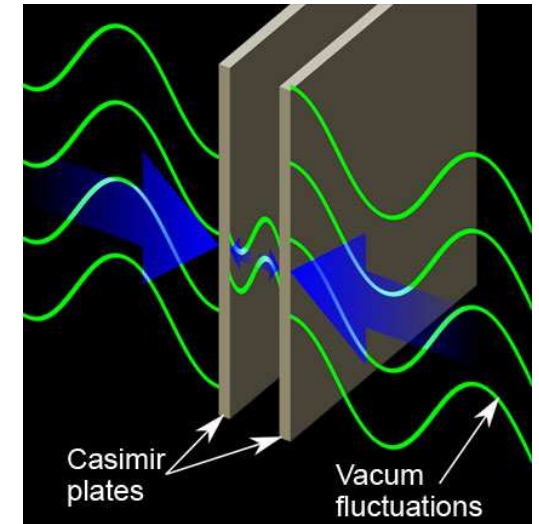
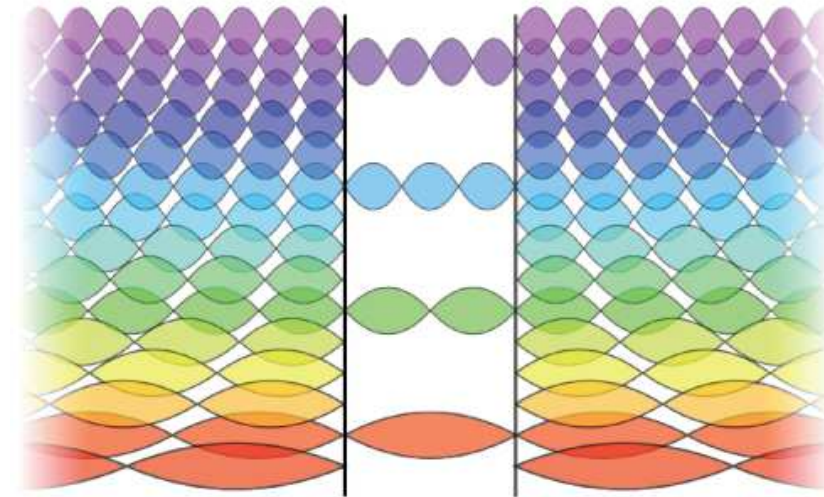
Copyright © Addison Wesley

Heisenberg: $\Delta E \cdot \Delta t > \frac{1}{2}\hbar$



→ Vacío cuántico es sopa de partículas virtuales

El efecto Casimir (1947): Fuerza atractiva entre espejos paralelos, debido a energía del vacío

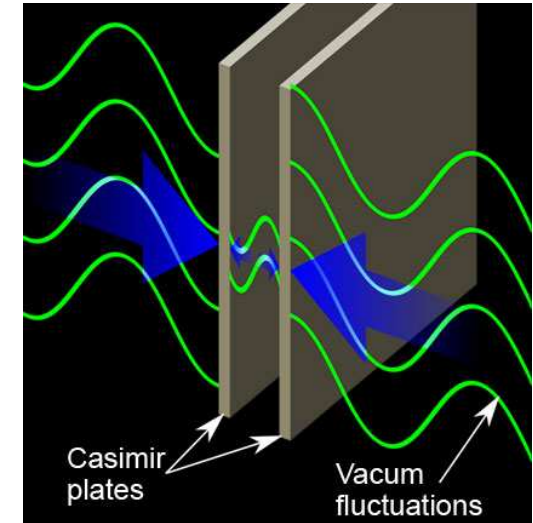
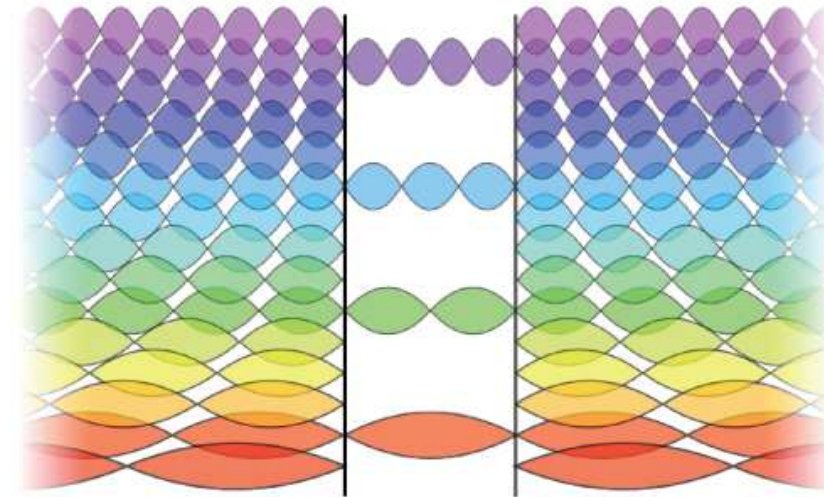


- Hay menos modos cuánticos entre las placas que fuera de las placas
- Presión del vacío neta hacia dentro: **Fuerza de Casimir**

$$d = 1 \mu m, \quad A = 1 cm^2 \quad \Rightarrow \quad F \sim 10^{-7} N$$

$$d = 1 nm, \quad A = 1 cm^2 \quad \Rightarrow \quad P \sim 1 atm$$

El efecto Casimir (1947): Fuerza atractiva entre espejos paralelos, debido a energía del vacío



→ Hay menos modos cuánticos entre las placas que fuera de las placas

→ Presión del vacío neta hacia dentro: **Fuerza de Casimir**

$$d = 1 \mu m, \quad A = 1 cm^2 \quad \Rightarrow \quad F \sim 10^{-7} N$$

$$d = 1 nm, \quad A = 1 cm^2 \quad \Rightarrow \quad P \sim 1 atm$$

Lamoreaux (1997): **Comprobación experimental** con error relativo de 15%

→ verificación experimental extremadamente complicada

1930 - 1968: Desarrollo de teoría cuántica de campos & renormalización

1967: Zel'dovich: **contribución de fluctuaciones cuánticas** a Λ



$$\phi(x) = \int \frac{d^3k}{\sqrt{(2\pi)^3 2\omega_k}} \left(a(k)e^{ik_\mu x^\mu} + a^\dagger(k)e^{-ik_\mu x^\mu} \right)$$

$$H = \int d^3k \omega_k \left[a^\dagger(k)a(k) + \frac{1}{2} \delta_k^3(0) \right]$$

$$\langle 0|H|0\rangle = \frac{1}{2} \delta_k^3(0) \int d^3k \omega_k \not\approx \infty$$

Campo cuántico es **colección de osciladores armónicos** con $E_0(k) = \frac{1}{2}\hbar\omega_k$

→ No es problema en TCT, sí en gravedad

1930 - 1968: Desarrollo de teoría cuántica de campos & renormalización

1967: Zel'dovich: **contribución de fluctuaciones cuánticas** a Λ



$$\phi(x) = \int \frac{d^3k}{\sqrt{(2\pi)^3 2\omega_k}} \left(a(k)e^{ik_\mu x^\mu} + a^\dagger(k)e^{-ik_\mu x^\mu} \right)$$

$$H = \int d^3k \omega_k \left[a^\dagger(k)a(k) + \frac{1}{2} \delta_k^3(0) \right]$$

$$\langle 0|H|0\rangle = \frac{1}{2} \delta_k^3(0) \int d^3k \omega_k \not\approx \infty$$

Campo cuántico es **colección de osciladores armónicos** con $E_0(k) = \frac{1}{2}\hbar\omega_k$

→ No es problema en TCT, sí en gravedad

Cut-off K a escala del Modelo Estándar o a la escala de Planck:

$$\rho_{\text{vac}} \sim 10^{65} - 10^{120} \text{ GeV}/m^3$$

→ da lugar a **constante cosmológica efectiva**

→ no concuerda con observaciones cosmológicas: $|\rho_{\text{obs}}| \lesssim 1 \text{ GeV}/m^3$

Problema (viejo) de la constante cosmológica:

Por qué la energía de las fluctuaciones cuánticas no contribuyen a la expansión del Universo?

Problema (viejo) de la constante cosmológica:

Por qué la energía las fluctuaciones cuánticas no contribuyen a la expansión del Universo?

- Renormalización de la acción clásica:

$$S = \int d^4x \sqrt{|g|} \left[\frac{1}{2\kappa} R + \frac{1}{2} (\partial\phi)^2 - V(\phi) - \Lambda_0(K) \right]$$

tal que $\Lambda_{\text{eff}} = \Lambda_0(K) + V(\phi_{\text{min}}) + \rho_{\text{vac}}(K)$

→ ajustar $\Lambda_0(K) = V(-\phi_{\text{min}}) - \rho_{\text{vac}}(K)$ es muy poco natural

Problema (viejo) de la constante cosmológica:

Por qué la energía las fluctuaciones cuánticas no contribuyen a la expansión del Universo?

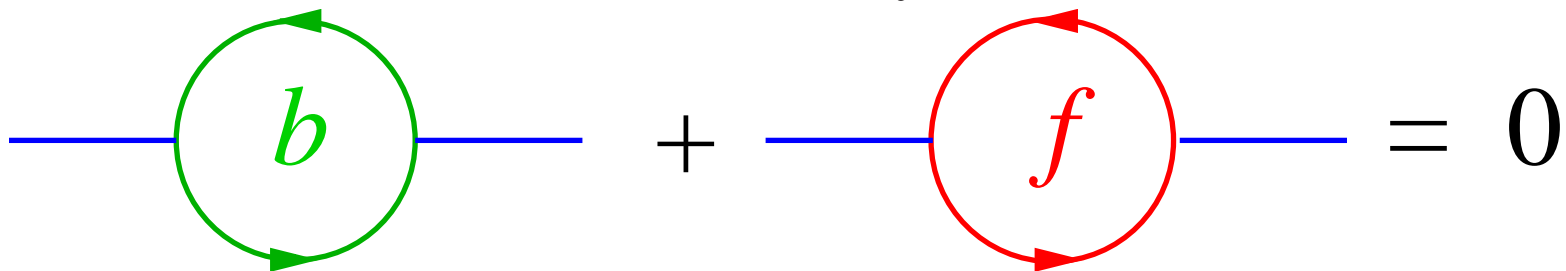
- Renormalización de la acción clásica:

$$S = \int d^4x \sqrt{|g|} \left[\frac{1}{2\kappa} R + \frac{1}{2} (\partial\phi)^2 - V(\phi) - \Lambda_0(K) \right]$$

tal que $\Lambda_{\text{eff}} = \Lambda_0(K) + V(\phi_{\text{min}}) + \rho_{\text{vac}}(K)$

→ ajustar $\Lambda_0(K) = V(-\phi_{\text{min}}) - \rho_{\text{vac}}(K)$ es muy poco natural

- Supersimetría: Contribuciones bosónicas y fermiónicas se cancelan?



→ contribuciones hasta escala de rotura de SUSY...

Problema (viejo) de la constante cosmológica:

Por qué la energía las fluctuaciones cuánticas no contribuyen a la expansión del Universo?

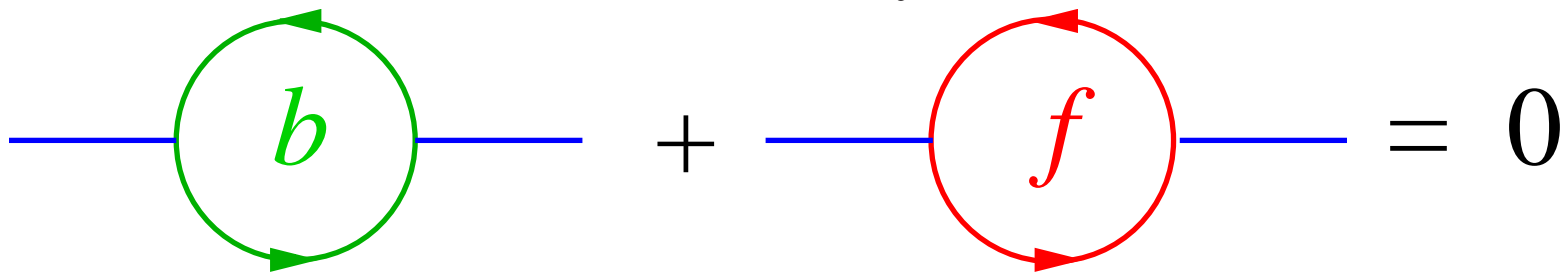
- Renormalización de la acción clásica:

$$S = \int d^4x \sqrt{|g|} \left[\frac{1}{2\kappa} R + \frac{1}{2} (\partial\phi)^2 - V(\phi) - \Lambda_0(K) \right]$$

tal que $\Lambda_{\text{eff}} = \Lambda_0(K) + V(\phi_{\text{min}}) + \rho_{\text{vac}}(K)$

→ ajustar $\Lambda_0(K) = V(-\phi_{\text{min}}) - \rho_{\text{vac}}(K)$ es muy poco natural

- Supersimetría: Contribuciones bosónicas y fermiónicas se cancelan?

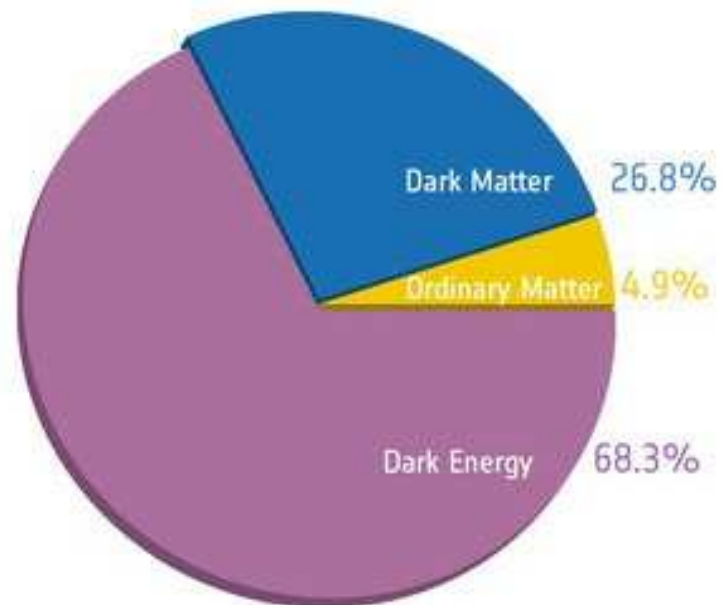


→ contribuciones hasta escala de rotura de SUSY...

Problema se ha puesto peor desde 1998: energía oscura...

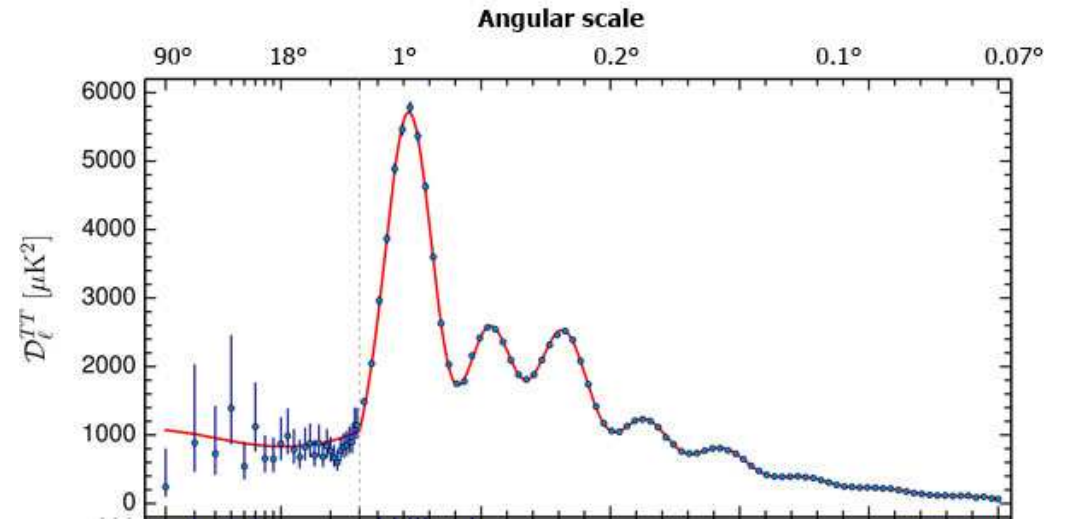
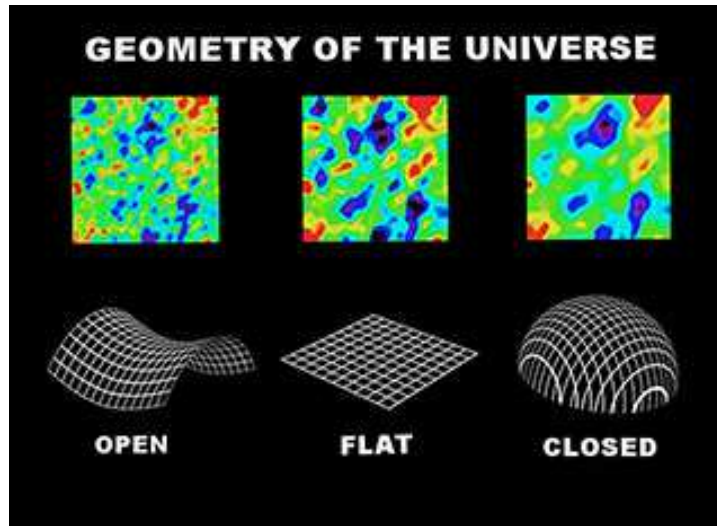
III. Constante cosmológica y la energía oscura

1998 - hoy



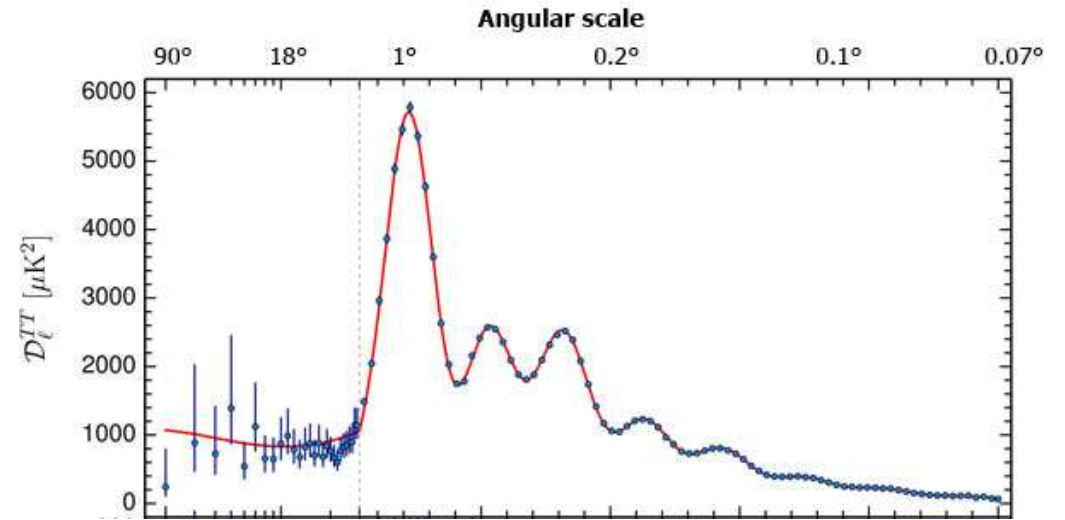
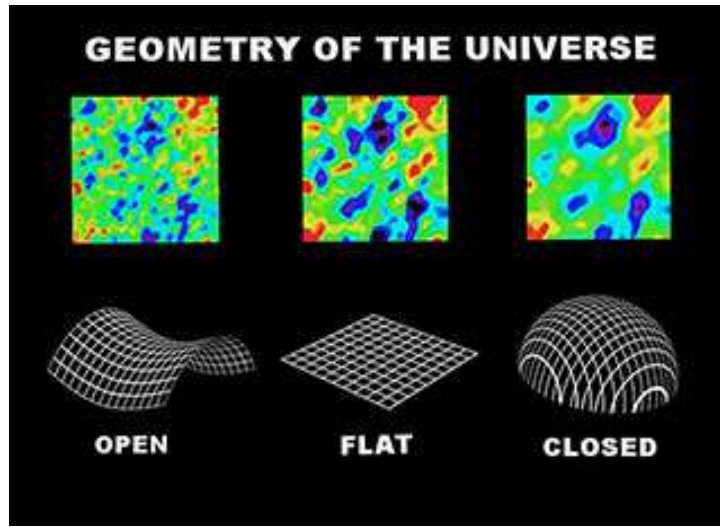
A partir de los años 1990: **modelo estándar cosmológico Λ CDM**

- CMB: Universo es espacialmente plano: $\Omega_{\text{tot}} = \sum_a \Omega_a = 1$

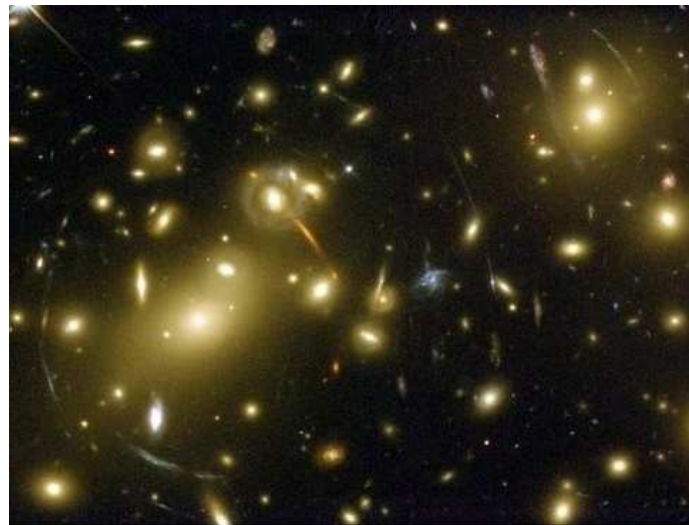


A partir de los años 1990: **modelo estándar cosmológico Λ CDM**

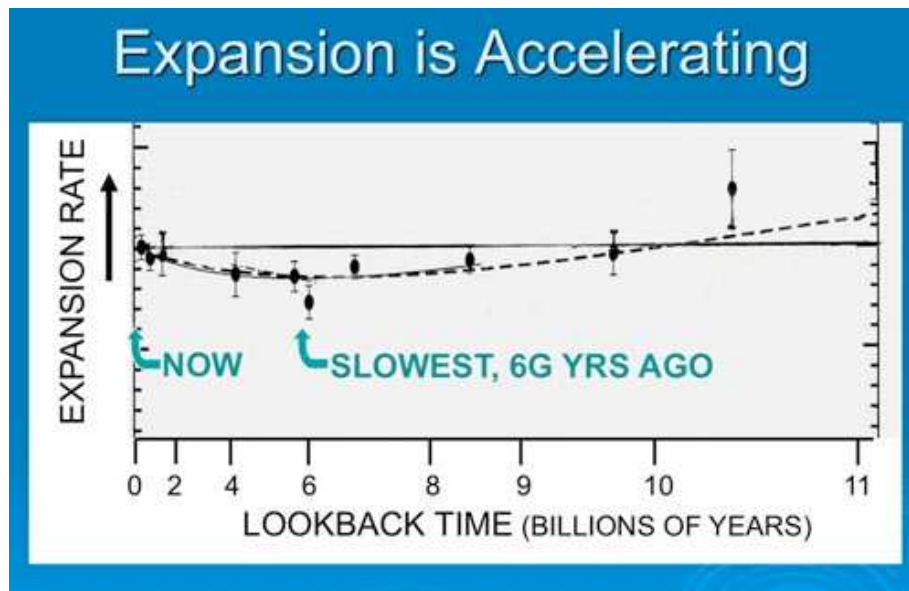
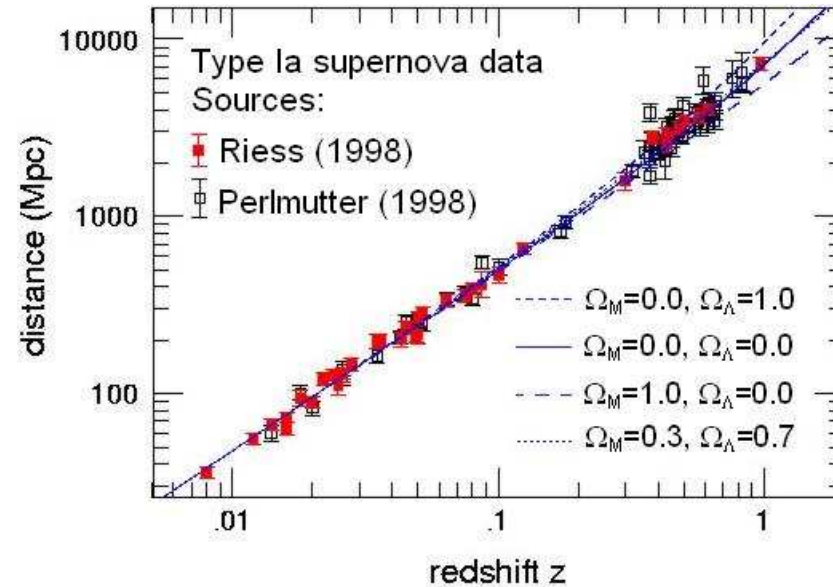
- CMB: Universo es espacialmente plano: $\Omega_{\text{tot}} = \sum_a \Omega_a = 1$



- Conteo de materia (bariónica & oscura): $\Omega_{\text{mat}} \sim 0,3$



- Rastreo de supernovae Tipo Ia: **expansión acelerada del universo**



Mejor ajuste:

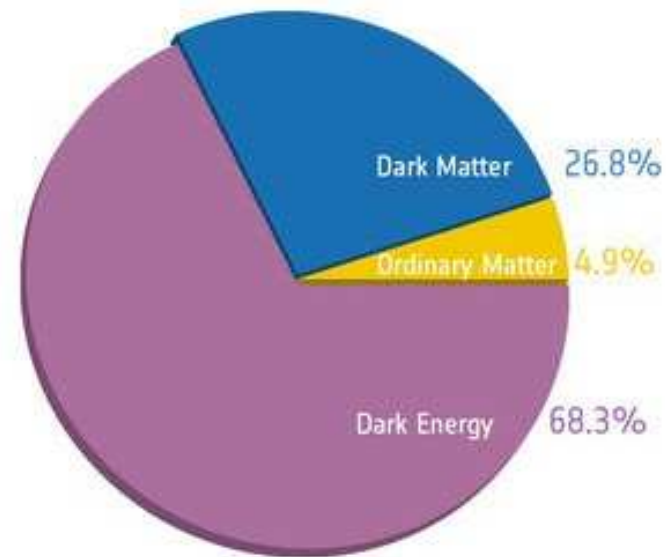
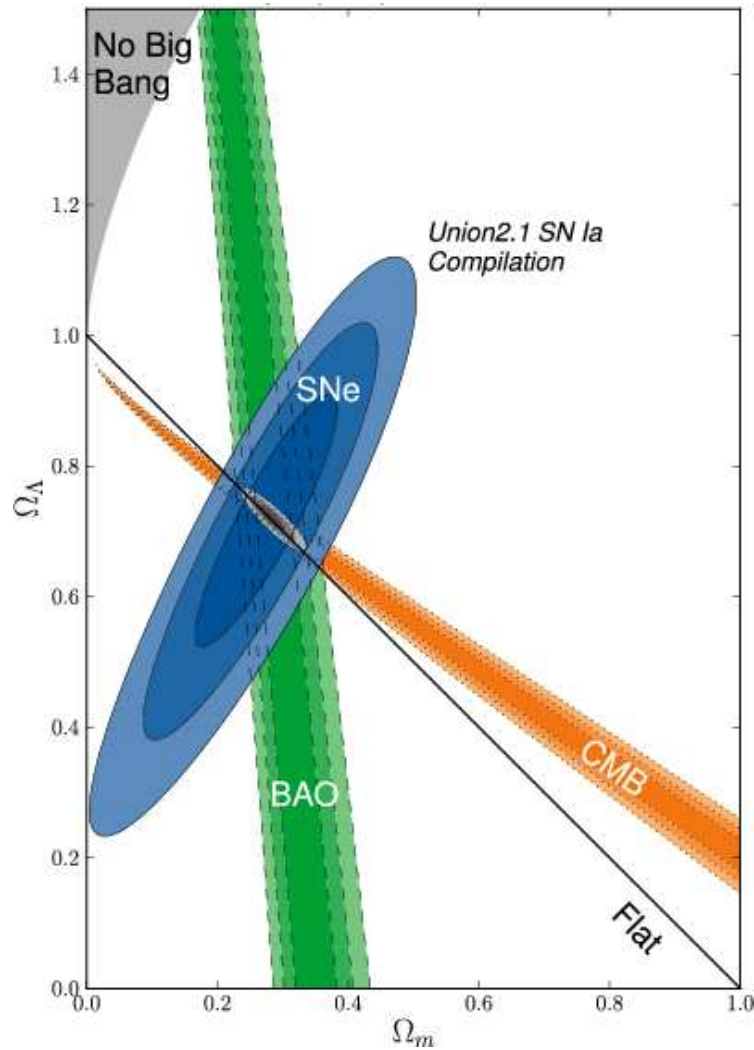
$$\rho_{\text{mat}} \sim 0,3 \rho_{\text{crit}}$$

$$\rho_\Lambda \sim 0,7 \rho_{\text{crit}}$$

→ **Energía oscura!**

Extraordinaria acuerdo entre datos independientes: Λ CDM

$$\Omega_{\text{bar}} \approx 0,048 \quad \Omega_{\text{DM}} \approx 0,264, \quad \Omega_{\Lambda} \approx 0,685$$



Expansión acelerada del universo: fluido con presión negativa

Parámetro de estado w caracteriza el tipo de materia:

$$P = w\rho \quad \Longrightarrow \quad \left\{ \begin{array}{ll} w = 0 & \text{materia fría} \\ w = 1/3 & \text{radiación} \\ w = -1 & \text{constante cosmológica} \\ w = -1,13^{+0,23}_{-0,25} & \text{energía oscura observada} \end{array} \right.$$

→ ¿Energía oscura = constante cosmológica = energía del vacío?

Expansión acelerada del universo: fluido con presión negativa

Parámetro de estado w caracteriza el tipo de materia:

$$P = w\rho \implies \begin{cases} w = 0 & \text{materia fría} \\ w = 1/3 & \text{radiación} \\ w = -1 & \text{constante cosmológica} \\ w = -1,13^{+0,23}_{-0,25} & \text{energía oscura observada} \end{cases}$$

→ ¿Energía oscura = constante cosmológica = energía del vacío?

Cálculo teórico versus observaciones cosmológicas:

$$\rho_{\text{DE}} \sim 1 \text{ GeV}/m^3, \quad \ddot{a}(t_0) = 9,2 \cdot 10^{-10} \text{ m}/s^2$$

$$\rho_{\text{vac}} \sim 10^{65} - 10^{120} \text{ GeV}/m^3$$

Expansión acelerada del universo: fluido con presión negativa

Parámetro de estado w caracteriza el tipo de materia:

$$P = w\rho \implies \begin{cases} w = 0 & \text{materia fría} \\ w = 1/3 & \text{radiación} \\ w = -1 & \text{constante cosmológica} \\ w = -1,13^{+0,23}_{-0,25} & \text{energía oscura observada} \end{cases}$$

→ ¿Energía oscura = constante cosmológica = energía del vacío?

Cálculo teórico versus observaciones cosmológicas:

$$\rho_{\text{DE}} \sim 1 \text{ GeV}/m^3, \quad \ddot{a}(t_0) = 9,2 \cdot 10^{-10} \text{ m}/s^2$$

$$\rho_{\text{vac}} \sim 10^{65} - 10^{120} \text{ GeV}/m^3$$

→ Peor predicción teórica de la historia!

Problema (nuevo) de la constante cosmológica:

¿Son las fluctuaciones cuánticas la causa de la aceleración del universo?

Si lo son, ¿por qué su contribución es tan baja en comparación con ρ_{vac} ?

Si no, ¿cuál es la causa de la aceleración?

Problema (nuevo) de la constante cosmológica:

¿Son las fluctuaciones cuánticas la causa de la aceleración del universo?

Si lo son, ¿por qué su contribución es tan baja en comparación con ρ_{vac} ?

Si no, ¿cuál es la causa de la aceleración?

Soluciones propuestas:

- Ajuste fino aún menos natural:

$$S = \int d^4x \sqrt{|g|} \left[\frac{1}{2\kappa} R + \frac{1}{2} (\partial\phi)^2 - \Lambda_0 \right]$$

tal que $\Lambda_{\text{eff}} = \Lambda_0(K) + \rho_{\text{vac}}(K)$

$$1 \text{ GeV}/m^3 = \Lambda_0(K) + 10^{120} \text{ GeV}/m^3$$

Problema (nuevo) de la constante cosmológica:

¿Son las fluctuaciones cuánticas la causa de la aceleración del universo?

Si lo son, ¿por qué su contribución es tan baja en comparación con ρ_{vac} ?

Si no, ¿cuál es la causa de la aceleración?

Soluciones propuestas:

- Ajuste fino aún menos natural:

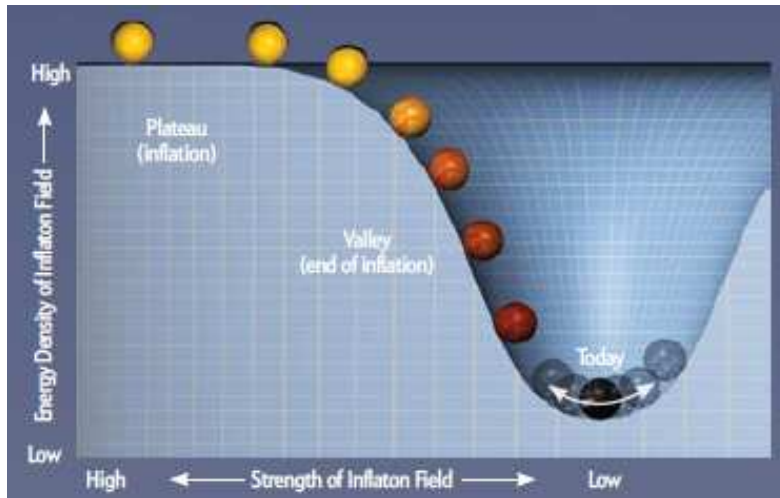
$$S = \int d^4x \sqrt{|g|} \left[\frac{1}{2\kappa} R + \frac{1}{2} (\partial\phi)^2 - \Lambda_0 \right]$$

tal que $\Lambda_{\text{eff}} = \Lambda_0(K) + \rho_{\text{vac}}(K)$

$$1 \text{ GeV}/m^3 = \Lambda_0(K) + 10^{120} \text{ GeV}/m^3$$

- Ya **no hay simetría** que protege $\Lambda \gtrsim 0$...
 - Supersimetría incompatible con $\Lambda > 0$
 - Soluciones tipo De Sitter en teoría de cuerdas?

- **Quintaesencia:** campo escalar que acelera universo
Idea muy parecida a inflación, sólo mucho más suave

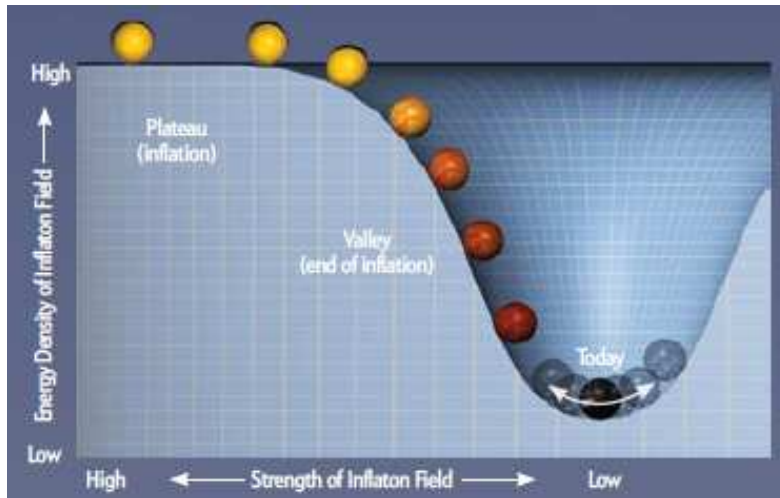


$$S = \int d^4x \sqrt{|g|} \left[\frac{1}{2\kappa} R + \frac{1}{2} (\partial\phi)^2 - V(\phi) \right]$$

$$w = \frac{P}{\rho} = \frac{\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V(\phi)}{\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi)}$$

→ otro campo escalar sin origen microscópico...

- **Quintaesencia:** campo escalar que acelera universo
Idea muy parecida a inflación, sólo mucho más suave



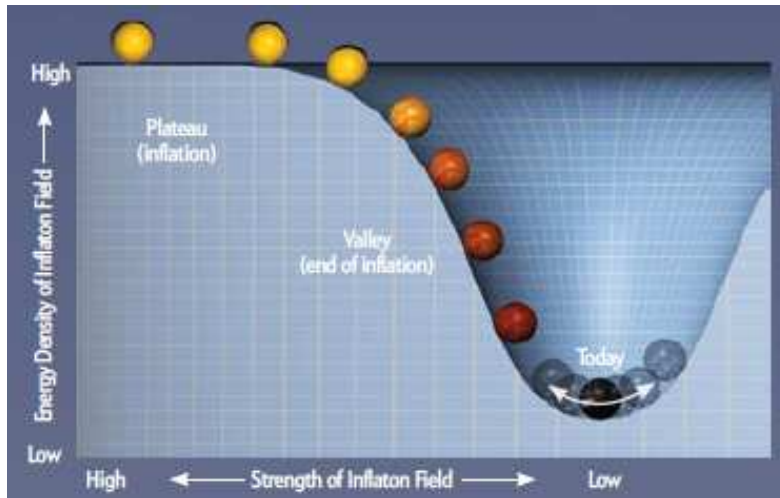
$$S = \int d^4x \sqrt{|g|} \left[\frac{1}{2\kappa} R + \frac{1}{2} (\partial\phi)^2 - V(\phi) \right]$$

$$w = \frac{P}{\rho} = \frac{\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V(\phi)}{\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi)}$$

→ otro campo escalar sin origen microscópico...

- Weinberg (1987): **Principio antrópico** predice $-10 \rho_{\text{mat}} \lesssim \Lambda \lesssim 10 \rho_{\text{mat}}$
 $\Lambda \lesssim -10 \rho_{\text{mat}}$: Universo cerrado, recolapsa demasiado rápido
 $10 \rho_{\text{mat}} \lesssim \Lambda$: Universo expande demasiado rápido: no hay estructuras

- **Quintaesencia:** campo escalar que acelera universo
Idea muy parecida a inflación, sólo mucho más suave



$$S = \int d^4x \sqrt{|g|} \left[\frac{1}{2\kappa} R + \frac{1}{2} (\partial\phi)^2 - V(\phi) \right]$$

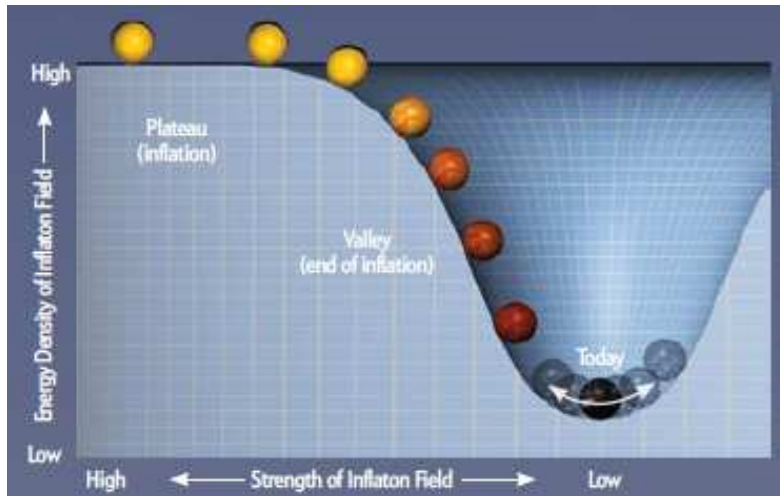
$$w = \frac{P}{\rho} = \frac{\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V(\phi)}{\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi)}$$

→ otro campo escalar sin origen microscópico...

- Weinberg (1987): **Principio antrópico** predice $-10 \rho_{\text{mat}} \lesssim \Lambda \lesssim 10 \rho_{\text{mat}}$
 $\Lambda \lesssim -10 \rho_{\text{mat}}$: Universo cerrado, recolapsa demasiado rápido
 $10 \rho_{\text{mat}} \lesssim \Lambda$: Universo expande demasiado rápido: no hay estructuras

→ Universo a medida del hombre/vida inteligente?

- **Quintaesencia:** campo escalar que acelera universo
Idea muy parecida a inflación, sólo mucho más suave



$$S = \int d^4x \sqrt{|g|} \left[\frac{1}{2\kappa} R + \frac{1}{2} (\partial\phi)^2 - V(\phi) \right]$$

$$w = \frac{P}{\rho} = \frac{\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V(\phi)}{\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi)}$$

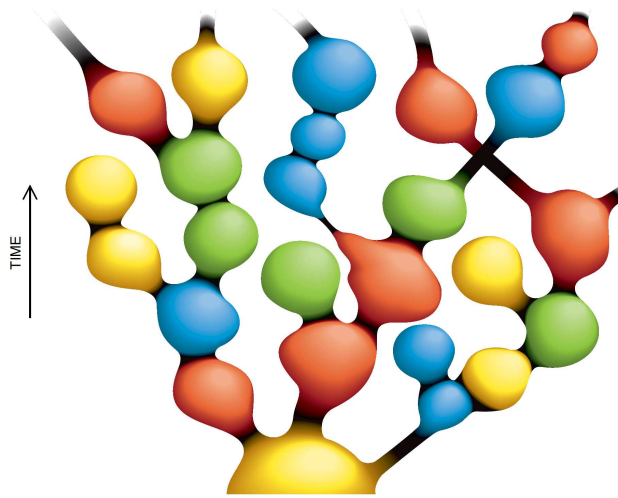
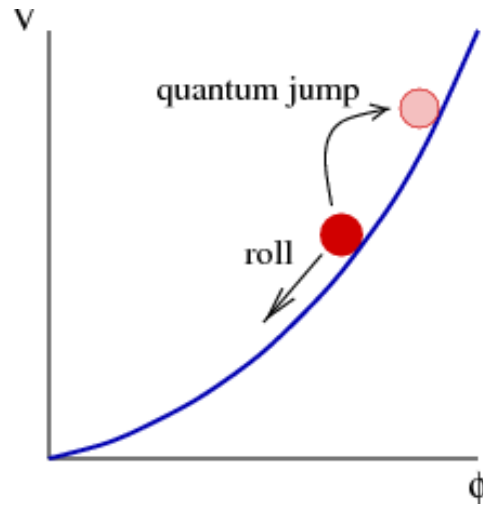
→ otro campo escalar sin origen microscópico...

- Weinberg (1987): **Principio antrópico** predice $-10 \rho_{\text{mat}} \lesssim \Lambda \lesssim 10 \rho_{\text{mat}}$
 $\Lambda \lesssim -10 \rho_{\text{mat}}$: Universo cerrado, recolapsa demasiado rápido
 $10 \rho_{\text{mat}} \lesssim \Lambda$: Universo expande demasiado rápido: no hay estructuras

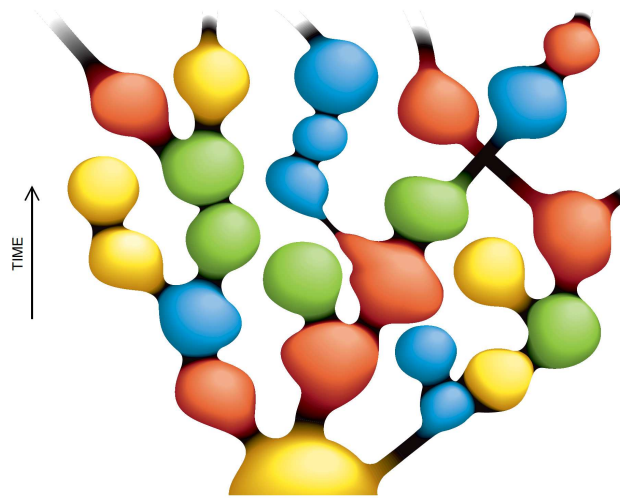
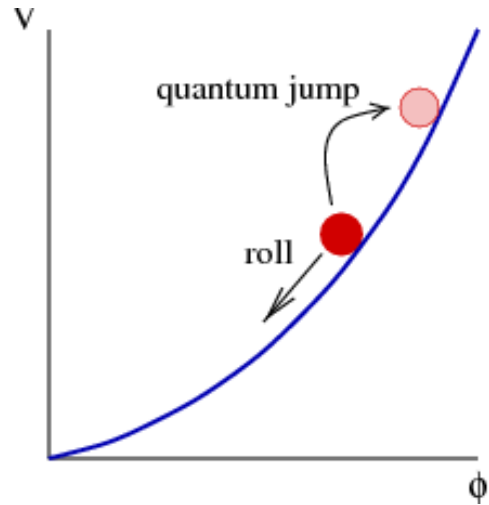
→ Universo a medida del hombre/vida inteligente?

→ Ensamble estadístico de universos?

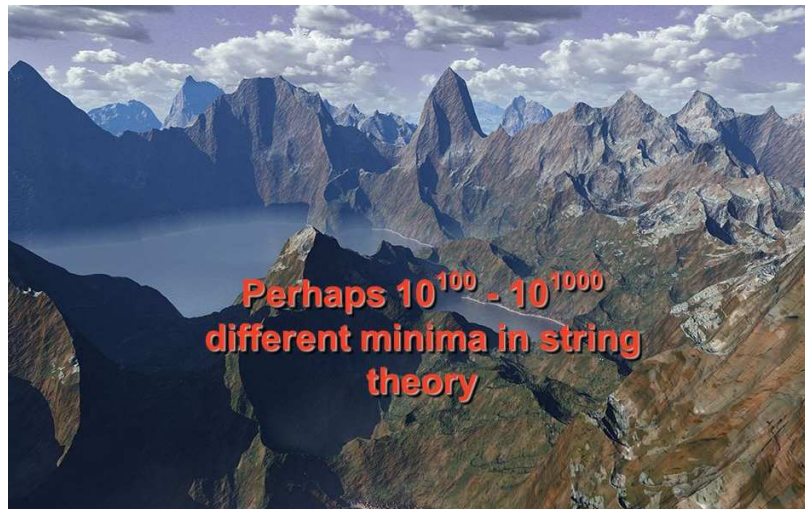
- **Inflación eterna:** fluctuaciones cuánticas inducen varias fases de inflación
 - multiverso con gran espectro de valores para Λ
 - vida sólo puede surgir en condiciones idóneas



- **Inflación eterna:** fluctuaciones cuánticas inducen varias fases de inflación
 - multiverso con gran espectro de valores para Λ
 - vida sólo puede surgir en condiciones idóneas



String theory predice $\sim 10^{500}$ vacíos: estudio estadístico



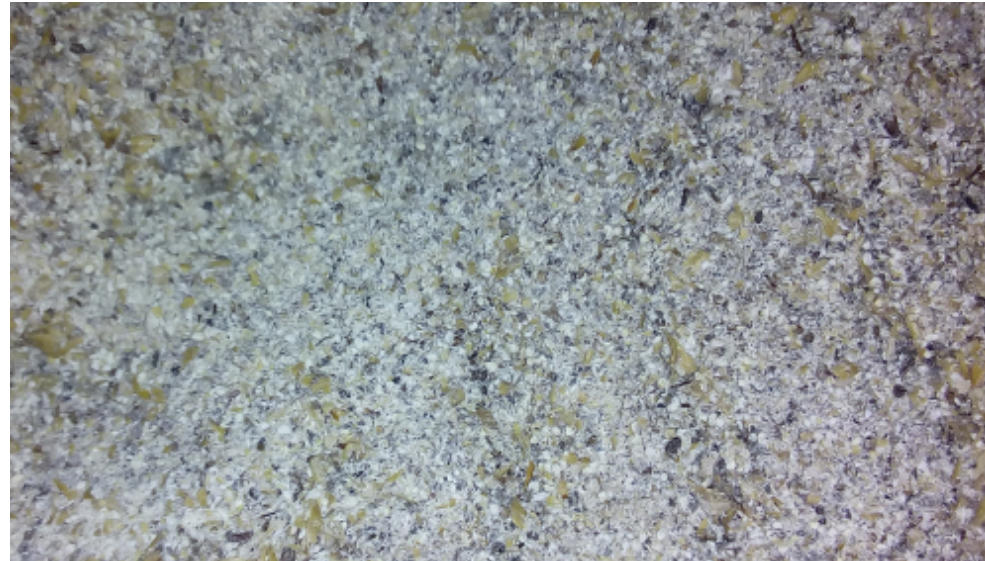
- **Verdadero problema:**

Relatividad General es **descripción granulada**, (semi-)clásica de un sistema cuántico subyacente...

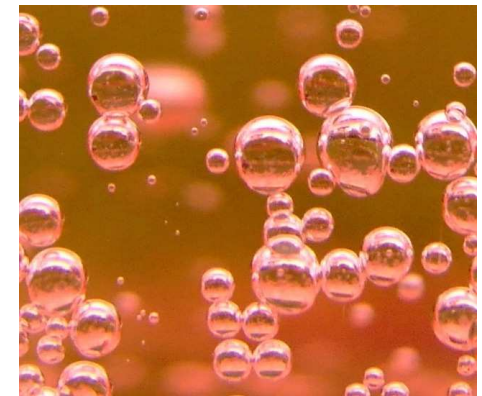
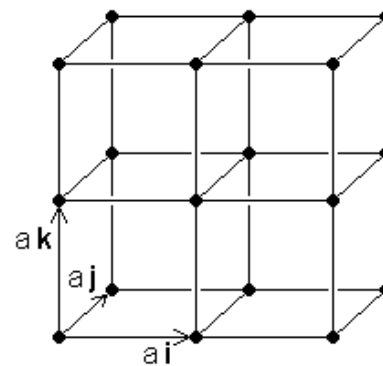
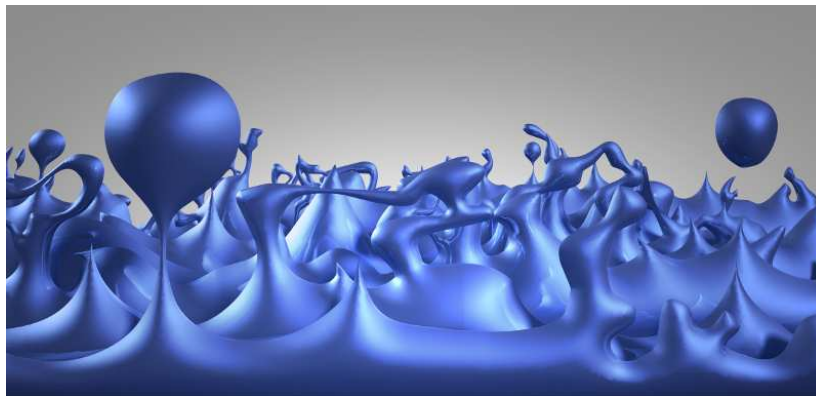


- **Verdadero problema:**

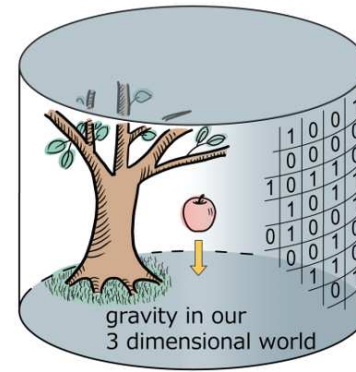
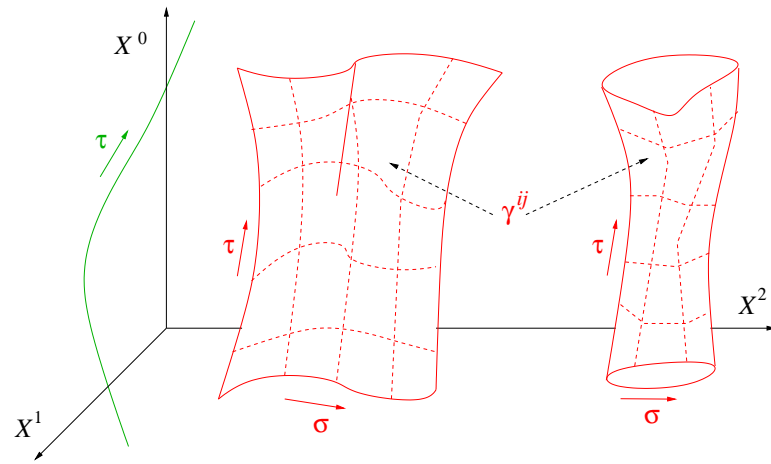
Relatividad General es **descripción granulada**, (semi-)clásica de un sistema cuántico subyacente...



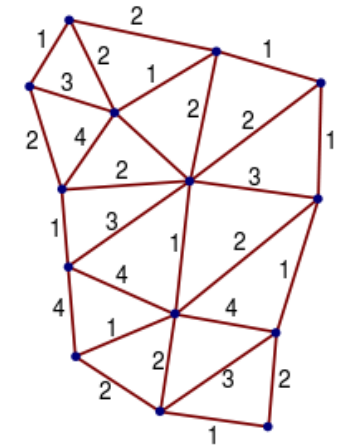
Gravedad cuántica debe dar **descripción cuántica del espaciotiempo**



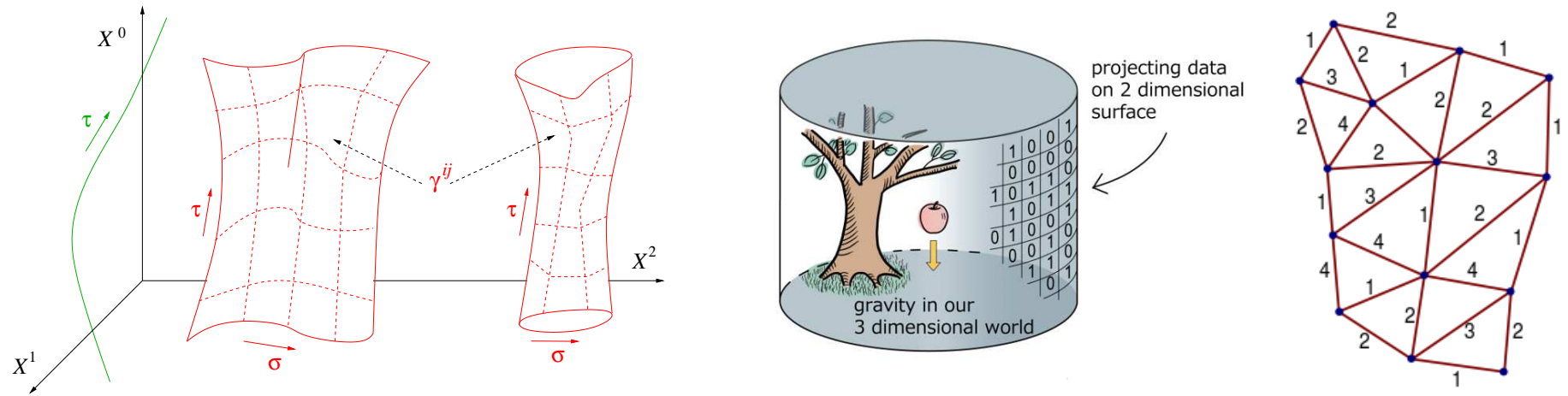
Aún no conocemos los grados de libertad cuanticos de gravedad



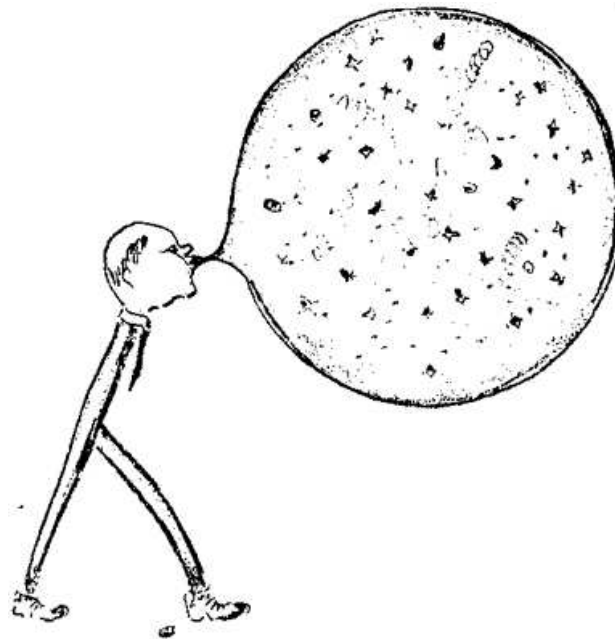
projecting data on 2 dimensional surface



Aún no conocemos los grados de libertad cuánticos de gravedad



¿Resolverá la gravedad cuántica el problema de la constante cosmológica?



Resumen en forma de preguntas

El problema de la constante cosmológica se ha manifestado en varias épocas y a diversas escalas y en diferentes ramas

Resumen en forma de preguntas

El problema de la constante cosmológica se ha manifestado en varias épocas y a diversas escalas y en diferentes ramas

- **1915 - 1935: Cosmología clásica relativista:**

Λ es parámetro en la acción clásica

¿Por qué, de todos los valores posibles, la Naturaleza elige $\Lambda = 0$?

Resumen en forma de preguntas

El problema de la constante cosmológica se ha manifestado en varias épocas y a diversas escalas y en diferentes ramas

- **1915 - 1935: Cosmología clásica relativista:**

Λ es parámetro en la acción clásica

¿Por qué, de todos los valores posibles, la Naturaleza elige $\Lambda = 0$?

- **1965 - 1998: Teoría cuántica de campos:**

Energía del vacío debería generar constante cosmológica efectiva

¿Por qué las fluctuaciones cuánticas no contribuyen a la expansión del universo?

Resumen en forma de preguntas

El problema de la constante cosmológica se ha manifestado en varias épocas y a diversas escalas y en diferentes ramas

- **1915 - 1935: Cosmología clásica relativista:**

Λ es parámetro en la acción clásica

¿Por qué, de todos los valores posibles, la Naturaleza elige $\Lambda = 0$?

- **1965 - 1998: Teoría cuántica de campos:**

Energía del vacío debería generar constante cosmológica efectiva

¿Por qué las fluctuaciones cuánticas no contribuyen a la expansión del universo?

- **1998 - hoy: Energía oscura**

Expansión acelerada del universo delata fluido con $P < 0$

¿Hay relación entre energía oscura y energía del vacío?

Bibliografía

- A. Einstein, H.A. Lorentz, H. Weyl, H. Minkowski,
The Principle of Relativity,
Dover Books on Physics, 1952
- H. Nussbaumer & L. Bieri, *Discovering the Expanding Universe*,
Cambridge University Press, 2009
- C.P. Burgess,
The Cosmological Constant Problem: Why it's hard to get Dark Energy from Micro-physics,
arXiv:1309.4133
- J. Martin,
Everything You Always Wanted To Know About The Cosmological Constant Problem (But Were Afraid To Ask),
arXiv:1205.3365
- S.E. Rugh & H. Zinkernagel,
The quantum vacuum and the cosmological constant problem,
Studies in History and Philosophy of Modern Physics 33 (2002) 663-705

Bibliografía

- A. Einstein, H.A. Lorentz, H. Weyl, H. Minkowski,
The Principle of Relativity,
Dover Books on Physics, 1952
- H. Nussbaumer & L. Bieri, *Discovering the Expanding Universe*,
Cambridge University Press, 2009
- C.P. Burgess,
The Cosmological Constant Problem: Why it's hard to get Dark Energy from Micro-physics,
arXiv:1309.4133
- J. Martin,
Everything You Always Wanted To Know About The Cosmological Constant Problem (But Were Afraid To Ask),
arXiv:1205.3365
- S.E. Rugh & H. Zinkernagel,
The quantum vacuum and the cosmological constant problem,
Studies in History and Philosophy of Modern Physics 33 (2002) 663-705

Gracias!

Cronología de la cosmología teórica y observacional temprana

- 1890's: Kapteyn: modelo de la galaxia
- 1915: Einstein: Relatividad General
Shapley: universo = nuestra galaxia + cúmulos globulares
- 1917: Einstein Static Universe & Espacio de De Sitter
Slypher observa redshift en galaxias
Curtis: nebulosas son galaxias lejanas; inicio debate Shapley-Curtis
- 1922: Modelos de Friedmann
- 1925: Lemaître: universos dinámicos
Hubble: cepheides en Andrómeda; final debate Shapley-Curtis
- 1927: Lemaître: Ley de Hubble teórica
- 1929: Hubble: Ley de Hubble observacional
- 1930: Eddington & De Sitter descubren trabajo de Lemaître
- 1932: Modelo Einstein-De Sitter
- 1953: Hubble muere, sin creer en expansión del universo

Conservación de carga y conservación de energía

- Ley de continuidad: $\nabla_{\mu} j^{\mu} \equiv \frac{1}{\sqrt{|g|}} \partial_{\mu} (\sqrt{|g|} j^{\mu}) = 0$

Conservación de carga:

$$0 = \int \sqrt{|g|} \nabla_{\mu} j^{\mu} d^4x = \int \partial_{\mu} (\sqrt{|g|} j^{\mu}) d^4x = \int \sqrt{|g|} j^{\mu} d^3x$$

$$Q = \int_V j^0(x) d^3x = \int_V \rho_e(x) d^3x = \int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{E} d^3x = \int_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

→ Teorema de Gauss para campos vectoriales

Conservación de carga y conservación de energía

- Ley de continuidad: $\nabla_{\mu} j^{\mu} \equiv \frac{1}{\sqrt{|g|}} \partial_{\mu} \left(\sqrt{|g|} j^{\mu} \right) = 0$

Conservación de carga:

$$0 = \int \sqrt{|g|} \nabla_{\mu} j^{\mu} d^4x = \int \partial_{\mu} \left(\sqrt{|g|} j^{\mu} \right) d^4x = \int \sqrt{|g|} j^{\mu} d^3x$$

$$Q = \int_V j^0(x) d^3x = \int_V \rho_e(x) d^3x = \int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{E} d^3x = \int_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

→ Teorema de Gauss para campos vectoriales

- Ley de continuidad: $\nabla_{\mu} T^{\mu\nu}(\phi) \equiv \frac{1}{\sqrt{|g|}} \partial_{\mu} \left(\sqrt{|g|} T^{\mu\nu} \right) + \Gamma_{\mu\rho}^{\nu} T^{\mu\rho} = 0$

→ ~~#~~ teorema de Gauss para campos tensoriales

→ ~~#~~ cantidad conservada asociada a $\nabla_{\mu} T^{\mu\nu}(\phi) = 0$

→ $T^{\mu\nu}(\phi)$ solo energía-momento de materia;

energía-momento de campo gravitatorio $\tau^{\mu\nu}$?

$$\partial_{\mu} \left[|g| (T^{\mu\nu} + \tau^{\mu\nu}) \right] = 0?$$

- invariancia bajo **traslaciones temporales** (config estacionarias)
 - campo vectorial k^μ de traslaciones temporales
 - $J^\mu = k_\mu T^{\mu\nu}$ campo vectorial con $\nabla_\mu J^\mu = 0$
 - Cantidad conservada

$$E = \int \sqrt{|g|} J^0 d^3x$$

Teorema de Noether:

Cantidades conservadas están relacionadas con simetrías

Einstein (homenaje a E. Noether):

La energía se crea y se destruye y a veces se conserva