

# Einstein y las Teoría de Campos Unificados

**Manuel Asorey**

Departamento de Física Teórica  
Universidad de Zaragoza

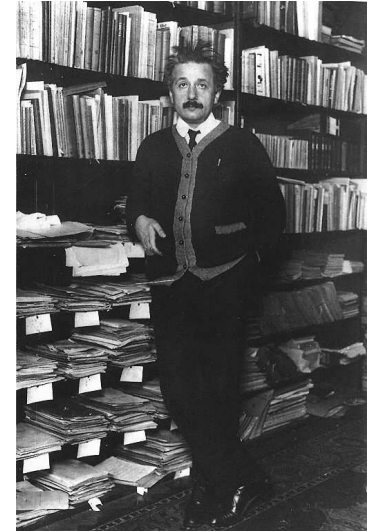
Barcelona, Febrero 2005

# TRES DECADAS DE BUSQUEDA

¡¡Casi la mitad de la vida de A. Eintein !!

Sería un gran paso adelante unificar en un simple esquema los campos gravitatorios y electromagnéticos. Sería un remate satisfactorio de la época de la física teórica comenzada por Faraday y Maxwell[Einstein, 1920]

---

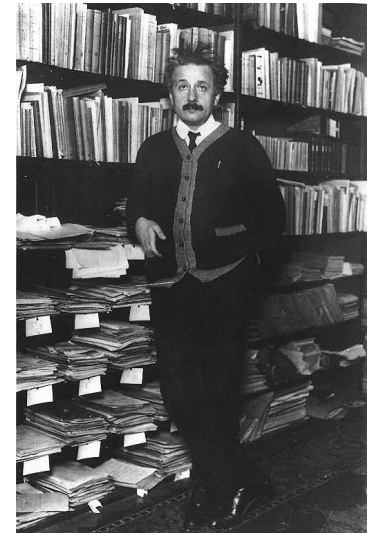


# TRES DECADAS DE BUSQUEDA

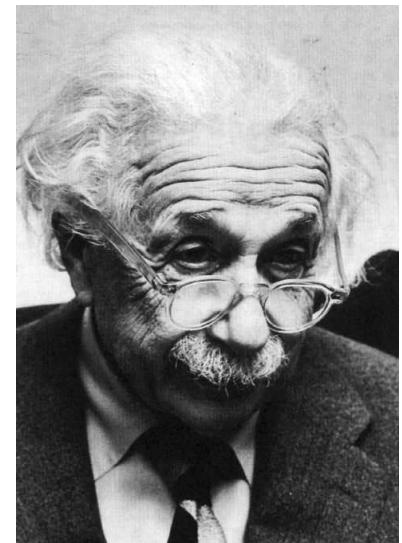
¡¡Casi la mitad de la vida de A. Einstein !!

Sería un gran paso adelante unificar en un simple esquema los campos gravitatorios y electromagnéticos. Sería un remate satisfactorio de la época de la física teórica comenzada por Faraday y Maxwell[Einstein, 1920]

---



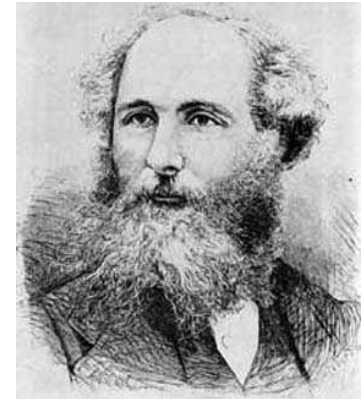
En mi opinión la teoría aquí presentada es la teoría de campo relativista [unificado] más simple que es posible formular lógicamente. Pero esto no significa que la naturaleza no pueda obedecer a una teoría de campo [unificado] más compleja [Einstein, 1954]



# Teoría del Campo Electromagnético

## Ecuaciones de Maxwell

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= 4\pi\rho \\ \nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} &= \frac{4\pi}{c} \mathbf{J} \\ \nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0\end{aligned}$$



# Teoría del Campo Electromagnético

## Ecuaciones de Maxwell

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= 4\pi\rho \\ \nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} &= \frac{4\pi}{c} \mathbf{J} \\ \nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0\end{aligned}$$



Teoría de la Relatividad Especial [Einstein 1905]

$$x_\mu = (x_0 = ct, x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z)$$

# Teoría del Campo Electromagnético

## Ecuaciones de Maxwell

$$F_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & -E_1 & -E_2 & -E_3 \\ E_1 & 0 & B_3 & -B_2 \\ E_2 & -B_3 & 0 & B_1 \\ E_3 & B_2 & -B_1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu; \quad \partial^\mu F_{\mu\nu} = \frac{4\pi}{c} J_\nu$$

$$F_{\mu\nu} \neq -F_{\nu\mu}$$



# Teoría del Campo Gravitatorio

Métrica del espacio-tiempo

$$g_{\mu\nu}$$

Conexión de Christoffel-Levi-Civita

$$\Gamma_{\mu\nu}^{\sigma} = \frac{1}{2}g^{\sigma\rho}(\partial_{\mu}g_{\nu\rho} + \partial_{\nu}g_{\rho\mu} - \partial_{\rho}g_{\mu\nu})$$

Tensor de Riemann

$$R^{\rho}{}_{\sigma\mu\nu} = \partial_{\mu}\Gamma_{\nu\sigma}^{\rho} - \partial_{\nu}\Gamma_{\mu\sigma}^{\rho} + \Gamma_{\mu\lambda}^{\rho}\Gamma_{\nu\sigma}^{\lambda} - \Gamma_{\nu\lambda}^{\rho}\Gamma_{\mu\sigma}^{\lambda}$$

Tensor de Ricci

$$R_{\mu\nu} = R^{\lambda}{}_{\mu\lambda\nu} \quad R = g^{\mu\nu}R_{\mu\nu}$$

# Teoría del Campo Gravitatorio

## Ecuaciones de Einstein:

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





# Teoría del Campo Gravitatorio

## Ecuaciones de Einstein:

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



# EL GRAN RETO DE LA UNIFICACION

## Antecedentes

### Orígen electromagnético de la Masa

- Teoría de la materia electromagnética [Einstein 1909, Mie 1912]

# EL GRAN RETO DE LA UNIFICACION

## Antecedentes

### Orígen electromagnético de la Masa

- Teoría de la materia electromagnética [Einstein 1909, Mie 1912]
- Interacción electro-gravitatoria [Hilbert, 1915]

# EL GRAN RETO DE LA UNIFICACION

## Antecedentes

### Orígen electromagnético de la Masa

- Teoría de la materia electromagnética [Einstein 1909, Mie 1912]
- Interacción electro-gravitatoria [Hilbert, 1915]
- Teoría con  $c$  variable [Ishiwara, 1912-1914]

# EL GRAN RETO DE LA UNIFICACION

## Antecedentes

### Orígen electromagnético de la Masa

- Teoría de la materia electromagnética [Einstein 1909, Mie 1912]
- Interacción electro-gravitatoria [Hilbert, 1915]
- Teoría con  $c$  variable [Ishiwara, 1912-1914]

## Teorías Unificadas

- Teoría de métrica no simétrica [Forster , 1917]

# EL GRAN RETO DE LA UNIFICACION

## Antecedentes

### Orígen electromagnético de la Masa

- Teoría de la materia electromagnética [Einstein 1909, Mie 1912]
- Interacción electro-gravitatoria [Hilbert, 1915]
- Teoría con  $c$  variable [Ishiwara, 1912-1914]

## Teorías Unificadas

- Teoría de métrica no simétrica [Forster , 1917]  
$$g_{\mu\nu} = g_{\mu\nu} + F_{\mu\nu}$$
- Teoría pentadimensional [Nordström, 1914]

$$A_{\mu} = (A_0, A_1, A_2, A_3, \varphi)$$

# TEORÍA de WEYL

## Electromagnetismo y Gravitación [H. Weyl, 1918]

$$\Gamma_{\mu\nu}^{\sigma} = \frac{1}{2}g^{\sigma\rho}(\partial_{\mu}g_{\nu\rho} + \partial_{\nu}g_{\rho\mu} - \partial_{\rho}g_{\mu\nu}) \\ + \frac{1}{2}[\delta_{\mu}^{\sigma}A_{\nu} + \delta_{\nu}^{\sigma}A_{\mu} - g^{\sigma\alpha}g_{\mu\nu}A_{\alpha}]$$



$g_{\mu\nu}$  Campo gravitatorio

$A_{\mu}$  Campo Electromagnético

# TEORÍA de WEYL

## Electromagnetismo y Gravitación [H. Weyl, 1918]

$$\Gamma_{\mu\nu}^{\sigma} = \frac{1}{2}g^{\sigma\rho}(\partial_{\mu}g_{\nu\rho} + \partial_{\nu}g_{\rho\mu} - \partial_{\rho}g_{\mu\nu}) \\ + \frac{1}{2}[\delta_{\mu}^{\sigma}A_{\nu} + \delta_{\nu}^{\sigma}A_{\mu} - g^{\sigma\alpha}g_{\mu\nu}A_{\alpha}]$$



$g_{\mu\nu}$  Campo gravitatorio

$A_{\mu}$  Campo Electromagnético

Principio de simetría gauge (**Eich-Invarianz**)

$$g_{\mu\nu} \rightarrow \lambda g_{\mu\nu}; \quad A_{\mu} \rightarrow A_{\mu} - \partial_{\mu}\lambda$$



# Teoría de Kaluza-Klein

Espacio-Tiempo de 5 dimensiones [Kaluzza, 1919]  
[ Klein, 1926]

$$g_{MN} = \begin{pmatrix} g_{\mu\nu} & A_\mu \\ A_\mu & \varphi \end{pmatrix}$$

$M, N = 0, 1, 2, 3, 4 : \mu, \nu = 0, 1, 2, 3$

$$g_{MN} = \begin{pmatrix} g_{\mu\nu} + A_\mu A_\nu & A_\mu \\ A_\mu & 1 \end{pmatrix}$$



# Teoría de Kaluza-Klein

Espacio-Tiempo de 5 dimensiones [Kaluzza, 1919]  
[ Klein, 1926]

$$g_{MN} = \begin{pmatrix} g_{\mu\nu} & A_\mu \\ A_\mu & \varphi \end{pmatrix}$$

$M, N = 0, 1, 2, 3, 4 : \mu, \nu = 0, 1, 2, 3$

$$g_{MN} = \begin{pmatrix} g_{\mu\nu} + A_\mu A_\nu & A_\mu \\ A_\mu & 1 \end{pmatrix}$$

Condición cilíndrica (Zylinderbedingung)

$$\partial_4 g_{MN} = 0 \quad R_4 = \frac{hc\sqrt{2\kappa}}{e} = 0.8 \times 10^{-30} \text{ cm}$$



# Teoría de Eddington [1921]

- Conexión afín

$$\Gamma_{\mu\nu}^{\sigma} = \frac{1}{2}g^{\sigma\rho}(\partial_{\mu}g_{\nu\rho} + \partial_{\nu}g_{\rho\mu} - \partial_{\rho}g_{\mu\nu}) + S_{\mu\nu}^{\sigma}$$

$$S_{\mu\nu}^{\sigma} = S_{\nu\mu}^{\sigma}$$



- Eddington “natural gauge”

$$g_{\mu\nu} = \frac{1}{2\lambda}(R_{\mu\nu} + R_{\nu\mu})$$

$$F_{\mu\nu} = \frac{1}{2}(R_{\mu\nu} - R_{\nu\mu})$$



# Teoría de Einstein-Cartan

Teleparalelismo (Fernparalellism)[Einstein, 1928]

Transporte paralelo:

# Teoría de Einstein-Cartan

Teleparalelismo (**Fernparalellism**)[Einstein, 1928]

Transporte paralelo:

- **Weyl**: No preserva ni el ángulo ni el módulo

# Teoría de Einstein-Cartan

Teleparalelismo (**Fernparalellism**)[Einstein, 1928]

Transporte paralelo:

- **Weyl**: No preserva ni el ángulo ni el módulo
- **Riemann**: Preserva el módulo

# Teoría de Einstein-Cartan

Teleparalelismo (**Fernparalellism**)[Einstein, 1928]

Transporte paralelo:

- **Weyl**: No preserva ni el ángulo ni el módulo
- **Riemann**: Preserva el módulo
- **Teleparalelismo**: Preserva módulo y ángulo

# Teoría de Einstein-Cartan

Teleparalelismo (Fernparalellism)[Einstein, 1928]

Transporte paralelo:

- **Weyl**: No preserva ni el ángulo ni el módulo
- **Riemann**: Preserva el módulo
- **Teleparalelismo**: Preserva módulo y ángulo

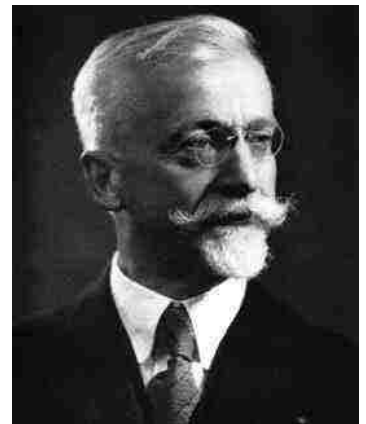
Campo básico:  $h_{\mu}^{\alpha}$  (vierbein)

Métrica:  $g_{\mu\nu} = h_{\mu}^{\alpha} h_{\alpha\nu}$   $h_{\mu}^{\alpha} h^{\beta\mu} = \delta^{\alpha\beta}$

Conexión afín:  $\Gamma_{\mu\nu}^{\sigma} = h^{\sigma\alpha} \partial_{\nu} h_{\mu\alpha}$

Torsión:  $T_{\mu\nu}^{\sigma} = \frac{1}{2} [\Gamma_{\mu\nu}^{\sigma} - \Gamma_{\nu\mu}^{\sigma}]$

Campo electromagnético:  $A_{\mu} = T_{\mu\sigma}^{\sigma}$





# Otras Contribuciones de Einstein

# Otras Contribuciones de Einstein

- Teoría conforme con tensor de Weyl [1921]

# Otras Contribuciones de Einstein

- Teoría conforme con tensor de Weyl [1921]
- Teoría métrica-afín [Einstein, 1925-26, 1945-55]

$$g_{\mu\nu} \neq g_{\nu\mu} \quad \Gamma_{\mu\nu}^{\sigma} \neq \Gamma_{\nu\mu}^{\sigma} \quad g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + F_{\mu\nu}$$

# Otras Contribuciones de Einstein

- Teoría conforme con tensor de Weyl [1921]
- Teoría métrica-afín [Einstein, 1925-26, 1945-55]

$$g_{\mu\nu} \neq g_{\nu\mu} \quad \Gamma_{\mu\nu}^{\sigma} \neq \Gamma_{\nu\mu}^{\sigma} \quad g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + F_{\mu\nu}$$

- Variaciones sobre la teoría de Kaluza-Klein [1921-22, 1927, 1931-32, 1938-43]  
(Formulación proyectiva [Veblen, Hoffman, Pauli, Bergmann])

# Otras Contribuciones de Einstein

- Teoría conforme con tensor de Weyl [1921]
- Teoría métrica-afín [Einstein, 1925-26, 1945-55]

$$g_{\mu\nu} \neq g_{\nu\mu} \quad \Gamma_{\mu\nu}^{\sigma} \neq \Gamma_{\nu\mu}^{\sigma} \quad g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + F_{\mu\nu}$$

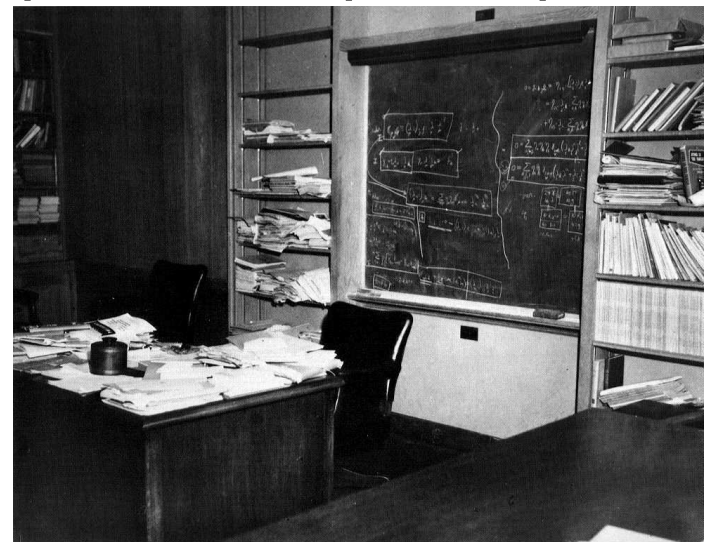
- Variaciones sobre la teoría de Kaluza-Klein [1921-22, 1927, 1931-32, 1938-43]  
(Formulación proyectiva [Veblen, Hoffman, Pauli, Bergmann])
- Teoría del electrón de Dirac: espinores y semivectores

# Otras Contribuciones de Einstein

- Teoría conforme con tensor de Weyl [1921]
- Teoría métrica-afín [Einstein, 1925-26, 1945-55]

$$g_{\mu\nu} \neq g_{\nu\mu} \quad \Gamma_{\mu\nu}^{\sigma} \neq \Gamma_{\nu\mu}^{\sigma} \quad g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + F_{\mu\nu}$$

- Variaciones sobre la teoría de Kaluza-Klein [1921-22, 1927, 1931-32, 1938-43] (Formulación proyectiva [Veblen, Hoffman, Pauli, Bergmann])
- Teoría del electrón de Dirac: espinores y semivectores



# Principios y Motivaciones de Einstein

- Como los cuatro principales problemas de GR Einstein elige dos de cosmología y dos de la teoría del campo unificado [Einstein, Nature 1921]:
  - 1) Estructura de las partículas de materia
  - 2) Unificación del electromagnetismo y gravitación

## Motivación

# Principios y Motivaciones de Einstein

- Como los cuatro principales problemas de GR Einstein elige dos de cosmología y dos de la teoría del campo unificado [Einstein, Nature 1921]:
  - 1) Estructura de las partículas de materia
  - 2) Unificación del electromagnetismo y gravitación

## Motivación

- Teoría del electrón libre de singularidades



# Principios y Motivaciones de Einstein

- Como los cuatro principales problemas de GR Einstein elige dos de cosmología y dos de la teoría del campo unificado [Einstein, Nature 1921]:

- 1) Estructura de las partículas de materia
- 2) Unificación del electromagnetismo y gravitación

## Motivación

- Teoría del electrón libre de singularidades
- Unificación de los campos electromagnético y gravitación (Compleción del programa de Maxwell y los principios relativistas)

# Principios y Motivaciones de Einstein

- Como los cuatro principales problemas de GR Einstein elige dos de cosmología y dos de la teoría del campo unificado [Einstein, Nature 1921]:

- 1) Estructura de las partículas de materia
- 2) Unificación del electromagnetismo y gravitación

## Motivación

- Teoría del electrón libre de singularidades
- Unificación de los campos electromagnético y gravitación (Compleción del programa de Maxwell y los principios relativistas)
- Posible comprensión clásica de los fenómenos cuánticos

# Principios y Motivaciones de Einstein

- Como los cuatro principales problemas de GR Einstein elige dos de cosmología y dos de la teoría del campo unificado [Einstein, Nature 1921]:

- 1) Estructura de las partículas de materia
- 2) Unificación del electromagnetismo y gravitación

## Motivación

- Teoría del electrón libre de singularidades
- Unificación de los campos electromagnético y gravitación (Compleción del programa de Maxwell y los principios relativistas)
- Posible comprensión clásica de los fenómenos cuánticos
- Einstein se convierte en adalid de las teorías unificadas [1923]

# Críticas

- Los campos clásicos crean fuerzas que actúan sobre partículas de prueba. Dado que no hay partículas más pequeñas que el electrón el concepto de campo eléctrico en un punto interior de un electrón aparece como una ficción vacía de cualquier contenido. [Pauli, 1921 ]



# Críticas

- La siempre fértil inventiva [de Einstein], así como su tenaz energía en la persecución [de la unificación], nos garantiza, en años recientes, un promedio de una teoría por año . . . . Es interesante psicológicamente que la teoría del momento es por un tiempo considerada por su autor como la **la solución definitiva** [Pauli, 1932]



# Críticas

- La siempre fértil inventiva [de Einstein], así como su tenaz energía en la persecución [de la unificación], nos garantiza, en años recientes, un promedio de una teoría por año . . . . Es interesante psicológicamente que la teoría del momento es por un tiempo considerada por su autor como la **la solución definitiva** [Pauli, 1932]

- **Después de todo tenía usted razón, bribón** (Sie haben also recht gehabt, Sie Spitzbube [Einstein, 1932 ])



# Unificación después de Einstein

- **Teoría de Yang-Mills** [1954]. Generalización del principio gauge [Weyl]

# Unificación después de Einstein

- **Teoría de Yang-Mills** [1954]. Generalización del principio gauge [Weyl]
- **Teoría electrodébil** [Glashow, Weinberg, Salam, 1968]



# Unificación después de Einstein

- **Teoría de Yang-Mills** [1954]. Generalización del principio gauge [Weyl]
- **Teoría electrodébil** [Glashow, Weinberg, Salam, 1968]
- **Gran Unificación. Teorema de Coleman-Mandula** [1970's]

# Unificación después de Einstein

- **Teoría de Yang-Mills** [1954]. Generalización del principio gauge [Weyl]
- **Teoría electrodébil** [Glashow, Weinberg, Salam, 1968]
- **Gran Unificación. Teorema de Coleman-Mandula** [1970's]
- **Supersimetría y Supergravedad**(11 dimensiones!!) [1970's]

# Unificación después de Einstein

- **Teoría de Yang-Mills** [1954]. Generalización del principio gauge [Weyl]
- **Teoría electrodébil** [Glashow, Weinberg, Salam, 1968]
- **Gran Unificación. Teorema de Coleman-Mandula** [1970's]
- **Supersimetría y Supergravedad**(11 dimensiones!!) [1970's]
- **Teoría de Cuerdas** (10 dimensiones !!) [1980's]]

# Unificación después de Einstein

- **Teoría de Yang-Mills** [1954]. Generalización del principio gauge [Weyl]
- **Teoría electrodébil** [Glashow, Weinberg, Salam, 1968]
- **Gran Unificación. Teorema de Coleman-Mandula** [1970's]
- **Supersimetría y Supergravedad**(11 dimensiones!!) [1970's]
- **Teoría de Cuerdas** (10 dimensiones !!) [1980's]]
- **Teoría M** (10/11 dimensiones !!) [1990's]]

# De Kaluza-Klein a Randall-Sundrum

- Generalización de KK para la teoría de Yang-Mills  
[DeWit 1963 , Kerner 1968]

# De Kaluza-Klein a Randall-Sundrum

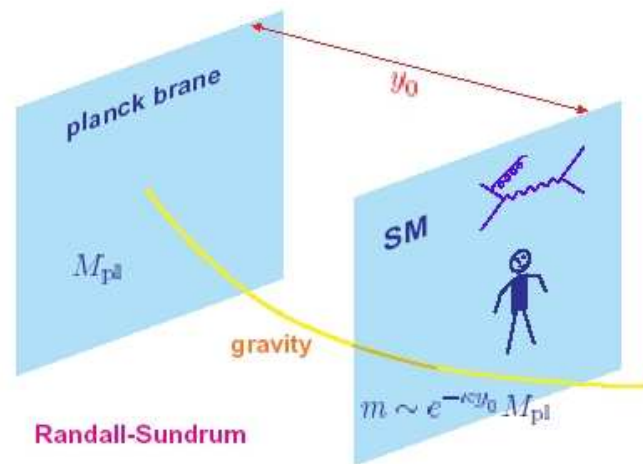
- Generalización de KK para la teoría de Yang-Mills [DeWit 1963 , Kerner 1968]
- Dimensiones extra grandes vs. KK [1990]

# De Kaluza-Klein a Randall-Sundrum

- Generalización de KK para la teoría de Yang-Mills [DeWit 1963 , Kerner 1968]
- Dimensiones extra grandes vs. KK [1990]
- Dualidad ADS/CFT [Maldacena, 1997]

# De Kaluza-Klein a Randall-Sundrum

- Generalización de KK para la teoría de Yang-Mills [DeWit 1963 , Kerner 1968]
- Dimensiones extra grandes vs. KK [1990]
- Dualidad ADS/CFT [Maldacena, 1997]
- Teorías Horawa-Witten y Randall-Sundrum [1999]





# Balance del Programa de Unificación

- Einstein se enfrascó durante décadas en un programa de unificación impulsado por tres problemas que siguen siendo fundamentales en el siglo XXI

# Balance del Programa de Unificación

- Einstein se enfrascó durante décadas en un programa de unificación impulsado por tres problemas que siguen siendo fundamentales en el siglo XXI
- El problema de singularidad de la materia sigue vigente
- El problema de la unificación no está resuelto
- La teoría cuántica complica la unificación

# Balance del Programa de Unificación

- Einstein se enfrascó durante décadas en un programa de unificación impulsado por tres problemas que siguen siendo fundamentales en el siglo XXI
- El problema de singularidad de la materia sigue vigente
- El problema de la unificación no está resuelto
- La teoría cuántica complica la unificación
- Quizás la solución del problema de las singularidades está más allá de las teorías cuánticas.

# ¿FIN?

¿A ver si después de todo tenía usted razón, bribón?

