



# Teoría de la Relatividad General

## *Los primeros años...*

Leonardo Fernández-Jambrina

leonardo.fernandez upm.es

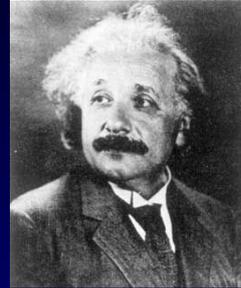
ETSI Navales

Universidad Politécnica de Madrid

# Contenidos

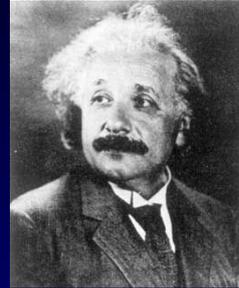
- Albert Einstein
- Relatividad General
- Marcel Grossmann
- David Hilbert
- Karl Schwarzschild
- Willem de Sitter
- Josef Lense & Hans Thirring
- Arthur Eddington
- Alexandr Friedmann

# Albert Einstein (1879-1955)



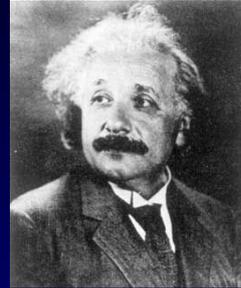
- Trabajó en oficina de patentes (1902-9) Berna, Praga, Berlín, Princeton.

# Albert Einstein (1879-1955)



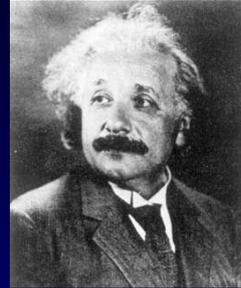
- Trabajó en oficina de patentes (1902-9) Berna, Praga, Berlín, Princeton.
- Renunció a la nacionalidad alemana en 1896, suizo desde 1899.

# Albert Einstein (1879-1955)



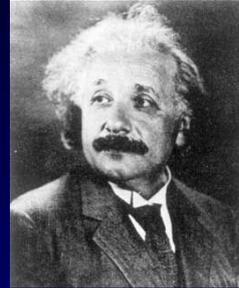
- Trabajó en oficina de patentes (1902-9) Berna, Praga, Berlín, Princeton.
- Renunció a la nacionalidad alemana en 1896, suizo desde 1899.
- Excluido del servicio militar en Suiza por pies planos y varices...

# Albert Einstein (1879-1955)



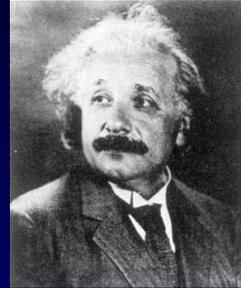
- Trabajó en oficina de patentes (1902-9) Berna, Praga, Berlín, Princeton.
- Contribuciones en diversos campos:

# Albert Einstein (1879-1955)



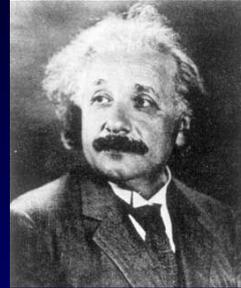
- Trabajó en oficina de patentes (1902-9) Berna, Praga, Berlín, Princeton.
- Contribuciones en diversos campos:
  - Efecto fotoeléctrico (1905)

# Albert Einstein (1879-1955)



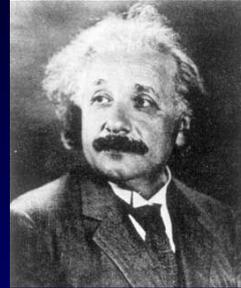
- Trabajó en oficina de patentes (1902-9) Berna, Praga, Berlín, Princeton.
- Contribuciones en diversos campos:
  - Efecto fotoeléctrico (1905)
  - Movimiento browniano (1905)

# Albert Einstein (1879-1955)



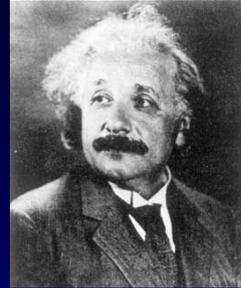
- Trabajó en oficina de patentes (1902-9) Berna, Praga, Berlín, Princeton.
- Contribuciones en diversos campos:
  - Efecto fotoeléctrico (1905)
  - Movimiento browniano (1905)
  - Relatividad especial (1905)

# Albert Einstein (1879-1955)



- Trabajó en oficina de patentes (1902-9) Berna, Praga, Berlín, Princeton.
- Contribuciones en diversos campos:
  - Efecto fotoeléctrico (1905)
  - Movimiento browniano (1905)
  - Relatividad especial (1905)
  - **Relatividad general** (1915)

# Albert Einstein (1879-1955)



- Trabajó en oficina de patentes (1902-9) Berna, Praga, Berlín, Princeton.
- Contribuciones en diversos campos:
  - Efecto fotoeléctrico (1905)
  - Movimiento browniano (1905)
  - Relatividad especial (1905)
  - **Relatividad general** (1915)
  - Estadística cuántica, Bose-Einstein (1924)

# Equivalencia+covariancia =RG

- Principio de equivalencia: campo gravitatorio  $\Leftrightarrow$  aceleración (1907-8)

# Equivalencia+covariancia =RG

- Principio de equivalencia: campo gravitatorio  $\Leftrightarrow$  aceleración (1907-8)
- Curvatura de los rayos de luz en astronomía, desplazamiento al rojo (1911)

# Equivalencia+covariancia =RG

- Principio de equivalencia: campo gravitatorio  $\Leftrightarrow$  aceleración (1907-8)
- Curvatura de los rayos de luz en astronomía, desplazamiento al rojo (1911)
- Tensor métrico  $g_{\mu\nu}$ . ¿Primeras ecuaciones?  
 $\Gamma_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$  (Einstein-Grossmann 1913-4)

# Equivalencia+covariancia =RG

- Principio de equivalencia: campo gravitatorio  $\Leftrightarrow$  aceleración (1907-8)
- Curvatura de los rayos de luz en astronomía, desplazamiento al rojo (1911)
- Tensor métrico  $g_{\mu\nu}$ . ¿Primeras ecuaciones?  
 $\Gamma_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$  (Einstein-Grossmann 1913-4)
- “De la teoría general de la relatividad.”  
¿ $R_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$ ? (11-18 noviembre 1915)

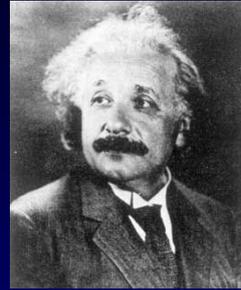
# Equivalencia+covariancia =RG

- Principio de equivalencia: campo gravitatorio  $\Leftrightarrow$  aceleración (1907-8)
- Curvatura de los rayos de luz en astronomía, desplazamiento al rojo (1911)
- Tensor métrico  $g_{\mu\nu}$ . ¿Primeras ecuaciones?  
 $\Gamma_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$  (Einstein-Grossmann 1913-4)
- “De la teoría general de la relatividad.”  
¿ $R_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$ ? (11-18 noviembre 1915)
- Explicación del perihelio de Mercurio y curvatura de la luz (25 noviembre 1915)

# Equivalencia+covariancia =RG

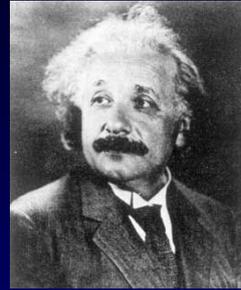
- Principio de equivalencia: campo gravitatorio  $\Leftrightarrow$  aceleración (1907-8)
- Curvatura de los rayos de luz en astronomía, desplazamiento al rojo (1911)
- Tensor métrico  $g_{\mu\nu}$ . ¿Primeras ecuaciones?  
 $\Gamma_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$  (Einstein-Grossmann 1913-4)
- “De la teoría general de la relatividad.”  
¿ $R_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$ ? (11-18 noviembre 1915)
- Explicación del perihelio de Mercurio y curvatura de la luz (25 noviembre 1915)
- “Las ecuaciones de campo de la gravitación.”  
¿ $G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$ ! (2 diciembre 1915)

# Albert Einstein (1879-1955)



**“Ese Einstein se acomoda a su conveniencia. Se retracta cada año de lo que escribió el año anterior.”**

# Albert Einstein (1879-1955)



**“Ese Einstein se acomoda a su conveniencia. Se retracta cada año de lo que escribió el año anterior.”** *Albert Einstein (diciembre 1915)*

# Einsteinjahr



# Marcel Grossmann (1878-1936)



- Compañero de Einstein en la Escuela Técnica Superior de Zurich

# Marcel Grossmann (1878-1936)



- Compañero de Einstein en la Escuela Técnica Superior de Zurich
- Profesor de geometría descriptiva en Zurich.

# Marcel Grossmann (1878-1936)



- Compañero de Einstein en la Escuela Técnica Superior de Zurich
- Profesor de geometría descriptiva en Zurich.
- Introduce a Einstein en el cálculo tensorial de Christoffel, Ricci, Levi-Civita, Riemann...

# Marcel Grossmann (1878-1936)



- Compañero de Einstein en la Escuela Técnica Superior de Zurich
- Profesor de geometría descriptiva en Zurich.
- Introduce a Einstein en el cálculo tensorial de Christoffel, Ricci, Levi-Civita, Riemann...
- Colabora en las primeras versiones de la teoría de la relatividad general.

# David Hilbert (1862-1943)



- Trabajó en Königsberg, Göttingen...

# David Hilbert (1862-1943)



- Trabajó en Königsberg, Göttingen...
- Geometría, teoría de números, álgebra, análisis funcional...

# David Hilbert (1862-1943)



- Trabajó en Königsberg, Göttingen...
- Geometría, teoría de números, álgebra, análisis funcional...
- ...y Relatividad General

# David Hilbert (1862-1943)



- La teoría de Einstein. . .

# David Hilbert (1862-1943)



- La teoría de Einstein...  
**¿es de Einstein?**

# David Hilbert (1862-1943)



- La teoría de Einstein...  
¿es de Einstein?
  - Hilbert envió “Fundamentos de la física” el 20 de noviembre de 1915.

# David Hilbert (1862-1943)



- La teoría de Einstein...  
¿es de Einstein?
  - Hilbert envió “Fundamentos de la física” el 20 de noviembre de 1915.
  - Einstein envió “Las ecuaciones de campo de la gravitación” el 25 de noviembre de 1915!!

# David Hilbert (1862-1943)



- La teoría de Einstein...  
¿es de Einstein?
  - Hilbert envió “Fundamentos de la física” el 20 de noviembre de 1915 y lo reenvió corregido el 6 de diciembre.
  - Einstein envió “Las ecuaciones de campo de la gravitación” el 25 de noviembre de 1915.

# David Hilbert (1862-1943)



- La teoría de Einstein...  
**¡es de Einstein!**
  - Hilbert envió “Fundamentos de la física” el 20 de noviembre de 1915 y lo reenvió corregido el 6 de diciembre.
  - Einstein envió “Las ecuaciones de campo de la gravitación” el 25 de noviembre de 1915 y se publicó el **2 de diciembre!!**

# David Hilbert (1862-1943)



- Hilbert deriva las ecuaciones de Einstein variacionalmente a partir de la curvatura:  $\mathcal{L} = R$ .

$$\frac{\delta \sqrt{-g} R}{\delta g_{\mu\nu}} = 0 \Rightarrow R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = 0 .$$

# David Hilbert (1862-1943)

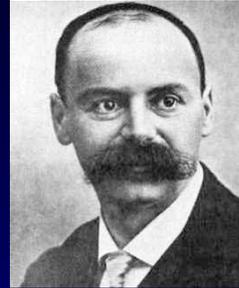


- Hilbert deriva las ecuaciones de Einstein variacionalmente a partir de la curvatura:  $\mathcal{L} = R$ .

$$\frac{\delta \sqrt{-g} R}{\delta g_{\mu\nu}} = 0 \Rightarrow R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = 0 .$$

- Palatini lo simplifica en 1919 derivando respecto a  $g_{\mu\nu}, \Gamma_{\mu\nu}^{\rho}$ .

# Karl Schwarzschild (1873-1916)



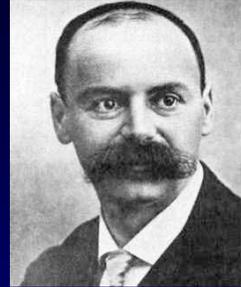
- Miembro de la Academia de Ciencias de Berlín, Observatorio Astrofísico de Potsdam...

# Karl Schwarzschild (1873-1916)



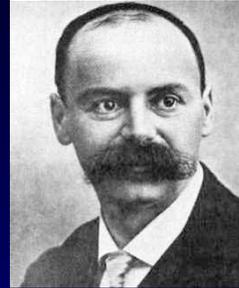
- Voluntario en el ejército alemán durante la Primera Guerra Mundial...!!!

# Karl Schwarzschild (1873-1916)



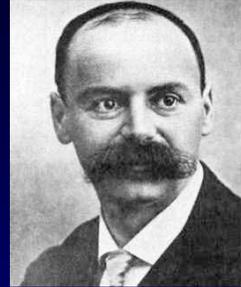
- Tres trabajos desde el frente ruso:

# Karl Schwarzschild (1873-1916)



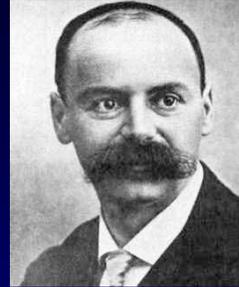
- Tres trabajos desde el frente ruso:
  - Efecto Stark.

# Karl Schwarzschild (1873-1916)



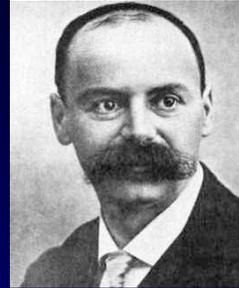
- Tres trabajos desde el frente ruso:
  - Efecto Stark.
  - Las famosas soluciones interior y exterior de simetría esférica de las ecuaciones de Einstein.

# Karl Schwarzschild (1873-1916)



- Tres trabajos desde el frente ruso:
  - Efecto Stark.
  - Las famosas soluciones interior y exterior de simetría esférica de las ecuaciones de Einstein.
- Y murió de pénfigo en 1916 :-)

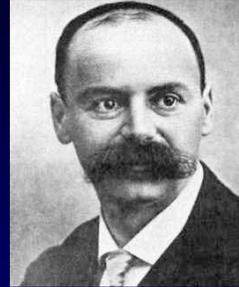
# Karl Schwarzschild (1873-1916)



- Tres trabajos desde el frente ruso:
  - Efecto Stark.
  - Las famosas soluciones interior y exterior de simetría esférica de las ecuaciones de Einstein.

Hans Reissner y Gunnar Nordstrøm le añadieron un campo electrostático (1916)

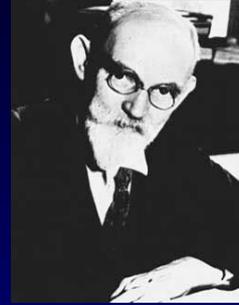
# Karl Schwarzschild (1873-1916)



- Tres trabajos desde el frente ruso:
  - Efecto Stark.
  - Las famosas soluciones interior y exterior de simetría esférica de las ecuaciones de Einstein.

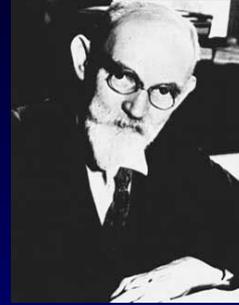
George Birkhoff demostró la unicidad de la solución de Schwarzschild (1923)

# Willem de Sitter (1872-1934)



- Trabajó como astrónomo en Groningen, Ciudad del Cabo y Leiden

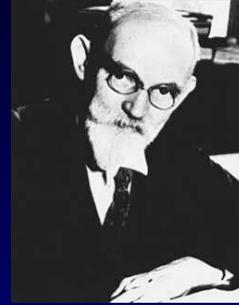
# Willem de Sitter (1872-1934)



- Trabajó como astrónomo en Groningen, Ciudad del Cabo y Leiden
- En 1917 Einstein introduce la constante cosmológica para lograr un universo homogéneo y estático,

$$G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu} .$$

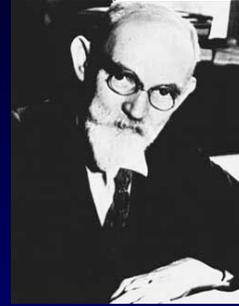
# Willem de Sitter (1872-1934)



- Trabajó como astrónomo en Groningen, Ciudad del Cabo y Leiden
- En 1917 Einstein introduce la constante cosmológica para lograr un universo homogéneo y estático,

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu} \dots$$

# Willem de Sitter (1872-1934)

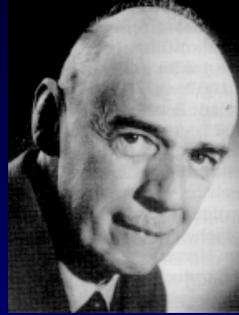


- Trabajó como astrónomo en Groningen, Ciudad del Cabo y Leiden
- En 1917 Einstein introduce la constante cosmológica para lograr un universo homogéneo y estático,

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu} \dots$$

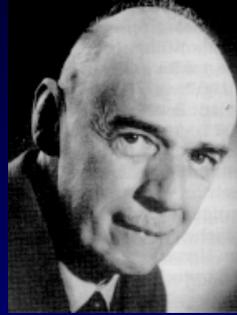
- ... y de Sitter muestra un universo en expansión, anticipándose a Friedmann y a Hubble.

# J. Lense & H. Thirring



- Josef Lense, (1890-1985), trabajó como matemático en la Universidad Técnica de Munich.
- Hans Thirring, (1888-1976), trabajó en la Universidad de Viena como físico teórico.

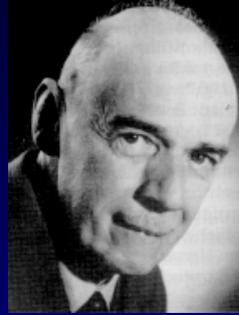
# J. Lense & H. Thirring



- En 1918 publicaron la solución aproximada para una masa rotante (arrastre de inerciales),

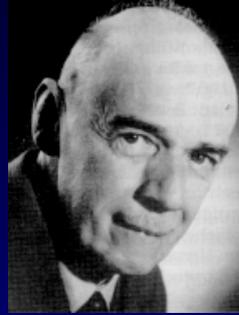
$$\begin{aligned} ds^2 &= - \left( 1 - \frac{2m}{r} \right) \left( dt + \frac{2J \sin^2 \theta}{r} d\phi \right)^2 \\ &+ \left( 1 + \frac{2m}{r} \right) [dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)] \\ &+ O(1/r^2) \end{aligned}$$

# J. Lense & H. Thirring



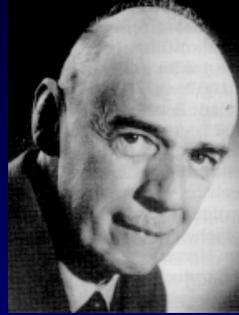
- En 1938 Thirring fue obligado a retirarse por los nazis (Anschluss!!). Trabaja en Siemens.

# J. Lense & H. Thirring



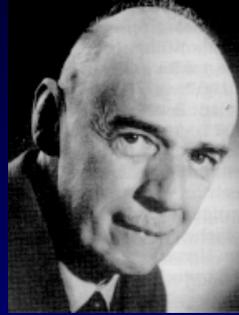
- En 1938 Thirring fue obligado a retirarse por los nazis (Anschluss!!). Trabaja en Siemens.
- En 1946 fue nombrado decano de la Facultad de Filosofía.

# J. Lense & H. Thirring



- En 1938 Thirring fue obligado a retirarse por los nazis (Anschluss!!). Trabaja en Siemens.
- En 1946 fue nombrado decano de la Facultad de Filosofía.
- Hans Thirring fue impulsor del Movimiento por la Paz...

# J. Lense & H. Thirring



- En 1938 Thirring fue obligado a retirarse por los nazis (Anschluss!!). Trabaja en Siemens.
- En 1946 fue nombrado decano de la Facultad de Filosofía.
- Hans Thirring fue impulsor del Movimiento por la Paz...
- ... y parlamentario austriaco por el Partido Socialdemócrata 1957-63

# Arthur Eddington (1882-1944)



- Astrónomo en Greenwich y Cambridge

# Arthur Eddington (1882-1944)



- Astrónomo en Greenwich y Cambridge
- Objeto (cuáquero) durante la Gran Guerra.

# Arthur Eddington (1882-1944)



- Astrónomo en Greenwich y Cambridge
- Objeto (cuáquero) durante la Gran Guerra.
- Expedición a la isla Príncipe para medir la curvatura de la luz durante un eclipse (1919).

# Arthur Eddington (1882-1944)



- Astrónomo en Greenwich y Cambridge
- Objeto (cuáquero) durante la Gran Guerra.
- Expedición a la isla Príncipe para medir la curvatura de la luz durante un eclipse (1919).
- De 16 tomas, una confirmaba la teoría de Einstein!!

# Arthur Eddington (1882-1944)



- Astrónomo en Greenwich y Cambridge
- Objeto (cuáquero) durante la Gran Guerra.
- Expedición a la isla Príncipe para medir la curvatura de la luz durante un eclipse (1919).
- De 16 tomas, una confirmaba la teoría de Einstein!!
- Inicia el cálculo postnewtoniano (1922)

# Arthur Eddington (1882-1944)



Periodista: ¿Es cierto que sólo tres personas entiendan la teoría de Einstein...?

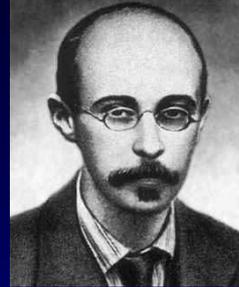
# Arthur Eddington (1882-1944)



Periodista: ¿Es cierto que sólo tres personas entiendan la teoría de Einstein...?

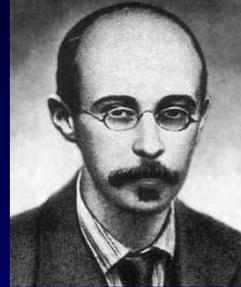
Eddington: ... me pregunto quién será el tercero...

# A.A. Friedmann (1888-1925)



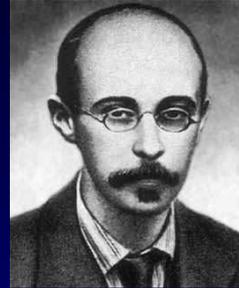
- Hijo de bailarín y pianista.

# A.A. Friedmann (1888-1925)



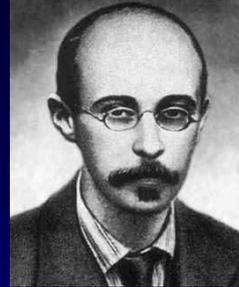
- Profesor en Perm y San Petersburgo.

# A.A. Friedmann (1888-1925)



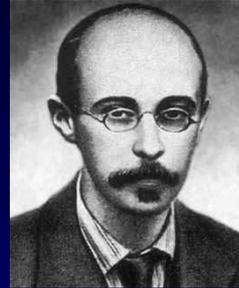
- Aviador durante la Primera Guerra Mundial.

# A.A. Friedmann (1888-1925)



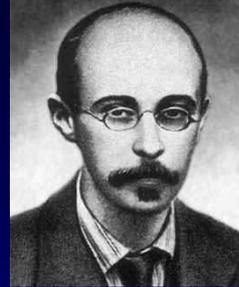
- Aviador durante la Primera Guerra Mundial
- Calculaba trayectorias de proyectiles...

# A.A. Friedmann (1888-1925)



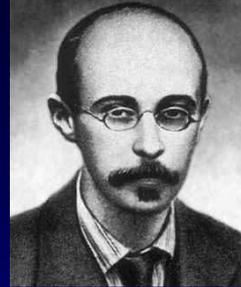
- La relatividad llega a Rusia tras la PGM y la Guerra Civil rusa. . .

# A.A. Friedmann (1888-1925)



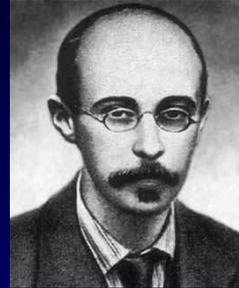
- La relatividad llega a Rusia tras la PGM y la Guerra Civil rusa...
  - En 1922 publica “Sobre la curvatura del espacio”: muestra que el universo puede no ser estacionario...

# A.A. Friedmann (1888-1925)



- La relatividad llega a Rusia tras la PGM y la Guerra Civil rusa...
  - En 1922 publica “Sobre la curvatura del espacio”: muestra que el universo puede no ser estacionario...
  - El (2º) mayor error de Einstein: las cuentas de Friedmann están mal...

# A.A. Friedmann (1888-1925)



- La relatividad llega a Rusia tras la PGM y la Guerra Civil rusa...
  - En 1922 publica “Sobre la curvatura del espacio”: muestra que el universo puede no ser estacionario...
  - El (2º) mayor error de Einstein: las cuentas de Friedmann están mal...
- Murió de tifus en 1925 ;-(

# Sociedad Gravitación y Relatividad

## SEGRE

La Sociedad Española de Gravitación y Relatividad se creó en 2003 para agrupar a todos los investigadores y estudiantes en esta área.

# Sociedad Gravitación y Relatividad

SEGRE

La SEGRE pretende promocionar la investigación y la divulgación de la Gravitación y de la Relatividad:

# Sociedad Gravitación y Relatividad

SEGRE

La SEGRE pretende promocionar la investigación y la divulgación de la Gravitación y de la Relatividad:

- Promover la difusión y divulgación de las actividades de investigación relacionadas con G & R, incluyendo reuniones científicas, conferencias y publicaciones.

# Sociedad Gravitación y Relatividad



La SEGRE pretende promocionar la investigación y la divulgación de la Gravitación y de la Relatividad:

- Promover la difusión y divulgación de las actividades de investigación relacionadas con G & R, incluyendo reuniones científicas, conferencias y publicaciones.
- Apoyar la enseñanza y la formación de investigadores en G & R.

URL: <http://debin.etsin.upm.es/~segre>

# Despedida

