

T9. RELATIVIDAD GENERAL (I): EL PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA DE INERCIA Y GRAVEDAD

1. [Introducción](#)
2. [El principio de equivalencia](#)
 - A. [La relatividad general](#)
 - B. [La igualdad de masa inercial y masa gravitatoria](#)
 - C. [La teoría de la gravitación](#)

Introducción

Introducción

- **Relatividad especial** (1905): sólo observadores inerciales

Introducción

- **Relatividad especial** (1905): sólo observadores inerciales
- **Generalización** a observadores acelerados (1907-1915). Más difícil:
 - Matemáticas más complicadas: cálculo tensorial y geometría diferencial
 - Escenario extraño: espacio curvo (geometría no euclídea)

El principio de equivalencia

El principio de equivalencia

- Principio de relatividad \Leftrightarrow imposibilidad de distinguir reposo y movimiento **uniforme**

El principio de equivalencia

- Principio de relatividad \Leftrightarrow imposibilidad de distinguir reposo y movimiento **uniforme**
- Obviamente **no aplicable a observadores acelerados**:
las **aceleraciones parecen absolutas** y podrían determinarse **sin referencia a nada externo**

El principio de equivalencia

- Principio de relatividad \Leftrightarrow imposibilidad de distinguir reposo y movimiento **uniforme**
- Obviamente **no aplicable a observadores acelerados**:
las **aceleraciones parecen absolutas** y podrían determinarse **sin referencia a nada externo**
- En 1907 Einstein tuvo “**la idea más feliz de mi vida**”

“Estaba sentado en la oficina de patentes de Berna cuando de repente pensé: ‘Si una persona sufre una caída libre, no siente su propio peso’. Estaba paralizado. Esta reflexión tan simple me condujo a una teoría de la gravitación”

El principio de equivalencia

- Principio de relatividad \Leftrightarrow imposibilidad de distinguir reposo y movimiento **uniforme**
- Obviamente **no aplicable a observadores acelerados**:
las **aceleraciones parecen absolutas** y podrían determinarse **sin referencia a nada externo**

- En 1907 Einstein tuvo “la idea más feliz de mi vida”

“Estaba sentado en la oficina de patentes de Berna cuando de repente pensé: ‘Si una persona sufre una caída libre, no siente su propio peso’. Estaba paralizado. Esta reflexión tan simple me condujo a una teoría de la gravitación”

- Esta idea feliz cristalizó en el **principio de equivalencia**:

En una pequeña región del espacio cualesquiera efectos producidos por la **gravitación** son los mismos que los producidos por una **aceleración**

El principio de equivalencia

- Principio de relatividad \Leftrightarrow imposibilidad de distinguir reposo y movimiento **uniforme**
- Obviamente **no aplicable a observadores acelerados**:
las **aceleraciones parecen absolutas** y podrían determinarse **sin referencia a nada externo**

- En 1907 Einstein tuvo “**la idea más feliz de mi vida**”

“Estaba sentado en la oficina de patentes de Berna cuando de repente pensé: ‘Si una persona sufre una caída libre, no siente su propio peso’. Estaba paralizado. Esta reflexión tan simple me condujo a una teoría de la gravitación”

- Esta idea feliz cristalizó en el **principio de equivalencia**:

En una pequeña región del espacio cualesquiera efectos producidos por la **gravitación** son los mismos que los producidos por una **aceleración**

\Rightarrow **Tres importantes consecuencias**

Consecuencias del principio de equivalencia

Consecuencias del principio de equivalencia

A. Permitió a Einstein dar validez general al principio de relatividad: la **relatividad general**

Consecuencias del principio de equivalencia

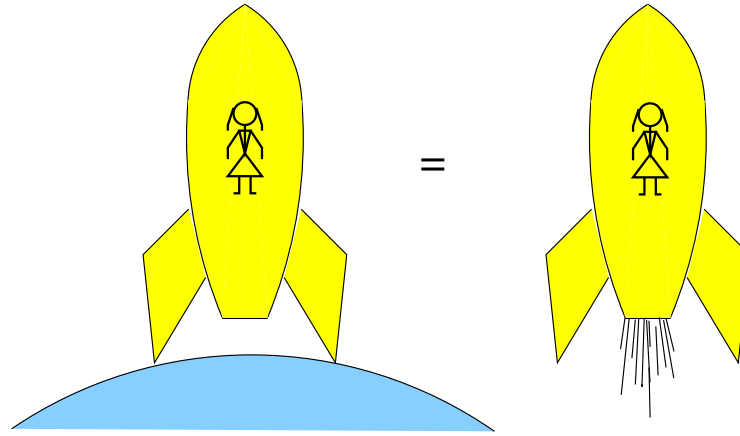
- A. Permitió a Einstein dar validez general al principio de relatividad: la **relatividad general**
- B. **Resuelve un viejo enigma**: la **igualdad de la masa inercial y la masa gravitatoria**, es decir, el hecho de que todos los cuerpos caen con la misma aceleración en un campo gravitatorio

Consecuencias del principio de equivalencia

- A. Permitió a Einstein dar validez general al principio de relatividad: la **relatividad general**
- B. **Resuelve un viejo enigma**: la **igualdad de la masa inercial y la masa gravitatoria**, es decir, el hecho de que todos los cuerpos caen con la misma aceleración en un campo gravitatorio
- C. **La relatividad general es una teoría de la gravitación**

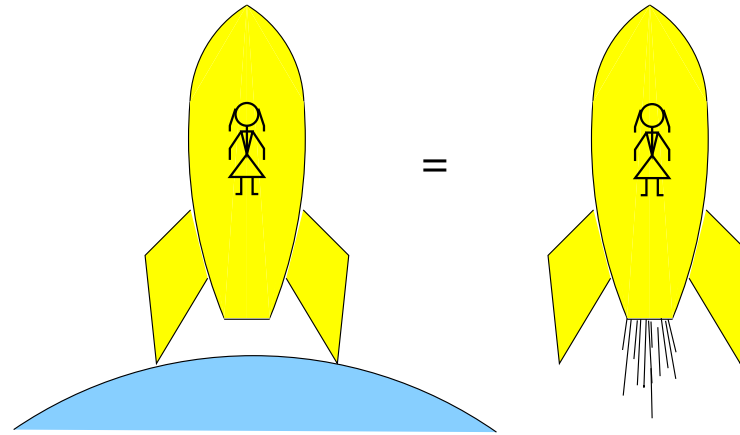
A. La relatividad general

A. La relatividad general



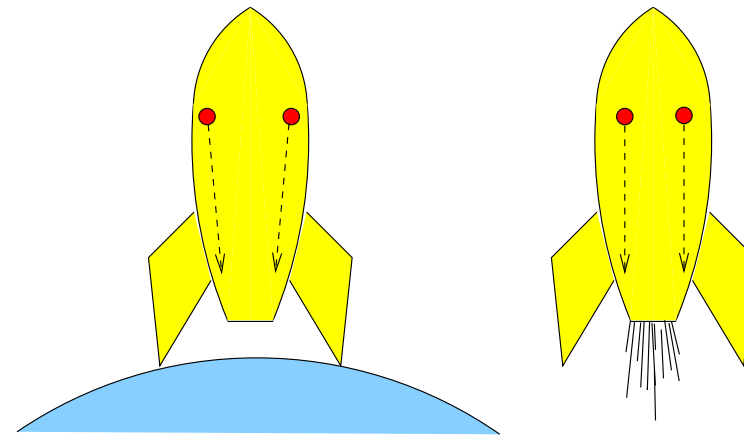
- Sin mirar por la ventanilla de la nave:
no distinguimos si sentimos la **fuerza de aceleración** del cohete o la **fuerza de la gravedad**

A. La relatividad general



- Sin mirar por la ventanilla de la nave:
no distinguimos si sentimos la **fuerza de aceleración** del cohete o la **fuerza de la gravedad**

- **Equivalencia válida sólo localmente**, en una pequeña región del espacio:



B. Igualdad de masa inercial y masa gravitatoria

B. Igualdad de masa inercial y masa gravitatoria

- **Hecho experimental:** dos objetos en caída libre desde igual altura llegan al suelo a la vez (si eliminamos el rozamiento)

B. Igualdad de masa inercial y masa gravitatoria

- **Hecho experimental:** dos objetos en caída libre desde igual altura llegan al suelo a la vez (si eliminamos el rozamiento)
- **Galileo** lo comprobó lanzando objetos y usando péndulos (más preciso)

B. Igualdad de masa inercial y masa gravitatoria

- **Hecho experimental:** dos objetos en caída libre desde igual altura llegan al suelo a la vez (si eliminamos el rozamiento)
- **Galileo** lo comprobó lanzando objetos y usando péndulos (más preciso)

- **Newton** refinó los experimentos y dio una explicación:

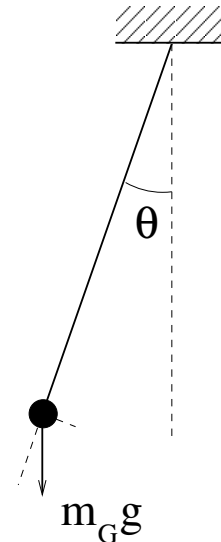
– ley de la gravedad: $F = G_N \frac{m_{G1} m_{G2}}{r^2}$

aplicada a la Tierra: $F = m_G g$, $g = G_N \frac{M_{\oplus}}{R_{\oplus}^2} = 9.8 \text{ m s}^{-2}$

– segunda ley Newton: $F = m_I a$

★ Por tanto, $a = g \Leftrightarrow m_I = m_G$: **masa inercial** y **masa gravitatoria** son iguales

★ En cuanto al péndulo: $-m_G g \sin \theta = m_I \ell \ddot{\theta} \Rightarrow T = 2\pi \sqrt{\frac{m_I \ell}{m_G g}} \Rightarrow \frac{|m_I - m_G|}{m_I} < 10^{-3}$



B. Igualdad de masa inercial y masa gravitatoria

- **Hecho experimental:** dos objetos en caída libre desde igual altura llegan al suelo a la vez (si eliminamos el rozamiento)
- **Galileo** lo comprobó lanzando objetos y usando péndulos (más preciso)

- **Newton** refinó los experimentos y dio una explicación:

– ley de la gravedad: $F = G_N \frac{m_{G1} m_{G2}}{r^2}$

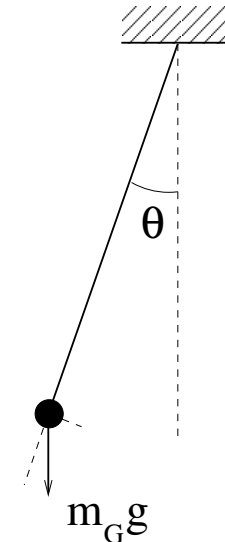
aplicada a la Tierra: $F = m_G g$, $g = G_N \frac{M_\oplus}{R_\oplus^2} = 9.8 \text{ m s}^{-2}$

– segunda ley Newton: $F = m_I a$

★ Por tanto, $a = g \Leftrightarrow m_I = m_G$: **masa inercial** y **masa gravitatoria** son iguales

★ En cuanto al péndulo: $-m_G g \sin \theta = m_I \ell \ddot{\theta} \Rightarrow T = 2\pi \sqrt{\frac{m_I \ell}{m_G g}} \Rightarrow \frac{|m_I - m_G|}{m_I} < 10^{-3}$

Pero: ¿por qué dos propiedades de un cuerpo tan distintas habían de ser iguales?



B. Igualdad de masa inercial y masa gravitatoria

- **Hecho experimental:** dos objetos en caída libre desde igual altura llegan al suelo a la vez (si eliminamos el rozamiento)

- **Galileo** lo comprobó lanzando objetos y usando péndulos (más preciso)

- **Newton** refinó los experimentos y dio una explicación:

– ley de la gravedad: $F = G_N \frac{m_{G1} m_{G2}}{r^2}$

aplicada a la Tierra: $F = m_G g$, $g = G_N \frac{M_{\oplus}}{R_{\oplus}^2} = 9.8 \text{ m s}^{-2}$

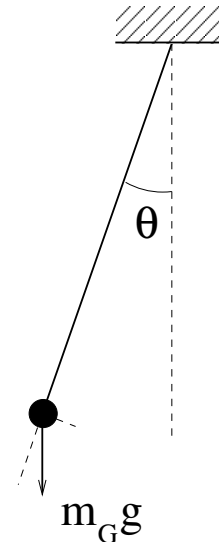
– segunda ley Newton: $F = m_I a$

★ Por tanto, $a = g \Leftrightarrow m_I = m_G$: **masa inercial** y **masa gravitatoria** son iguales

★ En cuanto al péndulo: $-m_G g \sin \theta = m_I \ell \ddot{\theta} \Rightarrow T = 2\pi \sqrt{\frac{m_I \ell}{m_G g}} \Rightarrow \frac{|m_I - m_G|}{m_I} < 10^{-3}$

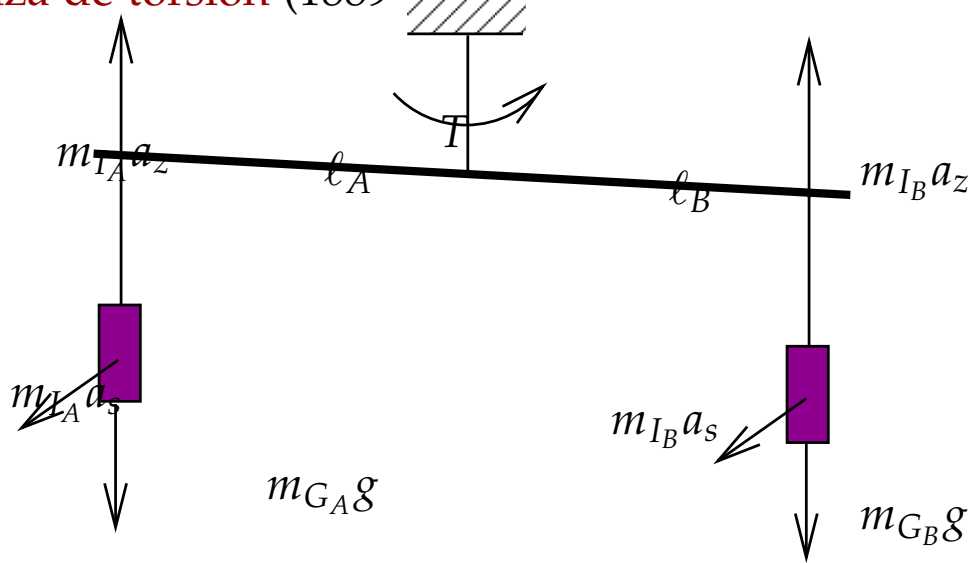
Pero: ¿por qué dos propiedades de un cuerpo tan distintas habían de ser iguales?

- **Einstein** aporta la explicación natural con el principio de equivalencia



El experimento de Eötvös

Balanza de torsión (1889-1909)



$$\Rightarrow \frac{|m_I - m_G|}{m_I} < 3 \times 10^{-9}$$

La **condición de equilibrio**:

$$\ell_A(m_{G_A}g - m_{I_A}a_z) = \ell_B(m_{G_B}g - m_{I_B}a_z)$$

nos permite determinar ℓ_B y sustituirla en la expresión del **momento de giro**:

$$\begin{aligned} T &= \ell_A m_{I_A} a_s - \ell_B m_{I_B} a_s \\ &= \ell_A m_{I_A} a_s \left[1 - \frac{\frac{m_{G_A}}{m_{I_A}} g - a_z}{\frac{m_{G_B}}{m_{I_B}} g - a_z} \right] \\ &\approx \ell_A m_{I_A} a_s \left[1 - \frac{m_{G_A}}{m_{G_B}} \frac{m_{I_B}}{m_{I_A}} \right] \\ &= \ell_A a_s m_{G_A} \left(\frac{m_{I_A}}{m_{G_A}} - \frac{m_{I_B}}{m_{G_B}} \right) \end{aligned}$$

- Dicke (1964): 10^{-11} , Baessler (1999): 10^{-13} , STEP (2013?): 10^{-18}

La teoría de la gravitación

La teoría de la gravitación

- Según la **física newtoniana** un objeto se mueve a través del espacio en **línea recta** (camino más corto), con velocidad uniforme, **a menos que sobre él actúe una fuerza**

La teoría de la gravitación

- Según la **física newtoniana** un objeto se mueve a través del espacio en **línea recta** (camino más corto), con velocidad uniforme, **a menos que sobre él actúe una fuerza**
- En **física relativista** un objeto **también** se mueve en línea recta, con velocidad uniforme, a menos que actúe una fuerza, **pero** ahora se trata de una la línea recta, entendida como **el camino más corto en el espaciotiempo (geodésica) y no en el espacio tridimensional**

La teoría de la gravitación

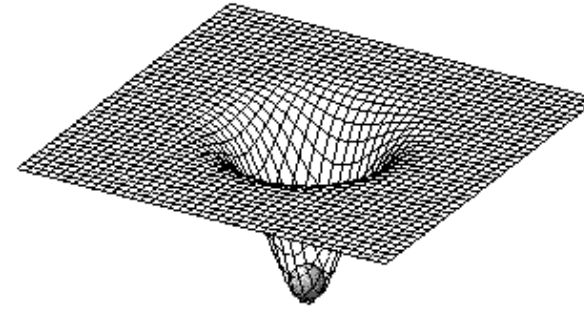
- Según la **física newtoniana** un objeto se mueve a través del espacio en **línea recta** (camino más corto), con velocidad uniforme, **a menos que sobre él actúe una fuerza**
- En **física relativista** un objeto **también** se mueve en línea recta, con velocidad uniforme, a menos que actúe una fuerza, **pero** ahora se trata de una la línea recta, entendida como **el camino más corto en el espaciotiempo (geodésica) y no en el espacio tridimensional**
- También cierto en presencia de gravedad, pues para Einstein **la gravedad no es una fuerza sino una distorsión del espaciotiempo** debida a la presencia de una masa.

El **campo gravitatorio** se manifiesta en la **geometría del espaciotiempo**

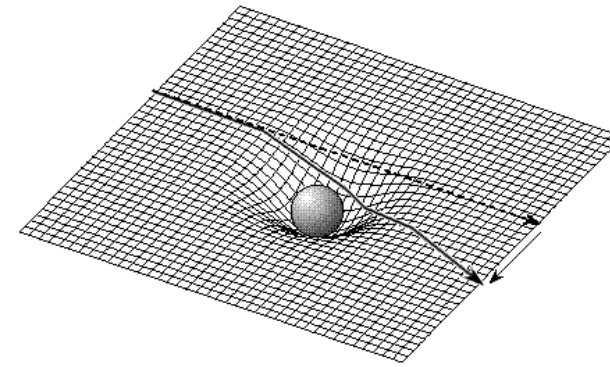
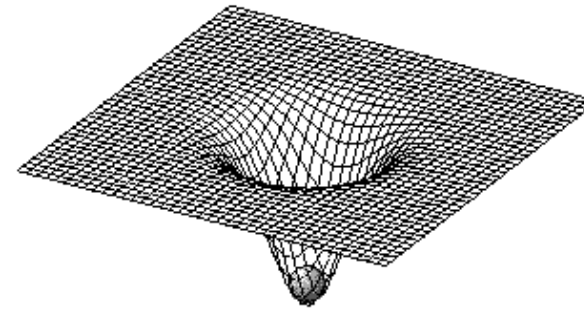
La teoría de la gravitación

- Según la **física newtoniana** un objeto se mueve a través del espacio en **línea recta** (camino más corto), con velocidad uniforme, **a menos que sobre él actúe una fuerza**
- En **física relativista** un objeto **también** se mueve en línea recta, con velocidad uniforme, a menos que actúe una fuerza, **pero** ahora se trata de una línea recta, entendida como **el camino más corto en el espaciotiempo (geodésica) y no en el espacio tridimensional**
- También cierto en presencia de gravedad, pues para Einstein **la gravedad no es una fuerza sino una distorsión del espaciotiempo** debida a la presencia de una masa.
El **campo gravitatorio** se manifiesta en la **geometría del espaciotiempo**
- Así, **el Sol no ejerce una fuerza sobre un planeta sino que curva el espaciotiempo** a su alrededor, de modo que **el planeta sigue el camino más corto** describiendo una **trayectoria curva en el espacio tridimensional**

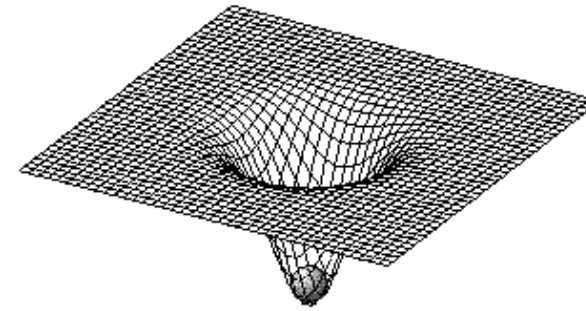
- Las **ecuaciones de campo de Einstein** expresan la **curvatura en función de la distribución de masa y energía** en cada punto del espaciotiempo



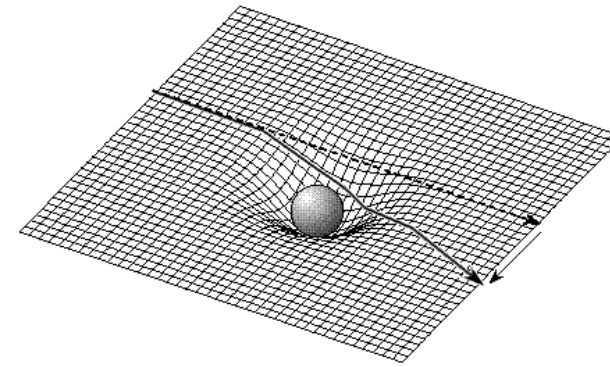
- Las **ecuaciones de campo de Einstein** expresan la **curvatura en función de la distribución de masa y energía** en cada punto del espaciotiempo
- **También los rayos de luz**, que siguen el camino más corto en un espacio curvo, **sienten la gravedad**
(↑ **principio de equivalencia**)



- Las **ecuaciones de campo de Einstein** expresan la **curvatura en función de la distribución de masa y energía** en cada punto del espaciotiempo



- **También los rayos de luz**, que siguen el camino más corto en un espacio curvo, **sienten la gravedad** (↑ **principio de equivalencia**)



- **La teoría de Einstein describe** las interacciones gravitatorias **más** (una mayor cantidad de fenómenos) y **mejor** (con mayor precisión) que la de Newton, aportando además una **nueva visión del mundo**

- Las **ecuaciones de campo de Einstein** expresan la **curvatura** en función de la **distribución de masa y energía** en cada punto del **espaciotiempo**
- **También los rayos de luz**, que siguen el camino más corto en un espacio curvo, **sienten la gravedad**
(↑ **principio de equivalencia**)
- **La teoría de Einstein describe** las interacciones gravitatorias **más** (una mayor cantidad de fenómenos) y **mejor** (con mayor precisión) que la de Newton, aportando además una **nueva visión del mundo**
- **La teoría de Newton** es de todas formas una **excelente aproximación** para objetos que **no se muevan muy rápido** y estén sometidos a **campos gravitatorios débiles**

