

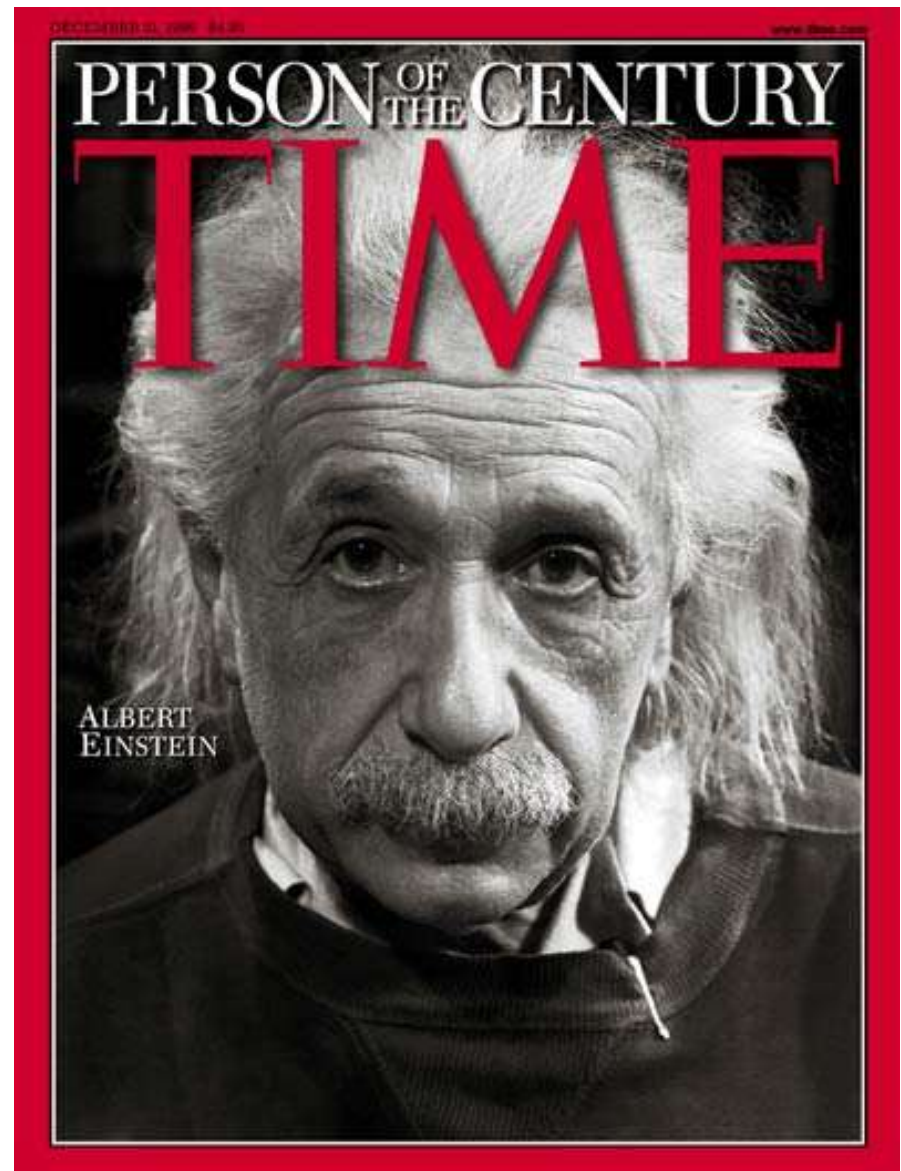
¿Qué carallo es la relatividad?

Martí Berenguer Mimó
IGFAE – Universidade de Santiago de Compostela

La Ricotta. As Barreiras, Castro Caldelas.
30/07/2025

Noviembre de 1915:

Albert Einstein presenta la teoría
general de la relatividad



LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

Men of Science More or Less
Agog Over Results of Eclipse
Observations.

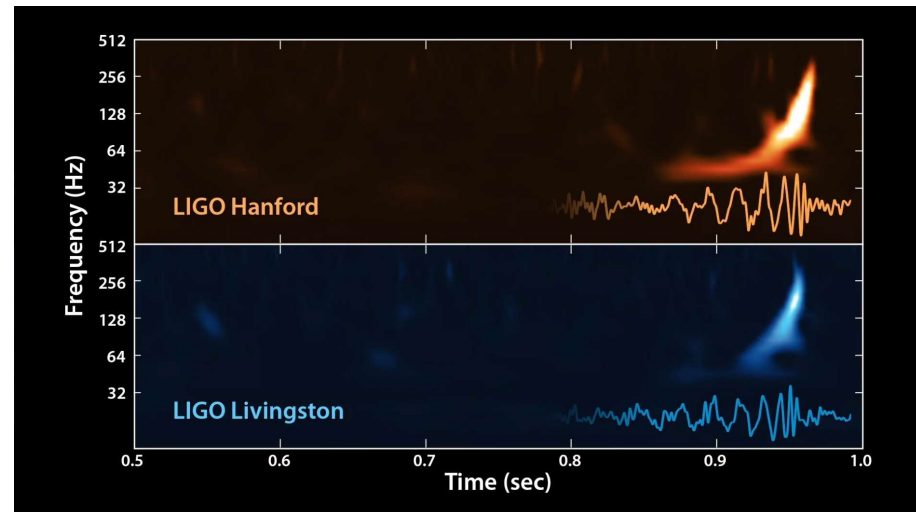
EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

Stars Not Where They Seemed
or Were Calculated to be,
but Nobody Need Worry.

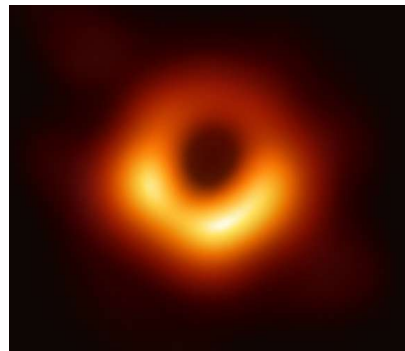
A BOOK FOR 12 WISE MEN

No More in All the World Could
Comprehend It, Said Einstein When
His Daring Publishers Accepted It.

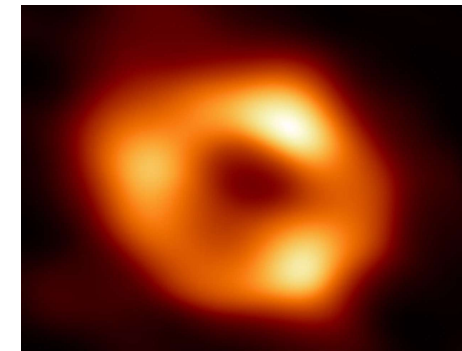
New York Times, 10 de noviembre de 1919.



LIGO. 15 de septiembre de 2015

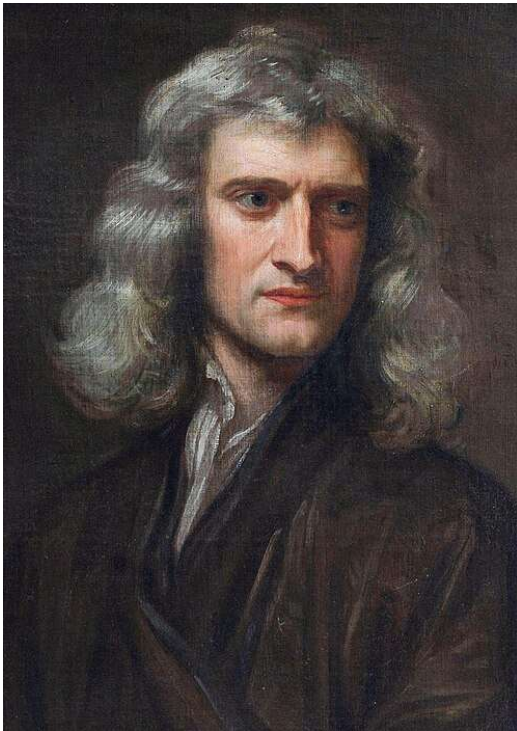


M87. 10 de abril de 2019

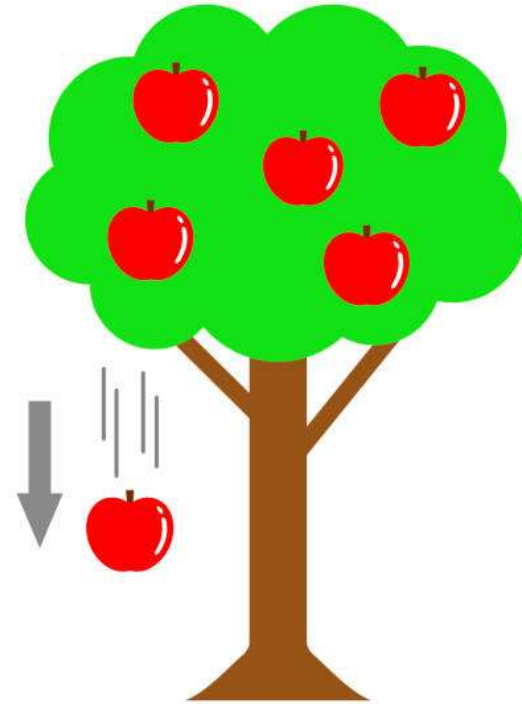


*Sgr A**. 12 de mayo de 2022

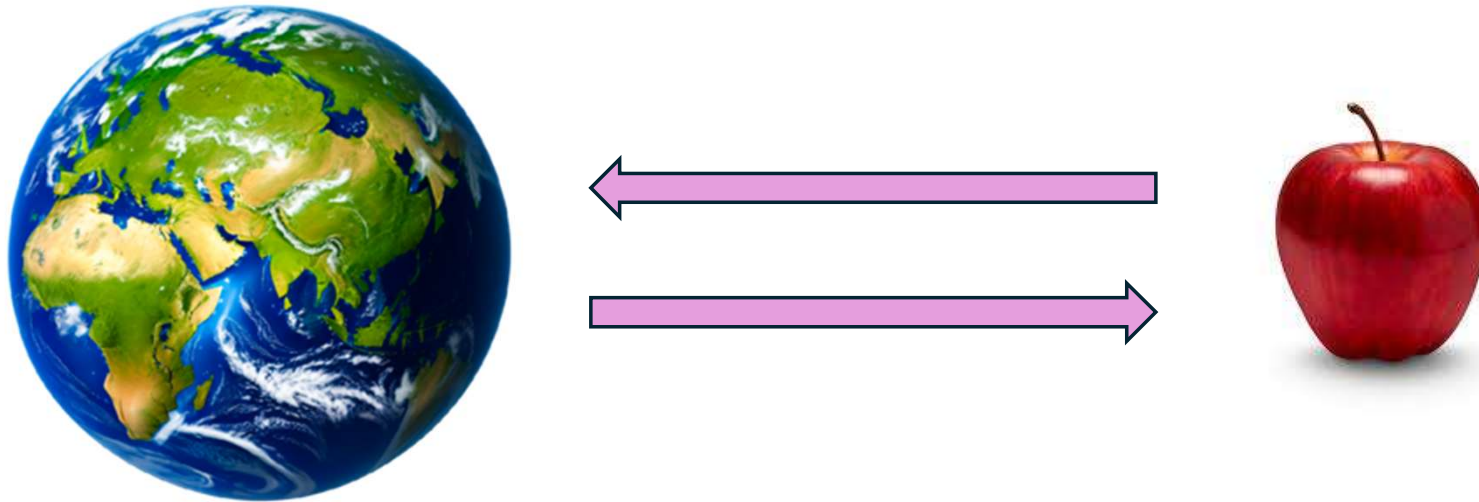
1687: Ley de la gravitación universal



Sir Isaac Newton



1687: Ley de la gravitación universal

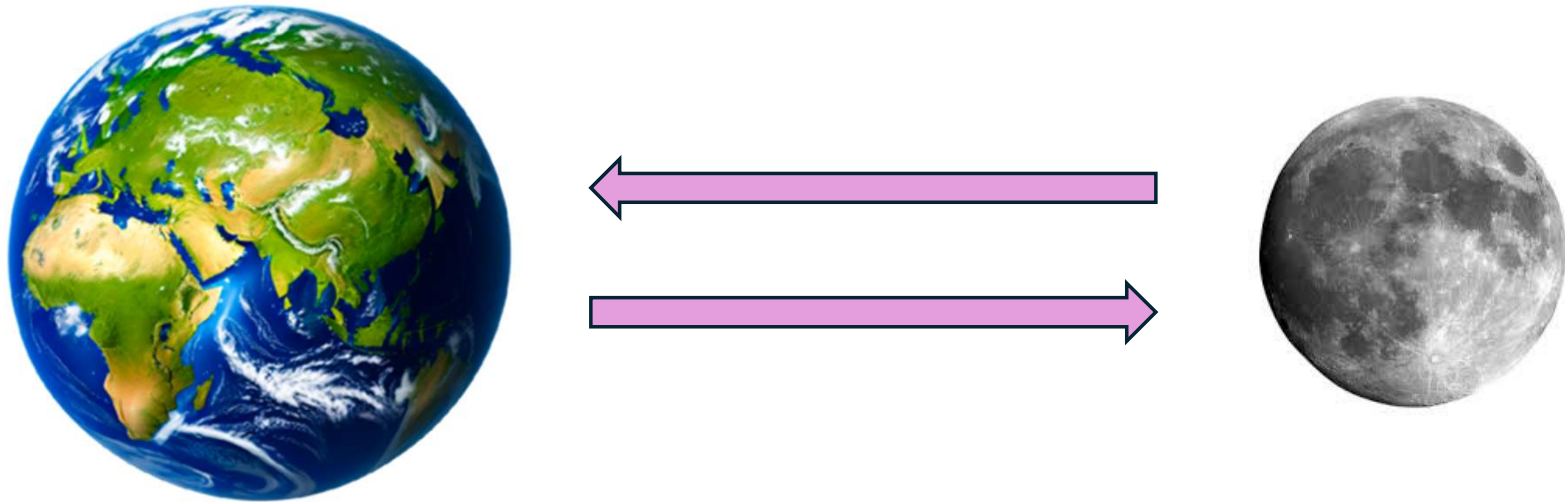


Existe una fuerza atractiva entre
todos los cuerpos con masa



La manzana cae
hacia la Tierra

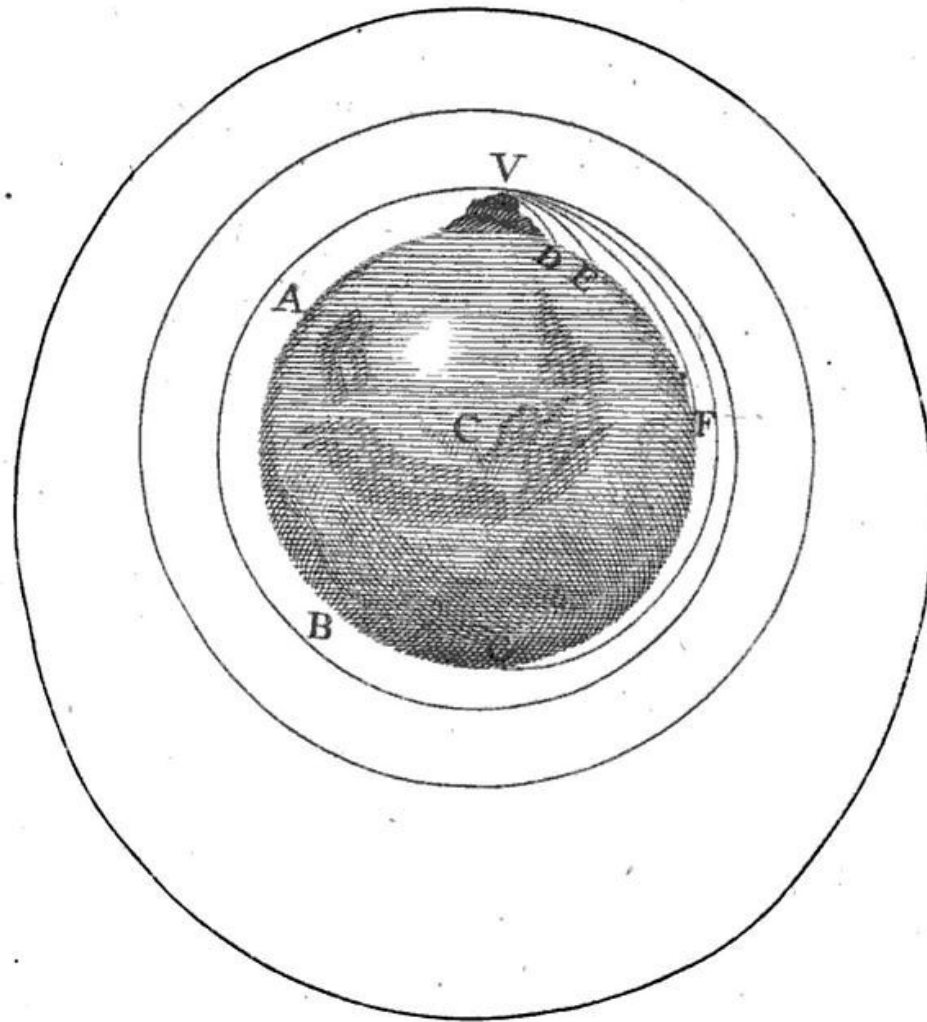
1687: Ley de la gravitación universal



Existe una fuerza atractiva entre
todos los cuerpos con masa



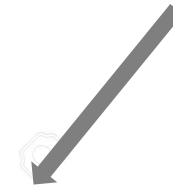
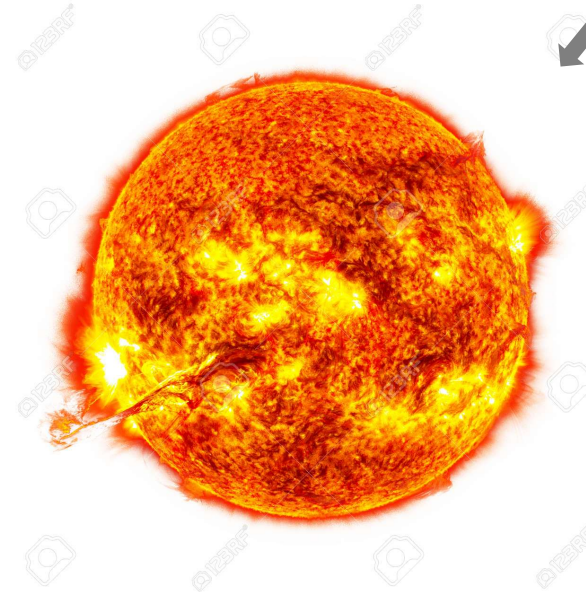
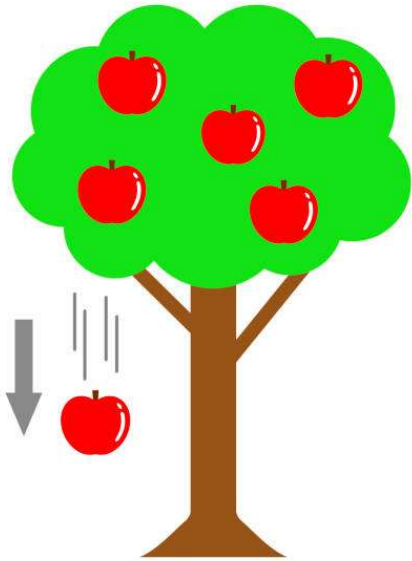
Por qué la Luna
no cae?



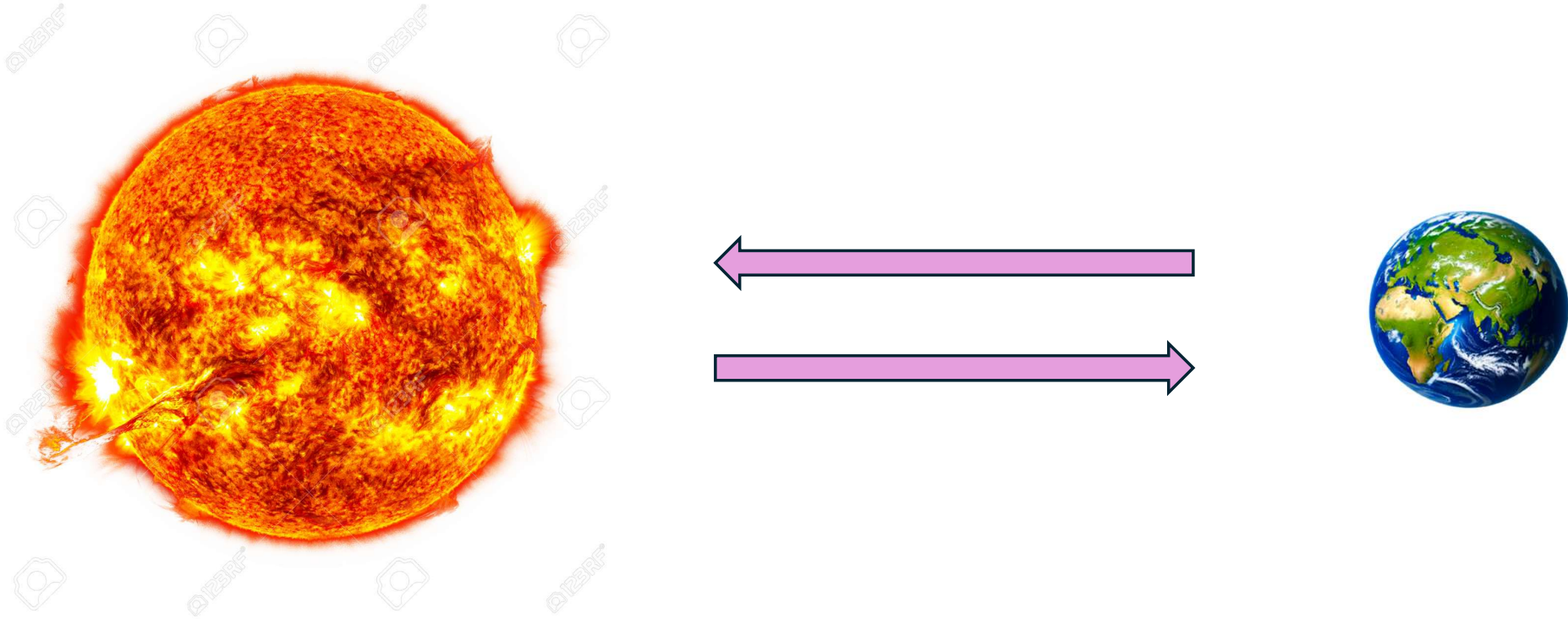
Philosophiæ naturalis principia mathematica (1687)

1687: Ley de la gravitación **universal**

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r}$$



La teoría tiene algo muy raro...



Acción a distancia?

La teoría tiene algo muy raro...

"Que la gravedad sea algo innato, inherente y esencial a la materia, de modo que un cuerpo pueda actuar sobre otro a distancia, a través del vacío, sin la mediación de nada que transmita su acción y fuerza de uno a otro, me parece tal absurdidad, que no creo que ninguna mente dotada de un mínimo de razón, pueda jamás llegar a creerse semejante idea."

La teoría tiene algo muy raro...

"Que la gravedad sea algo innato, inherente y esencial a la materia, de modo que un cuerpo pueda actuar sobre otro a distancia, a través del vacío, sin la mediación de nada que transmita su acción y fuerza de uno a otro, me parece tal absurdidad, que no creo que ninguna mente dotada de un mínimo de razón, pueda jamás llegar a creerse semejante idea."

Sir Isaac Newton

Teoría especial de la relatividad (1905)



Albert Einstein

Ann. Phys. (Leipzig) **14**, Supplement, 194-224 (2005)

A. Einstein, Annalen der Physik, Band 17, 1905

891

3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom

Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento.
Albert Einstein, 1905.

Teoría especial de la relatividad (1905)

Dos postulados:

- Las leyes de la Naturaleza son las mismas para todos los observadores inerciales.

Teoría especial de la relatividad (1905)

Dos postulados:

- Las leyes de la Naturaleza son las mismas para todos los observadores inerciales.
- La velocidad de la luz es **la misma para todos:**

299.792,458 km/s

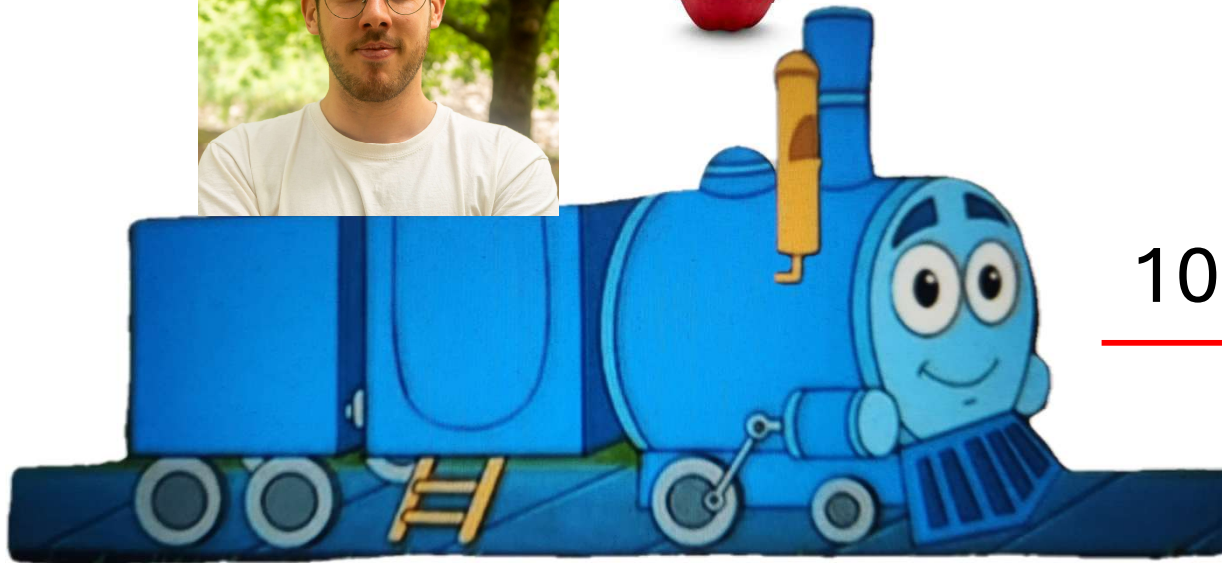


20 km/h



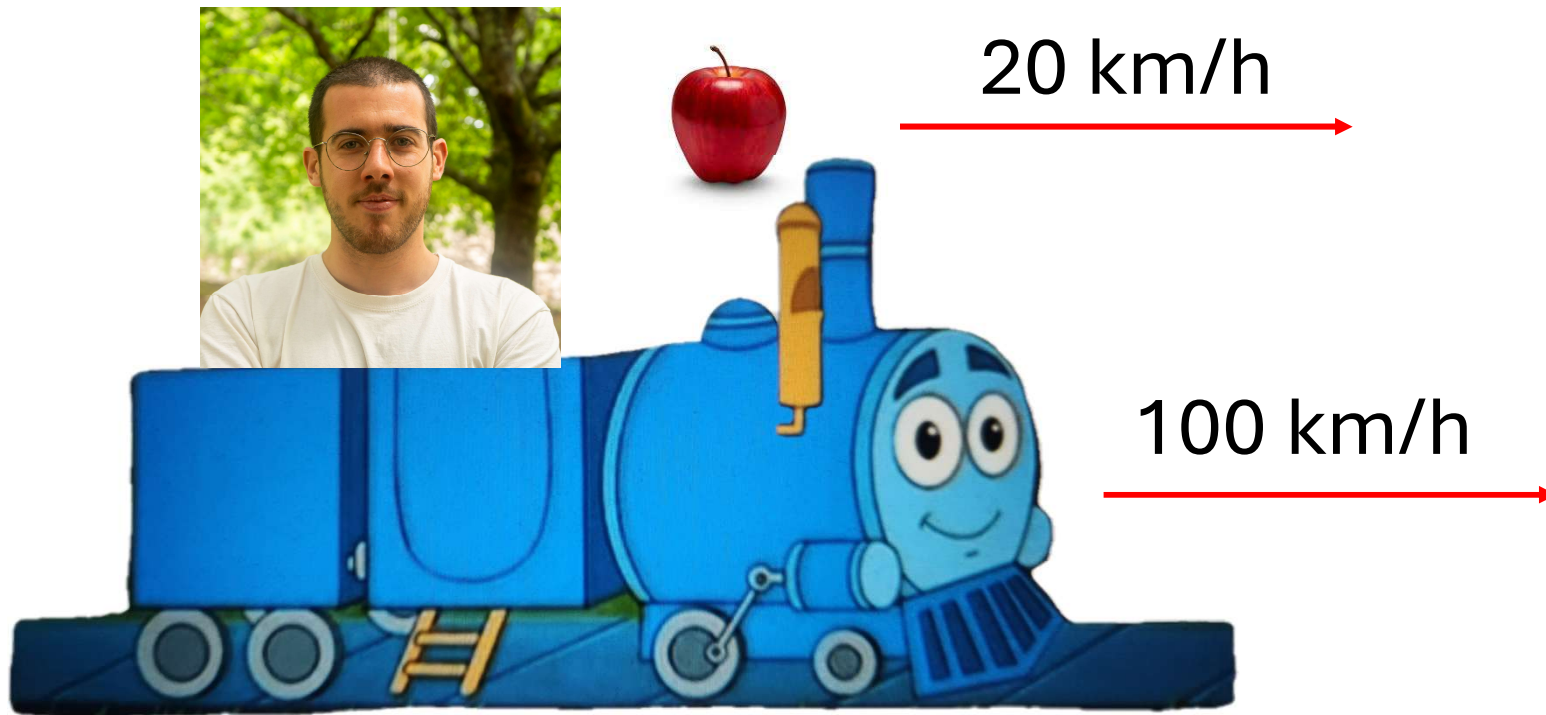


20 km/h



100 km/h





$$(100 + 20) \text{ km/h} = 120 \text{ km/h}$$



20 km/h



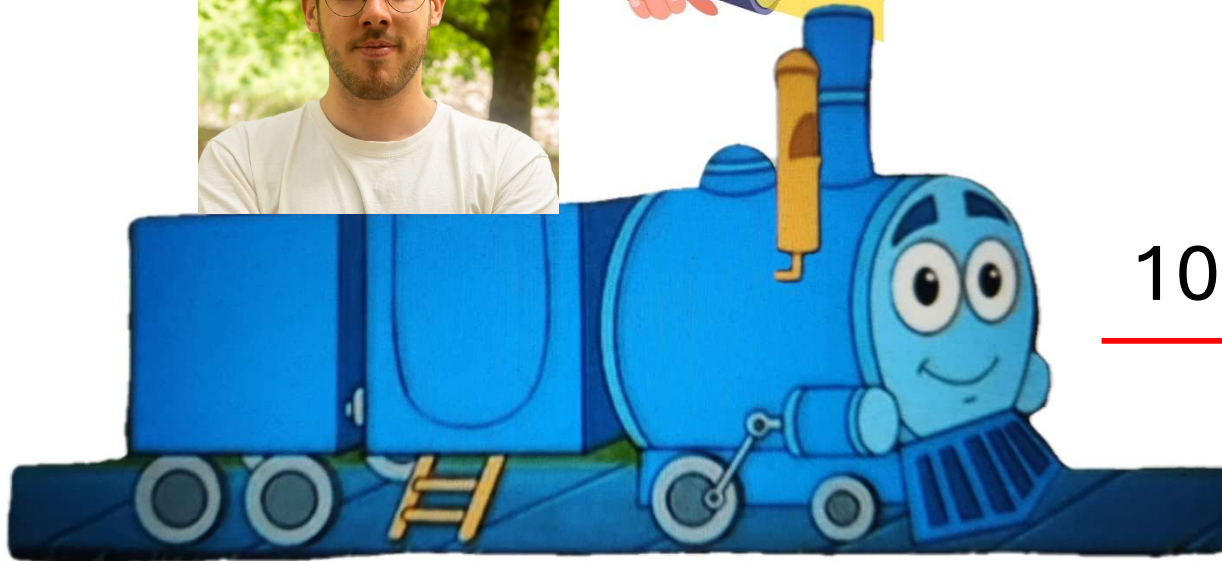


300.000 km/s



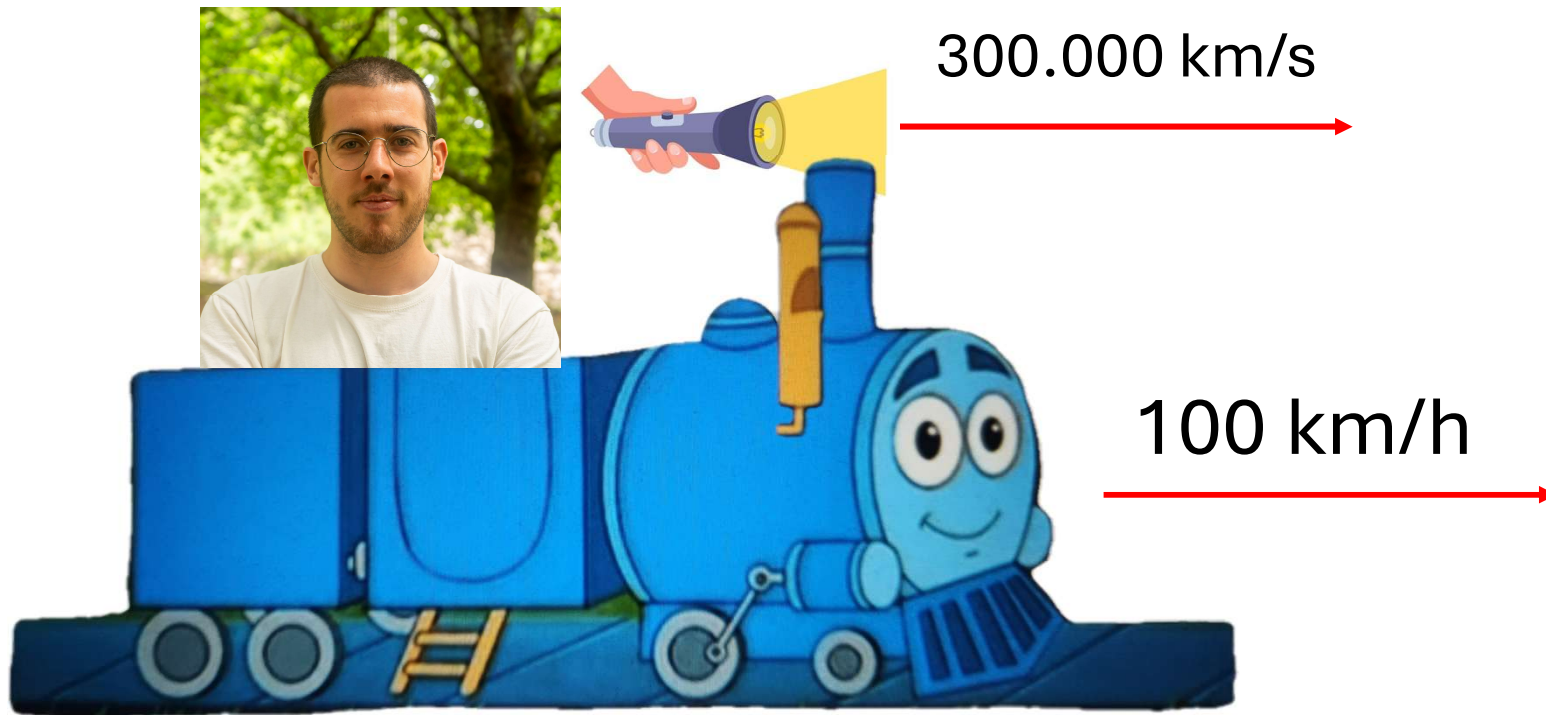


300.000 km/s

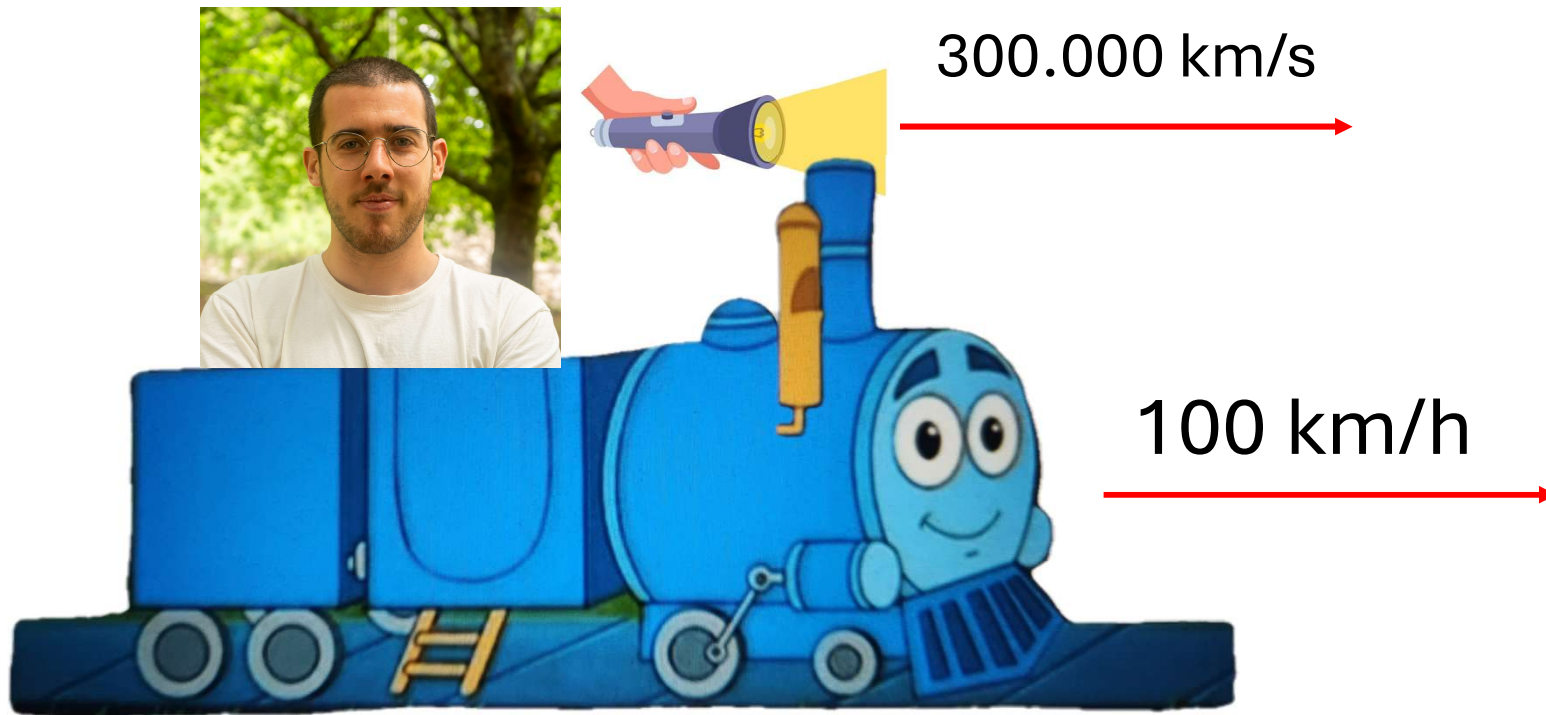


100 km/h





$$100 \text{ km/h} + 300.000 \text{ km/s}$$



$$100 \text{ km/h} + 300.000 \text{ km/s}$$

La velocidad de la luz es la misma para todos: **300.000 km/s**

Teoría especial de la relatividad (1905)

Algunas consecuencias:

- Espacio + tiempo = espacio-tiempo.
- El tiempo y el espacio no son absolutos.
- Nada puede viajar más rápido que la luz.

Teoría especial de la relatividad (1905)

Algunas consecuencias:

- Espacio + tiempo = espacio-tiempo.
- El tiempo y el espacio no son absolutos.
- **Nada puede viajar más rápido que la luz.**

Tenemos una contradicción...



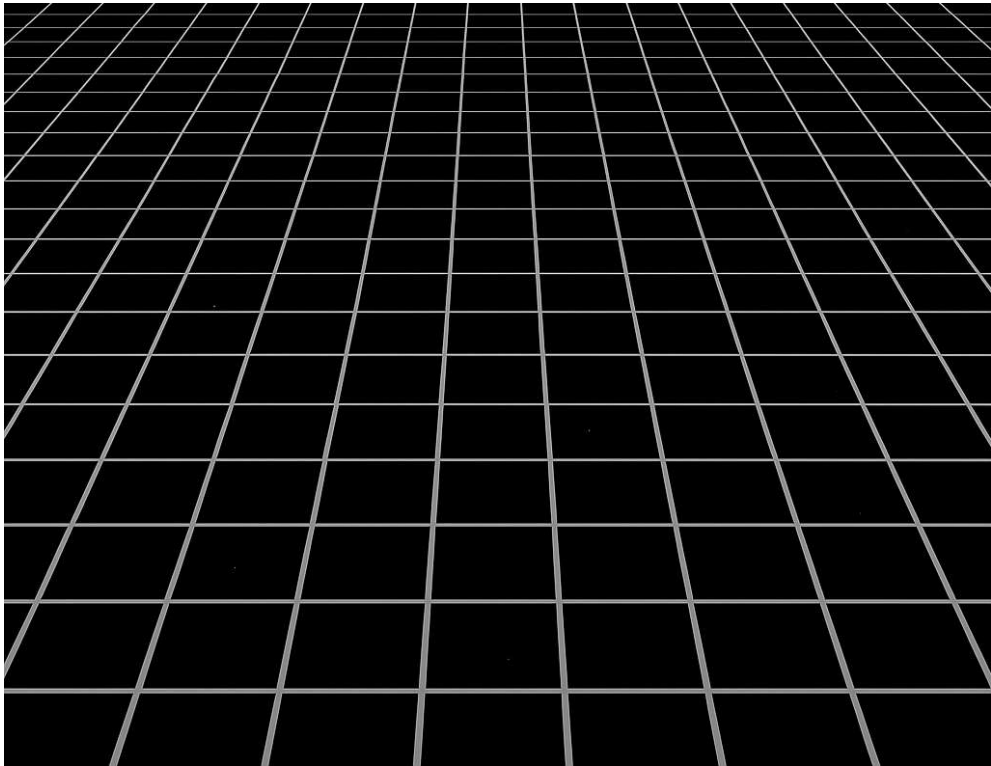
Teoría especial
de la relatividad
(1905)



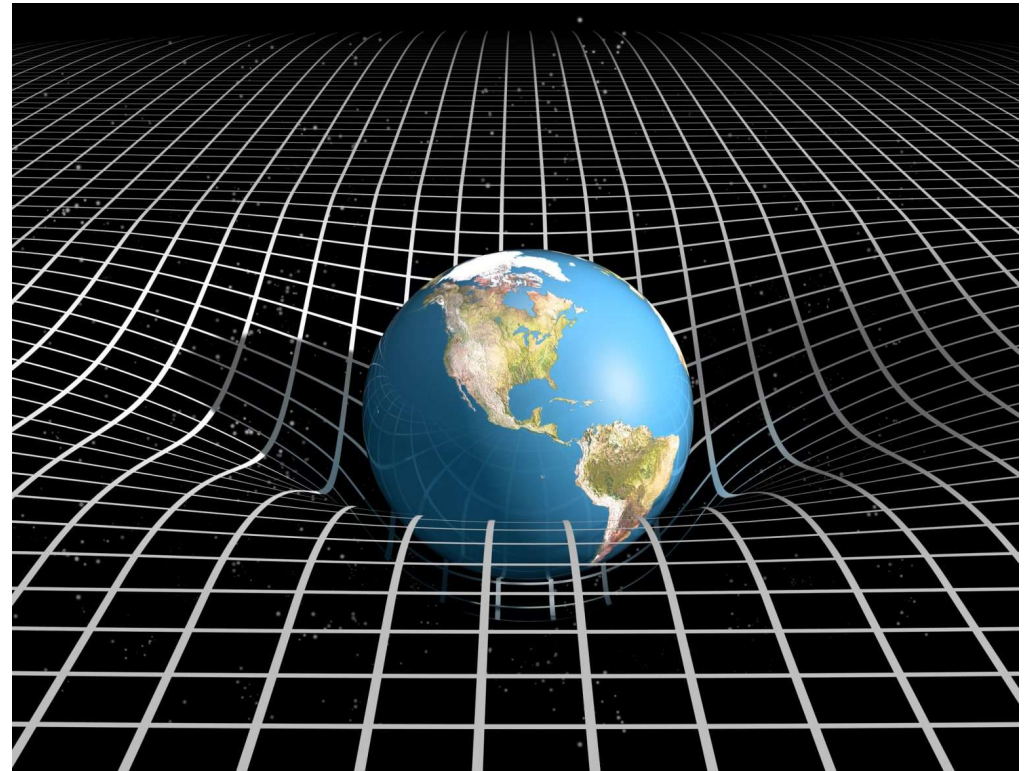
Gravedad



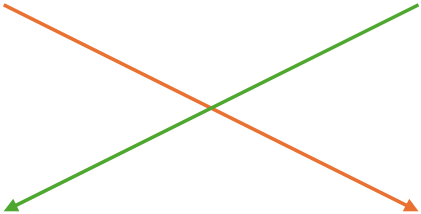
Teoría general de la relatividad (1915)



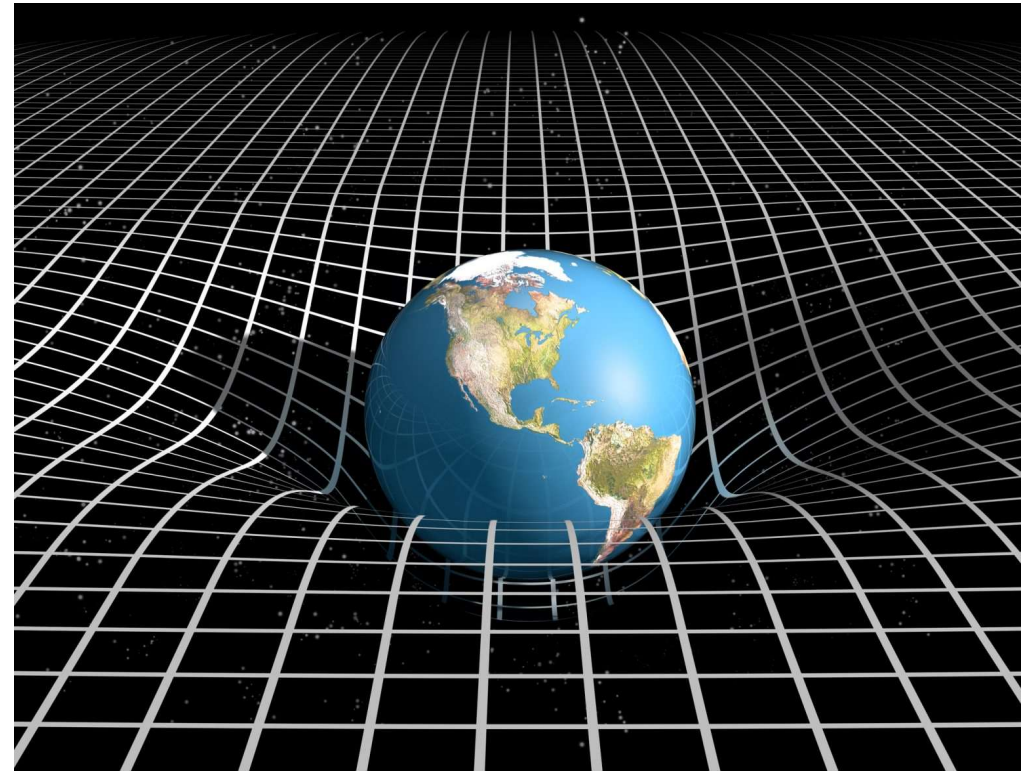
La materia y la energía curvan el espacio-tiempo



La materia y la energía curvan el espacio-tiempo


$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

10 ecuaciones muy difíciles
de resolver...





Karl Schwarzschild

- Noviembre de 1915: Relatividad general
- Enero de 1916: primera solución exacta



Karl Schwarzschild

- Noviembre de 1915: Relatividad general
- Enero de 1916: primera solución exacta

Solución de Schwarzschild

=

Agujeros negros

Qué es un agujero negro?

- Si comprimimos una masa lo suficiente...

Radio de Schwarzschild:

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

- Qué ocurre entonces?

La gravedad (curvatura) es tan intensa, que nada (ni siquiera la luz) puede escapar.

Qué es un agujero negro?

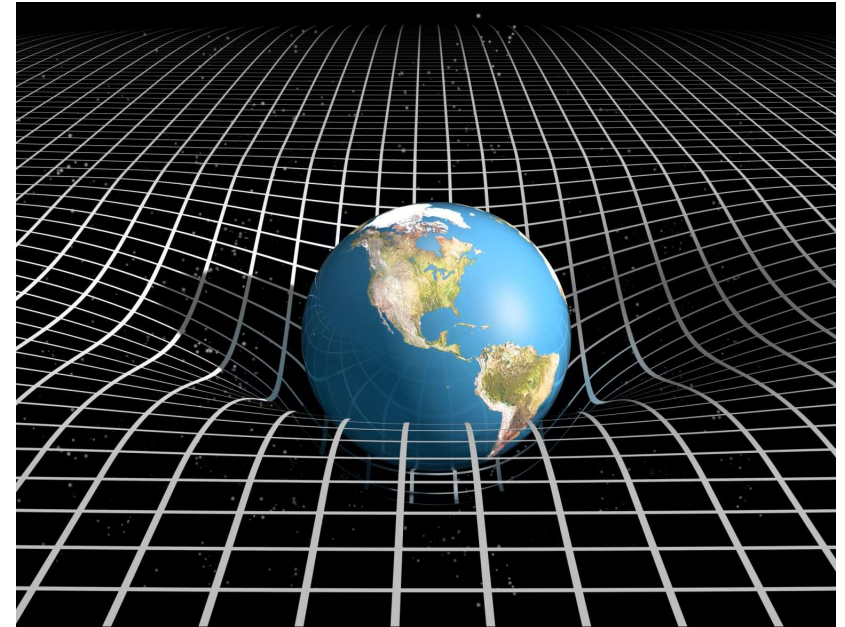
- Si comprimimos una masa lo suficiente...

Radio de Schwarzschild:

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

- Qué ocurre entonces?

La gravedad (curvatura) es tan intensa, que nada (ni siquiera la luz) puede escapar.



Qué es un agujero negro?

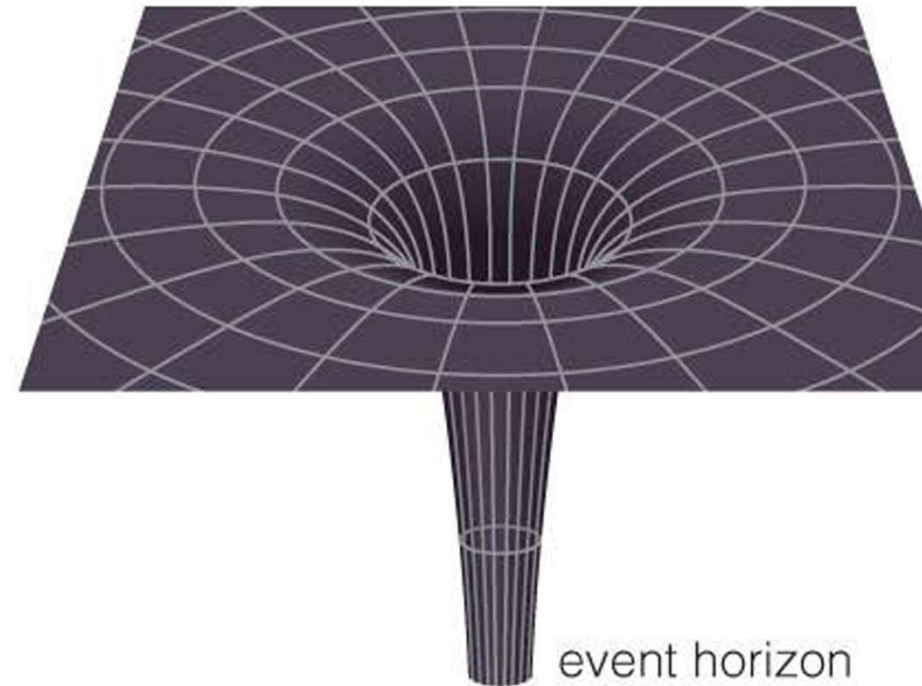
- Si comprimimos una masa lo suficiente...

Radio de Schwarzschild:

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

- Qué ocurre entonces?

La gravedad (curvatura) es tan intensa, que nada (ni siquiera la luz) puede escapar.



Qué es un agujero negro?

- Si comprimimos una masa lo suficiente...

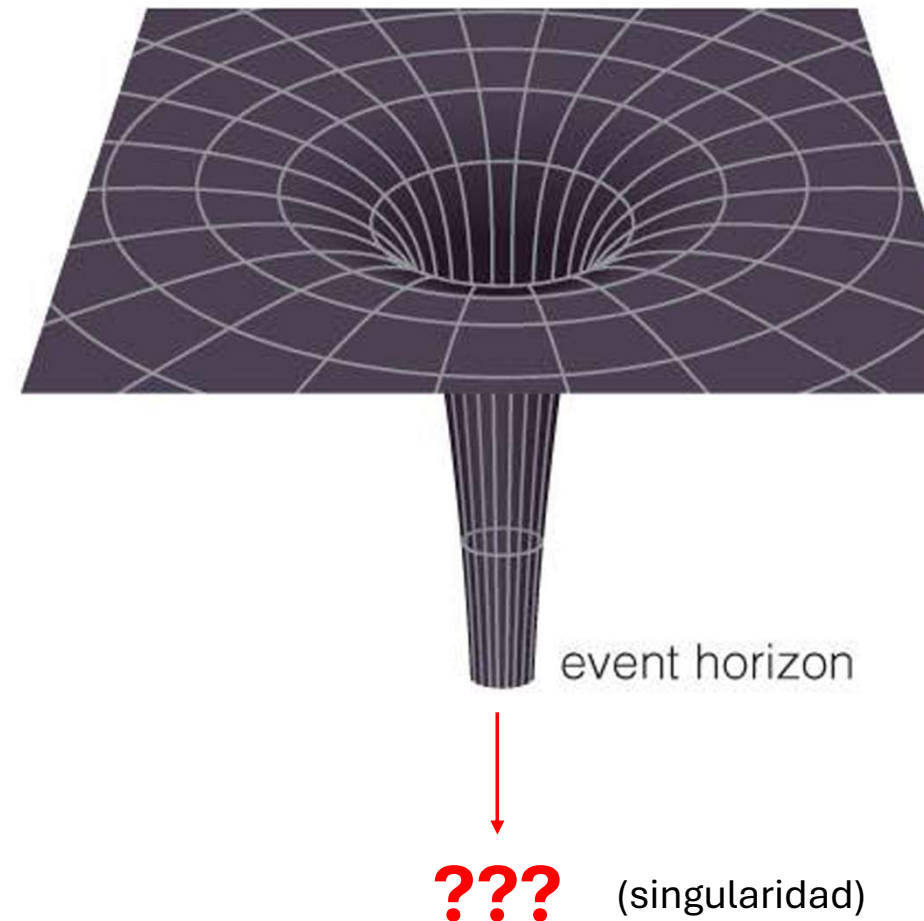
Radio de Schwarzschild:

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

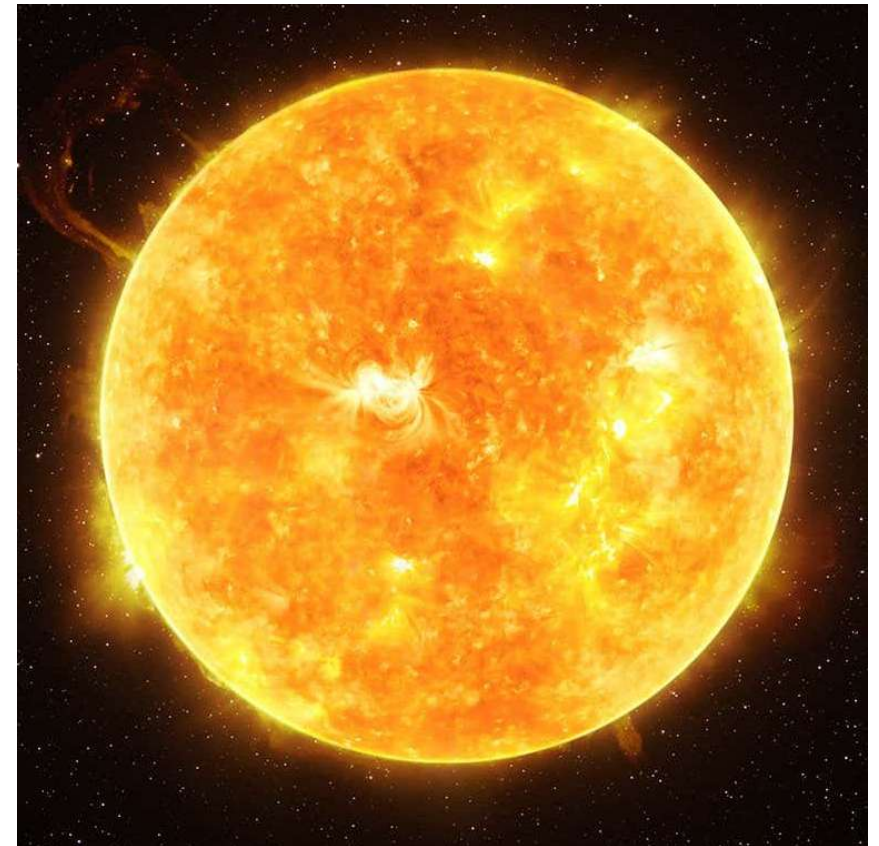
- Qué ocurre entonces?

La gravedad (curvatura) es tan intensa, que nada (ni siquiera la luz) puede escapar.

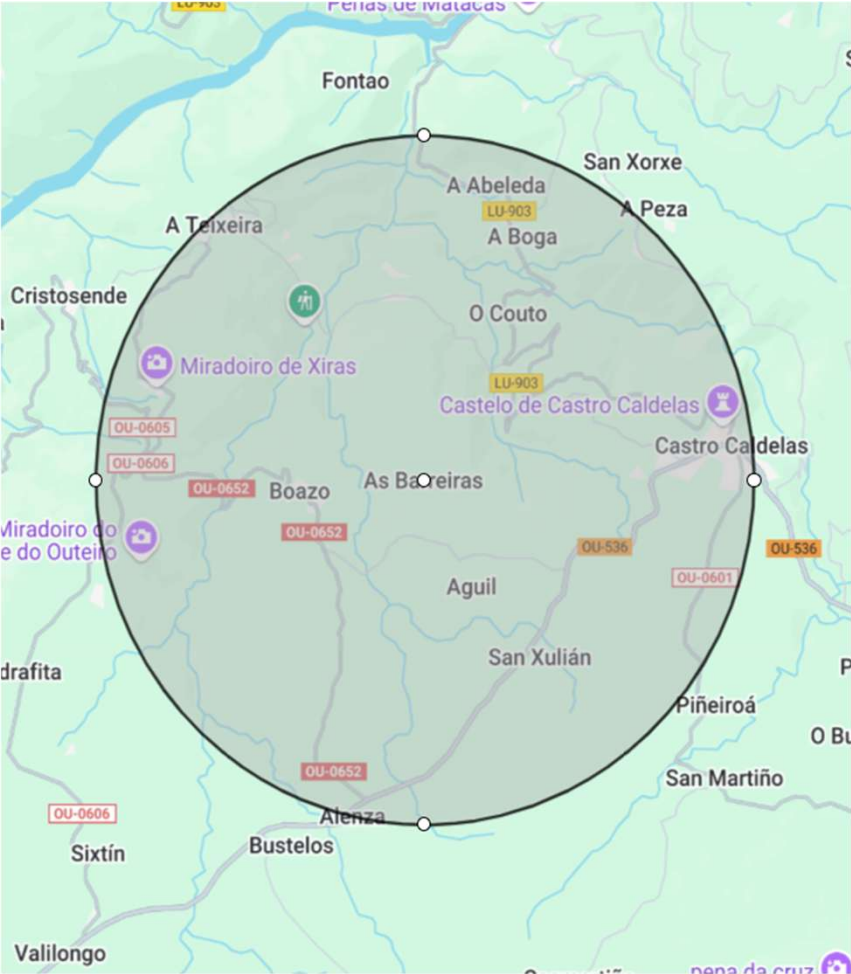
Las leyes conocidas dejan de ser válidas.



Objeto	Masa	Radio de Schwarzschild
Sol	$\sim 2 \cdot 10^{30} kg$	$\sim 3km$



Objeto	Masa	Radio de Schwarzschild
Sol	$\sim 2 \cdot 10^{30} kg$	$\sim 3km$



Objeto	Masa	Radio de Schwarzschild
Sol	$\sim 2 \cdot 10^{30} kg$	$\sim 3 km$
Tierra	$\sim 6 \cdot 10^{24} kg$	$\sim 1 cm$



Objeto	Masa	Radio de Schwarzschild
Sol	$\sim 2 \cdot 10^{30} kg$	$\sim 3km$
Tierra	$\sim 6 \cdot 10^{24} kg$	$\sim 1cm$

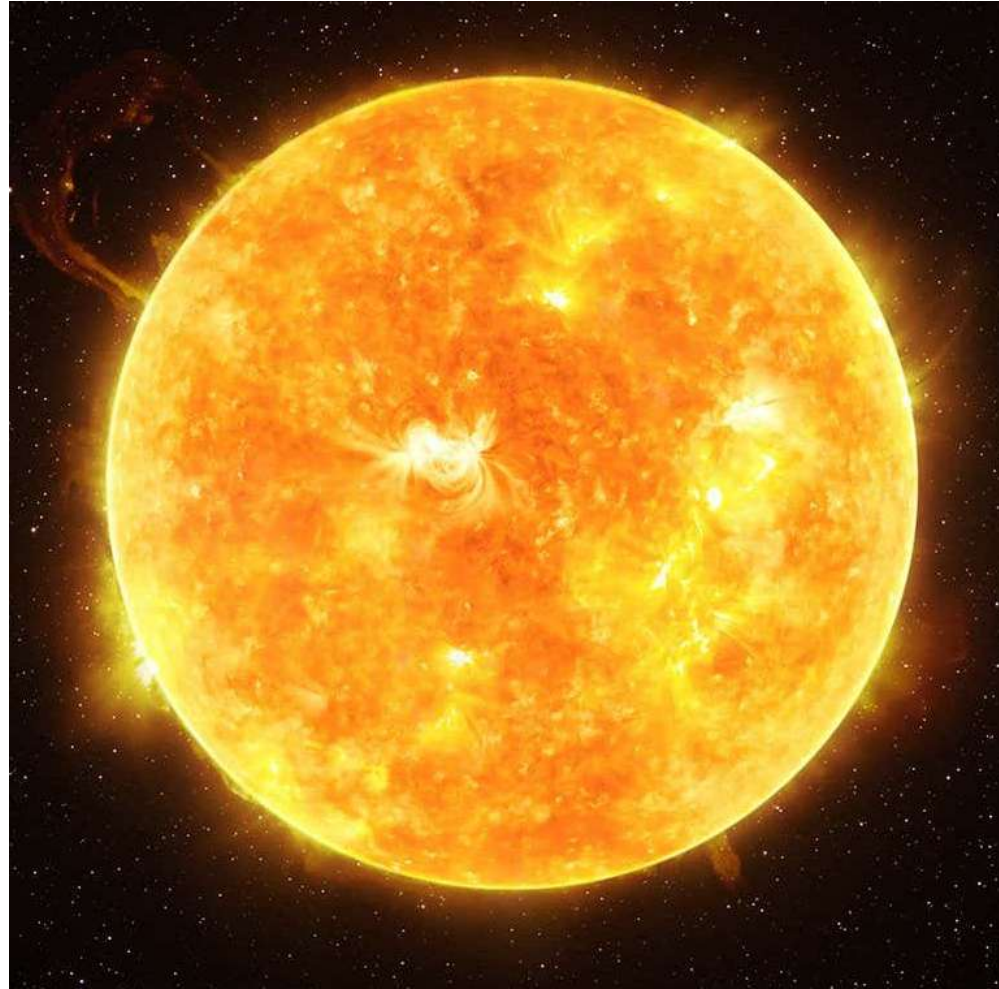


Objeto	Masa	Radio de Schwarzschild
Sol	$\sim 2 \cdot 10^{30} kg$	$\sim 3km$
Tierra	$\sim 6 \cdot 10^{24} kg$	$\sim 1cm$



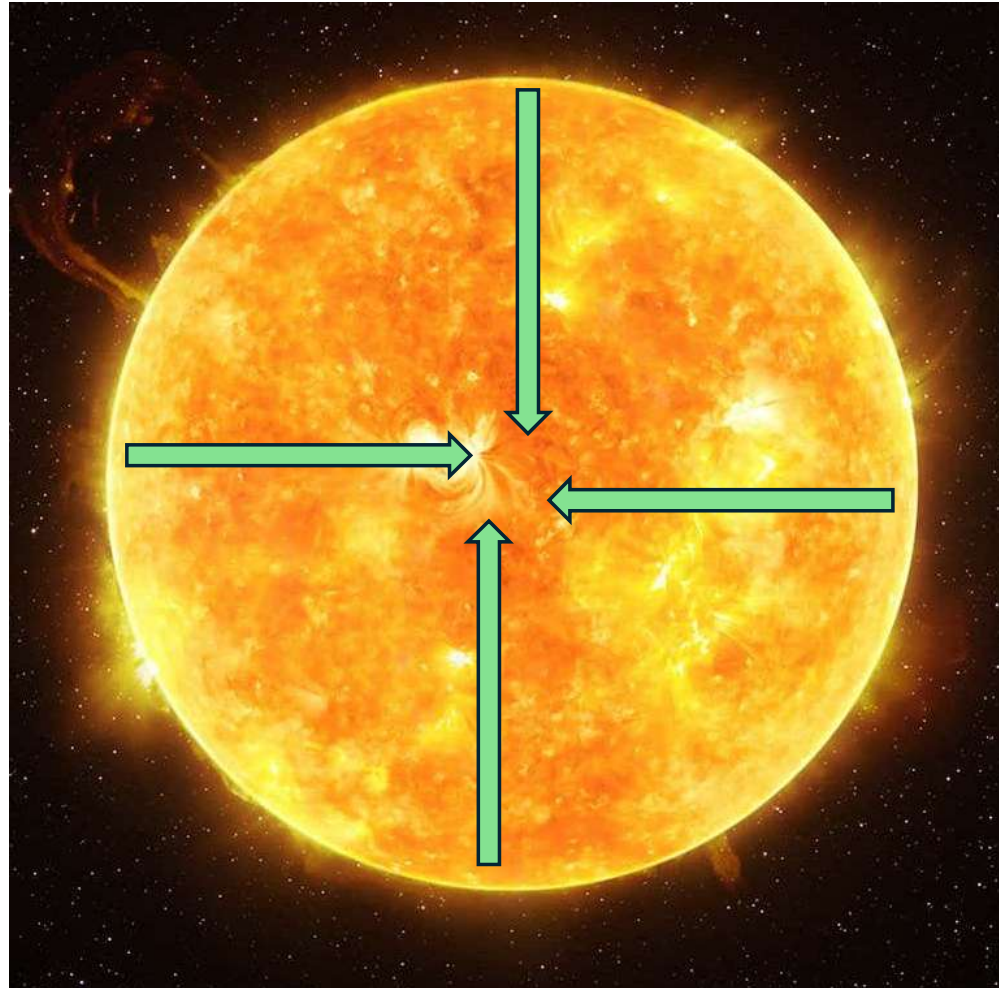
Pero... esto puede ocurrir?

Muerte estelar



Muerte estelar

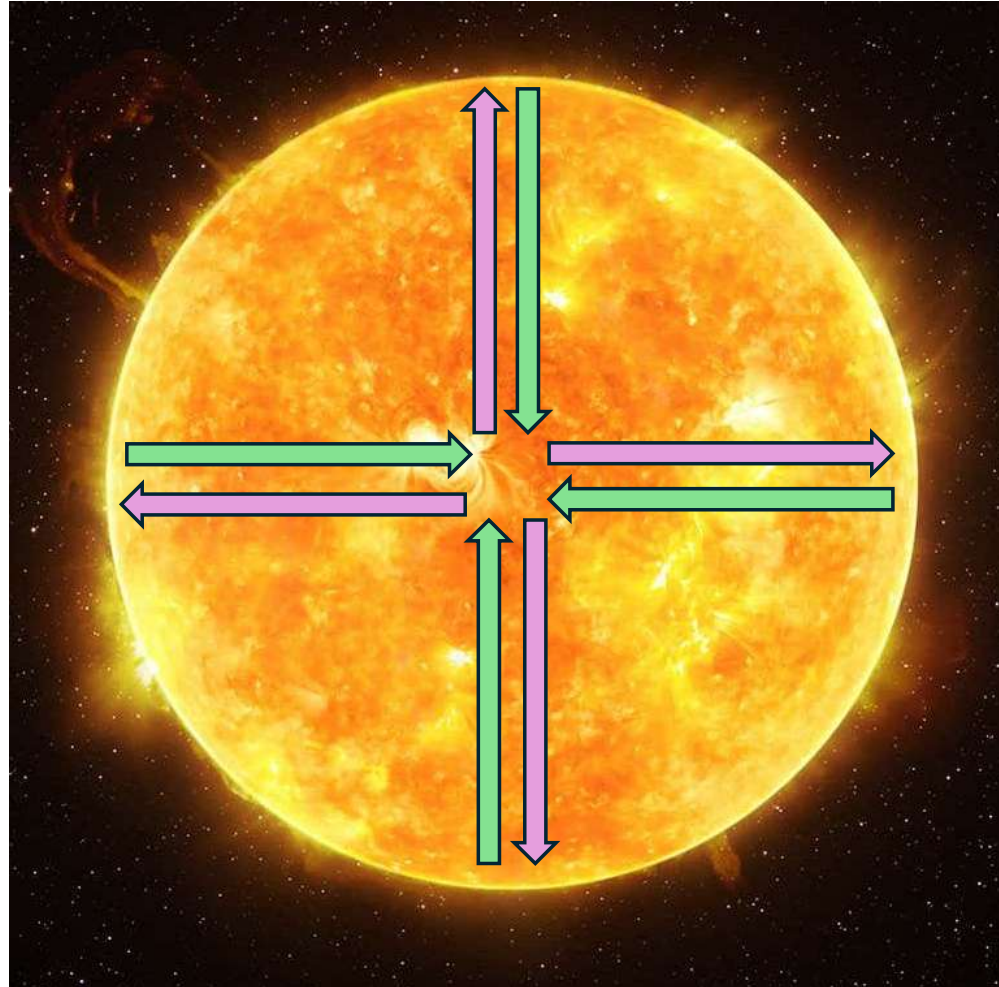
**Atracción
gravitatoria**



Muerte estelar

**Atracción
gravitatoria**

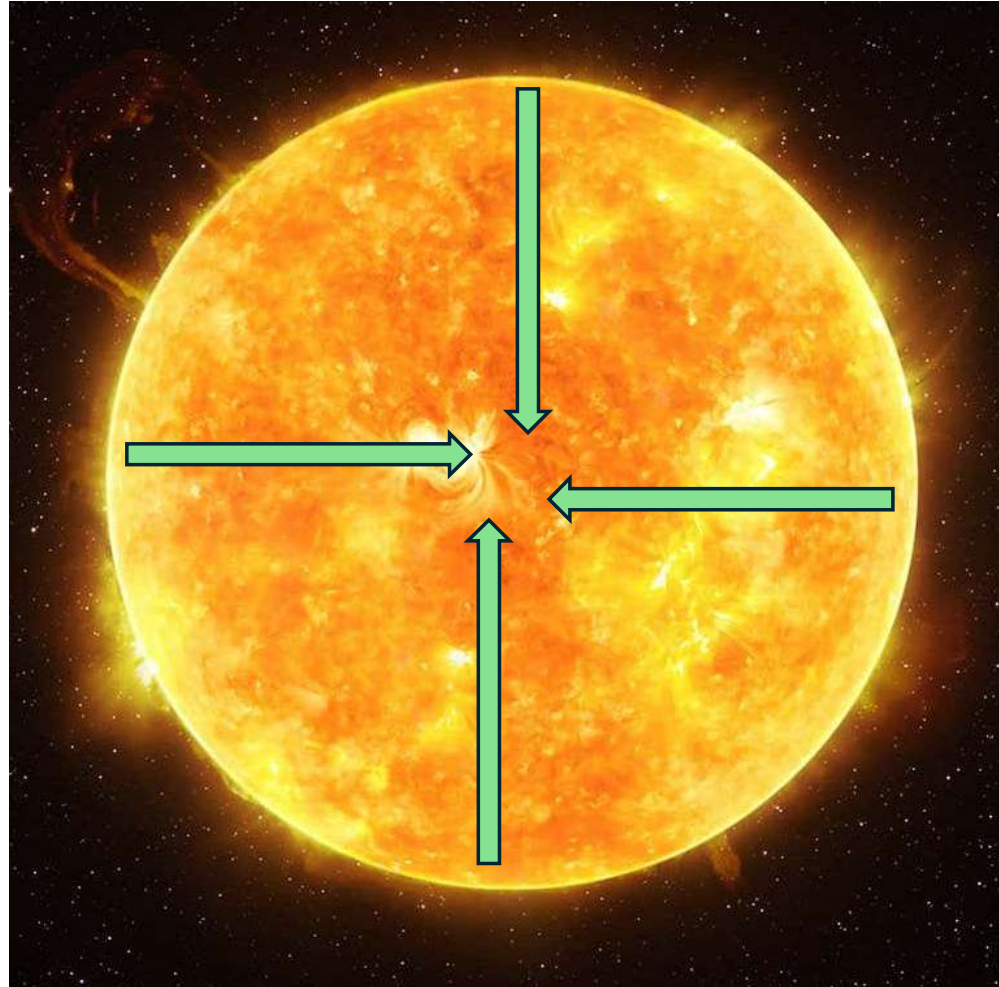
**Reacciones de
fusión**



Muerte estelar

**Atracción
gravitatoria**

La gravedad “vence”, y la
estrella colapsa



Tres posibilidades...

$$M < 10M_{\odot}$$



Enana blanca

Tres posibilidades...

$$M < 10M_{\odot}$$



Enana blanca

$$M = 10 \sim 25M_{\odot}$$



Estrella de neutrones

Tres posibilidades...

$$M < 10M_{\odot}$$



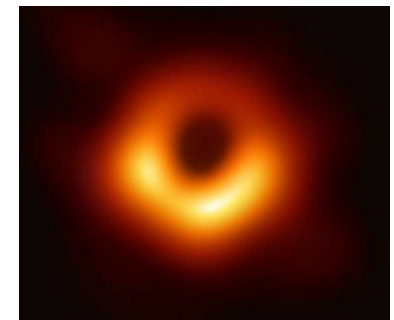
Enana blanca

$$M = 10 \sim 25M_{\odot}$$



Estrella de neutrones

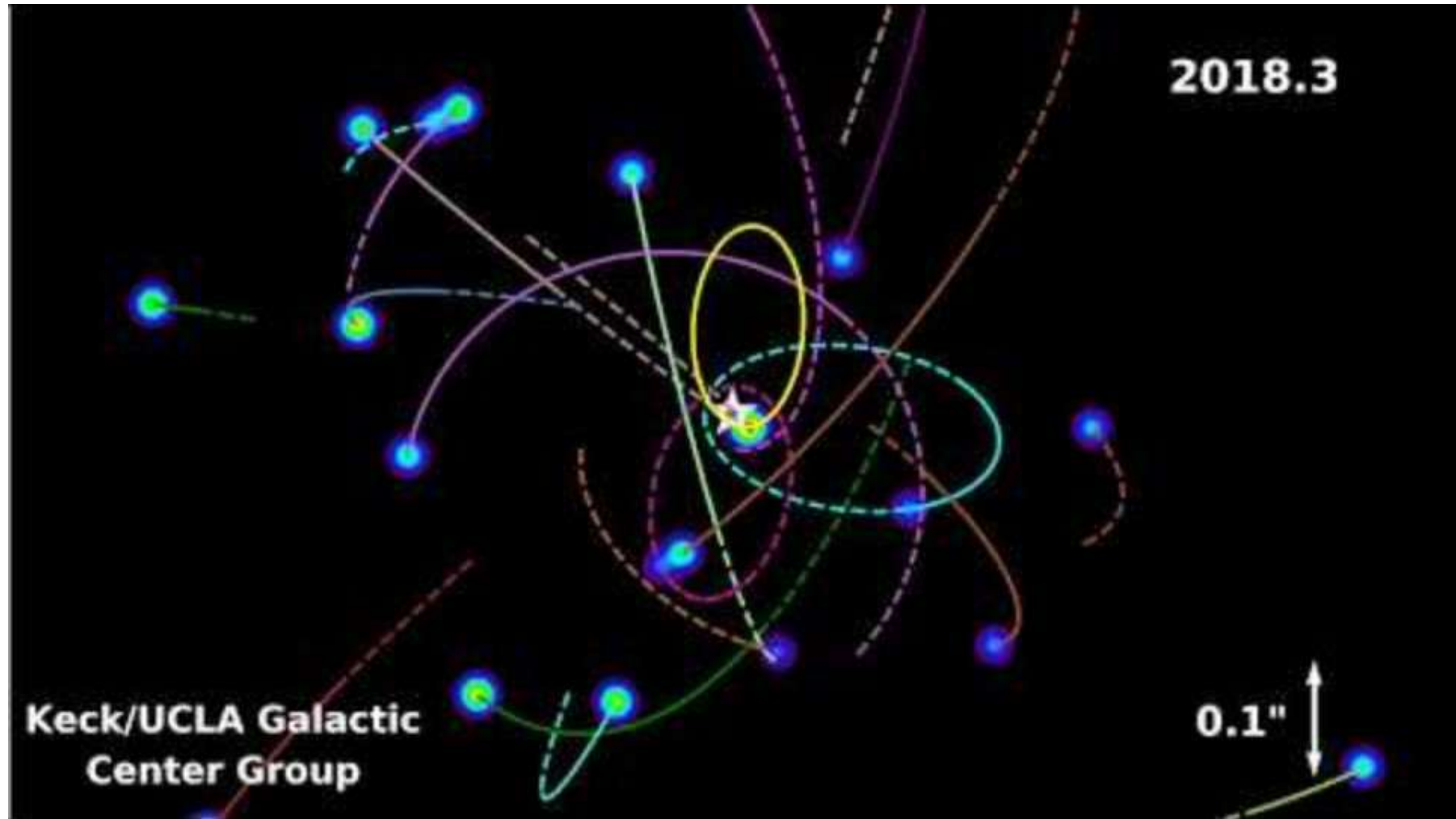
$$M > 25M_{\odot}$$



Muy bien, pero... existen realmente?

Muy bien, pero... existen realmente?

- Durante todo el siglo XX: evidencias **indirectas**
 - Centros galácticos
 - Sistemas binarios



YouTube: Animation of the Stellar Orbits around the Galactic Center (2019):

Muy bien, pero... Los hemos visto?

- Durante todo el siglo XX: evidencias **indirectas**
 - Centros galácticos
 - Sistemas binarios

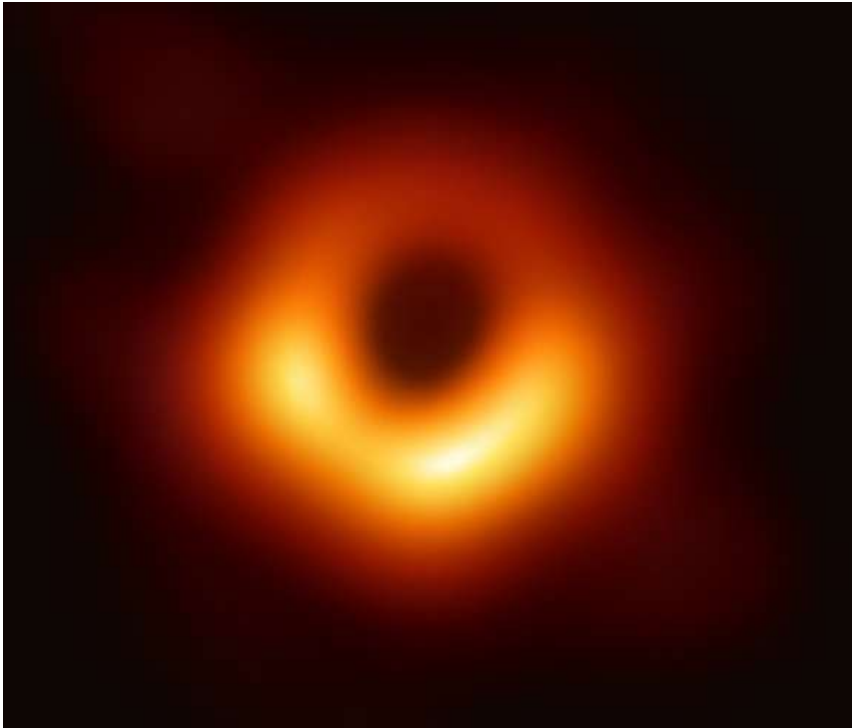


YouTube: Triple system harbors closest black hole to Earth

Muy bien, pero... Los hemos visto?

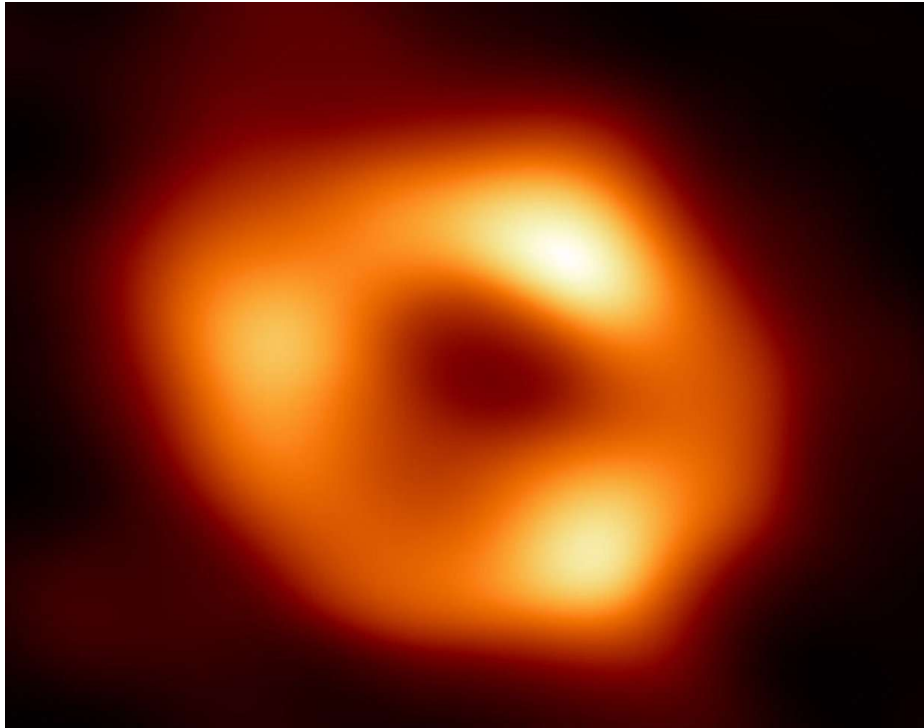
- Durante todo el siglo XX: evidencias **indirectas**
 - Centros galácticos
 - Sistemas binarios
- Siglo XXI: evidencias **directas**
 - Ondas gravitacionales (2015)
 - Primeras imágenes reales

2019. Primera imagen **real** de un agujero negro

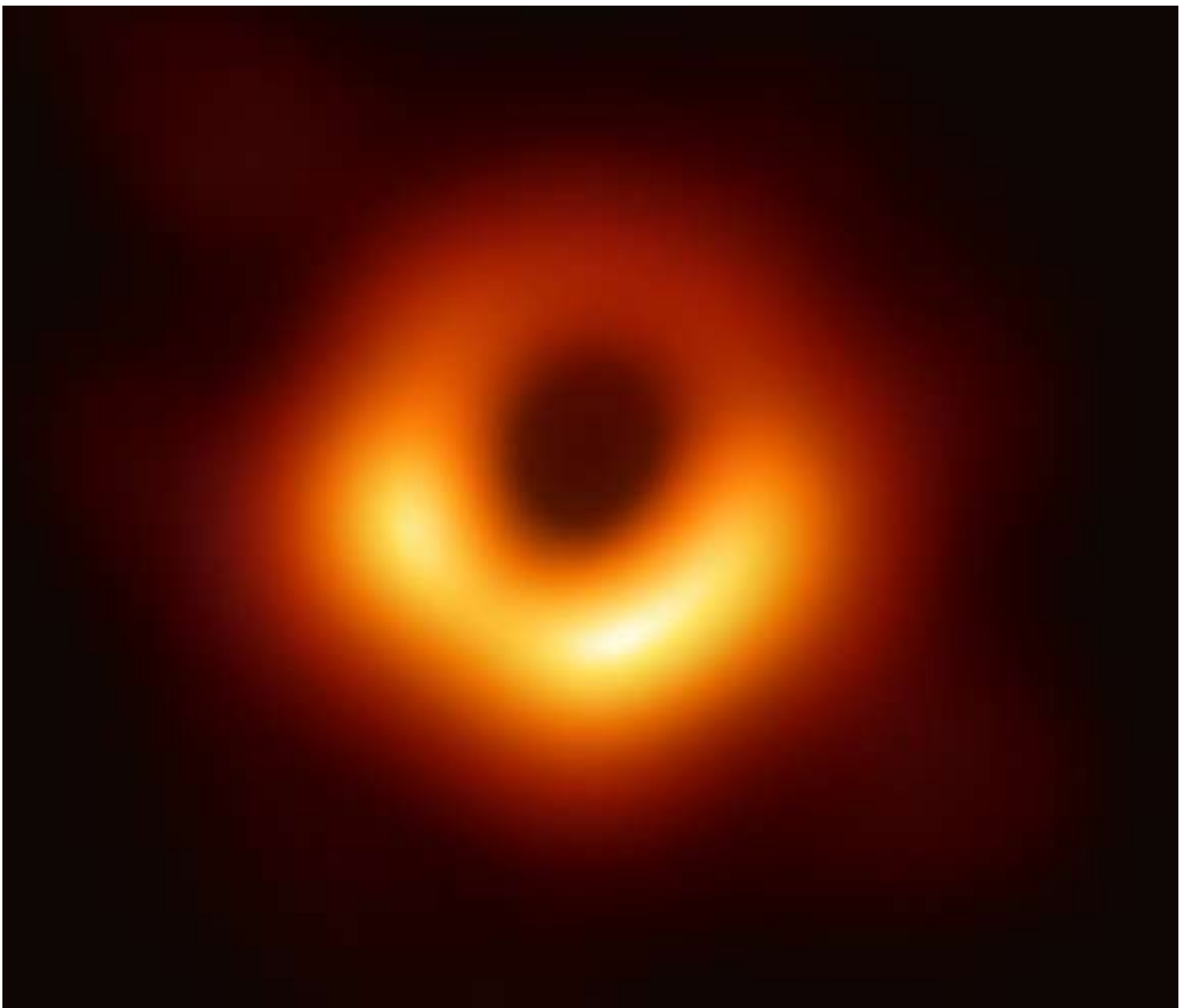


- Event Horizon Telescope
- 10 de abril de 2019.
- Galaxia M87 (53 millones de años luz).
- $M \sim 10^9 M_{\odot}$

2022. Segunda imagen **real** de un agujero negro



- Event Horizon Telescope
- 12 de mayo de 2022.
- Via Láctea (nuestra galaxia!).
26.000 años luz.
- $M \sim 4 \cdot 10^6 M_{\odot}$



Qué es lo siguiente?



Moitas grazas!