

RELATIVAMENTE
100 AÑOS

Guillermo A. Mena Marugán

**Instituto de Estructura
de la Materia**



**Semana de la Ciencia,
6 de noviembre de 2015**

Die Feldgleichungen der Gravitation.

VON A. EINSTEIN.

In zwei vor kurzem erschienenen Mitteilungen¹ habe ich gezeigt, wie man zu Feldgleichungen der Gravitation gelangen kann, die dem Postulat allgemeiner Relativität entsprechen, d. h. die in ihrer allgemeinen Fassung beliebigen Substitutionen der Raumzeitvariablen gegenüber kovariant sind.

Der Entwicklungsgang war dabei folgender. Zunächst fand ich Gleichungen, welche die NEWTONSCHE Theorie als Näherung enthalten und beliebigen Substitutionen von der Determinante 1 gegenüber kovariant waren. Hierauf fand ich, daß diesen Gleichungen allgemein kovariante entsprechen, falls der Skalar des Energietensors der „Materie“ verschwindet. Das Koordinatensystem war dann nach der einfachen Regel zu spezialisieren, daß $\sqrt{-g}$ zu 1 gemacht wird, wodurch die Gleichungen der Theorie eine eminente Vereinfachung erfahren. Dabei mußte aber, wie erwähnt, die Hypothese eingeführt werden, daß der Skalar des Energietensors der Materie verschwinde.

Neuerdings finde ich nun, daß man ohne Hypothese über den Energietensor der Materie auskommen kann, wenn man den Energietensor der Materie in etwas anderer Weise in die Feldgleichungen einsetzt, als dies in meinen beiden früheren Mitteilungen geschehen ist. Die Feldgleichungen für das Vakuum, auf welche ich die Erklärung der Perihelbewegung des Merkur gegründet habe, bleiben von dieser Modifikation unberührt. Ich gebe hier nochmals die ganze Betrachtung, damit der Leser nicht genötigt ist, die früheren Mitteilungen unausgesetzt heranzuziehen.

Aus der bekannten RIEMANNSCHEM Kovariante vierten Ranges leitet man folgende Kovariante zweiten Ranges ab:

$$G_{im} = R_{im} + S_{im} \quad (1)$$

$$R_{im} = -\sum_l \frac{\partial \{im\}}{\partial x_l} + \sum_{\rho} \{il\} \{m\rho\} \quad (1a)$$

$$S_{im} = \sum_l \frac{\partial \{il\}}{\partial x_m} - \sum_{\rho} \{im\} \{ \rho l \} \quad (1b)$$

¹ Sitzungsber. XLIV, S. 778 und XLVI, S. 799, 1915.

LEIPZIG, 1916.
VERLAG VON JOHANN AMBROSIVS

1916.

ANNALEN DER PHYSIK.

VIerte Folge. Band 49.

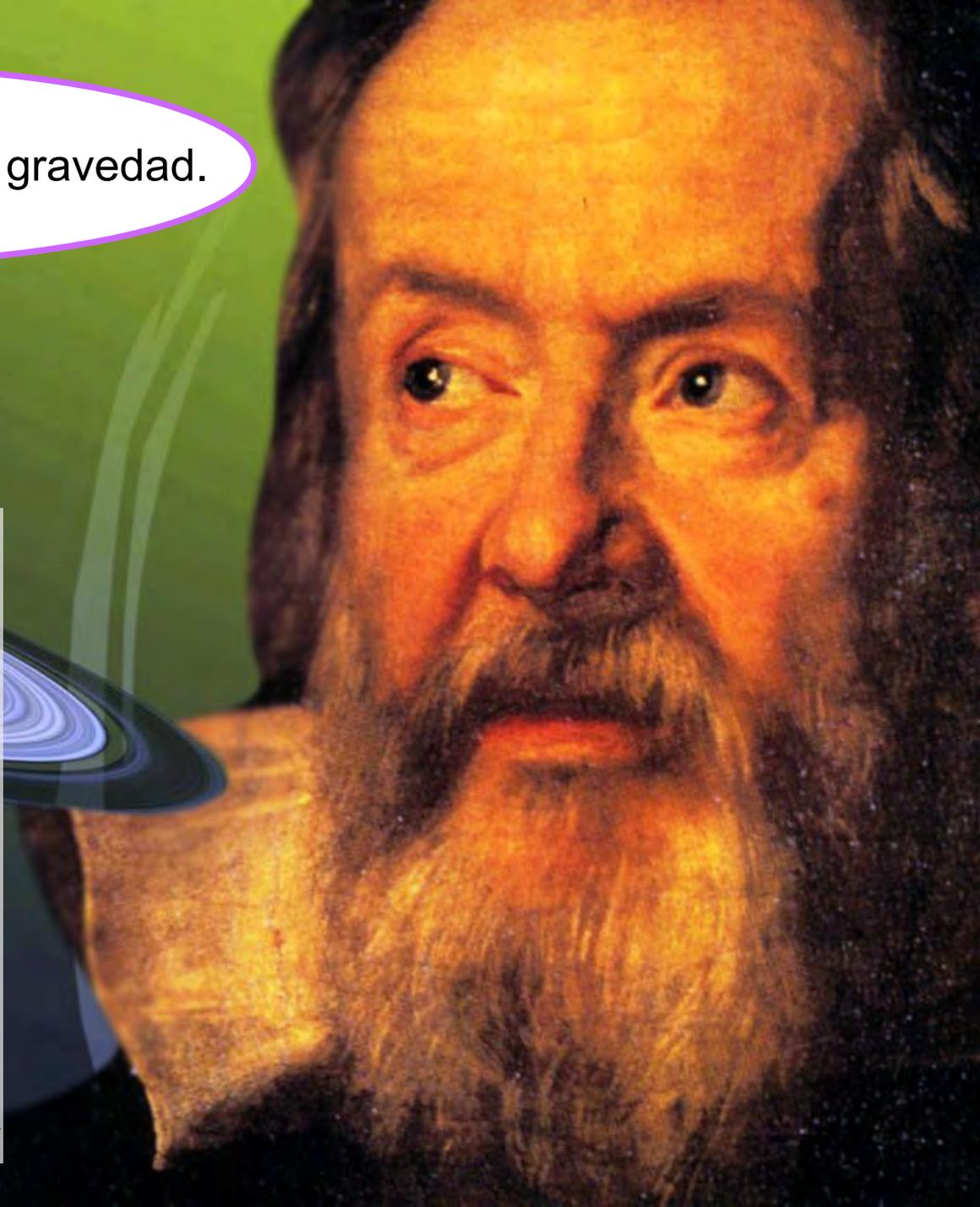
Nr. 7.

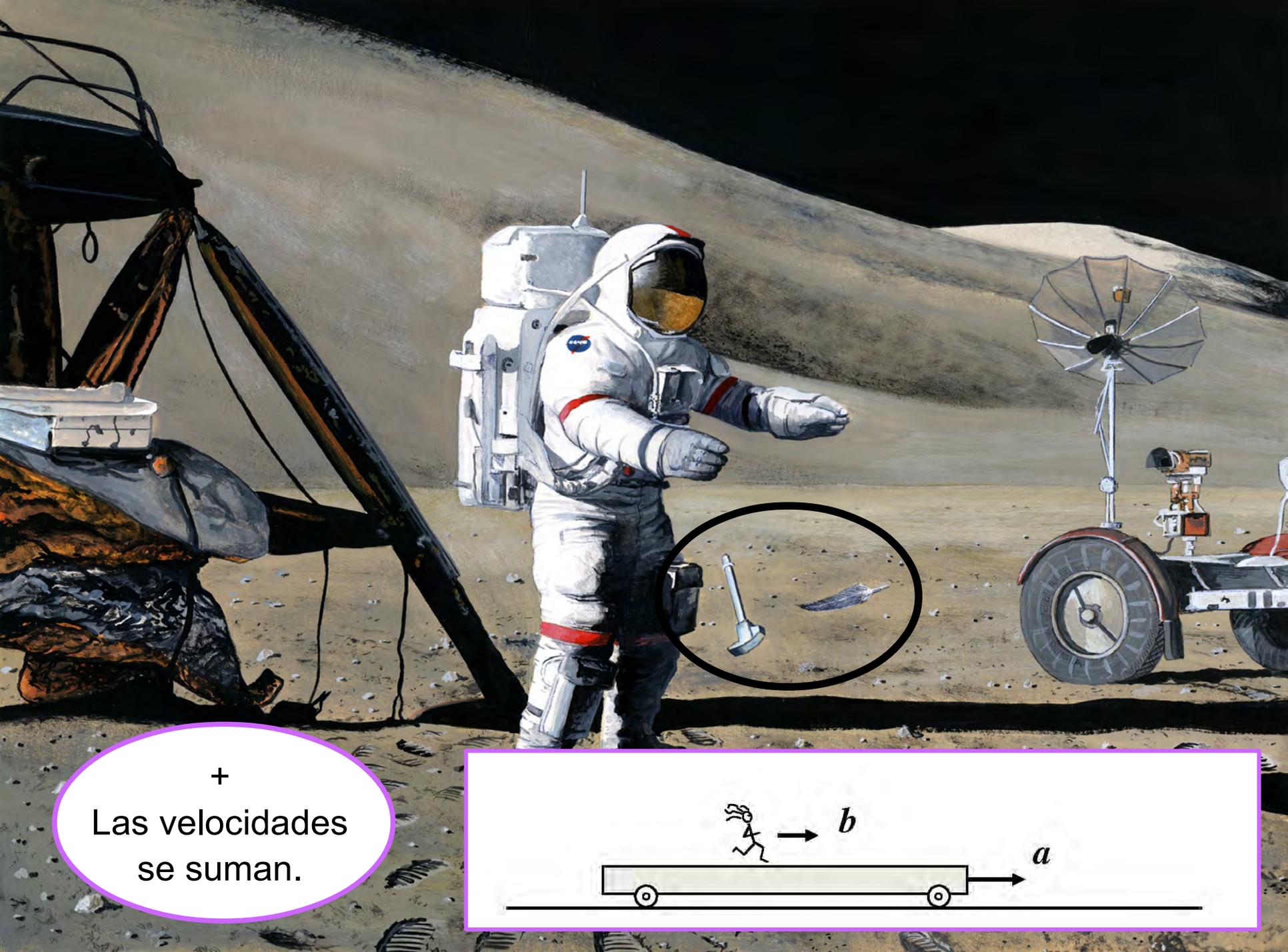
1. Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie; von A. Einstein.

Die im nachfolgenden dargelegte Theorie bildet die denkbar weitgehendste Verallgemeinerung der heute allgemein als „Relativitätstheorie“ bezeichneten Theorie; die letztere nenne ich im folgenden zur Unterscheidung von der ersteren „spezielle Relativitätstheorie“ und setze sie als bekannt voraus. Die Verallgemeinerung der Relativitätstheorie wurde sehr erleichtert durch die Gestalt, welche der speziellen Relativitätstheorie durch Minkowski gegeben wurde, welcher Mathematiker zuerst die formale Gleichwertigkeit der räumlichen Koordinaten und der Zeitkoordinate klar erkannte und für den Aufbau der Theorie nutzbar machte. Die für die allgemeine Relativitätstheorie nötigen mathematischen Hilfsmittel sind fertig bereit in dem „absoluten Differentialkalkül“, das auf den Forschungen von Gauss, Riemann und Ricci und Levi-Civita in ein System gebracht und auf Probleme der theoretischen Physik angewendet ist. Ich habe im Abschnitt B der vorliegenden Abhandlung alle für uns nötigen, bei dem Physiker nicht als bekannt vorausgesetzten mathematischen Hilfsmittel in möglichst klarer und durchsichtiger Weise entwickelt, so daß ein Verständnis der mathematischen Literatur für das Verständnis der vorliegenden Abhandlung nicht erforderlich ist. Endlich sei an dieser Stelle dankbar meines Freundes, des Mathematikers Hermann Weyl, gedacht, der mir durch seine Hilfe nicht nur

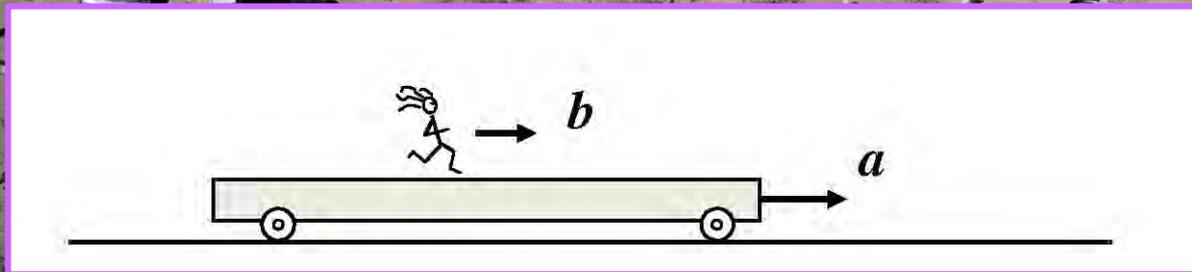
Anniversario de la Relatividad General de Einstein... relativamente.

Galileo: equivalencia ante la gravedad.

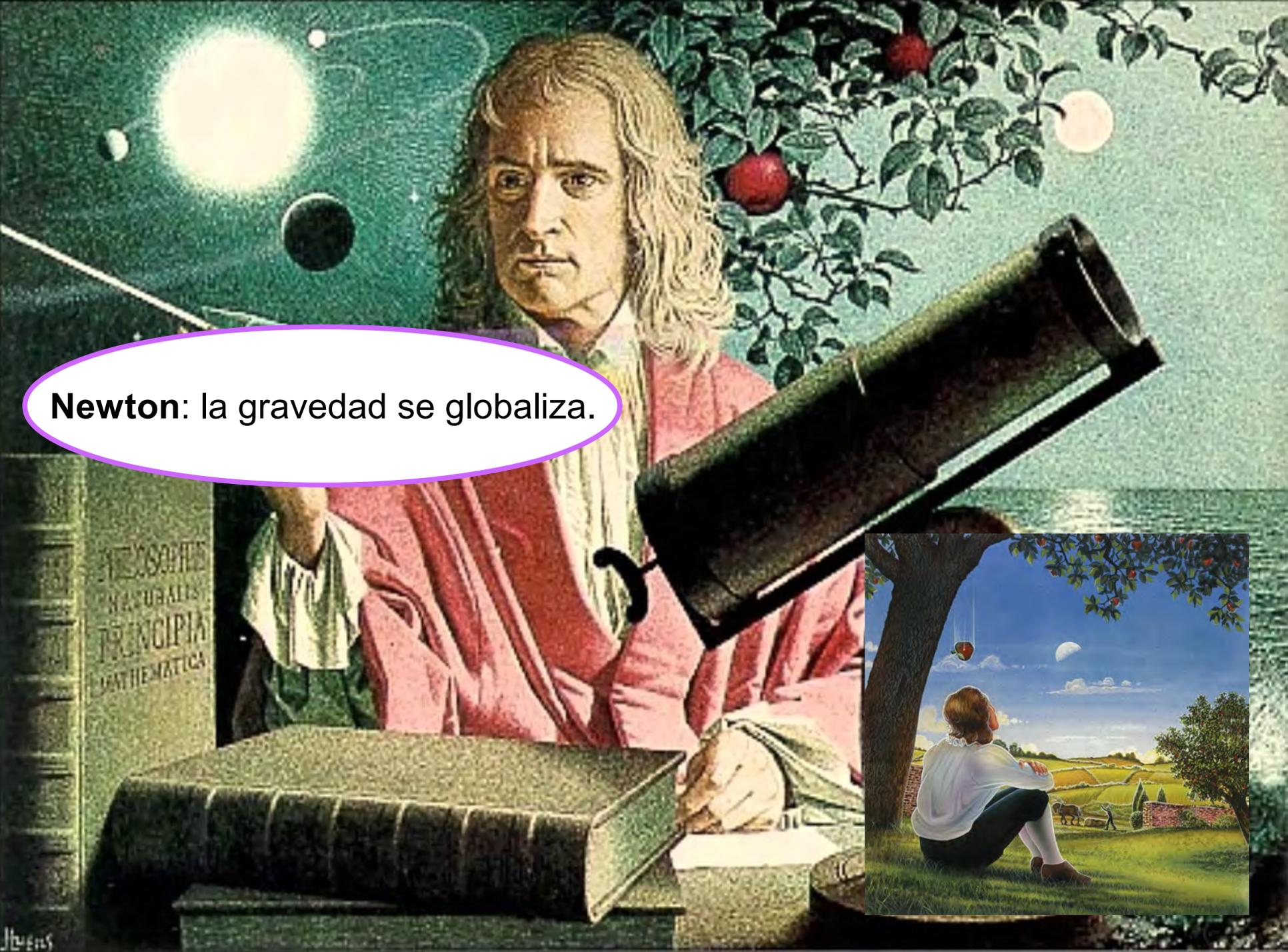


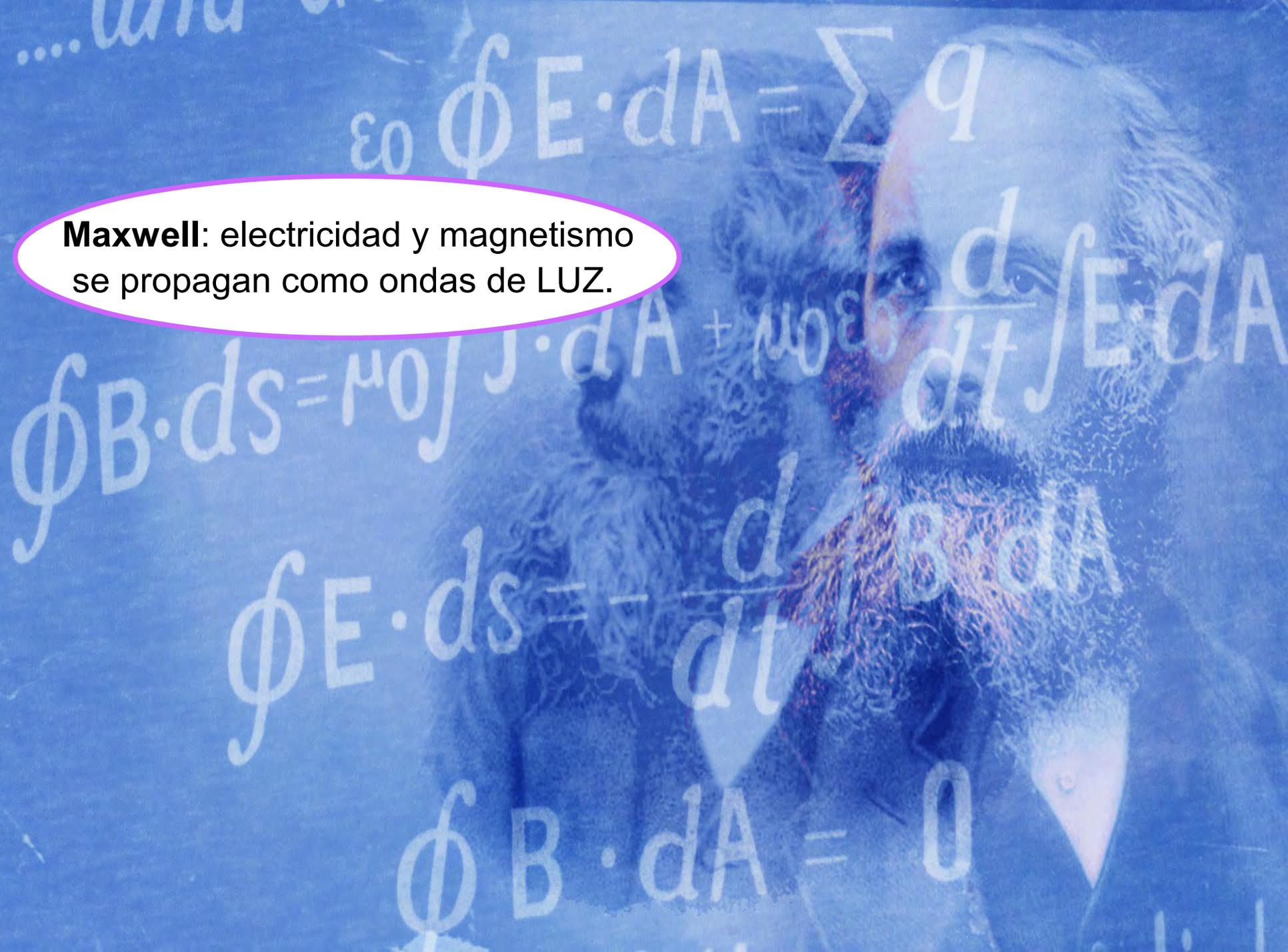


+
Las velocidades
se suman.



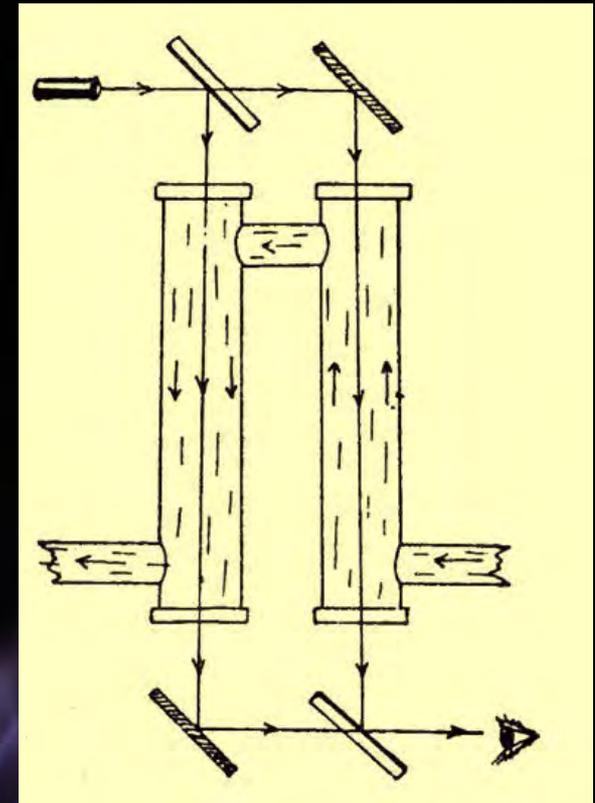
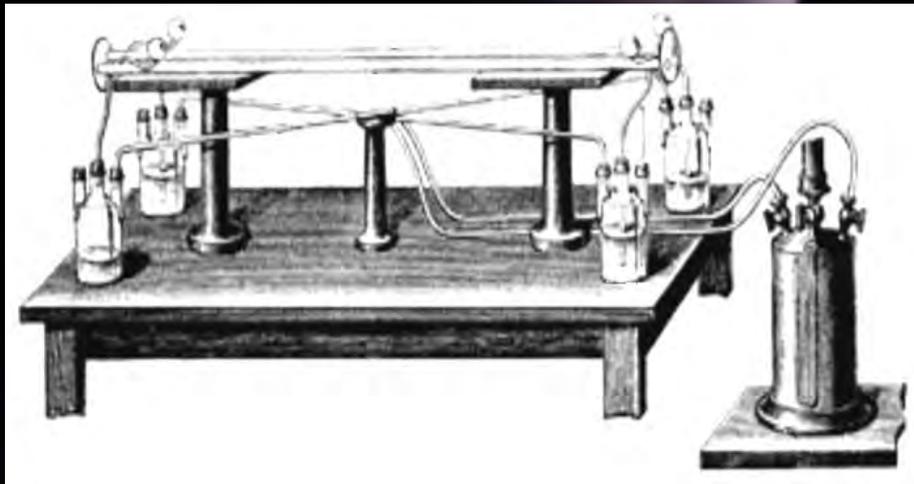
Newton: la gravedad se globaliza.



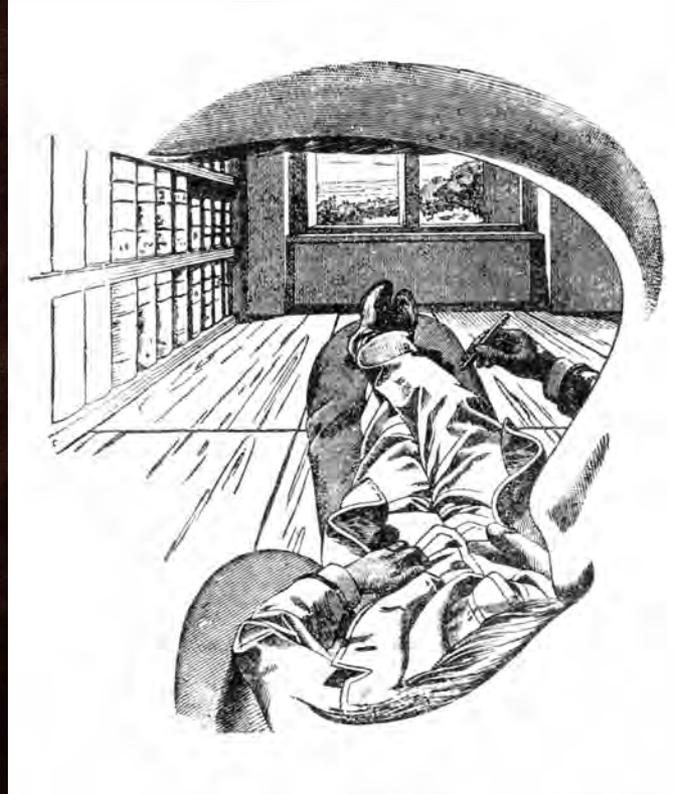
A portrait of James Clerk Maxwell, a man with a full white beard and hair, wearing a dark suit and tie. The background is a deep blue with various mathematical formulas from electromagnetism overlaid in a lighter blue, semi-transparent font. The formulas include Gauss's law for electricity, Gauss's law for magnetism, and Faraday's law of induction. A white oval with a purple border highlights a specific text block.

Maxwell: electricidad y magnetismo se propagan como ondas de LUZ.

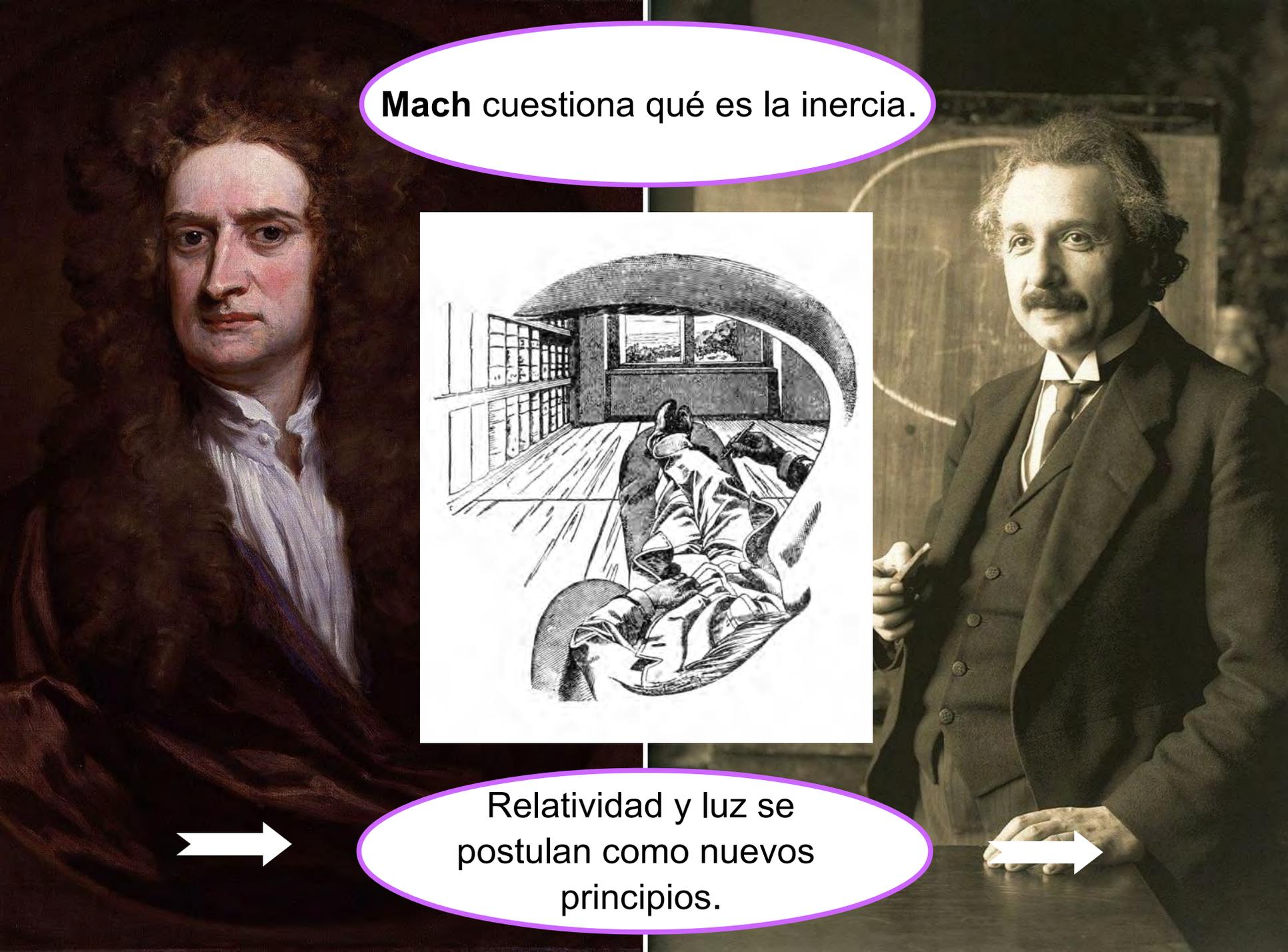
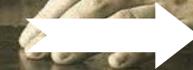
Fizeau y la velocidad de la luz en fluidos en movimiento.



Mach cuestiona qué es la inercia.



Relatividad y luz se postulan como nuevos principios.



EINSTEIN introduce la
Relatividad Especial (1905).

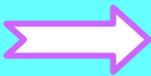
- *Las descripciones físicas relativas a cualquier observador sin aceleración son equivalentes.*
- *Todos observan la misma velocidad para la **luz** en vacío.*

$$u = c$$

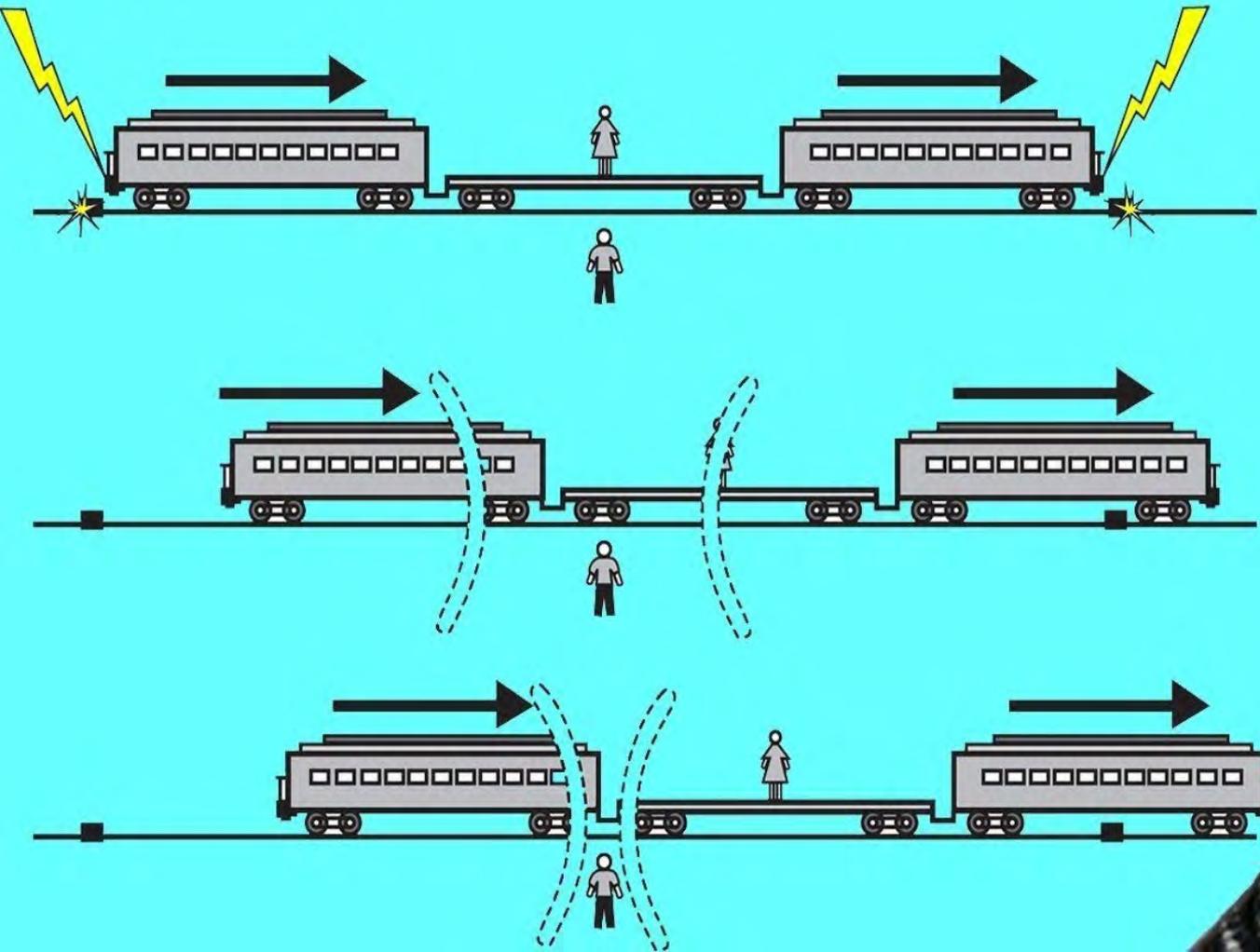
$$u' = c$$



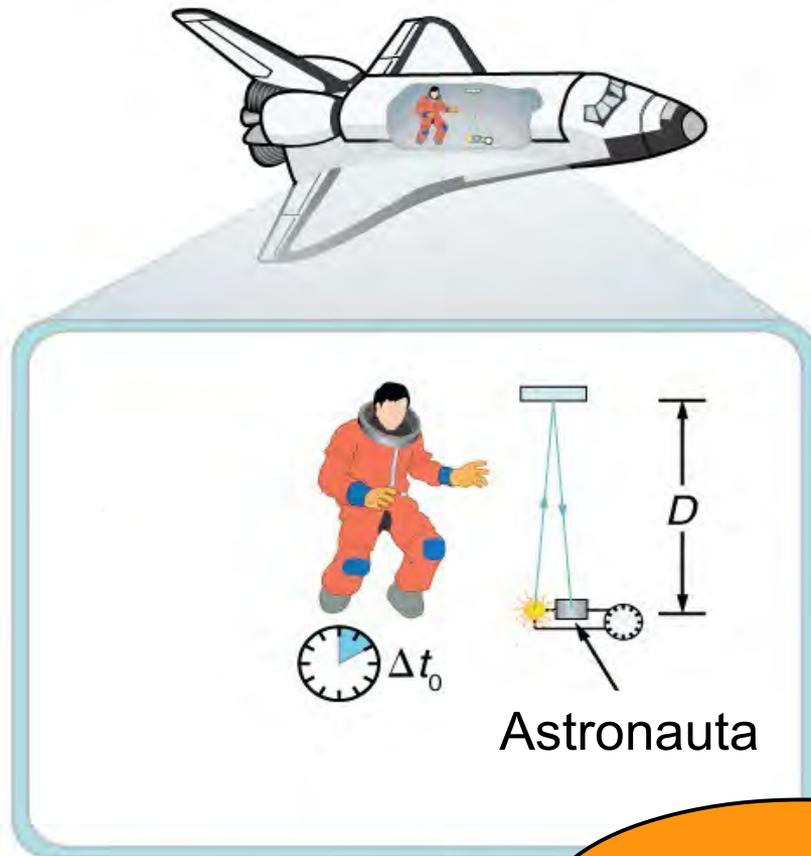
Las **CONSECUENCIAS**
son sorprendentes



La SIMULTANEIDAD
depende del observador.

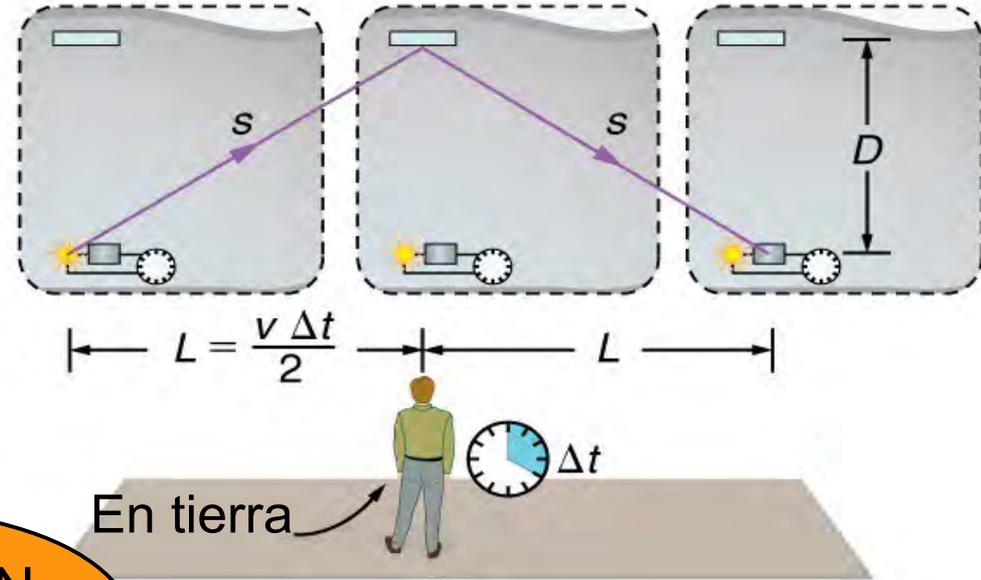


El TIEMPO transcurrido depende del observador



Astronauta

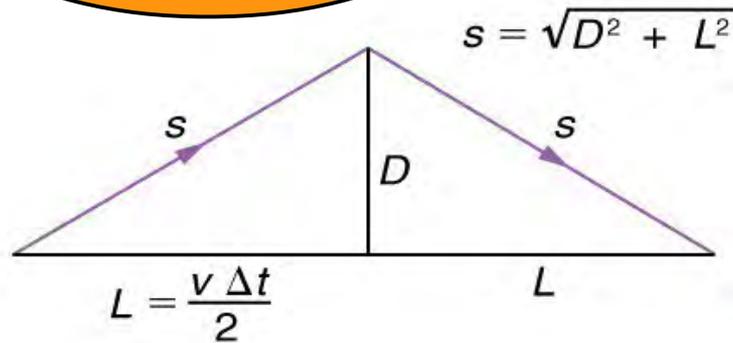
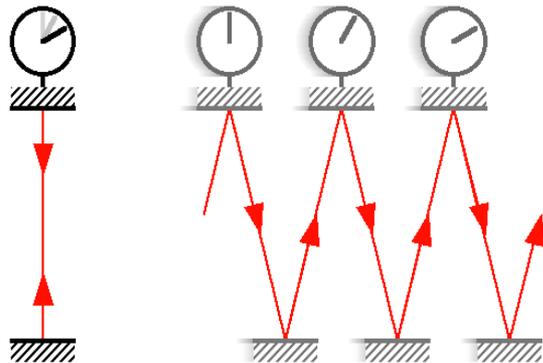
(a)



En tierra

(b)

DILATACIÓN DEL TIEMPO

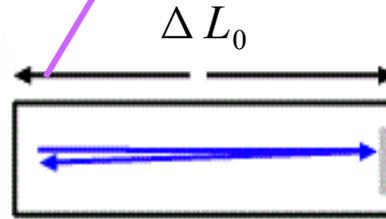


$$\Delta t = \frac{\Delta t_0 c}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

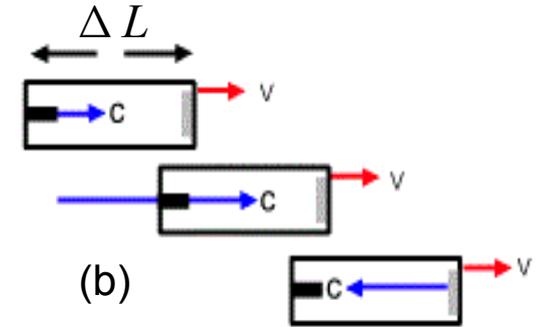
Las LONGITUDES dependen del observador



Astronauta



(a)



(b)



En tierra

**CONTRACCIÓN
(de Lorentz)**

(a)

$$\Delta t_0 = \frac{2 \Delta L_0}{c},$$

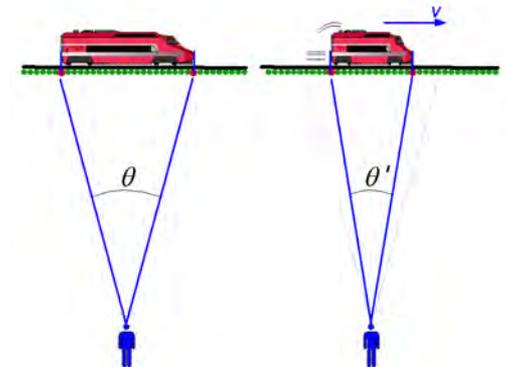
$$\Delta t = \frac{\Delta L}{c+v} + \frac{\Delta L}{c-v} = \frac{2 \Delta L c}{c^2 - v^2},$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0 c}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

(Dilatación)

$$\Delta L = \Delta L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

(b)



Analizando el balance de energía en procesos de creación de fotones, Einstein deduce también su famosa fórmula (en tres páginas).

$$E = mc^2$$

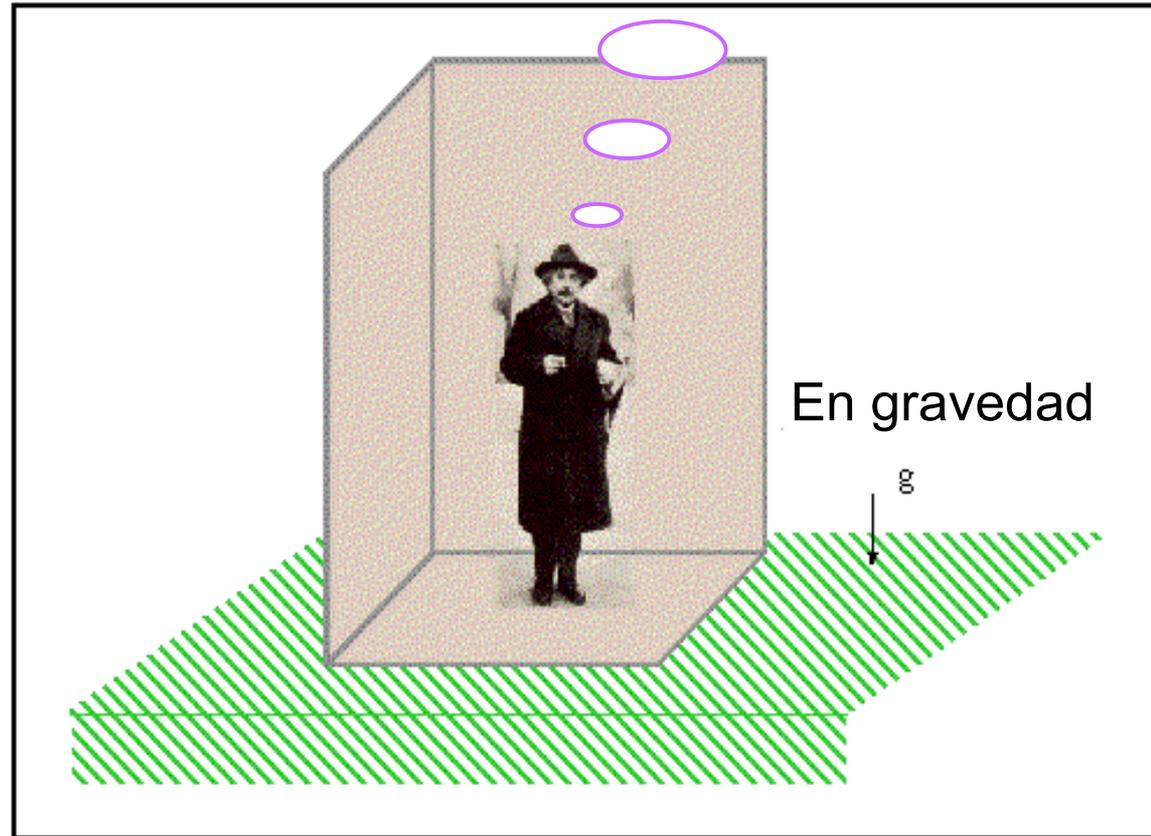
Si la masa dota de inercia, la energía también.

EINSTEIN discurre sobre el Principio de Equivalencia (1907).



¿Por qué habría de ser especial la Relatividad?

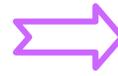
En una “caja” acelerada



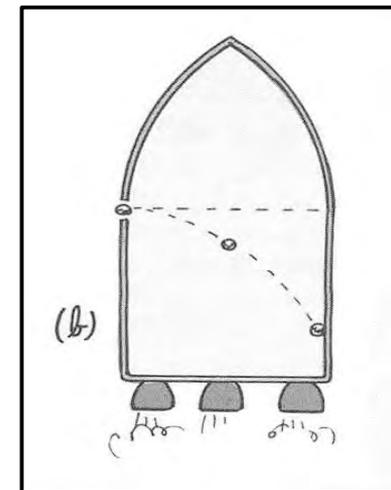
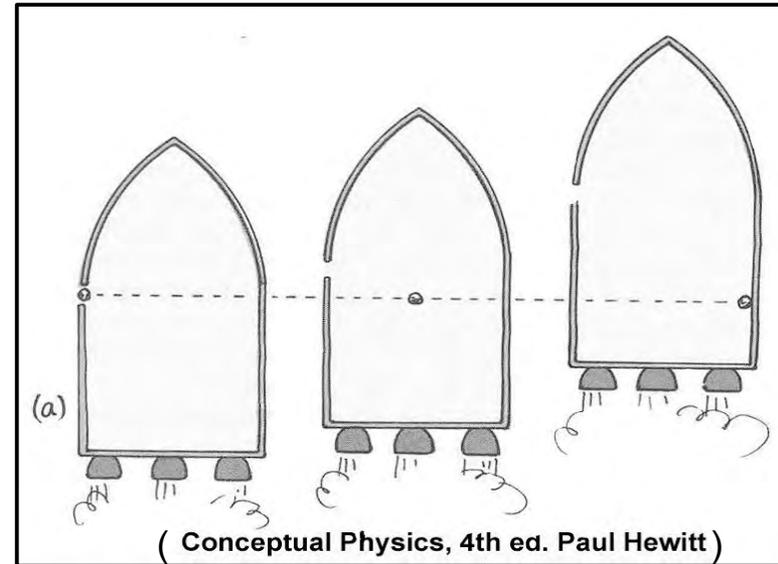
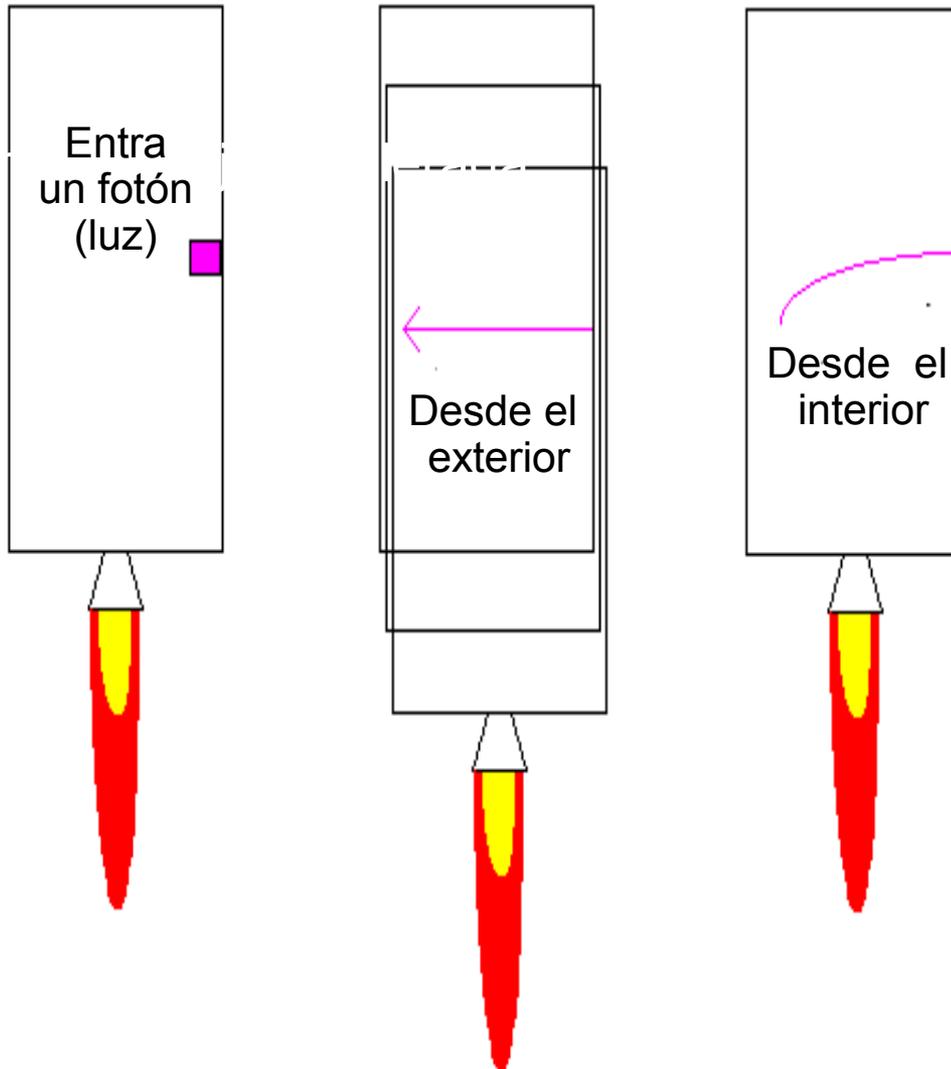
En gravedad

“ Lo que necesesito sabes es qué ocurre exactamente en un ascensor cuando cae al vacío”. (A Marie Curie)

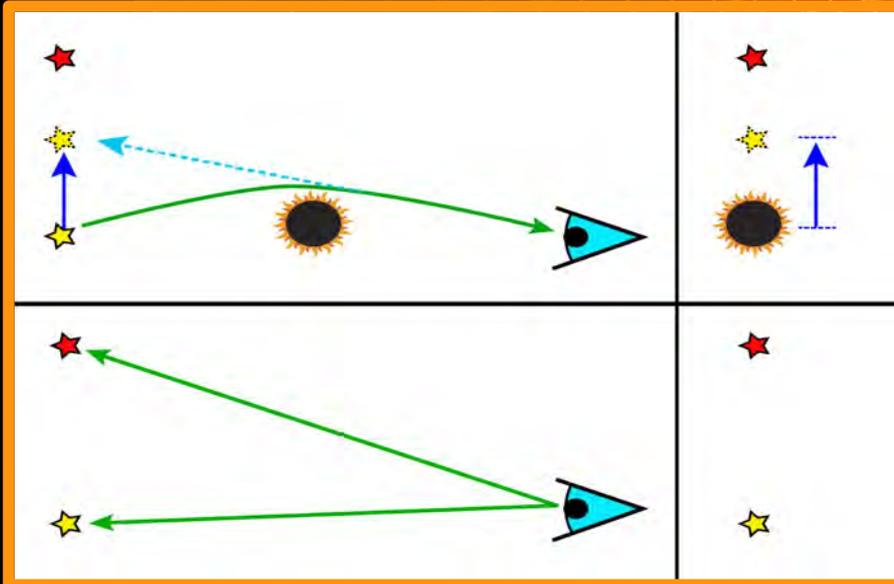
Entonces, igual que una piedra,
la luz pesa y se curva



**Su velocidad deja
de ser constante**



La gravedad desvía los rayos de luz

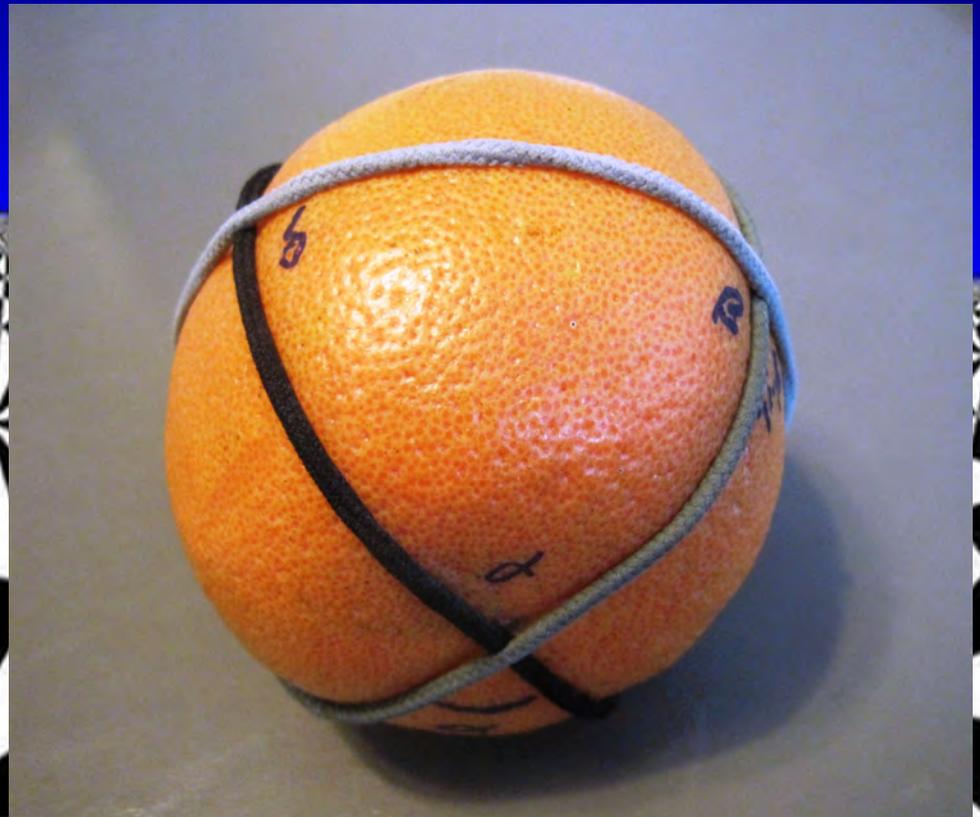
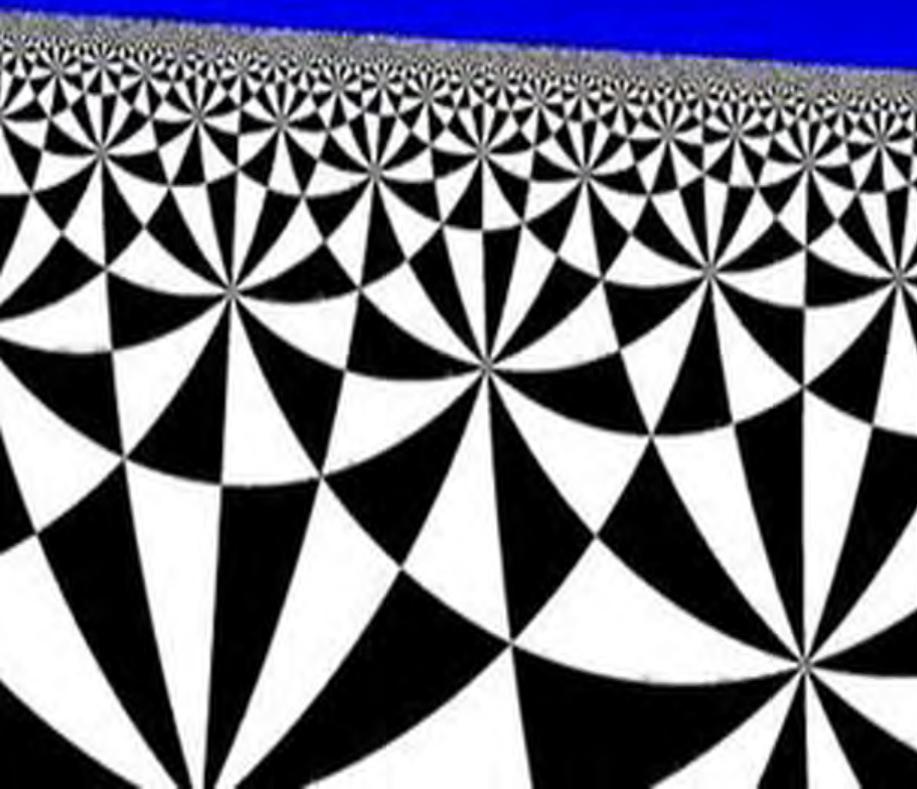


Einstein y el problema del tiovivo: el espacio-tiempo puede tener **GEOMETRÍA CURVA**.

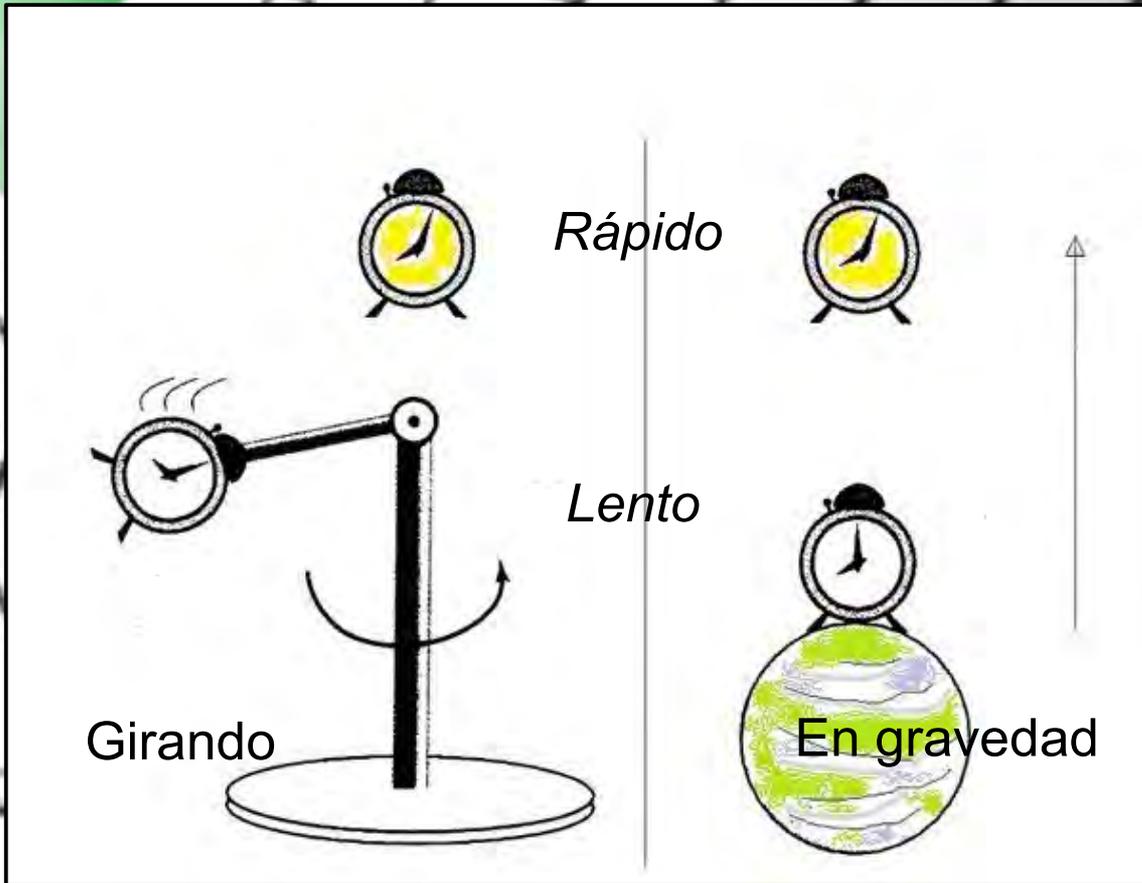


Si el observador que gira mide un ángulo de 360 grados, el del centro mide menos. Para él, el tiovivo no es un círculo plano.

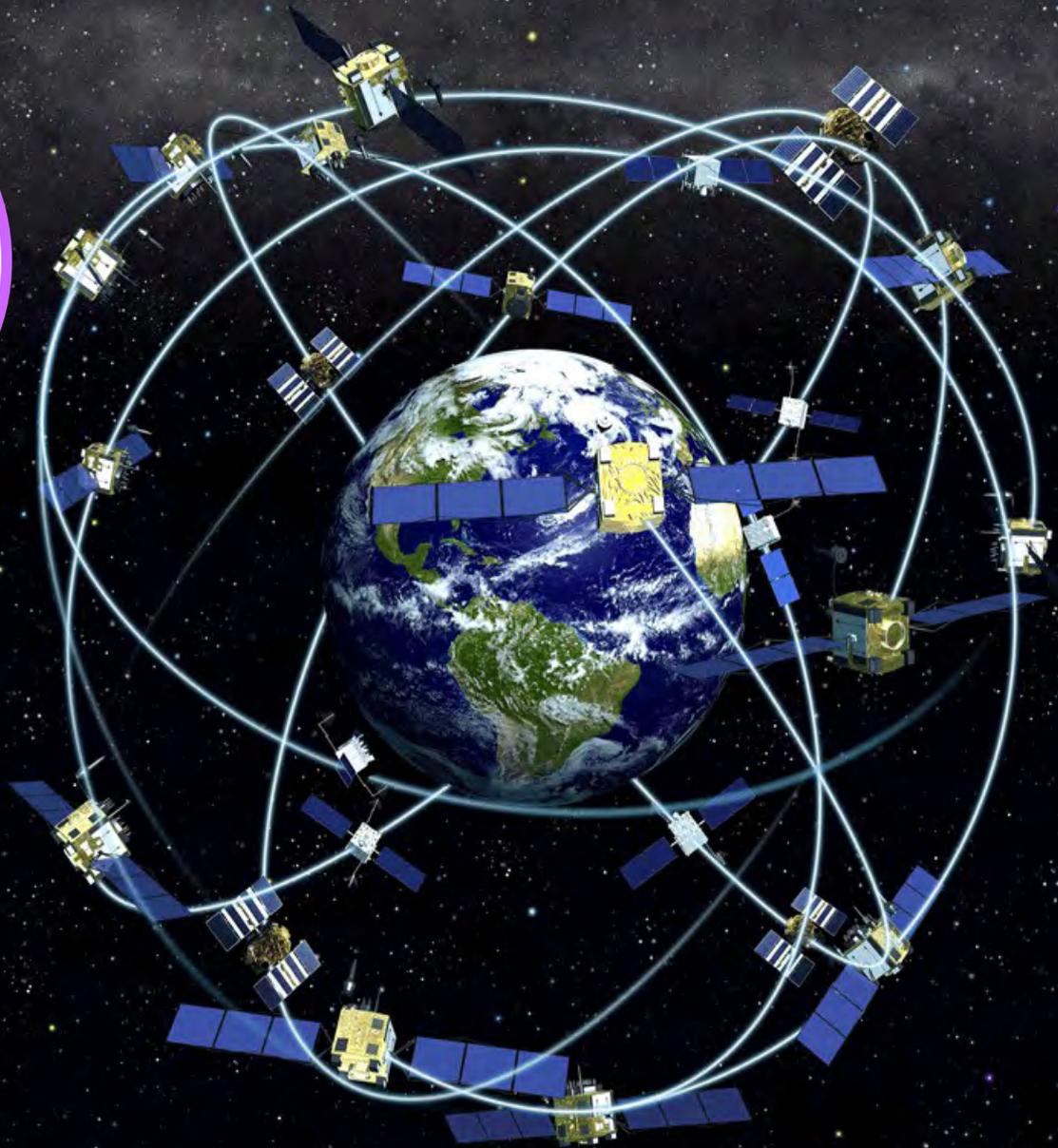
La **GEOMETRÍA** deja de ser absoluta, y puede no ser plana.



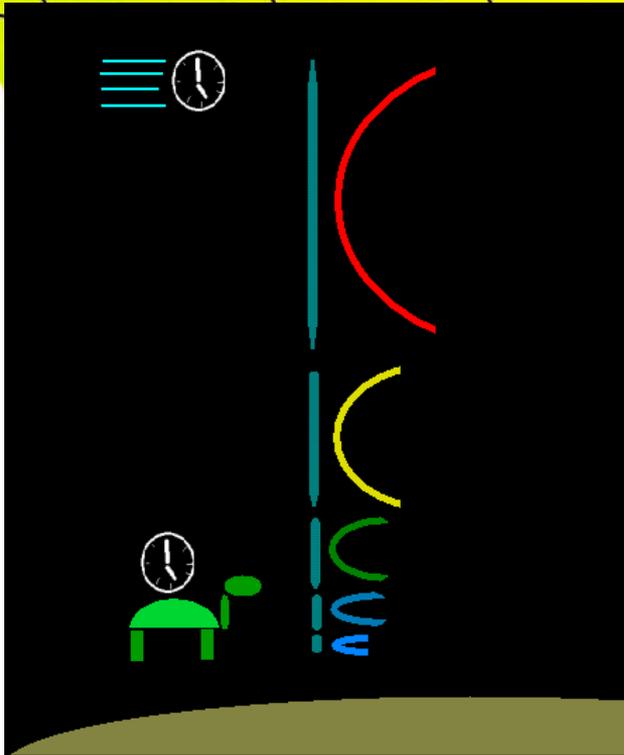
Si al girar el tiovivo se dilata el tiempo, la aceleración de la gravedad afecta los relojes.



Sin tener en cuenta
este efecto,
no funcionaría
el sistema GPS.



Al ir los relojes más lentos,
varía la frecuencia de la luz:
Corrimiento al rojo.



¿Qué falta para generalizar la Relatividad?
Einstein se percató de cómo **medir** con cualquier tipo de coordenadas (*tensor MÉTRICO*).

En geometría plana, la distancia la da el **Teorema de Pitágoras**.
En Relatividad Espacial, los intervalos incluyen el tiempo:

$$\sum_{i=1}^3 (\Delta x^i)^2 - c^2 \Delta t^2.$$

En coordenadas generales, el intervalo infinitesimal lo da una **métrica**:

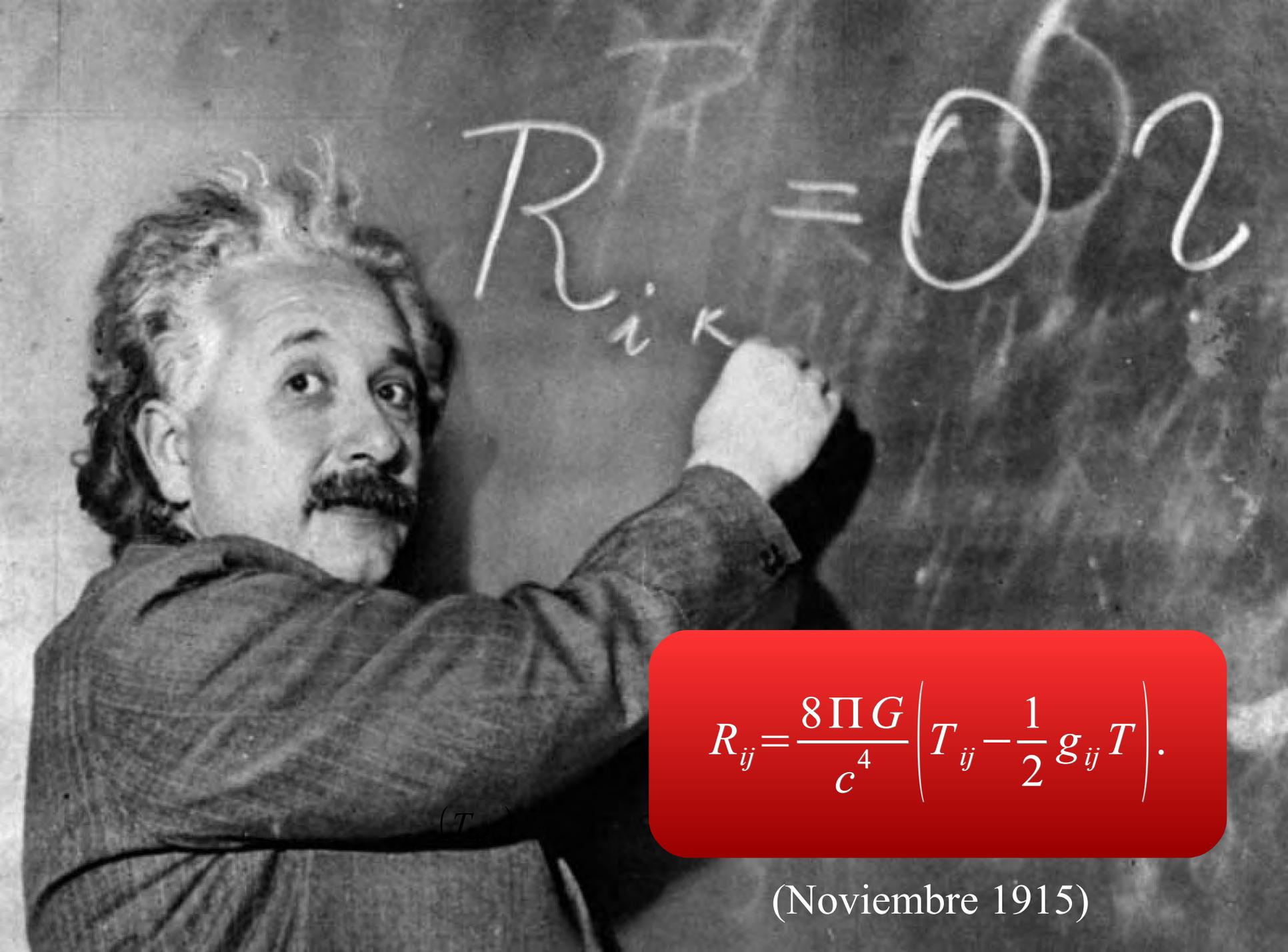
$$\sum_{i,j=1}^4 g_{ij}(x) dx^i dx^j.$$

Con la métrica se construye la conexión entre los sistemas locales y se calcula su **curvatura** (R_{ij}).



La fuente de esa curvatura ha de ser la materia: su **energía y momento** (T_{ij}).

Tras **VARIOS** intentos, Einsten deduce así las ecuaciones de la **Relatividad General**.



$$R_{ik} = 0$$

$$R_{ij} = \frac{8\pi G}{c^4} \left(T_{ij} - \frac{1}{2} g_{ij} T \right).$$

(Noviembre 1915)

Son ecuaciones de campo métricas de segundo orden en un espacio-tiempo de cuatro dimensiones y con una noción de conservación de energía-momento.

Pero esa noción no es la habitual.

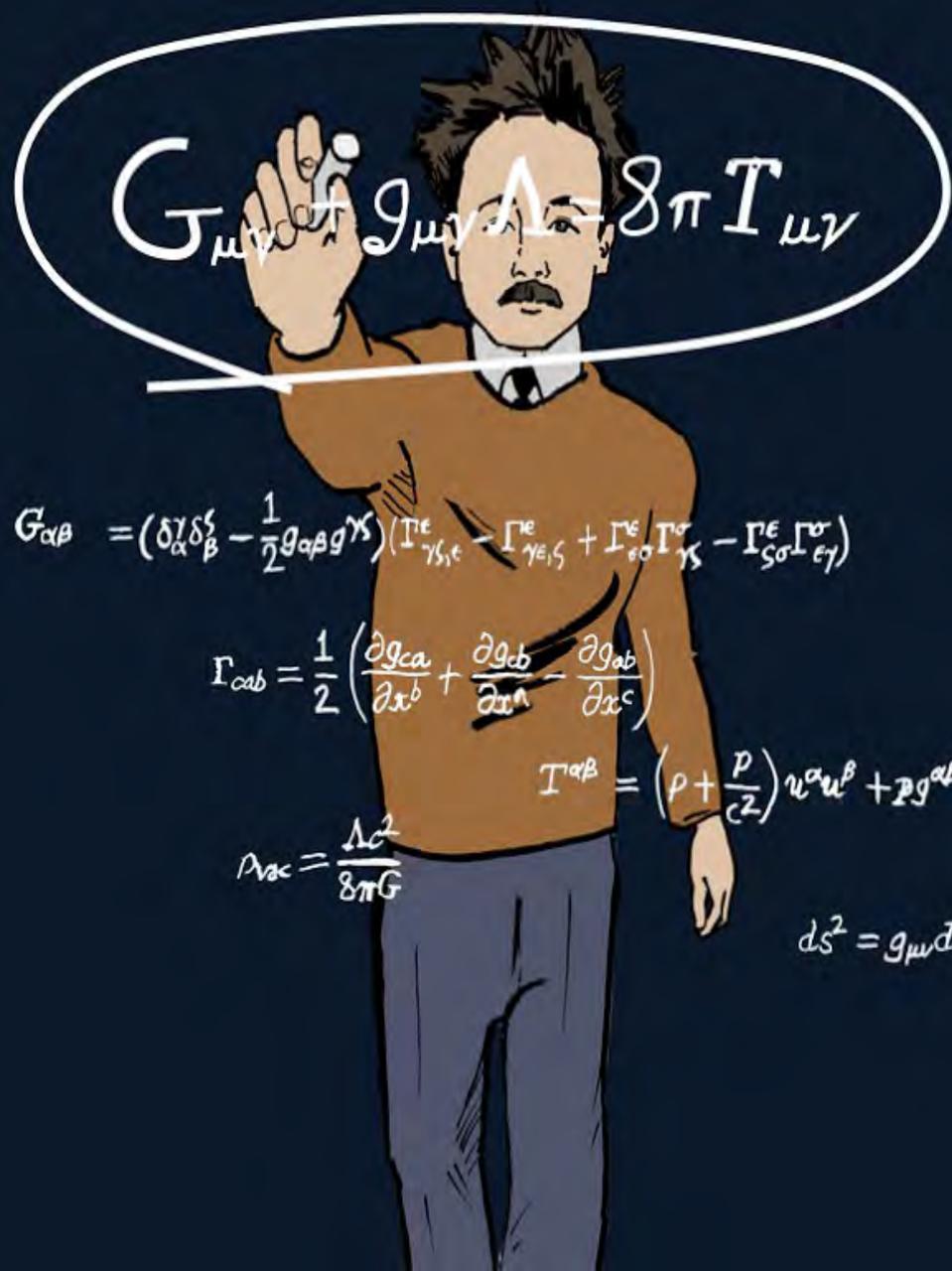




La materia curva el continuo del espacio-tiempo, y este constituye el marco en el que se desenvuelve la materia.

Es universal.

Por supuesto, decir que la gravedad es la deformación del espacio-tiempo es mucho más fácil que convertir esa inspiración en una teoría cuantitativa.



$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

$$G_{\alpha\beta} = \left(\delta_{\alpha}^{\gamma} \delta_{\beta}^{\delta} - \frac{1}{2} g_{\alpha\beta} g^{\gamma\delta} \right) \left(\Gamma_{\gamma\delta,\epsilon}^{\epsilon} - \Gamma_{\gamma\epsilon,\delta}^{\epsilon} + \Gamma_{\epsilon\sigma}^{\epsilon} \Gamma_{\gamma\delta}^{\sigma} - \Gamma_{\sigma\delta}^{\epsilon} \Gamma_{\epsilon\gamma}^{\sigma} \right)$$

$$\Gamma_{cab} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial g_{ca}}{\partial x^b} + \frac{\partial g_{cb}}{\partial x^a} - \frac{\partial g_{ab}}{\partial x^c} \right)$$

$$T^{\alpha\beta} = \left(\rho + \frac{p}{c^2} \right) u^{\alpha} u^{\beta} + p g^{\alpha\beta}$$

$$\rho_{vac} = \frac{\Lambda c^2}{8\pi G}$$

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^{\mu} dx^{\nu}$$

EN LA HISTORIA HAY...

PREGUNTAS QUE LAMENTABLEMENTE
NUNCA SE HICIERON...

...Y RESPUESTAS
CLARÍSIMAS QUE
NO SE LOGRARON

PROFESOR EINSTEIN:
¿NOS PODRÍA EXPLICAR EN POCAS
PALABRAS SU TEORÍA DE
LA RELATIVIDAD?

¿EN POCAS PALABRAS?
PUES... **TOPALLA** = DEPENDE LO CUALO

POR FIN;
¿LO ENTIENDO?



©

“Cuando un escarabajo ciego se arrastra por la superficie de una rama curva, no se da cuenta de que el trayecto que ha recorrido es en realidad curvo. Tuve la suerte de percibir lo que el escarabajo no podía hacer.”



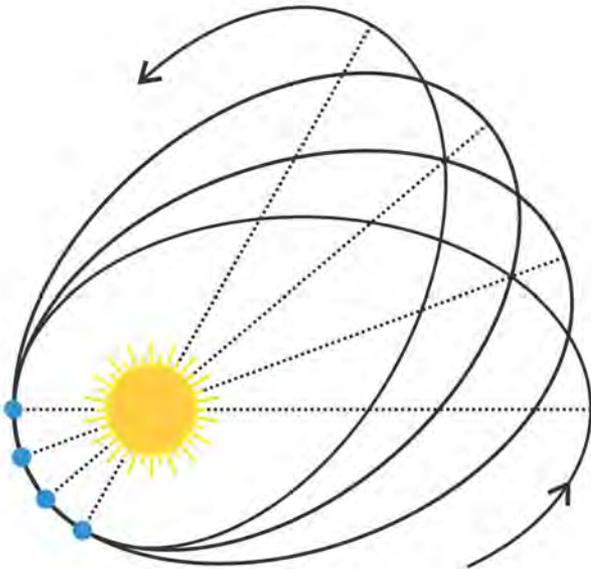
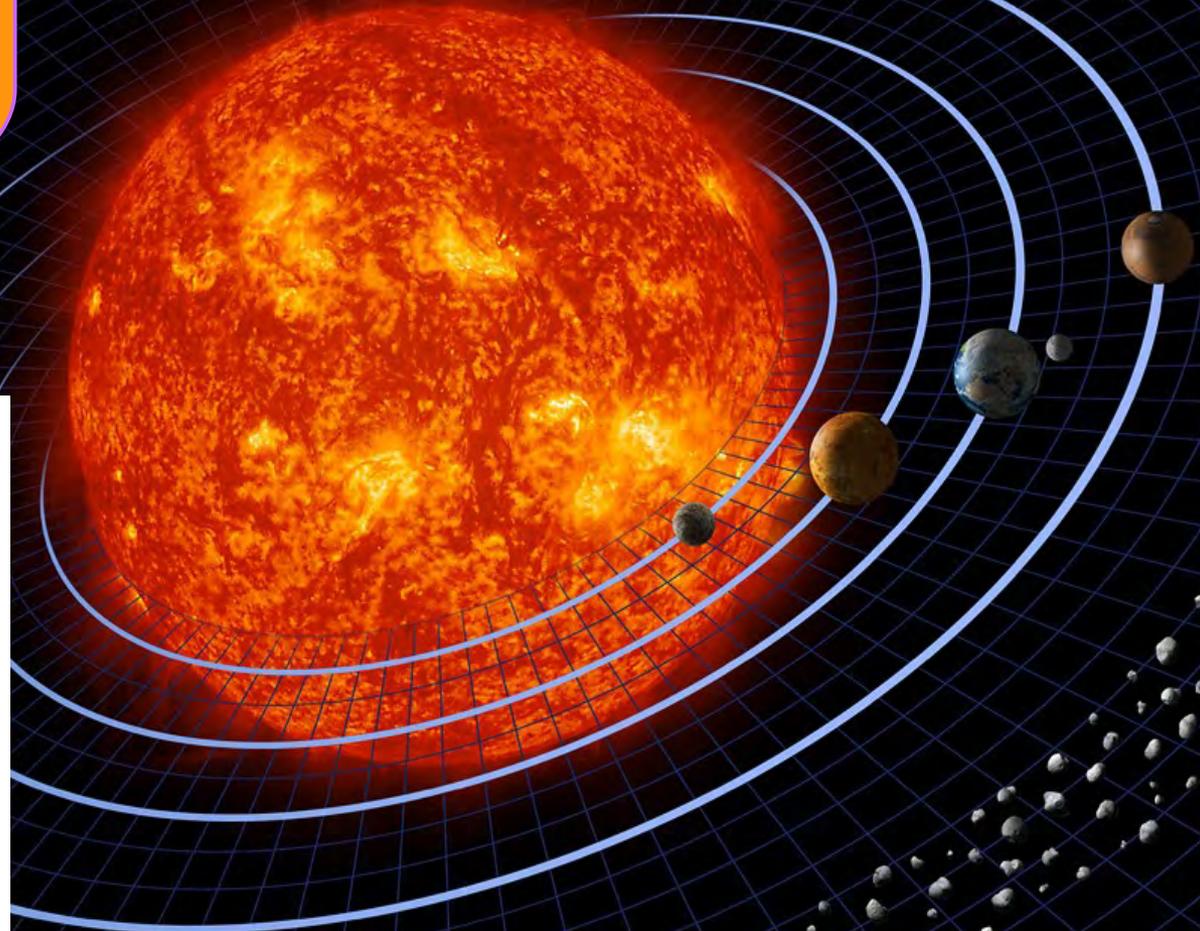


LAS MATEMÁTICAS SON CIENCIAS EXACTAS, Y LAS CUENTAS, CIENCIA-FICCIÓN

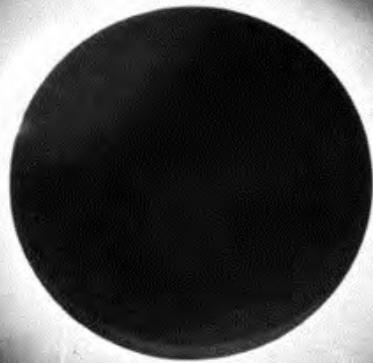
$$E=MC^2$$

Einstein calculó cómo
giraba el perihelio
de Mercurio:
¡justo lo observado!
(43''/siglo)

Einstein usa ya la
solución de Schwarzschild:
AGUJEROS NEGROS.

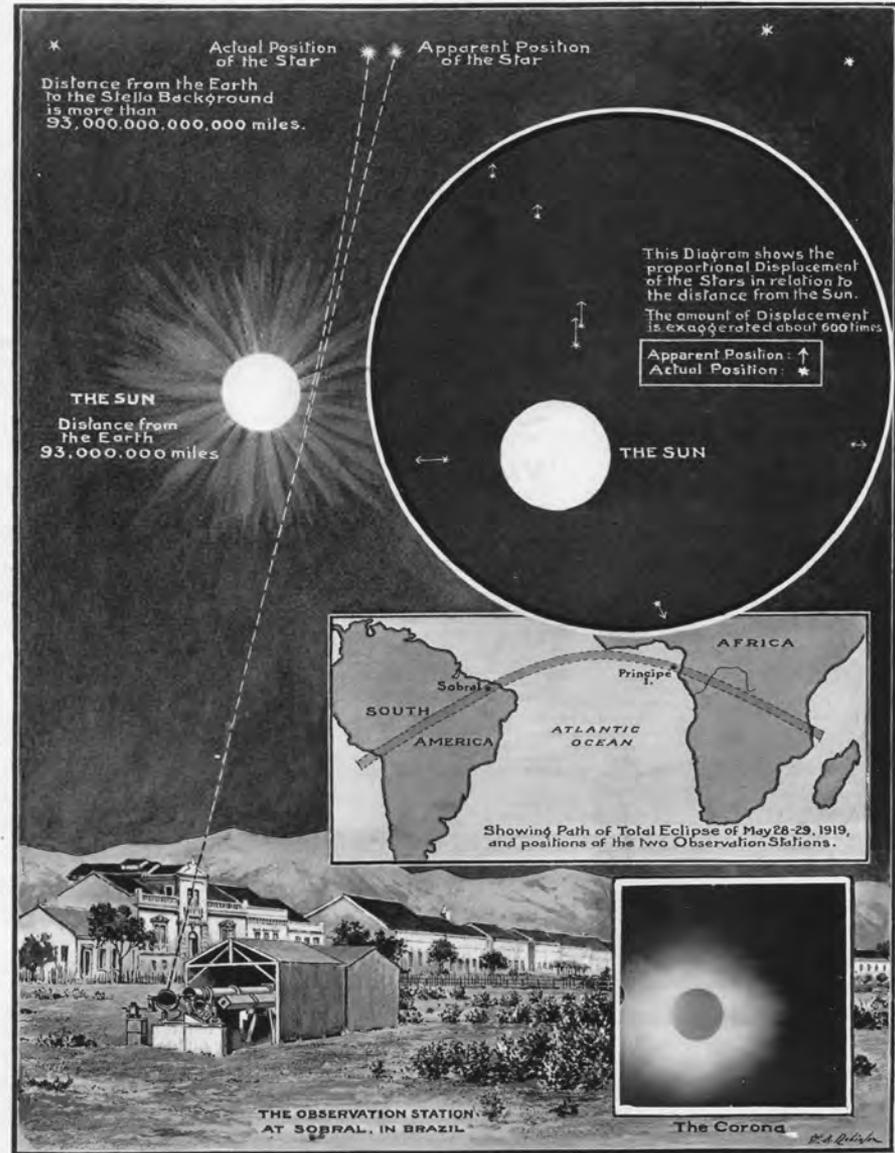


En un eclipse en 1919 se midió si la luz se curvaba: ¡lo predicho! (1,7 ")



"STARLIGHT BENT BY THE SUN'S ATTRACTION": THE EINSTEIN THEORY.

DRAWN BY W. S. ROBINSON, FROM MATERIAL SUPPLIED BY DR. CROMMELIN.



THE CURVATURE OF LIGHT: EVIDENCE FROM BRITISH OBSERVERS' PHOTOGRAPHS AT THE ECLIPSE OF THE SUN.

The results obtained by the British expeditions to observe the total eclipse of the sun last May verified Professor Einstein's theory that light is subject to gravitation. Writing in our issue of November 15, Dr. A. C. Crommelin, one of the British observers, said: "The eclipse was specially favourable for the purpose, there being no fewer than twelve fairly bright stars near the limb of the sun. The process of observation consisted in taking photographs of these stars during totality, and comparing them with other plates of the

same region taken when the sun was not in the neighbourhood. Then if the starlight is bent by the sun's attraction, the stars on the eclipse plates would seem to be pushed outward compared with those on the other plates. . . . The second Sobral camera and the one used at Principe agree in supporting Einstein's theory. . . . It is of profound philosophical interest. Straight lines in Einstein's space cannot exist; they are parts of gigantic curves."—(Drawing Copyrighted in the United States and Canada.)

LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

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

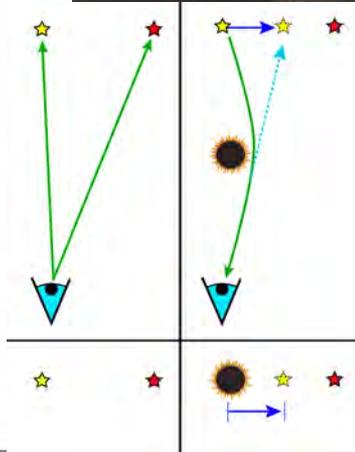
EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

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

A BOOK FOR 12 WISE MEN

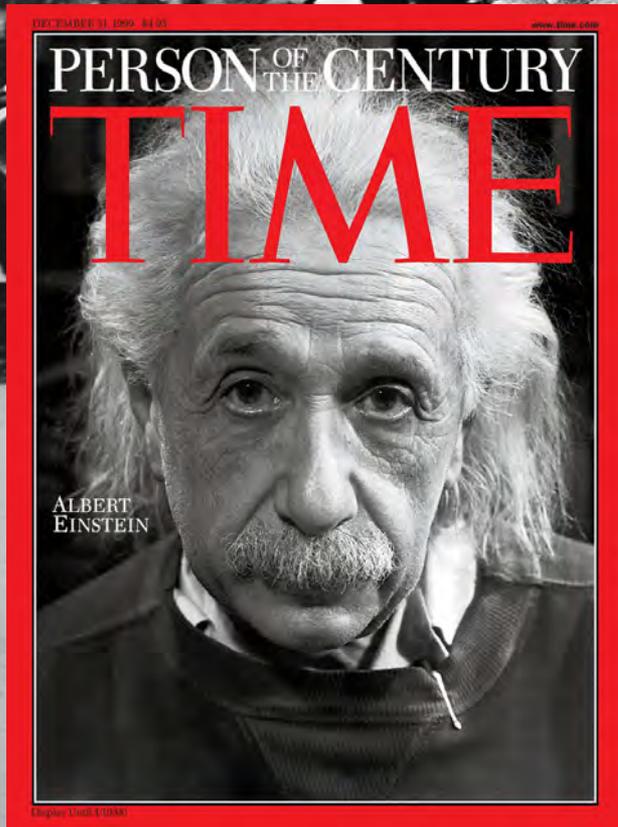
No More in All the World Could
Comprehend It, Said Einstein When
His Daring Publishers Accepted It.

New York Times headline of
November 10, 1919.



*The American
Edition*

La fama.



La Relatividad General tardó en desarrollarse en España.



LAS CONFERENCIAS DE EINSTEIN (DOCTOR HONORIS CAUSA DE LA UNIVERSIDAD CENTRAL)

—Y TU, CALINEZ, ¿HAS COMPRENDIDO LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD?
—¡HOMBRE, LA VERDAD: LA HE COMPRENDIDO... MUY RELATIVAMENTE!

JULIO PALACIOS

RELATIVIDAD

UNA NUEVA TEORÍA

“... parece ser que hay algo torcido en la teoría de la relatividad. Una cosa es que admitamos lo maravilloso aunque no lo entendamos, y otra muy distinta el que demos por bueno lo que es absurdo.”

ESPASA-CALPE S. A.

The background of the slide is a dark, starry space with a large, glowing, purple and blue wave-like structure representing gravitational waves. Two bright, glowing spheres, one purple and one white, are positioned in the center of the wave, appearing to be the source of the disturbance.

EINSTEIN y la Relatividad General más allá de 1915



ONDAS GRAVITATORIAS:

- En aproximación lineal (1916-18).
- Exactas: ondas cilíndricas (1937).

“No tenemos ninguna teoría clásica satisfactoria de la radiación. Ritz se dio cuenta de este hecho. Era un hombre inteligente...”

EINSTEIN y la Relatividad
General más allá de 1915



COSMOLOGÍA:

- Corrimiento al rojo (1911).
- Constante cosmológica (1917).

“Me comentó que la introducción
del término cosmológico fue el
mayor error que cometió jamás.”
(George Gamow)

$$R_{ij} + \Lambda g_{ij} = \frac{8 \Pi G}{c^4} \left(T_{ij} - \frac{1}{2} g_{ij} T \right).$$

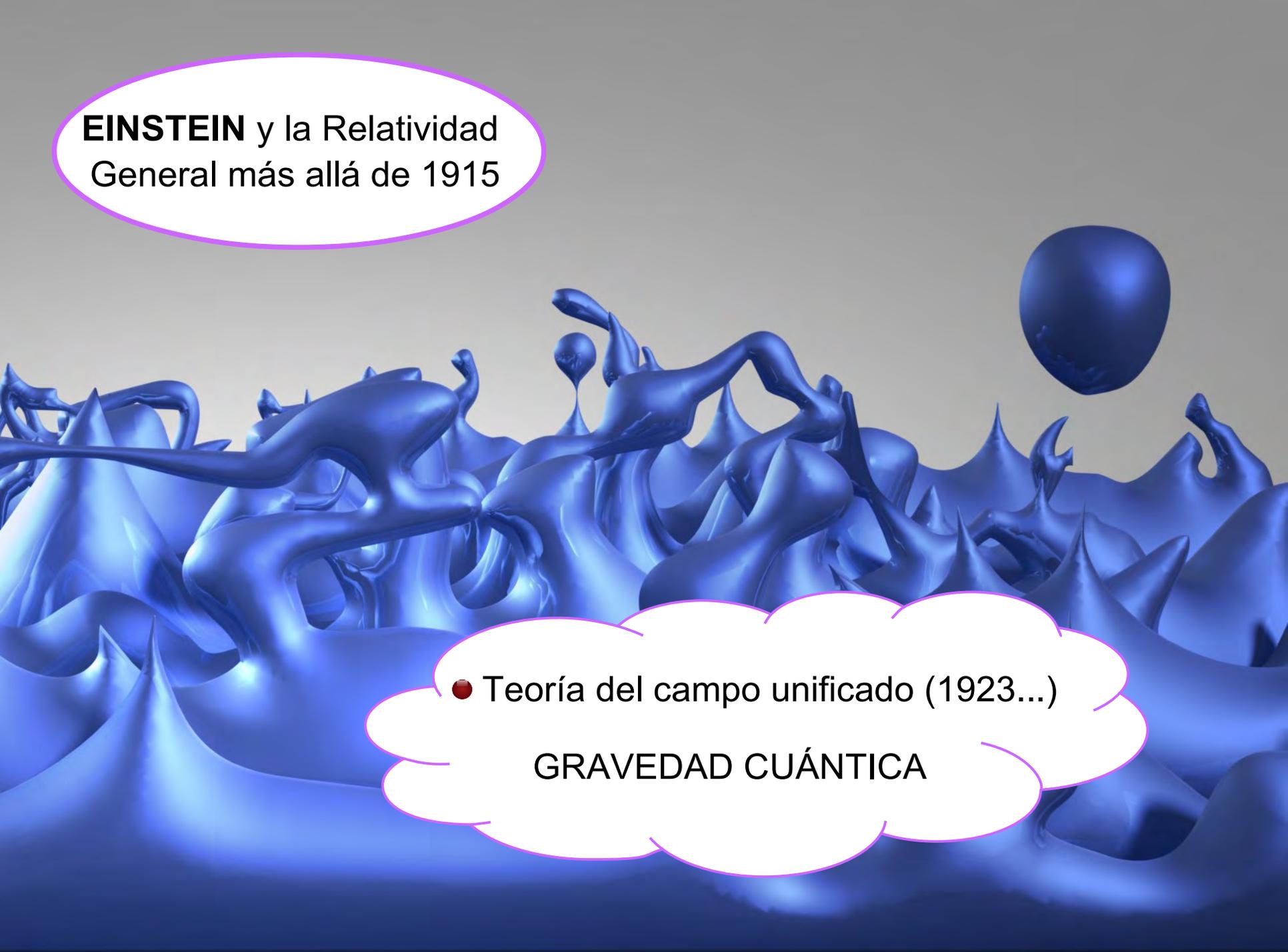


EINSTEIN y la Relatividad
General más allá de 1915



AGUJEROS NEGROS:

- Schwarzschild (1916).
- Puente de Einstein-Rosen (1935).



EINSTEIN y la Relatividad
General más allá de 1915

- Teoría del campo unificado (1923...)

GRAVEDAD CUÁNTICA

EL PLANETA QUE NO FUE (Isaac Asimov)

...¿No estáis impresionados por la coincidencia?

Pues bien, llevémosla más lejos.

¿Os acordáis que, en el mito sobre Cronos engullendo a sus hijos, Zeus se salvó cuando su madre lo sustituyó por una piedra?...

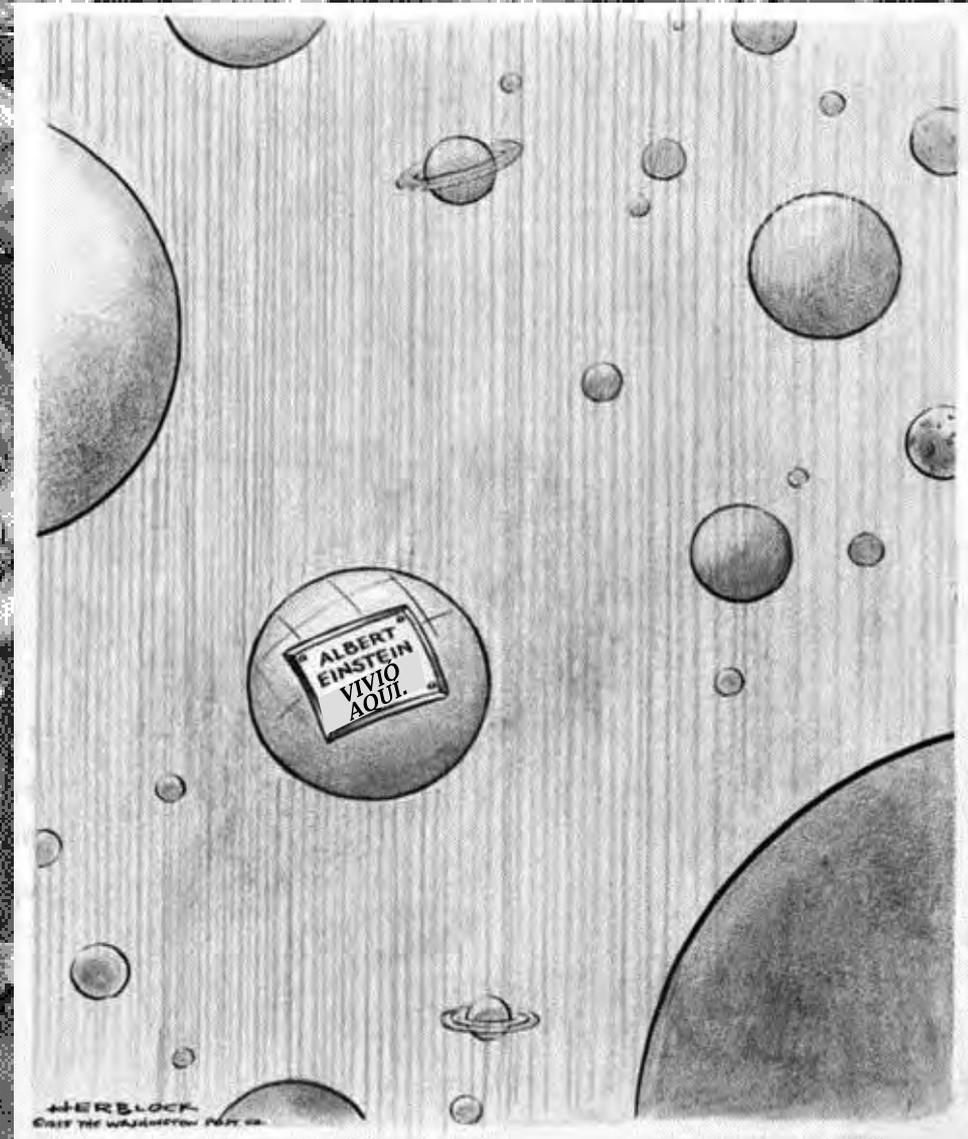
Muy bien, entonces, ¿quién expulsó a Hefestos (el mítico Vulcano) de los cielos? ¡Zeus!

¿Y quién expulsó el planeta Vulcano de los cielos? ¡Einstein!

¿Y qué significa *ein stein* en el alemán nativo de Einstein?

"¡Una piedra!"

Concluyo mi argumentación.



En el 60 aniversario
de su muerte.

