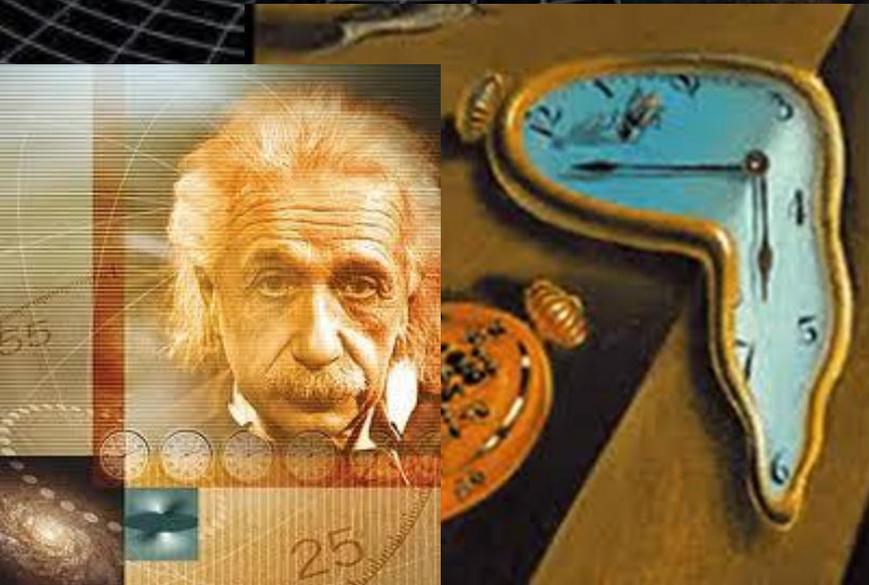
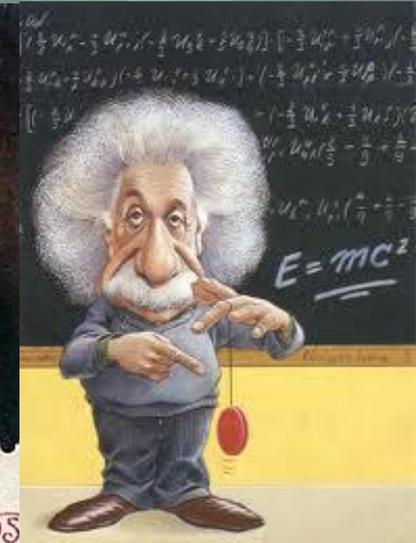
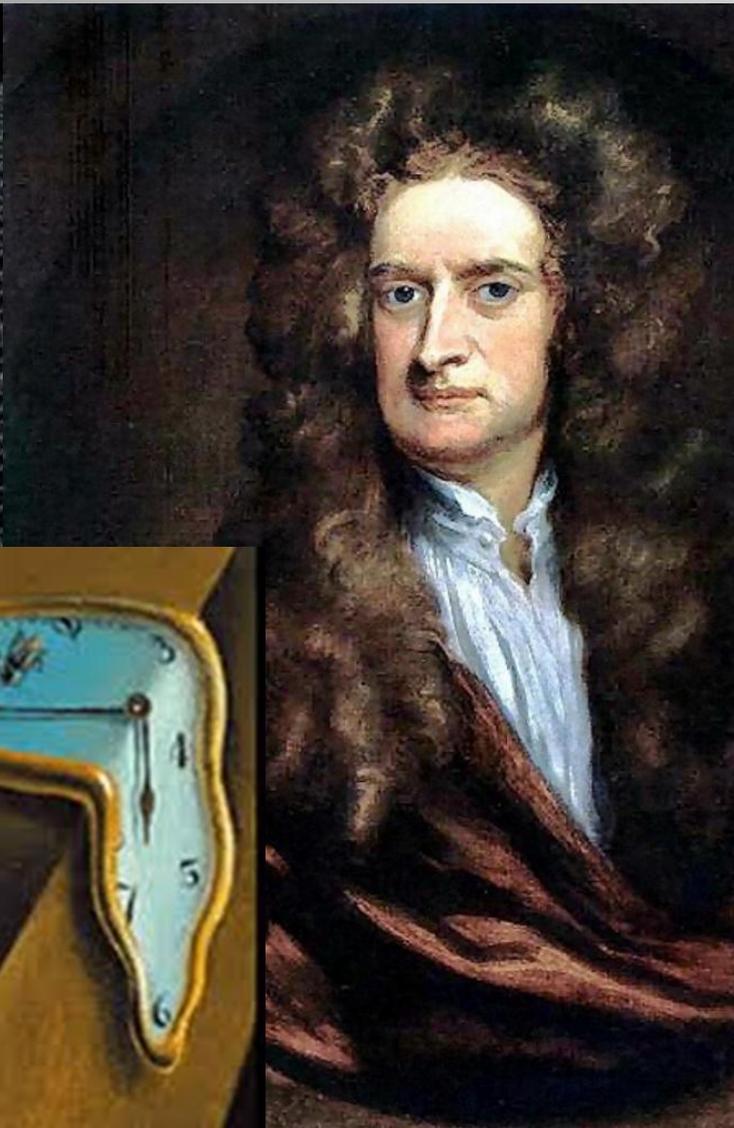
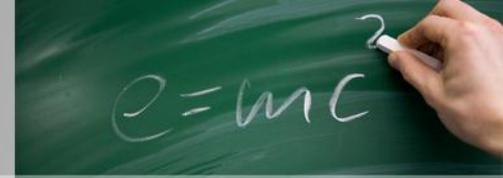

$$E = mc^2$$

Relatividad especial
Fundamentos de la Física III
Tema 7 primera parte (26:52 min)

Enrique Arribas Garde

Centro Asociado de la UNED en Albacete



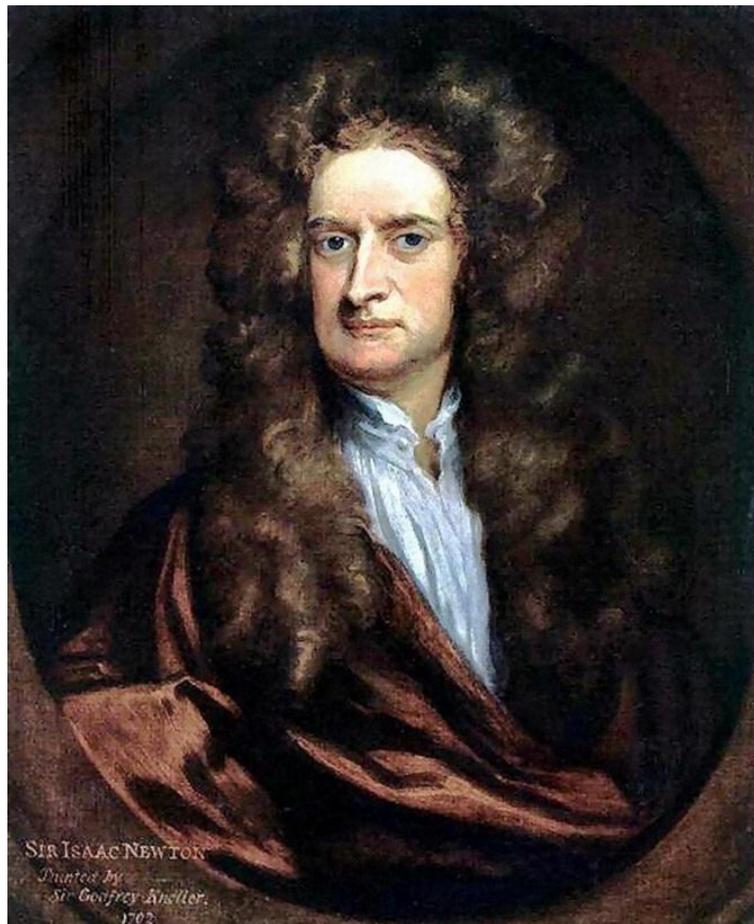




Capítulo 39 del Tipler-Mosca

- 1 Relatividad Newtoniana
- 2 Postulados de Einstein
- 3 La Transformación de Lorentz
- 4 Sincronización de relojes y simultaneidad
- 5 Transformación de velocidades
- 6 Momento lineal relativista
- 7 Energía Relativista
- 8 Relatividad general

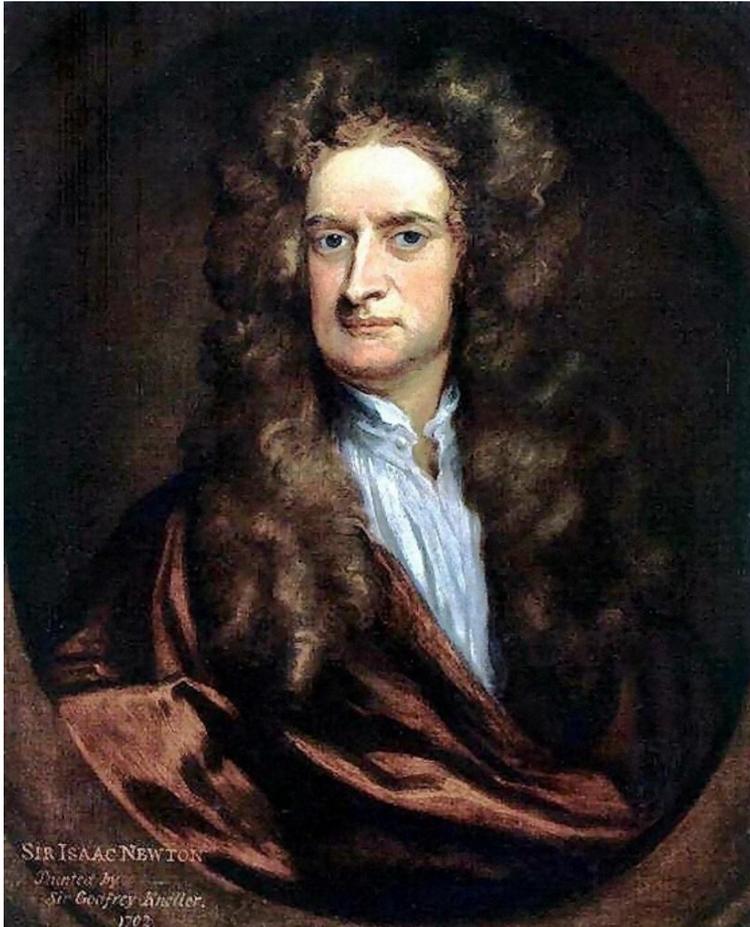
1. Relatividad newtoniana



Sistema de Referencia Inercial (SRI)

- Un SR es un conjunto de sistemas coordinados en reposo relativo entre ellos.
- Un SRI es aquel en el que son válidas las tres leyes de Newton.
- Todos los sistemas que se mueven con velocidad constante respecto a un SRI también son SRI.

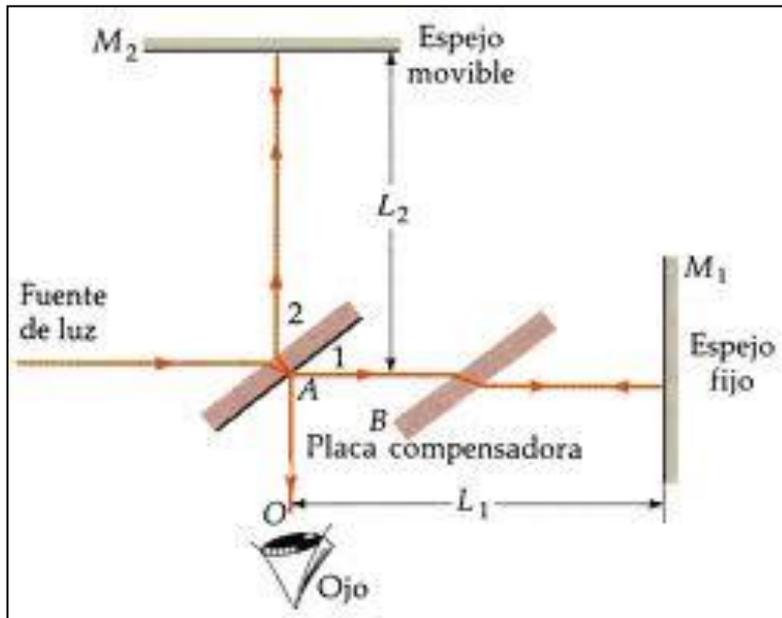
1. Relatividad newtoniana



Principio de Relatividad Newtoniana

- No puede detectarse el movimiento absoluto.
- Este principio ya era conocido por Galileo, Newton y otros científicos del siglo XVII.
- En el siglo XIX hubo un cambio de opinión; pero Einstein revolucionó el panorama a inicios del siglo XX.

1. Relatividad newtoniana



El éter

- La velocidad de una onda depende de las propiedades del medio en el que se propaga.
- No depende de la velocidad de la fuente emisora.
- El éter era el hipotético medio en el que se movían las ondas electromagnéticas.
- Michelson y Morley a finales del siglo XIX no pudieron medir la velocidad de la Tierra respecto del éter.

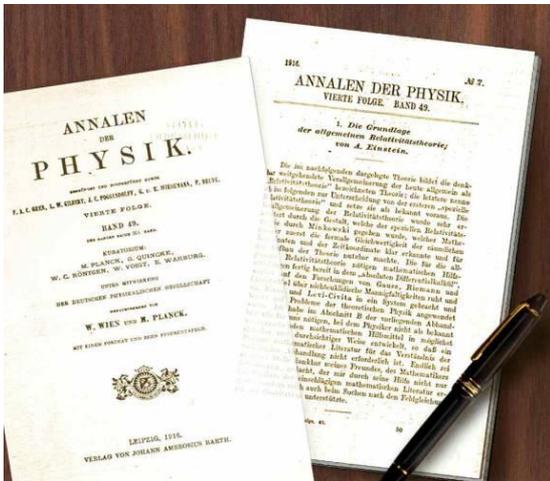
2. Postulados de Einstein



Albert Einstein los publicó en 1905, a los 26 años

Postulado 1

- **No puede detectarse el movimiento absoluto uniforme.**



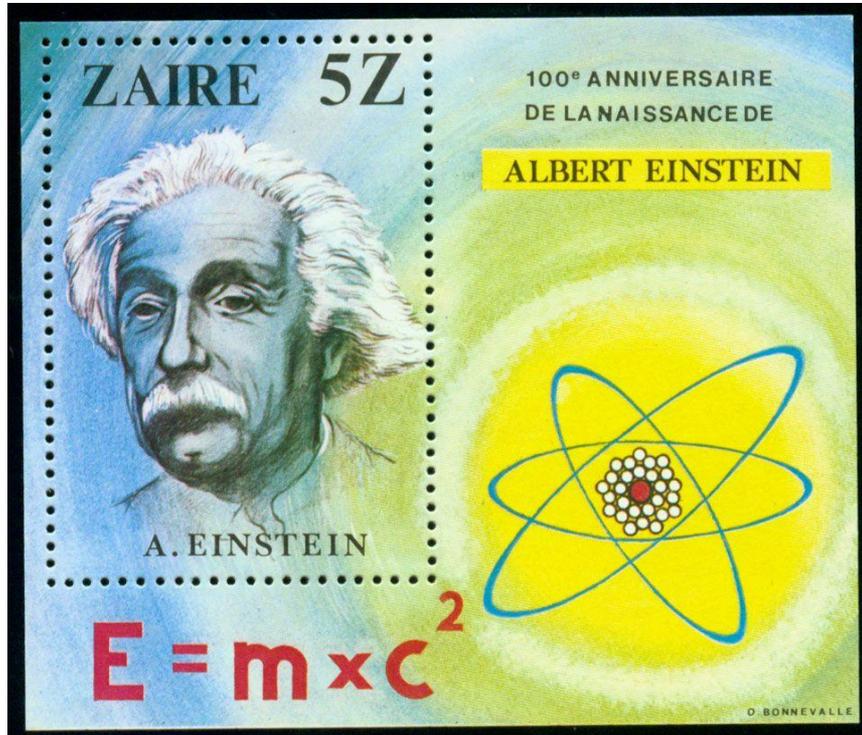
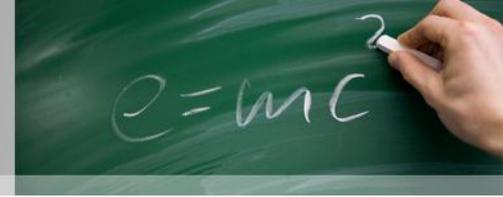
Postulado 2

- **La velocidad de la luz es independiente del movimiento de la fuente emisora.**
- El postulado 2 es una propiedad común de las ondas: la velocidad de las ondas sonoras tampoco depende del movimiento de la fuente.

Postulado 2 alternativo

- **Todo observador mide el mismo valor de c para la velocidad de la luz.**
- $c = 2.99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- Usaremos, hasta una precisión de tres cifras significativas, el valor de $c = 3.00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

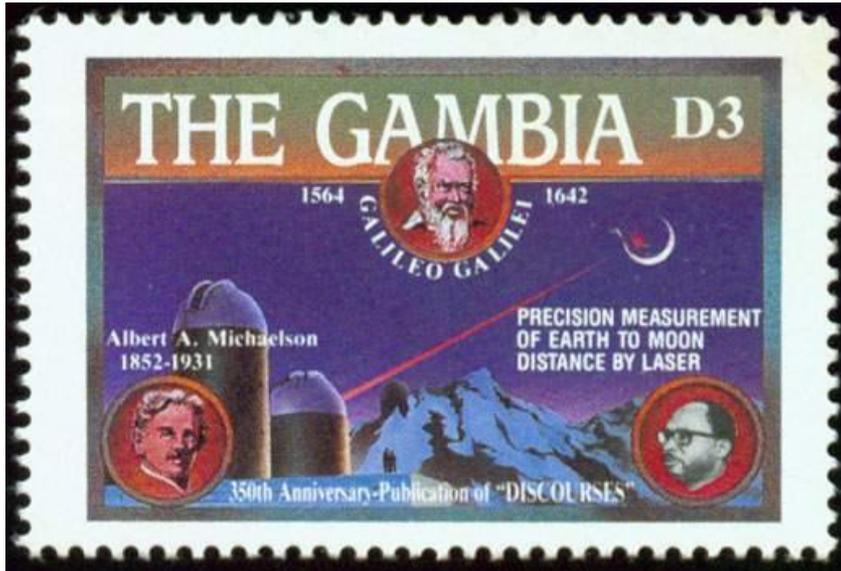
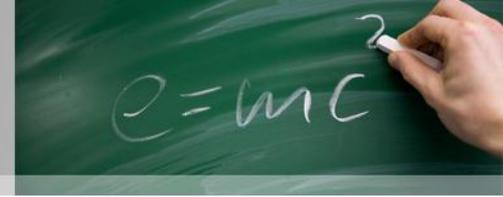
2. Postulados de Einstein



Consecuencias

- Las consecuencias de los postulados de Einstein suelen conducir a contradicciones con el sentido común.
- Toda la Teoría de la Relatividad Especial puede deducirse de estos postulados.

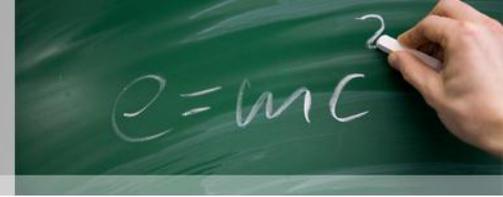
2. Postulados de Einstein



Consecuencias

- El éter no existe.
- Nuestras ideas intuitivas sobre la composición de velocidades son aproximadas.
- Sólo son válidas cuando las velocidades involucradas son muy pequeñas comparadas con la velocidad de la luz.

2. Postulados de Einstein



¿Neutrinos más rápidos que la luz?



- Habría que replantearse la TRE.
- La TRE tendría algún pequeño agujero que habría que solucionar.
- Se abriría una nueva puerta en el mundo de la Física.
- Si se confirma este experimento la Teoría de la Relatividad Especial (TRE) estaría en entredicho.
- Los datos experimentales conducen a que los neutrinos son más rápidos que la luz.
- Han adelantado a la luz 60 ns en una distancia de 730 km.

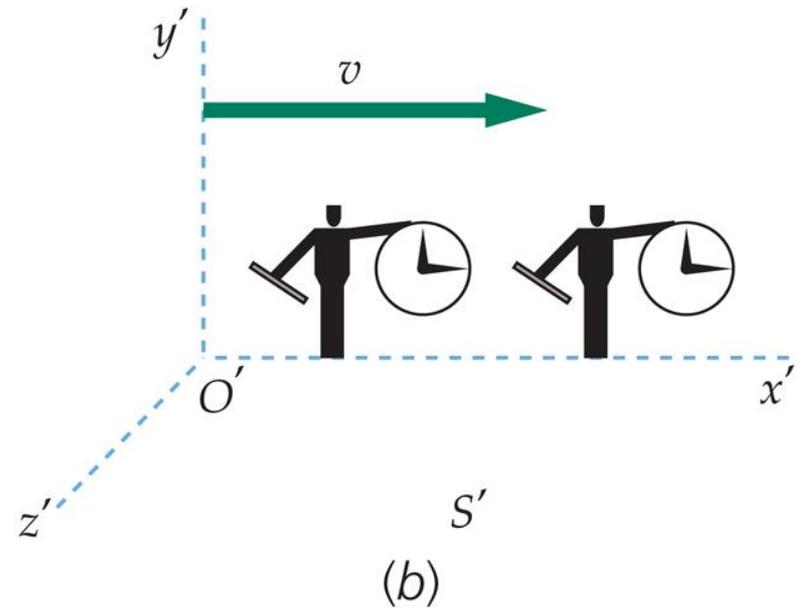
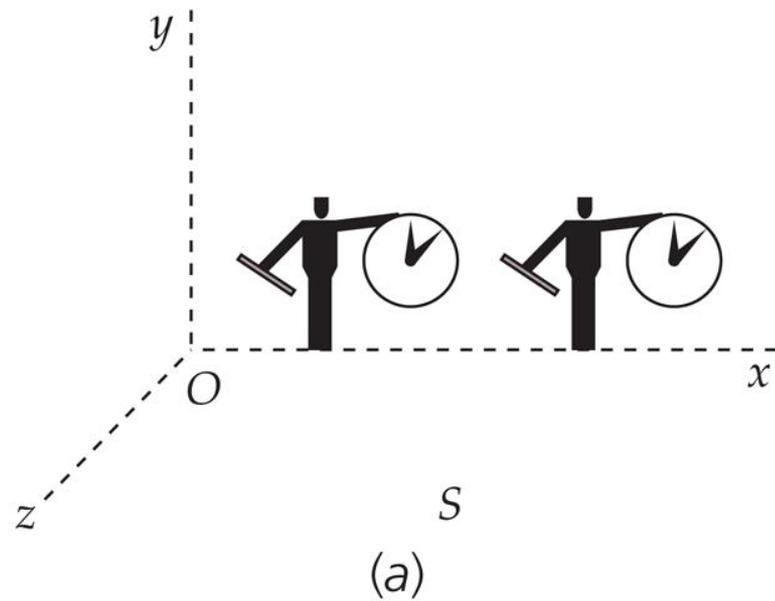
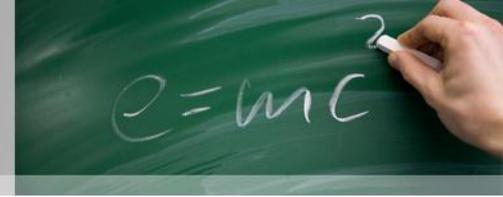
3. La transformación de Lorentz



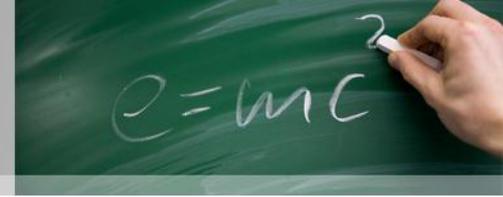
Medidas en dos sistemas de referencia

- Consideremos dos SRI llamados S y S' .
- Supondremos que S' se mueve con velocidad relativa v respecto a S .
- En cada SRI hay observadores con aparatos de medida: relojes, reglas, ...
- Estos aparatos de medida son idénticos cuando se comparan en reposo relativo.
- Habrá tantos observadores como hagan falta.
- Los orígenes de S y S' coinciden en el instante $t = t' = 0$,

3. La transformación de Lorentz



3. La transformación de Lorentz



Transformación de Galileo

- La transformación directa es
- $x = x' + vt'$
- $y = y'$
- $z = z'$
- $t = t'$
- La transformación inversa es
- $x' = x - vt$
- $y' = y$
- $z' = z$
- $t' = t$

3. La transformación de Lorentz



Transformación de Galileo

- Derivando con respecto al tiempo obtenemos la ley clásica de la suma de velocidades: $u_x' = u_x - v$
- Volviendo a derivar con respecto al tiempo obtenemos: $a_x' = a_x$
- Es decir, la segunda ley de Newton se cumple en todos los SRI.

3. La transformación de Lorentz



Transformación de Lorentz

- Gamma, γ , es un factor adimensional que siempre es mayor o igual que 1 y que tiende asintóticamente a infinito cuando v se acerca mucho a c .

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- $\gamma \geq 1$
- $\lim_{v \rightarrow c} \gamma = \infty$

$$x = \gamma(x' + vt')$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = \gamma\left(t' + \frac{vx'}{c^2}\right)$$

3. La transformación de Lorentz



Transformación inversa de Lorentz

- La transformación inversa es

$$x' = \gamma(x - vt)$$

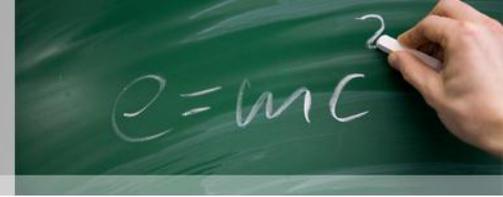
$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right)$$

- La transformación de Lorentz relaciona las cuatro coordenadas de
 - un suceso en S: (x, y, z, t) ,
 - con las del mismo suceso en S': (x', y', z', t') .

3. La transformación de Lorentz



Dilatación del tiempo

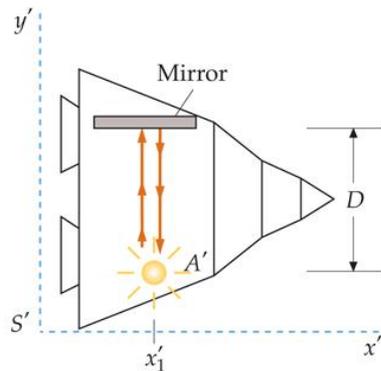
- **Tiempo propio:** Se define como el tiempo transcurrido entre dos sucesos que ocurren en el mismo lugar en un SR.
- Se representa por Δt_p .
- El intervalo de tiempo medido en otro SR es siempre más largo.
- $\Delta t = \gamma \Delta t_p$



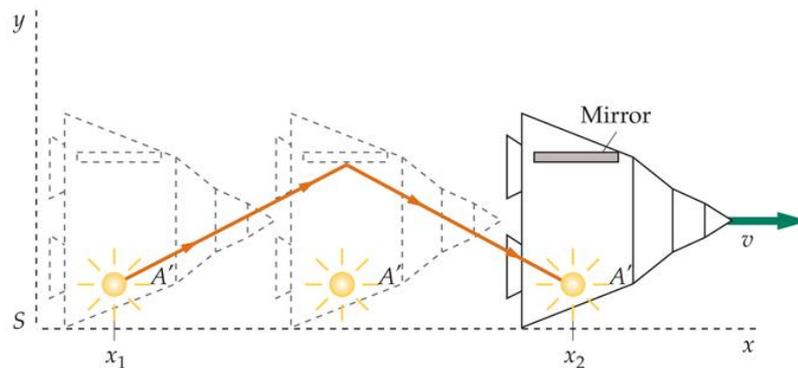
3. La transformación de Lorentz



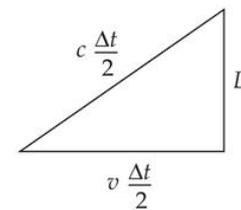
Dilatación del tiempo



(a)



(b)



(c)

El observador A' en S' mide el tiempo propio.

El observador A en S mide un tiempo mayor

Triángulo rectángulo usado en S

$$\Delta t' = \frac{2D}{c}$$

$$\Delta t = \gamma \Delta t'$$

3. La transformación de Lorentz

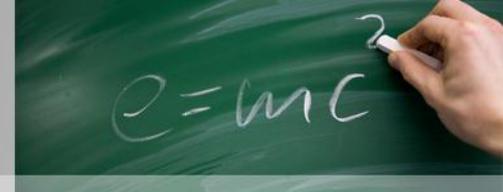


Los transeúntes quietos ven la contracción de longitudes en el ciclista.
(Dibujo de George Gamow)

Contracción de longitudes

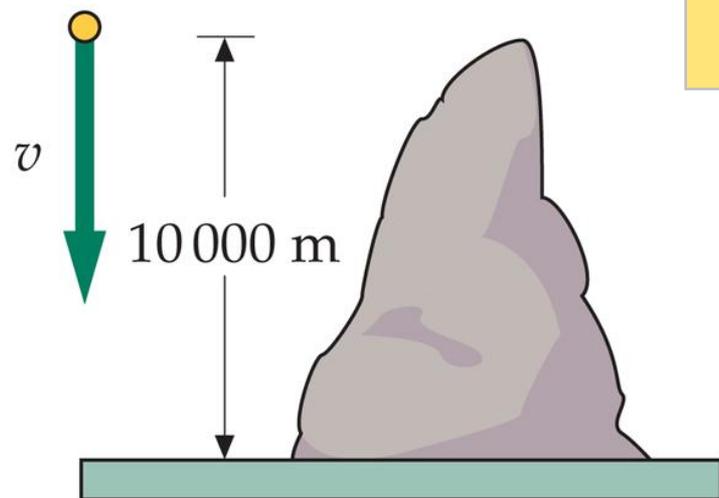
- **Longitud propia:** Se define la longitud propia de un objeto como la medida en un SR en el que dicho objeto se encuentra en reposo.
- Se representa por L_p .
- En un SR en el que el objeto está en movimiento la longitud medida es menor que su L_p .
- $L = L_p/\gamma$
- Se le suele denominar contracción de Lorentz-FitzGerald.

3. La transformación de Lorentz



Contracción de longitudes

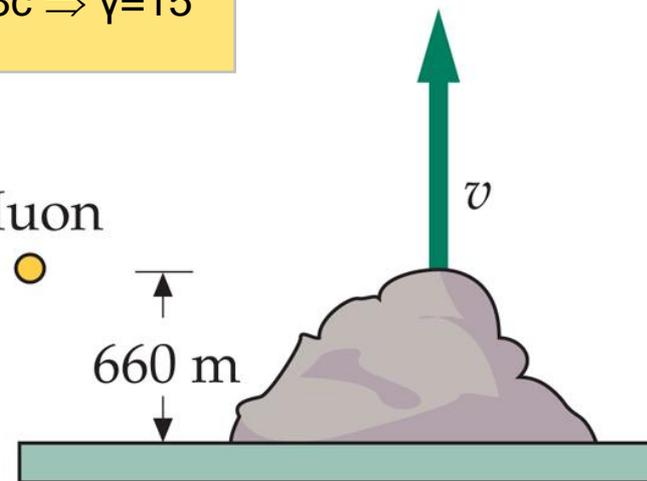
Muon



(a)

$$v_{\text{muón}} = 0.9978c \Rightarrow \gamma = 15$$

Muon

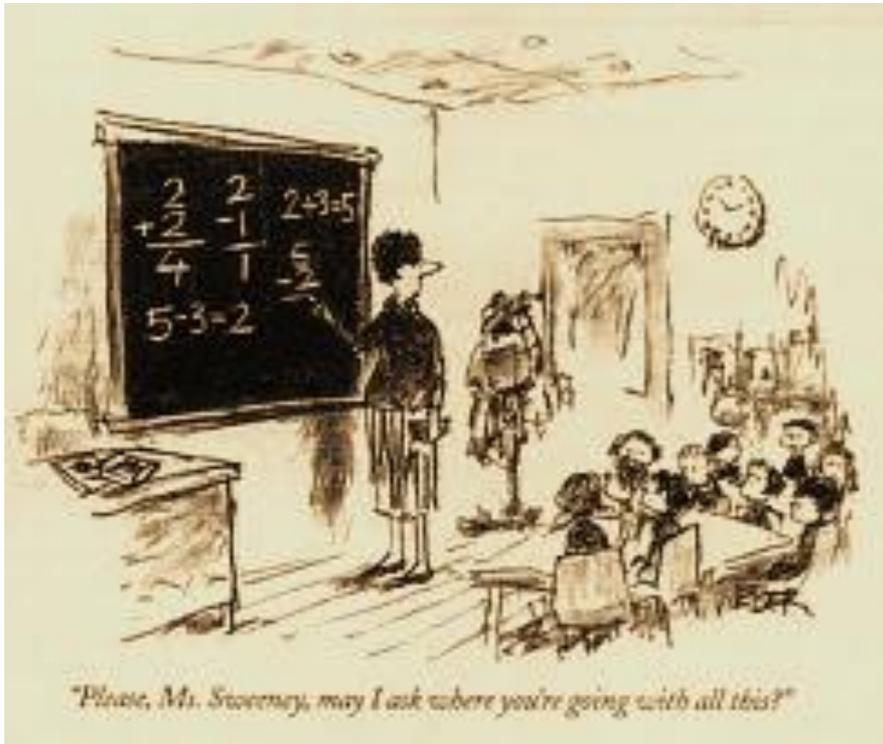
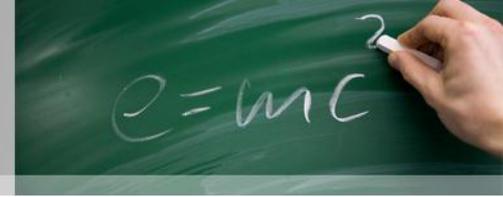


(b)

En el SR de la Tierra el muón tiene una vida propia de $33 \mu\text{s}$ en vez de los $2.2 \mu\text{s}$ que tiene en un SR ligado a él

En el SR de muón la atmósfera en vez de medir 10 km mide tan sólo 660 m.

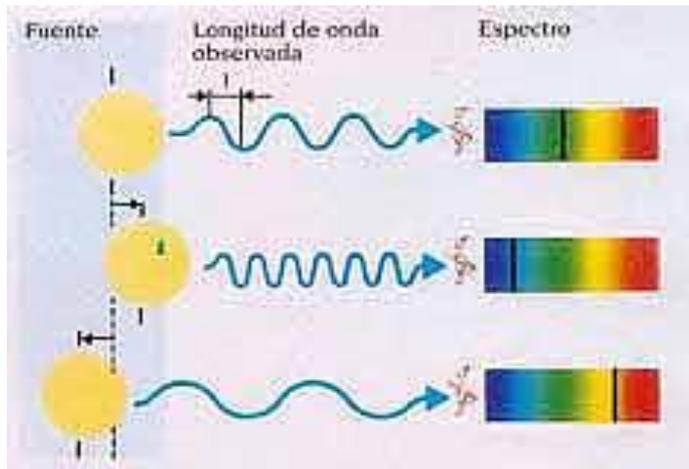
3. La transformación de Lorentz



Evidencias experimentales

- Algunos experimentos han comprobado las predicciones relativistas respecto a los muones que atraviesan la atmósfera terrestre.
- Podemos deducir que hay comprobación experimental de la dilatación del tiempo y de la contracción de las longitudes.
- La Teoría Especial de la Relatividad está comprobada desde el punto de vista experimental.

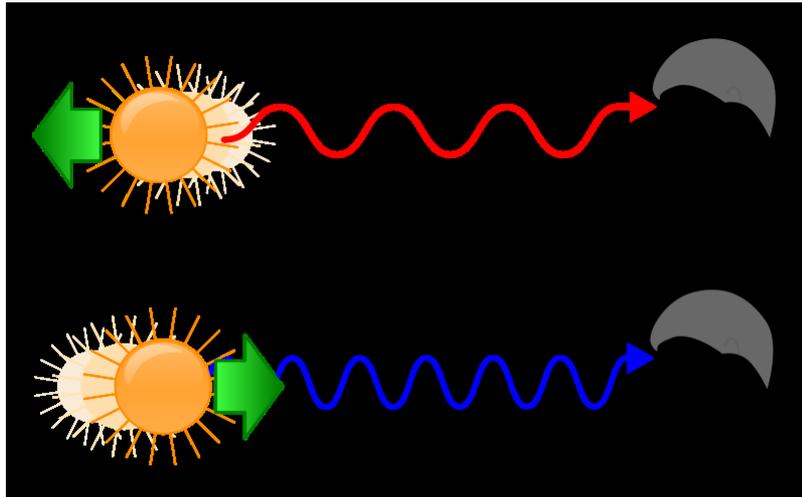
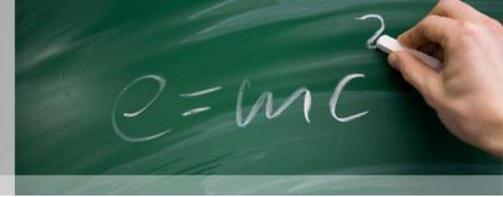
3. La transformación de Lorentz



Efecto Doppler relativista

- Conocemos el efecto Doppler para el sonido: la frecuencia observada y la emitida no coinciden si hay movimiento relativo entre la fuente y el observador.
- Para la luz ocurre algo muy semejante pero con unas ligeras diferencias.
- Vamos a comentar dos tipos de desplazamientos:
 - Hacia el **violeta**
 - Hacia el **rojo**
- La luz visible tiene longitudes de onda comprendidas entre 400 nm (**violeta**) y 780 nm (**rojo**).

3. La transformación de Lorentz



Desplazamiento hacia el **violeta**

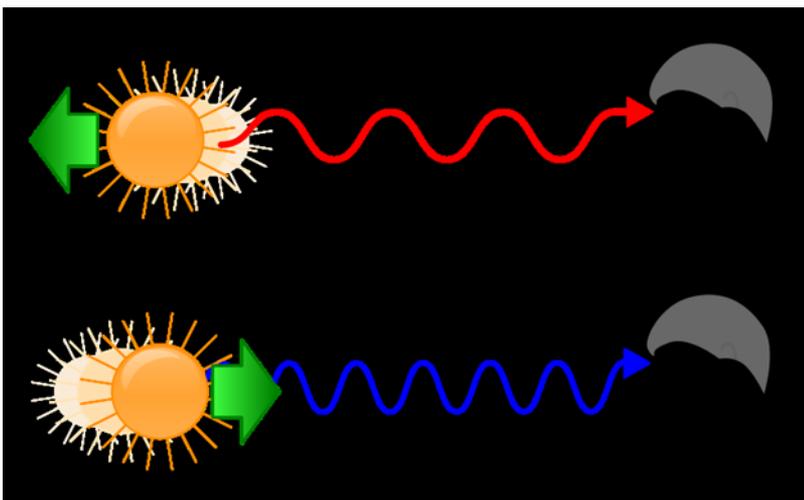
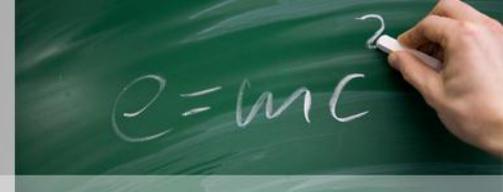
- Cuando la fuente emisora y el receptor se mueven el uno hacia el otro **acercándose** se obtiene que la frecuencia medida es mayor que la emitida: $f' > f_0$ ($\lambda < \lambda_0$).

$$f' = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}} f_0; \text{ aproximación}$$

$$f' > f_0$$

desplazamiento hacia el violeta

3. La transformación de Lorentz



Desplazamiento hacia el rojo

- Cuando la fuente emisora y el receptor se mueven **alejándose** el uno del otro se obtiene que la frecuencia medida es menor que la emitida: $f' < f_0$ ($\lambda > \lambda_0$).

$$f' = \sqrt{\frac{1 - v/c}{1 + v/c}} f_0; \text{recesión}$$

$$f' < f_0$$

desplazamiento hacia el rojo

3. La transformación de Lorentz



Desplazamiento
hacia el rojo

- Se observa un desplazamiento hacia el rojo de la luz emitida por las galaxias muy alejadas.

Expansión

- Eso quiere decir que esas galaxias se están alejando de nosotros. ⇒ **El Universo está en expansión.**

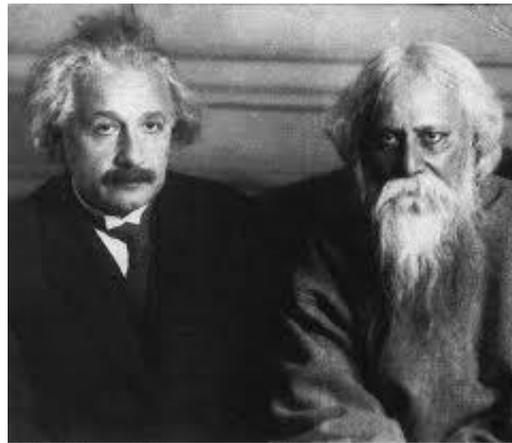
Recesión

- Midiendo el desplazamiento podemos calcular la velocidad de recesión de las galaxias respecto a un observador terrestre.

Ley de Hubble

- Se verá en el tema 9, la v de una galaxia y la distancia r que nos separa de ella están relacionadas:

ley de Hubble: $v = H \cdot r$, siendo H una constante.

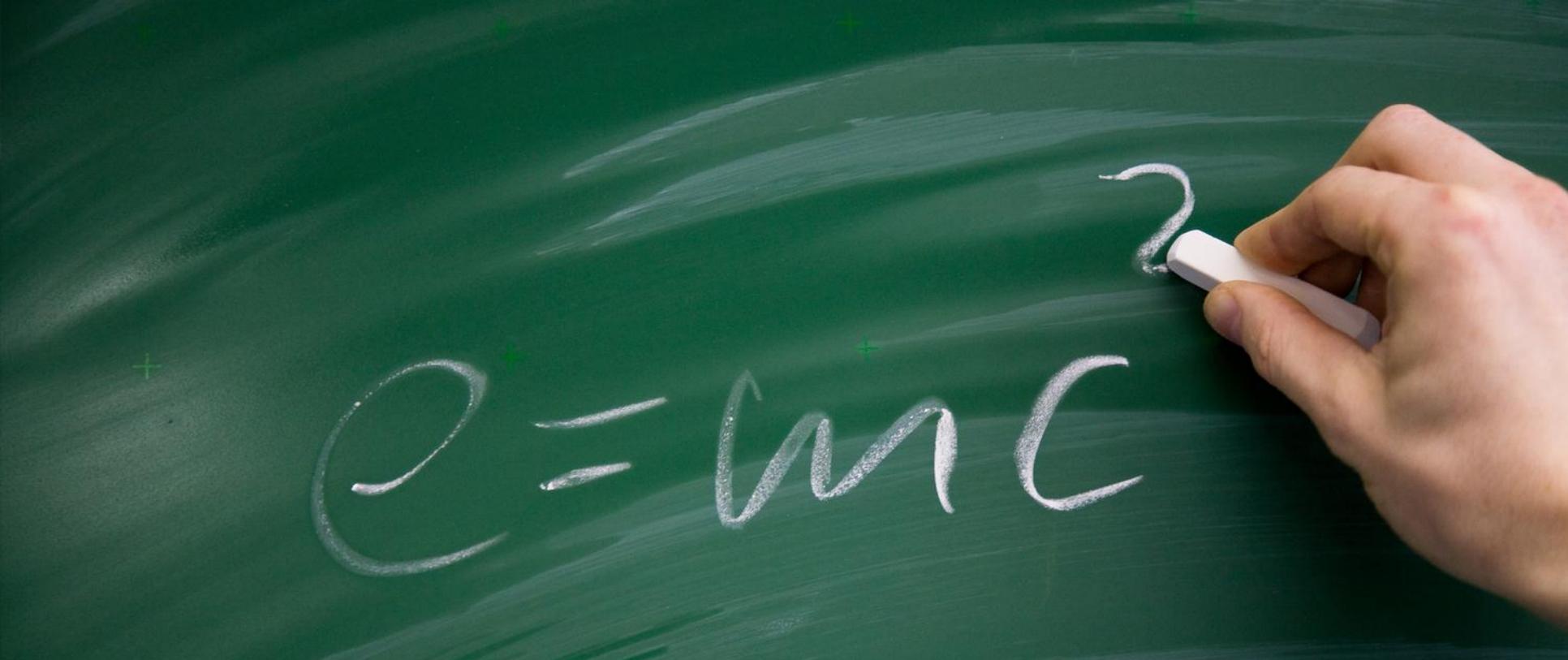




Para acabar esta primera parte de Relatividad os dejos dos frases de Albert Einstein que probablemente os hagan pensar.

**Si buscas resultados distintos,
no hagas siempre lo mismo.**

**Todo debe simplificarse
hasta donde sea posible,
pero nada más**

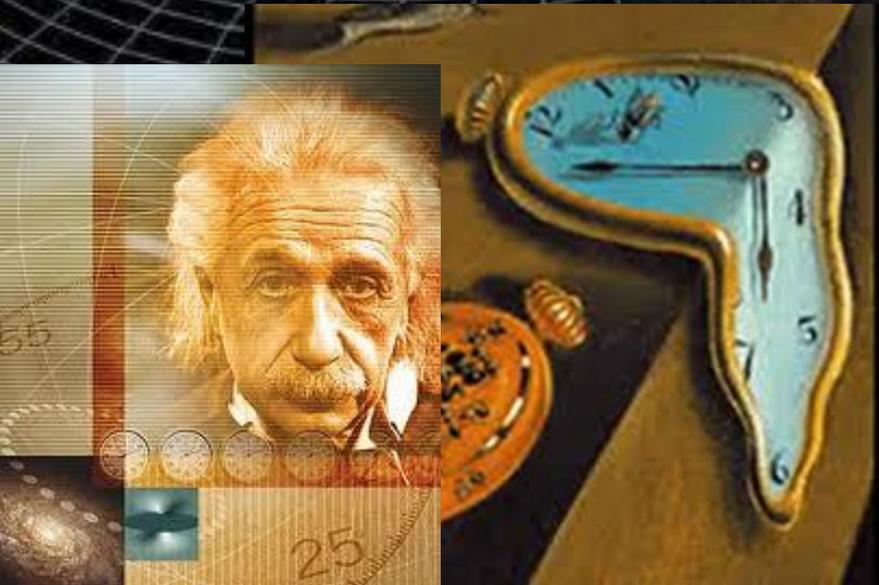
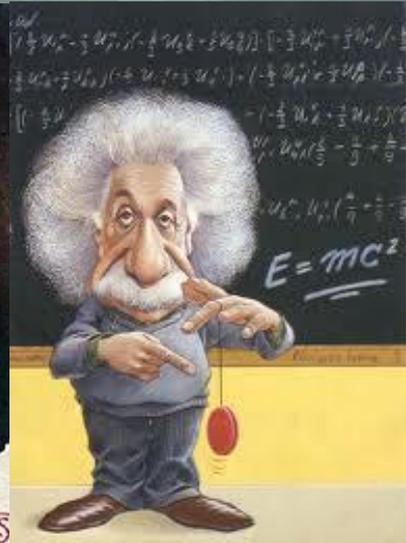
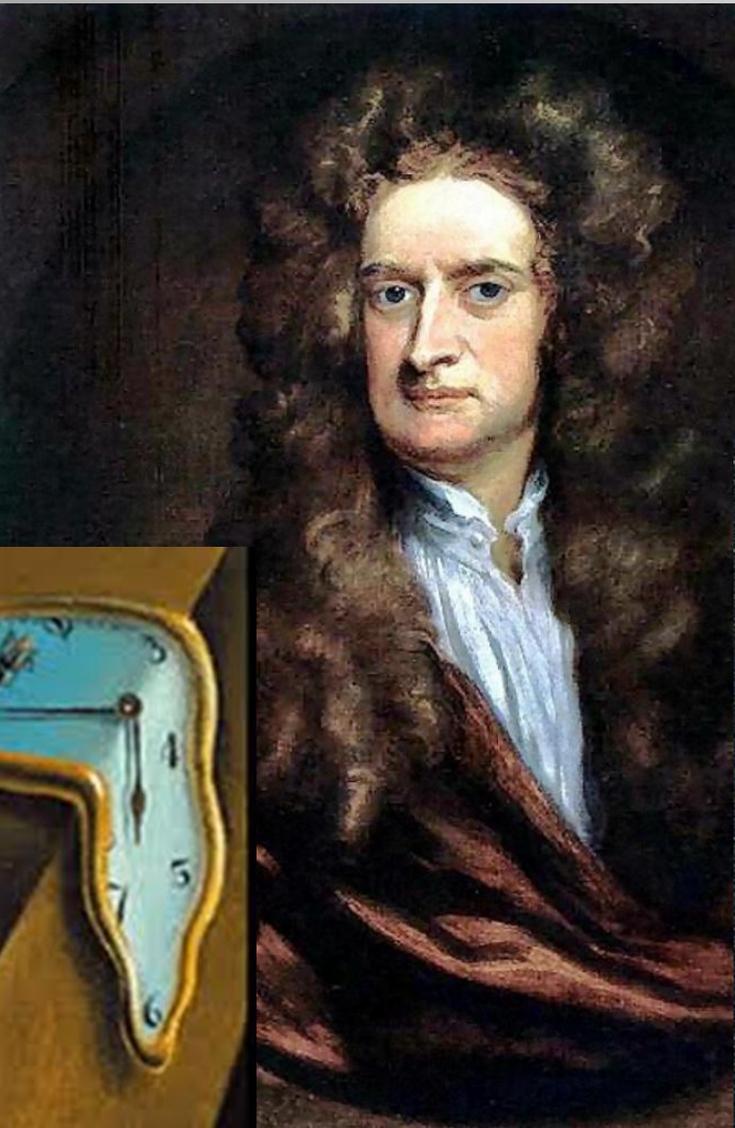
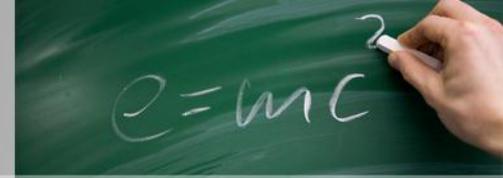

$$E = mc^2$$

Relatividad especial
Fundamentos de la Física III
Tema 7 segunda parte (17 min)

Enrique Arribas Garde

Centro Asociado de la UNED en Albacete



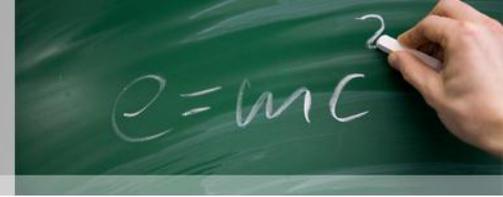




Capítulo 39 del Tipler-Mosca

- 1 Relatividad Newtoniana
- 2 Postulados de Einstein
- 3 La Transformación de Lorentz
- 4 Sincronización de relojes y simultaneidad
- 5 Transformación de velocidades
- 6 Momento lineal relativista
- 7 Energía Relativista
- 8 Relatividad general

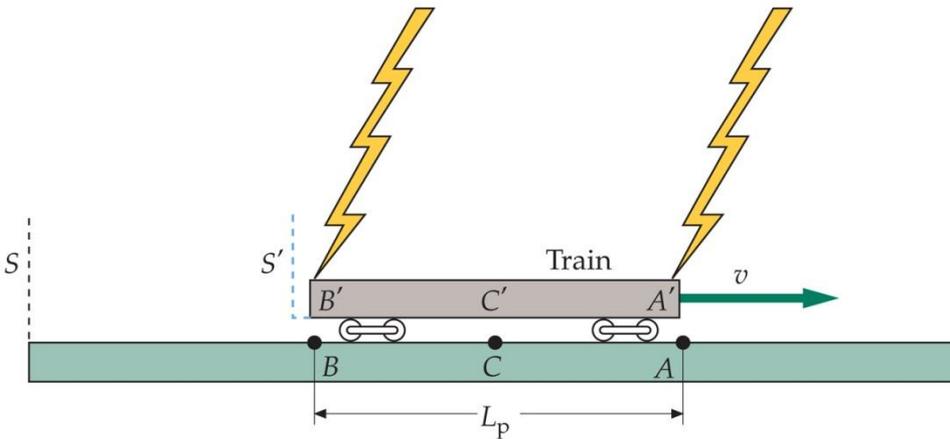
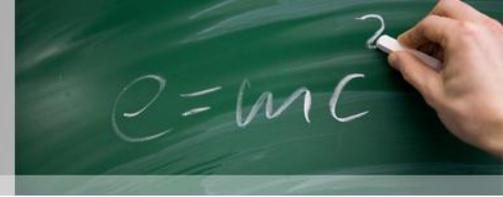
4. Sincronización de relojes y simultaneidad



Simultaneidad

- Dos relojes sincronizados en un SR no están generalmente sincronizados en otro sistema que se mueva respecto al primero.
- Dos sucesos que son simultáneos en un SR generalmente no lo son en otro sistema que se mueve respecto al primero.
- La simultaneidad no es una relación absoluta.
- Esta creencia intuitiva y errónea es muy difícil de erradicar.

4. Sincronización de relojes y simultaneidad

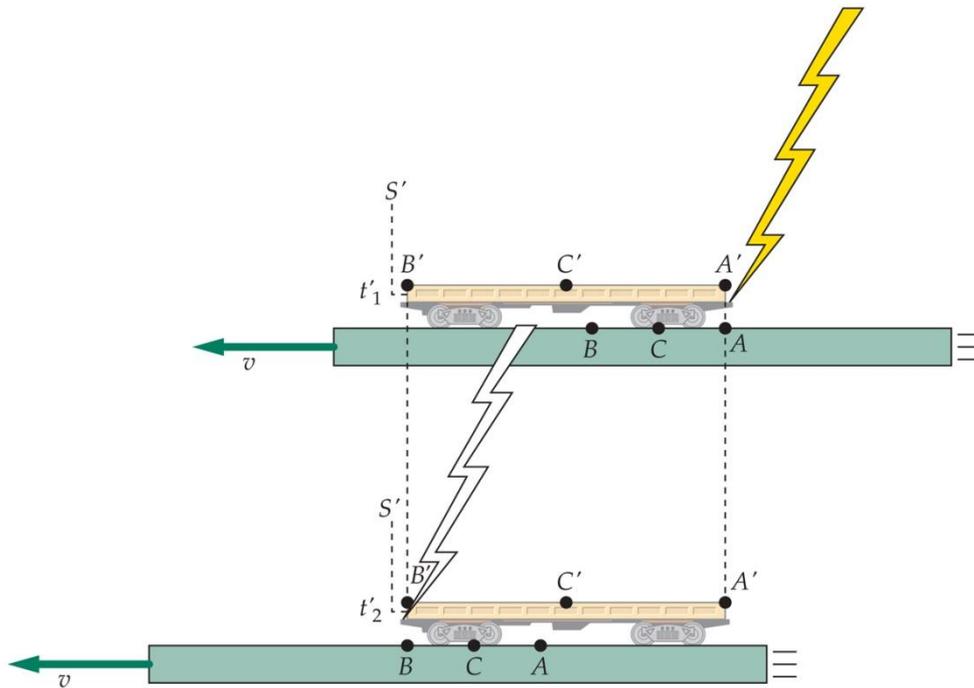
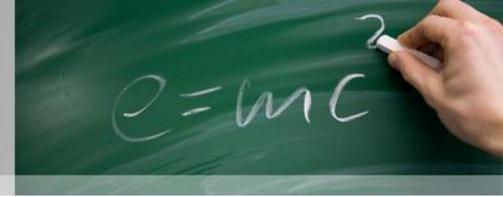


- La luz de estos dos rayos simultáneos alcanza, al mismo tiempo, al observador situado en C.

Simultaneidad

- Definición de simultaneidad:**
- Dos sucesos en un SR son simultáneos si las señales luminosas procedentes de estos sucesos alcanzan en el mismo instante a un observador situado a mitad de camino entre ellos.
- El segmento AB es la longitud del tren medida desde el andén, que es menor que su longitud propia.
- El dibujo tiene un error: en vez de L_p deber ser L_p andén, como viene en la sexta edición del Tipler-Mosca..

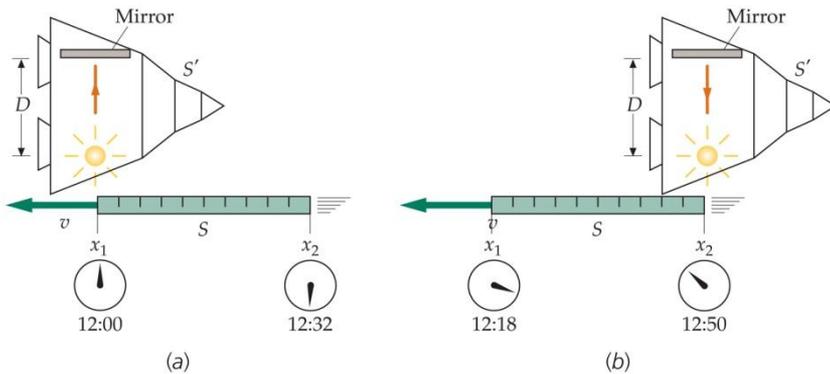
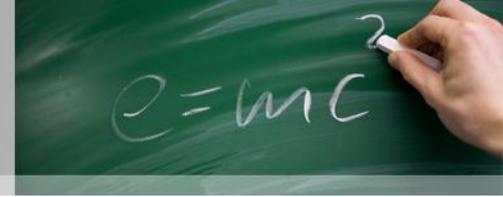
4. Sincronización de relojes y simultaneidad



Simultaneidad

- En el SR del tren, S' , el andén se mueve y la longitud propia del tren es mayor que el segmento AB del andén.
- El primer rayo cae en la parte delantera cuando A coincide con A' .
- El segundo rayo cae en la parte trasera del tren cuando B y B' coinciden.
- Es decir, los dos sucesos no son simultáneos.

4. Sincronización de relojes y simultaneidad



Los relojes rezagados adelantan

- Sincronizamos dos relojes en un SR en el que están en reposo.
- Sea L_P la distancia propia entre los relojes.
- Si los dos relojes se mueven a lo largo de la línea que los une \Rightarrow el reloj situado detrás adelanta (marca un tiempo posterior) en una cantidad dada por

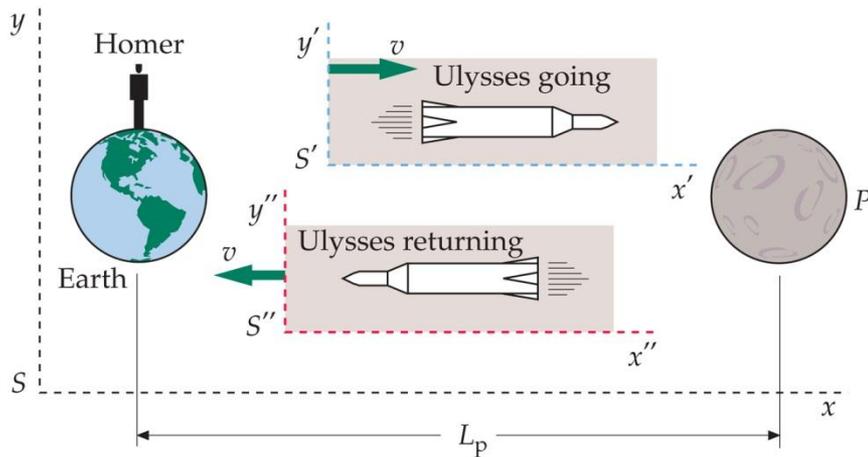
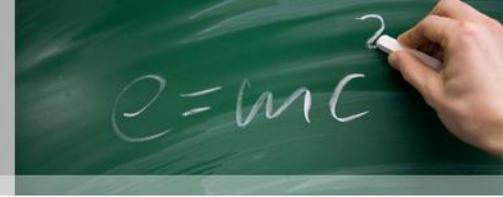
$$\Delta t_S = L_P \frac{v}{c^2}$$

- **Los relojes rezagados marcan tiempos posteriores.**

Ejemplo 39.6: se observa que el reloj de la derecha (el rezagado) adelanta en 32 minutos respecto al de la izquierda (el adelantado).

Todo ello visto desde el SR, S' , de la nave que se desplaza con $v = 0.80c$.

4. Sincronización de relojes y simultaneidad



La paradoja de los gemelos

- Homero y Ulises son gemelos idénticos. Homero se queda en la Tierra y Ulises va en la nave.
- Ulises viaja hasta $L_p = 8$ años-luz con $v = 0.8c \Rightarrow \gamma = 5/3$.
- Desde el punto de vista de Homero, Ulises viaja 10 años ($8/0.8$) hasta el planeta P y otros 10 años para volver.
- Su viaje dura 20 años.
- **Homero tiene 20 años más cuando Ulises regresa a la Tierra.**

4. Sincronización de relojes y simultaneidad

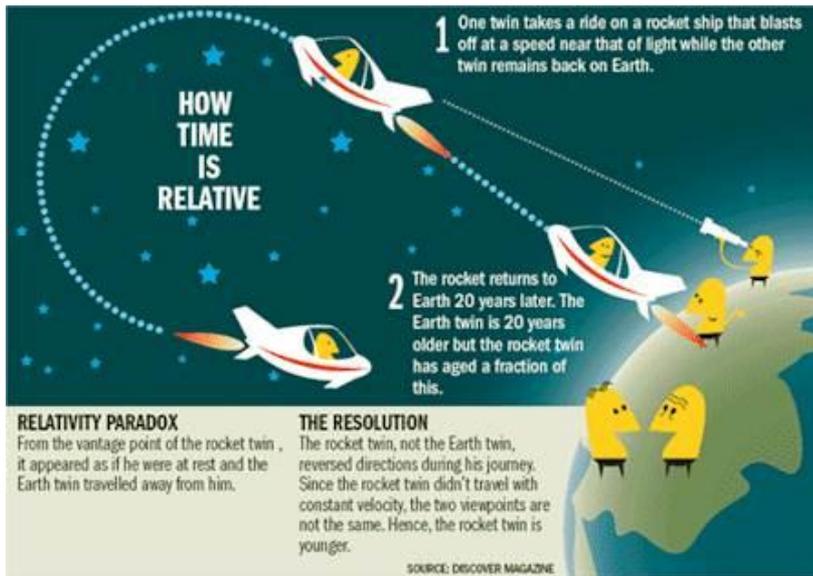


La paradoja de los gemelos

- Desde el punto de vista de Ulises el tiempo transcurrido debe ser menor porque es un tiempo propio:

$$\Delta t' = \Delta t / \gamma = 20 / (5/3) = 12 \text{ años}$$

- Ulises regresa a la Tierra cuando han transcurrido 12 años.**
- Ulises es 8 años más joven que Homero.**



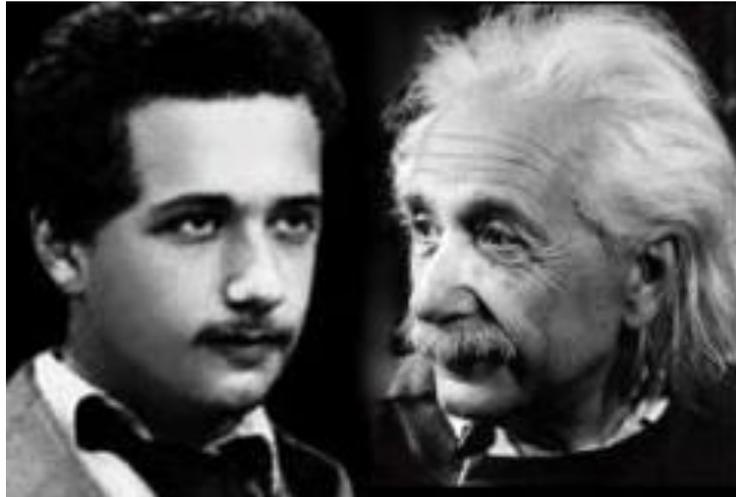
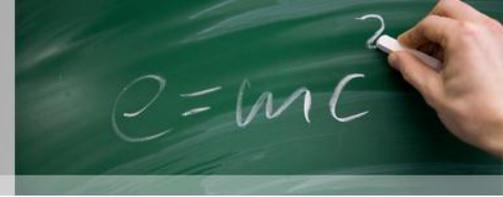
4. Sincronización de relojes y simultaneidad



La paradoja de los gemelos

- Consideremos, ahora, que es Homero el que viaja y Ulises está en reposo.
- El tiempo propio de Ulises es 12 años, por lo que el reloj de Homero atrasará y marcará sólo $(3/5) \cdot 12 = 7.2$ años.
- Homero debería haber envejecido sólo 7.2 años y no los 20 años que él cree que ha envejecido.
- **Ésta es realmente la paradoja.**

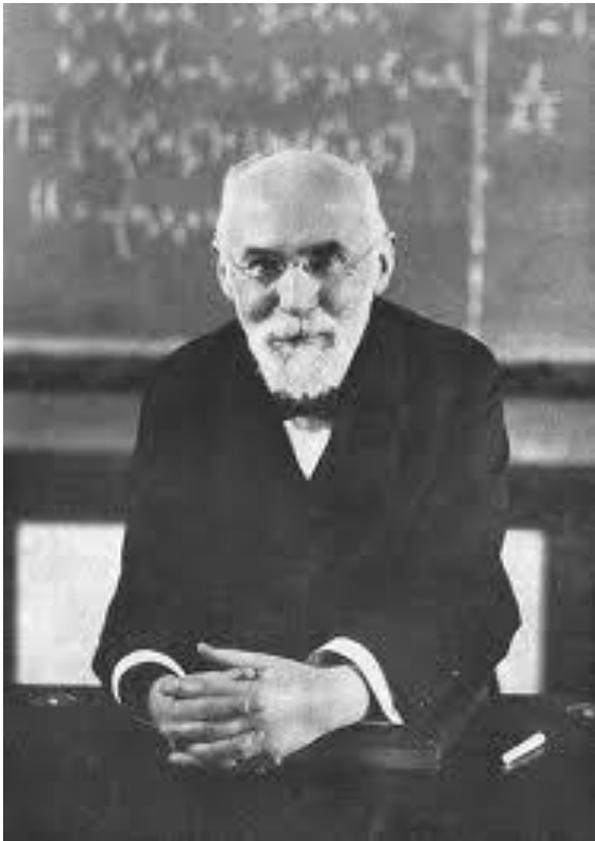
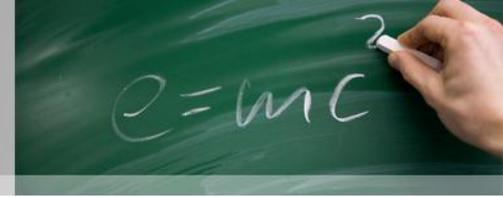
4. Sincronización de relojes y simultaneidad



La paradoja de los gemelos

- La dificultad es que Ulises no pertenece a un único SRI.
- Hay tramos en los que acelera y otros en los que frena.
- Tras emitir unos impulsos luminosos ambos acuerdan que, cuando se reúnan, el que ha sufrido aceleraciones será más joven que el que ha permanecido en casa.
- Usando partículas subatómicas, que se pueden acelerar hasta velocidades muy cercanas a c (para que $\gamma \gg 1$), la paradoja de los gemelos ha sido comprobada muchas veces.

5. Transformación de velocidades

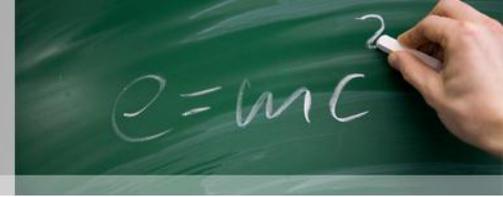


Transformación relativista de velocidades

- Derivando respecto de t las ecuaciones de la transformación de Lorentz se obtiene cómo se transforman las velocidades:

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{vu'_x}{c^2}}$$
$$u_y = \frac{u'_y}{\gamma \left(1 + \frac{vu'_x}{c^2} \right)}$$
$$u_z = \frac{u'_z}{\gamma \left(1 + \frac{vu'_x}{c^2} \right)}$$

5. Transformación de velocidades



Transformación relativista de velocidades

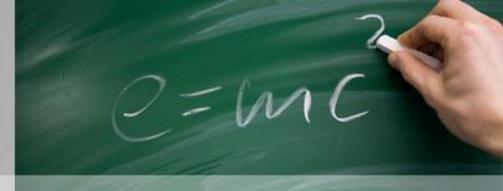
- Las ecuaciones de la transformación inversa de las velocidades son:

$$u'_x = \frac{u_x - v}{1 - \frac{vu_x}{c^2}}$$

$$u'_y = \frac{u_y}{\gamma \left(1 - \frac{vu_x}{c^2}\right)}$$

$$u'_z = \frac{u_z}{\gamma \left(1 - \frac{vu_x}{c^2}\right)}$$

6. Momento lineal relativista

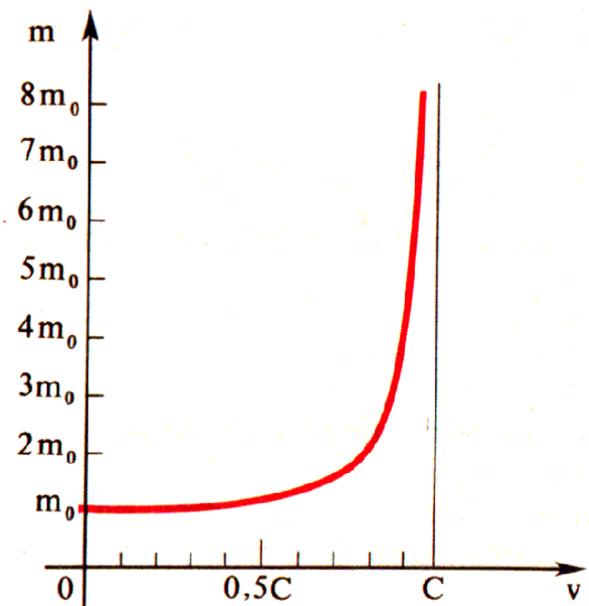
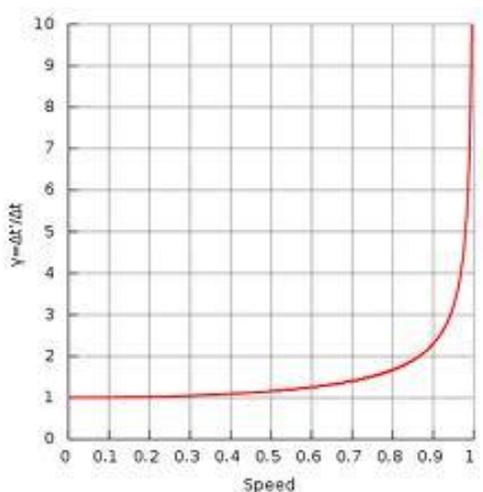


Definición de \mathbf{p}

- Los postulados de Einstein requieren también modifiquemos que nuestros conceptos sobre la masa, el momento lineal y la energía
- \mathbf{p} debe tener las siguientes propiedades:
 - Se debe conservar en las colisiones
 - Cuando $u/c \rightarrow 0$, $\mathbf{p} \rightarrow m\mathbf{u}$

$$\vec{p} = \frac{m\vec{u}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \gamma m\vec{u} = m_{rel}\vec{u}$$

6. Momento lineal relativista



Masa relativista

- En la anterior ecuación m_{rel} es la masa de la partícula cuando tiene velocidad u .
- La masa de un objeto aumenta con la velocidad, tendiendo asintóticamente a infinito cuando la velocidad se aproxima a la de la luz.
- La masa de una partícula cuando está en reposo en un SRI se denomina masa en reposo y se representa por m (a veces por m_0).

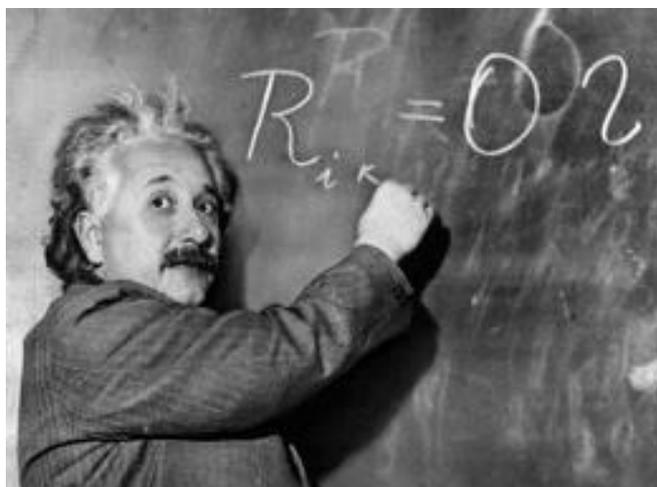
$$m_{rel} = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \gamma m$$

6. Momento lineal relativista

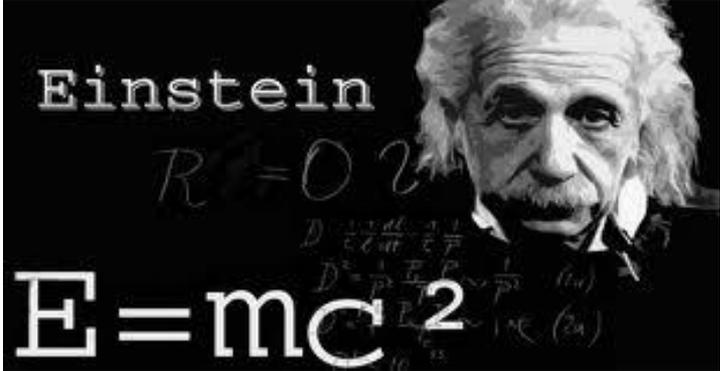
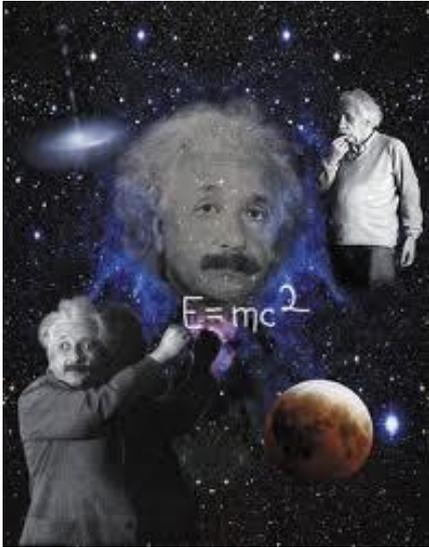
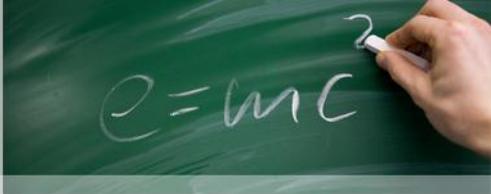


Cuadrivectores

- ✓ Si se consideran diferentes observadores en diversos sistemas de referencia surge el problema de relacionar los valores de las medidas realizadas por ambos.
- ✓ Para ello en vez de manejar vectores tridimensionales se considerarán **cuadrivectores**, vectores de cuatro dimensiones, que incluyen coordenadas espaciales y temporales.
- ✓ Esto se estudiará en cursos posteriores.



Fin de Relatividad-2

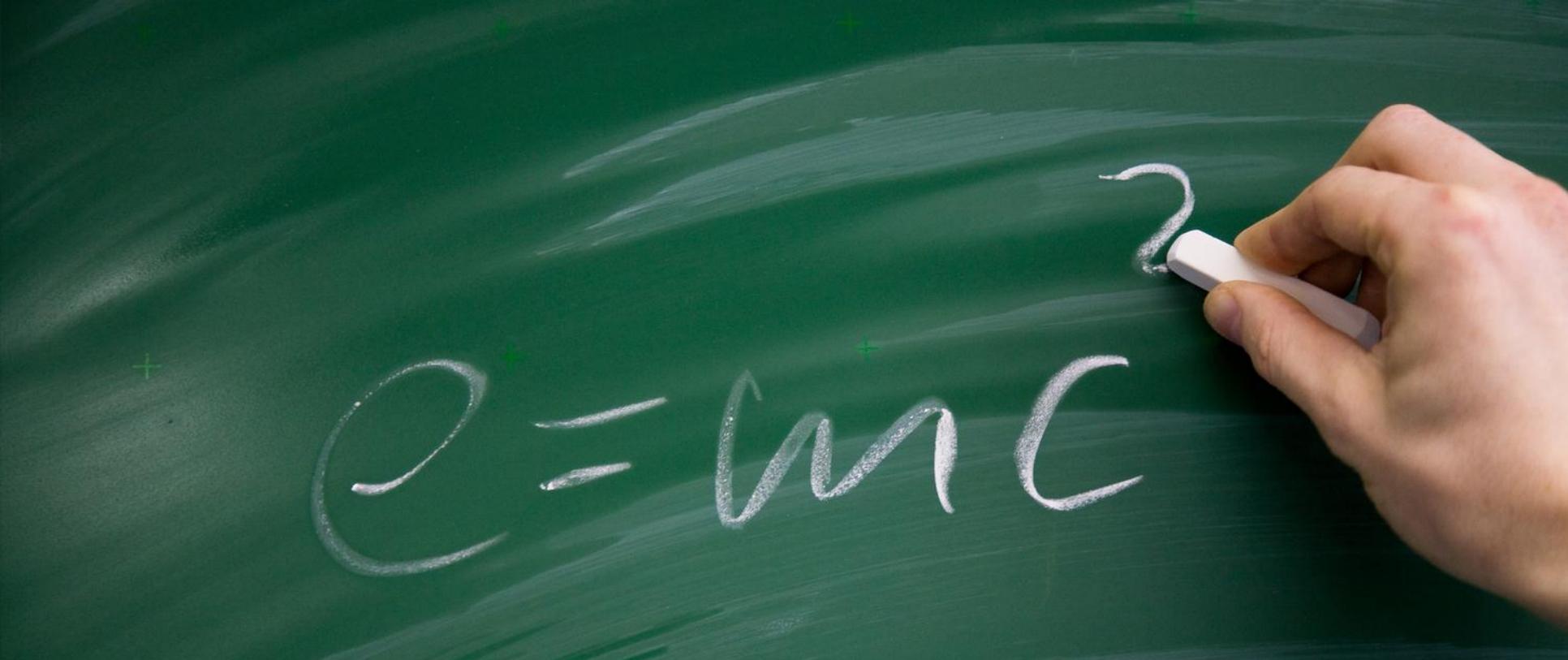




Para acabar esta segunda parte de Relatividad os dejas otras dos frases de Albert Einstein que probablemente también os hagan pensar.

Nunca pienso en el futuro. Éste llega lo suficientemente rápido

La ciencia no es más que un refinamiento del pensamiento cotidiano

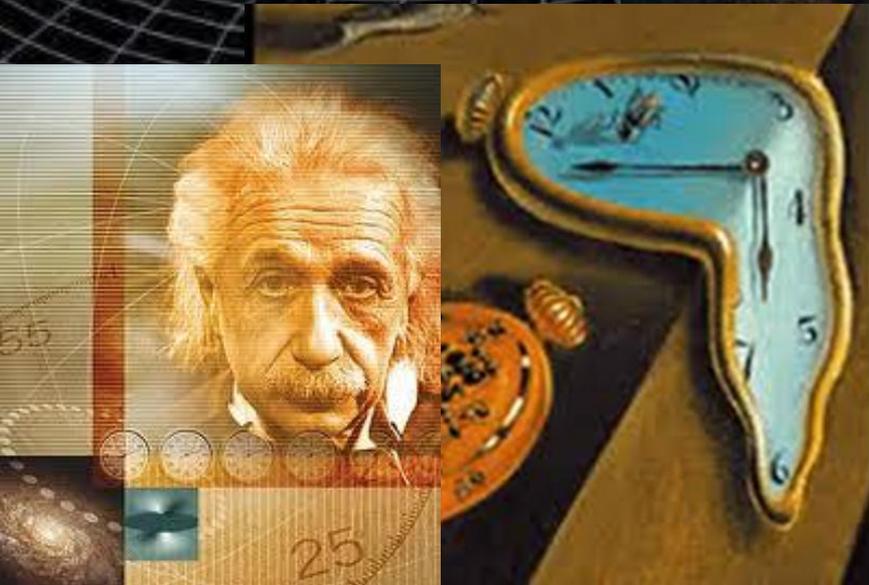
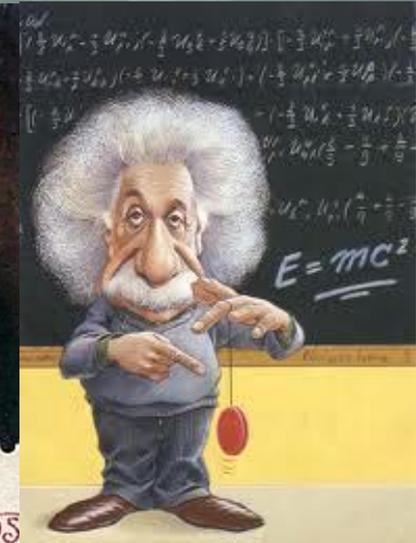
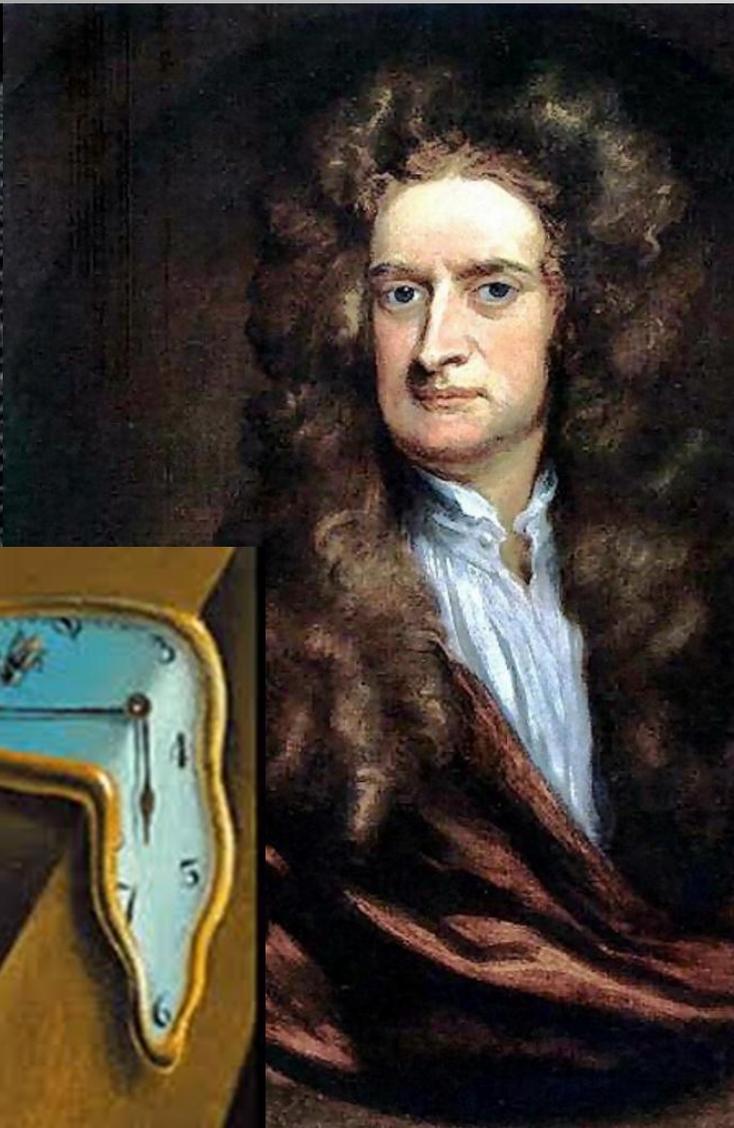
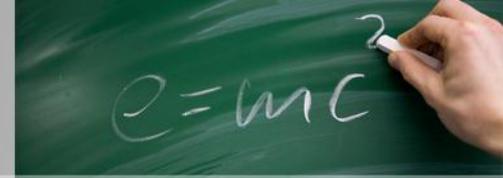

$$E = mc^2$$

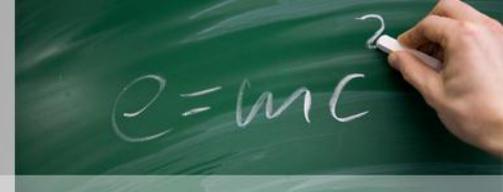
Relatividad especial
Fundamentos de la Física III
Tema 7 tercera parte (21 min)

Enrique Arribas Garde

Centro Asociado de la UNED en Albacete



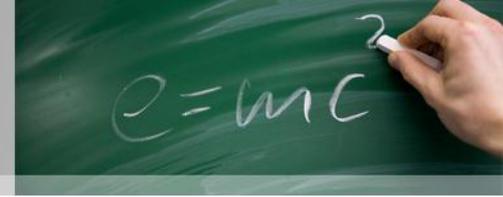




Capítulo 39 del Tipler-Mosca

- 1 Relatividad Newtoniana
- 2 Postulados de Einstein
- 3 La Transformación de Lorentz
- 4 Sincronización de relojes y simultaneidad
- 5 Transformación de velocidades
- 6 Momento lineal relativista
- 7 Energía Relativista
- 8 Relatividad general

7. Energía relativista



Energía en reposo

- La energía en reposo de una partícula de masa m se define como

$$E_0=mc^2$$

- Como las energías en reposo de las partículas elementales son pequeñas se expresan habitualmente en eV, keV o MeV.

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

- La masa se suele medir en MeV/c^2 .

7. Energía relativista

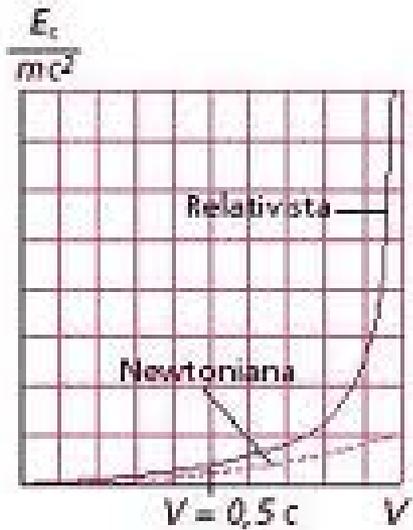


Table 39-1

Rest Energies of Some Elementary Particles and Light Nuclei

Particle	Symbol	Rest energy, MeV
Photon	γ	0
Electron (positron)	e or e^{-} (e^{+})	0.5110
Muon	μ^{\pm}	105.7
Pion	π^0	135.0
	π^{\pm}	139.6
Proton	${}^1\text{H}$ or p	938.272
Neutron	n	939.565
Deuteron	${}^2\text{H}$ or d	1875.613
Triton	${}^3\text{H}$ or t	2808.920
Helion	${}^3\text{He}$ or h	2808.391
Alpha particle	${}^4\text{He}$ or α	3727.379

7. Energía relativista

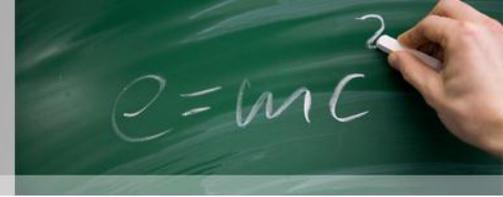


Energía cinética relativista

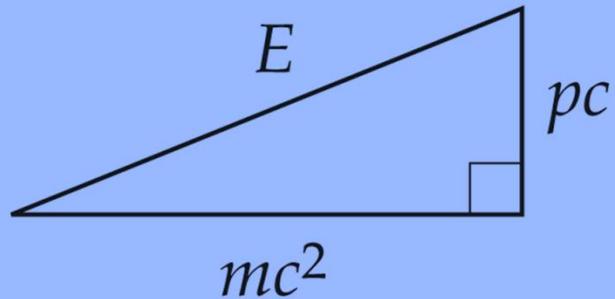
- La energía total relativista de una partícula de masa m tiene dos términos.
 - Uno que tiene que ver con la energía cinética
 - El otro con la energía en reposo

$$E = K + mc^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

7. Energía relativista



$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$$

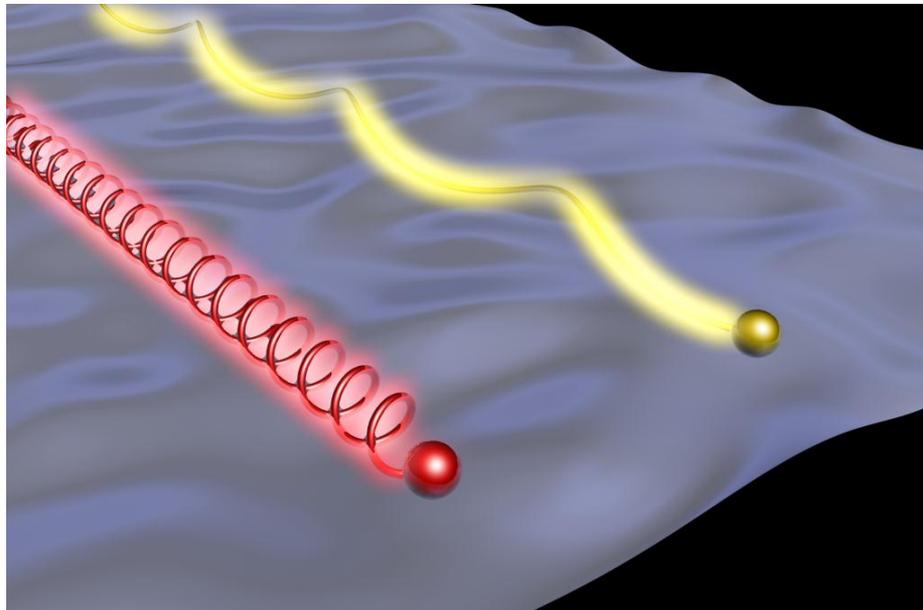
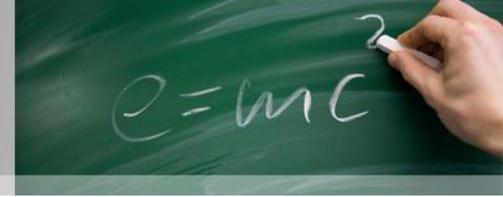


Energía relativista y momento lineal

- Se cumple la siguiente relación entre la energía total, el momento lineal y la energía en reposo:

$$E = \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2}$$

7. Energía relativista



Energía de los fotones

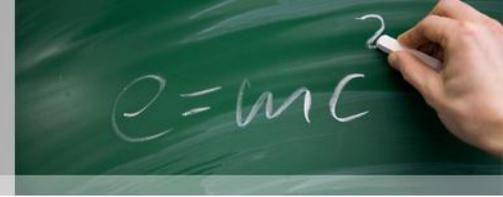
- Si la energía de una partícula es mucho mayor que su energía en reposo podemos despreciar mc^2 frente a pc y queda

$$E \approx pc \text{ cuando } E \gg mc^2$$

- Esta ecuación es exacta para los fotones, porque su masa en reposo es nula

$$\text{Fotones} \Rightarrow E=pc$$

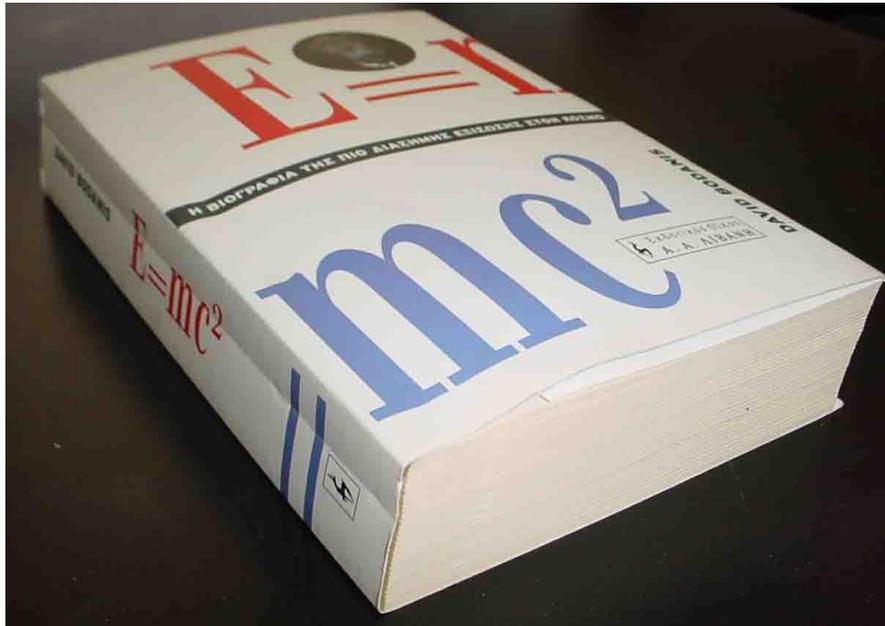
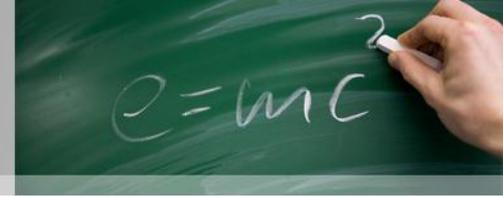
7. Energía relativista



Masa y energía

- Cualquier partícula estable compuesta por otras (núcleo de helio, deuterón, ...) tiene una masa y una energía en reposo menor que la suma de las masas y energía en reposo de sus componentes.
- La diferencia de energías en reposo es la energía de enlace la partícula compuesta.

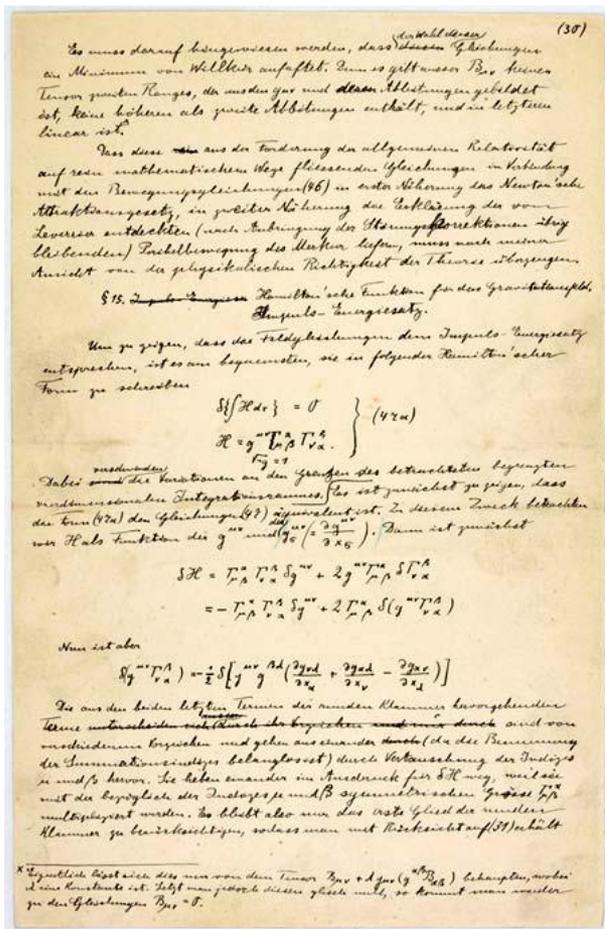
7. Energía relativista



Leyes de conservación

- Las energías de enlace de los átomos y moléculas son del orden del eV.
- Las energías de enlace de los núcleos son del orden del MeV.
- La energía total del sistema se conserva.

8. Relatividad General (TRG)



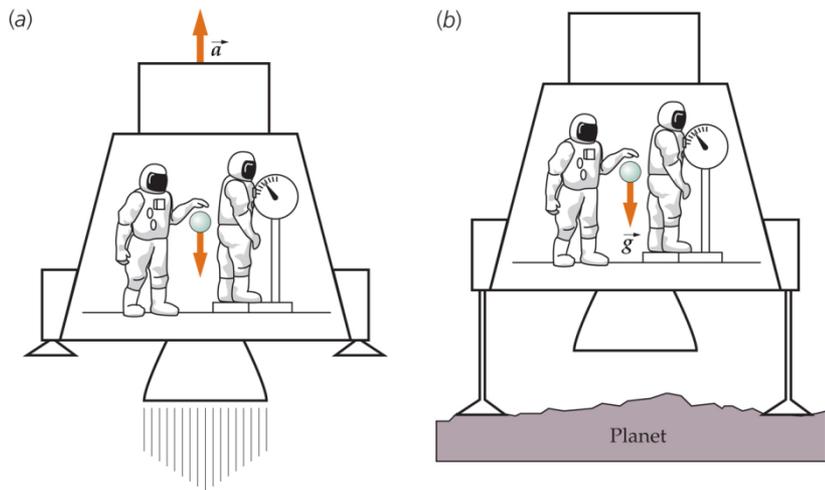
TRG

- En 1916 Einstein publicó su Teoría de la Relatividad General para poder incluir a los SRNI.
- La complejidad matemática de la TRG es bastante elevada.
- Es realmente difícil de comprobar experimentalmente.

8. Relatividad General



Esta parte es opcional, no va incluida en el temario, pero es tan bonita ...



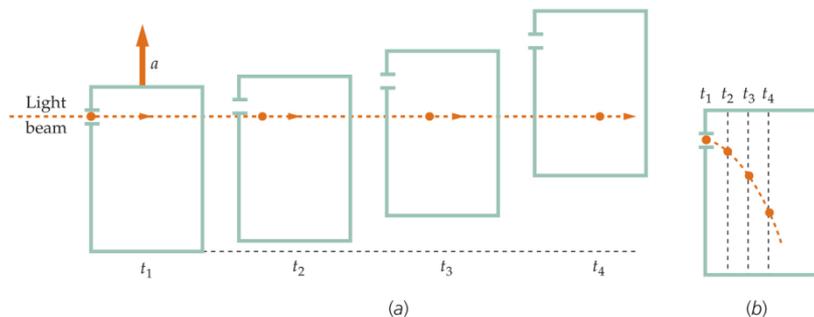
Ambos experimentos, (a) y en (b), darán los mismos resultados si el módulo de a coincide con el módulo de g .

Principio de equivalencia

Un campo gravitatorio homogéneo es completamente equivalente a un SR uniformemente acelerado

- La masa inercial y la masa gravitacional son iguales.
- El principio de equivalencia se aplica todas las ramas de la Física y no sólo a la Mecánica.

8. Relatividad General

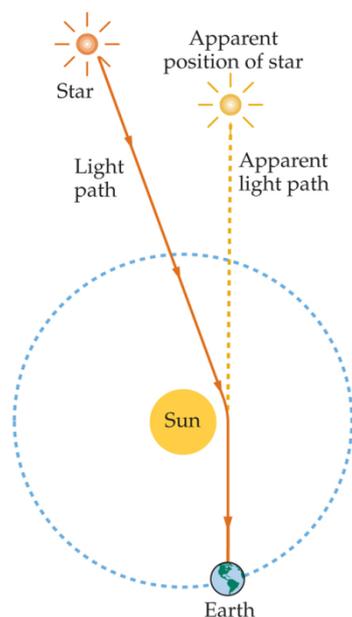


En el SR del compartimento, el haz de luz se desvía, siguiendo una trayectoria parabólica, como si fuera una caída libre.

La luz en un campo gravitatorio

- Veamos una consecuencia del principio de equivalencia.
- **Un haz de luz se desvía dentro de un campo gravitatorio.**
- Se comprobó experimentalmente.
- El compartimento acelera uniformemente hacia arriba respecto de un SR en caída libre.
- La luz se mueve en línea recta en ese SR.
- Desde el punto de vista del compartimento la luz describe una trayectoria parabólica, como una pelota.

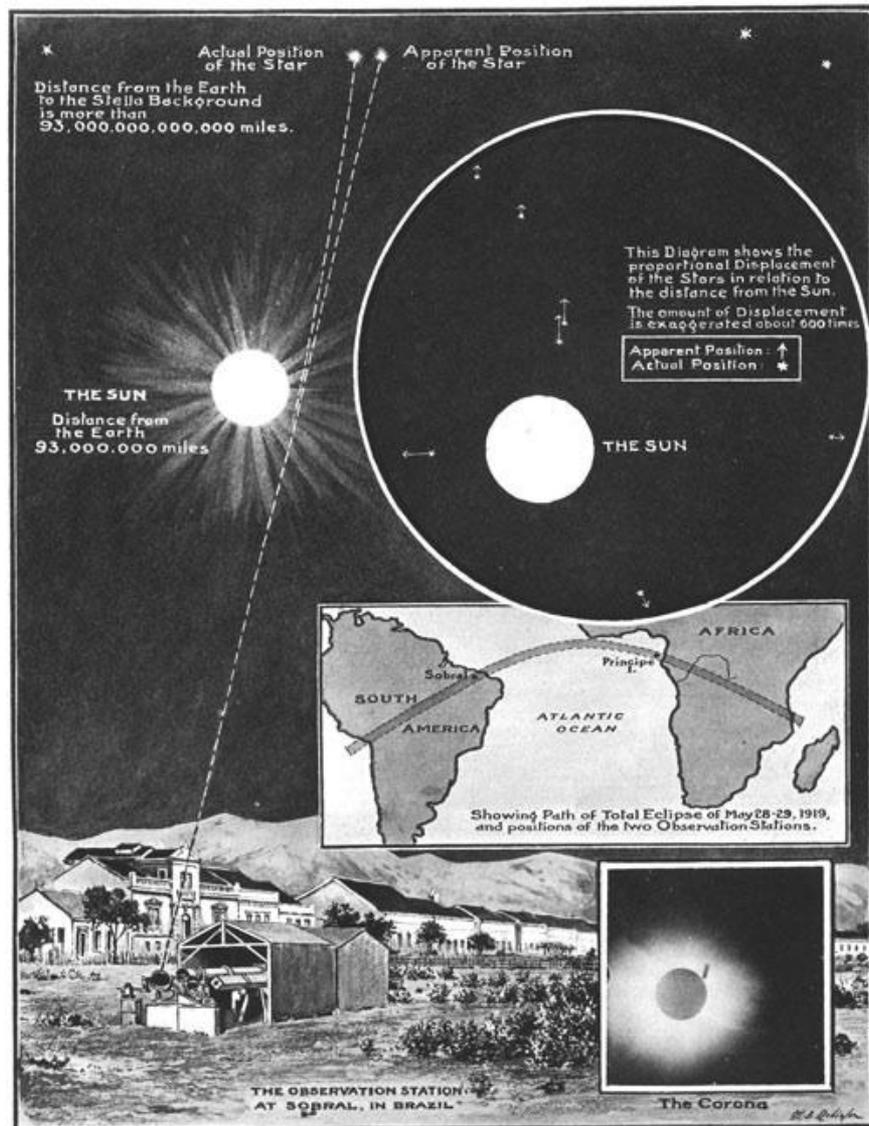
8. Relatividad General



La luz en un campo gravitatorio

- Einstein predijo que la desviación de la luz en un campo gravitatorio podría observarse cuando la luz de una estrella lejana pasara cerca del Sol.
- Debido al brillo del Sol este fenómeno no puede verse normalmente.
- Pero durante un eclipse sí podría observarse esta desviación.
- En **1919** se realizó esta observación durante un eclipse de Sol.
- Los periódicos de todo el mundo dieron la noticia y Einstein pasó a tener fama mundial.

8. Relatividad General



GIVEN THE SPEED, TIME IS NAUGHT

If Man Moved with the Velocity of Light He Might Remain Unchanged for 1,000 Years.

THE THEORY OF RELATIVITY

Among Other Things, it Makes Simultaneity of Two Widely Separated Events Impossible.

EINSTEIN EXPOUNDS HIS NEW THEORY

It Discards Absolute Time and Space, Recognizing Them Only as Related to Moving Systems.

IMPROVES ON NEWTON

Whose Approximations Hold for Most Motions, but Not Those of the Highest Velocity.

INSPIRED AS NEWTON WAS

But by the Fall of a Man from a Roof instead of the Fall of an Apple.

ECLIPSE SHOWED GRAVITY VARIATION

Deviation of Light Rays Accepted as Affecting Newton's Principles.

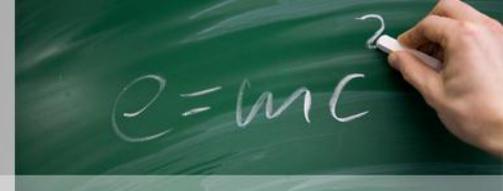
MAILED AS EPOCHMAKING

British Scientist Calls the Discovery One of the Greatest of Human Achievements.

New York Times articles, clockwise, from top — Dec. 7, 1919; Nov. 9, 1919; & Dec. 3, 1919.

Nota sobre Einstein publicada en The New York Times en 1919.

8. Relatividad General



Perihelio de Mercurio



- La segunda predicción de la TRG es el exceso de precesión del perihelio de la órbita del planeta **Mercurio**.
- Es un valor muy pequeño: 0.01° cada siglo.
- Este efecto era conocido desde hacía tiempo; pero no había podido ser explicado.
- Fue otro éxito de la TGR.

8. Relatividad General



Desplazamiento gravitatorio hacia el rojo

- La tercera predicción de la TGR fue lo que se denomina desplazamiento gravitatorio hacia el rojo o “gravitational redshift”.
- El potencial gravitatorio cerca de una masa M es $\varphi = -\frac{GM}{r}$ si tomamos como nivel de energía potencial nula el infinito.
- Según la TGR **los relojes marchan más lentos en las regiones de potencial más bajo**, en este caso, cerca de la masa M .

8. Relatividad General

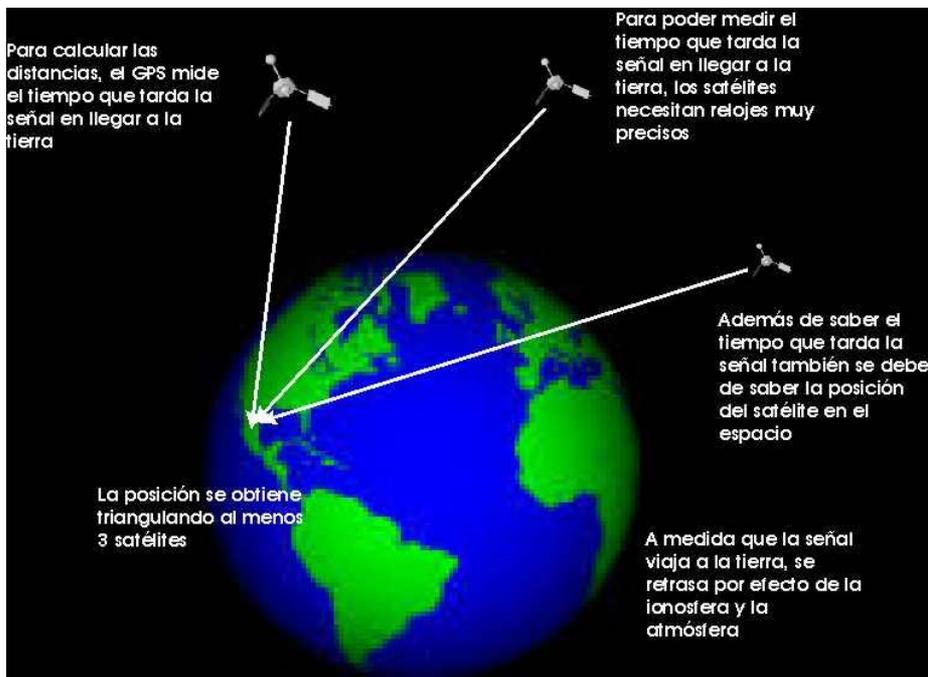


En 1976 se puso en órbita este reloj (dentro de una satélite a 10000 km) y sus medidas se comparaban con otro idéntico en la Tierra. Cumpliendo las predicciones de la TGR, **el reloj terrestre atrasaba 0.43 ns cada s respecto al reloj del satélite.**

Desplazamiento gravitatorio hacia el rojo

- Como un átomo vibrando puede considerarse como un reloj, su frecuencia de vibración será menor cerca del Sol, que la del mismo átomo sobre la superficie de la Tierra.
- Este desplazamiento hacia las frecuencias más bajas (longitudes de onda mayores) es lo que se denomina desplazamiento gravitatorio hacia el rojo.

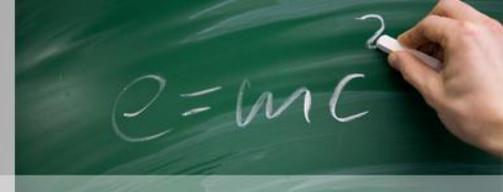
8. Relatividad General



GPS

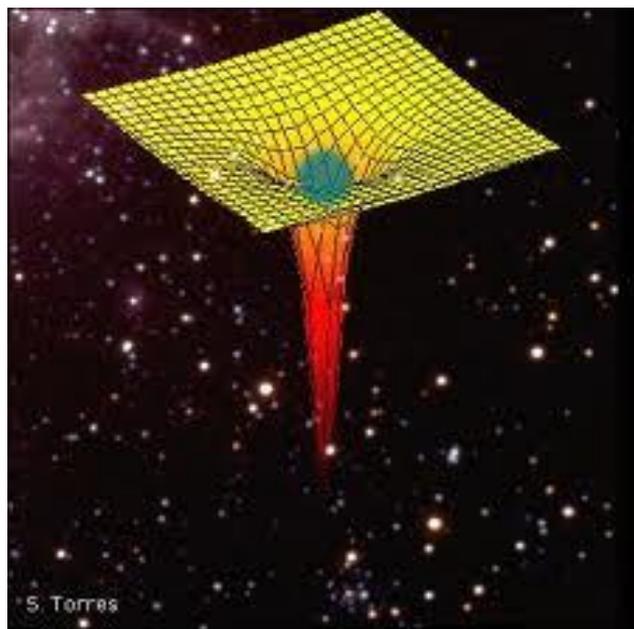
- La TGR juega un papel crucial en los **Sistemas de Posicionamiento Global (GPS)**.
- El corazón de un sistema de GPS es un conjunto de más de 12 satélites colocados en unas órbitas muy precisas.
- Cada satélite emite una señal muy precisa y un receptor (GPS) capta simultáneamente las señales procedentes de varios satélites.
- El receptor calcula la diferencia temporal entre las señales y usa esa información para calcular su propia posición.

8. Relatividad General



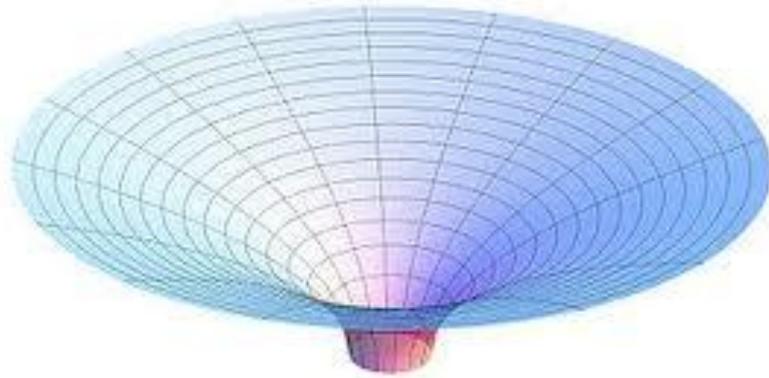
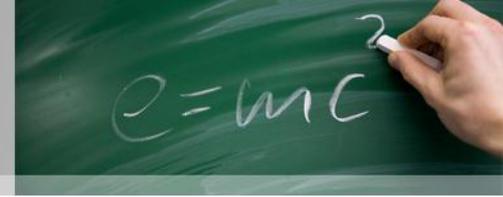
GPS

- Para poder hacer unos cálculos muy precisos hay que tener en cuenta las correcciones relativistas:
 - **Teoría Especial de la Relatividad:** los satélites se están moviendo respecto al receptor.
 - **Teoría General de la Relatividad:** los satélites se mueven en zonas de potencial gravitatorio mayor que el receptor.
- Estas correcciones son pequeñas (menos de una parte en 10^9) pero son cruciales en la precisión del GPS.



Agujeros negros

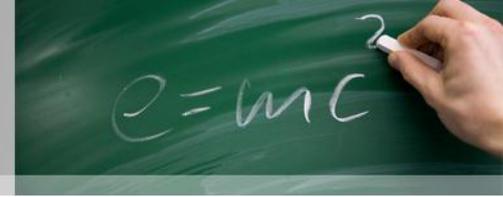
- La cuarta predicción de la TGR fueron los **agujeros negros** introducidos por R. Oppenheimer y H. Snyder en **1939**.
- Si la densidad de un objeto es suficientemente grande, la atracción gravitatoria es tan enorme que una vez que estemos a una distancia menor que el denominado **radio de Schwarzschild** nada puede escapar de su acción, ni siquiera las ondas electromagnéticas, ni siquiera la luz.
- Nada de lo que ocurra en su interior puede ser comunicado al exterior.



Agujeros negros

- El radio de Schwarzschild de un agujero negro de masa M vale
 - $R_S = \frac{2GM}{c^2}$
- Los agujeros negros son muy difíciles de detectar porque no emiten nada.
- Si un agujero negro forma la pareja de una estrella normal, en lo que se denomina **sistema binario**, puede detectarse indirectamente.
- En el centro de nuestra Vía Láctea hay un agujero negro con una masa que vale unos dos millones de veces la masa del Sol.

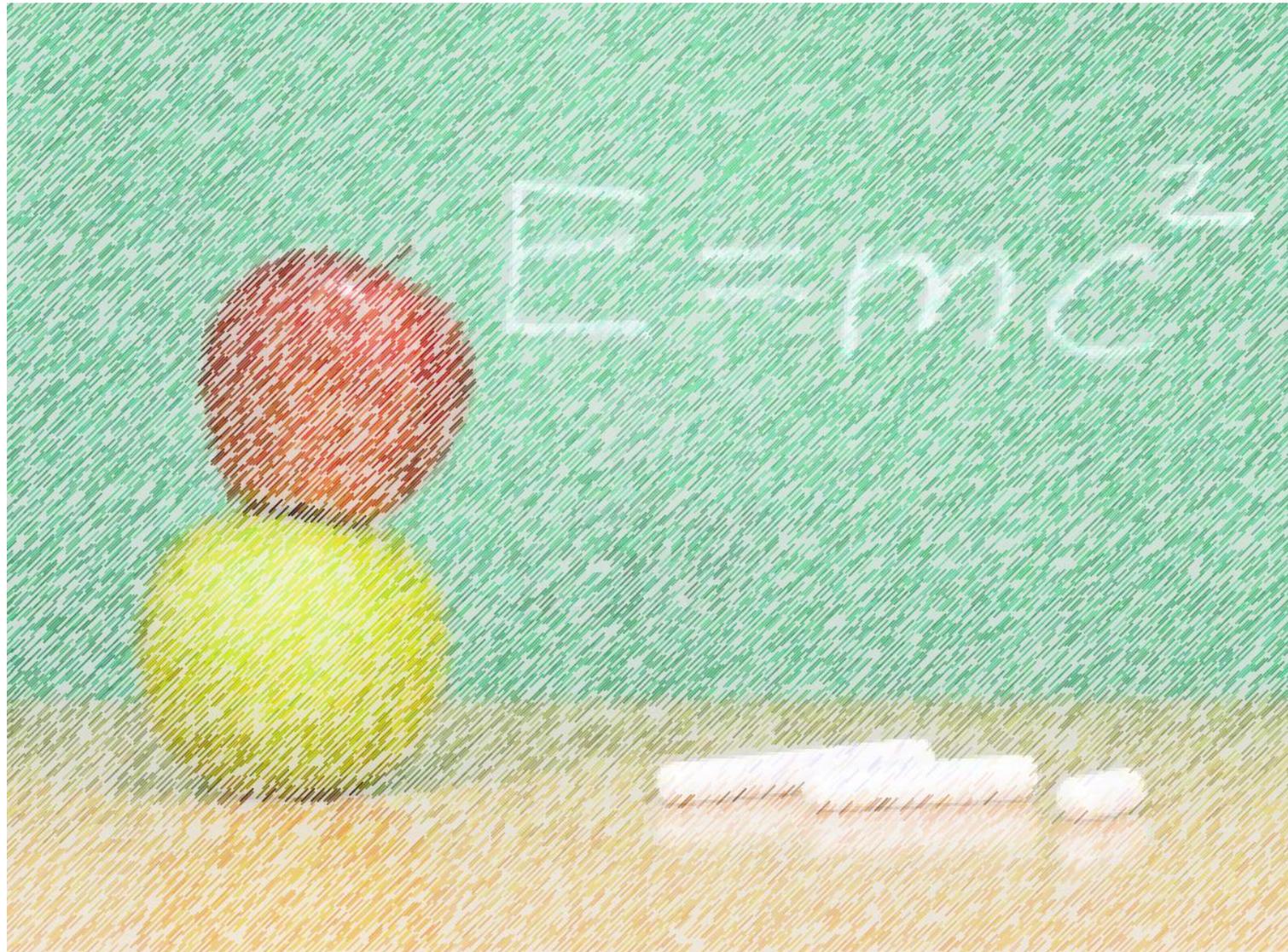
8. Relatividad General



Agujeros negros

- Hay cantidad ingente de trabajo y de Física en todo lo que hemos comentado y en lo que nos hemos callado.
- La persona interesada puede encontrar mucha información sobre estos temas.

Fin de la tercera parte de la presentación





Para acabar esta tercera y última parte de Relatividad os dejas otras dos frases de Albert Einstein que probablemente también os hagan pensar.

Cada día sabemos más y entendemos menos

¿Qué sabe el pez del agua donde nada toda su vida?