


$$E = mc^2$$

# Relatividad especial

## Fundamentos de la Física III

Tema 7 primera parte (26:52 min)

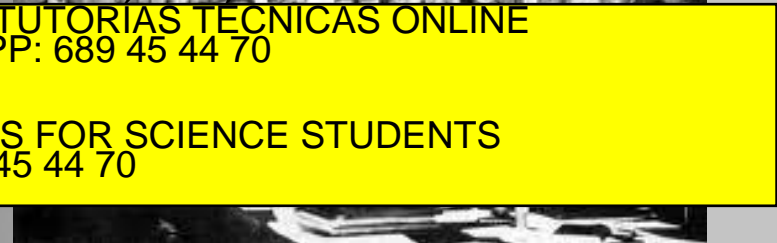
**Cartagena99**

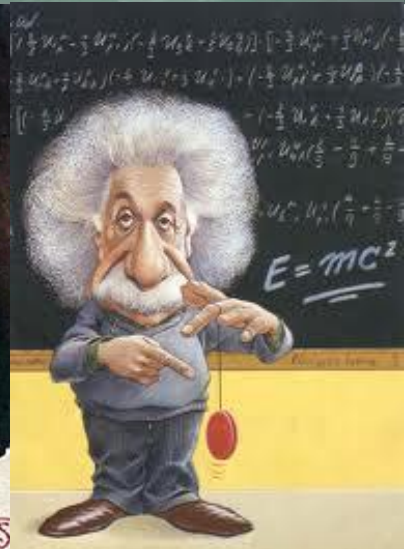


CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70





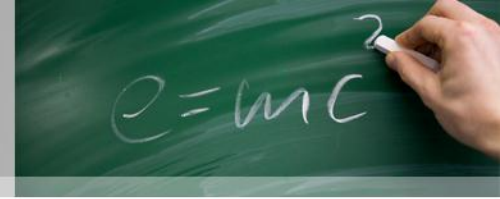
# Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70





## 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

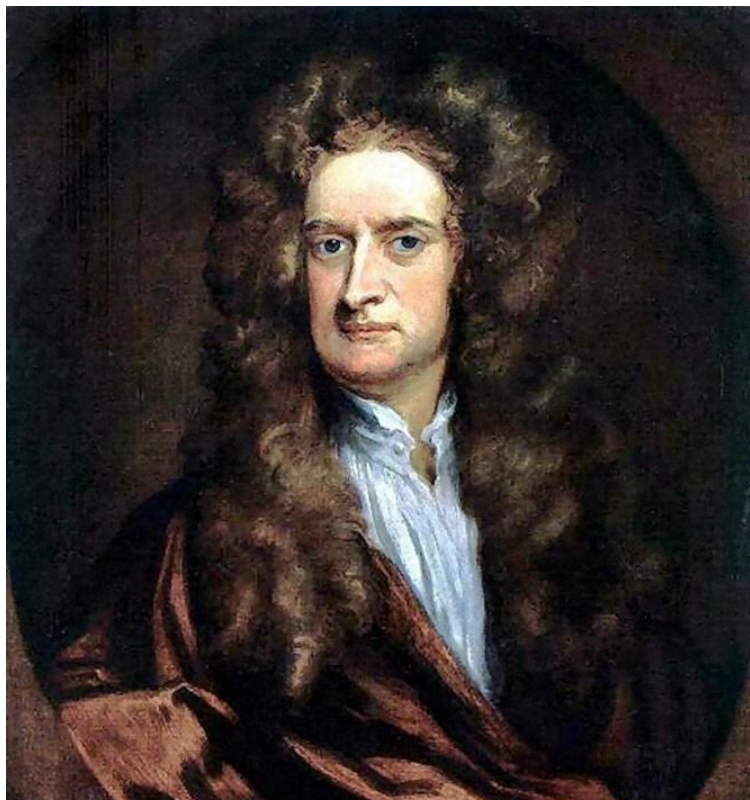
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# 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

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# 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

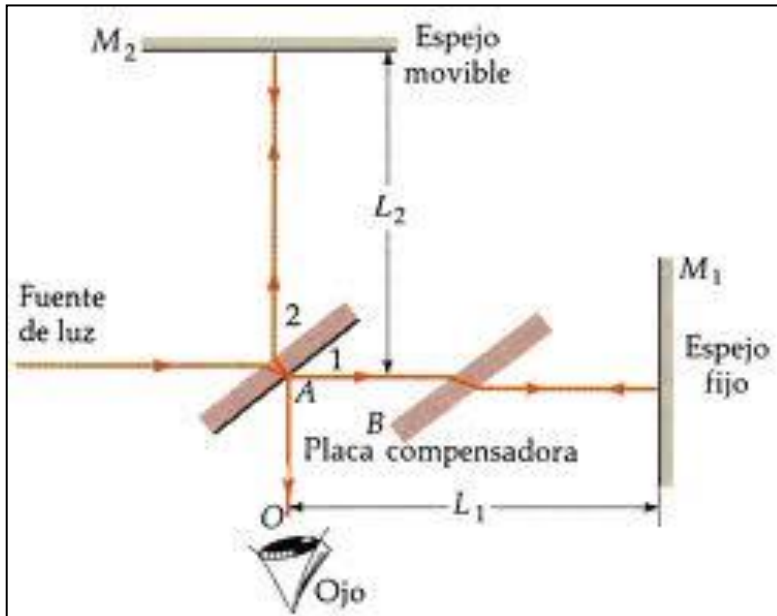
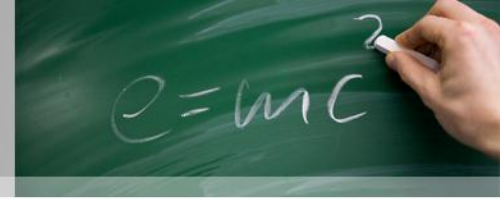
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# 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.

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



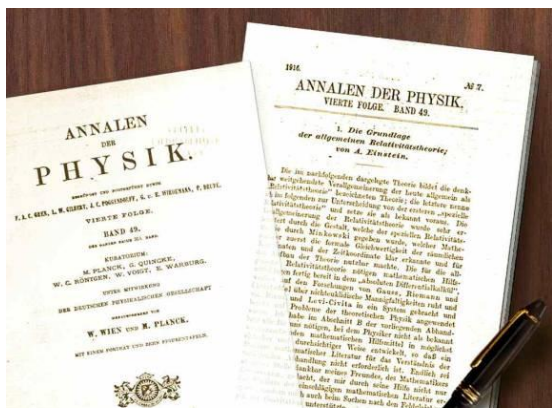
# 2. Postulados de Einstein



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 sinoras 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  $c = 3.00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

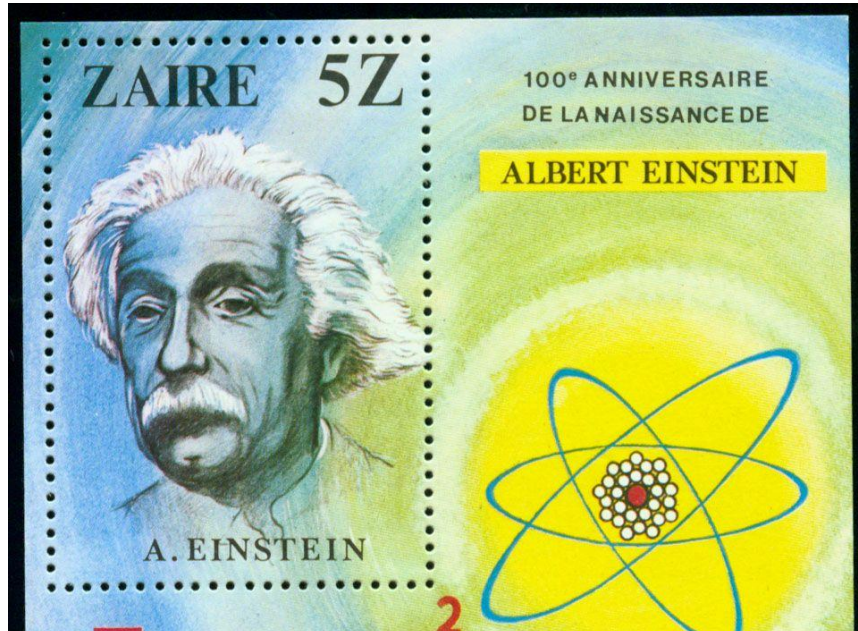
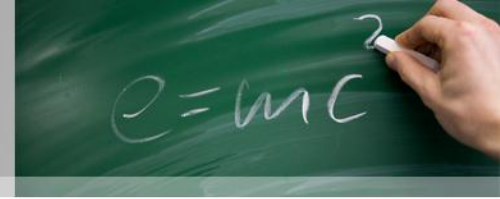
---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# Cartagena99

Enrique Arribas Garde

## 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.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

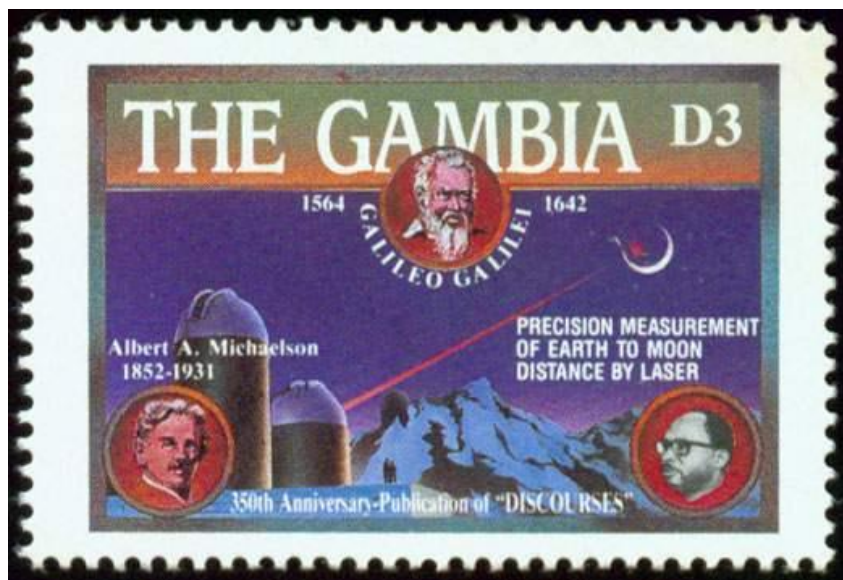
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

Enrique Arribas Garde



## 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.

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

## 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

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# 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

Cartagena99

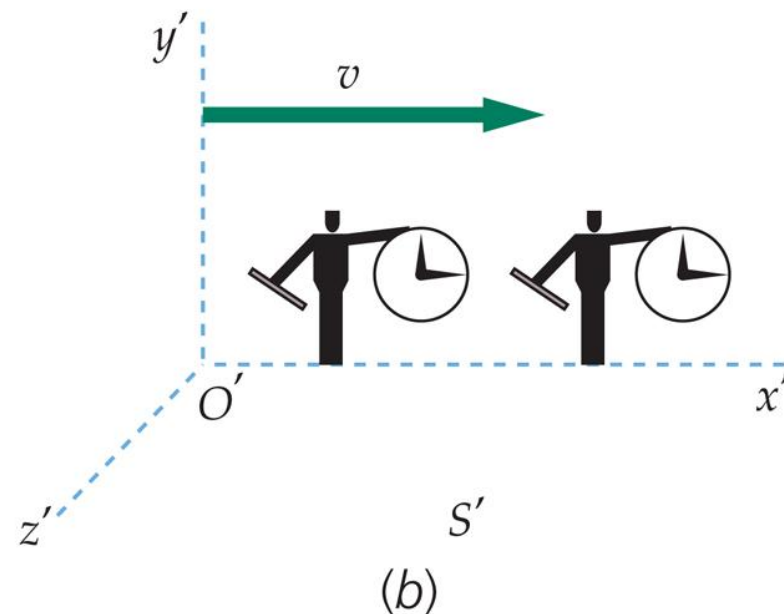
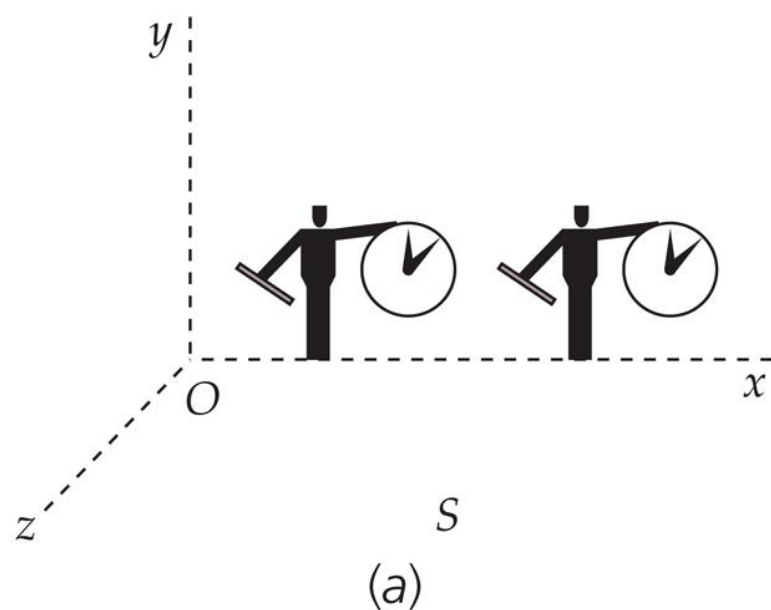
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



# 3. La transformación de Lorentz



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# 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
- $x' = x - vt$
- $y' = y$
- $z' = z$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# 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.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99



### 3. La transformación de Lorentz



#### Transformación de Lorentz

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

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

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

$$y = y'$$

$$z = z'$$

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

- $\gamma \geq 1$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

# 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

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

# 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  $\Delta t_p$ .
- El intervalo de tiempo medido en otro SR es siempre más largo.
- $\Delta t = \gamma \Delta t_p$



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

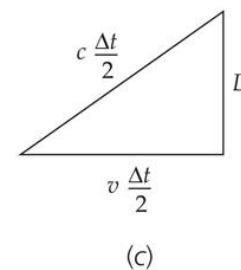
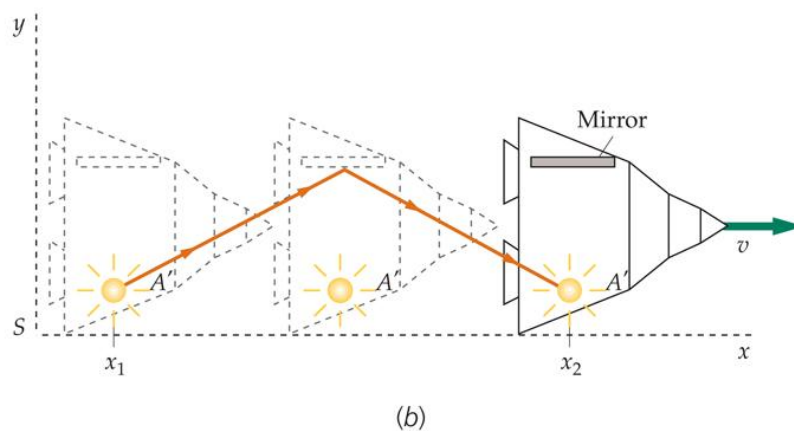
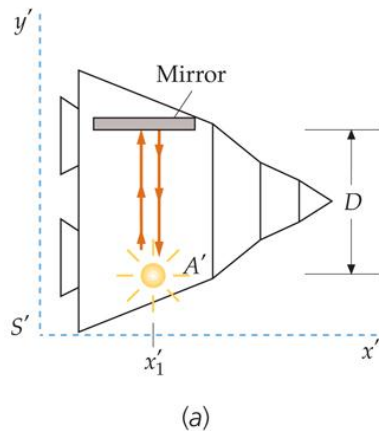
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



# 3. La transformación de Lorentz



## Dilatación del tiempo



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

El observador A en S mide un tiempo mayor

Triángulo rectángulo usado en S



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70  
 - - -  
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Enrique Arribas Garde

# 3. La transformación de Lorentz



## 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

Los transeúntes quietos ven la contracción de longitudes en el ciclista

Cartagena99

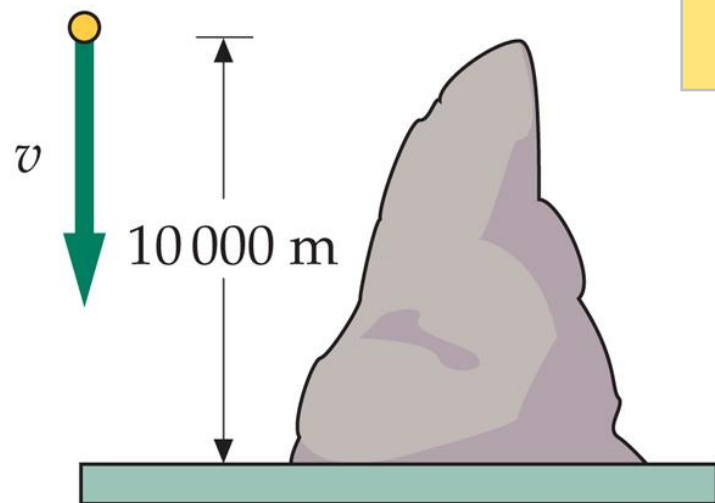
CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70  
- - -  
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# 3. La transformación de Lorentz



## Contracción de longitudes

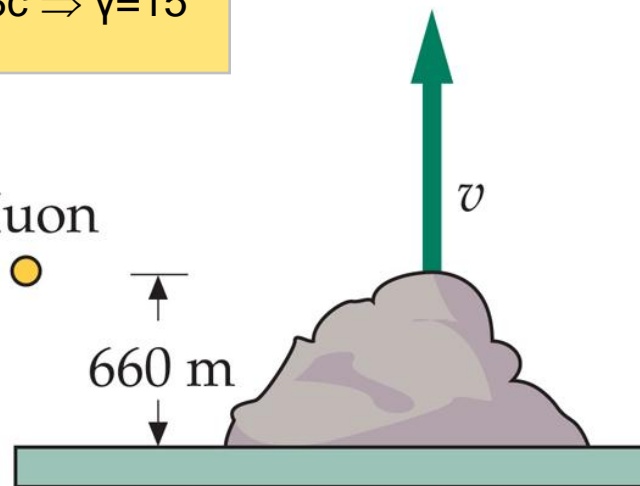
Muon



(a)

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

Muon



(b)

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

Enrique Arribas Garde



# 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.

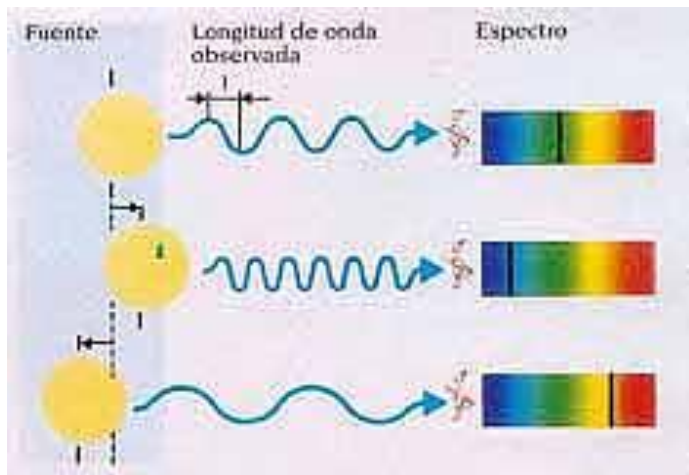
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# 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**

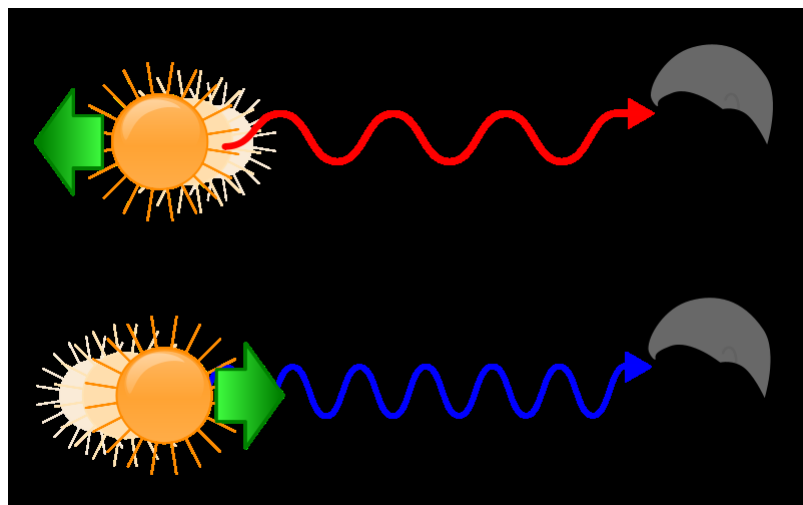
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

### 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

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

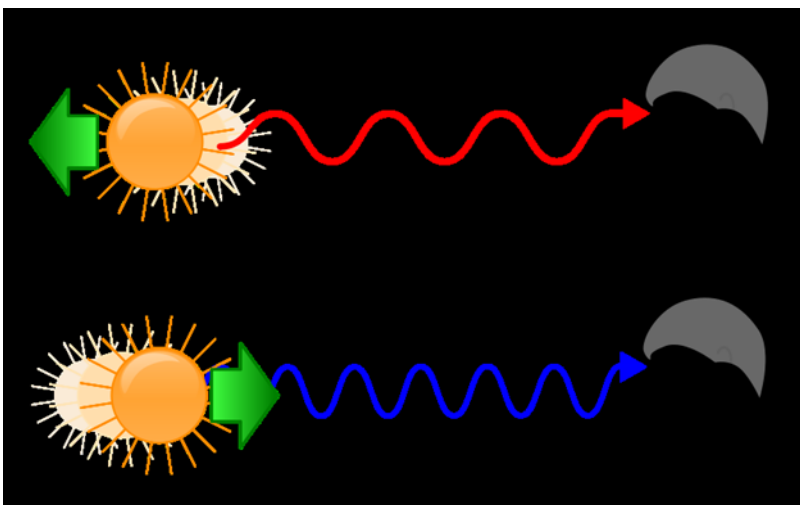
---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99



# 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

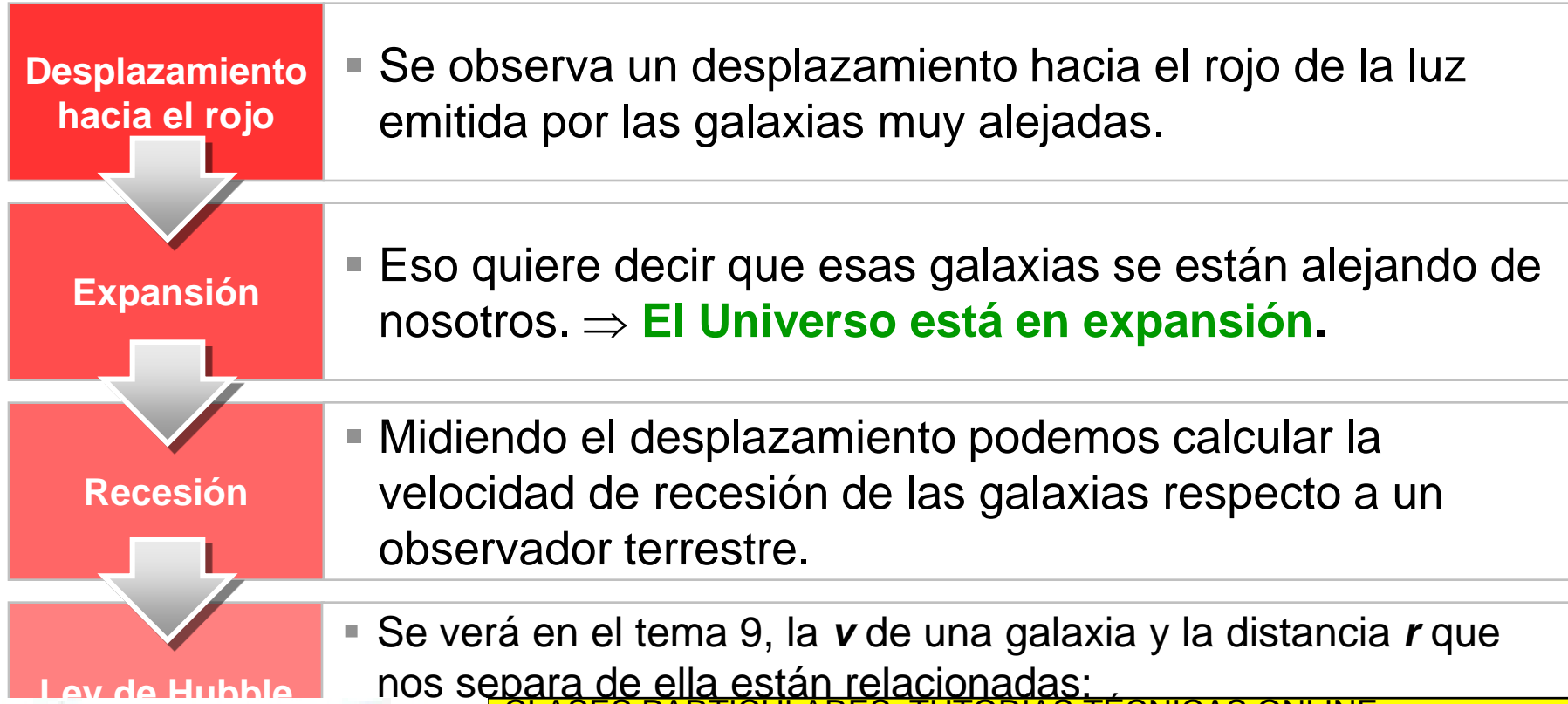
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

### 3. La transformación de Lorentz



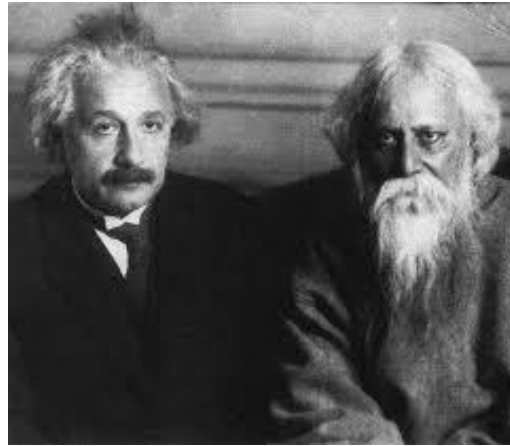
CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

# Fin de Relatividad-1



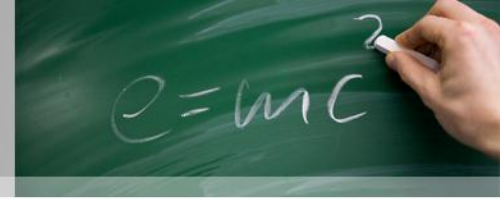
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# Fin de Relatividad-1



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**

**Cartagena99**

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70




$$E = mc^2$$

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

**Cartagena99**

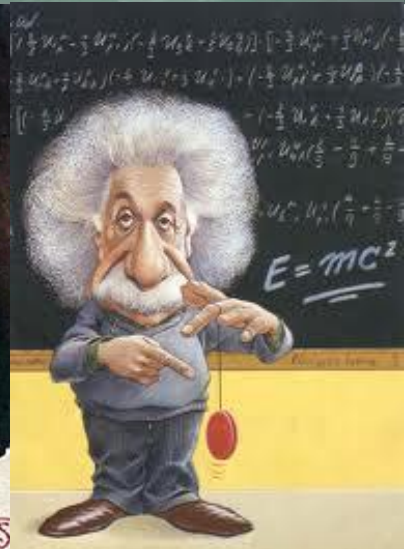


**CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE**  
**LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70**

---

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS**  
**CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70**





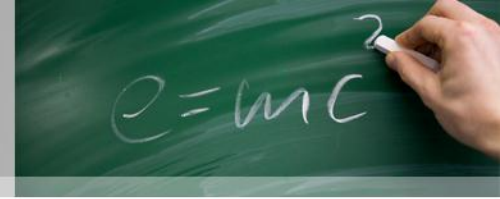
# Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70





## 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

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# 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 mueva respecto al primero.
- La simultaneidad no es una relación absoluta.
- Esta creencia intuitiva y errónea es muy



Cartagena99

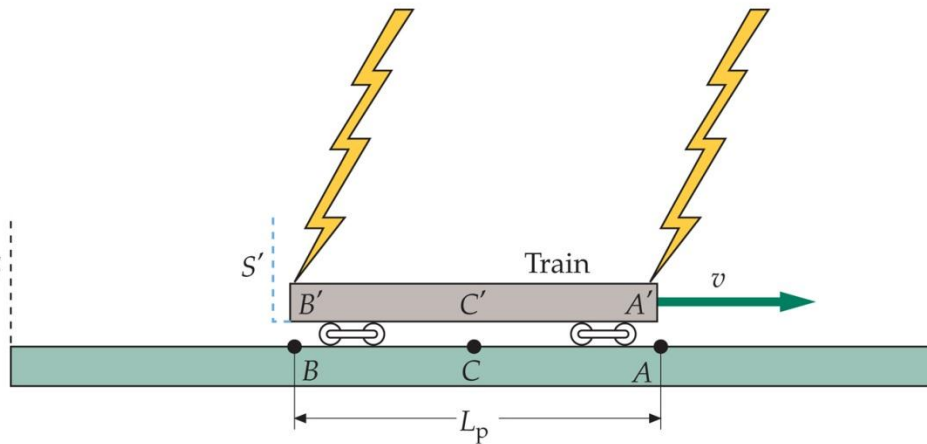
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



# 4. Sincronización de relojes y simultaneidad



La luz de estos dos rayos simultáneos alcanza, al mismo

## 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

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

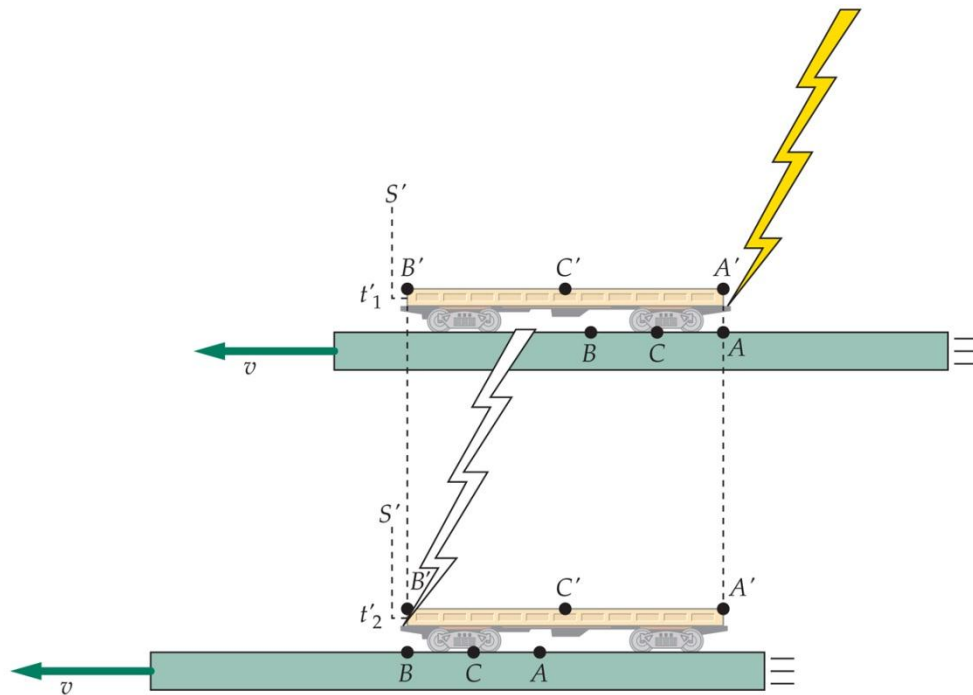
---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

Enrique Arribas Garde

# 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.

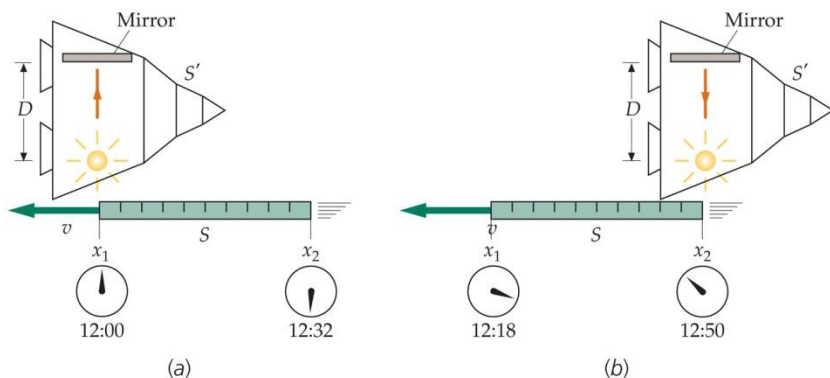
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

# 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

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

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

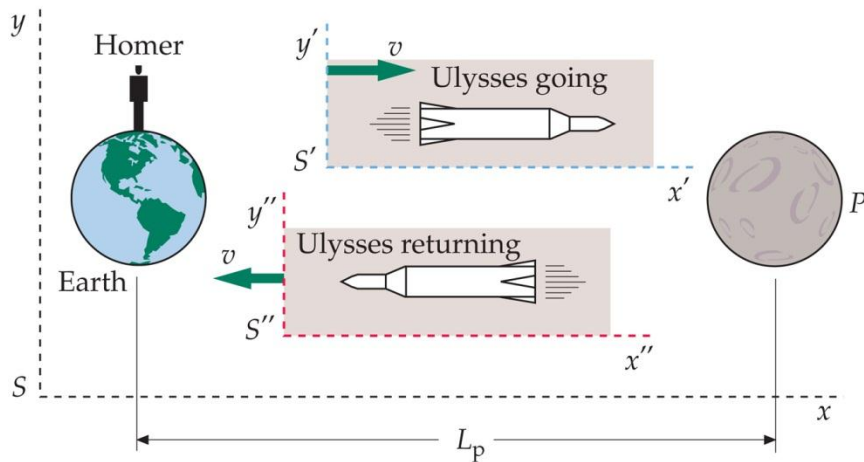
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

# 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.

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

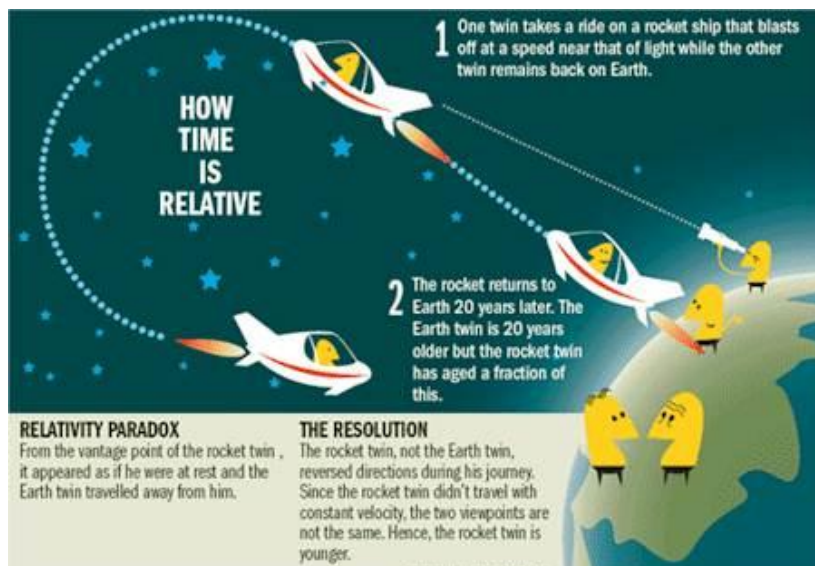


# 4. Sincronización de relojes y simultaneidad



## 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.**



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

# 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.**

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

# 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

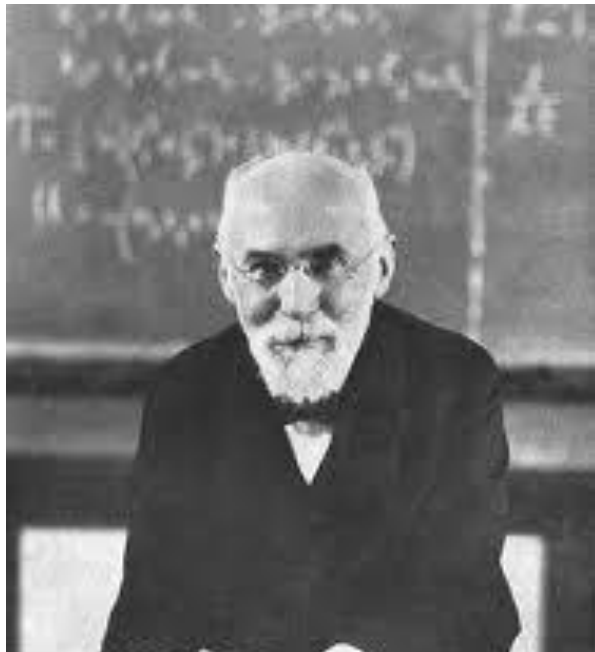
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

# 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:

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

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



# 5. Transformación de velocidades



## Transformación relativista de velocidades

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

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

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

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

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

## 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  $u/c \rightarrow 0$ ,  $\mathbf{p} \rightarrow m\mathbf{u}$

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

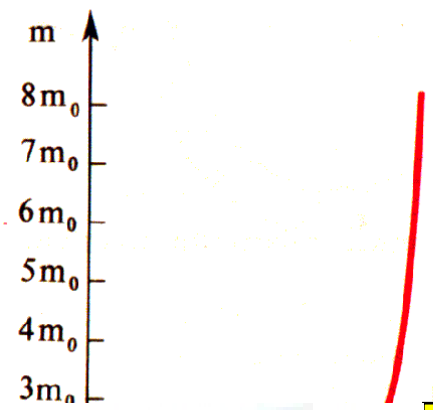
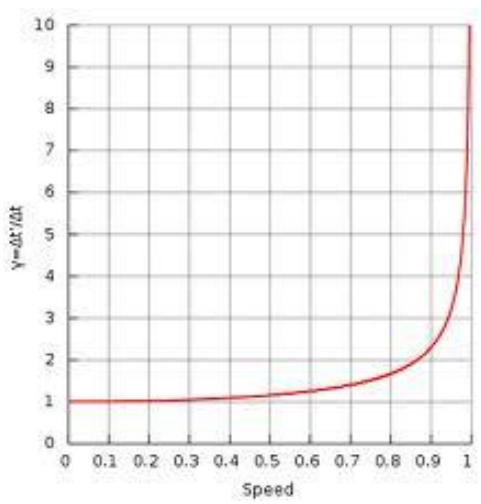
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

# 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  $m_0$ ).

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

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

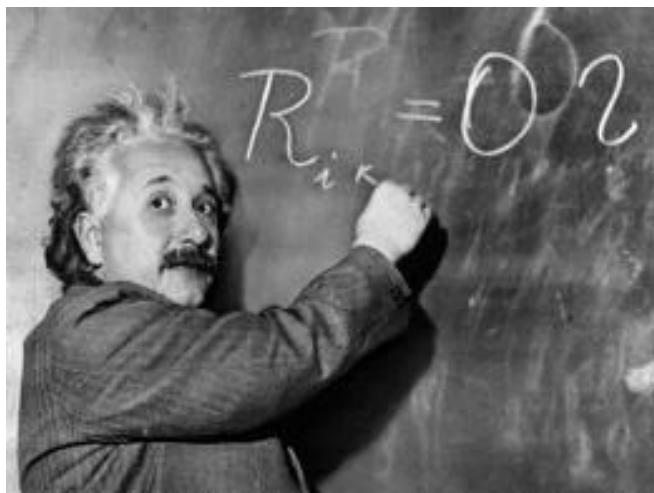
Enrique Arribas Garde

## 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.



Cartagena99

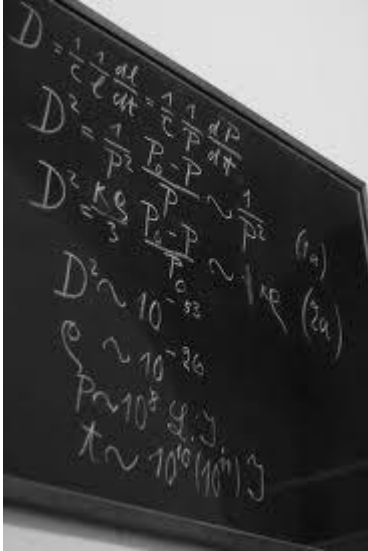
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



# Fin de Relatividad-2

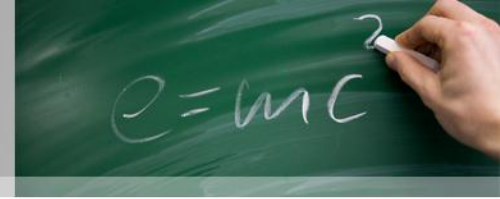


Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



Para acabar esta segunda parte de Relatividad os dejos 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**

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70


$$E = mc^2$$

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

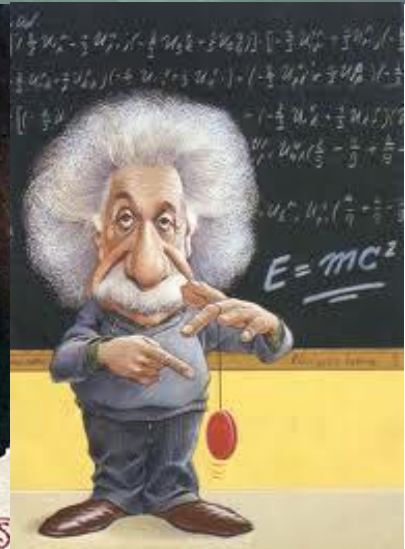
**Cartagena99**



CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

---  
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70





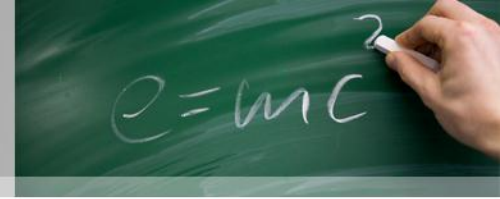
# Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70





## 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

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# 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  $\text{MeV}/c^2$ .

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

# 7. Energía relativista



**Table 39-1**

**Rest Energies of Some Elementary Particles and Light Nuclei**

Particle	Symbol	Rest energy, MeV
Photon	$\gamma$	0
Electron (positron)	$e$ or $e^-$ ( $e^+$ )	0.5110
Muon	$\mu^\pm$	105.7
Pion	$\pi^0$	135.0
	$\pi^\pm$	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

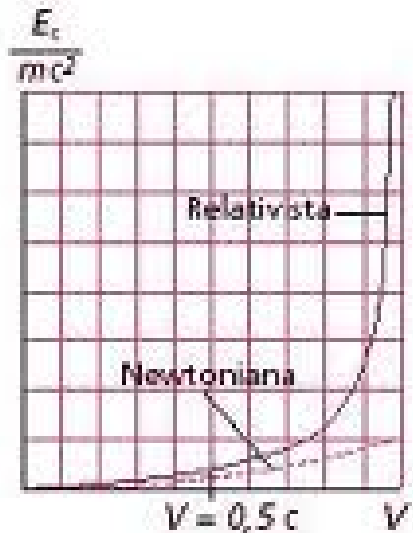
**Cartagena99**

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# 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

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

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

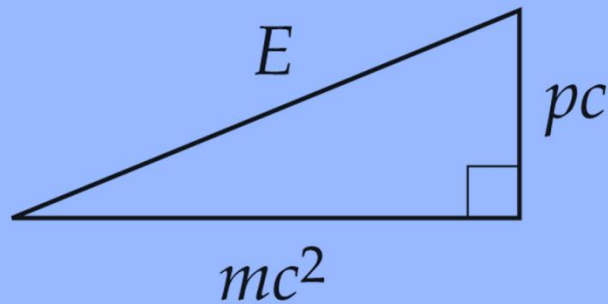
Cartagena99



# 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:

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

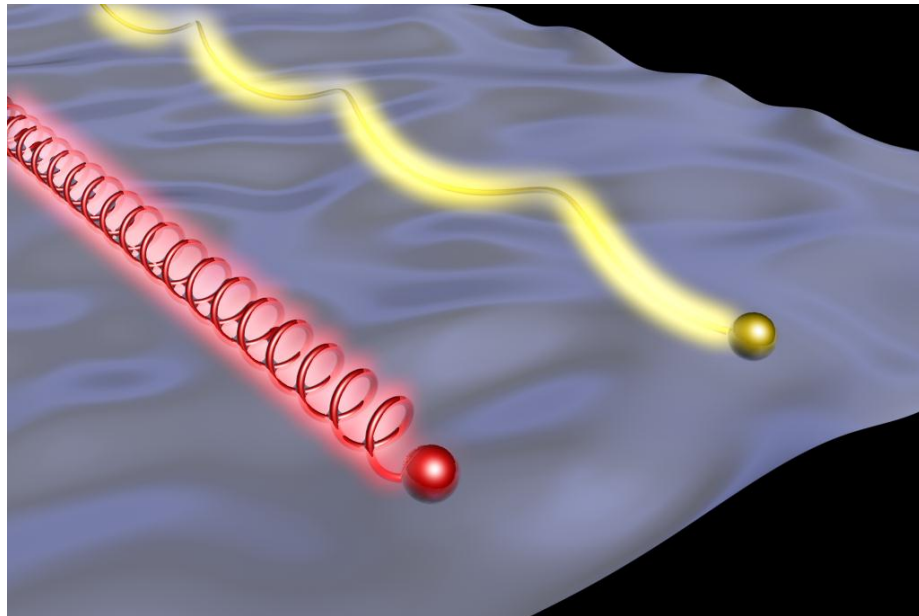
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# 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

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

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

# 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

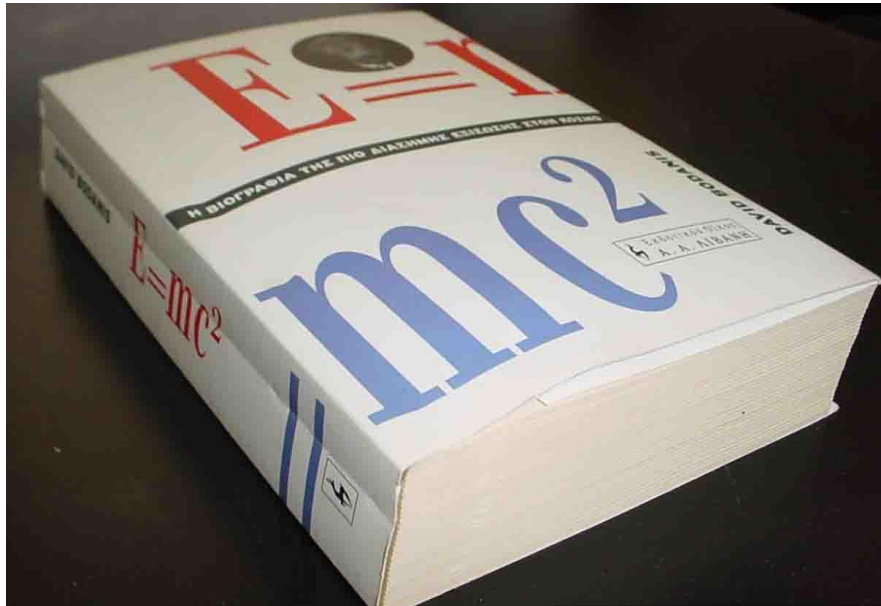
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

# 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.

Cartagena99

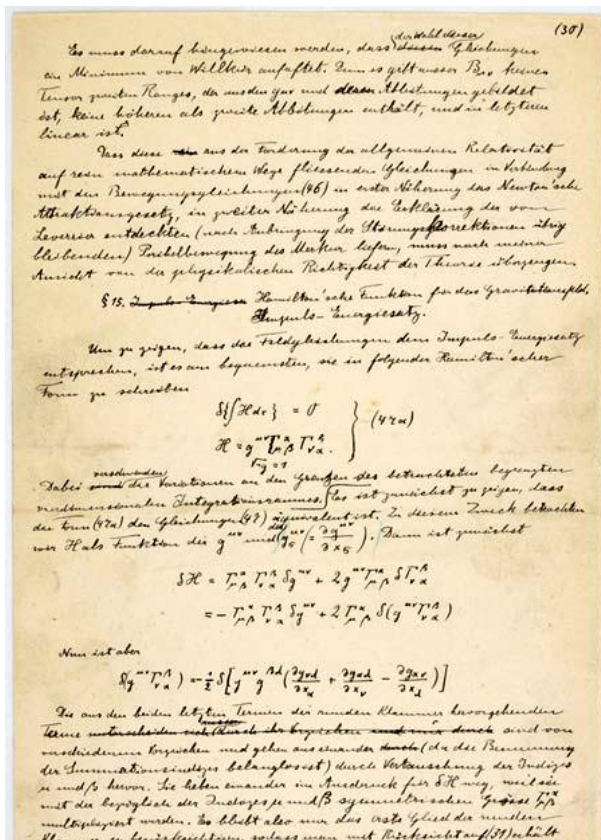
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



# 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.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

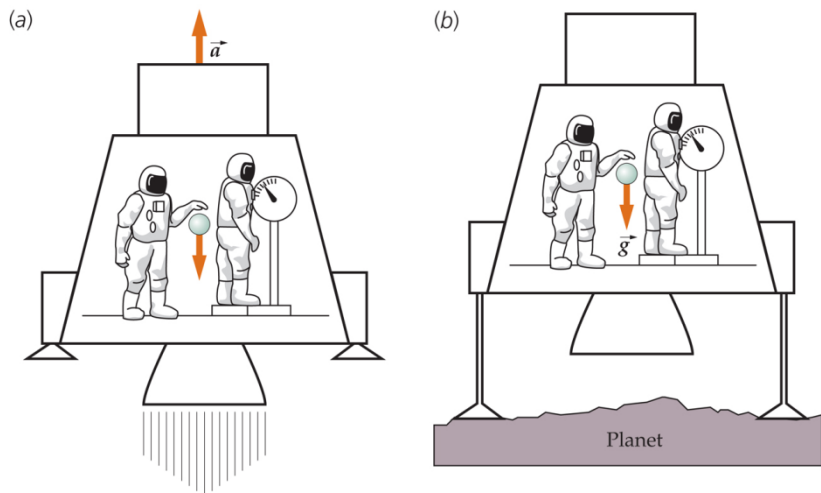
# Cartagena99

Enrique Arribas Garde

# 8. Relatividad General



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



## 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.

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

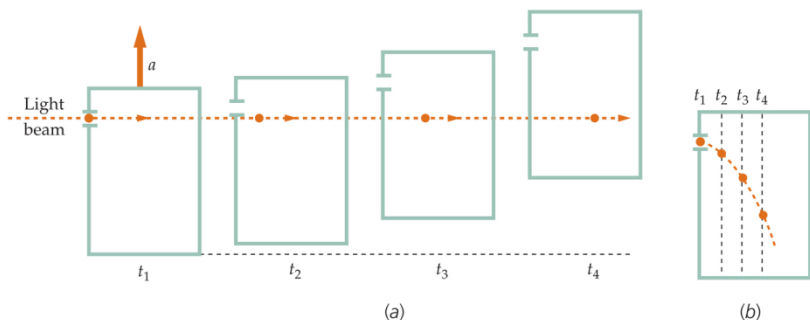


CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# 8. Relatividad General



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

## 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.

Cartagena99

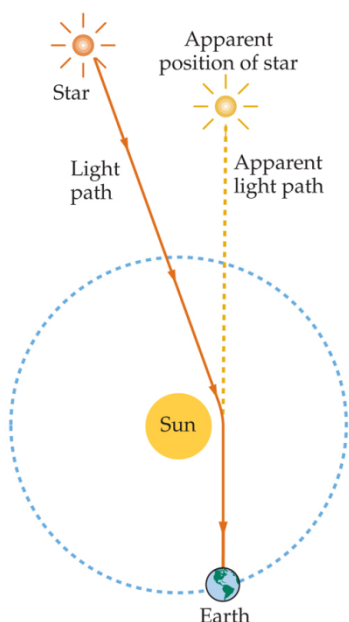
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# 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

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

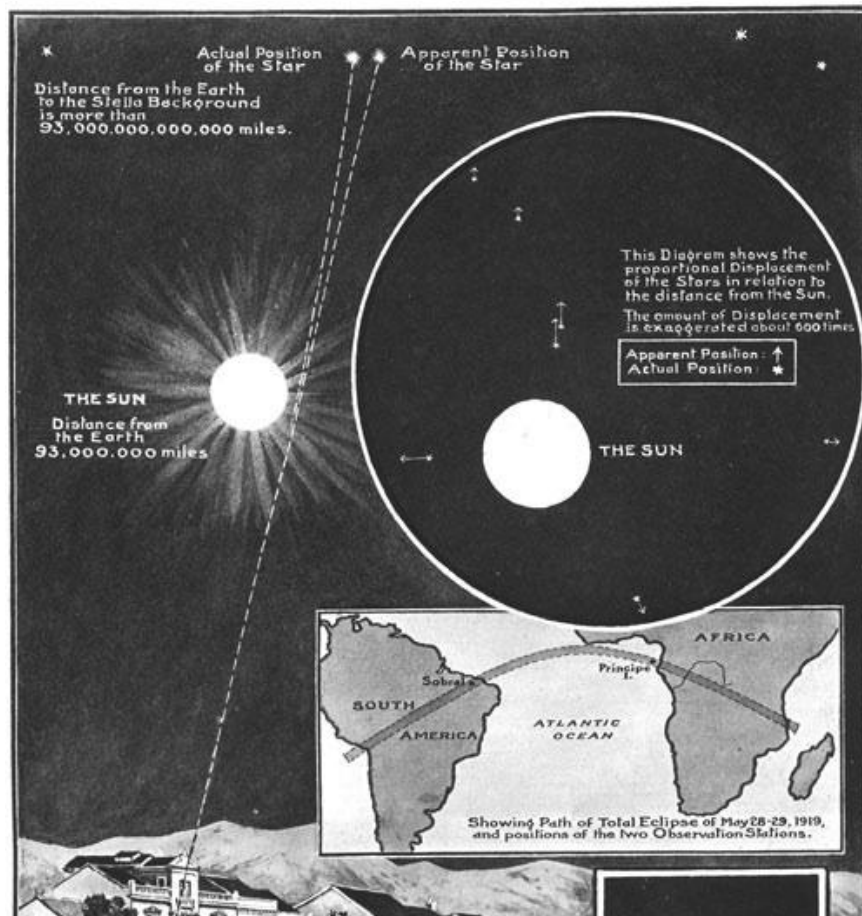
---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99



# 8. Relatividad General



**GIVEN THE SPEED,  
TIME IS NAUGHT**

**If Man Moved with the Velocity  
of Light He Might Remain Un-  
changed for 1,000 Years.**

**THE THEORY OF RELATIVITY**

**Among Other Things, it Makes Si-  
multaneity of Two Widely Sep-  
arated 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**

**ECLIPSE SHOWED  
GRAVITY VARIATION**

**Deviation of Light Rays Ac-  
cepted as Affecting New-  
ton's Principles.**

**MAILED AS EPOCHMAKING**

**British Scientist Calls the Discov-  
ery One of the Greatest of  
Human Achievements.**

**Cartagena99**

**CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70**

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70**

# 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:  $0.01^\circ$  cada siglo.
- Este efecto era conocido desde hacía tiempo; pero no había podido ser explicado.
- Fue otro éxito de la TGR.

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

# 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  $M$ .

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# 8. Relatividad General



En 1976 se puso en órbita este reloj (dentro de una

## 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.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

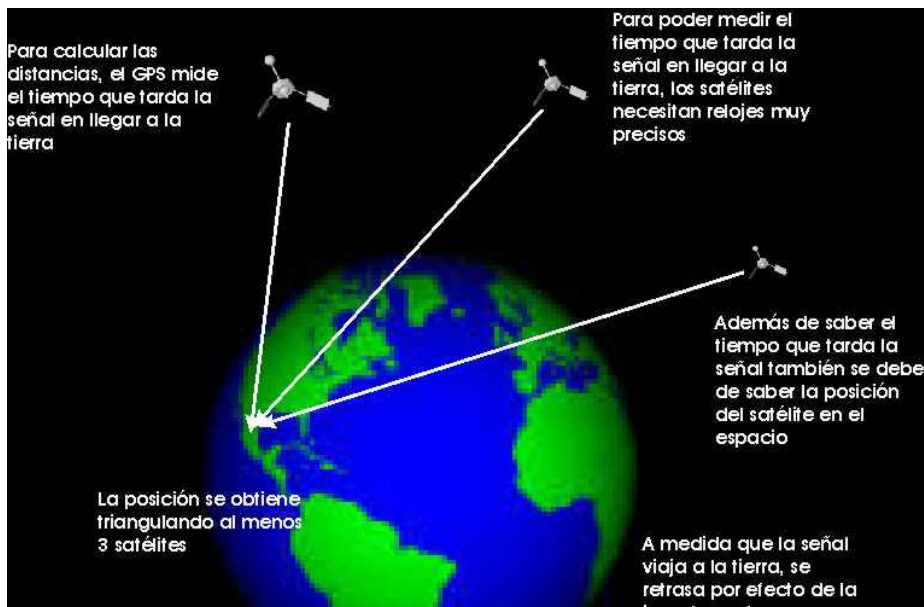
---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99



# 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

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

# 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

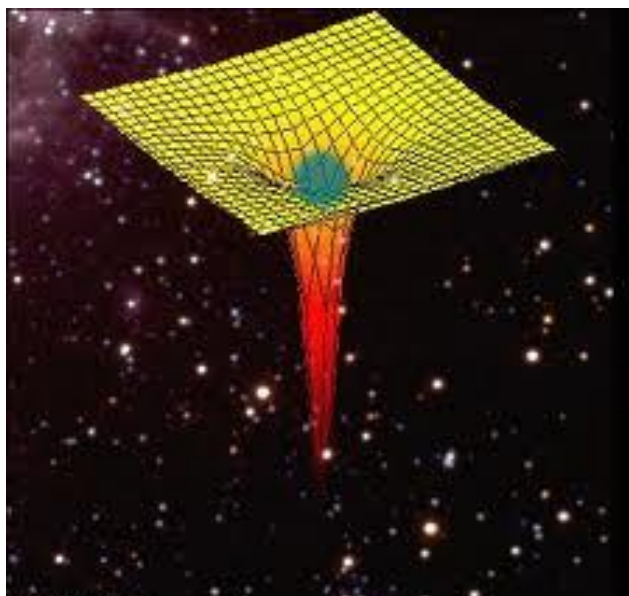
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# 8. Relatividad General



## 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.

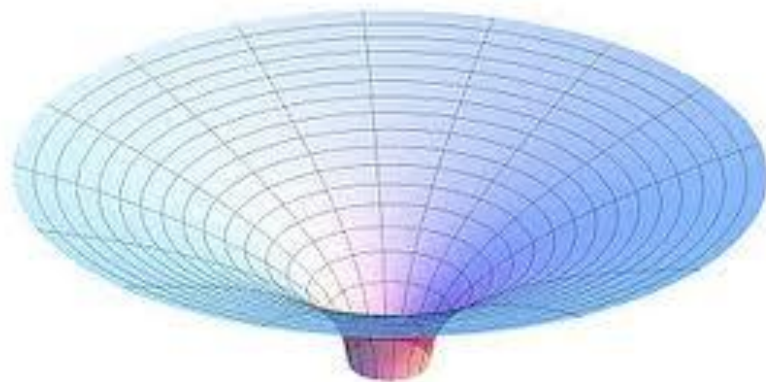
CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

# 8. Relatividad General



## 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

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99



# 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.

Cartagena99

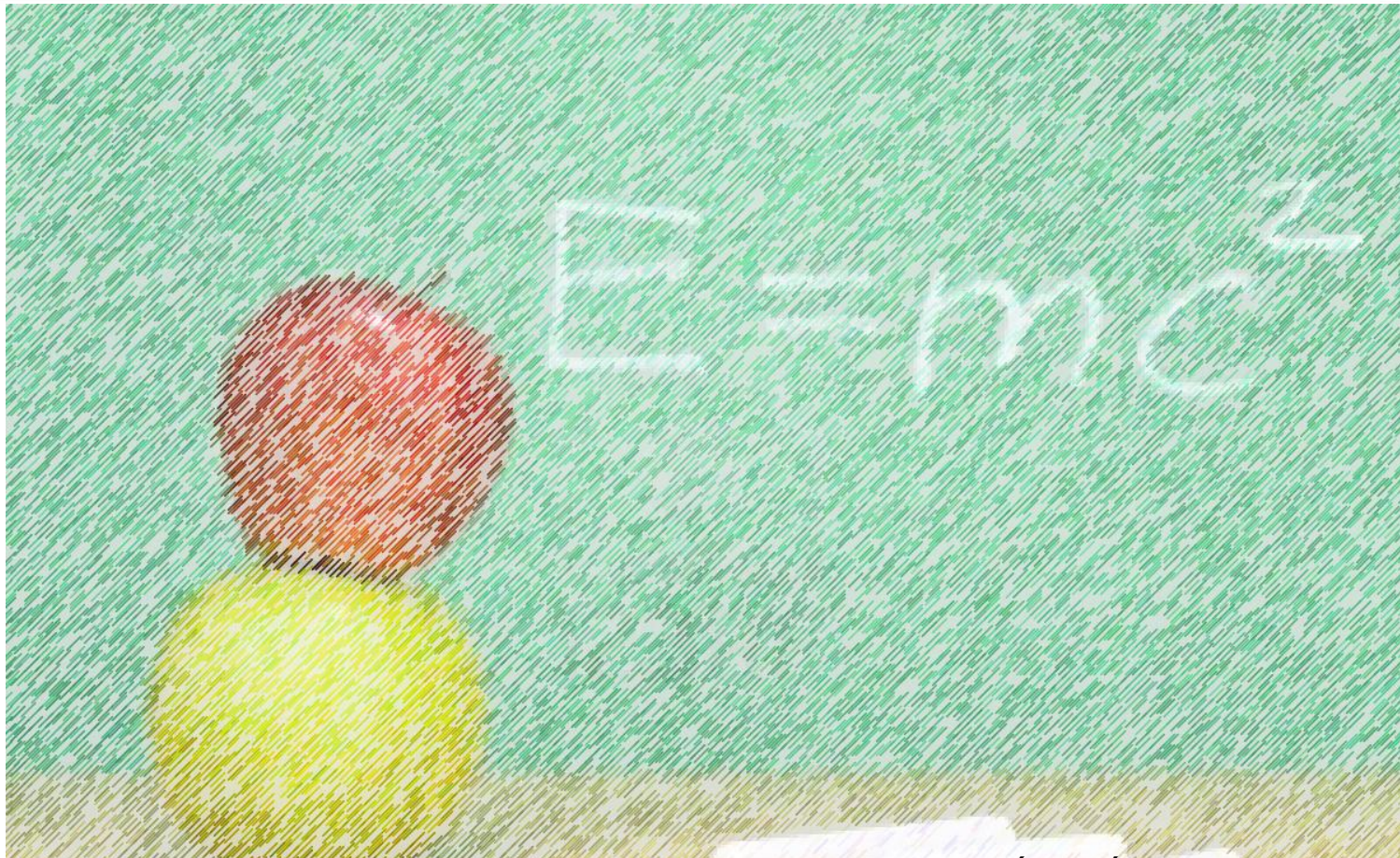
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



# Fin de la tercera parte de la presentación

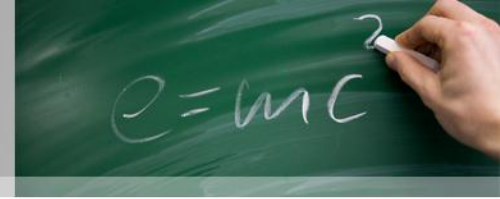


Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



Para acabar esta tercera y última parte de Relatividad os dejos 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?**

**Cartagena99**

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70