

Física Moderna

2012

Simon Casassus Astronomía, Universidad de Chile

<http://www.das.uchile.cl/~simon>

- I Relatividad Especial
- II Introducción a la Mecánica Cuántica

A fines del siglo XIX la física consistía de la termodinámica y del electromagnetismo, y 'solo' tenía las siguientes deficiencias, que no podía explicar:

- A Velocidad finita de la luz.
- B Catástrofe UV y calor específico de los sólidos.
- C Inexplicables líneas de absorción en el espectro solar, y líneas espectrales en general.

Los problemas **B** y **C** fueron resueltos por la mecánica cuántica, y los trataremos en la Parte 2. En esta parte estudiaremos el origen de **A**.

Relatividad Especial

1 Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

2 Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

3 Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

4 Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

5 Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

Plan

1 Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

2 Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

3 Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

4 Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

5 Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

Primeras mediciones de la velocidad de la luz

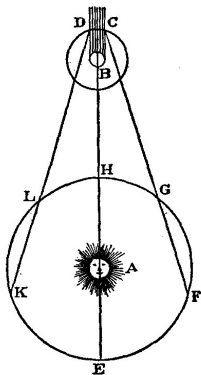


FIG. 70.

Ya en 1676 Rømer había demostrado la constancia de la velocidad de la luz usando las variaciones de la órbita de lo en función de la distancia Tierra-Júpiter. Ver wikipedia. Luego Bradley lo confirmó en 1728, observando la aberración estelar anual. Anualmente la posición aparente de una estrella en el plano de la eclíptica se mueve con una amplitud de $40''$.

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

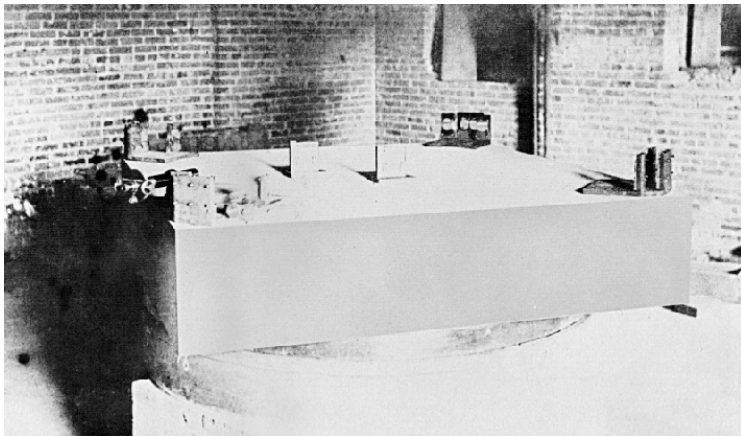
Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

Experimento de Michelson-Morley (1887)



$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

Proposición de Lorentz

Lorentz sugiere que los materiales se contraen en la dirección de su movimiento,

$$L_{\text{ether}} = L \sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}.$$

Con esta propuesta de Lorentz, se arregla experimento de Michelson-Morley.

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

Plan

1 Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

2 Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

3 Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

4 Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

5 Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

1.2-Principio de relatividad especial

Poincaré concluyó que no es posible medir una velocidad absoluta, o que no existe una velocidad absoluta. *Las leyes de los fenómenos físicos deben ser las mismas para un observador fijo que para un observador en movimiento uniforme respecto a el , tal que no tenemos, ni de ninguna manera podremos tener, alguna manera de discernir si estamos en un movimiento uniforme .*

⇒ Las leyes de la física son las mismas en todos los sistemas en translación uniforme.

⇒ Invariancia de c deriva de invariancia de las ecuaciones de Maxwell.

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

“On the Electrodynamics of Moving Bodies”, Einstein (1905)

$$E = mc^2$$

Einstein demuestra que es necesario revisar las transformaciones de Galileo, y que el tiempo es relativo.

- Dilatación del tiempo.
- Contracción de longitudes.

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

Plan

1 Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

2 Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

3 Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

4 Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

5 Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

Principio de equivalencia (Einstein 1907)

Un sistema de referencia no inercial es equivalente a un campo gravitacional \Rightarrow es imposible distinguir entre movimientos acelerados y campo gravitacional.

\Rightarrow Espacio-tiempo es curvo.

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

- **Principio de equivalencia debil.** En presencia de un campo gravitacional, un observador en caída libre no siente ningun efecto gravitacional, y el espacio-tiempo será plano (i.e. Minkowski).
- **Principio de equivalencia fuerte.** Las leyes de la física son las mismas en un sistema en caída libre que en la ausencia de gravedad. \Rightarrow las ecuaciones que rigen los fenómenos físicos deben preservar la misma forma ante cualquier cambio de coordenadas (i.e. las fuerzas no-inerciales muestran que $F = ma$ esta mal escrito).

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico
Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad
La relatividad de los tiempos
Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.
Composición de velocidades
Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

2-Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

Concepto clave: Evento \Leftrightarrow punto en el espacio-tiempo.

Plan

1 Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

2 Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

3 Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

4 Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

5 Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

2.1-Simultaneidad

- En un sistema S la posición de un punto P se determina con estándares rígidos.
- Estudiar movimiento de un punto material \Leftrightarrow dar trayectoria, i.e. coordenadas en función de t . Trayectoria solo sirve si definimos claramente lo que es t .
- Todas las mediciones de t son mediciones de simultaneidad. “Tren llega a las 7h” \Leftrightarrow Evento “aguja chica apunta al 7”y evento “llegada del tren” son simultáneos.

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

Relojes sincronizados y tiempo

- Dos observadores A y B , estacionarios, pueden medir el tiempo de eventos en su vecindad. Pero falta definir el tiempo común a A y B .
- Decimos que A y B están sincronizados si el tiempo que demora la luz en AB es el mismo para A y B . 3 eventos: emisión en A , reflejo en B , recepción en A .

$$t_B - t_A^1 = t_A^2 - t_B,$$

A calcula t_B , y le pregunta a B si efectivamente llegó la señal lumínica en t_B .

- El tiempo de un evento en un sistema S es aquel dado simultáneamente por un reloj en la posición del evento, estacionario en S , este reloj estando sincronizado con un reloj estacionario de referencia (digamos en el origen de S).

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

Plan

1 Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

2 Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

3 Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

4 Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

5 Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

2.2-La relatividad de los tiempos

“Las leyes por las cuales cambian los sistemas físicos no son afectadas si estos cambios son referidos a uno u otro sistema de coordenadas en movimiento de translación uniforme”

⇒ “Cualquier rayo de luz se mueve en el sistema S con la velocidad c , independientemente de si fue emitido por un cuerpo estacionario o en movimiento”.

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

2.2-La relatividad de los tiempos

- Consideremos un palo rígido con largo en reposo L_0 , en movimiento con velocidad $+u\hat{x}$, ligado a un sistema S' . En S' se puede medir el largo usando metro patrón.
- En S se pueden usar observadores con relojes sincronizados. En t un continuo de observadores estacionarios puede determinar las posiciones de las puntas del palo. La distancia entre estos puntos es lo que S llamaría largo del palo.
- Según S , ¿Están sincronizados los relojes en las puntas del palo?

$$c(t_B - t_A^1) = L_0 + u(t_B - t_A^1)$$

$$c(t_A^2 - t_B) = L_0 - u(t_A^2 - t_B)$$

$\Rightarrow t_B - t_A^1 \neq t_A^2 - t_B$. Para S los relojes de S' no están sincronizados, aunque por construcción si lo esten en S' .

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

Plan

1 Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

2 Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

3 Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

4 Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

5 Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

2.3-Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Buscamos $(\vec{r}', t) = f(\vec{r}, t)$.

- f debe ser lineal, por homogeneidad del espacio:

$$f(\alpha r_i, \alpha t) = \alpha f(r_i, t).$$

Ponemos $(r'_i, t') = \mathbf{A}(r_i, t_i)$.

- $t'(x, y, z, t) = t'(x, -y, -z, t) \forall (y, z) \Rightarrow a_{42} = 0, a_{43} = 0.$
- $x'(x, y, z, t) = x'(x, -y, -z, t) \Rightarrow a_{12} = 0, a_{13} = 0. \Rightarrow$

$$\begin{aligned}x' &= \alpha x + \beta t \\t' &= \epsilon x + \delta t\end{aligned}\tag{1}$$

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

2.3-Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

- En el origen de S' $x' = 0$, y $x = ut \Rightarrow \beta = -\alpha u$.
- Un rayo de luz parte en dirección de $+\hat{x}$, desde el origen de S , y S' , que coinciden en $t = 0$: $x = ct$, y $x' = ct'$. \Rightarrow

$$\alpha c + \beta = c^2 \epsilon + c \delta. \quad (2)$$

- Si el rayo parte en dirección $-\hat{x}$,

$$-\alpha c + \beta = c^2 \epsilon - c \delta. \quad (3)$$

De Ecs. 2 y 3,

$$\beta = \epsilon c^2, \quad \alpha = \delta.$$

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

2.3-Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

- Un rayo de luz parte en $t = 0$ hacia $+\hat{y}$: $y = \sqrt{c^2 - u^2}t$ y $y' = ct'$. Con $y = y'$,

$$c(\epsilon u + \gamma) = \sqrt{c^2 - u^2}.$$

- Llegamos a

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

$$y' = y$$

$$z' = z$$

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

Donde

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}}.$$

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

Plan

1 Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

2 Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

3 Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

4 Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

5 Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

3.1-Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

- Contracción de Lorentz.
- Dilatación del tiempo.
- Ejemplo: paradoja de la garrocha y del granero.

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

Plan

1 Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

2 Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

3 Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

4 Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

5 Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

3.2-Composición de velocidades

$$v_x = \frac{dx}{dt}, \quad v'_x = \frac{dx'}{dt'}$$

con

$$dx' = \gamma(dx - udt), \quad dt' = \gamma(dt - udx/c^2),$$

tenemos

$$v'_x = \frac{dx - udt}{dt - udx/c^2} = \frac{v_x - u}{1 - uv_x/c^2}, \quad y \quad (4)$$

$$v'_y = \frac{v_y}{\gamma(1 - uv_x/c^2)} \quad (5)$$

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

- En un sistema S dos partículas se alejan del origen con velocidades $\pm 0,9c$. Calcular la velocidad relativa entre las partículas en S , y luego la velocidad relativa de las partículas entre ellas.
- Aberración de la luz.
- Distribución de estrellas vista por un viajero interestelar.
- Efecto luces delanteras.

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

Plan

1 Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

2 Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

3 Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

4 Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

5 Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

3.3-Efecto Doppler lumínico

- Para el sonido, en relatividad Galileana tenemos

$$\frac{\Delta\tau}{\tau} = \frac{\vec{u} \cdot \hat{r}}{c_s}.$$

- Para la luz, el efecto Doppler es análogo al sonido para $u \ll c$. En casos relativistas,

$$\frac{\Delta\tau}{\tau} = \gamma \frac{\vec{u} \cdot \hat{r}}{c}.$$

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

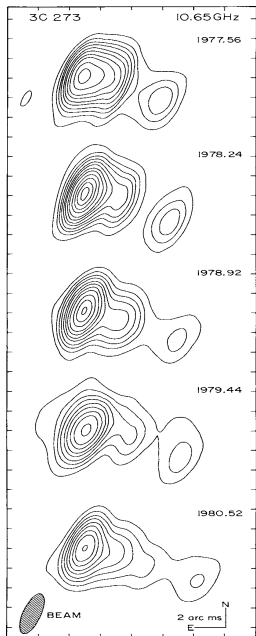
Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

Movimientos super-luminales aparentes



- Cuasar 3C273: $d = 440$ Mpc, ($1 \text{ pc} \sim 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}$), $\mu = 8 \cdot 10^{-4} \text{ '' yr}^{-1}$. $\Rightarrow v_a = 5,6 c$.
- La velocidad de expansión real, \vec{u} , con una inclinación i , se relaciona con v_a mediante

$$v_a = \frac{u \sin(\phi)}{1 - (u \cos(\phi)/c)}$$

- Para 3C273, se medimos $i > 69,6$ deg.

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momento y energía

4.0-Efecto Doppler lumínico

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

Plan

1 Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

2 Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

3 Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

4 Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

5 Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía

5.1-Acción, momentum y energía

$$E = mc^2$$

Introducción: principio de relatividad

Desarrollo histórico

Principio de relatividad especial

Principio de equivalencia y relatividad general

Transformaciones de Lorentz (Einstein 1905)

Simultaneidad

La relatividad de los tiempos

Teoría de transformaciones de coordenadas entre sistemas en translación

Aplicaciones cinemáticas y efecto Doppler para la luz

Contracción de longitudes, dilatación de tiempos.

Composición de velocidades

Efecto Doppler lumínico

Espacio-tiempo, notación tensorial y causalidad

Mecánica relativista

Acción, momentum y energía