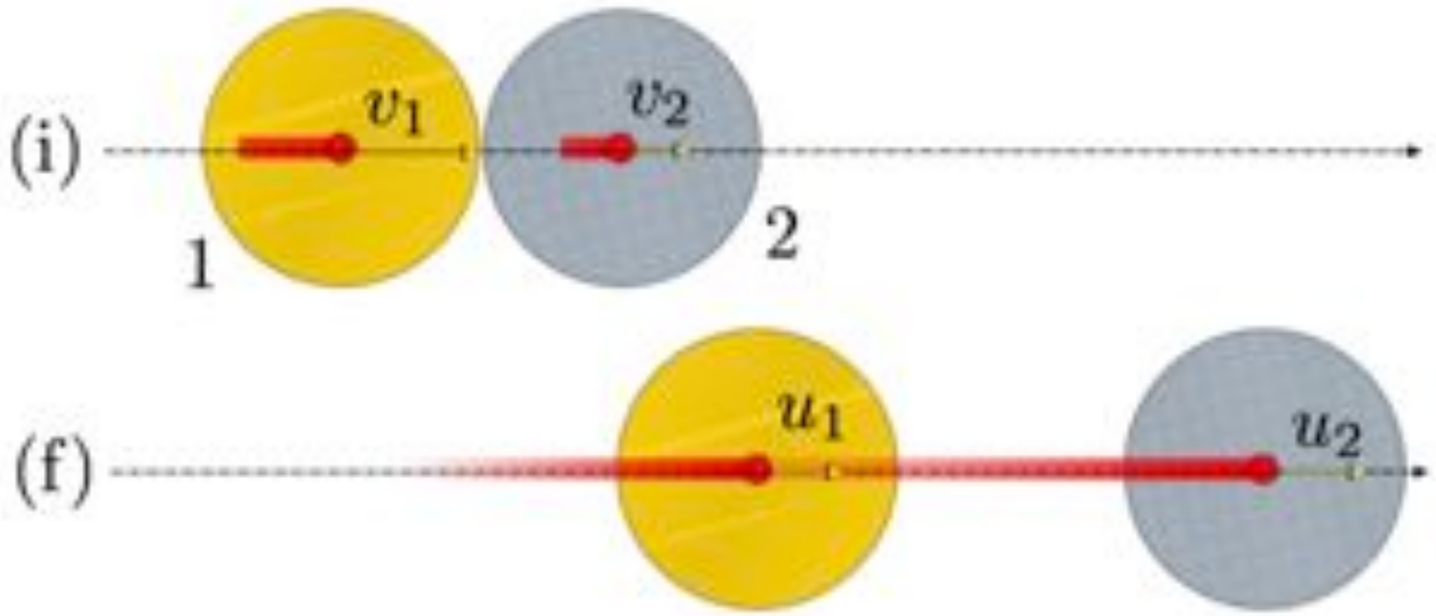
Colisiones elásticas



Choque elástico de dos bolas. (i) Dos bolas, 1 y 2, de inercias $\mathcal{M}_1$ y $\mathcal{M}_2$, respectivamente, chocan elásticamente. La bola 1 incide con velocidad v_1, sobre la bola 2, que se mueve con velocidad v_2. (f) Las bolas tienen velocidades, después del choque, u_1 y u_2, respectivamente. Las velocidades corresponden al referencial S en que se describe el proceso.

Formalismo Einstein-Minkowski-Lorentz

Cuadrivectores

Cuadrivector espacio-tiempo

$$\vec{r}_i = (x_i, y_i, z_i) \qquad t_i$$

$$r_i^{\mu} = \left\{ \begin{array}{c} x_i \\ y_i \\ z_i \\ ct_i \end{array} \right\} ;$$

Se utiliza la velocidad de la luz para transformar el tiempo en espacio. Y viceversa.

Formalismo Einstein-Minkowski-Lorentz

¿Cómo caracterizar el estado de una partícula en reposo?

Utilizando cuadrivectores de Minkowski

Estando de acuerdo con otro observador
Transformación de Lorentz entre observadores

Conjetura de Einstein. Inercia de la energía

Formalismo Einstein-Minkowski-Lorentz

Masa de una partícula

$$m$$

¿Energía en reposo de una partícula?

$$p = \gamma_v m v$$

En reposo

$$\left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ ?‘? \end{array} \right\}$$

En movimiento

$$\left\{ \begin{array}{c} c\gamma_v m v \\ 0 \\ 0 \\ ?‘? \end{array} \right\}$$

Formalismo Einstein-Minkowski-Lorentz

Masa de una partícula

m

¿Energía en reposo de una partícula?

Para convertir una masa en energía, hay que multiplicarla por una velocidad al cuadrado.

La única velocidad con sentido físico universal para hacer eso es la velocidad de la luz.

Conjetura de Einstein

$$E_0 = mc^2$$

Formalismo Einstein-Minkowski-Lorentz

Masa de una partícula

$$m$$

Los respectivos cuadrivectores se relacionan mediante la transformación de Lorentz.

$$\left\{ \begin{array}{c} c\gamma_v mv \\ 0 \\ 0 \\ ?‘? \end{array} \right\} = \mathcal{L}^{\mu}_{\nu}(-v) \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ ?‘? \end{array} \right\}$$

Formalismo Einstein-Minkowski-Lorentz

Los respectivos cuadrivectores se relacionan mediante la transformación de Lorentz.

$$\begin{Bmatrix} \gamma_v & 0 & 0 & \beta_v\gamma_v \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \beta_v\gamma_v & 0 & 0 & \gamma_v \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ mc^2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} c\gamma_v mv \\ 0 \\ 0 \\ \gamma_v mc^2 \end{Bmatrix}$$

Energía en reposo de una partícula

$$E_0 = mc^2$$

Energía en movimiento de una partícula

$$E = \gamma_v mc^2$$

Formalismo Einstein-Minkowski-Lorentz

Masa de una partícula

$$m$$

$$\left\{ \begin{array}{c} c\gamma_v mv \\ 0 \\ 0 \\ \gamma_v mc^2 \end{array} \right\} = \mathcal{L}^{\mu}_{\nu}(v) \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ mc^2 \end{array} \right\}$$

Formalismo Einstein-Minkowski-Lorentz

$$\begin{Bmatrix} \gamma_v & 0 & 0 & \beta_v\gamma_v \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \beta_v\gamma_v & 0 & 0 & \gamma_v \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ mc^2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} c\gamma_v mv \\ 0 \\ 0 \\ \gamma_v mc^2 \end{Bmatrix}$$

Energía total de una partícula

$$E = \gamma_v mc^2$$

Energía cinética de una partícula

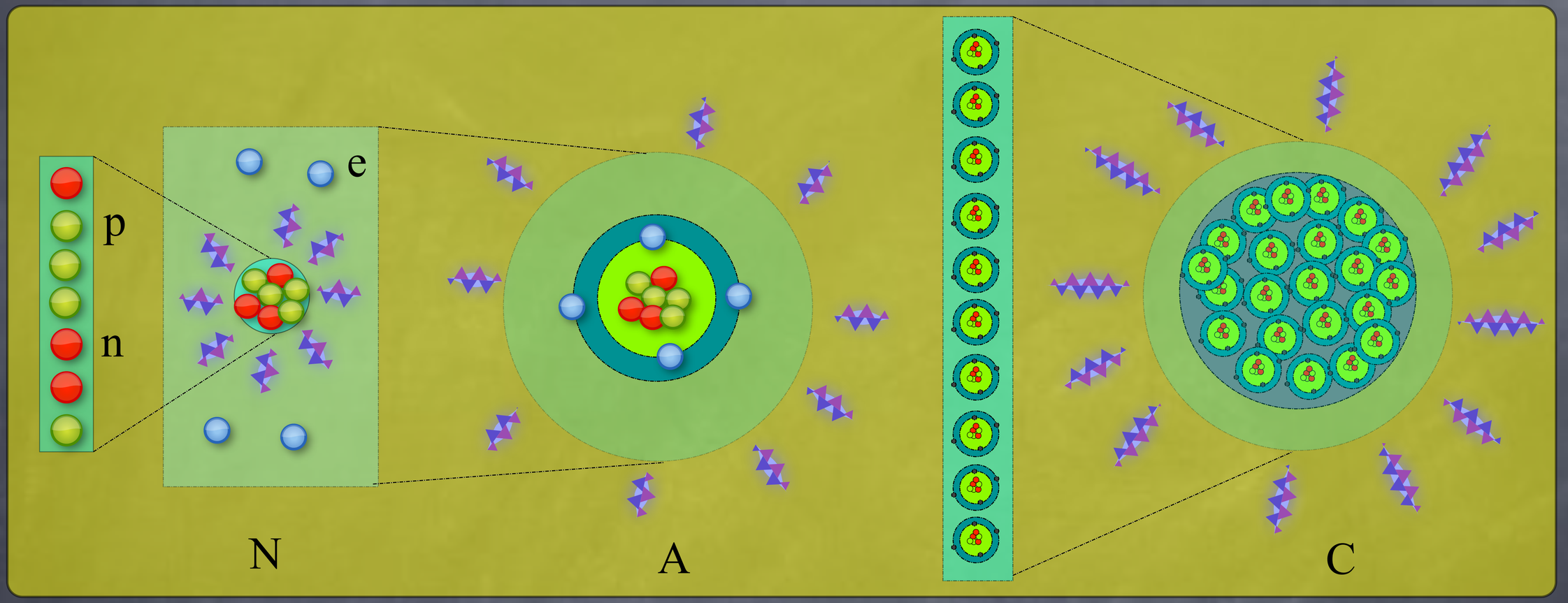
$$K = (\gamma_v - 1)mc^2 \Rightarrow (v/c \ll 1) \Rightarrow \frac{1}{2}mv^2$$

Energía en reposo de una partícula

$$E_0 = mc^2$$

La ecuación de Einstein

Cuerpo extenso



Un cuerpo extenso se forma ensamblando partículas elementales -- en núcleos, átomos, cristales --, que aportan sus masas a la inercia total, mientras se emite energía en forma de fotones que disminuye la energía de enlace (defecto de masa), que contribuyen negativamente a dicha inercia, respecto de la inercia de las partículas elementales por separado.

Formalismo Einstein-Minkowski-Lorentz

Energía en reposo de una partícula

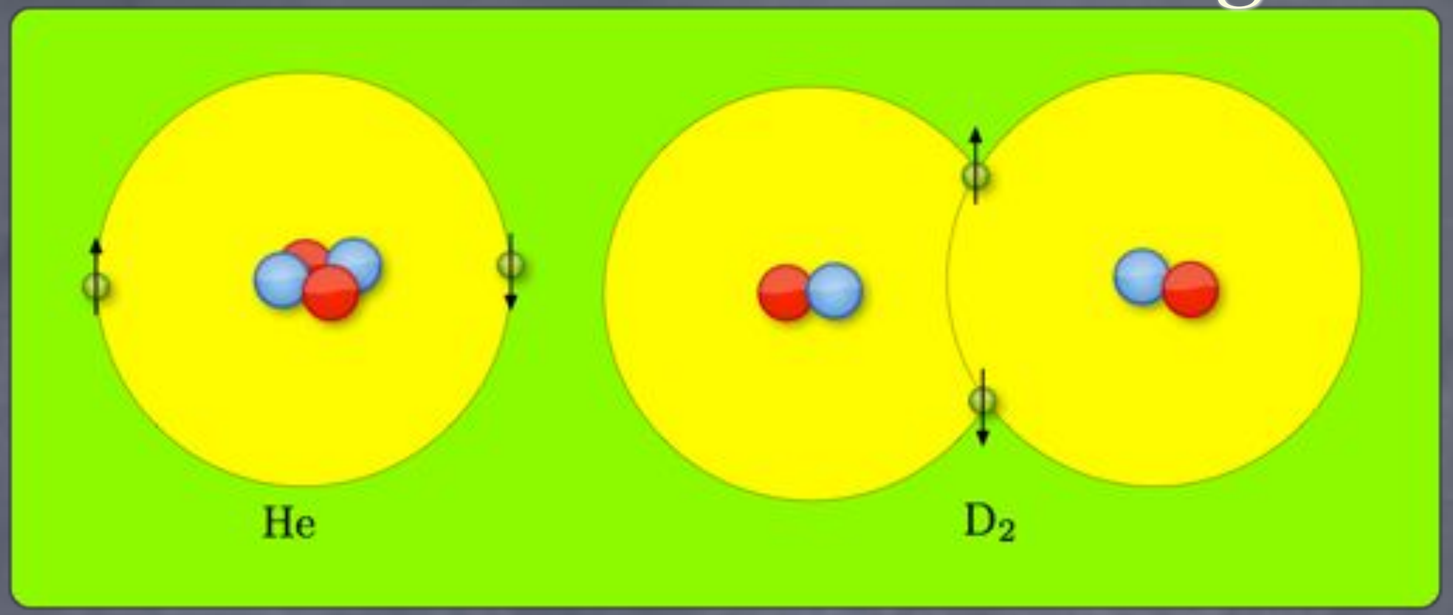
$$E_0 = mc^2$$

Conjetura de Einstein

Energía interna de un cuerpo en reposo

$$E_0(T) = \sum_i m_i c^2 - \left|\tilde{U}\right| + \sum_k \frac{1}{2} k_n x_n^2 + \int_0^T n c_p \mathrm{d}T + \cdots$$

Einstein sobre masa-energía



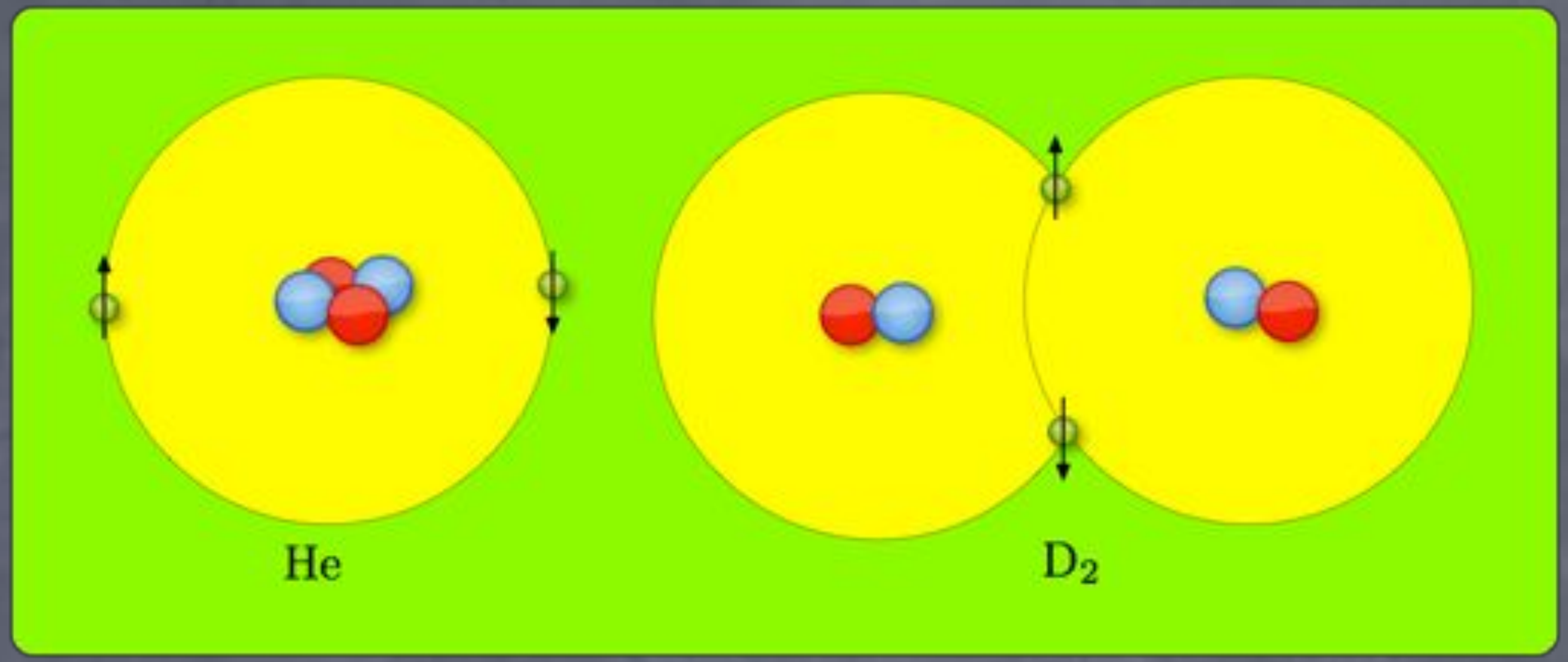
$$E_0(\mathrm{He}) = 2\left(m_\mathrm{p} + m_\mathrm{n} + m_\mathrm{e}\right)c^2 - \left[\tilde{U}_{\mathrm{N};\mathrm{He}} + \tilde{U}_{\mathrm{A};\mathrm{He}}\right];$$

$$\mathcal{M}(\mathrm{He}) = E_0(\mathrm{He})c^{-2},$$

$$E_0(\mathrm{D}) = 2\left(m_\mathrm{p} + m_\mathrm{n} + m_\mathrm{e}\right)c^2 - \left[2\tilde{U}_{\mathrm{N};\mathrm{D}} + \tilde{U}_{\mathrm{M};\mathrm{D}}\right];$$

$$\mathcal{M}(\mathrm{D}) = E_0(\mathrm{D})c^{-2}.$$

Einstein sobre Masa-Energía



Átomo de Helio y molécula de Deuterio.

A pesar de estar formados por las mismas partículas elementales, las inercias del átomo de He y la molécula de Deuterio son ligeramente diferentes.

Formalismo Einstein-Minkowski-Lorentz

$$E_0(T) = \sum_i m_i c^2 - \left|\tilde{U}\right| + \sum_k \frac{1}{2} k_n x_n^2 + \int_0^T n c_p \mathrm{d}T + \cdots$$

Conjetura de Einstein

Principio de inercia de la energía

$$\mathcal{M}(T) = c^{-2} E_0(T)$$

¡Un ladrillo caliente tiene más inercia que el mismo ladrillo frío.

$$\Delta\mathcal{M}(T) = c^{-2} \Delta E_0(T)$$

Formalismo Einstein-Minkowski-Lorentz

Cuadrivector velocidad

$$v^\mu = \frac{\mathrm{d}r^\mu}{\mathrm{d}\tau} = \frac{1}{\mathrm{d}\tau}\left\{\begin{array}{c} \mathrm{d}x \\ \mathrm{d}y \\ \mathrm{d}z \\ c\,\mathrm{d}t \end{array}\right\}.$$

$$v^\mu = \left\{\begin{array}{c} \gamma(v)v_x \\ \gamma(v)v_y \\ \gamma(v)v_z \\ \gamma(v)c \end{array}\right\},$$

Formalismo Einstein-Minkowski-Lorentz

Cuadrivector momento lineal-energía total

$$p^{\mu} = \mathcal{M}v^{\mu} = \left\{ \begin{array}{c} \gamma(v)\mathcal{M}v_x \\ \gamma(v)\mathcal{M}v_y \\ \gamma(v)\mathcal{M}v_z \\ c^{-1}\gamma(v)\mathcal{M}c^2 \end{array} \right\}$$

Formalismo Einstein-Minkowski-Lorentz

Cuadrivector momento lineal-energía total

$$p^{\mu} = \left\{ \begin{array}{c} \gamma(v)\mathcal{M}v_x \\ \gamma(v)\mathcal{M}v_y \\ \gamma(v)\mathcal{M}v_z \\ c^{-1}\gamma(v)\mathcal{M}c^2 \end{array} \right\}$$

$$E^{\mu} = cp^{\mu} = \left\{ \begin{array}{c} c\gamma(v)\mathcal{M}v_x \\ c\gamma(v)\mathcal{M}v_y \\ c\gamma(v)\mathcal{M}v_z \\ \gamma(v)\mathcal{M}c^2 \end{array} \right\}$$

Formalismo Einstein-Minkowski-Lorentz

Cuadrivector fuerza-potencia de Minkowski

$$F^{\mu} = \left\{ \begin{array}{c} \gamma(v) F_x \\ \gamma(v) F_y \\ \gamma(v) F_z \\ c^{-1} \gamma(v) \left[\vec{F} \cdot \vec{v} \right] \end{array} \right\} .$$

Formalismo Einstein-Minkowski-Lorentz

Cuadrivector impulso lineal-trabajo

$$W^{\mu} = \left\{ \begin{array}{c} cF_x \mathrm{d}t \\ cF_y \mathrm{d}t \\ cF_z \mathrm{d}t \\ \vec{F} \cdot \mathrm{d}\vec{x} \end{array} \right\} .$$

Formalismo Einstein-Minkowski-Lorentz

Transformación de Lorentz

$$\mathcal{L}^{\mu}_{\nu}(V) = \left\{ \begin{array}{ccc} \gamma(V) & 0 & 0 & -\beta(V)\gamma(V) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\beta(V)\gamma(V) & 0 & 0 & \gamma(V) \end{array} \right\}$$

$$\beta(V) = V/c$$

$$\gamma(V) = [1 - \beta^2(V)]^{-1/2}$$

Formalismo Einstein-Minkowski-Lorentz

Ecuación fundamental mecánica. Forma ley de Newton

$$p_f^\mu - p_i^\mu = \sum_k F_k^\mu \, \mathrm{d}t_k$$

Ecuación fundamental mecánica. Forma energía

$$E_f^\mu - E_i^\mu = \sum_k W_k^\mu$$

Formalismo Einstein-Minkowski-Lorentz

Choque elástico

$$E_f^\mu - E_i^\mu = 0$$

$$E_f^\mu = E_i^\mu$$

$$\left\{ \begin{array}{c} c\gamma_{v_1}\mathcal{M}_1 v_1 \\ 0 \\ 0 \\ \gamma_{v_1}\mathcal{M}_1 c^2 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} c\gamma_{v_2}\mathcal{M}_2 v_2 \\ 0 \\ 0 \\ \gamma_{v_2}\mathcal{M}_2 c^2 \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} c\gamma_{u_1}\mathcal{M}_1 u_1 \\ 0 \\ 0 \\ \gamma_{u_1}\mathcal{M}_1 c^2 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} c\gamma_{u_2}\mathcal{M}_2 u_2 \\ 0 \\ 0 \\ \gamma_{u_2}\mathcal{M}_2 c^2 \end{array} \right\}$$

Formalismo Einstein-Minkowski-Lorentz

Choque elástico

$$\gamma_{v_1}\mathcal{M}_1 v_1 + \gamma_{v_2}\mathcal{M}_2 v_2 = \gamma_{u_1}\mathcal{M}_1 u_1 + \gamma_{u_2}\mathcal{M}_2 u_2 \,,$$

$$\gamma_{v_1}\mathcal{M}_1 c^2 + \gamma_{v_2}\mathcal{M}_2 c^2 = \gamma_{u_1}\mathcal{M}_1 c^2 + \gamma_{u_2}\mathcal{M}_2 c^2$$

$$\Downarrow$$

$$(\gamma_{v_1} - 1)\,\mathcal{M}_1 c^2 + (\gamma_{v_2} - 1)\,\mathcal{M}_2 c^2 = (\gamma_{u_1} - 1)\,\mathcal{M}_1 c^2 + (\gamma_{u_2} - 1)\,\mathcal{M}_2 c^2$$

Conservación de la energía cinética

Principio de relatividad de Einstein

$$\gamma(v) = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$$

Momento lineal

$$p = \gamma(v) m v$$

Relatividad de Einstein

Factor de Lorentz

$$\gamma(v) = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$$

Conservación de la energía total

$$\gamma(v_1)m_1c^2 + \gamma(v_2)m_2c^2 = \gamma(u_1)m_1c^2 + \gamma(u_2)m_2c^2$$

Conservación del momento lineal

$$\gamma(v_1)m_1v_1 + \gamma(v_2)m_2v_2 = \gamma(u_1)m_1u_1 + \gamma(u_2)m_2u_2$$

Principio de relatividad de Einstein

$$\gamma(\bar{v}_1)m_1c^2 + \gamma(\bar{v}_2)m_2c^2 = \gamma(\bar{u}_1)m_1c^2 + \gamma(\bar{u}_2)m_2c^2$$

Transformación de velocidades de Einstein

$$\bar{v} = \frac{v - V}{1 - vV/c^2}$$

$$\gamma(\bar{v}) = \gamma(v)\gamma(V)(1 - vV/c^2)$$

Principio de relatividad de Einstein

Conservación de la energía en $\bar{\mathrm{S}}$

$$\gamma(\bar{v}_1)m_1c^2+\gamma(\bar{v}_2)m_2c^2=\gamma(\bar{u}_1)m_1c^2+\gamma(\bar{u}_2)m_2c^2$$

$$\downarrow$$

$$-\gamma(V)V\Big(\gamma(v_1)m_1v_1+\gamma(v_2)m_2v_2=\gamma(u_1)m_1u_1+\gamma(u_2)m_2u_2\Big)$$

$$+$$

$$\gamma(V)\Big(\gamma(v_1)m_1c^2+\gamma(v_2)m_2c^2=\gamma(u_1)m_1c^2+\gamma(u_2)m_2c^2\Big)$$

La ecuación de la conservación de la energía en $\bar{\mathrm{S}}$ es igual a la suma ponderada de las dos ecuaciones de conservación en S

Principio de relatividad de Einstein

Conservación del momento lineal en Sbar

$$\gamma(\bar{v}_1)m_1\bar{v}_1 + \gamma(\bar{v}_2)m_2\bar{v}_2 = \gamma(\bar{u}_1)m_1\bar{u}_1 + \gamma(\bar{u}_2)m_2\bar{u}_2$$

Transformación de velocidades de Einstein

$$\bar{v} = \frac{v - V}{1 - vV/c^2}$$

$$\gamma(\bar{v})\bar{v} = \gamma(v)\gamma(V)(v - V)$$

Conservación del momento lineal en $\bar{\mathrm{S}}$

$$\gamma(\bar{v}_1)m_1\bar{v}_1 + \gamma(\bar{v}_2)m_2\bar{v}_2 = \gamma(\bar{u}_1)m_1\bar{u}_1 + \gamma(\bar{u}_2)m_2\bar{u}_2$$

$$\downarrow$$

$$\gamma(V)\Big(\gamma(v_1)m_1v_1 + \gamma(v_2)m_2v_2 = \gamma(u_1)m_1u_1 + \gamma(u_2)m_2u_2\Big)$$

$$+$$

$$-\gamma(V)\frac{V}{c^2}\Big(\gamma(v_1)m_1c^2 + \gamma(v_2)m_2c^2 = \gamma(u_1)m_1c^2 + \gamma(u_2)m_2c^2\Big)$$

La ecuación de la conservación del momento lineal en $\bar{\mathrm{S}}$ es igual a la suma ponderada de las dos ecuaciones de conservación en S

Conservación de la energía total

$$-\gamma(V)\frac{V}{c^2}\Big(\gamma(v_1)m_1c^2+\gamma(v_2)m_2c^2=\gamma(u_1)m_1c^2+\gamma(u_2)m_2c^2\Big)$$

$$-\gamma(V)V\Big(\gamma(v_1)m_1+\gamma(v_2)m_2=\gamma(u_1)m_1+\gamma(u_2)m_2\Big)$$

Conservación de la inercia

$$\gamma(v_1)m_1+\gamma(v_2)m_2=\gamma(u_1)m_1+\gamma(u_2)m_2$$

$$\gamma(\bar{v}_1)m_1+\gamma(\bar{v}_2)m_2=\gamma(\bar{u}_1)m_1+\gamma(\bar{u}_2)m_2$$

Principio de relatividad de Einstein

$$\gamma(v) = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$$

Si se conserva la energía total durante un proceso, se conserva el momento lineal durante el mismo.

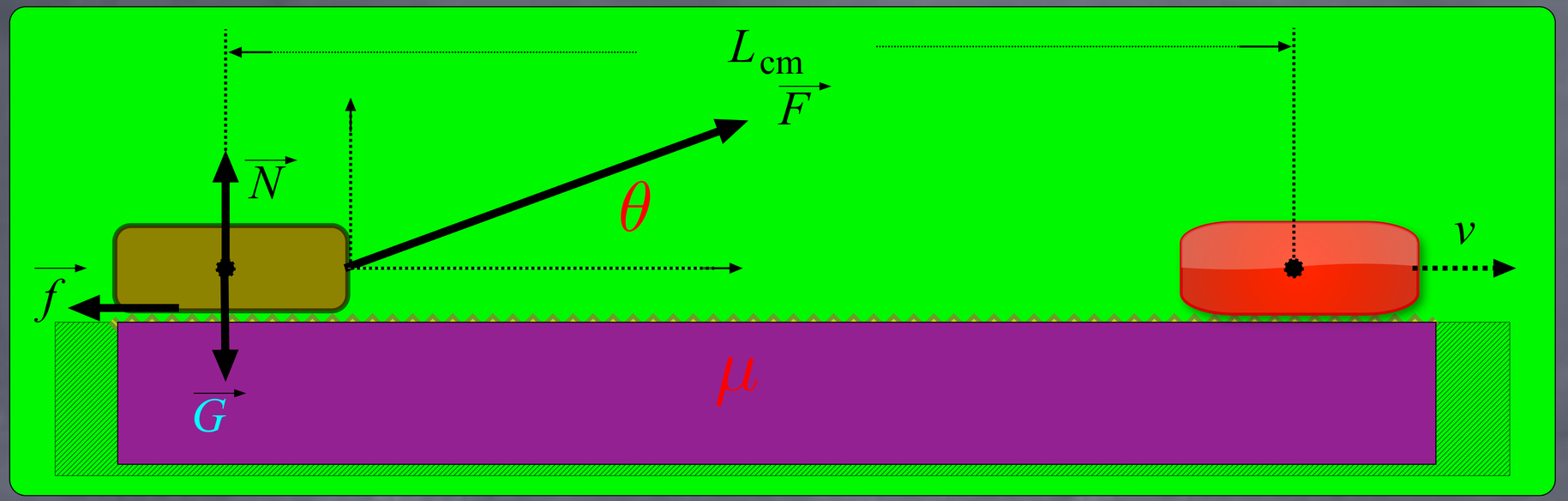
$$\gamma(v_1)m_1c^2 + \gamma(v_2)m_2c^2 = \gamma(u_1)m_1c^2 + \gamma(u_2)m_2c^2$$

$$\gamma(v_1)m_1 + \gamma(v_2)m_2 = \gamma(u_1)m_1 + \gamma(u_2)m_2$$

Si se conserva el momento lineal durante un proceso, se conserva la energía total durante el mismo.

$$\gamma(v_1)m_1v_1 + \gamma(v_2)m_2v_2 = \gamma(u_1)m_1u_1 + \gamma(u_2)m_2u_2$$

Movimiento de un cuerpo con rozamiento



Segunda ley de Newton

Ecuación del centro de masas

Primer principio de la termodinámica

Cambio de referencial

Cuadrivector calor. Fotones

$$Q^{\mu} = \sum_{n} \left\{ \begin{array}{c} h\nu_n \cos\theta_n \\ h\nu_n \sin\theta_n \\ 0 \\ h\nu_n \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ Q \end{array} \right\}$$

Para la misma energía intercambiada, el momento lineal total nulo equivale al máximo aumento de la entropía del univrrso.

Cuadrivector calor. Fonones

$$Q^{\mu} = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -N\hbar\omega_{\mathrm{B}} \end{array} \right\}$$

Para la misma energía intercambiada, el momento lineal total nulo equivale al máximo aumento de la entropía del universo.

Ecuaciones

Ecuación fundamental con procesos térmicos. Forma de la energía

$$E_f^\mu - E_i^\mu = \sum_k W_k^\mu + Q^\mu$$

Ecuación fundamental con procesos térmicos. Forma de la ley de Newton

$$p_f^\mu - p_i^\mu = \sum_k F_k^\mu \mathrm{d}t_k + p_Q^\mu$$

Cuadrivectores estado. Inicial y final

$$E_i^\mu = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \mathcal{M}c^2 \end{array} \right\} \qquad E_f^\mu = \left\{ \begin{array}{c} c\gamma_{v_f}\mathcal{M}v_f \\ 0 \\ 0 \\ \gamma_{v_f}\mathcal{M}c^2 \end{array} \right\}$$

Cuadrivectores impulso-trabajo

$$W_F^\mu = \left\{ \begin{array}{c} cF_x t_0 \\ cF_y t_0 \\ 0 \\ F_x L \end{array} \right\}$$

$$F_x = F \cos\,\theta$$

$$F_y = F \sin\,\theta$$

$$W = F \cdot L = FL \cos\,\theta = F_x L$$

$$L \equiv L_{\mathrm{cm}}$$

Cuadrivectores impulso-trabajo

$$W_G^\mu = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ -c\mathcal{M}gt_0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\}, \quad W_N^\mu = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ cNt_0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\}$$

Fuerza de rozamiento

$$F_{\mathrm{R}} = \mu N = \mu(\mathcal{M}g - F_y)$$

$$W_{\mathrm{R}}^{\mu} = \left\{ \begin{array}{c} -c\mu(\mathcal{M}g - F_y)t_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\}$$

Cuadrivector calor. Foco térmico

$$Q^{\mu} = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -N_{\mathrm{pn}} \hbar \omega_{\mathrm{B}} \end{array} \right\} = W^{\mu}_{\mathrm{D}}$$

Fuerza de rozamiento

$$E_f^\mu - E_i^\mu = W_F^\mu + W_{\mathrm{R}}^\mu + W_{\mathrm{G}}^\mu + W_{\mathrm{N}}^\mu + Q^\mu$$

$$\left\{ \begin{array}{c} c\gamma_{v_f}\mathcal{M}v_f \\ 0 \\ 0 \\ \gamma_{v_f}\mathcal{M}c^2 \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \mathcal{M}c^2 \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} cF_x t_0 \\ cF_y t_0 \\ 0 \\ F_x L \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} -c\mu(\mathcal{M}g - F_y)t_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\} +$$

$$+ \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ -cGt_0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ cNt_0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ Q \end{array} \right\}$$

Fuerza de rozamiento

$$E_f^\mu - E_i^\mu = W_F^\mu + W_{\mathrm{R}}^\mu + W_{\mathrm{G}}^\mu + W_{\mathrm{N}}^\mu$$

$$\left\{ \begin{array}{c} c\gamma_{v_f}\mathcal{M}(T_f)v_f \\ 0 \\ 0 \\ \gamma_{v_f}\mathcal{M}(T_f)c^2 \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \mathcal{M}(T_i)c^2 \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} cF_x t_0 \\ cF_y t_0 \\ 0 \\ F_x L \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} -c\mu(\mathcal{M}g - F_y)t_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\}$$

$$+ \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ -cGt_0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ cNt_0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\} +$$

Ecuaciones

Segunda ley de Newton

$$\gamma_{v_f} \mathcal{M} v_f = [F_x - \mu(\mathcal{M} g - F_y)]\, t_0$$

Ecuación de la energía

$$\gamma_{v_f} \mathcal{M} c^2 - \mathcal{M} c^2 = F_x L + Q$$

Fuerza de rozamiento

$$\gamma_{v_f} \mathcal{M} v_f = [F_x - \mu(\mathcal{M} g - F_y)]\, t_0$$

Relación

$$v \mathrm{d}(\gamma_v v) = \mathrm{d}(\gamma_v c^2)$$

Ecuación del pseudo-trabajo

$$\gamma_{v_f} \mathcal{M} c^2 - \mathcal{M} c^2 = [F_x - \mu(\mathcal{M} g - F_y)]\, L$$

Ecuación de la energía

$$\gamma_{v_f} \mathcal{M} c^2 - \mathcal{M} c^2 = F_x L + Q$$

Calor. Entropía

$$\gamma_{v_f}\mathcal{M}c^2 - \mathcal{M}c^2 = \left[F_x - \mu(\mathcal{M}g - F_y)\right] L$$

$$\gamma_{v_f}\mathcal{M}c^2 - \mathcal{M}c^2 = F_x L + Q$$

Ecuación de los efectos térmicos

$$Q = -\mu(\mathcal{M}g - F_y)L$$

Irreversibilidad

$$\Delta S_{\mathrm{U}} = \frac{\mu(\mathcal{M}g - F_y)L}{T}$$

Segunda ley de Newton en $\bar{\mathrm{S}}$

$$\gamma_{\bar{v}_f}\mathcal{M}\bar{v}_f = [F_x - \mu(\mathcal{M}g - F_y)]\,\bar{t}_0 + \gamma_V(c^{-2}Q)V$$

$$\gamma_{\bar{v}_f}\bar{v}_f = \gamma_V\gamma_{v_f}(v_f - V)$$

$$\bar{t}_0 = \gamma_V(t_0 - Vc^{-2}L)$$

$$\mathcal{M}^{(Q)} = c^{-2}Q$$

Segunda ley de Newton en $\bar{\mathrm{S}}$

$$\gamma_{\bar{v}_f}\mathcal{M}\bar{v}_f = [F_x - \mu(\mathcal{M}g - F_y)]\,\bar{t}_0 + \gamma_V(c^{-2}Q)V$$

$$\Downarrow$$

$$\gamma_V[\quad \gamma_{v_f}\mathcal{M}v_f = [F_x - \mu(\mathcal{M}g - F_y)]\,t_0$$

$$+$$

$$\gamma_V V c^{-2}[\quad \gamma_{v_f}\mathcal{M}c^2 - \mathcal{M}c^2 = F_x L + Q$$

La ecuación del momento lineal en $\bar{\mathrm{S}}$ es combinación lineal de las ecuaciones del momento lineal y de la energía en S.

Energía en $\bar{\mathrm{S}}$

$$\gamma_{\bar{v}_f}\mathcal{M}c^2 - \gamma_V\mathcal{M}c^2 = F_x\bar{L} + \bar{Q}$$

$$\gamma_{\bar{v}_f} = \gamma_V\gamma_{v_f}(1 - Vv_f/c^2)$$

$$\bar{L} = \gamma_V(L - Vt_0)$$

$$\bar{Q} = \gamma_V Q$$

Fuerza de rozamiento

$$\gamma_{\bar{v}_f}\mathcal{M}c^2 - \gamma_V\mathcal{M}c^2 = F_x\bar{L} + \bar{Q}$$

$$\Downarrow$$

$$\gamma_V V[\ \gamma_{v_f}\mathcal{M}v_f = [F_x - \mu(\mathcal{M}g - F_y)]\,t_0$$

$$+$$

$$\gamma_V[\quad \gamma_{v_f}\mathcal{M}c^2 - \mathcal{M}c^2 = F_x L + Q$$

La ecuación de la energía en $\bar{\mathrm{S}}$ es combinación lineal de las ecuaciones del momento lineal y de la energía en S.

Cambio de referencial
Transformaciones de Lorentz

$$\mathrm{S} \Rightarrow \bar{\mathrm{S}}$$

$$\mathcal{L}^{\mu}_{\nu}(V)\Big[E^{\nu}_{f} - E^{\nu}_{i} = W^{\nu}_{F} + W^{\nu}_{\mathrm{R}} + W^{\nu}_{\mathrm{G}} + W^{\nu}_{\mathrm{N}} + Q^{\nu}\Big] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \bar{E}^{\mu}_{f} - \bar{E}^{\mu}_{i} = \bar{W}^{\mu}_{F} + \bar{W}^{\mu}_{\mathrm{R}} + \bar{W}^{\mu}_{\mathrm{G}} + \bar{W}^{\mu}_{\mathrm{N}} + \bar{Q}^{\mu}$$

$$\bar{\mathrm{S}} \Rightarrow \mathrm{S}$$

$$\mathcal{L}^{\mu}_{\nu}(-V)\Big[\bar{E}^{\nu}_{f} - \bar{E}^{\nu}_{i} = \bar{W}^{\nu}_{F} + \bar{W}^{\nu}_{\mathrm{R}} + \bar{W}^{\nu}_{\mathrm{G}} + \bar{W}^{\nu}_{\mathrm{N}} + \bar{Q}^{\nu}\Big] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E^{\mu}_{f} - E^{\mu}_{i} = W^{\mu}_{F} + W^{\mu}_{\mathrm{R}} + W^{\mu}_{\mathrm{G}} + W^{\mu}_{\mathrm{N}} + Q^{\mu}$$

Principio de relatividad
Transformaciones de Lorentz

$$B^{\mu} = \left\{ \begin{array}{c} c\mathcal{M}\gamma_v v_x = cF_x t_0 \\ c\mathcal{M}\gamma_v v_y = cF_y t_0 \\ c\mathcal{M}\gamma_v v_z = cF_z t_0 \\ \mathcal{M}c^2\gamma_v = F_x x_0 + F_y y_0 + F_z z_0 \end{array} \right\},$$

$$\bar{B}^{\mu} = \left\{ \begin{array}{c} c\mathcal{M}\gamma_{\bar{v}} \bar{v}_x = c\bar{F}_x \bar{t}_0 \\ c\mathcal{M}\gamma_{\bar{v}} \bar{v}_y = c\bar{F}_y \bar{t}_0 \\ c\mathcal{M}\gamma_{\bar{v}} \bar{v}_z = c\bar{F}_z \bar{t}_0 \\ \mathcal{M}c^2\gamma_{\bar{v}} = \bar{F}_x \bar{x}_0 + \bar{F}_y \bar{y}_0 + \bar{F}_z \bar{z}_0 \end{array} \right\}.$$

Principio de relatividad
Cambio de referencial
Transformaciones de Lorentz

$$\left\{\begin{array}{cccc} \gamma(V) & 0 & 0 & -\beta(V)\gamma(V) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\beta(V)\gamma(V) & 0 & 0 & \gamma(V) \end{array}\right\} \left\{\begin{array}{c} c\mathcal{M}\gamma_v v_x = cF_x t_0 \\ c\mathcal{M}\gamma_v v_y = cF_y t_0 \\ c\mathcal{M}\gamma_v v_z = cF_z t_0 \\ \mathcal{M}c^2\gamma_v = F_x x_0 + F_y y_0 + F_z z_0 \end{array}\right\} =$$

$$= \left\{\begin{array}{c} c\mathcal{M}\gamma_{\bar{v}} \bar{v}_x = c\bar{F}_x \bar{t}_0 \\ c\mathcal{M}\gamma_{\bar{v}} \bar{v}_y = c\bar{F}_y \bar{t}_0 \\ c\mathcal{M}\gamma_{\bar{v}} \bar{v}_z = c\bar{F}_z \bar{t}_0 \\ \mathcal{M}c^2\gamma_{\bar{v}} = \bar{F}_x \bar{x}_0 + \bar{F}_y \bar{y}_0 + \bar{F}_z \bar{z}_0 \end{array}\right\}$$

Principio de relatividad
Cambio de referencial
Transformaciones de Lorentz

$$c\mathcal{M}(\gamma_{\bar{v}}\bar{v}_x) = c\bar{F}_x\bar{t}_0$$

$$\downarrow$$

$$\gamma_V\left[c\mathcal{M}\gamma_v v_x = cF_x t_0\right]$$

$$+$$

$$-\beta_V\gamma_V\left[\mathcal{M}c^2\gamma_v = F_x x_0 + F_y y_0 + F_z z_0\right].$$

Principio de relatividad
Cambio de referencial
Transformaciones de Lorentz

$$\gamma_{\bar{v}}\mathcal{M}c^2 = \bar{F}_x\bar{x}_0 + \bar{F}_y\bar{y}_0 + \bar{F}_z\bar{z}_0$$

$$\downarrow$$

$$-\gamma_V\beta_V\left[c\gamma_v\mathcal{M}v_x = cF_xt_0\right]$$

$$+$$

$$\gamma_V\left[\gamma_v\mathcal{M}c^2 = F_xx_0 + F_yy_0 + F_zz_0\right].$$

Cambio de referencial
Transformaciones de Lorentz

$$\left\{\begin{array}{cccc} \gamma(V) & 0 & 0 & +\beta(V)\gamma(V) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ +\beta(V)\gamma(V) & 0 & 0 & \gamma(V) \end{array}\right\}\left\{\begin{array}{c} c\mathcal{M}\gamma_{\bar{v}}\bar{v}_x = c\bar{F}_x\bar{t}_0 \\ c\mathcal{M}\gamma_{\bar{v}}\bar{v}_y = c\bar{F}_y\bar{t}_0 \\ c\mathcal{M}\gamma_{\bar{v}}\bar{v}_z = c\bar{F}_z\bar{t}_0 \\ \mathcal{M}c^2\gamma_{\bar{v}} = \bar{F}_x\bar{x}_0 + \bar{F}_y\bar{y}_0 + \bar{F}_z\bar{z}_0 \end{array}\right\} =$$

$$= \left\{\begin{array}{c} c\mathcal{M}\gamma_v v_x = cF_x t_0 \\ c\mathcal{M}\gamma_v v_y = cF_y t_0 \\ c\mathcal{M}\gamma_v v_z = cF_z t_0 \\ \mathcal{M}c^2\gamma_v = F_x x_0 + F_y y_0 + F_z z_0 \end{array}\right\}$$

Las leyes de la física son independientes del referencial

Simetría en transformaciones de espacio y tiempo. Tiempo y espacio son relativos

Simetría en transformaciones de momento lineal y energía.

Simetría en conservación del momento lineal y de la energía.

Formalismo Einstein-Minkowski-Lorentz

Fuerza de rozamiento

Fuerza de rozamiento

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

FIN

Ideas que dan forma a la física

Las leyes de la física son independientes del referencial

(Teoría especial de la relatividad)

Prof. J Güémez
Departamento de Física Aplicada
Universidad de Cantabria

Santander, enero 2019