RELATIVIDAD

* VELOCIDAD DE PROPAGACION DE LAS INTERACCIONES

* DESCRIPCION DE PROCESOS → SISTEMA DE REFERENCIA
(COORDENADAS)
(RELOJ)

* SISTEMAS INERCIALES
(VALE NEWTON)

* NO FUERZAS EXTERNAS → VELOCIDAD CONSTANTE

- EXPERIMENTOS → PRINCIPIO DE RELATIVIDAD

"TODAS LAS LEYES DE LA NATURALEZA SON IDENTICAS EN TODOS LOS SISTEMAS INERCIALES"

↓

* LAS ECUACIONES QUE EXPRESAN LAS LEYES SON INVARIANTES FRENTE A TRANSFORMACIONES DE COORDENADAS Y TIEMPO DE UN SISTEMA INERCIAL A OTRO *

↓

ECUACIONES MANTIENEN LA FORMA

* MECANICA ORDINARIA → ENERGIA POTENCIAL PARA LAS INTERACCIONES

⇓

PROPAGACION INSTANTANEA DE LAS INTERACCIONES

(DEPENDENCIA SOLO DE LA POSICION INSTANTANEA)

• EXPERIMENTO → NO EXISTEN INTERACCIONES INSTANTANEAS EN LA NATURALEZA

⇓

VELOCIDAD MÁXIMA DE PROPAGACION (VELOCIDAD DE SEÑAL)

⇓

MAYOR VELOCIDAD DE OBJETOS (PODRIAN TRANSMITIR INTERACCION)

$c = 299792458 \frac{m}{seg}$: CONSTANTE UNIVERSAL

* PRINCIPIO DE RELATIVIDAD → $\underline{c}$ IGUAL EN TODOS LOS SISTEMAS INERCIALES

PRINCIPIO DE RELATIVIDAD
+
VELOCIDAD DE PROPAGACION DE INTERACCIONES FINITA → RELATIVIDAD DE EINSTEIN

(~~RELATIVIDA DE GALILEO~~)
(v INFINITA)
↓
MECANICA CLASICA
(NEWTON) → ADICION DE VELOCIDADES?

$$\cancel{\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2} \rightarrow \underline{c + c \overset{?}{=} c}$$

INVARIANCIA RELATIVISTA

* ESPACIO Y TIEMPO: ESCENARIO PARA FENOMENOS FISICOS

PARA UBICARNOS EN EL ESCENARIO:

• SISTEMA DE COORDENADAS

* LOS "MEJORES": SISTEMAS INERCIALES

* ALLÍ VALE NEWTON *

LAS LEYES DE FENOMENOS MECANICOS SON LAS MISMAS EN TODOS LOS SISTEMAS INERCIALES

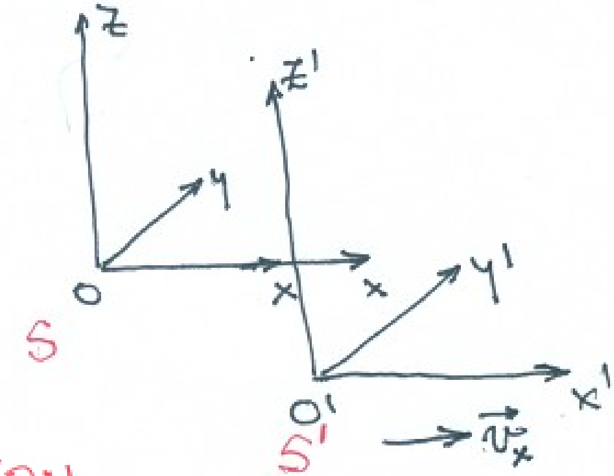
⇒ LEYES COVARIANTES

↓

SISTEMAS EN MOVIMIENTO RECTILINEO UNIFORME RESPECTO A UNO INERCIAL SON INERCIALES

GALILEO

TRANSFORMACIONES DE →



- $x' = x - vt \; ; \; y' = y \; ; \; z' = z \; ; \; t' = t$

DEJAN COVARIANTE LA 2a. LEY DE NEUTON

↓

* PRINCIPIO DE RELATIVIDAD: IMPOSIBLE DETECTAR POR MEDIOS MECANICOS EL MOVIMIENTO ABSOLUTO

Ts. DE GALILEO DEJAN COVARIANTES LAS LEYES DEL ELECTROMAGNETISMO ?

RESPUESTA: **NO**

POR QUÉ ?

MAXWELL $\Rightarrow$ ONDAS $\left(\Box^2\vec{E}=0\,;\ \Box^2\vec{H}=0\right)$ $\Rightarrow$

EN EL VACÍO VIAJAN CON VELOCIDAD C EN TODAS DIRECCIONES

VIAJA EN X DE S CON C $\Rightarrow$ EN X' DE S' LO HARÍA CON

(GALILEO) $C-V$ $\Rightarrow$ EN S' TENDRÍA VELOCIDADES

DIFERENTES EN DIFERENTES DIRECCIONES

$\Downarrow$

LEYES DE MAXWELL VALDRÍAN SOLO EN UN SISTEMA "PRIVILEGIADO": EL DEL "ÉTER"

* EXPERIMENTO CLAVE : MICHELSON - MORLEY

(INTERFEROMETRIA)

LA VELOCIDAD DE LA LUZ C ES LA MISMA EN TODAS LAS DIRECCIONES → NO ETER

↓

• ~~TRANSFORMACIONES DE~~ GALILEO PARA MAXWELL •

↓

RELATIVIDAD EINSTEIN

POSTULADOS DE LA RELATIVIDAD

- EINSTEIN : LA SIMULTANEIDAD DEBE SER DEFINIDA
  NO PUEDE SER VERIFICADA EXPERIMENTALMENTE

MEDIR v IMPLICA MEDIR t DE PASAJE POR DOS PUNTOS DISTANTES
Y SE NECESITA SINCRONIZAR LOS RELOJES RESPECTIVOS
Y PARA ELLO SE NECESITA CONOCER PREVIAMENTE UNA
VELOCIDAD $\Rightarrow$ CIRCULO VICIOSO

$\Downarrow$

DEFINIR SIMULTANEIDAD SOBRE LA BASE DE QUE
LAS ONDAS em SE PROPAGAN EN EL VACIO
CON VELOCIDAD <u>C</u> RESPECTO DE <u>TODO</u> SISTEMA INERCIAL

POSTULADOS

1) LAS LEYES DE LA NATURALEZA TIENEN LA MISMA FORMA EN TODOS LOS SISTEMAS INERCIALES
(COVARIANCIA)

2) LA VELOCIDAD C DE PROPAGACION DE LAS ONDAS em EN EL VACIO ES LA MISMA EN TODOS LOS SISTEMAS INERCIALES E INDEPENDIENTE DE LA DIRECCION DE PROPAGACION

$\Longrightarrow$
- LA SIMULTANEIDAD NO ES ABSOLUTA
- LONGITUDES DEPENDEN DEL ESTADO DE MOVIMIENTO DEL OBSERVADOR

POSICIONES SIMULTANEAS DE LOS EXTREMOS NO ES UNIVERSAL

TRANSFORMACIONES DE LORENTZ

(REEMPLAZAR GALILEO)

- PUNTO P $\rightarrow$ EN S : (x, y, z, t)
  $\rightarrow$ EN S' : (x', y', z', t')

$$d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$$

$d =$ DISTANCIA RECORRIDA POR UN RAYO DE LUZ ENTRE P_1 Y P_2

$\downarrow$ EN S: $c^2 = \dfrac{d^2}{\Delta t^2}$ $\Rightarrow$ • $\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 - c^2 \Delta t^2 = 0$

POSTULADO 2) $\Rightarrow$ EN S' : $\Delta x'^2 + \Delta y'^2 + \Delta z'^2 - c \Delta t'^2 = 0$

- NOTACION TETRADIMENSIONAL

  - $x_1 = x$; $x_2 = y$; $x_3 = z$; $x_4 = ict$

$\Downarrow$

- $$\sum_{\alpha=1}^{4} \Delta x_\alpha = 0 \qquad \left(= \sum_{\alpha=1}^{4} \Delta x'_\alpha\right)$$

TRANSFORMACIONES DE LORENTZ GARANTIZAN LA VALIDEZ DE LA IGUALDAD

SON LINEALES Y DEJAN INVARIANTE EL INTERVALO MAS GENERAL

- $$\Delta s^2 = \sum_{\alpha=1}^{4} \Delta x_\alpha^2$$

ENTRE 2 PUNTOS ESPACIO - TEMPORALES NO NECESARIAMENTE

CONECTADOS POR LUZ

SON "TRASLACIONES" Y "ROTACIONES" EN UN ESPACIO TETRADIMENSIONAL (ESPACIO DE MINKOWSKI)

"ROTACIONES" ≡ TRANSFORMACIONES DE LORENTZ

- $$x'_\alpha = \sum_{\beta=1}^{4} a_{\alpha\beta}\, x_\beta$$

ORTOGONALIDAD: $\sum_{\gamma=1}^{4} a_{\alpha\gamma}\, a_{\beta\gamma} = \delta_{\alpha\beta}$

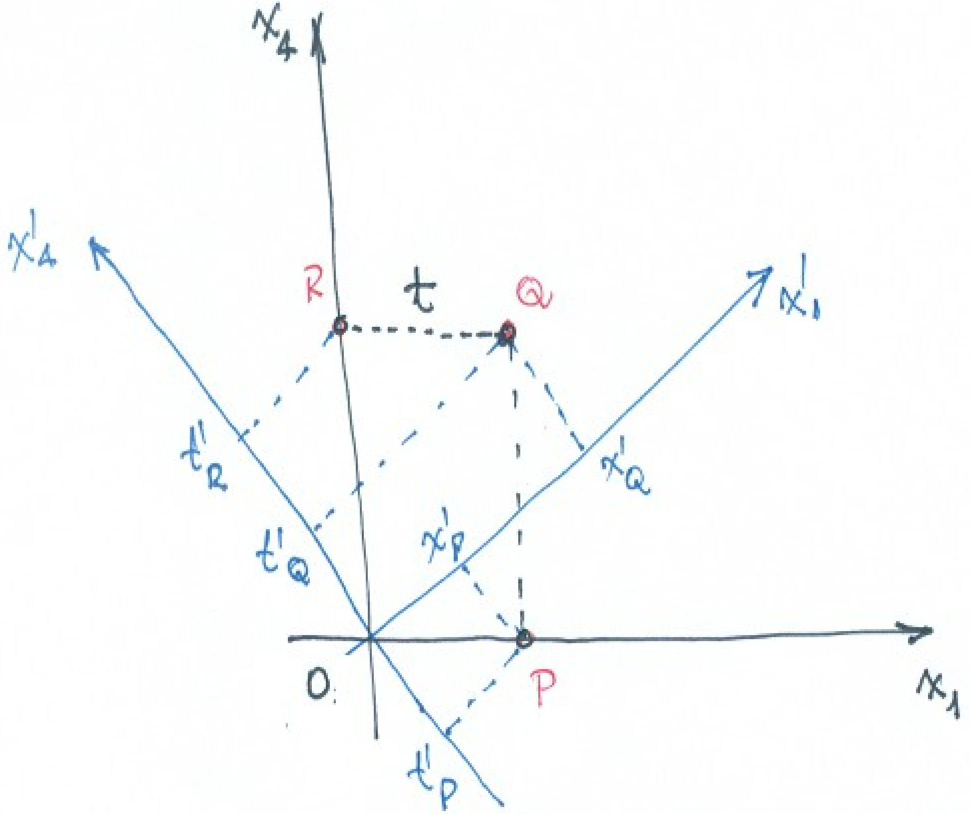
EJ:

MOVIMIENTO RELATIVO DE S Y S' A LO LARGO DE x

(SOLO SE AFECTAN x_1 Y x_4)

- $$\begin{cases} x'_1 = x_1 \cos\psi + x_4 \operatorname{sen}\psi \\ x'_2 = x_2 \\ x'_3 = x_3 \\ x'_4 = -x_1 \operatorname{sen}\psi + x_4 \cos\psi \end{cases}$$

- ψ: ÁNGULO DE "ROTACIÓN" EN EL PLANO (x_1, x_4)



Q y R : SIMULTANEOS EN S

$t'_Q \neq t'_R$: <u>NO</u> SIMULTANEOS EN S'

P y Q : IGUAL POSICION ESPACIAL EN S

$x'_P \neq x'_Q$: EN S'

- $x'_\alpha = \sum_{\beta=1}^{4} a_{\alpha\beta}\, x_\beta \rightarrow$ * $a_{\alpha\beta}$ ADIMENSIONALES $\Rightarrow$ $\psi = \underline{f\left(\beta = \frac{v}{c}\right)}$

ORIGEN DE S' DESDE S SE MUEVE CON v

- $\dfrac{x_1}{x_4} = \dfrac{x_1}{ict} = -\dfrac{i}{c}\dfrac{x_1}{t} = -i\dfrac{v}{c} = -i\beta$

$\rightarrow x'_1 = x_1 \cos\psi + x_4 \operatorname{sen}\psi \Rightarrow$ • $\tan\psi = -\dfrac{x_1}{x_4} = i\beta$

$\Downarrow$

- $\cos\psi = \dfrac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$
- $\operatorname{sen}\psi = \dfrac{i\beta}{\sqrt{1-\beta^2}}$

- $\begin{cases} x'_1 = \gamma(x_1 + i\beta x_4) \\ x'_2 = x_2 \\ x'_3 = x_3 \\ x'_4 = \gamma(x_4 - i\beta x_1) \end{cases}$

- $\gamma = \dfrac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$

$\begin{cases} x' = \gamma(x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \gamma\left(t - \dfrac{v}{c^2}x\right) \end{cases}$

INVERSAS:

PRIMADAS $\rightarrow$ SIN PRIMAR

$v \rightarrow -v$

IMPORTANTE:

- Ts. DE LORENTZ DEPENDEN SOLO DE LA VELOCIDAD RELATIVA ENTRE S Y S'
- NO DEPENDEN DE LAS POSICIONES RELATIVAS EN EL ESPACIO-TIEMPO

$\Downarrow$

TRANSFORMACIONES DE LORENTZ SON GLOBALES

- (EN RELATIVIDAD GENERAL: TRANSFORMACIONES LOCALES)
  (COORDENADAS LOCALES)

- Ts. LORENTZ $\xrightarrow[\beta \to 0]{}$ Ts. GALILEO

$\underline{\vec{v} \neq \check{x}}$

$$\vec{r} \begin{cases} (\parallel \vec{v}) & \vec{r}_{\parallel} \\ (\perp \vec{v}) & \vec{r}_{\perp} \end{cases}$$

- $$\begin{cases} \vec{r}\,'_{\parallel} = \gamma\left(\vec{r}_{\parallel} + \vec{v}\,t\right) \\ \vec{r}\,'_{\perp} = \vec{r}_{\perp} \\ t' = \gamma\left[t + \left(\dfrac{\vec{v}\cdot\vec{r}_{\parallel}}{c^2}\right)\right] \end{cases}$$

- $\vec{r}_{\parallel} = \dfrac{(\vec{r}\cdot\vec{v})\,\vec{v}}{v^2}$; - $\vec{r}_{\perp} = \vec{r} - \vec{r}_{\parallel}$ - $\vec{r}\,' = \vec{r}\,'_{\perp} + \vec{r}\,'_{\parallel}$

$\downarrow$ (MAS GENERAL)

- $$\begin{cases} \vec{r}\,' = \vec{r} + (\gamma - 1)\dfrac{(\vec{r}\cdot\vec{v})\,\vec{v}}{v^2} - \gamma\,\vec{v}\,t \\ t' = \gamma\left(t - \dfrac{\vec{r}\cdot\vec{v}}{c^2}\right) \end{cases}$$

$\rightarrow \underline{a_{\alpha\beta}}$

* TRANSFORMACIONES CONFORMES

• ECUACIONES DE MAXWELL COVARIANTES CONFORMES

* Ts. CONFORMES:

- LORENTZ USUALES
- CAMBIOS DE ESCALA: $x'_\mu = \lambda x_\mu$
- NO LINEALES: $x'_\mu = \dfrac{1}{N}\left(x_\mu - x^2 a_\mu\right)$

$(N = 1 - 2\, a.x + a^2 x^2)$ (a_μ: CONSTANTE)

PERO PRINCIPIO DE INERCIA (PARTICULA LIBRE → v = CONSTANTE)

NO ES INVARIANTE CONFORME

(AL CAMBIAR DE SISTEMA → ACELERACIONES EN LA LIBRE)

(NO LINEALIDAD!)

* EXCEPCION (UNICA): VELOCIDAD DE LA PARTICULA ≡ C

SIMETRIA CONFORME NO ES DE LA NATURALEZA!

(HAY PARTICULAS MASIVAS → $v < c$) (RMP 21, 378 (1949))