

# Física IV (IF 2023)

## Aula 25

- Objetivos de aprendizagem
  - Definir o “tempo próprio” de um objeto
  - Usar a transformação de Lorentz para obter a relação entre o tempo próprio e o tempo em um referencial com movimento relativo (dilatação temporal)
  - Explicar como muons produzidos na alta atmosfera são capazes de chegar até o solo antes de decair
  - Identificar a importância da relatividade para os sistemas de GPS

# Tempo próprio

- Intervalo de tempo entre dois eventos que ocorrem num mesmo ponto do espaço no referencial em que esse intervalo é medido

Exemplo: um período de oscilação do pêndulo de um relógio de pêndulo que está em repouso

# Usar a TL para relacionar intervalos de tempo

Transformação de Lorentz

$$x' = \gamma(x - \beta ct)$$

$$ct' = \gamma(ct - \beta x)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

Qual é a relação entre o intervalo de tempo entre dois eventos (1 e 2) medidos em S e o tempo próprio do mesmo processo em S'?

# Usar a TL para relacionar intervalos de tempo

Transformação de Lorentz

$$x' = \gamma(x - \beta ct)$$

$$ct' = \gamma(ct - \beta x)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

Qual é a relação entre o intervalo de tempo entre dois eventos (1 e 2) medidos em S e o tempo próprio do mesmo processo em S'?

→ Subst. nas TL com a condição de que, em S', o evento final ocorre no mesmo ponto do espaço que o evento inicial.

→ Identificar o intervalo de tempo em S' como sendo o tempo próprio:

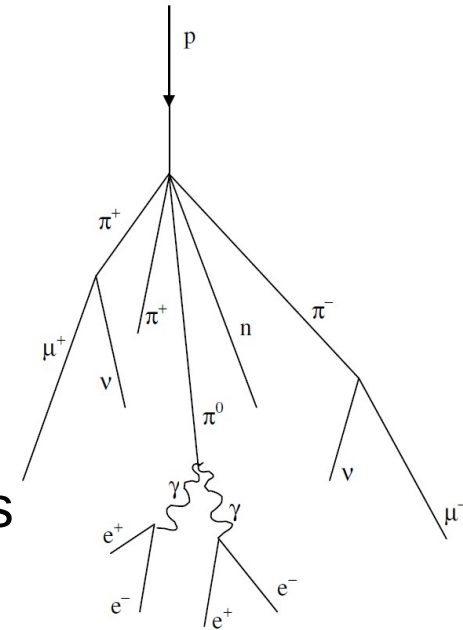
$$t_2' - t_1' = \tau$$

→ Resultado:  $t_2 - t_1 = \gamma \tau$

# Decaimento do Muon

<https://pdglive.lbl.gov/Particle.action?node=S004&init=0>

- Muon é uma partícula fundamental do **MP**, mas é instável
- Decaimento do muon (-):  $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$  (entre outros processos)
- A vida média é:  $\tau = 2.2 \mu s$
- Muons são produzidos por reações nucleares com raios cósmicos na alta **troposfera** da Terra (h~15 km)
- Parte deles atinge a superfície da Terra.
- Como isso é possível?



# Viagem interestelar (revisitada)

- Um astronauta parte do sistema solar em direção a Alfa-Centauro (a 4.3 a.l. do SS) com uma velocidade de  $0.91 c$ . Em quanto tempo, no referencial da nave, será feita a viagem?

Obs.: a velocidade do sistema de Alfa-Centauro com relação ao sistema solar é desprezível em comparação com a velocidade da luz.

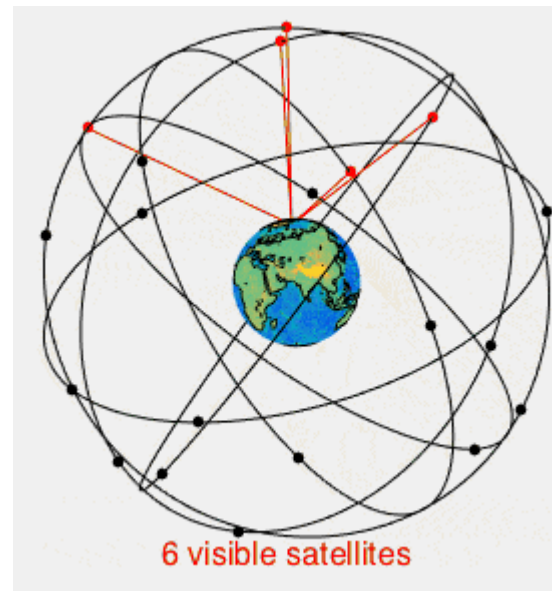
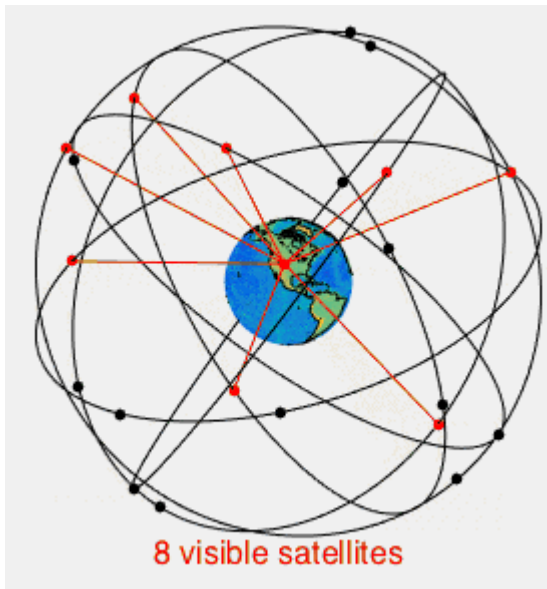
- Reanalisar a questão com base na dilatação temporal.

# Paradoxo dos gêmeos

- O astronauta volta para casa na mesma nave (na mesma velocidade) e encontra o seu irmão gêmeo. Qual será a diferença de idade entre eles?
- Como o astronauta explica, do seu ponto de vista, a idade do seu irmão?

# GPS

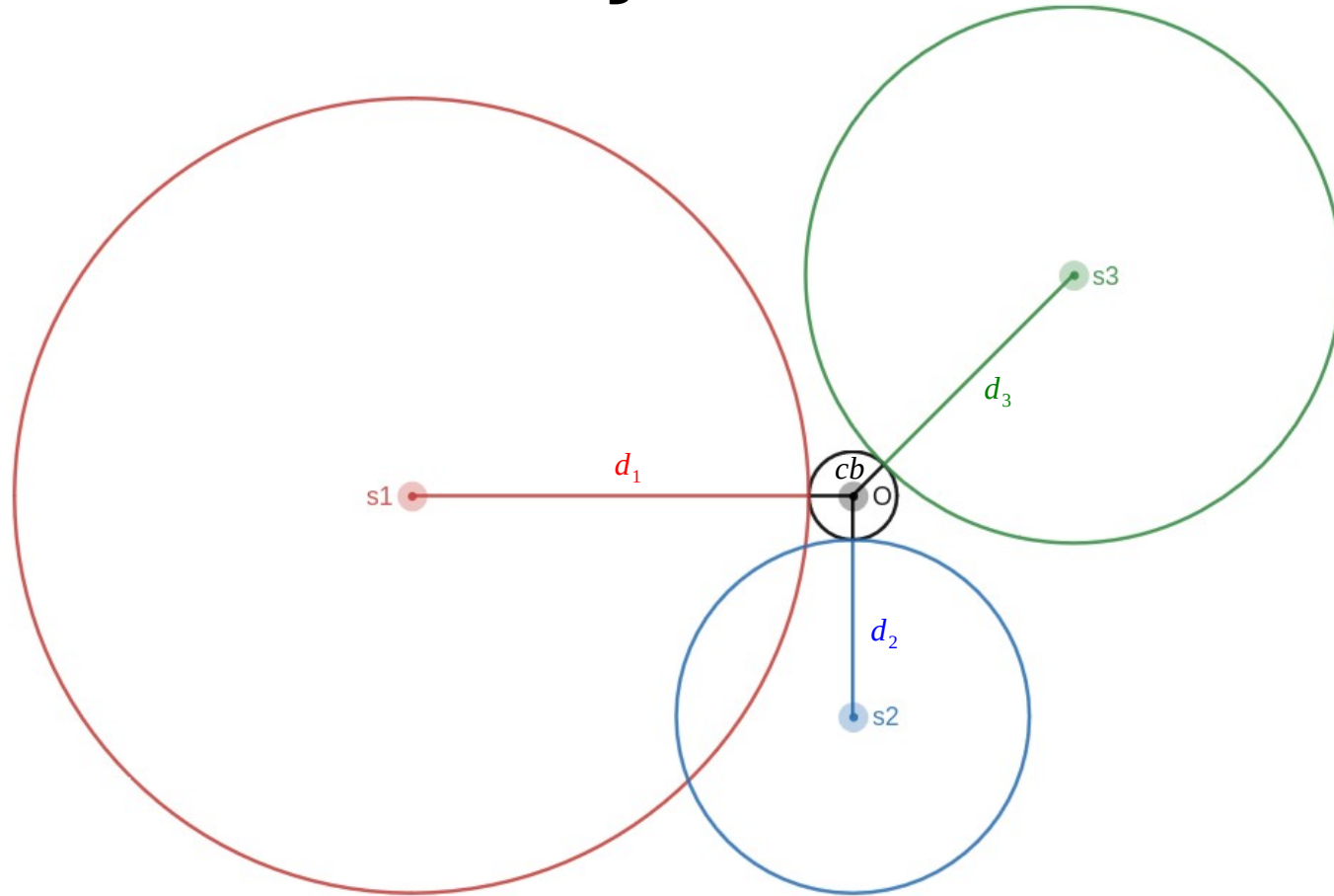
- 4 satélites (no mínimo) → 4 coordenadas (x,y,z,t)
- TOA ( $\tilde{t}_i$ ), TOT ( $s_i$ )
- bias ( $b = \tilde{t}_i - t_i$ )
- TOF ( $\Delta t_i = \tilde{t}_i - s_i - b$ )
- $d_i = |\vec{r}_i - \vec{r}_0| = c \Delta t_i$



[https://en.wikipedia.org/wiki/Global\\_Positioning\\_System](https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System)



# Localização em 2D



# Exercício

- $R_{\text{sat}} \sim 26.000 \text{ km}$ , Período da órbita: 12h
- $V_{\text{sat}} = 3.87 \text{ km/s}$
- Qual é a razão entre a frequência de um relógio com essa velocidade e um relógio idêntico em repouso?
- Qual seria o erro na distância calculada do satélite até o observador após 6 h sem levar em consideração a diferença de marcha entre os relógios?
- (Obs.: correção devida a relatividade geral é maior)