狭义相对论的两个基本假设

I. 光速不变原理

在所有的惯性系中，光在真空中的传播速率具有相同的值

II. 狭义相对性原理

一切物理规律在所有惯性系中具有相同的形式

洛伦兹变换

正变换

$$x'=\frac{x-ut}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad y'=y \quad z'=z \quad t'=\frac{t-ux/c^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

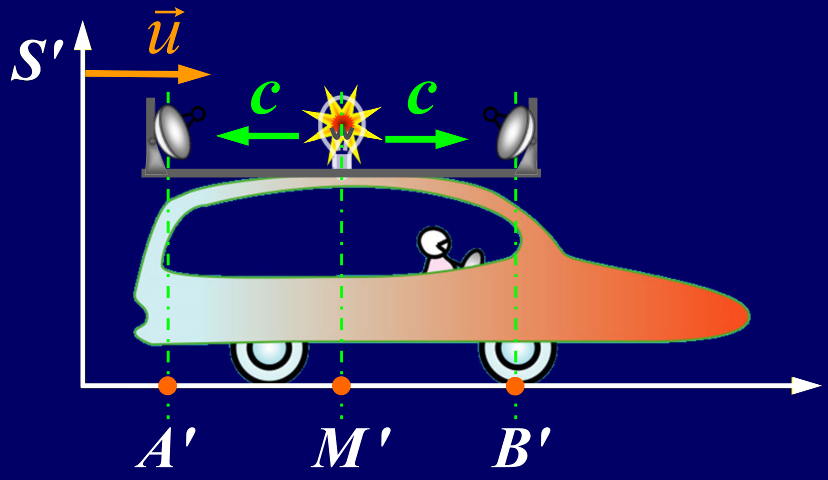
$$\Delta x'=\frac{\Delta x-u\Delta t}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad \Delta y'=\Delta y \quad \Delta z'=\Delta z \quad \Delta t'=\frac{\Delta t-u\Delta x/c^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

§14.4 狭义相对论的时空观

一. 同时性的相对性

S 地面参考系

S' 假想火车



$t = t' = 0$ 时，M' 发出一光信号

S'

事件1：A' 接收到光信号　　事件2：B' 接收到光信号

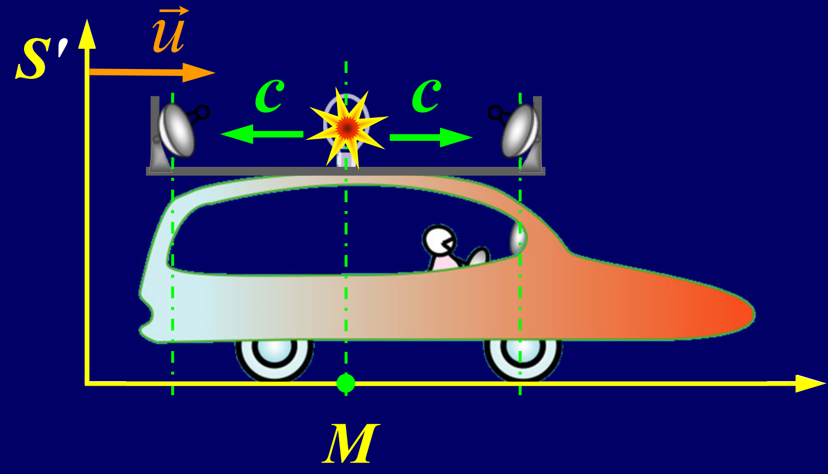
$\overline{A'M'} = \overline{B'M'}$ → 1、2 两事件在S'系中同时发生

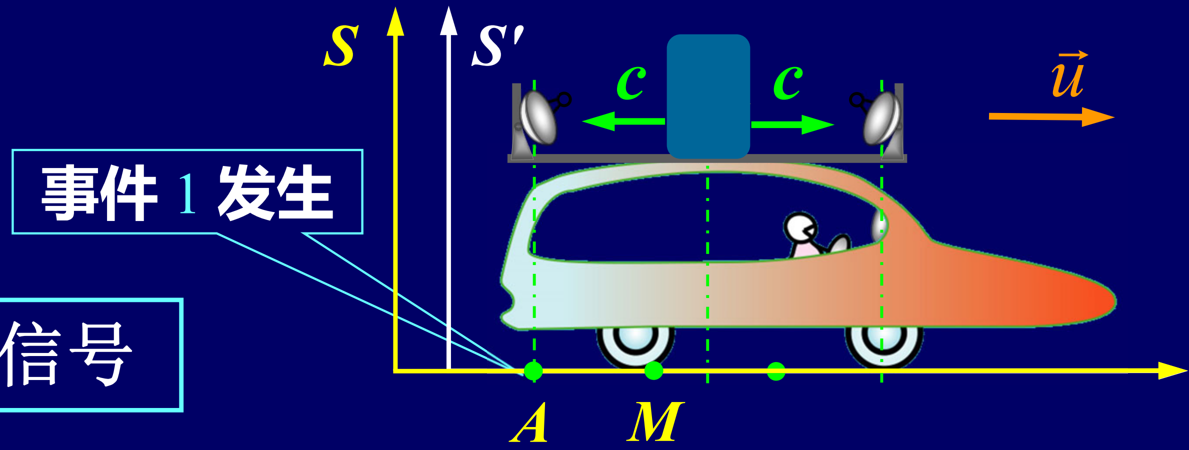
S

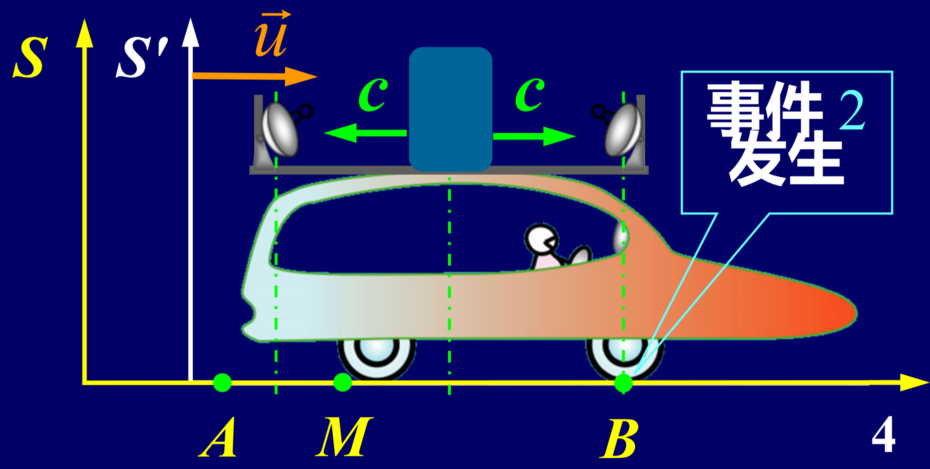
$$\overline{AM} < \overline{A'M'}$$

$$\overline{BM} > \overline{B'M'}$$

A' 比 B' 早接收到光信号







在S系中1事件先于2事件发生

- S' 系中异地同时事件，在S系中并不同时。

——同时的相对性

$$\Delta t' = \frac{\Delta t - u\Delta x / c^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

- S' 系中同地同时事件，在S系中也是同时。

——同地事件的同时性具有绝对意义

$t_2 - t_1 > 0$ S系中事件1先于事件2发生。

$t_2' - t_1' > 0, \quad < 0, \quad = 0$?

$$t_2' - t_1' = \frac{(t_2 - t_1) - u(x_2 - x_1)/c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad t_2 - t_1 > 0$$

事件1与事件2有因果联系。 $\left|x_2 - x_1\right| = \bar{\upsilon}(t_2 - t_1)$

$$u(x_2 - x_1)/c^2 = u\bar{\upsilon}(t_2 - t_1)/c^2 < t_2 - t_1$$

$$\bar{\upsilon} < c,\ u < c \quad \Longrightarrow \quad u\bar{\upsilon}/c^2 < 1$$

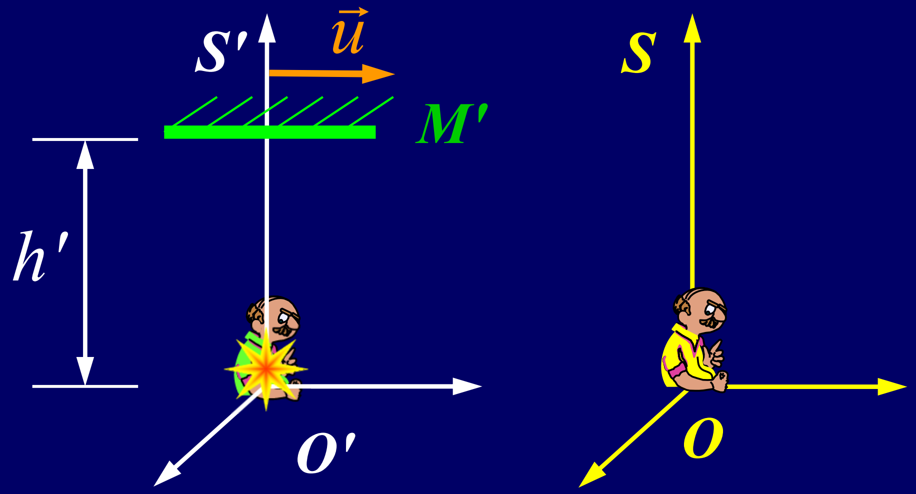
则：$t_2' - t_1' > 0$

- **因果关系是绝对的，不依赖于参考系的选择**

二. 时间延缓

事件1　O' 处的闪光光源发出一光信号

事件2　O' 处的接收器接收到该光信号



$$\Delta t \overset{?}{\Leftrightarrow} \Delta t'$$ (原时)

原时： 在某惯性系中，同一地点先后发生的两个事件之间的时间间隔

$$\Delta t=\frac{\Delta t'+\frac{u}{c^2}\Delta x'}{\sqrt{1-(u/c)^2}} \Rightarrow \Delta t=\frac{\Delta t'}{\sqrt{1-(u/c)^2}}$$

$$\Delta x=\frac{\Delta x'+u\Delta t'}{\sqrt{1-\beta^2}}\neq 0$$

原时： **在某惯性系中，同一地点先后发生的两个事件之间的时间间隔**

记： $\tau_0=\Delta t$ $\quad \tau=\Delta t \quad \beta=u/c \quad \gamma=\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$

$$\boxed{\tau=\frac{\tau_0}{\sqrt{1-\beta^2}}=\gamma\tau_0} > \tau_0$$

——时间延缓效应

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

- 在不同惯性系中测量给定两事件之间的时间间隔，测得的结果以原时最短。
- 运动时钟走的速率比静止时钟走的速率要慢。
- 物体的运动速度愈大，它内部的物理过程进行的愈缓慢。

讨论

(1) 当$\upsilon << c$时，$\beta \sim 0, \tau \approx \tau_0$

(2) 时间延缓效应是相对的。

(3) 运动时钟变慢效应是时间本身的客观特征。

例 π^-介子是一种不稳定的粒子，从它产生到它衰变为 π^-介子经历的时间即为它的寿命，已测得静止 π^-介子的平均寿命 $\tau_0 = 2\times10^{-8}\mathrm{s}$. 某加速器产生的 π^- 介子以速率 $u = 0.98\,c$ 相对实验室运动。

求 π^- 介子衰变前在实验室中通过的平均距离。

解 对实验室中的观察者来说，运动的 π^- 介子的寿命 τ 为

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{2\times10^{-8}}{\sqrt{1-0.98^2}} = 1.005\times10^{-7}\,\mathrm{s}$$

因此， π^- 介子衰变前在实验室中通过的距离 d' 为

$$d' = u\,\tau = 0.98\,c\times1.005\times10^{-7} = 29.5\mathrm{m}$$

三. 长度收缩

1. 运动长度的测量

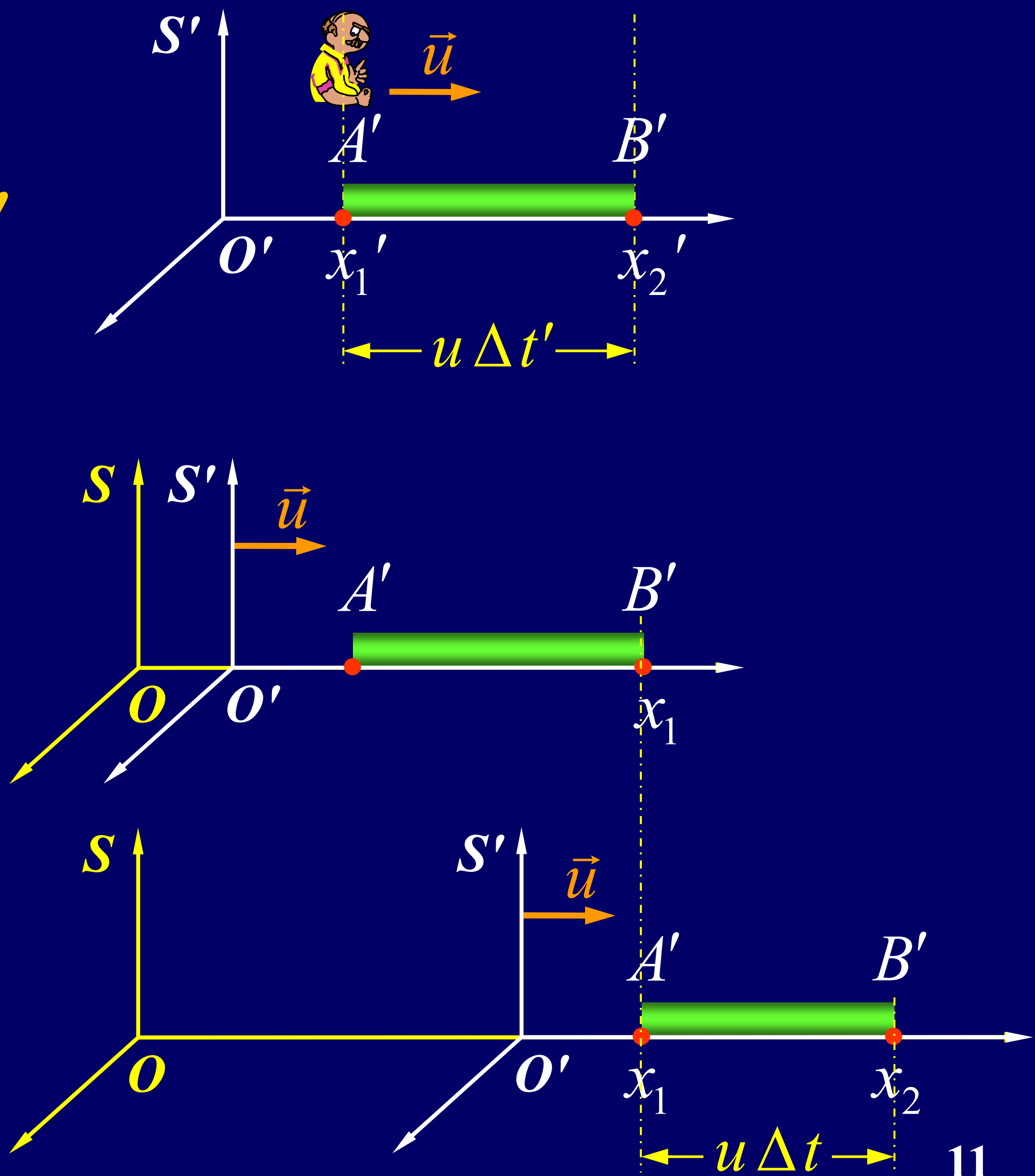
S' $\quad l_0 = \underbrace{x_2' - x_1'} = u\Delta t'$

不要求同时测量

原长：相对于棒静止的惯性系测得棒的长度

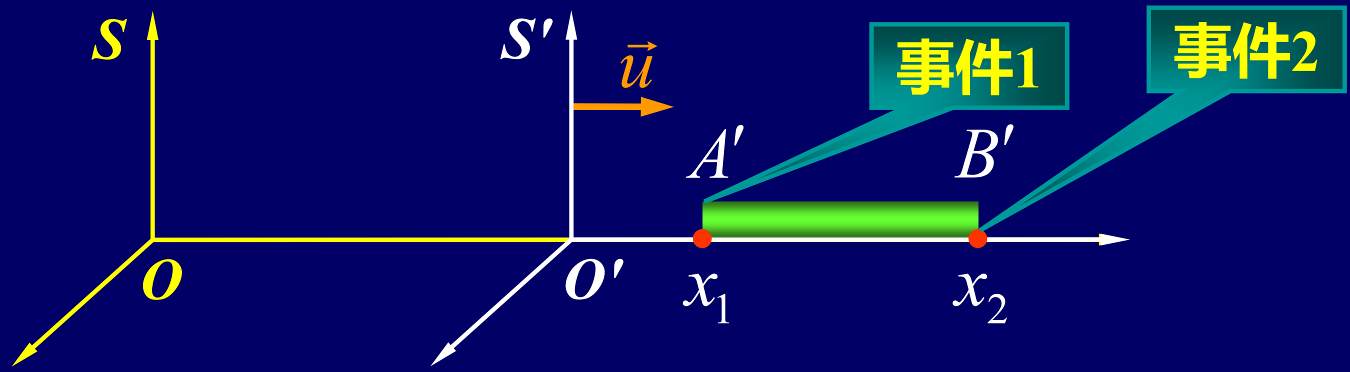
S $\quad l = \underbrace{x_2 - x_1} = u\Delta t$

必须同时测量



2. 长度收缩

S $l = x_2 - x_1$ 两事件必须同时发生

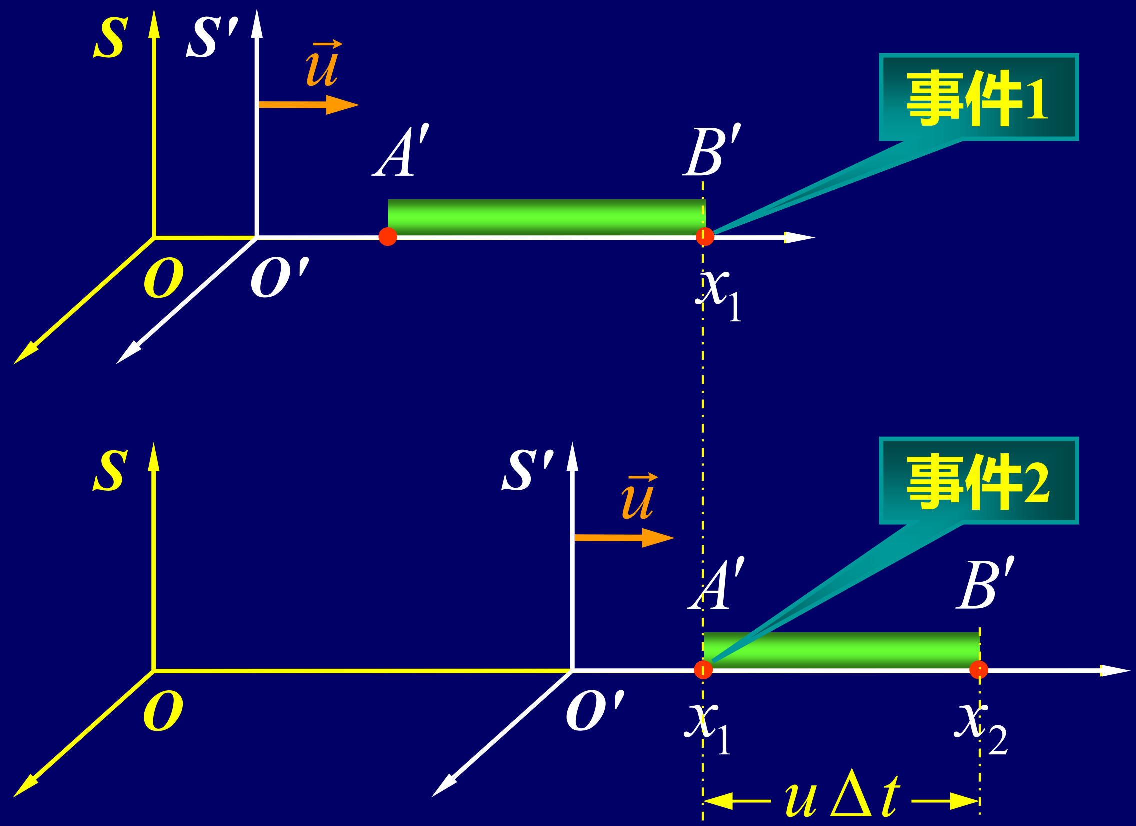


$$l_0 = x_2' - x_1' = \frac{(x_2 - x_1) - u\Delta t}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$\boxed{l = l_0\sqrt{1-\beta^2}}$$ —— 运动长度缩短效应

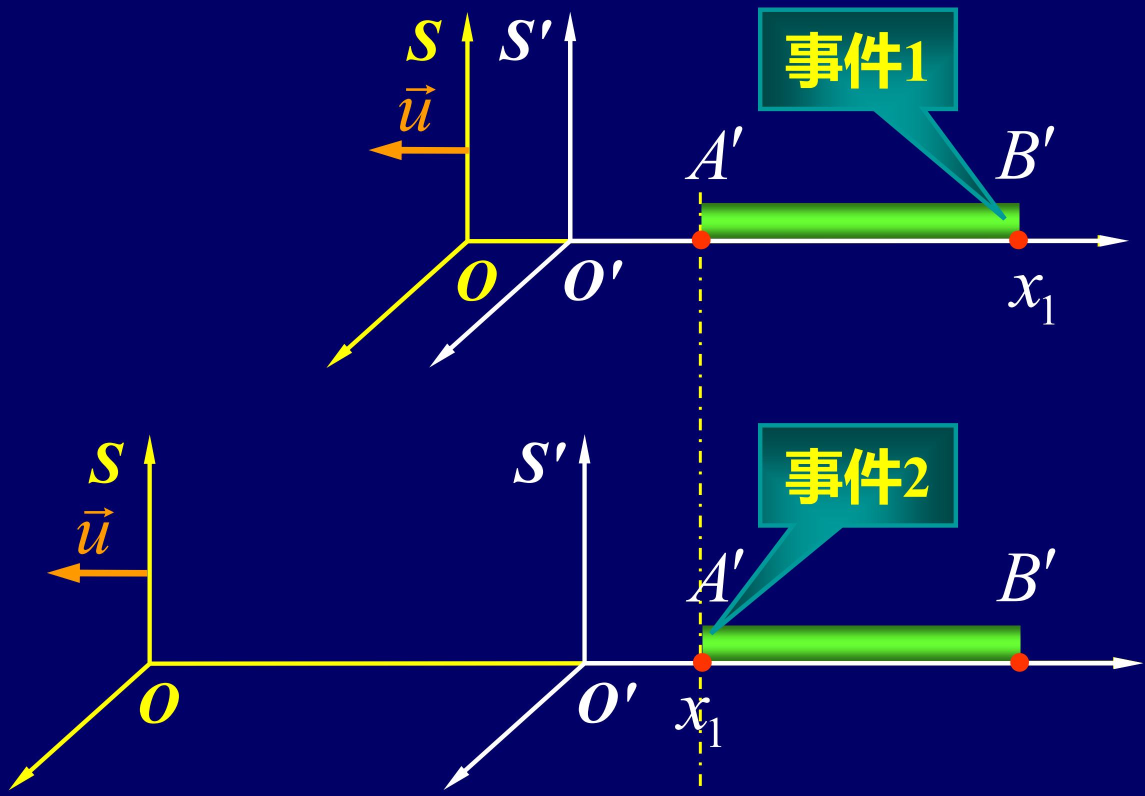
S $l = x_2 - x_1 = u\Delta t$

两事件同地发生，Δt 为原时



S $l = x_2 - x_1 = u\Delta t$

两事件同地发生，Δt 为原时



S' $l_0 = u\Delta t'$

由 $\Delta t' = \dfrac{\Delta t}{\sqrt{1-\beta^2}}$

得 $\dfrac{l_0}{u} = \dfrac{l}{u\sqrt{1-\beta^2}}$ $\Rightarrow$ $\boxed{l = l_0\sqrt{1-\beta^2}}$

$$\boxed{l = l_0\sqrt{1-\beta^2}}$$

- 在不同惯性系中测量同一尺长，以原长为**最长**。

讨论

(1) 当 $v << c$ 时， $l \approx l_0$

(2) 长度收缩效应是相对的。

(3) 长度收缩发生在物体运动的方向上。

(4) 长度收缩效应并不是视觉感受，而是测量结果。

例 地球–月球系中测得地–月距离为 3.844×10^{8} m，一火箭以 $0.8c$ 的速率沿着从地球到月球的方向飞行，先经过地球(事件1)，之后又经过月球 (事件2)。

求 在地球–月球系和火箭系中观测，火箭从地球飞经月球所需要的时间。

解 取地球–月球系为 S 系，火箭系为 S' 系。则在 S 系中，地–月距离为

$$l=\Delta x=3.844\times10^{8}\,\mathrm{m}$$

火箭从地球飞径月球的时间为

$$\Delta t=\frac{\Delta x}{u}=\frac{3.844\times10^{8}}{0.8\times3\times10^{8}}=1.6\,\mathrm{s}$$

设在系 S' 中，地–月距离为 l'，根据长度收缩公式有

$$l' = l\sqrt{1-\beta^2}$$

因此，在 S' 系中火箭从地球飞径月球的时间为

$$\Delta t' = \frac{l'}{u} = \frac{l_0\sqrt{1-\beta^2}}{u}$$

$$= \frac{3.844\times10^8\times\sqrt{1-0.8^2}}{0.8\times3\times10^8} = 0.96\,\mathrm{s}$$

另解: $\boxed{\tau = \dfrac{\tau_0}{\sqrt{1-\beta^2}}}$ $\Delta t' = \tau_0 = \tau\sqrt{1-\beta^2} = \Delta t\sqrt{1-\beta^2}$

例 宇宙飞船以 $0.8c$ 速度远离地球(退行速度 $u=0.8c$)，在此过程中飞船向地球发出两光信号，其时间间隔为 Δt_E.

求 地球上接收到它发出的两个光信号间隔 Δt_R.

解 令宇宙飞船为 S' 系，地面为 S 系。则 S 系中测得发出两光信号的时间间隔为

$$\Delta t_{发射}=\frac{\Delta t_E}{\sqrt{1-u^2/c^2}}=\frac{\Delta t_E}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

接收两光信号的时间间隔为

$$\Delta t_R=\Delta t_{发射}+\frac{u\Delta t_{发射}}{c}$$

$$=\Delta t_{发射}(1+\frac{u}{c})$$

$$=\Delta t_E\sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}=3\Delta t_E$$