§8.3 从洛仑兹变换看相对论的时空性质

§8.3 从洛仑兹变换看相对论的时空性质

一、同时的相对性

§8.3 从洛仑兹变换看相对论的时空性质

一、同时的相对性

A 事件的时空坐标 (x, y, z, t)：空间坐标 (x, y, z) 容易理解

时间坐标 t：　是指 A 事件与放置在 S 系 (x, y, z) 处的一个钟指向 t 时刻这一事件同时发生

§ 8.3 从洛仑兹变换看相对论的时空性质

一、同时的相对性

A 事件的时空坐标 (x, y, z, t)：空间坐标 (x, y, z) 容易理解

时间坐标 t：是指 A 事件与放置在 S 系 (x, y, z) 处的一个钟指向 t 时刻这一事件同时发生

若两事件发生于同一地点，可用该地的一个钟来判断两事件是否同时发生。

对异地事件，由于必须用两个钟来标记两个事件发生的时间，因此这两个钟必须校准，若在某惯性系校准了的两个钟读数相同，则称这两个事件在该惯性系同时发生。

§ 8.3 从洛仑兹变换看相对论的时空性质

一、同时的相对性

A 事件的时空坐标 (x, y, z, t)：空间坐标 (x, y, z) 容易理解

时间坐标 t： 是指 A 事件与放置在 S 系 (x, y, z) 处的一个钟指向 t 时刻这一事件同时发生

若两事件发生于同一地点，可用该地的一个钟来判断两事件是否同时发生。

对异地事件，由于必须用两个钟来标记两个事件发生的时间，因此这两个钟必须校准，若在某惯性系校准了的两个钟读数相同，则称这两个事件在该惯性系同时发生。

如何校准：等距电磁信号法。

§8.3 从洛仑兹变换看相对论的时空性质

一、同时的相对性

A 事件的时空坐标 (x, y, z, t)：空间坐标 (x, y, z) 容易理解

时间坐标 t： 是指 A 事件与放置在 S 系 (x, y, z) 处的一个钟指向 t 时刻这一事件同时发生

若两事件发生于同一地点，可用该地的一个钟来判断两事件是否同时发生。

对异地事件，由于必须用两个钟来标记两个事件发生的时间，因此这两个钟必须校准，
若在某惯性系校准了的两个钟读数相同，则称这两个事件在该惯性系同时发生。

如何校准：等距电磁信号法。用于校准固定于某惯性系各地的时钟

§ 8.3 从洛仑兹变换看相对论的时空性质

一、 同时的相对性

A 事件的时空坐标 (x, y, z, t)：空间坐标 (x, y, z) 容易理解

时间坐标 t： 是指 A 事件与放置在 S 系 (x, y, z) 处的一个钟指向 t 时刻这一事件同时发生

若两事件发生于同一地点，可用该地的一个钟来判断两事件是否同时发生。

对异地事件，由于必须用两个钟来标记两个事件发生的时间，因此这两个钟必须校准，

若在某惯性系校准了的两个钟读数相同，则称这两个事件在该惯性系同时发生。

如何校准：等距电磁信号法。用于校准固定于某惯性系各地的时钟

在两地连线中点发光，若 A 钟和 B 钟收到光信号时的读数 t_A 等于 t_B，则称两个钟已校准

§ 8.3 从洛仑兹变换看相对论的时空性质

一、同时的相对性

A 事件的时空坐标 (x, y, z, t)：空间坐标 (x, y, z) 容易理解

时间坐标 t： 是指 A 事件与放置在 S 系 (x, y, z) 处的一个钟指向 t 时刻这一事件同时发生

若两事件发生于同一地点，可用该地的一个钟来判断两事件是否同时发生。

对异地事件，由于必须用两个钟来标记两个事件发生的时间，因此这两个钟必须校准，

若在某惯性系校准了的两个钟读数相同，则称这两个事件在该惯性系同时发生。

如何校准：等距电磁信号法。用于校准固定于某惯性系各地的时钟

在两地连线中点发光，若 A 钟和 B 钟收到光信号时的读数 t_A 等于 t_B，则称两个钟已校准

或称在 A 钟指向 t_A 的同时， B 钟指向 t_B，显然这里的同时是相对于地面而言。

§ 8.3 从洛仑兹变换看相对论的时空性质

一、同时的相对性

A 事件的时空坐标 (x, y, z, t)：空间坐标 (x, y, z) 容易理解

时间坐标 t：是指 A 事件与放置在 S 系 (x, y, z) 处的一个钟指向 t 时刻这一事件同时发生

若两事件发生于同一地点，可用该地的一个钟来判断两事件是否同时发生。

对异地事件，由于必须用两个钟来标记两个事件发生的时间，因此这两个钟必须校准，

若在某惯性系校准了的两个钟读数相同，则称这两个事件在该惯性系同时发生。

如何校准：等距电磁信号法。用于校准固定于某惯性系各地的时钟

在两地连线中点发光，若 A 钟和 B 钟收到光信号时的读数 t_A 等于 t_B，则称两个钟已校准

或称在 A 钟指向 t_A 的同时，B 钟指向 t_B，显然这里的同时是相对于地面而言。

校准之后，发生在某地的事件即可用该地的时钟读数来表示事件发生的时刻。

§8.3 从洛仑兹变换看相对论的时空性质

一、同时的相对性

A 事件的时空坐标 (x, y, z, t)：空间坐标 (x, y, z) 容易理解

时间坐标 t： 是指 A 事件与放置在 S 系 (x, y, z) 处的一个钟指向 t 时刻这一事件同时发生

若两事件发生于同一地点，可用该地的一个钟来判断两事件是否同时发生。

对异地事件，由于必须用两个钟来标记两个事件发生的时间，因此这两个钟必须校准，

若在某惯性系校准了的两个钟读数相同，则称这两个事件在该惯性系同时发生。

如何校准：等距电磁信号法。用于校准固定于某惯性系各地的时钟

在两地连线中点发光，若 A 钟和 B 钟收到光信号时的读数 t_A 等于 t_B，则称两个钟已校准

或称在 A 钟指向 t_A 的同时， B 钟指向 t_B，显然这里的同时是相对于地面而言。

校准之后，发生在某地的事件即可用该地的时钟读数来表示事件发生的时刻。

显然钟的校准与同时性有关。如上述校准方法中，在地面惯性系，光同时到达 A 钟和 B 钟。

§ 8.3 从洛仑兹变换看相对论的时空性质

一、同时的相对性

A 事件的时空坐标 (x, y, z, t)：空间坐标 (x, y, z) 容易理解

时间坐标 t： 是指 A 事件与放置在 S 系 (x, y, z) 处的一个钟指向 t 时刻这一事件同时发生

若两事件发生于同一地点，可用该地的一个钟来判断两事件是否同时发生。

对异地事件，由于必须用两个钟来标记两个事件发生的时间，因此这两个钟必须校准，

若在某惯性系校准了的两个钟读数相同，则称这两个事件在该惯性系同时发生。

如何校准：等距电磁信号法。用于校准固定于某惯性系各地的时钟

在两地连线中点发光，若 A 钟和 B 钟收到光信号时的读数 t_A 等于 t_B，则称两个钟已校准

或称在 A 钟指向 t_A 的同时， B 钟指向 t_B，显然这里的同时是相对于地面而言。

校准之后，发生在某地的事件即可用该地的时钟读数来表示事件发生的时刻。

显然钟的校准与同时性有关。如上述校准方法中，在地面惯性系，光同时到达 A 钟和 B 钟。

但在运动的车厢上看，地面和两个钟都在运动，光并不同时到达 A 钟和 B 钟 (见§8.2 p5)

§ 8.3 从洛仑兹变换看相对论的时空性质

一、同时的相对性

A 事件的时空坐标 (x, y, z, t)：空间坐标 (x, y, z) 容易理解

时间坐标 t： 是指 A 事件与放置在 S 系 (x, y, z) 处的一个钟指向 t 时刻这一事件同时发生

若两事件发生于同一地点，可用该地的一个钟来判断两事件是否同时发生。

对异地事件，由于必须用两个钟来标记两个事件发生的时间，因此这两个钟必须校准，

若在某惯性系校准了的两个钟读数相同，则称这两个事件在该惯性系同时发生。

如何校准：等距电磁信号法。用于校准固定于某惯性系各地的时钟

在两地连线中点发光，若 A 钟和 B 钟收到光信号时的读数 t_A 等于 t_B，则称两个钟已校准

或称在 A 钟指向 t_A 的同时， B 钟指向 t_B，显然这里的同时是相对于地面而言。

校准之后，发生在某地的事件即可用该地的时钟读数来表示事件发生的时刻。

显然钟的校准与同时性有关。如上述校准方法中，在地面惯性系，光同时到达 A 钟和 B 钟。

但在运动的车厢上看，地面和两个钟都在运动，光并不同时到达 A 钟和 B 钟 (见§8.2 p5)

因此车厢观察者认为，地面把非同时事件的时钟读数设置成相同，地面的钟没有校准。

设两特殊相关惯性系 S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动，

设两特殊相关惯性系 S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动，有两个事件 A、B

设两特殊相关惯性系 S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动，有两个事件 A、B
在 S 系中的时空坐标为：A 事件：(x_1, t_1) 和 B 事件：(x_2, t_2)
在 S' 系中的时空坐标为：A 事件：(x_1', t_1')；B 事件：(x_2', t_2')

设两特殊相关惯性系 S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动，有两个事件 A、B

在 S 系中的时空坐标为：A 事件：(x_1, t_1) 和 B 事件：(x_2, t_2)

在 S' 系中的时空坐标为：A 事件：(x'_1, t'_1)；B 事件：(x'_2, t'_2)

在 S 系中，A、B 两事件同时发生：$t_1 = t_2$。

由洛仑兹变换：$\Delta t' = t'_2 - t'_1 = -\gamma\,\beta(x_2 - x_1)/c, \qquad \beta = v/c$

设两特殊相关惯性系 S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动，有两个事件 A、B

在 S 系中的时空坐标为：A 事件：(x_1, t_1) 和 B 事件：(x_2, t_2)

在 S' 系中的时空坐标为：A 事件：(x'_1, t'_1)；B 事件：(x'_2, t'_2)

在 S 系中，A、B 两事件同时发生：$t_1 = t_2$。

由洛仑兹变换：$\Delta t' = t'_2 - t'_1 = -\gamma\,\beta(x_2 - x_1)/c, \qquad \beta = v/c$ 因此：

(1) 若 A、B 两事件同地发生，则 $\Delta t' = 0$：同地发生的事件，其同时性是绝对的

这是显然的，因为同地事件只须用一只时钟计时，不涉及时钟的校准问题

设两特殊相关惯性系 S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动，有两个事件 A、B

在 S 系中的时空坐标为：A 事件：(x_1, t_1) 和 B 事件：(x_2, t_2)

在 S' 系中的时空坐标为：A 事件：(x_1', t_1')；B 事件：(x_2', t_2')

在 S 系中，A、B 两事件同时发生：$t_1 = t_2$。

由洛仑兹变换：$\Delta t' = t_2' - t_1' = -\gamma\,\beta(x_2 - x_1)/c, \qquad \beta = v/c$ 因此：

(1) 若 A、B 两事件同地发生，则 $\Delta t' = 0$：同地发生的事件，其同时性是绝对的

这是显然的，因为同地事件只须用一只时钟计时，不涉及时钟的校准问题

(2) 异地发生的事件，若 $x_1 > x_2$，则 $t_2' > t_1'$；反之若 $x_1 < x_2$，则 $t_2' < t_1'$，即：

在某惯性系 S 同时发生的事件，在不同条件下，在另一惯性系 S' 观察，次序可以不相同。

设两特殊相关惯性系 S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动，有两个事件 A、B

在 S 系中的时空坐标为：A 事件：(x_1, t_1) 和 B 事件：(x_2, t_2)

在 S' 系中的时空坐标为：A 事件：(x_1', t_1')；B 事件：(x_2', t_2')

在 S 系中，A、B 两事件同时发生：$t_1 = t_2$。

由洛仑兹变换：$\Delta t' = t_2' - t_1' = -\gamma\,\beta(x_2 - x_1)/c, \qquad \beta = v/c$ 　　因此：

(1) 若 A、B 两事件同地发生，则 $\Delta t' = 0$：同地发生的事件，其同时性是绝对的

这是显然的，因为同地事件只须用一只时钟计时，不涉及时钟的校准问题

(2) 异地发生的事件，若 $x_1 > x_2$，则 $t_2' > t_1'$；反之若 $x_1 < x_2$，则 $t_2' < t_1'$，即：

在某惯性系 S 同时发生的事件，在不同条件下，在另一惯性系 S' 观察，次序可以不相同。

这是因为：

异地事件用两只钟计时，在 S 系，这两钟是校准的，两钟读数相同，表明两事件同时发生。

设两特殊相关惯性系 S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动，有两个事件 A、B
在 S 系中的时空坐标为：A 事件：(x_1, t_1) 和 B 事件：(x_2, t_2)
在 S' 系中的时空坐标为：A 事件：(x_1', t_1')；B 事件：(x_2', t_2')
在 S 系中，A、B 两事件同时发生：$t_1 = t_2$。
由洛仑兹变换：$\Delta t' = t_2' - t_1' = -\gamma\,\beta(x_2 - x_1)/c, \qquad \beta = v/c$ 因此：

(1) 若 A、B 两事件同地发生，则 $\Delta t' = 0$：同地发生的事件，其同时性是绝对的
这是显然的，因为同地事件只须用一只时钟计时，不涉及时钟的校准问题

(2) 异地发生的事件，若 $x_1 > x_2$，则 $t_2' > t_1'$；反之若 $x_1 < x_2$，则 $t_2' < t_1'$，即：
在某惯性系 S 同时发生的事件，在不同条件下，在另一惯性系 S' 观察，次序可以不相同。
这是因为：
异地事件用两只钟计时，在 S 系，这两钟是校准的，两钟读数相同，表明两事件同时发生。
在 S' 系，这两只钟是没有校准的，两只钟读数相同恰恰表明两事件不同时发生。

设两特殊相关惯性系 S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动，有两个事件 A、B

在 S 系中的时空坐标为：A 事件：(x_1, t_1) 和 B 事件：(x_2, t_2)

在 S' 系中的时空坐标为：A 事件：(x_1', t_1')；B 事件：(x_2', t_2')

在 S 系中，A、B 两事件同时发生：$t_1 = t_2$。

由洛仑兹变换：$\Delta t' = t_2' - t_1' = -\gamma\,\beta(x_2 - x_1)/c, \qquad \beta = v/c$ 因此：

(1) 若 A、B 两事件同地发生，则 $\Delta t' = 0$：同地发生的事件，其同时性是绝对的

这是显然的，因为同地事件只须用一只时钟计时，不涉及时钟的校准问题

(2) 异地发生的事件，若 $x_1 > x_2$，则 $t_2' > t_1'$；反之若 $x_1 < x_2$，则 $t_2' < t_1'$，即：

在某惯性系 S 同时发生的事件，在不同条件下，在另一惯性系 S' 观察，次序可以不相同。

这是因为：

异地事件用两只钟计时，在 S 系，这两钟是校准的，两钟读数相同，表明两事件同时发生。

在 S' 系，这两只钟是没有校准的，两只钟读数相同恰恰表明两事件不同时发生。

(3) 在任意一惯性系 S，某事件发生于空间位置 (x, y, z)，该事件的的时间坐标必须用

同样位于 (x, y, z) 处的 S 系的钟（即相对于 S 系静止的钟）的读数来确定。

当然，在 S 系观察，(x, y, z) 处的钟指向读数 t 的同时，S 系各处的钟也都指向读数 t。

二、运动尺度的缩短

二、运动尺度的缩短

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

一根棍子沿 x 轴放置且相对于 S' 静止，则在 S' 系测得的棍长称为静止长度或固有长度。

二、运动尺度的缩短

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

一根棍子沿 x 轴放置且相对于 S' 静止，则在 S' 系测得的棍长称为静止长度或固有长度。

在 S 系测得的棍长称为运动长度

二、运动尺度的缩短

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

一根棍子沿 x 轴放置且相对于 S' 静止，则在 S' 系测得的棍长称为静止长度或固有长度。

在 S 系测得的棍长称为运动长度

在 S' 系，由于棍是静止的，因此可以在任意的不同时刻分别测定棍两端的坐标 x'_A，x'_B。

$(x'_B - x'_A)$ 总是等于棍的固有长度 l_0。

二、运动尺度的缩短

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

一根棍子沿 x 轴放置且相对于 S' 静止，则在 S' 系测得的棍长称为静止长度或固有长度。

在 S 系测得的棍长称为运动长度

在 S' 系，由于棍是静止的，因此可以在任意的不同时刻分别测定棍两端的坐标 x'_A, x'_B。

$(x'_B - x'_A)$ 总是等于棍的固有长度 l_0。

在 S 系，由于棍是运动的，不能先确定某端的坐标，再确定另一端的坐标。

必须同时确定两端的坐标 x_A, x_B。$(x_B - x_A)$ 才是在 S 系测量的棍的运动长度 l。

二、运动尺度的缩短

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

一根棍子沿 x 轴放置且相对于 S' 静止，则在 S' 系测得的棍长称为静止长度或固有长度。

在 S 系测得的棍长称为运动长度

在 S' 系，由于棍是静止的，因此可以在任意的不同时刻分别测定棍两端的坐标 x'_A，x'_B。

$(x'_B - x'_A)$ 总是等于棍的固有长度 l_0。

在 S 系，由于棍是运动的，不能先确定某端的坐标，再确定另一端的坐标。

必须同时确定两端的坐标 x_A，x_B。$(x_B - x_A)$ 才是在 S 系测量的棍的运动长度 l。

设 A 事件为棍的 A 端与 x_A 和 x'_A 重合事件，B 事件为棍的 B 端与 x_B 和 x'_B 重合事件

二、运动尺度的缩短

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

一根棍子沿 x 轴放置且相对于 S' 静止，则在 S' 系测得的棍长称为静止长度或固有长度。

在 S 系测得的棍长称为运动长度

在 S' 系，由于棍是静止的，因此可以在任意的不同时刻分别测定棍两端的坐标 x'_A, x'_B。

$(x'_B - x'_A)$ 总是等于棍的固有长度 l_0。

在 S 系，由于棍是运动的，不能先确定某端的坐标，再确定另一端的坐标。

必须同时确定两端的坐标 x_A, x_B。$(x_B - x_A)$ 才是在 S 系测量的棍的运动长度 l。

设 A 事件为棍的 A 端与 x_A 和 x'_A 重合事件，B 事件为棍的 B 端与 x_B 和 x'_B 重合事件

在 S 系， A 事件发生于 (x_A, t_A)，B 事件发生于 (x_B, t_B)

二、运动尺度的缩短

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

一根棍子沿 x 轴放置且相对于 S' 静止，则在 S' 系测得的棍长称为静止长度或固有长度。

在 S 系测得的棍长称为运动长度

在 S' 系，由于棍是静止的，因此可以在任意的不同时刻分别测定棍两端的坐标 x'_A，x'_B。

$(x'_B - x'_A)$ 总是等于棍的固有长度 l_0。

在 S 系，由于棍是运动的，不能先确定某端的坐标，再确定另一端的坐标。

必须同时确定两端的坐标 x_A，x_B。$(x_B - x_A)$ 才是在 S 系测量的棍的运动长度 l。

设 A 事件为棍的 A 端与 x_A 和 x'_A 重合事件，B 事件为棍的 B 端与 x_B 和 x'_B 重合事件

在 S 系， A 事件发生于 (x_A, t_A)，B 事件发生于 (x_B, t_B)

在 S' 系， A 事件发生于 (x'_A, t'_A)，B 事件发生于 (x'_B, t'_B)

二、运动尺度的缩短

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

一根棍子沿 x 轴放置且相对于 S' 静止，则在 S' 系测得的棍长称为静止长度或固有长度。

在 S 系测得的棍长称为运动长度

在 S' 系，由于棍是静止的，因此可以在任意的不同时刻分别测定棍两端的坐标 x'_A，x'_B。

$(x'_B - x'_A)$ 总是等于棍的固有长度 l_0。

在 S 系，由于棍是运动的，不能先确定某端的坐标，再确定另一端的坐标。

必须同时确定两端的坐标 x_A，x_B。$(x_B - x_A)$ 才是在 S 系测量的棍的运动长度 l。

设 A 事件为棍的 A 端与 x_A 和 x'_A 重合事件，B 事件为棍的 B 端与 x_B 和 x'_B 重合事件

在 S 系， A 事件发生于 (x_A, t_A)，B 事件发生于 (x_B, t_B)

在 S' 系， A 事件发生于 (x'_A, t'_A)，B 事件发生于 (x'_B, t'_B)

由洛仑兹变换：$x'_B - x'_A = \gamma\big[(x_B - x_A) - v(t_B - t_A)\big]$

二、运动尺度的缩短

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

一根棍子沿 x 轴放置且相对于 S' 静止，则在 S' 系测得的棍长称为静止长度或固有长度。

在 S 系测得的棍长称为运动长度

在 S' 系，由于棍是静止的，因此可以在任意的不同时刻分别测定棍两端的坐标 x'_A, x'_B。

$(x'_B - x'_A)$ 总是等于棍的固有长度 l_0。

在 S 系，由于棍是运动的，不能先确定某端的坐标，再确定另一端的坐标。

必须同时确定两端的坐标 x_A, x_B。$(x_B - x_A)$ 才是在 S 系测量的棍的运动长度 l。

设 A 事件为棍的 A 端与 x_A 和 x'_A 重合事件，B 事件为棍的 B 端与 x_B 和 x'_B 重合事件

在 S 系， A 事件发生于 (x_A, t_A)，B 事件发生于 (x_B, t_B)

在 S' 系， A 事件发生于 (x'_A, t'_A)，B 事件发生于 (x'_B, t'_B)

由洛仑兹变换：$x'_B - x'_A = \gamma\big[(x_B - x_A) - v(t_B - t_A)\big]$

为了测量棍长，在 S 系，棍两端的坐标必须同时测量，即 A 事件与 B 事件同时发生：$t_A = t_B$

二、运动尺度的缩短

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

一根棍子沿 x 轴放置且相对于 S' 静止，则在 S' 系测得的棍长称为静止长度或固有长度。

在 S 系测得的棍长称为运动长度

在 S' 系，由于棍是静止的，因此可以在任意的不同时刻分别测定棍两端的坐标 x'_A, x'_B。

$(x'_B - x'_A)$ 总是等于棍的固有长度 l_0。

在 S 系，由于棍是运动的，不能先确定某端的坐标，再确定另一端的坐标。

必须同时确定两端的坐标 x_A, x_B。$(x_B - x_A)$ 才是在 S 系测量的棍的运动长度 l。

设 A 事件为棍的 A 端与 x_A 和 x'_A 重合事件，B 事件为棍的 B 端与 x_B 和 x'_B 重合事件

在 S 系， A 事件发生于 (x_A, t_A)，B 事件发生于 (x_B, t_B)

在 S' 系， A 事件发生于 (x'_A, t'_A)，B 事件发生于 (x'_B, t'_B)

由洛仑兹变换：$x'_B - x'_A = \gamma\big[(x_B - x_A) - v(t_B - t_A)\big]$

为了测量棍长，在 S 系，棍两端的坐标必须同时测量，即 A 事件与 B 事件同时发生：$t_A = t_B$

因此：$\underbrace{x'_B - x'_A}_{l_0} = \gamma\,\underbrace{(x_B - x_A)}_{l} \quad\Longrightarrow\quad l_0 = \gamma l \quad\Longrightarrow\quad l = l_0/\gamma$ 运动物体变短

二、运动尺度的缩短

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

一根棍子沿 x 轴放置且相对于 S' 静止，则在 S' 系测得的棍长称为静止长度或固有长度。

在 S 系测得的棍长称为运动长度

在 S' 系，由于棍是静止的，因此可以在任意的不同时刻分别测定棍两端的坐标 x'_A, x'_B。

$(x'_B - x'_A)$ 总是等于棍的固有长度 l_0。

在 S 系，由于棍是运动的，不能先确定某端的坐标，再确定另一端的坐标。

必须同时确定两端的坐标 x_A, x_B。$(x_B - x_A)$ 才是在 S 系测量的棍的运动长度 l。

设 A 事件为棍的 A 端与 x_A 和 x'_A 重合事件，B 事件为棍的 B 端与 x_B 和 x'_B 重合事件

在 S 系， A 事件发生于 (x_A, t_A)，B 事件发生于 (x_B, t_B)

在 S' 系， A 事件发生于 (x'_A, t'_A)，B 事件发生于 (x'_B, t'_B)

由洛仑兹变换：$x'_B - x'_A = \gamma\big[(x_B - x_A) - v(t_B - t_A)\big]$

为了测量棍长，在 S 系，棍两端的坐标必须同时测量，即 A 事件与 B 事件同时发生：$t_A = t_B$

因此：$\underbrace{x'_B - x'_A}_{l_0} = \gamma\,\underbrace{(x_B - x_A)}_{l} \quad \Longrightarrow \quad l_0 = \gamma l \quad \Longrightarrow \quad l = l_0/\gamma$ 运动物体变短

运动长度总是小于静止（固有）长度

三、运动时钟的延缓

三、运动时钟的延缓

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

三、运动时钟的延缓

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

若发生物理过程的物体相对于 S' 静止，则在 S' 测得的该物理过程的持续时间称为固有时。

三、运动时钟的延缓

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

若发生物理过程的物体相对于 S' 静止，则在 S' 测得的该物理过程的持续时间称为固有时。

在 S 系测得的该物理过程的持续时间称为运动时间。

三、运动时钟的延缓

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

若发生物理过程的物体相对于 S' 静止，则在 S' 测得的该物理过程的持续时间称为固有时。

在 S 系测得的该物理过程的持续时间称为运动时间。

简而言之，同一地点发生的两事件的时间间隔称为固有时。

三、运动时钟的延缓

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

若发生物理过程的物体相对于 S' 静止，则在 S' 测得的该物理过程的持续时间称为固有时。

在 S 系测得的该物理过程的持续时间称为运动时间。

简而言之，同一地点发生的两事件的时间间隔称为固有时。

对固有时，由于物理过程开始 (事件 A) 与物理过程结束 (事件 B) 发生于同地点

只需要一只钟即可测量出事件 A 发生的时刻 t'_A 与事件 B 的时刻 t'_B，固有时 $\Delta\tau = t'_B - t'_A$

三、运动时钟的延缓

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

若发生物理过程的物体相对于 S' 静止，则在 S' 测得的该物理过程的持续时间称为固有时。

在 S 系测得的该物理过程的持续时间称为运动时间。

简而言之，同一地点发生的两事件的时间间隔称为固有时。

对固有时，由于物理过程开始 (事件 A) 与物理过程结束 (事件 B) 发生于同地点

只需要一只钟即可测量出事件 A 发生的时刻 t'_A 与事件 B 的时刻 t'_B，固有时 $\Delta\tau = t'_B - t'_A$

在 S 系，事件 A 和事件 B 发生于不同地点

必须用放置在不同地点的两只钟来分别测量事件 A 和 B 各自发生的时刻：t_A、t_B

三、运动时钟的延缓

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

若发生物理过程的物体相对于 S' 静止，则在 S' 测得的该物理过程的持续时间称为固有时。

在 S 系测得的该物理过程的持续时间称为运动时间。

简而言之，同一地点发生的两事件的时间间隔称为固有时。

对固有时，由于物理过程开始 (事件 A) 与物理过程结束 (事件 B) 发生于同地点

只需要一只钟即可测量出事件 A 发生的时刻 t'_A 与事件 B 的时刻 t'_B，固有时 $\Delta\tau = t'_B - t'_A$

在 S 系，事件 A 和事件 B 发生于不同地点

必须用放置在不同地点的两只钟来分别测量事件 A 和 B 各自发生的时刻：t_A、t_B

运动时间：$\Delta t = t_B - t_A$。

三、运动时钟的延缓

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

若发生物理过程的物体相对于 S' 静止，则在 S' 测得的该物理过程的持续时间称为固有时。

在 S 系测得的该物理过程的持续时间称为运动时间。

简而言之，同一地点发生的两事件的时间间隔称为固有时。

对固有时，由于物理过程开始 (事件 A) 与物理过程结束 (事件 B) 发生于同地点

只需要一只钟即可测量出事件 A 发生的时刻 t'_A 与事件 B 的时刻 t'_B，固有时 $\Delta\tau = t'_B - t'_A$

在 S 系，事件 A 和事件 B 发生于不同地点

必须用放置在不同地点的两只钟来分别测量事件 A 和 B 各自发生的时刻：t_A、t_B

运动时间：$\Delta t = t_B - t_A$。当然这两只钟是在 S 系中校准了的。

三、运动时钟的延缓

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

若发生物理过程的物体相对于 S' 静止，则在 S' 测得的该物理过程的持续时间称为固有时。

在 S 系测得的该物理过程的持续时间称为运动时间。

简而言之，同一地点发生的两事件的时间间隔称为固有时。

对固有时，由于物理过程开始 (事件 A) 与物理过程结束 (事件 B) 发生于同地点

只需要一只钟即可测量出事件 A 发生的时刻 t'_A 与事件 B 的时刻 t'_B，固有时 $\Delta\tau = t'_B - t'_A$

在 S 系，事件 A 和事件 B 发生于不同地点

必须用放置在不同地点的两只钟来分别测量事件 A 和 B 各自发生的时刻：t_A、t_B

运动时间：$\Delta t = t_B - t_A$。当然这两只钟是在 S 系中校准了的。

但在 S' 系观察， S 系中测量事件 A 和事件 B 发生时刻的两个钟没校准：$t'_B - t'_A \neq t_B - t_A$

三、运动时钟的延缓

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

若发生物理过程的物体相对于 S' 静止，则在 S' 测得的该物理过程的持续时间称为固有时。

在 S 系测得的该物理过程的持续时间称为运动时间。

简而言之，同一地点发生的两事件的时间间隔称为固有时。

对固有时，由于物理过程开始 (事件 A) 与物理过程结束 (事件 B) 发生于同地点

只需要一只钟即可测量出事件 A 发生的时刻 t'_A 与事件 B 的时刻 t'_B，固有时 $\Delta\tau = t'_B - t'_A$

在 S 系，事件 A 和事件 B 发生于不同地点

必须用放置在不同地点的两只钟来分别测量事件 A 和 B 各自发生的时刻：t_A、t_B

运动时间：$\Delta t = t_B - t_A$。当然这两只钟是在 S 系中校准了的。

但在 S' 系观察， S 系中测量事件 A 和事件 B 发生时刻的两个钟没校准：$t'_B - t'_A \neq t_B - t_A$

由洛仑兹变换：$t_B - t_A = \gamma\left[(t'_B - t'_A) + v(x'_B - x'_A)/c^2\right]$

三、运动时钟的延缓

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

若发生物理过程的物体相对于 S' 静止，则在 S' 测得的该物理过程的持续时间称为固有时。

在 S 系测得的该物理过程的持续时间称为运动时间。

简而言之，同一地点发生的两事件的时间间隔称为固有时。

对固有时，由于物理过程开始 (事件 A) 与物理过程结束 (事件 B) 发生于同地点

只需要一只钟即可测量出事件 A 发生的时刻 t'_A 与事件 B 的时刻 t'_B，固有时 $\Delta\tau = t'_B - t'_A$

在 S 系，事件 A 和事件 B 发生于不同地点

必须用放置在不同地点的两只钟来分别测量事件 A 和 B 各自发生的时刻：t_A、t_B

运动时间：$\Delta t = t_B - t_A$。当然这两只钟是在 S 系中校准了的。

但在 S' 系观察，S 系中测量事件 A 和事件 B 发生时刻的两个钟没校准：$t'_B - t'_A \neq t_B - t_A$

由洛仑兹变换：$t_B - t_A = \gamma\left[(t'_B - t'_A) + v(x'_B - x'_A)/c^2\right]$

在 S' 系，事件 A 和事件 B 发生同一地点 $x'_A = x'_B$，

三、运动时钟的延缓

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

若发生物理过程的物体相对于 S' 静止，则在 S' 测得的该物理过程的持续时间称为固有时。

在 S 系测得的该物理过程的持续时间称为运动时间。

简而言之，同一地点发生的两事件的时间间隔称为固有时。

对固有时，由于物理过程开始 (事件 A) 与物理过程结束 (事件 B) 发生于同地点

只需要一只钟即可测量出事件 A 发生的时刻 t'_A 与事件 B 的时刻 t'_B，固有时 $\Delta\tau = t'_B - t'_A$

在 S 系，事件 A 和事件 B 发生于不同地点

必须用放置在不同地点的两只钟来分别测量事件 A 和 B 各自发生的时刻：t_A、t_B

运动时间：$\Delta t = t_B - t_A$。当然这两只钟是在 S 系中校准了的。

但在 S' 系观察， S 系中测量事件 A 和事件 B 发生时刻的两个钟没校准：$t'_B - t'_A \neq t_B - t_A$

由洛仑兹变换：$t_B - t_A = \gamma\big[(t'_B - t'_A) + v(x'_B - x'_A)/c^2\big]$

在 S' 系，事件 A 和事件 B 发生同一地点 $x'_A = x'_B$， $t'_B - t'_A = \Delta\tau$

三、运动时钟的延缓

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

若发生物理过程的物体相对于 S' 静止，则在 S' 测得的该物理过程的持续时间称为固有时。

在 S 系测得的该物理过程的持续时间称为运动时间。

简而言之，同一地点发生的两事件的时间间隔称为固有时。

对固有时，由于物理过程开始 (事件 A) 与物理过程结束 (事件 B) 发生于同地点

只需要一只钟即可测量出事件 A 发生的时刻 t'_A 与事件 B 的时刻 t'_B，固有时 $\Delta\tau = t'_B - t'_A$

在 S 系，事件 A 和事件 B 发生于不同地点

必须用放置在不同地点的两只钟来分别测量事件 A 和 B 各自发生的时刻：t_A、t_B

运动时间：$\Delta t = t_B - t_A$。当然这两只钟是在 S 系中校准了的。

但在 S' 系观察， S 系中测量事件 A 和事件 B 发生时刻的两个钟没校准：$t'_B - t'_A \neq t_B - t_A$

由洛仑兹变换：$t_B - t_A = \gamma\big[(t'_B - t'_A) + v(x'_B - x'_A)/c^2\big]$

在 S' 系，事件 A 和事件 B 发生同一地点 $x'_A = x'_B$， $t'_B - t'_A = \Delta\tau$

因此：$t_B - t_A = \gamma(t'_B - t'_A) \quad \Longrightarrow \quad \Delta t = \gamma\Delta\tau$

三、运动时钟的延缓

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

若发生物理过程的物体相对于 S' 静止，则在 S' 测得的该物理过程的持续时间称为固有时。

在 S 系测得的该物理过程的持续时间称为运动时间。

简而言之，同一地点发生的两事件的时间间隔称为固有时。

对固有时，由于物理过程开始 (事件 A) 与物理过程结束 (事件 B) 发生于同地点

只需要一只钟即可测量出事件 A 发生的时刻 t'_A 与事件 B 的时刻 t'_B，固有时 $\Delta\tau = t'_B - t'_A$

在 S 系，事件 A 和事件 B 发生于不同地点

必须用放置在不同地点的两只钟来分别测量事件 A 和 B 各自发生的时刻：t_A、t_B

运动时间：$\Delta t = t_B - t_A$。当然这两只钟是在 S 系中校准了的。

但在 S' 系观察， S 系中测量事件 A 和事件 B 发生时刻的两个钟没校准：$t'_B - t'_A \neq t_B - t_A$

由洛仑兹变换：$t_B - t_A = \gamma\big[(t'_B - t'_A) + v(x'_B - x'_A)/c^2\big]$

在 S' 系，事件 A 和事件 B 发生同一地点 $x'_A = x'_B$， $t'_B - t'_A = \Delta\tau$

因此：$t_B - t_A = \gamma(t'_B - t'_A) \quad \Longrightarrow \quad \Delta t = \gamma\Delta\tau$

运动时间总是大于固有（静止）时间

三、运动时钟的延缓

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

若发生物理过程的物体相对于 S' 静止，则在 S' 测得的该物理过程的持续时间称为固有时。

在 S 系测得的该物理过程的持续时间称为运动时间。

简而言之，同一地点发生的两事件的时间间隔称为固有时。

对固有时，由于物理过程开始 (事件 A) 与物理过程结束 (事件 B) 发生于同地点

只需要一只钟即可测量出事件 A 发生的时刻 t'_A 与事件 B 的时刻 t'_B，固有时 $\Delta\tau = t'_B - t'_A$

在 S 系，事件 A 和事件 B 发生于不同地点

必须用放置在不同地点的两只钟来分别测量事件 A 和 B 各自发生的时刻：t_A、t_B

运动时间：$\Delta t = t_B - t_A$。当然这两只钟是在 S 系中校准了的。

但在 S' 系观察，S 系中测量事件 A 和事件 B 发生时刻的两个钟没校准：$t'_B - t'_A \neq t_B - t_A$

由洛仑兹变换：$t_B - t_A = \gamma\left[(t'_B - t'_A) + v(x'_B - x'_A)/c^2\right]$

在 S' 系，事件 A 和事件 B 发生同一地点 $x'_A = x'_B$，$\quad t'_B - t'_A = \Delta\tau$

因此：$t_B - t_A = \gamma(t'_B - t'_A) \quad \Longrightarrow \quad \Delta t = \gamma\Delta\tau$

运动时间总是大于固有（静止）时间

若物体相对于地面运动，固定于物体上的钟测得的该物体上的物理过程的持续时间：固有时

若物体相对于地面运动，固定于物体上的钟测得的物体上的物理过程的持续时间：固有时 $\Delta\tau$

若物体相对于地面运动，固定于物体上的钟测得的物体上的物理过程的持续时间：固有时 $\Delta\tau$

而在地面惯性系测得的同一物理过程的持续时间：运动时间 Δt

若物体相对于地面运动，固定于物体上的钟测得的物体上的物理过程的持续时间：固有时 $\Delta\tau$

而在地面惯性系测得的同一物理过程的持续时间：运动时间 Δt $\Delta t = \gamma\Delta\tau$

若物体相对于地面运动，固定于物体上的钟测得的物体上的物理过程的持续时间：固有时 $\Delta\tau$

而在地面惯性系测得的同一物理过程的持续时间：运动时间 Δt　　$\Delta t = \gamma \Delta\tau$

现考察某时钟从指针指向 τ_1 到指针指向 τ_2 这个物理过程

若物体相对于地面运动，固定于物体上的钟测得的物体上的物理过程的持续时间：固有时 $\Delta\tau$

而在地面惯性系测得的同一物理过程的持续时间：运动时间 Δt $\Delta t = \gamma\Delta\tau$

现考察某时钟从指针指向 τ_1 到指针指向 τ_2 这个物理过程

在钟惯性系上观察，物理过程发生于同一地点，物理过程的持续时间为固有时：$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$

若物体相对于地面运动，固定于物体上的钟测得的物体上的物理过程的持续时间：固有时 $\Delta\tau$

而在地面惯性系测得的同一物理过程的持续时间：运动时间 Δt $\Delta t = \gamma\Delta\tau$

现考察某时钟从指针指向 τ_1 到指针指向 τ_2 这个物理过程

在钟惯性系上观察，物理过程发生于同一地点，物理过程的持续时间为固有时：$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$

若钟相对于 S 系以速度 v 运动，在 S 系观察，该物理过程的持续时间为运动时间：$\Delta t = \gamma\Delta\tau$

若物体相对于地面运动，固定于物体上的钟测得的物体上的物理过程的持续时间：固有时 $\Delta\tau$

而在地面惯性系测得的同一物理过程的持续时间：运动时间 Δt $\qquad \Delta t = \gamma\Delta\tau$

现考察某时钟从指针指向 τ_1 到指针指向 τ_2 这个物理过程

在钟惯性系上观察，物理过程发生于同一地点，物理过程的持续时间为固有时：$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$

若钟相对于 S 系以速度 v 运动，在 S 系观察，该物理过程的持续时间为运动时间：$\Delta t = \gamma\Delta\tau$

换而言之

如果钟相对于 S 系静止，在 S 系观察，时钟指针指向 τ_1 到指针指向 τ_2 这个物理过程经历了

$$\Delta t = \gamma\Big|_{v=0}\Delta\tau = \Delta\tau \qquad\qquad \gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

若物体相对于地面运动，固定于物体上的钟测得的物体上的物理过程的持续时间：固有时 $\Delta\tau$

而在地面惯性系测得的同一物理过程的持续时间：运动时间 Δt $\qquad \Delta t = \gamma\Delta\tau$

现考察某时钟从指针指向 τ_1 到指针指向 τ_2 这个物理过程

在钟惯性系上观察，物理过程发生于同一地点，物理过程的持续时间为固有时：$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$

若钟相对于 S 系以速度 v 运动，在 S 系观察，该物理过程的持续时间为运动时间：$\Delta t = \gamma\Delta\tau$

换而言之

如果钟相对于 S 系静止，在 S 系观察，时钟指针指向 τ_1 到指针指向 τ_2 这个物理过程经历了

$$\Delta t = \gamma\Big|_{v=0}\Delta\tau = \Delta\tau \qquad\qquad \gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

若钟相对于 S 系以速度 v 运动，在 S 系观察，指针指向 τ_1 到指针指向 τ_2 这个物理过程经历了

$$\Delta t = \gamma\Big|_{v\neq 0}\Delta\tau > \Delta\tau$$ 因此 S 系观察者认为运动的钟变慢了。

运动物体上发生的物理过程比静止物体上的同样过程慢，运动速度越大，过程进行得越慢。

若物体相对于地面运动，固定于物体上的钟测得的物体上的物理过程的持续时间：固有时 $\Delta\tau$

而在地面惯性系测得的同一物理过程的持续时间：运动时间 Δt $\quad\Delta t = \gamma\Delta\tau$

现考察某时钟从指针指向 τ_1 到指针指向 τ_2 这个物理过程

在钟惯性系上观察，物理过程发生于同一地点，物理过程的持续时间为固有时：$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$

若钟相对于 S 系以速度 v 运动，在 S 系观察，该物理过程的持续时间为运动时间：$\Delta t = \gamma\Delta\tau$

换而言之

如果钟相对于 S 系静止，在 S 系观察，时钟指针指向 τ_1 到指针指向 τ_2 这个物理过程经历了

$$\Delta t = \gamma\Big|_{v=0}\Delta\tau = \Delta\tau \qquad\qquad \gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

若钟相对于 S 系以速度 v 运动，在 S 系观察，指针指向 τ_1 到指针指向 τ_2 这个物理过程经历了

$$\Delta t = \gamma\Big|_{v\neq 0}\Delta\tau > \Delta\tau$$ 因此 S 系观察者认为运动的钟变慢了。

运动物体上发生的物理过程比静止物体上的同样过程慢，运动速度越大，过程进行得越慢。

问题：在 S 系观察，钟惯性系 S' 的钟由于运动而变慢了

但是，在 S' 系观察，是 S 系的钟在运动，为何不是 S 系的钟变慢呢，如何理解？

若物体相对于地面运动，固定于物体上的钟测得的物体上的物理过程的持续时间：固有时 $\Delta\tau$

而在地面惯性系测得的同一物理过程的持续时间：运动时间 Δt $\Delta t = \gamma\Delta\tau$

现考察某时钟从指针指向 τ_1 到指针指向 τ_2 这个物理过程

在钟惯性系上观察，物理过程发生于同一地点，物理过程的持续时间为固有时：$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$

若钟相对于 S 系以速度 v 运动，在 S 系观察，该物理过程的持续时间为运动时间：$\Delta t = \gamma\Delta\tau$

换而言之

如果钟相对于 S 系静止，在 S 系观察，时钟指针指向 τ_1 到指针指向 τ_2 这个物理过程经历了

$$\Delta t = \gamma\Big|_{v=0}\Delta\tau = \Delta\tau \qquad \gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

若钟相对于 S 系以速度 v 运动，在 S 系观察，指针指向 τ_1 到指针指向 τ_2 这个物理过程经历了

$$\Delta t = \gamma\Big|_{v\neq 0}\Delta\tau > \Delta\tau$$ 因此 S 系观察者认为运动的钟变慢了。

运动物体上发生的物理过程比静止物体上的同样过程慢，运动速度越大，过程进行得越慢。

问题：在 S 系观察，钟惯性系 S' 的钟由于运动而变慢了

但是，在 S' 系观察，是 S 系的钟在运动，为何不是 S 系的钟变慢呢，如何理解？

确实，在 S' 系观察，S 系的钟也变慢了，

若物体相对于地面运动，固定于物体上的钟测得的物体上的物理过程的持续时间：固有时 $\Delta\tau$

而在地面惯性系测得的同一物理过程的持续时间：运动时间 Δt $\Delta t = \gamma\Delta\tau$

现考察某时钟从指针指向 τ_1 到指针指向 τ_2 这个物理过程

在钟惯性系上观察，物理过程发生于同一地点，物理过程的持续时间为固有时：$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$

若钟相对于 S 系以速度 v 运动，在 S 系观察，该物理过程的持续时间为运动时间：$\Delta t = \gamma\Delta\tau$

换而言之

如果钟相对于 S 系静止，在 S 系观察，时钟指针指向 τ_1 到指针指向 τ_2 这个物理过程经历了

$$\Delta t = \gamma\Big|_{v=0}\Delta\tau = \Delta\tau \qquad \gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

若钟相对于 S 系以速度 v 运动，在 S 系观察，指针指向 τ_1 到指针指向 τ_2 这个物理过程经历了

$$\Delta t = \gamma\Big|_{v\neq0}\Delta\tau > \Delta\tau$$ 因此 S 系观察者认为运动的钟变慢了。

运动物体上发生的物理过程比静止物体上的同样过程慢，运动速度越大，过程进行得越慢。

问题：在 S 系观察，钟惯性系 S' 的钟由于运动而变慢了

但是，在 S' 系观察，是 S 系的钟在运动，为何不是 S 系的钟变慢呢，如何理解？

确实，在 S' 系观察，S 系的钟也变慢了，到底谁变慢？

若物体相对于地面运动，固定于物体上的钟测得的物体上的物理过程的持续时间：固有时 $\Delta\tau$

而在地面惯性系测得的同一物理过程的持续时间：运动时间 Δt $\quad\quad \Delta t = \gamma\Delta\tau$

现考察某时钟从指针指向 τ_1 到指针指向 τ_2 这个物理过程

在钟惯性系上观察，物理过程发生于同一地点，物理过程的持续时间为固有时：$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$

若钟相对于 S 系以速度 v 运动，在 S 系观察，该物理过程的持续时间为运动时间：$\Delta t = \gamma\Delta\tau$

换而言之

如果钟相对于 S 系静止，在 S 系观察，时钟指针指向 τ_1 到指针指向 τ_2 这个物理过程经历了

$$\Delta t = \gamma\Big|_{v=0}\Delta\tau = \Delta\tau \qquad\qquad \gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

若钟相对于 S 系以速度 v 运动，在 S 系观察，指针指向 τ_1 到指针指向 τ_2 这个物理过程经历了

$$\Delta t = \gamma\Big|_{v\neq 0}\Delta\tau > \Delta\tau$$

因此 S 系观察者认为运动的钟变慢了。

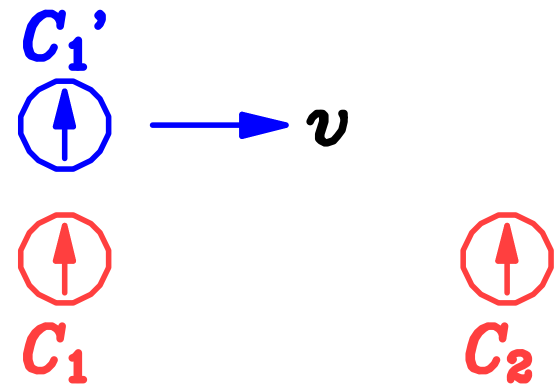
运动物体上发生的物理过程比静止物体上的同样过程慢，运动速度越大，过程进行得越慢。

问题：在 S 系观察，钟惯性系 S' 的钟由于运动而变慢了

但是，在 S' 系观察，是 S 系的钟在运动，为何不是 S 系的钟变慢呢，如何理解？

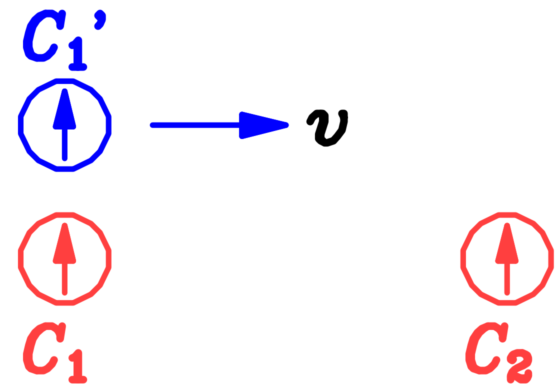
确实，在 S' 系观察，S 系的钟也变慢了，到底谁变慢？ 本质在于同时的相对性

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。



设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

在 S 系的坐标原点和 $x = l$ 处个放一个钟，C_1 和 C_2

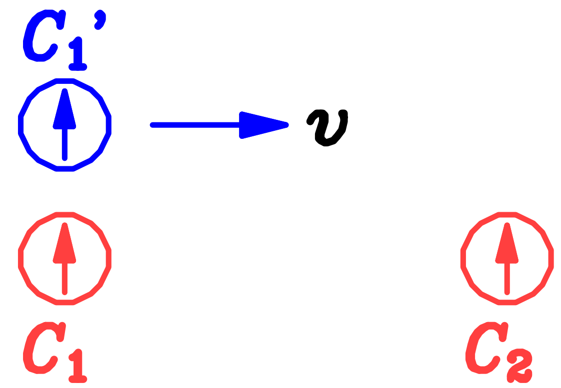


Let there be light

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

在 S 系的坐标原点和 $x = l$ 处个放一个钟，C_1 和 C_2

在 S' 系的坐标原点放一个钟 C_1'

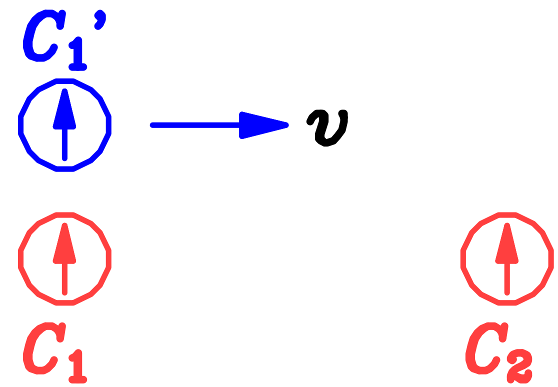


设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

在 S 系的坐标原点和 $x = l$ 处个放一个钟，C_1 和 C_2

在 S' 系的坐标原点放一个钟 C_1'

C_1 和 C_2 是 S 系的钟，C_1' 是 S' 系的钟，C_1' 相对 C_1 运动。



Let there be light

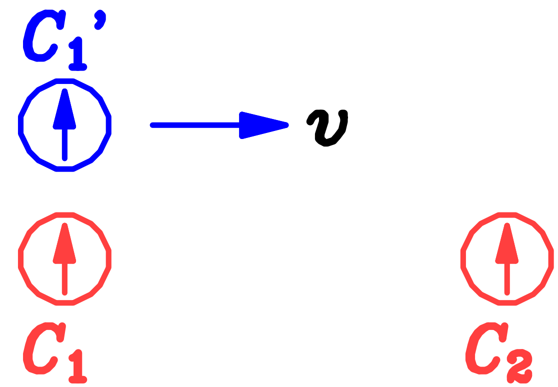
设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

在 S 系的坐标原点和 $x = l$ 处个放一个钟，C_1 和 C_2

在 S' 系的坐标原点放一个钟 C_1'

C_1 和 C_2 是 S 系的钟，C_1' 是 S' 系的钟，C_1' 相对 C_1 运动。

$t = 0$ 时，两坐标原点重合，故 C_1' 和 C_1 重合



设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

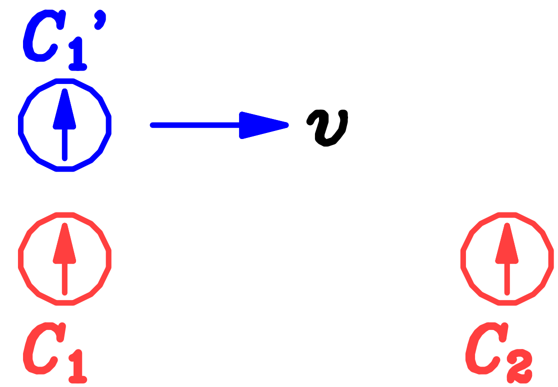
在 S 系的坐标原点和 $x=l$ 处个放一个钟，C_1 和 C_2

在 S' 系的坐标原点放一个钟 C_1'

C_1 和 C_2 是 S 系的钟，C_1' 是 S' 系的钟，C_1' 相对 C_1 运动。

$t=0$ 时，两坐标原点重合，故 C_1' 和 C_1 重合

定义 C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E



设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

在 S 系的坐标原点和 $x=l$ 处个放一个钟，C_1 和 C_2

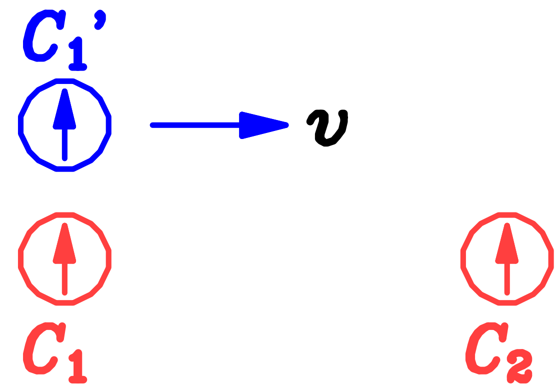
在 S' 系的坐标原点放一个钟 C_1'

C_1 和 C_2 是 S 系的钟，C_1' 是 S' 系的钟，C_1' 相对 C_1 运动。

$t=0$ 时，两坐标原点重合，故 C_1' 和 C_1 重合

定义 C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

先在 S 系观察这两个事件



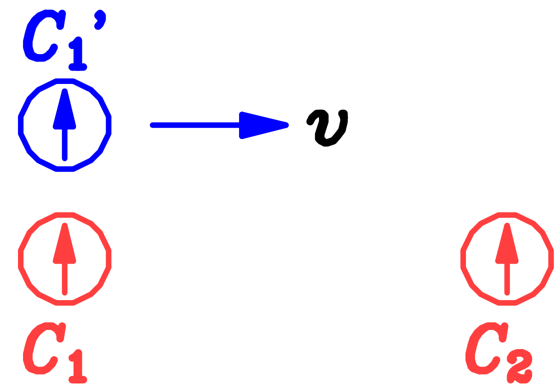
设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

在 S 系的坐标原点和 $x=l$ 处个放一个钟，C_1 和 C_2

在 S' 系的坐标原点放一个钟 C_1'

C_1 和 C_2 是 S 系的钟，C_1' 是 S' 系的钟，C_1' 相对 C_1 运动。

$t=0$ 时，两坐标原点重合，故 C_1' 和 C_1 重合



定义 C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

先在 S 系观察这两个事件

显然，事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A=t'_A=0,\quad x_A=x'_A=0$

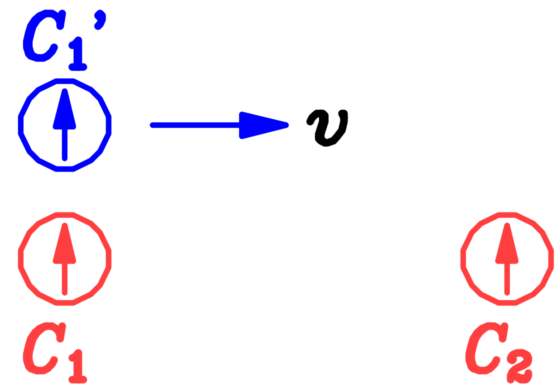
设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

在 S 系的坐标原点和 $x=l$ 处个放一个钟，C_1 和 C_2

在 S' 系的坐标原点放一个钟 C_1'

C_1 和 C_2 是 S 系的钟，C_1' 是 S' 系的钟，C_1' 相对 C_1 运动。

$t=0$ 时，两坐标原点重合，故 C_1' 和 C_1 重合



定义 C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

先在 S 系观察这两个事件

显然，事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A=t'_A=0,\quad x_A=x'_A=0$

由于事件的时间坐标就是位于事件发生地的钟的读数，

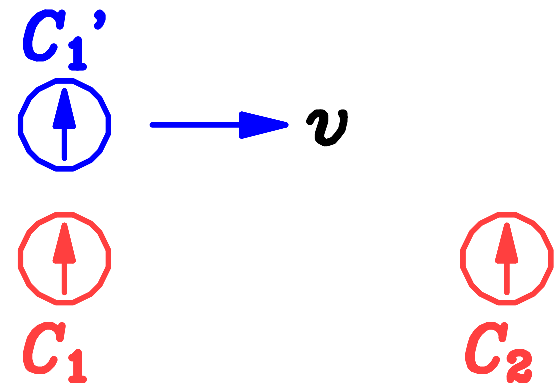
设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

在 S 系的坐标原点和 $x=l$ 处个放一个钟，C_1 和 C_2

在 S' 系的坐标原点放一个钟 C_1'

C_1 和 C_2 是 S 系的钟，C_1' 是 S' 系的钟，C_1' 相对 C_1 运动。

$t=0$ 时，两坐标原点重合，故 C_1' 和 C_1 重合



定义 C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

先在 S 系观察这两个事件

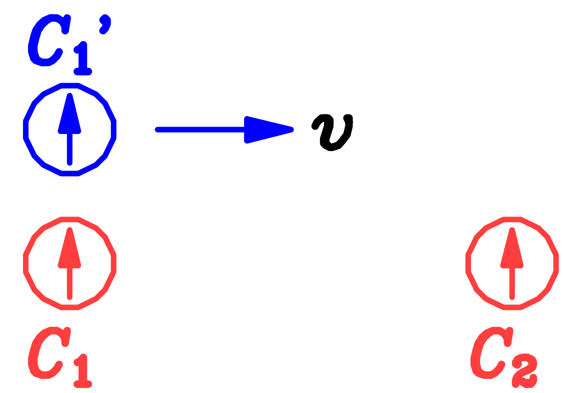
显然，事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A=t_A'=0,\quad x_A=x_A'=0$

由于事件的时间坐标就是位于事件发生地的钟的读数，因此事件 A 发生时C_1、C_1' 的读数都为 0。

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

在 S 系的坐标原点和 $x=l$ 处个放一个钟，C_1 和 C_2

在 S' 系的坐标原点放一个钟 C_1'



C_1 和 C_2 是 S 系的钟，C_1' 是 S' 系的钟，C_1' 相对 C_1 运动。

$t=0$ 时，两坐标原点重合，故 C_1' 和 C_1 重合

定义 C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

先在 S 系观察这两个事件

显然，事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A=t'_A=0,\quad x_A=x'_A=0$

由于事件的时间坐标就是位于事件发生地的钟的读数，因此事件 A 发生时C_1、C_1' 的读数都为 0。

由于 C_2 与 C_1 同为 S 系的钟，在 S 系是校准的，故在 S 系观察 C_1 读数为 0 时C_2 读数也为 0。

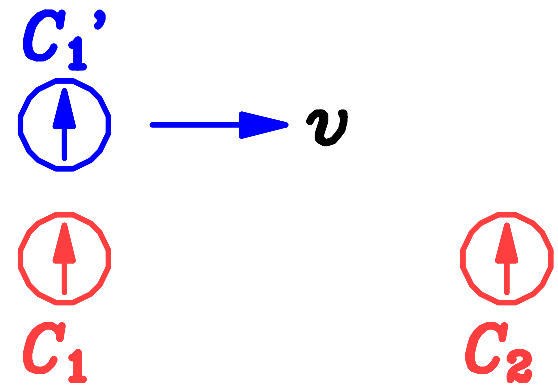
设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

在 S 系的坐标原点和 $x=l$ 处个放一个钟，C_1 和 C_2

在 S' 系的坐标原点放一个钟 C_1'

C_1 和 C_2 是 S 系的钟，C_1' 是 S' 系的钟，C_1' 相对 C_1 运动。

$t=0$ 时，两坐标原点重合，故 C_1' 和 C_1 重合



定义 C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

先在 S 系观察这两个事件

显然，事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A=t'_A=0, \quad x_A=x'_A=0$

由于事件的时间坐标就是位于事件发生地的钟的读数，因此事件 A 发生时C_1、C_1' 的读数都为 0。

由于 C_2 与 C_1 同为 S 系的钟，在 S 系是校准的，故在 S 系观察 C_1 读数为 0 时C_2 读数也为 0。

事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E=l,\ t_E=l/v, \quad \Longrightarrow \quad x'_E=0,\ t'_E=\gamma^{-1}(l/v)$

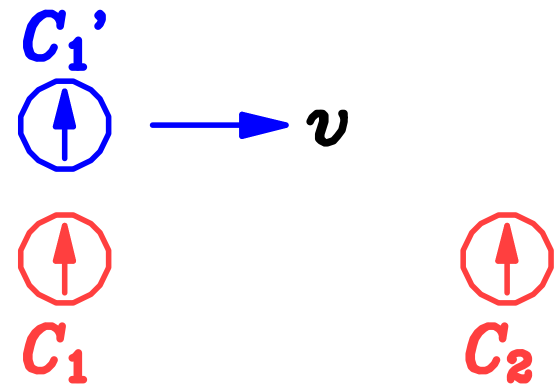
设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

在 S 系的坐标原点和 $x=l$ 处个放一个钟，C_1 和 C_2

在 S' 系的坐标原点放一个钟 C_1'

C_1 和 C_2 是 S 系的钟，C_1' 是 S' 系的钟，C_1' 相对 C_1 运动。

$t=0$ 时，两坐标原点重合，故 C_1' 和 C_1 重合



定义 C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

先在 S 系观察这两个事件

显然，事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A=t_A'=0,\quad x_A=x_A'=0$

由于事件的时间坐标就是位于事件发生地的钟的读数，因此事件 A 发生时C_1、C_1' 的读数都为 0。

由于 C_2 与 C_1 同为 S 系的钟，在 S 系是校准的，故在 S 系观察 C_1 读数为 0 时C_2 读数也为 0。

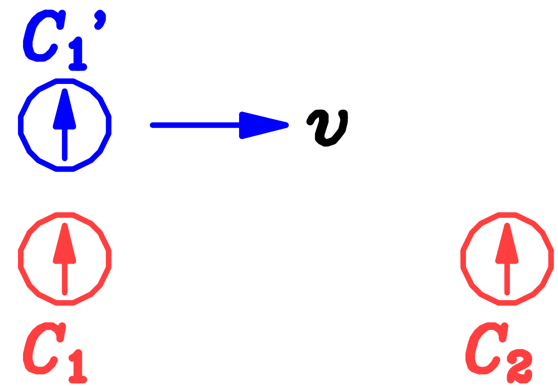
事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E=l,\ t_E=l/v,\quad\Longrightarrow\quad x_E'=0,\ t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$

事件 E 发生时 C_1' 的读数为 $t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$，C_2 的读数为 $t_E=l/v$

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

在 S 系的坐标原点和 $x = l$ 处个放一个钟，C_1 和 C_2

在 S' 系的坐标原点放一个钟 C_1'



C_1 和 C_2 是 S 系的钟，C_1' 是 S' 系的钟，C_1' 相对 C_1 运动。

$t = 0$ 时，两坐标原点重合，故 C_1' 和 C_1 重合

定义 C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

先在 S 系观察这两个事件

显然，事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A = t_A' = 0, \quad x_A = x_A' = 0$

由于事件的时间坐标就是位于事件发生地的钟的读数，因此事件 A 发生时C_1、C_1' 的读数都为 0。

由于 C_2 与 C_1 同为 S 系的钟，在 S 系是校准的，故在 S 系观察 C_1 读数为 0 时C_2 读数也为 0。

事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l,\ t_E = l/v, \quad \Longrightarrow \quad x_E' = 0,\ t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

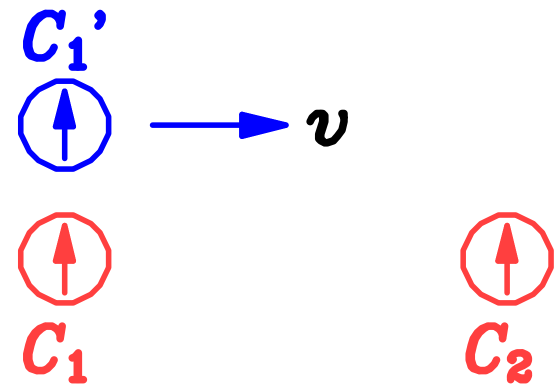
事件 E 发生时 C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$，C_2 的读数为 $t_E = l/v$

C_1 与 C_2 同为 S 系的钟，在 S 系是校准的，故在 S 系观察 C_2 读数为 l/v 时C_1 读数也为 l/v。

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

在 S 系的坐标原点和 $x = l$ 处个放一个钟，C_1 和 C_2

在 S' 系的坐标原点放一个钟 C_1'



C_1 和 C_2 是 S 系的钟，C_1' 是 S' 系的钟，C_1' 相对 C_1 运动。

$t = 0$ 时，两坐标原点重合，故 C_1' 和 C_1 重合

定义 C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

先在 S 系观察这两个事件

显然，事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A = t_A' = 0, \quad x_A = x_A' = 0$

由于事件的时间坐标就是位于事件发生地的钟的读数，因此事件 A 发生时C_1、C_1' 的读数都为 0。

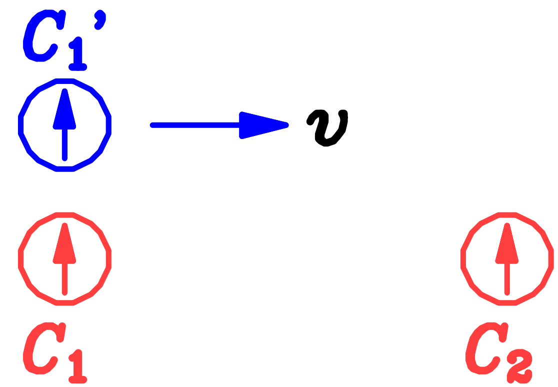
由于 C_2 与 C_1 同为 S 系的钟，在 S 系是校准的，故在 S 系观察 C_1 读数为 0 时C_2 读数也为 0。

事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l,\ t_E = l/v, \quad \Longrightarrow \quad x_E' = 0,\ t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

事件 E 发生时 C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$，C_2 的读数为 $t_E = l/v$

C_1 与 C_2 同为 S 系的钟，在 S 系是校准的，故在 S 系观察 C_2 读数为 l/v 时C_1 读数也为 l/v。

事件 A 发生时



设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

在 S 系的坐标原点和 $x = l$ 处个放一个钟，C_1 和 C_2

在 S' 系的坐标原点放一个钟 C_1'

C_1 和 C_2 是 S 系的钟，C_1' 是 S' 系的钟，C_1' 相对 C_1 运动。

$t = 0$ 时，两坐标原点重合，故 C_1' 和 C_1 重合

定义 C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

先在 S 系观察这两个事件

显然，事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A = t'_A = 0, \quad x_A = x'_A = 0$

由于事件的时间坐标就是位于事件发生地的钟的读数，因此事件 A 发生时C_1、C_1' 的读数都为 0。

由于 C_2 与 C_1 同为 S 系的钟，在 S 系是校准的，故在 S 系观察 C_1 读数为 0 时C_2 读数也为 0。

事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l,\ t_E = l/v, \quad \Longrightarrow \quad x'_E = 0,\ t'_E = \gamma^{-1}(l/v)$

事件 E 发生时 C_1' 的读数为 $t'_E = \gamma^{-1}(l/v)$，C_2 的读数为 $t_E = l/v$

C_1 与 C_2 同为 S 系的钟，在 S 系是校准的，故在 S 系观察 C_2 读数为 l/v 时C_1 读数也为 l/v。

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$

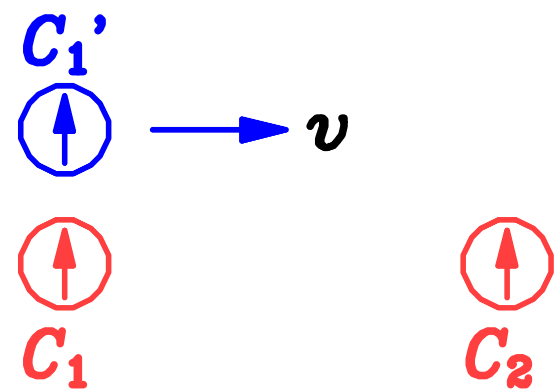
设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

在 S 系的坐标原点和 $x = l$ 处个放一个钟，C_1 和 C_2

在 S' 系的坐标原点放一个钟 C_1'

C_1 和 C_2 是 S 系的钟，C_1' 是 S' 系的钟，C_1' 相对 C_1 运动。

$t = 0$ 时，两坐标原点重合，故 C_1' 和 C_1 重合



定义 C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

先在 S 系观察这两个事件

显然，事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A = t'_A = 0, \quad x_A = x'_A = 0$

由于事件的时间坐标就是位于事件发生地的钟的读数，因此事件 A 发生时C_1、C_1' 的读数都为 0。

由于 C_2 与 C_1 同为 S 系的钟，在 S 系是校准的，故在 S 系观察 C_1 读数为 0 时C_2 读数也为 0。

事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l,\ t_E = l/v, \quad \Longrightarrow \quad x'_E = 0,\ t'_E = \gamma^{-1}(l/v)$

事件 E 发生时 C_1' 的读数为 $t'_E = \gamma^{-1}(l/v)$，C_2 的读数为 $t_E = l/v$

C_1 与 C_2 同为 S 系的钟，在 S 系是校准的，故在 S 系观察 C_2 读数为 l/v 时C_1 读数也为 l/v。

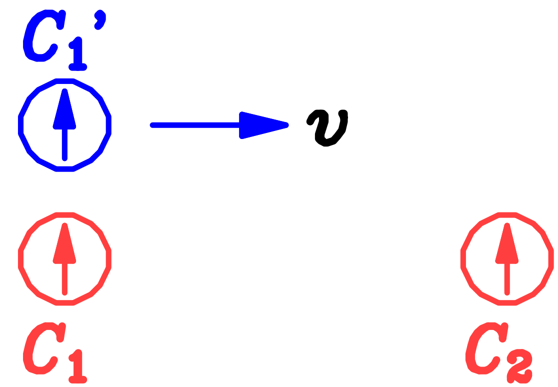
事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$ $\qquad\qquad$ C_1' 读数 $t'_A = 0$

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

在 S 系的坐标原点和 $x=l$ 处个放一个钟，C_1 和 C_2

在 S' 系的坐标原点放一个钟 C_1'



C_1 和 C_2 是 S 系的钟，C_1' 是 S' 系的钟，C_1' 相对 C_1 运动。

$t=0$ 时，两坐标原点重合，故 C_1' 和 C_1 重合

定义 C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

先在 S 系观察这两个事件

显然，事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A = t'_A = 0, \quad x_A = x'_A = 0$

由于事件的时间坐标就是位于事件发生地的钟的读数，因此事件 A 发生时C_1、C_1' 的读数都为 0。

由于 C_2 与 C_1 同为 S 系的钟，在 S 系是校准的，故在 S 系观察 C_1 读数为 0 时C_2 读数也为 0。

事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l,\ t_E = l/v, \quad \Longrightarrow \quad x'_E = 0,\ t'_E = \gamma^{-1}(l/v)$

事件 E 发生时 C_1' 的读数为 $t'_E = \gamma^{-1}(l/v)$，C_2 的读数为 $t_E = l/v$

C_1 与 C_2 同为 S 系的钟，在 S 系是校准的，故在 S 系观察 C_2 读数为 l/v 时C_1 读数也为 l/v。

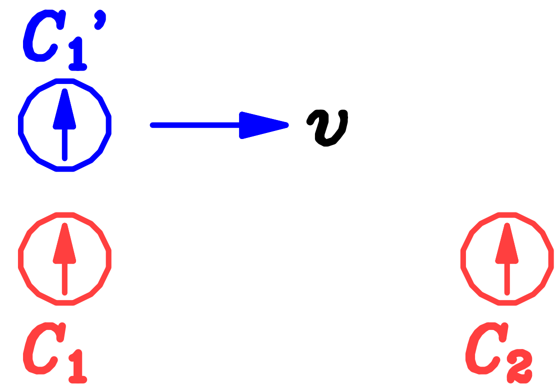
事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$ $\qquad$ C_1' 读数 $t'_A = 0$ $\qquad$ C_2 读数 $t_A = 0$ (在 S 系观察)

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

在 S 系的坐标原点和 $x=l$ 处个放一个钟，C_1 和 C_2

在 S' 系的坐标原点放一个钟 C_1'



C_1 和 C_2 是 S 系的钟，C_1' 是 S' 系的钟，C_1' 相对 C_1 运动。

$t=0$ 时，两坐标原点重合，故 C_1' 和 C_1 重合

定义 C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

先在 S 系观察这两个事件

显然，事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A=t_A'=0,\quad x_A=x_A'=0$

由于事件的时间坐标就是位于事件发生地的钟的读数，因此事件 A 发生时C_1、C_1' 的读数都为 0。

由于 C_2 与 C_1 同为 S 系的钟，在 S 系是校准的，故在 S 系观察 C_1 读数为 0 时C_2 读数也为 0。

事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E=l,\ t_E=l/v,\quad \Longrightarrow \quad x_E'=0,\ t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$

事件 E 发生时 C_1' 的读数为 $t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$，C_2 的读数为 $t_E=l/v$

C_1 与 C_2 同为 S 系的钟，在 S 系是校准的，故在 S 系观察 C_2 读数为 l/v 时C_1 读数也为 l/v。

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A=0$ $\qquad$ C_1' 读数 $t_A'=0$ $\qquad$ C_2 读数 $t_A=0$ (在 S 系观察)

事件 E 发生时

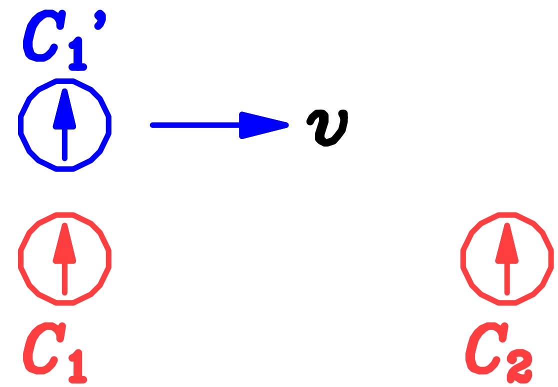
设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

在 S 系的坐标原点和 $x=l$ 处个放一个钟，C_1 和 C_2

在 S' 系的坐标原点放一个钟 C_1'

C_1 和 C_2 是 S 系的钟，C_1' 是 S' 系的钟，C_1' 相对 C_1 运动。

$t=0$ 时，两坐标原点重合，故 C_1' 和 C_1 重合



定义 C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

先在 S 系观察这两个事件

显然，事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A=t'_A=0,\quad x_A=x'_A=0$

由于事件的时间坐标就是位于事件发生地的钟的读数，因此事件 A 发生时C_1、C_1' 的读数都为 0。

由于 C_2 与 C_1 同为 S 系的钟，在 S 系是校准的，故在 S 系观察 C_1 读数为 0 时C_2 读数也为 0。

事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E=l,\ t_E=l/v,\quad\Longrightarrow\quad x'_E=0,\ t'_E=\gamma^{-1}(l/v)$

事件 E 发生时 C_1' 的读数为 $t'_E=\gamma^{-1}(l/v)$，C_2 的读数为 $t_E=l/v$

C_1 与 C_2 同为 S 系的钟，在 S 系是校准的，故在 S 系观察 C_2 读数为 l/v 时C_1 读数也为 l/v。

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A=0$　　C_1' 读数 $t'_A=0$　　C_2 读数 $t_A=0$ (在 S 系观察)

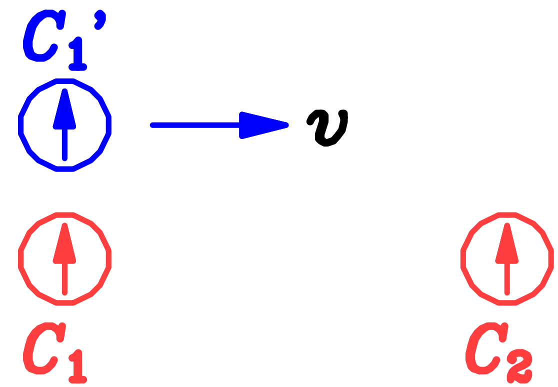
事件 E 发生时

C_1 读数 $t_E=l/v$ (在 S 系观察)

设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

在 S 系的坐标原点和 $x=l$ 处个放一个钟，C_1 和 C_2

在 S' 系的坐标原点放一个钟 C_1'



C_1 和 C_2 是 S 系的钟，C_1' 是 S' 系的钟，C_1' 相对 C_1 运动。

$t=0$ 时，两坐标原点重合，故 C_1' 和 C_1 重合

定义 C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

先在 S 系观察这两个事件

显然，事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A=t_A'=0,\quad x_A=x_A'=0$

由于事件的时间坐标就是位于事件发生地的钟的读数，因此事件 A 发生时C_1、C_1' 的读数都为 0。

由于 C_2 与 C_1 同为 S 系的钟，在 S 系是校准的，故在 S 系观察 C_1 读数为 0 时C_2 读数也为 0。

事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E=l,\ t_E=l/v,\quad \Longrightarrow\quad x_E'=0,\ t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$

事件 E 发生时 C_1' 的读数为 $t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$，C_2 的读数为 $t_E=l/v$

C_1 与 C_2 同为 S 系的钟，在 S 系是校准的，故在 S 系观察 C_2 读数为 l/v 时C_1 读数也为 l/v。

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A=0$　　C_1' 读数 $t_A'=0$　　C_2 读数 $t_A=0$ (在 S 系观察)

事件 E 发生时

C_1 读数 $t_E=l/v$ (在 S 系观察)　　C_1' 读数 $t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$

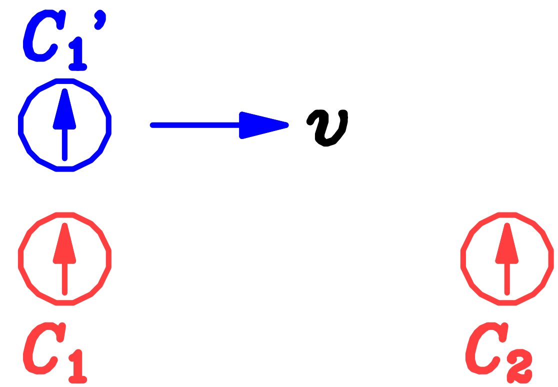
设 S 和 S' 为特殊相关惯性系，S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 向运动。

在 S 系的坐标原点和 $x=l$ 处个放一个钟，C_1 和 C_2

在 S' 系的坐标原点放一个钟 C_1'

C_1 和 C_2 是 S 系的钟，C_1' 是 S' 系的钟，C_1' 相对 C_1 运动。

$t=0$ 时，两坐标原点重合，故 C_1' 和 C_1 重合



定义 C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

先在 S 系观察这两个事件

显然，事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A=t_A'=0,\quad x_A=x_A'=0$

由于事件的时间坐标就是位于事件发生地的钟的读数，因此事件 A 发生时C_1、C_1' 的读数都为 0。

由于 C_2 与 C_1 同为 S 系的钟，在 S 系是校准的，故在 S 系观察 C_1 读数为 0 时C_2 读数也为 0。

事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E=l,\ t_E=l/v,\quad\Longrightarrow\quad x_E'=0,\ t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$

事件 E 发生时 C_1' 的读数为 $t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$，C_2 的读数为 $t_E=l/v$

C_1 与 C_2 同为 S 系的钟，在 S 系是校准的，故在 S 系观察 C_2 读数为 l/v 时C_1 读数也为 l/v。

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A=0$ $\qquad$ C_1' 读数 $t_A'=0$ $\qquad$ C_2 读数 $t_A=0$ (在 S 系观察)

事件 E 发生时

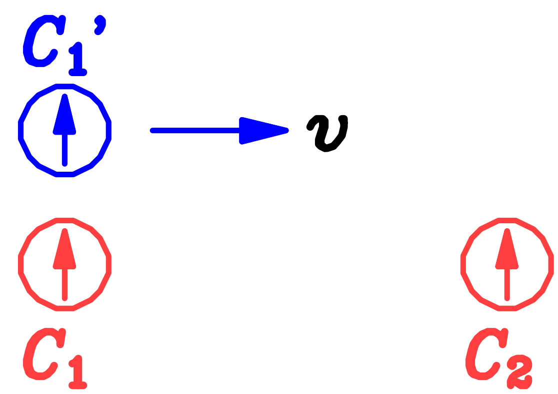
C_1 读数 $t_E=l/v$ (在 S 系观察) $\qquad$ C_1' 读数 $t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$ $\qquad$ C_2 读数：$t_E=l/v$

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$　　C_1' 读数 $t'_A = 0$　　C_2 读数 $t_A = 0$ (在 S 系观察)

事件 E 发生时

C_1 读数 $t_E = l/v$ (在 S 系观察)　　C_1' 读数 $t'_E = \gamma^{-1}(l/v)$　　C_2 读数：$t_E = l/v$



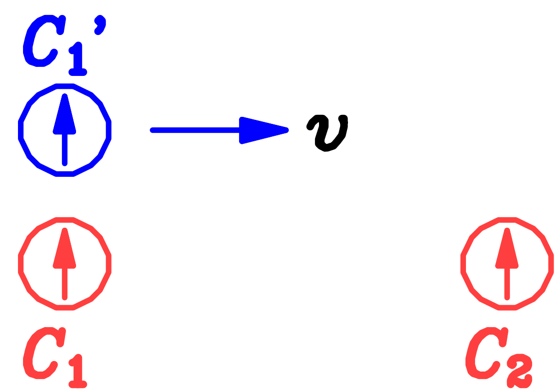
事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$　　C_1' 读数 $t_A' = 0$　　C_2 读数 $t_A = 0$ (在 S 系观察)

事件 E 发生时

C_1 读数 $t_E = l/v$ (在 S 系观察)　　C_1' 读数 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$　　C_2 读数：$t_E = l/v$

事件 A 到事件 B 的过程



事件 A 发生时

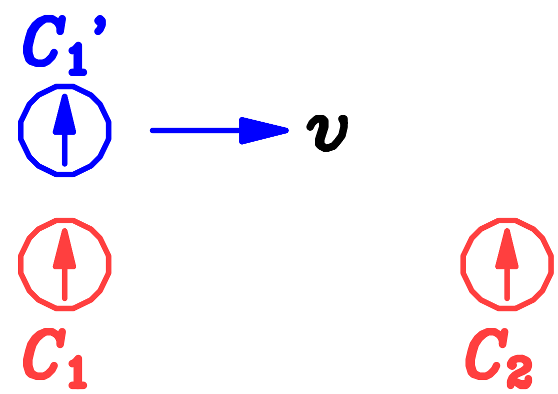
C_1 读数 $t_A = 0$ C_1' 读数 $t'_A = 0$ C_2 读数 $t_A = 0$ (在 S 系观察)

事件 E 发生时

C_1 读数 $t_E = l/v$ (在 S 系观察) C_1' 读数 $t'_E = \gamma^{-1}(l/v)$ C_2 读数：$t_E = l/v$

事件 A 到事件 B 的过程

C_1 走了 $t_E = l/v$



事件 A 发生时

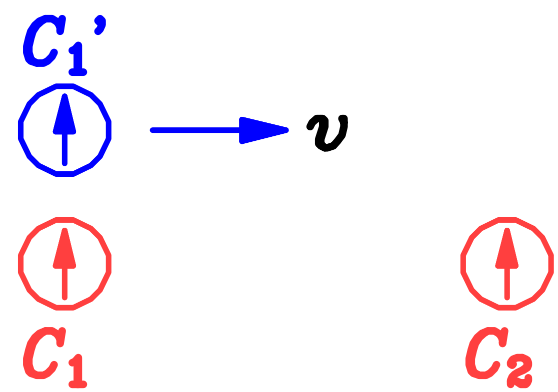
C_1 读数 $t_A = 0$　　C_1' 读数 $t_A' = 0$　　C_2 读数 $t_A = 0$ (在 S 系观察)

事件 E 发生时

C_1 读数 $t_E = l/v$ (在 S 系观察)　　C_1' 读数 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$　　C_2 读数：$t_E = l/v$

事件 A 到事件 B 的过程

C_1 走了 $t_E = l/v$　　C_1' 走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$



事件 A 发生时

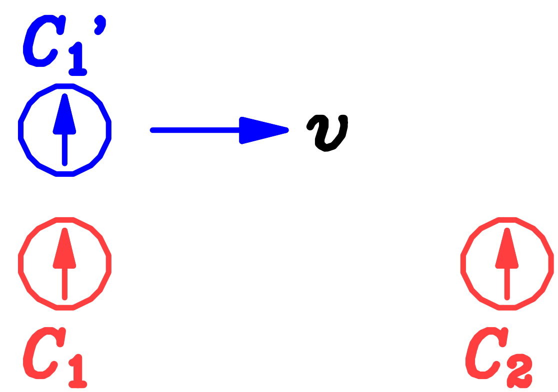
C_1 读数 $t_A=0$ C_1' 读数 $t_A'=0$ C_2 读数 $t_A=0$ (在 S 系观察)

事件 E 发生时

C_1 读数 $t_E=l/v$ (在 S 系观察) C_1' 读数 $t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$ C_2 读数：$t_E=l/v$

事件 A 到事件 B 的过程

C_1 走了 $t_E=l/v$ C_1' 走了 $t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$ C_2 走了 $t_E=l/v$



事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$　　C_1' 读数 $t_A' = 0$　　C_2 读数 $t_A = 0$ (在 S 系观察)

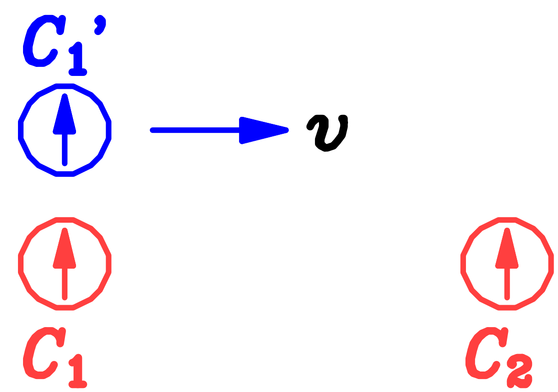
事件 E 发生时

C_1 读数 $t_E = l/v$ (在 S 系观察)　　C_1' 读数 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$　　C_2 读数：$t_E = l/v$

事件 A 到事件 B 的过程

C_1 走了 $t_E = l/v$　　C_1' 走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$　　C_2 走了 $t_E = l/v$

在 S 系观察，C_1 与 C_2 都走了 $t_E = l/v$，而 C_1' 只走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$，S' 系的钟变慢了



事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$ C_1' 读数 $t_A' = 0$ C_2 读数 $t_A = 0$ (在 S 系观察)

事件 E 发生时

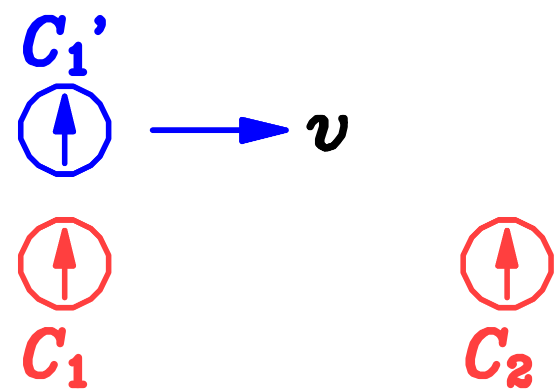
C_1 读数 $t_E = l/v$ (在 S 系观察) C_1' 读数 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$ C_2 读数：$t_E = l/v$

事件 A 到事件 B 的过程

C_1 走了 $t_E = l/v$ C_1' 走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$ C_2 走了 $t_E = l/v$

在 S 系观察，C_1 与 C_2 都走了 $t_E = l/v$，而 C_1' 只走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$，S' 系的钟变慢了

现在，在 S' 系观察 A、E 两个事件。



Let there be light

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$ $\quad$ C_1' 读数 $t_A' = 0$ $\quad$ C_2 读数 $t_A = 0$ (在 S 系观察)

事件 E 发生时

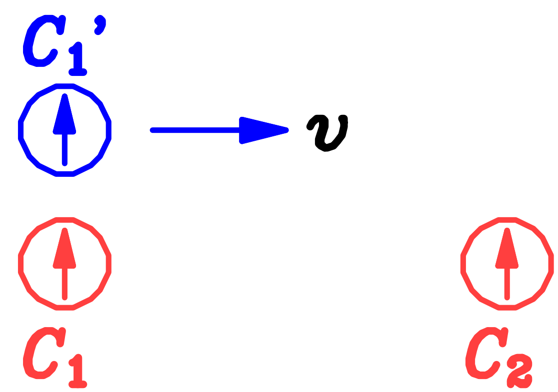
C_1 读数 $t_E = l/v$ (在 S 系观察) $\quad$ C_1' 读数 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$ $\quad$ C_2 读数：$t_E = l/v$

事件 A 到事件 B 的过程

C_1 走了 $t_E = l/v$ $\quad$ C_1' 走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$ $\quad$ C_2 走了 $t_E = l/v$

在 S 系观察，C_1 与 C_2 都走了 $t_E = l/v$，而 C_1' 只走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$，S' 系的钟变慢了

现在，在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E



事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A=0$　　C_1' 读数 $t_A'=0$　　C_2 读数 $t_A=0$ (在 S 系观察)

事件 E 发生时

C_1 读数 $t_E=l/v$ (在 S 系观察)　　C_1' 读数 $t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$　　C_2 读数：$t_E=l/v$

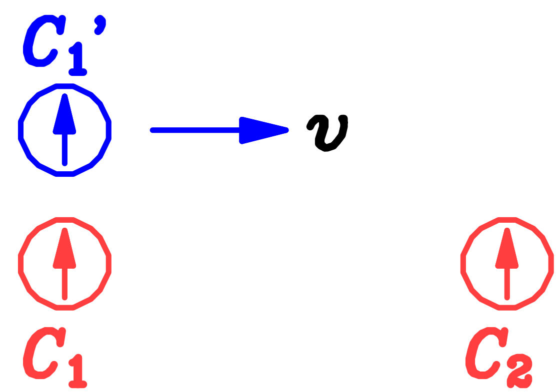
事件 A 到事件 B 的过程

C_1 走了 $t_E=l/v$　　C_1' 走了 $t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$　　C_2 走了 $t_E=l/v$

在 S 系观察，C_1 与 C_2 都走了 $t_E=l/v$，而 C_1' 只走了 $t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$，S' 系的钟变慢了

现在，在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A=t_A'=0,\quad x_A=x_A'=0$



事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$　　C_1' 读数 $t_A' = 0$　　C_2 读数 $t_A = 0$ (在 S 系观察)

事件 E 发生时

C_1 读数 $t_E = l/v$ (在 S 系观察)　　C_1' 读数 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$　　C_2 读数：$t_E = l/v$

事件 A 到事件 B 的过程

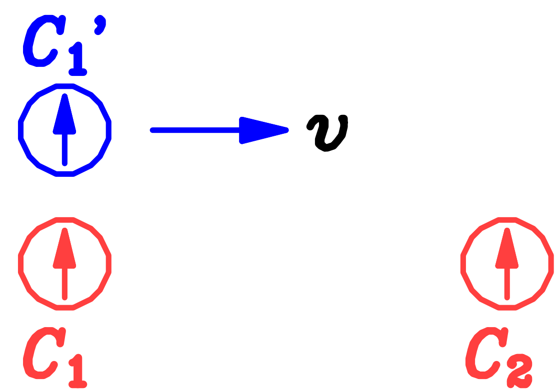
C_1 走了 $t_E = l/v$　　C_1' 走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$　　C_2 走了 $t_E = l/v$

在 S 系观察，C_1 与 C_2 都走了 $t_E = l/v$，而 C_1' 只走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$，S' 系的钟变慢了

现在，在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A = t_A' = 0$， $x_A = x_A' = 0$

因此事件 A 发生时C_1、C_1' 的读数都为 0。



事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$ C_1' 读数 $t_A' = 0$ C_2 读数 $t_A = 0$ (在 S 系观察)

事件 E 发生时

C_1 读数 $t_E = l/v$ (在 S 系观察) C_1' 读数 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$ C_2 读数：$t_E = l/v$

事件 A 到事件 B 的过程

C_1 走了 $t_E = l/v$ C_1' 走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$ C_2 走了 $t_E = l/v$

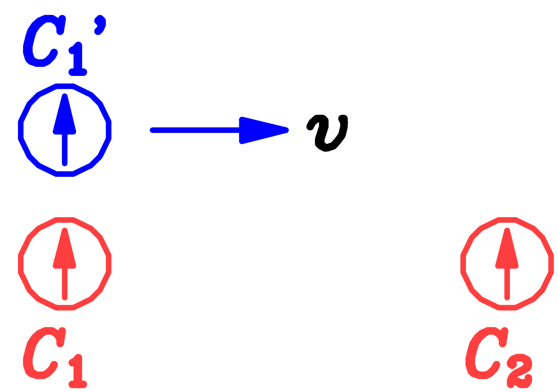
在 S 系观察，C_1 与 C_2 都走了 $t_E = l/v$，而 C_1' 只走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$，S' 系的钟变慢了

现在，在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A = t_A' = 0, \quad x_A = x_A' = 0$

因此事件 A 发生时C_1、C_1' 的读数都为 0。

但在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，C_2 的读数并不为 0



事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A=0$ C_1' 读数 $t_A'=0$ C_2 读数 $t_A=0$ (在 S 系观察)

事件 E 发生时

C_1 读数 $t_E=l/v$ (在 S 系观察) C_1' 读数 $t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$ C_2 读数：$t_E=l/v$

事件 A 到事件 B 的过程

C_1 走了 $t_E=l/v$ C_1' 走了 $t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$ C_2 走了 $t_E=l/v$

在 S 系观察，C_1 与 C_2 都走了 $t_E=l/v$，而 C_1' 只走了 $t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$，S' 系的钟变慢了

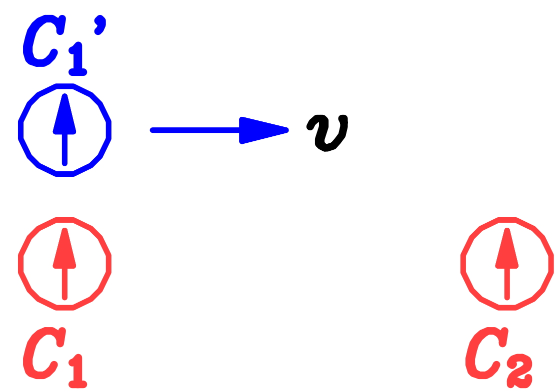
现在，在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A=t_A'=0,\quad x_A=x_A'=0$

因此事件 A 发生时C_1、C_1' 的读数都为 0。

但在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，C_2 的读数并不为 0

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，与 C_2 重合的 C_2' 钟的读数为 0



事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$ $\quad$ C_1' 读数 $t_A' = 0$ $\quad$ C_2 读数 $t_A = 0$ (在 S 系观察)

事件 E 发生时

C_1 读数 $t_E = l/v$ (在 S 系观察) $\quad$ C_1' 读数 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$ $\quad$ C_2 读数：$t_E = l/v$

事件 A 到事件 B 的过程

C_1 走了 $t_E = l/v$ $\quad$ C_1' 走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$ $\quad$ C_2 走了 $t_E = l/v$

在 S 系观察，C_1 与 C_2 都走了 $t_E = l/v$，而 C_1' 只走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$，S' 系的钟变慢了

现在，在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

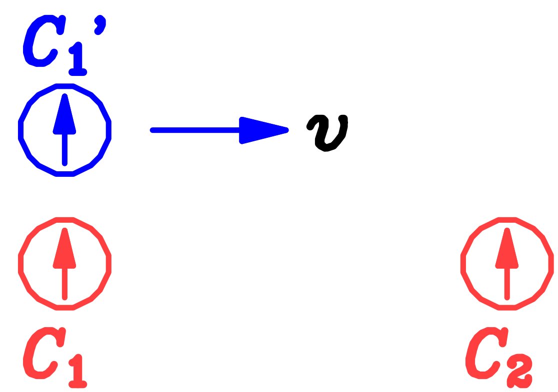
事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A = t_A' = 0, \quad x_A = x_A' = 0$

因此事件 A 发生时C_1、C_1' 的读数都为 0。

但在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，C_2 的读数并不为 0

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，与 C_2 重合的 C_2' 钟的读数为 0

这是因为 C_1' 与 C_2' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的



事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$ C_1' 读数 $t_A' = 0$ C_2 读数 $t_A = 0$ (在 S 系观察)

事件 E 发生时

C_1 读数 $t_E = l/v$ (在 S 系观察) C_1' 读数 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$ C_2 读数：$t_E = l/v$

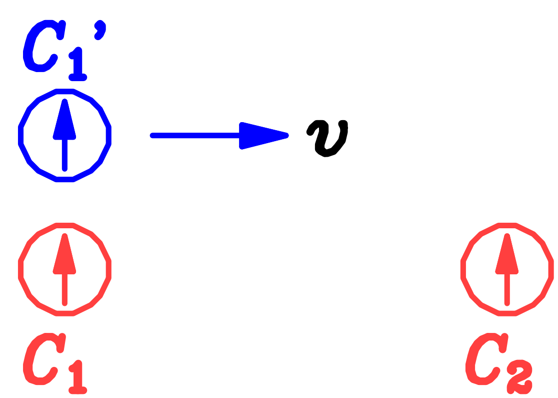
事件 A 到事件 B 的过程

C_1 走了 $t_E = l/v$ C_1' 走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$ C_2 走了 $t_E = l/v$

在 S 系观察，C_1 与 C_2 都走了 $t_E = l/v$，而 C_1' 只走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$，S' 系的钟变慢了

现在，在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A = t_A' = 0$，$\quad x_A = x_A' = 0$



因此事件 A 发生时C_1、C_1' 的读数都为 0。

但在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，C_2 的读数并不为 0

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，与 C_2 重合的 C_2' 钟的读数为 0

这是因为 C_1' 与 C_2' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

C_2 的读数不为 0，设其读数为 δ，

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$　　C_1' 读数 $t_A' = 0$　　C_2 读数 $t_A = 0$ (在 S 系观察)

事件 E 发生时

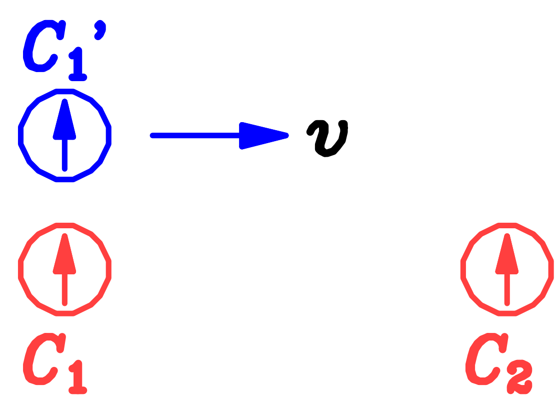
C_1 读数 $t_E = l/v$ (在 S 系观察)　　C_1' 读数 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$　　C_2 读数：$t_E = l/v$

事件 A 到事件 B 的过程

C_1 走了 $t_E = l/v$　　C_1' 走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$　　C_2 走了 $t_E = l/v$

在 S 系观察，C_1 与 C_2 都走了 $t_E = l/v$，而 C_1' 只走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$，S' 系的钟变慢了

现在，在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E



事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A = t_A' = 0$，　$x_A = x_A' = 0$

因此事件 A 发生时C_1、C_1' 的读数都为 0。

但在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，C_2 的读数并不为 0

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，与 C_2 重合的 C_2' 钟的读数为 0

这是因为 C_1' 与 C_2' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

C_2 的读数不为 0，设其读数为 δ，即在 S' 系观察，C_2' 与 C_2 重合时，C_2 的读数为 δ

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$　　C_1' 读数 $t_A' = 0$　　C_2 读数 $t_A = 0$ (在 S 系观察)

事件 E 发生时

C_1 读数 $t_E = l/v$ (在 S 系观察)　　C_1' 读数 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$　　C_2 读数：$t_E = l/v$

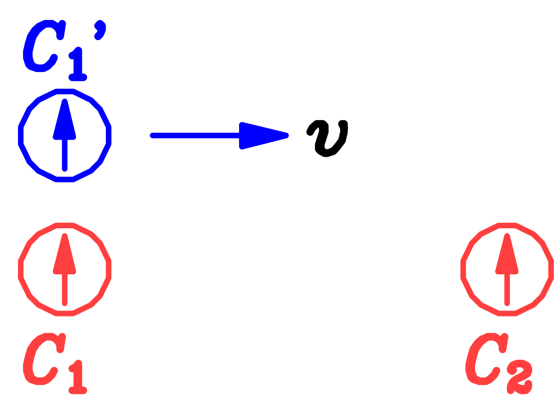
事件 A 到事件 B 的过程

C_1 走了 $t_E = l/v$　　C_1' 走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$　　C_2 走了 $t_E = l/v$

在 S 系观察，C_1 与 C_2 都走了 $t_E = l/v$，而 C_1' 只走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$，S' 系的钟变慢了

现在，在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A = t_A' = 0$，　$x_A = x_A' = 0$



因此事件 A 发生时C_1、C_1' 的读数都为 0。

但在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，C_2 的读数并不为 0

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，与 C_2 重合的 C_2' 钟的读数为 0

这是因为 C_1' 与 C_2' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

C_2 的读数不为 0，设其读数为 δ，即在 S' 系观察，C_2' 与 C_2 重合时，C_2 的读数为 δ

设 C_2' 与 C_2 重合为事件 B，

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$ | C_1' 读数 $t_A' = 0$ | C_2 读数 $t_A = 0$ (在 S 系观察)

事件 E 发生时

C_1 读数 $t_E = l/v$ (在 S 系观察) | C_1' 读数 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$ | C_2 读数：$t_E = l/v$

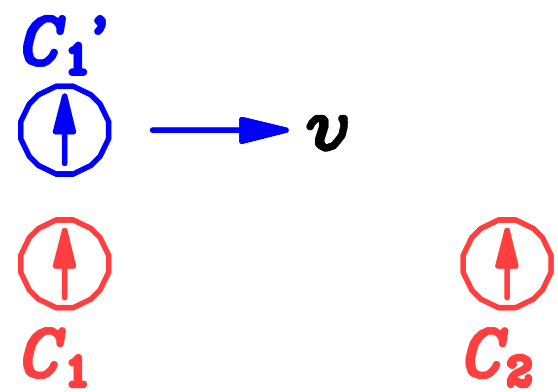
事件 A 到事件 B 的过程

C_1 走了 $t_E = l/v$ | C_1' 走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$ | C_2 走了 $t_E = l/v$

在 S 系观察，C_1 与 C_2 都走了 $t_E = l/v$，而 C_1' 只走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$，S' 系的钟变慢了

现在，在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A = t_A' = 0, \quad x_A = x_A' = 0$



因此事件 A 发生时C_1、C_1' 的读数都为 0。

但在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，C_2 的读数并不为 0

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，与 C_2 重合的 C_2' 钟的读数为 0

这是因为 C_1' 与 C_2' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

C_2 的读数不为 0，设其读数为 δ，即在 S' 系观察，C_2' 与 C_2 重合时，C_2 的读数为 δ

设 C_2' 与 C_2 重合为事件 B，则事件 B 在 S 与 S' 的时空坐标为：

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$　　C_1' 读数 $t_A' = 0$　　C_2 读数 $t_A = 0$ (在 S 系观察)

事件 E 发生时

C_1 读数 $t_E = l/v$ (在 S 系观察)　　C_1' 读数 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$　　C_2 读数：$t_E = l/v$

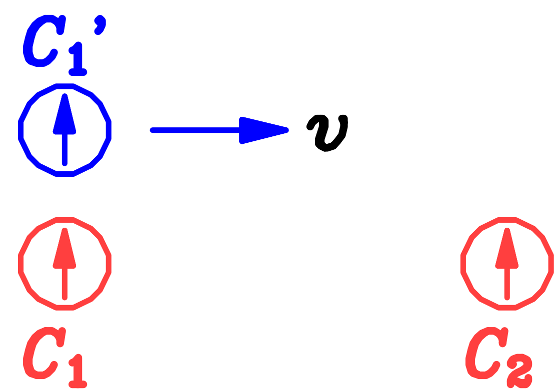
事件 A 到事件 B 的过程

C_1 走了 $t_E = l/v$　　C_1' 走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$　　C_2 走了 $t_E = l/v$

在 S 系观察，C_1 与 C_2 都走了 $t_E = l/v$，而 C_1' 只走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$，S' 系的钟变慢了

现在，在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A = t_A' = 0,\quad x_A = x_A' = 0$



因此事件 A 发生时C_1、C_1' 的读数都为 0。

但在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，C_2 的读数并不为 0

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，与 C_2 重合的 C_2' 钟的读数为 0

这是因为 C_1' 与 C_2' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

C_2 的读数不为 0，设其读数为 δ，即在 S' 系观察，C_2' 与 C_2 重合时，C_2 的读数为 δ

设 C_2' 与 C_2 重合为事件 B，则事件 B 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_B = \delta,\quad t_B' = 0,\quad x_B = l$

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A=0$　　C_1' 读数 $t_A'=0$　　C_2 读数 $t_A=0$ (在 S 系观察)

事件 E 发生时

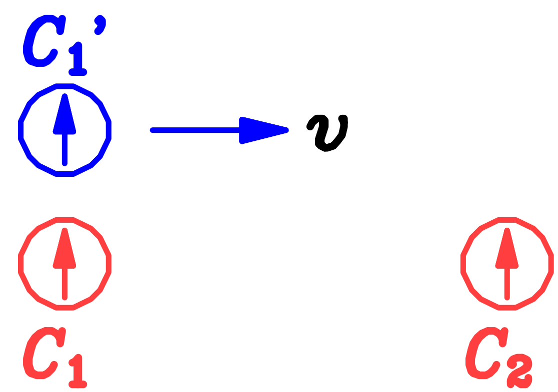
C_1 读数 $t_E=l/v$ (在 S 系观察)　　C_1' 读数 $t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$　　C_2 读数：$t_E=l/v$

事件 A 到事件 B 的过程

C_1 走了 $t_E=l/v$　　C_1' 走了 $t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$　　C_2 走了 $t_E=l/v$

在 S 系观察，C_1 与 C_2 都走了 $t_E=l/v$，而 C_1' 只走了 $t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$，S' 系的钟变慢了

现在，在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E



事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A=t_A'=0,\quad x_A=x_A'=0$

因此事件 A 发生时C_1、C_1' 的读数都为 0。

但在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，C_2 的读数并不为 0

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，与 C_2 重合的 C_2' 钟的读数为 0

这是因为 C_1' 与 C_2' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

C_2 的读数不为 0，设其读数为 δ，即在 S' 系观察，C_2' 与 C_2 重合时，C_2 的读数为 δ

设 C_2' 与 C_2 重合为事件 B，则事件 B 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_B=\delta,\quad t_B'=0,\quad x_B=l$

由洛仑兹变换：$t_B'=\gamma(t_B-vx_B/c^2)$

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A=0$　　C_1' 读数 $t_A'=0$　　C_2 读数 $t_A=0$ (在 S 系观察)

事件 E 发生时

C_1 读数 $t_E=l/v$ (在 S 系观察)　　C_1' 读数 $t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$　　C_2 读数：$t_E=l/v$

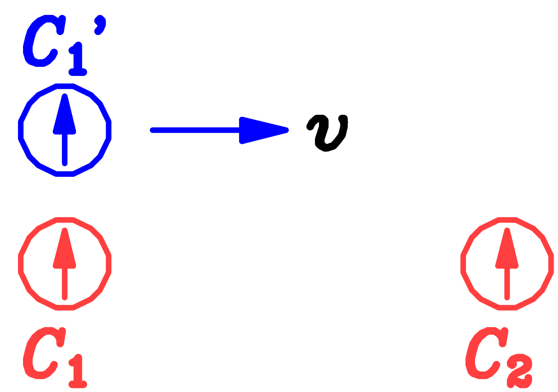
事件 A 到事件 B 的过程

C_1 走了 $t_E=l/v$　　C_1' 走了 $t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$　　C_2 走了 $t_E=l/v$

在 S 系观察，C_1 与 C_2 都走了 $t_E=l/v$，而 C_1' 只走了 $t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$，S' 系的钟变慢了

现在，在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A=t_A'=0,\quad x_A=x_A'=0$



因此事件 A 发生时C_1、C_1' 的读数都为 0。

但在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，C_2 的读数并不为 0

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，与 C_2 重合的 C_2' 钟的读数为 0

这是因为 C_1' 与 C_2' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

C_2 的读数不为 0，设其读数为 δ，即在 S' 系观察，C_2' 与 C_2 重合时，C_2 的读数为 δ

设 C_2' 与 C_2 重合为事件 B，则事件 B 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_B=\delta,\quad t_B'=0,\quad x_B=l$

由洛仑兹变换：$t_B'=\gamma(t_B-vx_B/c^2)\quad\Longrightarrow\quad\delta=vl/c^2$

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A=0$ C_1' 读数 $t_A'=0$ C_2 读数 $t_A=0$ (在 S 系观察)

事件 E 发生时

C_1 读数 $t_E=l/v$ (在 S 系观察) C_1' 读数 $t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$ C_2 读数：$t_E=l/v$

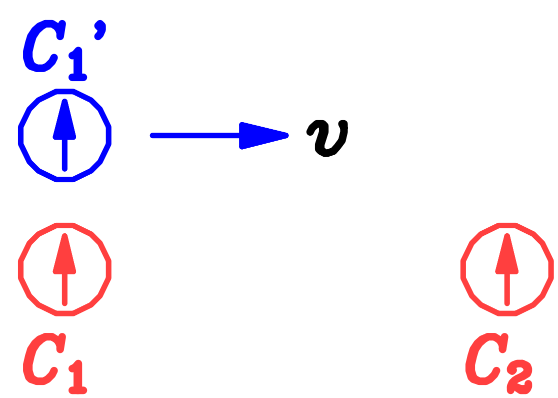
事件 A 到事件 B 的过程

C_1 走了 $t_E=l/v$ C_1' 走了 $t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$ C_2 走了 $t_E=l/v$

在 S 系观察，C_1 与 C_2 都走了 $t_E=l/v$，而 C_1' 只走了 $t_E'=\gamma^{-1}(l/v)$，S' 系的钟变慢了

现在，在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

事件 A 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_A=t_A'=0,\quad x_A=x_A'=0$



因此事件 A 发生时C_1、C_1' 的读数都为 0。

但在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，C_2 的读数并不为 0

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，与 C_2 重合的 C_2' 钟的读数为 0

这是因为 C_1' 与 C_2' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

C_2 的读数不为 0，设其读数为 δ，即在 S' 系观察，C_2' 与 C_2 重合时，C_2 的读数为 δ

设 C_2' 与 C_2 重合为事件 B，则事件 B 在 S 与 S' 的时空坐标为：$t_B=\delta,\quad t_B'=0,\quad x_B=l$

由洛仑兹变换：$t_B'=\gamma(t_B-vx_B/c^2)\quad\Longrightarrow\quad\delta=vl/c^2$

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta=vl/c^2$

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow$ $x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow$ $x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow\ x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

Let there be light

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow\ x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察，事件 E 发生时，C_1 的读数不为 l/v，而是 η。

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow$ $x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察，事件 E 发生时，C_1 的读数不为 l/v，而是 η。如何求 η?

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow$ $x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察，事件 E 发生时，C_1 的读数不为 l/v，而是 η。如何求 η?

在 S' 系观察，设事件 E 发生时，在 S' 系中有一个钟 C_1'' 与 C_1 重合

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow$ $x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察，事件 E 发生时，C_1 的读数不为 l/v，而是 η。如何求 η?

在 S' 系观察，设事件 E 发生时，在 S' 系中有一个钟 C_1'' 与 C_1 重合

因为 C_1'' 与 C_1' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow$ $x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察，事件 E 发生时，C_1 的读数不为 l/v，而是 η。如何求 η?

在 S' 系观察，设事件 E 发生时，在 S' 系中有一个钟 C_1'' 与 C_1 重合

因为 C_1'' 与 C_1' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

故事件 E 发生时，C_1'' 的读数与C_1' 的读数同为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow \quad x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察，事件 E 发生时，C_1 的读数不为 l/v，而是 η。如何求 η?

在 S' 系观察，设事件 E 发生时，在 S' 系中有一个钟 C_1'' 与 C_1 重合

因为 C_1'' 与 C_1' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

故事件 E 发生时，C_1'' 的读数与C_1' 的读数同为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

设 C_1'' 和 C_1 重合为事件 C，则事件 C 在 S 与 S' 的时空坐标为：

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow$ $x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察，事件 E 发生时，C_1 的读数不为 l/v，而是 η。如何求 η?

在 S' 系观察，设事件 E 发生时，在 S' 系中有一个钟 C_1'' 与 C_1 重合

因为 C_1'' 与 C_1' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

故事件 E 发生时，C_1'' 的读数与C_1' 的读数同为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

设 C_1'' 和 C_1 重合为事件 C，则事件 C 在 S 与 S' 的时空坐标为：

$$t_C = \eta, \quad t_C' = t_E' = \gamma^{-1}(l/v), \quad x_C = 0$$

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow \quad x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察，事件 E 发生时，C_1 的读数不为 l/v，而是 η。如何求 η?

在 S' 系观察，设事件 E 发生时，在 S' 系中有一个钟 C_1'' 与 C_1 重合

因为 C_1'' 与 C_1' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

故事件 E 发生时，C_1'' 的读数与C_1' 的读数同为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

设 C_1'' 和 C_1 重合为事件 C，则事件 C 在 S 与 S' 的时空坐标为：

$t_C = \eta, \quad t_C' = t_E' = \gamma^{-1}(l/v), \quad x_C = 0$ 由 $t_C' = \gamma(t_C - vx_C/c^2)$

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow \; x'_E = 0$，$t'_E = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，C_1' 的读数为 $t'_E = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察，事件 E 发生时，C_1 的读数不为 l/v，而是 η。如何求 η?

在 S' 系观察，设事件 E 发生时，在 S' 系中有一个钟 C_1'' 与 C_1 重合

因为 C_1'' 与 C_1' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

故事件 E 发生时，C_1'' 的读数与C_1' 的读数同为 $t'_E = \gamma^{-1}(l/v)$

设 C_1'' 和 C_1 重合为事件 C，则事件 C 在 S 与 S' 的时空坐标为：

$t_C = \eta, \quad t'_C = t'_E = \gamma^{-1}(l/v), \quad x_C = 0$ 由 $t'_C = \gamma(t_C - v x_C/c^2) \;\Longrightarrow\; \eta = \gamma^{-2}(l/v)$

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow \quad x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察，事件 E 发生时，C_1 的读数不为 l/v，而是 η。如何求 η?

在 S' 系观察，设事件 E 发生时，在 S' 系中有一个钟 C_1'' 与 C_1 重合

因为 C_1'' 与 C_1' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

故事件 E 发生时，C_1'' 的读数与C_1' 的读数同为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

设 C_1'' 和 C_1 重合为事件 C，则事件 C 在 S 与 S' 的时空坐标为：

$$t_C = \eta, \quad t_C' = t_E' = \gamma^{-1}(l/v), \quad x_C = 0 \quad 由 \ \ t_C' = \gamma(t_C - vx_C/c^2) \ \Longrightarrow \ \eta = \gamma^{-2}(l/v)$$

小结：在 S' 系观察 A、E 两个事件。

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow$ $x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察，事件 E 发生时，C_1 的读数不为 l/v，而是 η。如何求 η?

在 S' 系观察，设事件 E 发生时，在 S' 系中有一个钟 C_1'' 与 C_1 重合

因为 C_1'' 与 C_1' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

故事件 E 发生时，C_1'' 的读数与C_1' 的读数同为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

设 C_1'' 和 C_1 重合为事件 C，则事件 C 在 S 与 S' 的时空坐标为：

$t_C = \eta$，　$t_C' = t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$，　$x_C = 0$　由 $t_C' = \gamma(t_C - vx_C/c^2) \Longrightarrow \eta = \gamma^{-2}(l/v)$

小结：在 S' 系观察 A、E 两个事件。

事件 A 发生时

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow \quad x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察，事件 E 发生时，C_1 的读数不为 l/v，而是 η。如何求 η?

在 S' 系观察，设事件 E 发生时，在 S' 系中有一个钟 C_1'' 与 C_1 重合

因为 C_1'' 与 C_1' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

故事件 E 发生时，C_1'' 的读数与C_1' 的读数同为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

设 C_1'' 和 C_1 重合为事件 C，则事件 C 在 S 与 S' 的时空坐标为：

$t_C = \eta, \quad t_C' = t_E' = \gamma^{-1}(l/v), \quad x_C = 0$ 由 $t_C' = \gamma(t_C - vx_C/c^2) \Longrightarrow \eta = \gamma^{-2}(l/v)$

小结：在 S' 系观察 A、E 两个事件。

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow \quad x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察，事件 E 发生时，C_1 的读数不为 l/v，而是 η。如何求 η?

在 S' 系观察，设事件 E 发生时，在 S' 系中有一个钟 C_1'' 与 C_1 重合

因为 C_1'' 与 C_1' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

故事件 E 发生时，C_1'' 的读数与C_1' 的读数同为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

设 C_1'' 和 C_1 重合为事件 C，则事件 C 在 S 与 S' 的时空坐标为：

$t_C = \eta, \quad t_C' = t_E' = \gamma^{-1}(l/v), \quad x_C = 0$ 由 $t_C' = \gamma(t_C - vx_C/c^2) \Longrightarrow \eta = \gamma^{-2}(l/v)$

小结：在 S' 系观察 A、E 两个事件。

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$ $\qquad\qquad$ C_1' 读数 $t_A' = 0$

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow \quad x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察，事件 E 发生时，C_1 的读数不为 l/v，而是 η。如何求 η?

在 S' 系观察，设事件 E 发生时，在 S' 系中有一个钟 C_1'' 与 C_1 重合

因为 C_1'' 与 C_1' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

故事件 E 发生时，C_1'' 的读数与C_1' 的读数同为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

设 C_1'' 和 C_1 重合为事件 C，则事件 C 在 S 与 S' 的时空坐标为：

$t_C = \eta, \quad t_C' = t_E' = \gamma^{-1}(l/v), \quad x_C = 0$ 由 $t_C' = \gamma(t_C - vx_C/c^2) \Longrightarrow \eta = \gamma^{-2}(l/v)$

小结：在 S' 系观察 A、E 两个事件。

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$ 　　　　 C_1' 读数 $t_A' = 0$ 　　　　 C_2 读数 $\delta = vl/c^2$

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow$ $x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察，事件 E 发生时，C_1 的读数不为 l/v，而是 η。如何求 η?

在 S' 系观察，设事件 E 发生时，在 S' 系中有一个钟 C_1'' 与 C_1 重合

因为 C_1'' 与 C_1' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

故事件 E 发生时，C_1'' 的读数与C_1' 的读数同为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

设 C_1'' 和 C_1 重合为事件 C，则事件 C 在 S 与 S' 的时空坐标为：

$$t_C = \eta, \quad t_C' = t_E' = \gamma^{-1}(l/v), \quad x_C = 0 \quad \text{由} \ \ t_C' = \gamma(t_C - vx_C/c^2) \ \Longrightarrow \ \eta = \gamma^{-2}(l/v)$$

小结：在 S' 系观察 A、E 两个事件。

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$ $\qquad$ C_1' 读数 $t_A' = 0$ $\qquad$ C_2 读数 $\delta = vl/c^2$

事件 E 发生时

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow$ $x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察，事件 E 发生时，C_1 的读数不为 l/v，而是 η。如何求 η?

在 S' 系观察，设事件 E 发生时，在 S' 系中有一个钟 C_1'' 与 C_1 重合

因为 C_1'' 与 C_1' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

故事件 E 发生时，C_1'' 的读数与C_1' 的读数同为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

设 C_1'' 和 C_1 重合为事件 C，则事件 C 在 S 与 S' 的时空坐标为：

$$t_C = \eta, \quad t_C' = t_E' = \gamma^{-1}(l/v), \quad x_C = 0 \quad \text{由} \ t_C' = \gamma(t_C - vx_C/c^2) \Longrightarrow \eta = \gamma^{-2}(l/v)$$

小结：在 S' 系观察 A、E 两个事件。

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$ C_1' 读数 $t_A' = 0$ C_2 读数 $\delta = vl/c^2$

事件 E 发生时

C_1 读数 $\eta = \gamma^{-2}(l/v)$

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow$ $x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察，事件 E 发生时，C_1 的读数不为 l/v，而是 η。如何求 η?

在 S' 系观察，设事件 E 发生时，在 S' 系中有一个钟 C_1'' 与 C_1 重合

因为 C_1'' 与 C_1' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

故事件 E 发生时，C_1'' 的读数与C_1' 的读数同为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

设 C_1'' 和 C_1 重合为事件 C，则事件 C 在 S 与 S' 的时空坐标为：

$$t_C = \eta,\quad t_C' = t_E' = \gamma^{-1}(l/v),\quad x_C = 0 \quad \text{由}\ t_C' = \gamma(t_C - vx_C/c^2) \Longrightarrow \eta = \gamma^{-2}(l/v)$$

小结：在 S' 系观察 A、E 两个事件。

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$ $\qquad$ C_1' 读数 $t_A' = 0$ $\qquad$ C_2 读数 $\delta = vl/c^2$

事件 E 发生时

C_1 读数 $\eta = \gamma^{-2}(l/v)$ $\qquad$ C_1' 读数 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow$ $x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察，事件 E 发生时，C_1 的读数不为 l/v，而是 η。如何求 η?

在 S' 系观察，设事件 E 发生时，在 S' 系中有一个钟 C_1'' 与 C_1 重合

因为 C_1'' 与 C_1' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

故事件 E 发生时，C_1'' 的读数与C_1' 的读数同为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

设 C_1'' 和 C_1 重合为事件 C，则事件 C 在 S 与 S' 的时空坐标为：

$$t_C = \eta, \quad t_C' = t_E' = \gamma^{-1}(l/v), \quad x_C = 0 \quad \text{由} \ t_C' = \gamma(t_C - vx_C/c^2) \Longrightarrow \eta = \gamma^{-2}(l/v)$$

小结：在 S' 系观察 A、E 两个事件。

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$	C_1' 读数 $t_A' = 0$	C_2 读数 $\delta = vl/c^2$

事件 E 发生时

C_1 读数 $\eta = \gamma^{-2}(l/v)$	C_1' 读数 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$	C_2 读数：$t_E = l/v$

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow$ $x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察，事件 E 发生时，C_1 的读数不为 l/v，而是 η。如何求 η?

在 S' 系观察，设事件 E 发生时，在 S' 系中有一个钟 C_1'' 与 C_1 重合

因为 C_1'' 与 C_1' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

故事件 E 发生时，C_1'' 的读数与C_1' 的读数同为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

设 C_1'' 和 C_1 重合为事件 C，则事件 C 在 S 与 S' 的时空坐标为：

$$t_C = \eta, \quad t_C' = t_E' = \gamma^{-1}(l/v), \quad x_C = 0 \quad \text{由} \ \ t_C' = \gamma(t_C - vx_C/c^2) \Longrightarrow \eta = \gamma^{-2}(l/v)$$

小结：在 S' 系观察 A、E 两个事件。

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$	C_1' 读数 $t_A' = 0$	C_2 读数 $\delta = vl/c^2$

事件 E 发生时

C_1 读数 $\eta = \gamma^{-2}(l/v)$	C_1' 读数 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$	C_2 读数：$t_E = l/v$

事件 A 到事件 E 的过程

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow$ $x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察，事件 E 发生时，C_1 的读数不为 l/v，而是 η。如何求 η?

在 S' 系观察，设事件 E 发生时，在 S' 系中有一个钟 C_1'' 与 C_1 重合

因为 C_1'' 与 C_1' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

故事件 E 发生时，C_1'' 的读数与C_1' 的读数同为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

设 C_1'' 和 C_1 重合为事件 C，则事件 C 在 S 与 S' 的时空坐标为：

$$t_C = \eta, \quad t_C' = t_E' = \gamma^{-1}(l/v), \quad x_C = 0 \quad \text{由} \ t_C' = \gamma(t_C - vx_C/c^2) \Longrightarrow \eta = \gamma^{-2}(l/v)$$

小结：在 S' 系观察 A、E 两个事件。

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$	C_1' 读数 $t_A' = 0$	C_2 读数 $\delta = vl/c^2$

事件 E 发生时

C_1 读数 $\eta = \gamma^{-2}(l/v)$	C_1' 读数 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$	C_2 读数：$t_E = l/v$

事件 A 到事件 E 的过程

C_1 走了 $\eta = \gamma^{-2}(l/v)$

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow$ $x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察，事件 E 发生时，C_1 的读数不为 l/v，而是 η。如何求 η?

在 S' 系观察，设事件 E 发生时，在 S' 系中有一个钟 C_1'' 与 C_1 重合

因为 C_1'' 与 C_1' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

故事件 E 发生时，C_1'' 的读数与C_1' 的读数同为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

设 C_1'' 和 C_1 重合为事件 C，则事件 C 在 S 与 S' 的时空坐标为：

$$t_C = \eta, \quad t_C' = t_E' = \gamma^{-1}(l/v), \quad x_C = 0 \quad \text{由} \ t_C' = \gamma(t_C - vx_C/c^2) \Longrightarrow \eta = \gamma^{-2}(l/v)$$

小结：在 S' 系观察 A、E 两个事件。

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$　　C_1' 读数 $t_A' = 0$　　C_2 读数 $\delta = vl/c^2$

事件 E 发生时

C_1 读数 $\eta = \gamma^{-2}(l/v)$　　C_1' 读数 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$　　C_2 读数：$t_E = l/v$

事件 A 到事件 E 的过程

C_1 走了 $\eta = \gamma^{-2}(l/v)$　　C_1' 走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow$ $x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察，事件 E 发生时，C_1 的读数不为 l/v，而是 η。如何求 η?

在 S' 系观察，设事件 E 发生时，在 S' 系中有一个钟 C_1'' 与 C_1 重合

因为 C_1'' 与 C_1' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

故事件 E 发生时，C_1'' 的读数与C_1' 的读数同为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

设 C_1'' 和 C_1 重合为事件 C，则事件 C 在 S 与 S' 的时空坐标为：

$t_C = \eta$，$\quad t_C' = t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$，$\quad x_C = 0$ 由 $t_C' = \gamma(t_C - vx_C/c^2) \Longrightarrow \eta = \gamma^{-2}(l/v)$

小结：在 S' 系观察 A、E 两个事件。

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$	C_1' 读数 $t_A' = 0$	C_2 读数 $\delta = vl/c^2$

事件 E 发生时

C_1 读数 $\eta = \gamma^{-2}(l/v)$	C_1' 读数 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$	C_2 读数：$t_E = l/v$

事件 A 到事件 E 的过程

C_1 走了 $\eta = \gamma^{-2}(l/v)$	C_1' 走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$	C_2 走了 $\gamma^{-2}(l/v)$

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow \ x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察，事件 E 发生时，C_1 的读数不为 l/v，而是 η。如何求 η?

在 S' 系观察，设事件 E 发生时，在 S' 系中有一个钟 C_1'' 与 C_1 重合

因为 C_1'' 与 C_1' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

故事件 E 发生时，C_1'' 的读数与C_1' 的读数同为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

设 C_1'' 和 C_1 重合为事件 C，则事件 C 在 S 与 S' 的时空坐标为：

$$t_C = \eta, \quad t_C' = t_E' = \gamma^{-1}(l/v), \quad x_C = 0 \quad 由 \ t_C' = \gamma(t_C - vx_C/c^2) \ \Longrightarrow \ \eta = \gamma^{-2}(l/v)$$

小结：在 S' 系观察 A、E 两个事件。

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$	C_1' 读数 $t_A' = 0$	C_2 读数 $\delta = vl/c^2$

事件 E 发生时

C_1 读数 $\eta = \gamma^{-2}(l/v)$	C_1' 读数 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$	C_2 读数：$t_E = l/v$

事件 A 到事件 E 的过程

C_1 走了 $\eta = \gamma^{-2}(l/v)$	C_1' 走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$	C_2 走了 $\gamma^{-2}(l/v)$

在 S' 系观察，C_1' 走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$，

在 S' 系观察 A、E 两个事件。C_1' 和 C_1 重合为事件 A，C_1' 和 C_2 重合为事件 E

在 S' 系观察，C_1' 读数为 0 时，即事件 A 发生时，C_2 的读数不为 0，而是 $\delta = vl/c^2$

前已得，事件 E 在 S 与 S' 的时空坐标为：$x_E = l$，$t_E = l/v$，$\Longrightarrow$ $x_E' = 0$，$t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

故，事件 E 发生时，C_2 的读数为 $t_E = l/v$，C_1' 的读数为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

在 S' 系观察，事件 E 发生时，C_1 的读数不为 l/v，而是 η。如何求 η?

在 S' 系观察，设事件 E 发生时，在 S' 系中有一个钟 C_1'' 与 C_1 重合

因为 C_1'' 与 C_1' 都是 S' 系的钟，在 S' 系是校准的

故事件 E 发生时，C_1'' 的读数与C_1' 的读数同为 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$

设 C_1'' 和 C_1 重合为事件 C，则事件 C 在 S 与 S' 的时空坐标为：

$$t_C = \eta, \quad t_C' = t_E' = \gamma^{-1}(l/v), \quad x_C = 0 \quad \text{由} \ \ t_C' = \gamma(t_C - v x_C/c^2) \ \Longrightarrow \ \eta = \gamma^{-2}(l/v)$$

小结：在 S' 系观察 A、E 两个事件。

事件 A 发生时

C_1 读数 $t_A = 0$ $\qquad$ C_1' 读数 $t_A' = 0$ $\qquad$ C_2 读数 $\delta = vl/c^2$

事件 E 发生时

C_1 读数 $\eta = \gamma^{-2}(l/v)$ $\qquad$ C_1' 读数 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$ $\qquad$ C_2 读数：$t_E = l/v$

事件 A 到事件 E 的过程

C_1 走了 $\eta = \gamma^{-2}(l/v)$ $\qquad$ C_1' 走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$ $\qquad$ C_2 走了 $\gamma^{-2}(l/v)$

在 S' 系观察，C_1' 走了 $t_E' = \gamma^{-1}(l/v)$，而 C_1 与 C_2 都只走了 $\gamma^{-2}(l/v)$，S 系的钟变慢了

四、因果律和极限速度

四、因果律和极限速度

设在 S 系先后发生两个事件，其时空坐标分别为：(x_1, t_1)，(x_2, t_2)。

四、因果律和极限速度

设在 S 系先后发生两个事件，其时空坐标分别为：(x_1, t_1)，(x_2, t_2)。

在 S' 系，这两个事件的时空坐标分别为：(x_1', t_1')，(x_2', t_2')。

四、因果律和极限速度

设在 S 系先后发生两个事件，其时空坐标分别为：(x_1, t_1)，(x_2, t_2)。

在 S' 系，这两个事件的时空坐标分别为：(x_1', t_1')，(x_2', t_2')。

由洛仑兹变换：

$$t_2' - t_1' = \gamma\big[(t_2 - t_1) - \beta(x_2 - x_1)/c\big], \qquad \beta = v/c$$

四、因果律和极限速度

设在 S 系先后发生两个事件，其时空坐标分别为：(x_1, t_1)，(x_2, t_2)。

在 S' 系，这两个事件的时空坐标分别为：(x_1', t_1')，(x_2', t_2')。

由洛仑兹变换：

$t_2' - t_1' = \gamma\left[(t_2 - t_1) - \beta(x_2 - x_1)/c\right], \qquad \beta = v/c$

若在 S 系，$t_2 > t_1$，即事件 1 早于事件 2，当两惯性系的相对速度满足下式时

$(t_2 - t_1) - \beta(x_2 - x_1)/c < 0$

四、因果律和极限速度

设在 S 系先后发生两个事件，其时空坐标分别为：(x_1, t_1), (x_2, t_2)。

在 S' 系，这两个事件的时空坐标分别为：(x_1', t_1'), (x_2', t_2')。

由洛仑兹变换：

$$t_2' - t_1' = \gamma\left[(t_2 - t_1) - \beta(x_2 - x_1)/c\right], \qquad \beta = v/c$$

若在 S 系，$t_2 > t_1$，即事件 1 早于事件 2，当两惯性系的相对速度满足下式时

$$(t_2 - t_1) - \beta(x_2 - x_1)/c < 0$$

则在 S' 系，$t_2' < t_1'$，即事件 2 早于事件 1。

对无因果关系的两个事件，先后次序是相对的，可以对调。

四、因果律和极限速度

设在 S 系先后发生两个事件，其时空坐标分别为：(x_1, t_1)，(x_2, t_2)。

在 S' 系，这两个事件的时空坐标分别为：(x_1', t_1')，(x_2', t_2')。

由洛仑兹变换：

$$t_2' - t_1' = \gamma\big[(t_2 - t_1) - \beta(x_2 - x_1)/c\big], \qquad \beta = v/c$$

若在 S 系，$t_2 > t_1$，即事件 1 早于事件 2，当两惯性系的相对速度满足下式时

$$(t_2 - t_1) - \beta(x_2 - x_1)/c < 0$$

则在 S' 系，$t_2' < t_1'$，即事件 2 早于事件 1。

对无因果关系的两个事件，先后次序是相对的，可以对调。

但是，如果事件 1 导致事件 2，事件 1 为原因，事件 2 为结果，

先因后果，这种因果（先后）关系应该是绝对的。

四、因果律和极限速度

设在 S 系先后发生两个事件，其时空坐标分别为：(x_1, t_1)，(x_2, t_2)。

在 S' 系，这两个事件的时空坐标分别为：(x_1', t_1')，(x_2', t_2')。

由洛仑兹变换：

$$t_2' - t_1' = \gamma\big[(t_2 - t_1) - \beta(x_2 - x_1)/c\big], \qquad \beta = v/c$$

若在 S 系，$t_2 > t_1$，即事件 1 早于事件 2，当两惯性系的相对速度满足下式时

$$(t_2 - t_1) - \beta(x_2 - x_1)/c < 0$$

则在 S' 系，$t_2' < t_1'$，即事件 2 早于事件 1。

对无因果关系的两个事件，先后次序是相对的，可以对调。

但是，如果事件 1 导致事件 2，事件 1 为原因，事件 2 为结果，

先因后果，这种因果（先后）关系应该是绝对的。

是否能找到一个惯性系，破坏这种绝对的先后关系呢？

四、因果律和极限速度

设在 S 系先后发生两个事件，其时空坐标分别为：(x_1, t_1), (x_2, t_2)。

在 S' 系，这两个事件的时空坐标分别为：(x_1', t_1'), (x_2', t_2')。

由洛仑兹变换：

$$t_2' - t_1' = \gamma\left[(t_2 - t_1) - \beta(x_2 - x_1)/c\right], \qquad \beta = v/c$$

若在 S 系，$t_2 > t_1$，即事件 1 早于事件 2，当两惯性系的相对速度满足下式时

$$(t_2 - t_1) - \beta(x_2 - x_1)/c < 0$$

则在 S' 系，$t_2' < t_1'$，即事件 2 早于事件 1。

对无因果关系的两个事件，先后次序是相对的，可以对调。

但是，如果事件 1 导致事件 2，事件 1 为原因，事件 2 为结果，

先因后果，这种因果（先后）关系应该是绝对的。

是否能找到一个惯性系，破坏这种绝对的先后关系呢？

也就是说，在相对论中，事件的先后次序的相对性是否会破坏因果律？

四、因果律和极限速度

设在 S 系先后发生两个事件，其时空坐标分别为：(x_1, t_1), (x_2, t_2)。

在 S' 系，这两个事件的时空坐标分别为：(x_1', t_1'), (x_2', t_2')。

由洛仑兹变换：

$$t_2' - t_1' = \gamma\big[(t_2 - t_1) - \beta(x_2 - x_1)/c\big], \qquad \beta = v/c$$

若在 S 系，$t_2 > t_1$，即事件 1 早于事件 2，当两惯性系的相对速度满足下式时

$$(t_2 - t_1) - \beta(x_2 - x_1)/c < 0$$

则在 S' 系，$t_2' < t_1'$，即事件 2 早于事件 1。

对无因果关系的两个事件，先后次序是相对的，可以对调。

但是，如果事件 1 导致事件 2，事件 1 为原因，事件 2 为结果，

先因后果，这种因果（先后）关系应该是绝对的。

是否能找到一个惯性系，破坏这种绝对的先后关系呢？

也就是说，在相对论中，事件的先后次序的相对性是否会破坏因果律？

爱因斯坦极限速度原理：任何物体、信号的运动速度都不会超过真空光速 c。

四、因果律和极限速度

设在 S 系先后发生两个事件，其时空坐标分别为：(x_1, t_1), (x_2, t_2)。

在 S' 系，这两个事件的时空坐标分别为：(x_1', t_1'), (x_2', t_2')。

由洛仑兹变换：

$$t_2' - t_1' = \gamma\left[(t_2 - t_1) - \beta(x_2 - x_1)/c\right], \qquad \beta = v/c$$

若在 S 系，$t_2 > t_1$，即事件 1 早于事件 2，当两惯性系的相对速度满足下式时

$$(t_2 - t_1) - \beta(x_2 - x_1)/c < 0$$

则在 S' 系，$t_2' < t_1'$，即事件 2 早于事件 1。

对无因果关系的两个事件，先后次序是相对的，可以对调。

但是，如果事件 1 导致事件 2，事件 1 为原因，事件 2 为结果，

先因后果，这种因果（先后）关系应该是绝对的。

是否能找到一个惯性系，破坏这种绝对的先后关系呢？

也就是说，在相对论中，事件的先后次序的相对性是否会破坏因果律？

爱因斯坦极限速度原理：任何物体、信号的运动速度都不会超过真空光速 c。

极限速度原理保证了在相对论中，因果律不会被破坏

例如，原因事件和结果事件分别发生于：(x_1, t_1) 与 (x_2, t_2)，$t_1 < t_2$
为保证在 S' 系中 $t'_1 < t'_2$ (满足因果律)，须有

例如，原因事件和结果事件分别发生于：(x_1, t_1) 与 (x_2, t_2)，$t_1 < t_2$

为保证在 S' 系中 $t_1' < t_2'$ (满足因果律)，须有

$$\left[(t_2 - t_1) - \beta(x_2 - x_1)/c\right] > 0, \quad \Longrightarrow \quad \frac{(x_2 - x_1)}{(t_2 - t_1)} < c^2/v$$

例如，原因事件和结果事件分别发生于：(x_1, t_1) 与 (x_2, t_2)，$t_1 < t_2$

为保证在 S' 系中 $t_1' < t_2'$ (满足因果律)，须有

$$\left[(t_2 - t_1) - \beta(x_2 - x_1)/c\right] > 0, \quad \Longrightarrow \quad \frac{(x_2 - x_1)}{(t_2 - t_1)} < c^2/v$$

上式左端为具有因果关系的两事件的信号传播速度 u，从而上式为：$uv < c^2$

例如，原因事件和结果事件分别发生于：(x_1, t_1) 与 (x_2, t_2)，$t_1 < t_2$

为保证在 S' 系中 $t_1' < t_2'$ (满足因果律)，须有

$$\left[(t_2 - t_1) - \beta(x_2 - x_1)/c\right] > 0, \quad \Longrightarrow \quad \frac{(x_2 - x_1)}{(t_2 - t_1)} < c^2/v$$

上式左端为具有因果关系的两事件的信号传播速度 u，从而上式为：$uv < c^2$

极限速度原理保证任何物体、信号的传播速度都不会超过真空光速

例如，原因事件和结果事件分别发生于：(x_1, t_1) 与 (x_2, t_2)，$t_1 < t_2$

为保证在 S' 系中 $t'_1 < t'_2$ (满足因果律)，须有

$$\left[(t_2 - t_1) - \beta(x_2 - x_1)/c\right] > 0, \quad \Longrightarrow \quad \frac{(x_2 - x_1)}{(t_2 - t_1)} < c^2/v$$

上式左端为具有因果关系的两事件的信号传播速度 u，从而上式为：$uv < c^2$

极限速度原理保证任何物体、信号的传播速度都不会超过真空光速

故总有：$uv < c^2$

例如，原因事件和结果事件分别发生于：(x_1, t_1) 与 (x_2, t_2)，$t_1 < t_2$

为保证在 S' 系中 $t_1' < t_2'$ (满足因果律)，须有

$$\left[(t_2 - t_1) - \beta(x_2 - x_1)/c\right] > 0, \quad \Longrightarrow \quad \frac{(x_2 - x_1)}{(t_2 - t_1)} < c^2/v$$

上式左端为具有因果关系的两事件的信号传播速度 u，从而上式为：$uv < c^2$

极限速度原理保证任何物体、信号的传播速度都不会超过真空光速

故总有：$uv < c^2$

即，对任意惯性系，有因果关系的事件之先后次序不会被颠倒，不破坏因果律

例如，原因事件和结果事件分别发生于：(x_1, t_1) 与 (x_2, t_2)，$t_1 < t_2$

为保证在 S' 系中 $t_1' < t_2'$ (满足因果律)，须有

$$\left[(t_2 - t_1) - \beta(x_2 - x_1)/c\right] > 0, \quad \Longrightarrow \quad \frac{(x_2 - x_1)}{(t_2 - t_1)} < c^2/v$$

上式左端为具有因果关系的两事件的信号传播速度 u，从而上式为：$uv < c^2$

极限速度原理保证任何物体、信号的传播速度都不会超过真空光速

故总有：$uv < c^2$

即，对任意惯性系，有因果关系的事件之先后次序不会被颠倒，不破坏因果律

如果两件事件满足：$u = \dfrac{(x_2 - x_1)}{(t_2 - t_1)} > c$，使得 $uv < c^2$ 不成立。

例如，原因事件和结果事件分别发生于：(x_1, t_1) 与 (x_2, t_2)，$t_1 < t_2$

为保证在 S' 系中 $t_1' < t_2'$ (满足因果律)，须有

$$\left[(t_2 - t_1) - \beta(x_2 - x_1)/c\right] > 0, \quad \Longrightarrow \quad \frac{(x_2 - x_1)}{(t_2 - t_1)} < c^2/v$$

上式左端为具有因果关系的两事件的信号传播速度 u，从而上式为：$uv < c^2$

极限速度原理保证任何物体、信号的传播速度都不会超过真空光速

故总有：$uv < c^2$

即，对任意惯性系，有因果关系的事件之先后次序不会被颠倒，不破坏因果律

如果两件事件满足：$u = \dfrac{(x_2 - x_1)}{(t_2 - t_1)} > c$，使得 $uv < c^2$ 不成立。

对这样两个件事件，其次序在其他惯性系中可以被颠倒。

例如，原因事件和结果事件分别发生于：(x_1, t_1) 与 (x_2, t_2)，$t_1 < t_2$

为保证在 S' 系中 $t'_1 < t'_2$ (满足因果律)，须有

$$\left[(t_2 - t_1) - \beta(x_2 - x_1)/c\right] > 0, \quad \Longrightarrow \quad \frac{(x_2 - x_1)}{(t_2 - t_1)} < c^2/v$$

上式左端为具有因果关系的两事件的信号传播速度 u，从而上式为：$uv < c^2$

极限速度原理保证任何物体、信号的传播速度都不会超过真空光速

故总有：$uv < c^2$

即，对任意惯性系，有因果关系的事件之先后次序不会被颠倒，不破坏因果律

如果两件事件满足：$u = \dfrac{(x_2 - x_1)}{(t_2 - t_1)} > c$，使得 $uv < c^2$ 不成立。

对这样两个件事件，其次序在其他惯性系中可以被颠倒。

但由于：$u = \dfrac{(x_2 - x_1)}{(t_2 - t_1)} > c$，而信号传播不会大于光速

例如，原因事件和结果事件分别发生于：(x_1, t_1) 与 (x_2, t_2)，$t_1 < t_2$

为保证在 S' 系中 $t_1' < t_2'$ (满足因果律)，须有

$$\left[(t_2 - t_1) - \beta(x_2 - x_1)/c\right] > 0, \quad \Longrightarrow \quad \frac{(x_2 - x_1)}{(t_2 - t_1)} < c^2/v$$

上式左端为具有因果关系的两事件的信号传播速度 u，从而上式为：$uv < c^2$

极限速度原理保证任何物体、信号的传播速度都不会超过真空光速

故总有：$uv < c^2$

即，对任意惯性系，有因果关系的事件之先后次序不会被颠倒，不破坏因果律

如果两件事件满足：$u = \dfrac{(x_2 - x_1)}{(t_2 - t_1)} > c$，使得 $uv < c^2$ 不成立。

对这样两个件事件，其次序在其他惯性系中可以被颠倒。

但由于：$u = \dfrac{(x_2 - x_1)}{(t_2 - t_1)} > c$，而信号传播不会大于光速

故这两个件事件不具有因果关系，其次序被颠倒并不破坏因果律。

五、间隔的性质

五、间隔的性质

在 S 系中两个事件 A、 B 的时空坐标：(x_1, y_1, z_1, t_1)，(x_2, y_2, z_2, t_2)

定义间隔 $(\Delta s)^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2$

五、间隔的性质

在 S 系中两个事件 A、B 的时空坐标：(x_1, y_1, z_1, t_1)，(x_2, y_2, z_2, t_2)

定义间隔 $(\Delta s)^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2$

由洛仑兹变换可以证明间隔不会因为惯性系的改变而改变。

五、间隔的性质

在 S 系中两个事件 A、B 的时空坐标：(x_1, y_1, z_1, t_1)，(x_2, y_2, z_2, t_2)

定义间隔 $(\Delta s)^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2$

由洛仑兹变换可以证明间隔不会因为惯性系的改变而改变。

因此，可用间隔 $(\Delta s)^2$ 来描述两件事件的关系。

五、间隔的性质

在 S 系中两个事件 A、B 的时空坐标：(x_1, y_1, z_1, t_1)，(x_2, y_2, z_2, t_2)

定义间隔 $(\Delta s)^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2$

由洛仑兹变换可以证明间隔不会因为惯性系的改变而改变。

因此，可用间隔 $(\Delta s)^2$ 来描述两件事件的关系。

$(\Delta s)^2 = 0$ 类光间隔　　$(\Delta s)^2 > 0$ 类时间隔　　$(\Delta s)^2 < 0$ 类空间隔

五、间隔的性质

在 S 系中两个事件 A、B 的时空坐标：(x_1, y_1, z_1, t_1)，(x_2, y_2, z_2, t_2)

定义间隔 $(\Delta s)^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2$

由洛仑兹变换可以证明间隔不会因为惯性系的改变而改变。

因此，可用间隔 $(\Delta s)^2$ 来描述两件事件的关系。

$(\Delta s)^2 = 0$ 类光间隔　　$(\Delta s)^2 > 0$ 类时间隔　　$(\Delta s)^2 < 0$ 类空间隔

下讨论这三种间隔的性质（为简单起见，令 $y_1 = y_2$，$z_1 = z_2$）

五、间隔的性质

在 S 系中两个事件 A、B 的时空坐标：(x_1, y_1, z_1, t_1)，(x_2, y_2, z_2, t_2)

定义间隔 $(\Delta s)^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2$

由洛仑兹变换可以证明间隔不会因为惯性系的改变而改变。

因此，可用间隔 $(\Delta s)^2$ 来描述两件事件的关系。

$(\Delta s)^2 = 0$　类光间隔　　$(\Delta s)^2 > 0$　类时间隔　　$(\Delta s)^2 < 0$　类空间隔

下讨论这三种间隔的性质（为简单起见，令 $y_1 = y_2$，$z_1 = z_2$）

类空间隔

五、间隔的性质

在 S 系中两个事件 A、B 的时空坐标：(x_1, y_1, z_1, t_1)，(x_2, y_2, z_2, t_2)

定义间隔 $(\Delta s)^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2$

由洛仑兹变换可以证明间隔不会因为惯性系的改变而改变。

因此，可用间隔 $(\Delta s)^2$ 来描述两件事件的关系。

$(\Delta s)^2 = 0$　类光间隔　　$(\Delta s)^2 > 0$　类时间隔　　$(\Delta s)^2 < 0$　类空间隔

下讨论这三种间隔的性质（为简单起见，令 $y_1 = y_2$，$z_1 = z_2$）

类空间隔

$$\Delta l = \Delta x,\ (\Delta s)^2 < 0 \quad \Longrightarrow \quad \left|\frac{\Delta l}{\Delta t}\right| = \left|\frac{\Delta x}{\Delta t}\right| > c$$

五、间隔的性质

在 S 系中两个事件 A、 B 的时空坐标：(x_1, y_1, z_1, t_1)，(x_2, y_2, z_2, t_2)

定义间隔 $(\Delta s)^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2$

由洛仑兹变换可以证明间隔不会因为惯性系的改变而改变。

因此，可用间隔 $(\Delta s)^2$ 来描述两件事件的关系。

$(\Delta s)^2 = 0$ 类光间隔　　$(\Delta s)^2 > 0$ 类时间隔　　$(\Delta s)^2 < 0$ 类空间隔

下讨论这三种间隔的性质（为简单起见，令 $y_1 = y_2$，$z_1 = z_2$）

类空间隔

$$\Delta l = \Delta x，(\Delta s)^2 < 0 \quad \Longrightarrow \quad \left|\frac{\Delta l}{\Delta t}\right| = \left|\frac{\Delta x}{\Delta t}\right| > c$$

因 c 为极限速度，上式表明两事件不能用任何信号相关联，称为非关联事件

五、间隔的性质

在 S 系中两个事件 A、B 的时空坐标：(x_1, y_1, z_1, t_1)，(x_2, y_2, z_2, t_2)

定义间隔 $(\Delta s)^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2$

由洛仑兹变换可以证明间隔不会因为惯性系的改变而改变。

因此，可用间隔 $(\Delta s)^2$ 来描述两件事件的关系。

$(\Delta s)^2 = 0$ 类光间隔　　$(\Delta s)^2 > 0$ 类时间隔　　$(\Delta s)^2 < 0$ 类空间隔

下讨论这三种间隔的性质（为简单起见，令 $y_1 = y_2$，$z_1 = z_2$）

类空间隔

$$\Delta l = \Delta x,\ (\Delta s)^2 < 0 \quad \Longrightarrow \quad \left|\frac{\Delta l}{\Delta t}\right| = \left|\frac{\Delta x}{\Delta t}\right| > c$$

因 c 为极限速度，上式表明两事件不能用任何信号相关联，称为非关联事件

在 S' 系，$\Delta t' = \gamma(\Delta t - \dfrac{v\,\Delta x}{c^2})$

五、间隔的性质

在 S 系中两个事件 A、B 的时空坐标：(x_1, y_1, z_1, t_1)，(x_2, y_2, z_2, t_2)

定义间隔 $(\Delta s)^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2$

由洛仑兹变换可以证明间隔不会因为惯性系的改变而改变。

因此，可用间隔 $(\Delta s)^2$ 来描述两件事件的关系。

$(\Delta s)^2 = 0$ 类光间隔　　$(\Delta s)^2 > 0$ 类时间隔　　$(\Delta s)^2 < 0$ 类空间隔

下讨论这三种间隔的性质（为简单起见，令 $y_1 = y_2$，$z_1 = z_2$）

类空间隔

$$\Delta l = \Delta x,\ (\Delta s)^2 < 0 \quad \Longrightarrow \quad \left|\frac{\Delta l}{\Delta t}\right| = \left|\frac{\Delta x}{\Delta t}\right| > c$$

因 c 为极限速度，上式表明两事件不能用任何信号相关联，称为非关联事件

在 S' 系，$\Delta t' = \gamma(\Delta t - \dfrac{v\,\Delta x}{c^2})$　两个事件为同时的条件为：$\dfrac{v\,\Delta x}{\Delta t} = c^2$

五、间隔的性质

在 S 系中两个事件 A、B 的时空坐标：(x_1, y_1, z_1, t_1)，(x_2, y_2, z_2, t_2)

定义间隔 $(\Delta s)^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2$

由洛仑兹变换可以证明间隔不会因为惯性系的改变而改变。

因此，可用间隔 $(\Delta s)^2$ 来描述两件事件的关系。

$(\Delta s)^2 = 0$ 类光间隔　　$(\Delta s)^2 > 0$ 类时间隔　　$(\Delta s)^2 < 0$ 类空间隔

下讨论这三种间隔的性质（为简单起见，令 $y_1 = y_2$，$z_1 = z_2$）

类空间隔

$$\Delta l = \Delta x,\ (\Delta s)^2 < 0 \implies \left|\frac{\Delta l}{\Delta t}\right| = \left|\frac{\Delta x}{\Delta t}\right| > c$$

因 c 为极限速度，上式表明两事件不能用任何信号相关联，称为非关联事件

在 S' 系，$\Delta t' = \gamma(\Delta t - \dfrac{v\,\Delta x}{c^2})$ 两个事件为同时的条件为：$\dfrac{v\,\Delta x}{\Delta t} = c^2$

由于 $(\Delta x/\Delta t) > c$，故 $v\,(\Delta x/\Delta t) = c^2$ 存在 $v < c$ 的解

五、间隔的性质

在 S 系中两个事件 A、 B 的时空坐标：(x_1, y_1, z_1, t_1)，(x_2, y_2, z_2, t_2)

定义间隔 $(\Delta s)^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2$

由洛仑兹变换可以证明间隔不会因为惯性系的改变而改变。

因此，可用间隔 $(\Delta s)^2$ 来描述两件事件的关系。

$(\Delta s)^2 = 0$　类光间隔　　$(\Delta s)^2 > 0$　类时间隔　　$(\Delta s)^2 < 0$　类空间隔

下讨论这三种间隔的性质（为简单起见，令 $y_1 = y_2$，$z_1 = z_2$）

类空间隔

$$\Delta l = \Delta x,\ (\Delta s)^2 < 0 \implies \left|\frac{\Delta l}{\Delta t}\right| = \left|\frac{\Delta x}{\Delta t}\right| > c$$

因 c 为极限速度，上式表明两事件不能用任何信号相关联，称为非关联事件

在 S' 系，$\Delta t' = \gamma(\Delta t - \dfrac{v\,\Delta x}{c^2})$　两个事件为同时的条件为：$\dfrac{v\,\Delta x}{\Delta t} = c^2$

由于 $(\Delta x/\Delta t) > c$，故 $v\,(\Delta x/\Delta t) = c^2$ 存在 $v < c$ 的解

可以找到一个惯性系，使得两类空事件为同时发生

五、间隔的性质

在 S 系中两个事件 A、 B 的时空坐标：(x_1, y_1, z_1, t_1)，(x_2, y_2, z_2, t_2)

定义间隔 $(\Delta s)^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2$

由洛仑兹变换可以证明间隔不会因为惯性系的改变而改变。

因此，可用间隔 $(\Delta s)^2$ 来描述两件事件的关系。

$(\Delta s)^2 = 0$ 类光间隔 $(\Delta s)^2 > 0$ 类时间隔 $(\Delta s)^2 < 0$ 类空间隔

下讨论这三种间隔的性质（为简单起见，令 $y_1 = y_2$，$z_1 = z_2$）

类空间隔

$$\Delta l = \Delta x,\ (\Delta s)^2 < 0 \quad \Longrightarrow \quad \left|\frac{\Delta l}{\Delta t}\right| = \left|\frac{\Delta x}{\Delta t}\right| > c$$

因 c 为极限速度，上式表明两事件不能用任何信号相关联，称为非关联事件

在 S' 系，$\Delta t' = \gamma(\Delta t - \dfrac{v\,\Delta x}{c^2})$ 两个事件为同时的条件为：$\dfrac{v\,\Delta x}{\Delta t} = c^2$

由于 $(\Delta x/\Delta t) > c$，故 $v\,(\Delta x/\Delta t) = c^2$ 存在 $v < c$ 的解

可以找到一个惯性系，使得两类空事件为同时发生

同理，可以找到一个惯性系，使得两类空事件次序颠倒

类空间隔

类空间隔

由于：$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v\Delta t), \quad \dfrac{\Delta x}{\Delta t} > c, \quad v < c$

类空间隔

由于：$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v\Delta t), \quad \dfrac{\Delta x}{\Delta t} > c, \quad v < c$

故：$\Delta x' \neq 0 \quad \Longrightarrow$ 找不到惯性系使得两类空事件同地：绝对远离

类空间隔

由于：$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v\Delta t), \quad \dfrac{\Delta x}{\Delta t} > c, \quad v < c$

故：$\Delta x' \neq 0 \quad \Longrightarrow$ 找不到惯性系使得两类空事件同地：绝对远离

类时间隔

类空间隔

由于：$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v\Delta t), \quad \dfrac{\Delta x}{\Delta t} > c, \quad v < c$

故：$\Delta x' \neq 0 \quad \Longrightarrow$ 找不到惯性系使得两类空事件同地：绝对远离

类时间隔

$$(\Delta s)^2 > 0 \quad \Longrightarrow \quad \left|\frac{\Delta l}{\Delta t}\right| = \left|\frac{\Delta x}{\Delta t}\right| < c$$

类空间隔

由于：$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v\Delta t), \quad \dfrac{\Delta x}{\Delta t} > c, \quad v < c$

故：$\Delta x' \neq 0 \quad \Longrightarrow$ 找不到惯性系使得两类空事件同地：绝对远离

类时间隔

$$(\Delta s)^2 > 0 \quad \Longrightarrow \quad \left|\frac{\Delta l}{\Delta t}\right| = \left|\frac{\Delta x}{\Delta t}\right| < c$$

类时事件可以用速度小于 c 的信号相关联，称为关联事件

类空间隔

由于：$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v\Delta t), \quad \dfrac{\Delta x}{\Delta t} > c, \quad v < c$

故：$\Delta x' \neq 0 \quad \Longrightarrow$ 找不到惯性系使得两类空事件同地：绝对远离

类时间隔

$$(\Delta s)^2 > 0 \quad \Longrightarrow \quad \left|\frac{\Delta l}{\Delta t}\right| = \left|\frac{\Delta x}{\Delta t}\right| < c$$

类时事件可以用速度小于 c 的信号相关联，称为关联事件

在 S' 系，$\Delta t' = \gamma(\Delta t - \dfrac{v\,\Delta x}{c^2})$

类空间隔

由于：$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v\Delta t), \quad \dfrac{\Delta x}{\Delta t} > c, \quad v < c$

故：$\Delta x' \neq 0 \quad \Longrightarrow$ 找不到惯性系使得两类空事件同地：绝对远离

类时间隔

$$(\Delta s)^2 > 0 \quad \Longrightarrow \quad \left|\frac{\Delta l}{\Delta t}\right| = \left|\frac{\Delta x}{\Delta t}\right| < c$$

类时事件可以用速度小于 c 的信号相关联，称为关联事件

在 S' 系，$\Delta t' = \gamma(\Delta t - \dfrac{v\,\Delta x}{c^2})$ 两个事件为同时的条件为：$\dfrac{v\,\Delta x}{\Delta t} = c^2$

类空间隔

由于：$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v\Delta t)$, $\quad \dfrac{\Delta x}{\Delta t} > c, \quad v < c$

故：$\Delta x' \neq 0 \quad \Longrightarrow$ 找不到惯性系使得两类空事件同地：绝对远离

类时间隔

$$(\Delta s)^2 > 0 \quad \Longrightarrow \quad \left|\frac{\Delta l}{\Delta t}\right| = \left|\frac{\Delta x}{\Delta t}\right| < c$$

类时事件可以用速度小于 c 的信号相关联，称为关联事件

在 S' 系，$\Delta t' = \gamma(\Delta t - \dfrac{v\,\Delta x}{c^2})$ 两个事件为同时的条件为：$\dfrac{v\,\Delta x}{\Delta t} = c^2$

不可能找到一个速度小于 c 的惯性系，使得两类时事件为同时发生，

类空间隔

由于：$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v\Delta t), \quad \dfrac{\Delta x}{\Delta t} > c, \quad v < c$

故：$\Delta x' \neq 0 \quad \Longrightarrow$ 找不到惯性系使得两类空事件同地：绝对远离

类时间隔

$$(\Delta s)^2 > 0 \quad \Longrightarrow \quad \left|\frac{\Delta l}{\Delta t}\right| = \left|\frac{\Delta x}{\Delta t}\right| < c$$

类时事件可以用速度小于 c 的信号相关联，称为关联事件

在 S' 系，$\Delta t' = \gamma(\Delta t - \dfrac{v\,\Delta x}{c^2})$ 两个事件为同时的条件为：$\dfrac{v\,\Delta x}{\Delta t} = c^2$

不可能找到一个速度小于 c 的惯性系，使得两类时事件为同时发生，更不可能使时序颠倒，两类时事件的时序是绝对的

类空间隔

由于：$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v\Delta t), \quad \dfrac{\Delta x}{\Delta t} > c, \quad v < c$

故：$\Delta x' \neq 0 \quad \Longrightarrow$ 找不到惯性系使得两类空事件同地：绝对远离

类时间隔

$$(\Delta s)^2 > 0 \quad \Longrightarrow \quad \left|\frac{\Delta l}{\Delta t}\right| = \left|\frac{\Delta x}{\Delta t}\right| < c$$

类时事件可以用速度小于 c 的信号相关联，称为关联事件

在 S' 系，$\Delta t' = \gamma(\Delta t - \dfrac{v\,\Delta x}{c^2})$ 两个事件为同时的条件为：$\dfrac{v\,\Delta x}{\Delta t} = c^2$

不可能找到一个速度小于 c 的惯性系，使得两类时事件为同时发生，

更不可能使时序颠倒，两类时事件的时序是绝对的

由于：$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v\Delta t), \quad \dfrac{\Delta x}{\Delta t} < c$

类空间隔

由于：$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v\Delta t)$, $\quad \dfrac{\Delta x}{\Delta t} > c, \quad v < c$

故：$\Delta x' \neq 0 \quad \Longrightarrow$ 找不到惯性系使得两类空事件同地：绝对远离

类时间隔

$$(\Delta s)^2 > 0 \quad \Longrightarrow \quad \left|\frac{\Delta l}{\Delta t}\right| = \left|\frac{\Delta x}{\Delta t}\right| < c$$

类时事件可以用速度小于 c 的信号相关联，称为关联事件

在 S' 系，$\Delta t' = \gamma(\Delta t - \dfrac{v\,\Delta x}{c^2})$ 两个事件为同时的条件为：$\dfrac{v\,\Delta x}{\Delta t} = c^2$

不可能找到一个速度小于 c 的惯性系，使得两类时事件为同时发生，

更不可能使时序颠倒，两类时事件的时序是绝对的

由于：$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v\Delta t)$, $\quad \dfrac{\Delta x}{\Delta t} < c$

故可以找到一个惯性系使得两类时事件同地

类空间隔

由于：$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v\Delta t), \quad \dfrac{\Delta x}{\Delta t} > c, \quad v < c$

故：$\Delta x' \neq 0 \quad \Longrightarrow$ 找不到惯性系使得两类空事件同地：绝对远离

类时间隔

$$(\Delta s)^2 > 0 \quad \Longrightarrow \quad \left|\frac{\Delta l}{\Delta t}\right| = \left|\frac{\Delta x}{\Delta t}\right| < c$$

类时事件可以用速度小于 c 的信号相关联，称为关联事件

在 S' 系，$\Delta t' = \gamma(\Delta t - \dfrac{v\,\Delta x}{c^2})$ 两个事件为同时的条件为：$\dfrac{v\,\Delta x}{\Delta t} = c^2$

不可能找到一个速度小于 c 的惯性系，使得两类时事件为同时发生，

更不可能使时序颠倒，两类时事件的时序是绝对的

由于：$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v\Delta t), \quad \dfrac{\Delta x}{\Delta t} < c$

故可以找到一个惯性系使得两类时事件同地

类光间隔

类空间隔

由于：$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v\Delta t)$, $\quad \dfrac{\Delta x}{\Delta t} > c, \quad v < c$

故：$\Delta x' \neq 0 \quad \Longrightarrow$ 找不到惯性系使得两类空事件同地：绝对远离

类时间隔

$$(\Delta s)^2 > 0 \quad \Longrightarrow \quad \left|\frac{\Delta l}{\Delta t}\right| = \left|\frac{\Delta x}{\Delta t}\right| < c$$

类时事件可以用速度小于 c 的信号相关联，称为关联事件

在 S' 系，$\Delta t' = \gamma(\Delta t - \dfrac{v\,\Delta x}{c^2})$ 两个事件为同时的条件为：$\dfrac{v\,\Delta x}{\Delta t} = c^2$

不可能找到一个速度小于 c 的惯性系，使得两类时事件为同时发生，

更不可能使时序颠倒，两类时事件的时序是绝对的

由于：$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v\Delta t)$, $\quad \dfrac{\Delta x}{\Delta t} < c$

故可以找到一个惯性系使得两类时事件同地

类光间隔

$$(\Delta s)^2 = 0 \quad \Longrightarrow \quad \left|\frac{\Delta l}{\Delta t}\right| = c$$

类空间隔

由于：$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v\Delta t), \quad \dfrac{\Delta x}{\Delta t} > c, \quad v < c$

故：$\Delta x' \neq 0 \quad \Longrightarrow$ 找不到惯性系使得两类空事件同地：绝对远离

类时间隔

$$(\Delta s)^2 > 0 \quad \Longrightarrow \quad \left|\frac{\Delta l}{\Delta t}\right| = \left|\frac{\Delta x}{\Delta t}\right| < c$$

类时事件可以用速度小于 c 的信号相关联，称为关联事件

在 S' 系，$\Delta t' = \gamma(\Delta t - \dfrac{v\,\Delta x}{c^2})$ 两个事件为同时的条件为：$\dfrac{v\,\Delta x}{\Delta t} = c^2$

不可能找到一个速度小于 c 的惯性系，使得两类时事件为同时发生，

更不可能使时序颠倒，两类时事件的时序是绝对的

由于：$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v\Delta t), \quad \dfrac{\Delta x}{\Delta t} < c$

故可以找到一个惯性系使得两类时事件同地

类光间隔

$$(\Delta s)^2 = 0 \quad \Longrightarrow \quad \left|\frac{\Delta l}{\Delta t}\right| = c$$

两类光事件的时序也是绝对的，可以找到一个惯性系使得两类光事件同地

六、速度变换公式

六、速度变换公式

Lorentz 变换：

$$
\begin{aligned}
x' &= \gamma(x - vt)\\
y' &= y\\
z' &= z\\
t' &= \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right),
\end{aligned}
$$

六、速度变换公式

Lorentz 变换：

$$
\begin{aligned}
x' &= \gamma(x - vt) \\
y' &= y \\
z' &= z \\
t' &= \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right), \qquad\qquad \gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}
\end{aligned}
$$

六、速度变换公式

Lorentz 变换：

$$x' = \gamma(x - vt)$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$
$$t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right), \qquad \gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$$

在 S 系的速度：$u_x = \dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}, \quad u_y = \dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}, \quad u_z = \dfrac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}$

$$x' = \gamma(x - vt) \qquad \Longrightarrow \quad \mathrm{d}x' = \gamma(\mathrm{d}x - v\mathrm{d}t)$$

六、速度变换公式

Lorentz 变换：
$$x' = \gamma(x - vt)$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$
$$t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right), \qquad \gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$$

在 S 系的速度：$u_x = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}, \quad u_y = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}, \quad u_z = \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}$

$$x' = \gamma(x - vt) \quad \Longrightarrow \quad \mathrm{d}x' = \gamma(\mathrm{d}x - v\mathrm{d}t)$$
$$t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right) \quad \Longrightarrow \quad \mathrm{d}t' = \gamma\left(\mathrm{d}t - \frac{v}{c^2}\mathrm{d}x\right)$$

六、速度变换公式

Lorentz 变换：

$$x' = \gamma(x - vt)$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$
$$t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right), \qquad \gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$$

在 S 系的速度： $u_x = \dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}, \quad u_y = \dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}, \quad u_z = \dfrac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}$

$$\begin{aligned} x' &= \gamma(x - vt) &\Longrightarrow\quad \mathrm{d}x' &= \gamma(\mathrm{d}x - v\mathrm{d}t) \\ t' &= \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right) &\Longrightarrow\quad \mathrm{d}t' &= \gamma\left(\mathrm{d}t - \frac{v}{c^2}\mathrm{d}x\right) \end{aligned} \quad\Longrightarrow\quad u'_x = \frac{\mathrm{d}x'}{\mathrm{d}t'} = \frac{u_x - v}{1 - \dfrac{vu_x}{c^2}}$$

六、速度变换公式

Lorentz 变换：
$$x' = \gamma(x - vt)$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$
$$t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right), \qquad \gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$$

在 S 系的速度：$u_x = \dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}, \quad u_y = \dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}, \quad u_z = \dfrac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}$

$$x' = \gamma(x - vt) \quad \Longrightarrow \quad \mathrm{d}x' = \gamma(\mathrm{d}x - v\mathrm{d}t)$$
$$t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right) \quad \Longrightarrow \quad \mathrm{d}t' = \gamma\left(\mathrm{d}t - \frac{v}{c^2}\mathrm{d}x\right)$$
$$\Longrightarrow \quad u'_x = \frac{\mathrm{d}x'}{\mathrm{d}t'} = \frac{u_x - v}{1 - \dfrac{vu_x}{c^2}}$$

$$\mathrm{d}y' = \mathrm{d}y$$

六、速度变换公式

Lorentz 变换：

$$x' = \gamma(x - vt)$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$
$$t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right), \qquad \gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$$

在 S 系的速度：$u_x = \dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}, \quad u_y = \dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}, \quad u_z = \dfrac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}$

$$\left.\begin{aligned} x' = \gamma(x - vt) &\implies \mathrm{d}x' = \gamma(\mathrm{d}x - v\mathrm{d}t) \\ t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right) &\implies \mathrm{d}t' = \gamma\left(\mathrm{d}t - \frac{v}{c^2}\mathrm{d}x\right) \end{aligned}\right. \implies u'_x = \frac{\mathrm{d}x'}{\mathrm{d}t'} = \frac{u_x - v}{1 - \dfrac{vu_x}{c^2}}$$

$$\mathrm{d}y' = \mathrm{d}y \implies u'_y = \frac{\mathrm{d}y'}{\mathrm{d}t'} = \frac{\gamma u_y}{1 - \dfrac{vu_x}{c^2}}$$

六、速度变换公式

Lorentz 变换：

$$x' = \gamma(x - vt)$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$
$$t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right), \qquad \gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$$

在 S 系的速度： $u_x = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}, \quad u_y = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}, \quad u_z = \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}$

$$x' = \gamma(x - vt) \implies \mathrm{d}x' = \gamma(\mathrm{d}x - v\mathrm{d}t)$$
$$t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right) \implies \mathrm{d}t' = \gamma\left(\mathrm{d}t - \frac{v}{c^2}\mathrm{d}x\right)$$
$$\implies u'_x = \frac{\mathrm{d}x'}{\mathrm{d}t'} = \frac{u_x - v}{1 - \frac{vu_x}{c^2}}$$

$$\mathrm{d}y' = \mathrm{d}y \qquad \implies u'_y = \frac{\mathrm{d}y'}{\mathrm{d}t'} = \frac{\gamma u_y}{1 - \frac{vu_x}{c^2}}$$

$$\mathrm{d}z' = \mathrm{d}z$$

六、速度变换公式

Lorentz 变换：

$$x' = \gamma(x - vt)$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$
$$t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right), \qquad \gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$$

在 S 系的速度：$u_x = \dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}, \quad u_y = \dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}, \quad u_z = \dfrac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}$

$$\begin{aligned} x' &= \gamma(x - vt) &&\Longrightarrow \quad \mathrm{d}x' = \gamma(\mathrm{d}x - v\mathrm{d}t) \\ t' &= \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right) &&\Longrightarrow \quad \mathrm{d}t' = \gamma\left(\mathrm{d}t - \frac{v}{c^2}\mathrm{d}x\right) \end{aligned} \quad \Longrightarrow \quad u'_x = \frac{\mathrm{d}x'}{\mathrm{d}t'} = \frac{u_x - v}{1 - \dfrac{vu_x}{c^2}}$$

$$\mathrm{d}y' = \mathrm{d}y \quad \Longrightarrow \quad u'_y = \frac{\mathrm{d}y'}{\mathrm{d}t'} = \frac{\gamma u_y}{1 - \dfrac{vu_x}{c^2}}$$

$$\mathrm{d}z' = \mathrm{d}z \quad \Longrightarrow \quad u'_z = \frac{\mathrm{d}z'}{\mathrm{d}t'} = \frac{\gamma u_z}{1 - \dfrac{vu_x}{c^2}}$$

七、例题

七、例题

例 1：双生子佯谬：（参阅：Am. J. Phys. **40**, 966)

Daniel 以速度 v 飞向一星球，到达后即跳进一反向同速飞船返回。John留在地球。John 认为：自己静止于地球惯性系，而 Daniel 以速度 v 运动，运动时间变缓，因此见面时 Daniel 年轻。而 Daniel 在飞船惯性系，认为是 John 在运动，因而见面时应该是 John 年轻。

七、例题

例 1：双生子佯谬：（参阅：Am. J. Phys. **40**, 966)

Daniel 以速度 v 飞向一星球，到达后即跳进一反向同速飞船返回。John留在地球。John 认为：自己静止于地球惯性系，而 Daniel 以速度 v 运动，运动时间变缓，因此见面时 Daniel 年轻。而 Daniel 在飞船惯性系，认为是 John 在运动，因而见面时应该是 John 年轻。

John 的计算：

七、例题

例 1：双生子佯谬：（参阅：Am. J. Phys. **40**, 966)

Daniel 以速度 v 飞向一星球，到达后即跳进一反向同速飞船返回。John留在地球。John 认为：自己静止于地球惯性系，而 Daniel 以速度 v 运动，运动时间变缓，因此见面时 Daniel 年轻。而 Daniel 在飞船惯性系，认为是 John 在运动，因而见面时应该是 John 年轻。

John 的计算： D_j 为 John 测量的地球与星球之距离，D_d 为 Daniel 测量的地球与星球之距离

七、例题

例 1：双生子佯谬：（参阅：Am. J. Phys. **40**, 966)

Daniel 以速度 v 飞向一星球，到达后即跳进一反向同速飞船返回。John留在地球。John 认为：自己静止于地球惯性系，而 Daniel 以速度 v 运动，运动时间变缓，因此见面时 Daniel 年轻。而 Daniel 在飞船惯性系，认为是 John 在运动，因而见面时应该是 John 年轻。

John 的计算： D_j 为 John 测量的地球与星球之距离，D_d 为 Daniel 测量的地球与星球之距离

John 认为从出发到返回，在地球观察经历了：$\Delta t_j = D_j/v + D_j/v$,

七、例题

例 1：双生子佯谬：（参阅：Am. J. Phys. **40**, 966)

Daniel 以速度 v 飞向一星球，到达后即跳进一反向同速飞船返回。John留在地球。John 认为：自己静止于地球惯性系，而 Daniel 以速度 v 运动，运动时间变缓，因此见面时 Daniel 年轻。而 Daniel 在飞船惯性系，认为是 John 在运动，因而见面时应该是 John 年轻。

John 的计算： D_j 为 John 测量的地球与星球之距离，D_d 为 Daniel 测量的地球与星球之距离

John 认为从出发到返回，在地球观察经历了：$\Delta t_j = D_j/v + D_j/v$， 一来一回各需时间 D_j/v

七、例题

例 1：双生子佯谬：（参阅：Am. J. Phys. **40**, 966)

Daniel 以速度 v 飞向一星球，到达后即跳进一反向同速飞船返回。John留在地球。John 认为：自己静止于地球惯性系，而 Daniel 以速度 v 运动，运动时间变缓，因此见面时 Daniel 年轻。而 Daniel 在飞船惯性系，认为是 John 在运动，因而见面时应该是 John 年轻。

John 的计算： D_j 为 John 测量的地球与星球之距离，D_d 为 Daniel 测量的地球与星球之距离

John 认为从出发到返回，在地球观察经历了：$\Delta t_j = D_j/v + D_j/v$， 一来一回各需时间 D_j/v

运动时间变缓，因此 John 认为 Daniel 的时钟走了：$\Delta t_d = \Delta t_j/\gamma$， $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$

七、例题

例 1：双生子佯谬：（参阅：Am. J. Phys. **40**, 966)

Daniel 以速度 v 飞向一星球，到达后即跳进一反向同速飞船返回。John留在地球。John 认为：自己静止于地球惯性系，而 Daniel 以速度 v 运动，运动时间变缓，因此见面时 Daniel 年轻。而 Daniel 在飞船惯性系，认为是 John 在运动，因而见面时应该是 John 年轻。

John 的计算：D_j 为 John 测量的地球与星球之距离，D_d 为 Daniel 测量的地球与星球之距离

John 认为从出发到返回，在地球观察经历了：$\Delta t_j = D_j/v + D_j/v$，一来一回各需时间 D_j/v

运动时间变缓，因此 John 认为 Daniel 的时钟走了：$\Delta t_d = \Delta t_j/\gamma$，$\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \dfrac{2D_j}{v}\left(1 - \dfrac{1}{\gamma}\right) = \dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

七、例题

例 1：双生子佯谬：（参阅：Am. J. Phys. **40**, 966)

Daniel 以速度 v 飞向一星球，到达后即跳进一反向同速飞船返回。John留在地球。John 认为：自己静止于地球惯性系，而 Daniel 以速度 v 运动，运动时间变缓，因此见面时 Daniel 年轻。而 Daniel 在飞船惯性系，认为是 John 在运动，因而见面时应该是 John 年轻。

John 的计算： D_j 为 John 测量的地球与星球之距离，D_d 为 Daniel 测量的地球与星球之距离

John 认为从出发到返回，在地球观察经历了：$\Delta t_j = D_j/v + D_j/v$，　一来一回各需时间 D_j/v

运动时间变缓，因此 John 认为 Daniel 的时钟走了：$\Delta t_d = \Delta t_j/\gamma$，　$\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \dfrac{2D_j}{v}\left(1-\dfrac{1}{\gamma}\right) = \dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

Daniel 的计算：

七、例题

例 1：双生子佯谬：（参阅：Am. J. Phys. **40**, 966)

Daniel 以速度 v 飞向一星球，到达后即跳进一反向同速飞船返回。John留在地球。John 认为：自己静止于地球惯性系，而 Daniel 以速度 v 运动，运动时间变缓，因此见面时 Daniel 年轻。而 Daniel 在飞船惯性系，认为是 John 在运动，因而见面时应该是 John 年轻。

John 的计算： D_j 为 John 测量的地球与星球之距离，D_d 为 Daniel 测量的地球与星球之距离

John 认为从出发到返回，在地球观察经历了：$\Delta t_j = D_j/v + D_j/v$， 一来一回各需时间 D_j/v

运动时间变缓，因此 John 认为 Daniel 的时钟走了：$\Delta t_d = \Delta t_j/\gamma$， $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \dfrac{2D_j}{v}\left(1 - \dfrac{1}{\gamma}\right) = \dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

Daniel 的计算： John 测量地球与星球之距离 D_j，Daniel 测量地球与星球之距离 $D_d = D_j/\gamma$

七、例题

例1：双生子佯谬：（参阅：Am. J. Phys. **40**, 966)

Daniel 以速度 v 飞向一星球，到达后即跳进一反向同速飞船返回。John留在地球。John 认为：自己静止于地球惯性系，而 Daniel 以速度 v 运动，运动时间变缓，因此见面时 Daniel 年轻。而 Daniel 在飞船惯性系，认为是 John 在运动，因而见面时应该是 John 年轻。

John 的计算：D_j 为 John 测量的地球与星球之距离，D_d 为 Daniel 测量的地球与星球之距离

John 认为从出发到返回，在地球观察经历了：$\Delta t_j = D_j/v + D_j/v$，　一来一回各需时间 D_j/v

运动时间变缓，因此 John 认为 Daniel 的时钟走了：$\Delta t_d = \Delta t_j/\gamma$，　$\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \dfrac{2D_j}{v}\left(1 - \dfrac{1}{\gamma}\right) = \dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

Daniel 的计算：John 测量地球与星球之距离 D_j，Daniel 测量地球与星球之距离 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为从出发到返回，在飞船观察经历了：$\Delta t_d = D_d/v + D_d/v$，

七、例题

例 1：双生子佯谬：（参阅：Am. J. Phys. **40**, 966)

Daniel 以速度 v 飞向一星球，到达后即跳进一反向同速飞船返回。John留在地球。John 认为：自己静止于地球惯性系，而 Daniel 以速度 v 运动，运动时间变缓，因此见面时 Daniel 年轻。而 Daniel 在飞船惯性系，认为是 John 在运动，因而见面时应该是 John 年轻。

John 的计算：D_j 为 John 测量的地球与星球之距离，D_d 为 Daniel 测量的地球与星球之距离

John 认为从出发到返回，在地球观察经历了：$\Delta t_j = D_j/v + D_j/v$， 一来一回各需时间 D_j/v

运动时间变缓，因此 John 认为 Daniel 的时钟走了：$\Delta t_d = \Delta t_j/\gamma$， $\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \frac{2D_j}{v}\left(1-\frac{1}{\gamma}\right) = \frac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

Daniel 的计算：John 测量地球与星球之距离 D_j，Daniel 测量地球与星球之距离 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为从出发到返回，在飞船观察经历了：$\Delta t_d = D_d/v + D_d/v$， 一来一回各需时间 D_d/v

七、例题

例 1：双生子佯谬：（参阅：Am. J. Phys. **40**, 966)

Daniel 以速度 v 飞向一星球，到达后即跳进一反向同速飞船返回。John留在地球。John 认为：自己静止于地球惯性系，而 Daniel 以速度 v 运动，运动时间变缓，因此见面时 Daniel 年轻。而 Daniel 在飞船惯性系，认为是 John 在运动，因而见面时应该是 John 年轻。

John 的计算：D_j 为 John 测量的地球与星球之距离，D_d 为 Daniel 测量的地球与星球之距离

John 认为从出发到返回，在地球观察经历了：$\Delta t_j = D_j/v + D_j/v$，　一来一回各需时间 D_j/v

运动时间变缓，因此 John 认为 Daniel 的时钟走了：$\Delta t_d = \Delta t_j/\gamma$，　$\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \dfrac{2D_j}{v}\left(1-\dfrac{1}{\gamma}\right) = \dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma-1)$

Daniel 的计算：John 测量地球与星球之距离 D_j，Daniel 测量地球与星球之距离 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为从出发到返回，在飞船观察经历了：$\Delta t_d = D_d/v + D_d/v$，　一来一回各需时间 D_d/v

在飞船观察，地球在运动，运动时间变缓，因此 Daniel 认为 John 的时钟走了：$\Delta t_j = \Delta t_d/\gamma$

七、例题

例1：双生子佯谬：（参阅：Am. J. Phys. **40**, 966)

Daniel 以速度 v 飞向一星球，到达后即跳进一反向同速飞船返回。John留在地球。John 认为：自己静止于地球惯性系，而 Daniel 以速度 v 运动，运动时间变缓，因此见面时 Daniel 年轻。而 Daniel 在飞船惯性系，认为是 John 在运动，因而见面时应该是 John 年轻。

John 的计算： D_j 为 John 测量的地球与星球之距离，D_d 为 Daniel 测量的地球与星球之距离

John 认为从出发到返回，在地球观察经历了：$\Delta t_j = D_j/v + D_j/v$，　一来一回各需时间 D_j/v

运动时间变缓，因此 John 认为 Daniel 的时钟走了：$\Delta t_d = \Delta t_j/\gamma$，　$\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \dfrac{2D_j}{v}\left(1-\dfrac{1}{\gamma}\right) = \dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

Daniel 的计算： John 测量地球与星球之距离 D_j，Daniel 测量地球与星球之距离 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为从出发到返回，在飞船观察经历了：$\Delta t_d = D_d/v + D_d/v$，　一来一回各需时间 D_d/v

在飞船观察，地球在运动，运动时间变缓，因此 Daniel 认为 John 的时钟走了：$\Delta t_j = \Delta t_d/\gamma$

Daniel 认为 John 年轻了：$\Delta t_d - \Delta t_j = \dfrac{2D_d}{v}\left(1-\dfrac{1}{\gamma}\right) = \dfrac{2D_j}{\gamma^2 v}(\gamma - 1)$

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

Daniel 认为 John 年轻了：$\Delta t_d - \Delta t_j = \dfrac{2D_j}{\gamma^2 v}(\gamma - 1)$

Let there be light

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

Daniel 认为 John 年轻了：$\Delta t_d - \Delta t_j = \dfrac{2D_j}{\gamma^2 v}(\gamma - 1)$

到底谁年轻些？

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

Daniel 认为 John 年轻了：$\Delta t_d - \Delta t_j = \dfrac{2D_j}{\gamma^2 v}(\gamma - 1)$ 到底谁年轻些？

现有三个惯性系，地球 S，离开地球的飞船 S'，飞向地球的飞船 S''

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

Daniel 认为 John 年轻了：$\Delta t_d - \Delta t_j = \dfrac{2D_j}{\gamma^2 v}(\gamma - 1)$　　到底谁年轻些？

现有三个惯性系，地球 S，离开地球的飞船 S'，飞向地球的飞船 S''

相对于地球惯性系 S，飞船惯性系 S' 和 S'' 分别以速度 v 沿 $\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 和 $-\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 方向运动。

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

Daniel 认为 John 年轻了：$\Delta t_d - \Delta t_j = \dfrac{2D_j}{\gamma^2 v}(\gamma - 1)$ 到底谁年轻些？

现有三个惯性系，地球 S，离开地球的飞船 S'，飞向地球的飞船 S''

相对于地球惯性系 S，飞船惯性系 S' 和 S'' 分别以速度 v 沿 $\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 和 $-\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 方向运动。

Daniel 出发时刻，三个惯性系完全重合：

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

Daniel 认为 John 年轻了：$\Delta t_d - \Delta t_j = \dfrac{2D_j}{\gamma^2 v}(\gamma - 1)$ 到底谁年轻些？

现有三个惯性系，地球 S，离开地球的飞船 S'，飞向地球的飞船 S''

相对于地球惯性系 S，飞船惯性系 S' 和 S'' 分别以速度 v 沿 $\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 和 $-\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 方向运动。

Daniel 出发时刻，三个惯性系完全重合： $x = x' = x'' = 0, \quad t = t' = t'' = 0$

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

Daniel 认为 John 年轻了：$\Delta t_d - \Delta t_j = \dfrac{2D_j}{\gamma^2 v}(\gamma - 1)$ 到底谁年轻些？

现有三个惯性系，地球 S，离开地球的飞船 S'，飞向地球的飞船 S''

相对于地球惯性系 S，飞船惯性系 S' 和 S'' 分别以速度 v 沿 $\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 和 $-\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 方向运动。

Daniel 出发时刻，三个惯性系完全重合： $x = x' = x'' = 0, \quad t = t' = t'' = 0$

在 S 系：Daniel 到达星球这一事件（称为 D 事件）的时空坐标：$(x_D, t_D) = (D_j, \dfrac{D_j}{v})$

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

Daniel 认为 John 年轻了：$\Delta t_d - \Delta t_j = \dfrac{2D_j}{\gamma^2 v}(\gamma - 1)$　　到底谁年轻些？

现有三个惯性系，地球 S，离开地球的飞船 S'，飞向地球的飞船 S''

相对于地球惯性系 S，飞船惯性系 S' 和 S'' 分别以速度 v 沿 $\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 和 $-\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 方向运动。

Daniel 出发时刻，三个惯性系完全重合：　$x = x' = x'' = 0, \quad t = t' = t'' = 0$

在 S 系：Daniel 到达星球这一事件（称为 D 事件）的时空坐标：$(x_D, t_D) = (D_j, \dfrac{D_j}{v})$

也即：Daniel 到达星球的同时，地球上的表指向 D_j/v，John 老了 D_j/v

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

Daniel 认为 John 年轻了：$\Delta t_d - \Delta t_j = \dfrac{2D_j}{\gamma^2 v}(\gamma - 1)$　　到底谁年轻些？

现有三个惯性系，地球 S，离开地球的飞船 S'，飞向地球的飞船 S''

相对于地球惯性系 S，飞船惯性系 S' 和 S'' 分别以速度 v 沿 $\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 和 $-\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 方向运动。

Daniel 出发时刻，三个惯性系完全重合：　$x = x' = x'' = 0, \quad t = t' = t'' = 0$

在 S 系：Daniel 到达星球这一事件（称为 D 事件）的时空坐标：$(x_D, t_D) = (D_j, \dfrac{D_j}{v})$

也即：Daniel 到达星球的同时，地球上的表指向 D_j/v，John 老了 D_j/v

而 Daniel 到达星球的同时，Daniel 的表指向：$t'_D = \gamma(t_D - vx_D/c^2) = D_j/(\gamma v)$

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

Daniel 认为 John 年轻了：$\Delta t_d - \Delta t_j = \dfrac{2D_j}{\gamma^2 v}(\gamma - 1)$ 到底谁年轻些？

现有三个惯性系，地球 S，离开地球的飞船 S'，飞向地球的飞船 S''

相对于地球惯性系 S，飞船惯性系 S' 和 S'' 分别以速度 v 沿 $\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 和 $-\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 方向运动。

Daniel 出发时刻，三个惯性系完全重合： $x = x' = x'' = 0, \quad t = t' = t'' = 0$

在 S 系：Daniel 到达星球这一事件（称为 D 事件）的时空坐标：$(x_D, t_D) = (D_j, \dfrac{D_j}{v})$

也即：Daniel 到达星球的同时，地球上的表指向 D_j/v，John 老了 D_j/v

而 Daniel 到达星球的同时，Daniel 的表指向：$t'_D = \gamma(t_D - v x_D/c^2) = D_j/(\gamma v)$

Daniel 老了 t'_D。

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

Daniel 认为 John 年轻了：$\Delta t_d - \Delta t_j = \dfrac{2D_j}{\gamma^2 v}(\gamma - 1)$ 到底谁年轻些？

现有三个惯性系，地球 S，离开地球的飞船 S'，飞向地球的飞船 S''

相对于地球惯性系 S，飞船惯性系 S' 和 S'' 分别以速度 v 沿 $\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 和 $-\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 方向运动。

Daniel 出发时刻，三个惯性系完全重合： $x = x' = x'' = 0, \quad t = t' = t'' = 0$

在 S 系：Daniel 到达星球这一事件（称为 D 事件）的时空坐标：$(x_D, t_D) = (D_j, \dfrac{D_j}{v})$

也即：Daniel 到达星球的同时，地球上的表指向 D_j/v，John 老了 D_j/v

而 Daniel 到达星球的同时，Daniel 的表指向：$t'_D = \gamma(t_D - vx_D/c^2) = D_j/(\gamma v)$

Daniel 老了 t'_D。 —— John 认为 Daniel 到达星球的时，比 John 年轻。

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

Daniel 认为 John 年轻了：$\Delta t_d - \Delta t_j = \dfrac{2D_j}{\gamma^2 v}(\gamma - 1)$ 到底谁年轻些？

现有三个惯性系，地球 S，离开地球的飞船 S'，飞向地球的飞船 S''

相对于地球惯性系 S，飞船惯性系 S' 和 S'' 分别以速度 v 沿 $\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 和 $-\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 方向运动。

Daniel 出发时刻，三个惯性系完全重合： $x = x' = x'' = 0, \quad t = t' = t'' = 0$

在 S 系：Daniel 到达星球这一事件（称为 D 事件）的时空坐标：$(x_D, t_D) = (D_j, \dfrac{D_j}{v})$

也即：Daniel 到达星球的同时，地球上的表指向 D_j/v，John 老了 D_j/v

而 Daniel 到达星球的同时，Daniel 的表指向：$t'_D = \gamma(t_D - vx_D/c^2) = D_j/(\gamma v)$

Daniel 老了 t'_D。 —— John 认为 Daniel 到达星球的时，比 John 年轻。

Daniel 跳到返回飞船事件称为 J 事件，$(x_J, t_J) = (x_D, t_D)$

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

Daniel 认为 John 年轻了：$\Delta t_d - \Delta t_j = \dfrac{2D_j}{\gamma^2 v}(\gamma - 1)$ 到底谁年轻些？

现有三个惯性系，地球 S，离开地球的飞船 S'，飞向地球的飞船 S''

相对于地球惯性系 S，飞船惯性系 S' 和 S'' 分别以速度 v 沿 $\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 和 $-\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 方向运动。

Daniel 出发时刻，三个惯性系完全重合： $x = x' = x'' = 0, \quad t = t' = t'' = 0$

在 S 系：Daniel 到达星球这一事件（称为 D 事件）的时空坐标：$(x_D, t_D) = (D_j, \dfrac{D_j}{v})$

也即：Daniel 到达星球的同时，地球上的表指向 D_j/v，John 老了 D_j/v

而 Daniel 到达星球的同时，Daniel 的表指向：$t'_D = \gamma(t_D - vx_D/c^2) = D_j/(\gamma v)$

Daniel 老了 t'_D。 —— John 认为 Daniel 到达星球的时，比 John 年轻。

Daniel 跳到返回飞船事件称为 J 事件，$(x_J, t_J) = (x_D, t_D)$

Daniel 回到地球称为 R 事件，$(x_R, t_R) = (0, 2D_j/v) = (0, 2t_D)$

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

Daniel 认为 John 年轻了：$\Delta t_d - \Delta t_j = \dfrac{2D_j}{\gamma^2 v}(\gamma - 1)$　　到底谁年轻些？

现有三个惯性系，地球 S，离开地球的飞船 S'，飞向地球的飞船 S''

相对于地球惯性系 S，飞船惯性系 S' 和 S'' 分别以速度 v 沿 $\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 和 $-\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 方向运动。

Daniel 出发时刻，三个惯性系完全重合：　$x = x' = x'' = 0,\quad t = t' = t'' = 0$

在 S 系：Daniel 到达星球这一事件（称为 D 事件）的时空坐标：$(x_D, t_D) = (D_j, \dfrac{D_j}{v})$

也即：Daniel 到达星球的同时，地球上的表指向 D_j/v，John 老了 D_j/v

而 Daniel 到达星球的同时，Daniel 的表指向：$t'_D = \gamma(t_D - v x_D/c^2) = D_j/(\gamma v)$

Daniel 老了 t'_D。　—— John 认为 Daniel 到达星球的时，比 John 年轻。

Daniel 跳到返回飞船事件称为 J 事件，$(x_J, t_J) = (x_D, t_D)$

Daniel 回到地球称为 R 事件，$(x_R, t_R) = (0, 2D_j/v) = (0, 2t_D)$

即，Daniel 到达地球的同时，地球上的表指向 $2t_D$，

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \frac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

Daniel 认为 John 年轻了：$\Delta t_d - \Delta t_j = \frac{2D_j}{\gamma^2 v}(\gamma - 1)$ 到底谁年轻些？

现有三个惯性系，地球 S，离开地球的飞船 S'，飞向地球的飞船 S''

相对于地球惯性系 S，飞船惯性系 S' 和 S'' 分别以速度 v 沿 $\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 和 $-\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 方向运动。

Daniel 出发时刻，三个惯性系完全重合： $x = x' = x'' = 0, \quad t = t' = t'' = 0$

在 S 系：Daniel 到达星球这一事件（称为 D 事件）的时空坐标：$(x_D, t_D) = (D_j, \frac{D_j}{v})$

也即：Daniel 到达星球的同时，地球上的表指向 D_j/v，John 老了 D_j/v

而 Daniel 到达星球的同时，Daniel 的表指向：$t'_D = \gamma(t_D - vx_D/c^2) = D_j/(\gamma v)$

Daniel 老了 t'_D。 —— John 认为 Daniel 到达星球的时，比 John 年轻。

Daniel 跳到返回飞船事件称为 J 事件，$(x_J, t_J) = (x_D, t_D)$

Daniel 回到地球称为 R 事件，$(x_R, t_R) = (0, 2D_j/v) = (0, 2t_D)$

即，Daniel 到达地球的同时，地球上的表指向 $2t_D$，

也就是说在 Daniel 的旅行过程， John 年龄增加了 $2t_D = 2D_j/v = 2D_j/v$

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

Daniel 认为 John 年轻了：$\Delta t_d - \Delta t_j = \dfrac{2D_j}{\gamma^2 v}(\gamma - 1)$　　到底谁年轻些？

现有三个惯性系，地球 S，离开地球的飞船 S'，飞向地球的飞船 S''

相对于地球惯性系 S，飞船惯性系 S' 和 S'' 分别以速度 v 沿 $\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 和 $-\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 方向运动。

Daniel 出发时刻，三个惯性系完全重合：　$x = x' = x'' = 0, \quad t = t' = t'' = 0$

在 S 系：Daniel 到达星球这一事件（称为 D 事件）的时空坐标：$(x_D, t_D) = (D_j, \dfrac{D_j}{v})$

也即：Daniel 到达星球的同时，地球上的表指向 D_j/v，John 老了 D_j/v

而 Daniel 到达星球的同时，Daniel 的表指向：$t'_D = \gamma(t_D - v x_D/c^2) = D_j/(\gamma v)$

Daniel 老了 t'_D。　—— John 认为 Daniel 到达星球的时，比 John 年轻。

Daniel 跳到返回飞船事件称为 J 事件，$(x_J, t_J) = (x_D, t_D)$

Daniel 回到地球称为 R 事件，$(x_R, t_R) = (0, 2D_j/v) = (0, 2t_D)$

即，Daniel 到达地球的同时，地球上的表指向 $2t_D$，

也就是说在 Daniel 的旅行过程，John 年龄增加了 $2t_D = 2D_j/v = 2D_j/v$

在 S' 系：通过 Lorentz 变换可得 D 事件时空坐标：$(x'_D, t'_D) = [0, D_j/(\gamma v)] = (x'_J, t'_J)$

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

Daniel 认为 John 年轻了：$\Delta t_d - \Delta t_j = \dfrac{2D_j}{\gamma^2 v}(\gamma - 1)$ 到底谁年轻些？

现有三个惯性系，地球 S，离开地球的飞船 S'，飞向地球的飞船 S''

相对于地球惯性系 S，飞船惯性系 S' 和 S'' 分别以速度 v 沿 $\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 和 $-\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 方向运动。

Daniel 出发时刻，三个惯性系完全重合： $x = x' = x'' = 0,\quad t = t' = t'' = 0$

在 S 系：Daniel 到达星球这一事件（称为 D 事件）的时空坐标：$(x_D, t_D) = (D_j, \dfrac{D_j}{v})$

也即：Daniel 到达星球的同时，地球上的表指向 D_j/v，John 老了 D_j/v

而 Daniel 到达星球的同时，Daniel 的表指向：$t'_D = \gamma(t_D - vx_D/c^2) = D_j/(\gamma v)$

Daniel 老了 t'_D。 —— John 认为 Daniel 到达星球的时，比 John 年轻。

Daniel 跳到返回飞船事件称为 J 事件，$(x_J, t_J) = (x_D, t_D)$

Daniel 回到地球称为 R 事件，$(x_R, t_R) = (0, 2D_j/v) = (0, 2t_D)$

即，Daniel 到达地球的同时，地球上的表指向 $2t_D$，

也就是说在 Daniel 的旅行过程， John 年龄增加了 $2t_D = 2D_j/v = 2D_j/v$

在 S' 系：通过 Lorentz 变换可得 D 事件时空坐标：$(x'_D, t'_D) = [0, D_j/(\gamma v)] = (x'_J, t'_J)$

即：到达星球时，Daniel 的表指向 $t'_D = D_d/v$，其中 $D_d = D_j/\gamma$

John 认为 Daniel 年轻了：$\Delta t_j - \Delta t_d = \dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

Daniel 认为 John 年轻了：$\Delta t_d - \Delta t_j = \dfrac{2D_j}{\gamma^2 v}(\gamma - 1)$ 到底谁年轻些？

现有三个惯性系，地球 S，离开地球的飞船 S'，飞向地球的飞船 S''

相对于地球惯性系 S，飞船惯性系 S' 和 S'' 分别以速度 v 沿 $\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 和 $-\hat{\boldsymbol{e}}_x$ 方向运动。

Daniel 出发时刻，三个惯性系完全重合： $x = x' = x'' = 0, \quad t = t' = t'' = 0$

在 S 系：Daniel 到达星球这一事件（称为 D 事件）的时空坐标：$(x_D, t_D) = (D_j, \dfrac{D_j}{v})$

也即：Daniel 到达星球的同时，地球上的表指向 D_j/v，John 老了 D_j/v

而 Daniel 到达星球的同时，Daniel 的表指向：$t'_D = \gamma(t_D - v x_D/c^2) = D_j/(\gamma v)$

Daniel 老了 t'_D。 —— John 认为 Daniel 到达星球的时，比 John 年轻。

Daniel 跳到返回飞船事件称为 J 事件，$(x_J, t_J) = (x_D, t_D)$

Daniel 回到地球称为 R 事件，$(x_R, t_R) = (0, 2D_j/v) = (0, 2t_D)$

即，Daniel 到达地球的同时，地球上的表指向 $2t_D$，

也就是说在 Daniel 的旅行过程， John 年龄增加了 $2t_D = 2D_j/v = 2D_j/v$

在 S' 系：通过 Lorentz 变换可得 D 事件时空坐标：$(x'_D, t'_D) = [0, D_j/(\gamma v)] = (x'_J, t'_J)$

即：到达星球时，Daniel 的表指向 $t'_D = D_d/v$，其中 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为，在他到达星球的同时，地球上 John 的表指向：t_δ —— 如何求 t_δ

即：到达星球时，Daniel 的表指向 $t'_D = D_d/v$，其中 $D_d = D_j/\gamma$

即：到达星球时，Daniel 的表指向 $t'_D = D_d/v$，其中 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为，在他到达星球的同时，地球上 John 的表指向：t_δ —— 如何求 t_δ

即：到达星球时，Daniel 的表指向 $t'_D = D_d/v$，其中 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为，在他到达星球的同时，地球上 John 的表指向：t_δ —— 如何求 t_δ

两种算法：

即：到达星球时，Daniel 的表指向 $t'_D = D_d/v$，其中 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为，在他到达星球的同时，地球上 John 的表指向：t_δ —— 如何求 t_δ

两种算法：$(a)\ t_\delta = t'_D/\gamma$

即：到达星球时，Daniel 的表指向 $t'_D = D_d/v$，其中 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为，在他到达星球的同时，地球上 John 的表指向：t_δ —— 如何求 t_δ

两种算法：$(a)\ t_\delta = t'_D/\gamma$ —— 地球相对于 Daniel 以速度 v 运动，时间变缓

即：到达星球时，Daniel 的表指向 $t'_D = D_d/v$，其中 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为，在他到达星球的同时，地球上 John 的表指向：t_δ —— 如何求 t_δ

两种算法：(a) $t_\delta = t'_D/\gamma$ —— 地球相对于 Daniel 以速度 v 运动，时间变缓

(b) 在 S' 看，地球在 $x' = -D_d$ 处，故：$t_\delta = \gamma[t'_D + (v/c^2)\ x'] = \dfrac{D_d}{\gamma v} = \dfrac{t'_D}{\gamma}$

即：到达星球时，Daniel 的表指向 $t'_D = D_d/v$，其中 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为，在他到达星球的同时，地球上 John 的表指向：t_δ —— 如何求 t_δ

两种算法：(a) $t_\delta = t'_D/\gamma$ —— 地球相对于 Daniel 以速度 v 运动，时间变缓

(b) 在 S' 看，地球在 $x' = -D_d$ 处，故：$t_\delta = \gamma[t'_D + (v/c^2)\, x'] = \dfrac{D_d}{\gamma v} = \dfrac{t'_D}{\gamma}$

Daniel 到达星球时，认为 John 比他年轻。

即：到达星球时，Daniel 的表指向 $t'_D = D_d/v$，其中 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为，在他到达星球的同时，地球上 John 的表指向：t_δ —— 如何求 t_δ

两种算法：$(a)\ t_\delta = t'_D/\gamma$ —— 地球相对于 Daniel 以速度 v 运动，时间变缓

(b) 在 S' 看，地球在 $x' = -D_d$ 处，故：$t_\delta = \gamma[t'_D + (v/c^2)\ x'] = \dfrac{D_d}{\gamma v} = \dfrac{t'_D}{\gamma}$

Daniel 到达星球时，认为 John 比他年轻。注意，John 却认为 Daniel 到达星球时比 John 年轻。

即：到达星球时，Daniel 的表指向 $t'_D = D_d/v$，其中 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为，在他到达星球的同时，地球上 John 的表指向：t_δ —— 如何求 t_δ

两种算法：(a) $t_\delta = t'_D/\gamma$ —— 地球相对于 Daniel 以速度 v 运动，时间变缓

(b) 在 S' 看，地球在 $x' = -D_d$ 处，故：$t_\delta = \gamma[t'_D + (v/c^2)\, x'] = \dfrac{D_d}{\gamma v} = \dfrac{t'_D}{\gamma}$

Daniel 到达星球时，认为 John 比他年轻。注意，John 却认为 Daniel 到达星球时比 John 年轻。

这里涉及到的是同时的相对性问题。

即：到达星球时，Daniel 的表指向 $t'_D = D_d/v$，其中 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为，在他到达星球的同时，地球上 John 的表指向：t_δ —— 如何求 t_δ

两种算法：(a) $t_\delta = t'_D/\gamma$ —— 地球相对于 Daniel 以速度 v 运动，时间变缓

(b) 在 S' 看，地球在 $x' = -D_d$ 处，故：$t_\delta = \gamma[t'_D + (v/c^2)\,x'] = \dfrac{D_d}{\gamma v} = \dfrac{t'_D}{\gamma}$

Daniel 到达星球时，认为 John 比他年轻。注意，John 却认为 Daniel 到达星球时比 John 年轻。

这里涉及到的是同时的相对性问题。

Daniel 看来，在他到达星球（D 事件）的同时，John 比他年轻，这里的同时是指在 S' 系同时。

即：到达星球时，Daniel 的表指向 $t'_D = D_d/v$，其中 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为，在他到达星球的同时，地球上 John 的表指向：t_δ —— 如何求 t_δ

两种算法：(a) $t_\delta = t'_D/\gamma$ —— 地球相对于 Daniel 以速度 v 运动，时间变缓

(b) 在 S' 看，地球在 $x' = -D_d$ 处，故：$t_\delta = \gamma[t'_D + (v/c^2)\ x'] = \dfrac{D_d}{\gamma v} = \dfrac{t'_D}{\gamma}$

Daniel 到达星球时，认为 John 比他年轻。注意，John 却认为 Daniel 到达星球时比 John 年轻。这里涉及到的是同时的相对性问题。

Daniel 看来，在他到达星球（D 事件）的同时，John 比他年轻，这里的同时是指在 S' 系同时。

而 John 看来，在 D 事件的同时，Daniel 比 John 年轻，这里的同时指的是在 S 系看来同时。

即：到达星球时，Daniel 的表指向 $t'_D = D_d/v$，其中 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为，在他到达星球的同时，地球上 John 的表指向：t_δ —— 如何求 t_δ

两种算法：(a) $t_\delta = t'_D/\gamma$ —— 地球相对于 Daniel 以速度 v 运动，时间变缓

(b) 在 S' 看，地球在 $x' = -D_d$ 处，故：$t_\delta = \gamma[t'_D + (v/c^2)\ x'] = \dfrac{D_d}{\gamma v} = \dfrac{t'_D}{\gamma}$

Daniel 到达星球时，认为 John 比他年轻。注意，John 却认为 Daniel 到达星球时比 John 年轻。这里涉及到的是同时的相对性问题。

Daniel 看来，在他到达星球（D 事件）的同时，John 比他年轻，这里的同时是指在 S' 系同时。

而 John 看来，在 D 事件的同时，Daniel 比 John 年轻，这里的同时指的是在 S 系看来同时。

因为同时是相对的，在 Daniel 看来是同时，在 John 看来却不是同时，也就是说，John 认为：

即：到达星球时，Daniel 的表指向 $t'_D = D_d/v$，其中 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为，在他到达星球的同时，地球上 John 的表指向：t_δ —— 如何求 t_δ

两种算法：(a) $t_\delta = t'_D/\gamma$ —— 地球相对于 Daniel 以速度 v 运动，时间变缓

(b) 在 S' 看，地球在 $x' = -D_d$ 处，故：$t_\delta = \gamma[t'_D + (v/c^2)\ x'] = \dfrac{D_d}{\gamma v} = \dfrac{t'_D}{\gamma}$

Daniel 到达星球时，认为 John 比他年轻。注意，John 却认为 Daniel 到达星球时比 John 年轻。这里涉及到的是同时的相对性问题。

Daniel 看来，在他到达星球（D 事件）的同时，John 比他年轻，这里的同时是指在 S' 系同时。

而 John 看来，在 D 事件的同时，Daniel 比 John 年轻，这里的同时指的是在 S 系看来同时。

因为同时是相对的，在 Daniel 看来是同时，在 John 看来却不是同时，也就是说，John 认为：Daniel 拿自己在某时刻的年龄与 John 在另一时刻的年龄作比较以判断谁更年轻，Daniel 比错了

即：到达星球时，Daniel 的表指向 $t'_D = D_d/v$，其中 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为，在他到达星球的同时，地球上 John 的表指向：t_δ —— 如何求 t_δ

两种算法：(a) $t_\delta = t'_D/\gamma$ —— 地球相对于 Daniel 以速度 v 运动，时间变缓

(b) 在 S' 看，地球在 $x' = -D_d$ 处，故：$t_\delta = \gamma[t'_D + (v/c^2)\, x'] = \dfrac{D_d}{\gamma v} = \dfrac{t'_D}{\gamma}$

Daniel 到达星球时，认为 John 比他年轻。注意，John 却认为 Daniel 到达星球时比 John 年轻。这里涉及到的是同时的相对性问题。

Daniel 看来，在他到达星球（D 事件）的同时，John 比他年轻，这里的同时是指在 S' 系同时。
而 John 看来，在 D 事件的同时，Daniel 比 John 年轻，这里的同时指的是在 S 系看来同时。

因为同时是相对的，在 Daniel 看来是同时，在 John 看来却不是同时，也就是说，John 认为：
Daniel 拿自己在某时刻的年龄与 John 在另一时刻的年龄作比较以判断谁更年轻，Daniel 比错了
Daniel 则认为，是 John 错拿自己某时刻的年龄与 Daniel 在另一时刻的年龄作比较以判断谁年轻

即：到达星球时，Daniel 的表指向 $t'_D = D_d/v$，其中 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为，在他到达星球的同时，地球上 John 的表指向：t_δ —— 如何求 t_δ

两种算法：(a) $t_\delta = t'_D/\gamma$ —— 地球相对于 Daniel 以速度 v 运动，时间变缓

(b) 在 S' 看，地球在 $x' = -D_d$ 处，故：$t_\delta = \gamma[t'_D + (v/c^2)\ x'] = \dfrac{D_d}{\gamma v} = \dfrac{t'_D}{\gamma}$

Daniel 到达星球时，认为 John 比他年轻。注意，John 却认为 Daniel 到达星球时比 John 年轻。

这里涉及到的是同时的相对性问题。

Daniel 看来，在他到达星球（D 事件）的同时，John 比他年轻，这里的同时是指在 S' 系同时。

而 John 看来，在 D 事件的同时，Daniel 比 John 年轻，这里的同时指的是在 S 系看来同时。

因为同时是相对的，在 Daniel 看来是同时，在 John 看来却不是同时，也就是说，John 认为：

Daniel 拿自己在某时刻的年龄与 John 在另一时刻的年龄作比较以判断谁更年轻，Daniel 比错了

Daniel 则认为，是 John 错拿自己某时刻的年龄与 Daniel 在另一时刻的年龄作比较以判断谁年轻

故不同地点的年龄比较会出现我认为你比我年轻，你算出我比你年轻的似乎不可理解的“怪象”

即：到达星球时，Daniel 的表指向 $t'_D = D_d/v$，其中 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为，在他到达星球的同时，地球上 John 的表指向：t_δ —— 如何求 t_δ

两种算法：(a) $t_\delta = t'_D/\gamma$ —— 地球相对于 Daniel 以速度 v 运动，时间变缓

(b) 在 S' 看，地球在 $x' = -D_d$ 处，故：$t_\delta = \gamma[t'_D + (v/c^2)\ x'] = \dfrac{D_d}{\gamma v} = \dfrac{t'_D}{\gamma}$

Daniel 到达星球时，认为 John 比他年轻。注意，John 却认为 Daniel 到达星球时比 John 年轻。

这里涉及到的是同时的相对性问题。

Daniel 看来，在他到达星球（D 事件）的同时，John 比他年轻，这里的同时是指在 S' 系同时。

而 John 看来，在 D 事件的同时，Daniel 比 John 年轻，这里的同时指的是在 S 系看来同时。

因为同时是相对的，在 Daniel 看来是同时，在 John 看来却不是同时，也就是说，John 认为：

Daniel 拿自己在某时刻的年龄与 John 在另一时刻的年龄作比较以判断谁更年轻，Daniel 比错了

Daniel 则认为，是 John 错拿自己某时刻的年龄与 Daniel 在另一时刻的年龄作比较以判断谁年轻

故不同地点的年龄比较会出现我认为你比我年轻，你算出我比你年轻的似乎不可理解的“怪象”

若 Daniel 飞回地球，同地的同时是绝对的，比较就有客观意义，那么，飞回地球时究竟谁年轻？

即：到达星球时，Daniel 的表指向 $t'_D = D_d/v$，其中 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为，在他到达星球的同时，地球上 John 的表指向：t_δ —— 如何求 t_δ

两种算法：(a) $t_\delta = t'_D/\gamma$ —— 地球相对于 Daniel 以速度 v 运动，时间变缓

(b) 在 S' 看，地球在 $x' = -D_d$ 处，故：$t_\delta = \gamma[t'_D + (v/c^2)\ x'] = \dfrac{D_d}{\gamma v} = \dfrac{t'_D}{\gamma}$

Daniel 到达星球时，认为 John 比他年轻。注意，John 却认为 Daniel 到达星球时比 John 年轻。这里涉及到的是同时的相对性问题。

Daniel 看来，在他到达星球（D 事件）的同时，John 比他年轻，这里的同时是指在 S' 系同时。

而 John 看来，在 D 事件的同时，Daniel 比 John 年轻，这里的同时指的是在 S 系看来同时。

因为同时是相对的，在 Daniel 看来是同时，在 John 看来却不是同时，也就是说，John 认为：

Daniel 拿自己在某时刻的年龄与 John 在另一时刻的年龄作比较以判断谁更年轻，Daniel 比错了

Daniel 则认为，是 John 错拿自己某时刻的年龄与 Daniel 在另一时刻的年龄作比较以判断谁年轻

故不同地点的年龄比较会出现我认为你比我年轻，你算出我比你年轻的似乎不可理解的“怪象”

若 Daniel 飞回地球，同地的同时是绝对的，比较就有客观意义，那么，飞回地球时究竟谁年轻？

为了回地球，Daniel 必须跳到 S'' 惯性系（这里避免加速度，规避广义相对论）。

即：到达星球时，Daniel 的表指向 $t'_D = D_d/v$，其中 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为，在他到达星球的同时，地球上 John 的表指向：t_δ —— 如何求 t_δ

两种算法：(a) $t_\delta = t'_D/\gamma$ —— 地球相对于 Daniel 以速度 v 运动，时间变缓

(b) 在 S' 看，地球在 $x' = -D_d$ 处，故：$t_\delta = \gamma[t'_D + (v/c^2)\ x'] = \dfrac{D_d}{\gamma v} = \dfrac{t'_D}{\gamma}$

Daniel 到达星球时，认为 John 比他年轻。注意，John 却认为 Daniel 到达星球时比 John 年轻。
这里涉及到的是同时的相对性问题。

Daniel 看来，在他到达星球（D 事件）的同时，John 比他年轻，这里的同时是指在 S' 系同时。
而 John 看来，在 D 事件的同时，Daniel 比 John 年轻，这里的同时指的是在 S 系看来同时。

因为同时是相对的，在 Daniel 看来是同时，在 John 看来却不是同时，也就是说，John 认为：
Daniel 拿自己在某时刻的年龄与 John 在另一时刻的年龄作比较以判断谁更年轻，Daniel 比错了
Daniel 则认为，是 John 错拿自己某时刻的年龄与 Daniel 在另一时刻的年龄作比较以判断谁年轻
故不同地点的年龄比较会出现我认为你比我年轻，你算出我比你年轻的似乎不可理解的“怪象”
若 Daniel 飞回地球，同地的同时是绝对的，比较就有客观意义，那么，飞回地球时究竟谁年轻？
为了回地球，Daniel 必须跳到 S'' 惯性系（这里避免加速度，规避广义相对论）。
一旦跳到 S''，会出现什么现象？

即：到达星球时，Daniel 的表指向 $t'_D = D_d/v$，其中 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为，在他到达星球的同时，地球上 John 的表指向：t_δ —— 如何求 t_δ

两种算法：(a) $t_\delta = t'_D/\gamma$ —— 地球相对于 Daniel 以速度 v 运动，时间变缓

(b) 在 S' 看，地球在 $x' = -D_d$ 处，故：$t_\delta = \gamma[t'_D + (v/c^2)\, x'] = \dfrac{D_d}{\gamma v} = \dfrac{t'_D}{\gamma}$

Daniel 到达星球时，认为 John 比他年轻。注意，John 却认为 Daniel 到达星球时比 John 年轻。

这里涉及到的是同时的相对性问题。

Daniel 看来，在他到达星球（D 事件）的同时，John 比他年轻，这里的同时是指在 S' 系同时。

而 John 看来，在 D 事件的同时，Daniel 比 John 年轻，这里的同时指的是在 S 系看来同时。

因为同时是相对的，在 Daniel 看来是同时，在 John 看来却不是同时，也就是说，John 认为：

Daniel 拿自己在某时刻的年龄与 John 在另一时刻的年龄作比较以判断谁更年轻，Daniel 比错了

Daniel 则认为，是 John 错拿自己某时刻的年龄与 Daniel 在另一时刻的年龄作比较以判断谁年轻

故不同地点的年龄比较会出现我认为你比我年轻，你算出我比你年轻的似乎不可理解的“怪象”

若 Daniel 飞回地球，同地的同时是绝对的，比较就有客观意义，那么，飞回地球时究竟谁年轻？

为了回地球，Daniel 必须跳到 S'' 惯性系（这里避免加速度，规避广义相对论）。

一旦跳到 S''，会出现什么现象？

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件，前已求得，在 S 系观察：

即：到达星球时，Daniel 的表指向 $t'_D = D_d/v$，其中 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为，在他到达星球的同时，地球上 John 的表指向：t_δ —— 如何求 t_δ

两种算法：(a) $t_\delta = t'_D/\gamma$ —— 地球相对于 Daniel 以速度 v 运动，时间变缓

(b) 在 S' 看，地球在 $x' = -D_d$ 处，故：$t_\delta = \gamma[t'_D + (v/c^2)\ x'] = \dfrac{D_d}{\gamma v} = \dfrac{t'_D}{\gamma}$

Daniel 到达星球时，认为 John 比他年轻。注意，John 却认为 Daniel 到达星球时比 John 年轻。

这里涉及到的是同时的相对性问题。

Daniel 看来，在他到达星球（D 事件）的同时，John 比他年轻，这里的同时是指在 S' 系同时。

而 John 看来，在 D 事件的同时，Daniel 比 John 年轻，这里的同时指的是在 S 系看来同时。

因为同时是相对的，在 Daniel 看来是同时，在 John 看来却不是同时，也就是说，John 认为：

Daniel 拿自己在某时刻的年龄与 John 在另一时刻的年龄作比较以判断谁更年轻，Daniel 比错了

Daniel 则认为，是 John 错拿自己某时刻的年龄与 Daniel 在另一时刻的年龄作比较以判断谁年轻

故不同地点的年龄比较会出现我认为你比我年轻，你算出我比你年轻的似乎不可理解的“怪象”

若 Daniel 飞回地球，同地的同时是绝对的，比较就有客观意义，那么，飞回地球时究竟谁年轻？

为了回地球，Daniel 必须跳到 S'' 惯性系（这里避免加速度，规避广义相对论）。

一旦跳到 S''，会出现什么现象？

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件，前已求得，在 S 系观察：$(x_J, t_J) = (D_j, D_j/v)$

即：到达星球时，Daniel 的表指向 $t'_D = D_d/v$，其中 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为，在他到达星球的同时，地球上 John 的表指向：t_δ —— 如何求 t_δ

两种算法：(a) $t_\delta = t'_D/\gamma$ —— 地球相对于 Daniel 以速度 v 运动，时间变缓

(b) 在 S' 看，地球在 $x' = -D_d$ 处，故：$t_\delta = \gamma[t'_D + (v/c^2)\ x'] = \dfrac{D_d}{\gamma v} = \dfrac{t'_D}{\gamma}$

Daniel 到达星球时，认为 John 比他年轻。注意，John 却认为 Daniel 到达星球时比 John 年轻。

这里涉及到的是同时的相对性问题。

Daniel 看来，在他到达星球（D 事件）的同时，John 比他年轻，这里的同时是指在 S' 系同时。

而 John 看来，在 D 事件的同时，Daniel 比 John 年轻，这里的同时指的是在 S 系看来同时。

因为同时是相对的，在 Daniel 看来是同时，在 John 看来却不是同时，也就是说，John 认为：

Daniel 拿自己在某时刻的年龄与 John 在另一时刻的年龄作比较以判断谁更年轻，Daniel 比错了

Daniel 则认为，是 John 错拿自己某时刻的年龄与 Daniel 在另一时刻的年龄作比较以判断谁年轻

故不同地点的年龄比较会出现我认为你比我年轻，你算出我比你年轻的似乎不可理解的“怪象”

若 Daniel 飞回地球，同地的同时是绝对的，比较就有客观意义，那么，飞回地球时究竟谁年轻？

为了回地球，Daniel 必须跳到 S'' 惯性系（这里避免加速度，规避广义相对论）。

一旦跳到 S''，会出现什么现象？

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件，前已求得，在 S 系观察：$(x_J, t_J) = (D_j, D_j/v)$

Lorentz 变换 $\Longrightarrow$ $(x''_J, t''_J) = \gamma[x_J + vt_J, t_J + vx_J/c^2] = \gamma[2D_j, (1+\beta^2)D_j/v]$

即：到达星球时，Daniel 的表指向 $t'_D = D_d/v$，其中 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为，在他到达星球的同时，地球上 John 的表指向：t_δ —— 如何求 t_δ

两种算法：(a) $t_\delta = t'_D/\gamma$ —— 地球相对于 Daniel 以速度 v 运动，时间变缓

(b) 在 S' 看，地球在 $x' = -D_d$ 处，故：$t_\delta = \gamma[t'_D + (v/c^2)\,x'] = \dfrac{D_d}{\gamma v} = \dfrac{t'_D}{\gamma}$

Daniel 到达星球时，认为 John 比他年轻。注意，John 却认为 Daniel 到达星球时比 John 年轻。

这里涉及到的是同时的相对性问题。

Daniel 看来，在他到达星球（D 事件）的同时，John 比他年轻，这里的同时是指在 S' 系同时。

而 John 看来，在 D 事件的同时，Daniel 比 John 年轻，这里的同时指的是在 S 系看来同时。

因为同时是相对的，在 Daniel 看来是同时，在 John 看来却不是同时，也就是说，John 认为：

Daniel 拿自己在某时刻的年龄与 John 在另一时刻的年龄作比较以判断谁更年轻，Daniel 比错了

Daniel 则认为，是 John 错拿自己某时刻的年龄与 Daniel 在另一时刻的年龄作比较以判断谁年轻

故不同地点的年龄比较会出现我认为你比我年轻，你算出我比你年轻的似乎不可理解的“怪象”

若 Daniel 飞回地球，同地的同时是绝对的，比较就有客观意义，那么，飞回地球时究竟谁年轻？

为了回地球，Daniel 必须跳到 S'' 惯性系（这里避免加速度，规避广义相对论）。

一旦跳到 S''，会出现什么现象？

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件，前已求得，在 S 系观察：$(x_J, t_J) = (D_j, D_j/v)$

Lorentz 变换 $\Longrightarrow$ $(x''_J, t''_J) = \gamma[x_J + vt_J, t_J + vx_J/c^2] = \gamma[2D_j, (1+\beta^2)D_j/v]$

也即：在 S'' 系看，Daniel 跳到 S'' 系事件发生于 $\gamma D_j(1+\beta^2)/v$ 时刻

即：到达星球时，Daniel 的表指向 $t'_D = D_d/v$，其中 $D_d = D_j/\gamma$

Daniel 认为，在他到达星球的同时，地球上 John 的表指向：t_δ —— 如何求 t_δ

两种算法：(a) $t_\delta = t'_D/\gamma$ —— 地球相对于 Daniel 以速度 v 运动，时间变缓

(b) 在 S' 看，地球在 $x' = -D_d$ 处，故：$t_\delta = \gamma[t'_D + (v/c^2)\,x'] = \dfrac{D_d}{\gamma v} = \dfrac{t'_D}{\gamma}$

Daniel 到达星球时，认为 John 比他年轻。注意，John 却认为 Daniel 到达星球时比 John 年轻。

这里涉及到的是同时的相对性问题。

Daniel 看来，在他到达星球（D 事件）的同时，John 比他年轻，这里的同时是指在 S' 系同时。

而 John 看来，在 D 事件的同时，Daniel 比 John 年轻，这里的同时指的是在 S 系看来同时。

因为同时是相对的，在 Daniel 看来是同时，在 John 看来却不是同时，也就是说，John 认为：

Daniel 拿自己在某时刻的年龄与 John 在另一时刻的年龄作比较以判断谁更年轻，Daniel 比错了

Daniel 则认为，是 John 错拿自己某时刻的年龄与 Daniel 在另一时刻的年龄作比较以判断谁年轻

故不同地点的年龄比较会出现我认为你比我年轻，你算出我比你年轻的似乎不可理解的“怪象”

若 Daniel 飞回地球，同地的同时是绝对的，比较就有客观意义，那么，飞回地球时究竟谁年轻？

为了回地球，Daniel 必须跳到 S'' 惯性系（这里避免加速度，规避广义相对论）。

一旦跳到 S''，会出现什么现象？

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件，前已求得，在 S 系观察：$(x_J, t_J) = (D_j, D_j/v)$

Lorentz 变换 $\Longrightarrow$ $(x''_J, t''_J) = \gamma[x_J + vt_J, t_J + vx_J/c^2] = \gamma[2D_j, (1+\beta^2)D_j/v]$

也即：在 S'' 系看，Daniel 跳到 S'' 系事件发生于 $\gamma D_j(1+\beta^2)/v$ 时刻

注意在跳前，Danial 手表读数为：$t'_D = D_d/v = D_j/(\gamma v)$，跳到 S'' 后，手表读数仍为 t'_D

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件 $t''_J = \gamma D_j(1+\beta^2)/v$

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件 $t''_J = \gamma D_j(1+\beta^2)/v$

跳前，Danial 手表读数为：$t'_D = D_d/v = D_j/(\gamma v)$，跳到 S'' 后，手表读数仍为 t'_D

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件 $\quad t''_J = \gamma D_j(1+\beta^2)/v$

跳前，Danial 手表读数为：$t'_D = D_d/v = D_j/(\gamma v)$，跳到 S'' 后，手表读数仍为 t'_D

但 Danial 跳到 S'' 后，他的手表应显示 S'' 的时刻，也即 Daniel 必须校正他的手表(像跨时区旅行)

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件 $t''_J = \gamma D_j(1+\beta^2)/v$

跳前，Danial 手表读数为：$t'_D = D_d/v = D_j/(\gamma v)$，跳到 S'' 后，手表读数仍为 t'_D

但 Danial 跳到 S'' 后，他的手表应显示 S'' 的时刻，也即 Daniel 必须校正他的手表(像跨时区旅行)

在 S'' 系，跳跃事件 J 发生于 t''_J，而 Daniel 手表读数为 t'_D，

Let there be light

在 S'' 系： Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件 $t''_J = \gamma D_j(1+\beta^2)/v$

跳前，Danial 手表读数为：$t'_D = D_d/v = D_j/(\gamma v)$，跳到 S'' 后，手表读数仍为 t'_D

但 Danial 跳到 S'' 后，他的手表应显示 S'' 的时刻，也即 Daniel 必须校正他的手表(像跨时区旅行)

在 S'' 系，跳跃事件 J 发生于 t''_J，而 Daniel 手表读数为 t'_D，因此完成跳跃后

Let there be light

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件 $t''_J = \gamma D_j(1+\beta^2)/v$

跳前，Danial 手表读数为：$t'_D = D_d/v = D_j/(\gamma v)$，跳到 S'' 后，手表读数仍为 t'_D

但 Danial 跳到 S'' 后，他的手表应显示 S'' 的时刻，也即 Daniel 必须校正他的手表(像跨时区旅行)

在 S'' 系，跳跃事件 J 发生于 t''_J，而 Daniel 手表读数为 t'_D，因此完成跳跃后

Daniel 手表必须往前拨：$\Delta t = t''_J - t'_D = 2\gamma v D_j/c^2$

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件　$t''_J = \gamma D_j(1+\beta^2)/v$

跳前，Danial 手表读数为：$t'_D = D_d/v = D_j/(\gamma v)$，跳到 S'' 后，手表读数仍为 t'_D

但 Danial 跳到 S'' 后，他的手表应显示 S'' 的时刻，也即 Daniel 必须校正他的手表(像跨时区旅行)

在 S'' 系，跳跃事件 J 发生于 t''_J，而 Daniel 手表读数为 t'_D，因此完成跳跃后

Daniel 手表必须往前拨：$\Delta t = t''_J - t'_D = 2\gamma v D_j/c^2$　以保证其手表显示的是 S'' 的时刻

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件 $t''_J = \gamma D_j(1+\beta^2)/v$

跳前，Danial 手表读数为：$t'_D = D_d/v = D_j/(\gamma v)$，跳到 S'' 后，手表读数仍为 t'_D

但 Danial 跳到 S'' 后，他的手表应显示 S'' 的时刻，也即 Daniel 必须校正他的手表(像跨时区旅行)

在 S'' 系，跳跃事件 J 发生于 t''_J，而 Daniel 手表读数为 t'_D，因此完成跳跃后

Daniel 手表必须往前拨：$\Delta t = t''_J - t'_D = 2\gamma v D_j/c^2$ 以保证其手表显示的是 S'' 的时刻

Daniel 回到地球为 R 事件：$(x_R, t_R) = (0, 2D_j/v)$

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件 $t''_J = \gamma D_j(1+\beta^2)/v$

跳前，Danial 手表读数为：$t'_D = D_d/v = D_j/(\gamma v)$，跳到 S'' 后，手表读数仍为 t'_D

但 Danial 跳到 S'' 后，他的手表应显示 S'' 的时刻，也即 Daniel 必须校正他的手表(像跨时区旅行)

在 S'' 系，跳跃事件 J 发生于 t''_J，而 Daniel 手表读数为 t'_D，因此完成跳跃后

Daniel 手表必须往前拨：$\Delta t = t''_J - t'_D = 2\gamma v D_j/c^2$ 以保证其手表显示的是 S'' 的时刻

Daniel 回到地球为 R 事件：$(x_R, t_R) = (0, 2D_j/v) \quad \Longrightarrow \quad (x''_R, t''_R) = (2\gamma D_j, 2\gamma D_j/v)$

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件 $t''_J = \gamma D_j(1+\beta^2)/v$

跳前，Danial 手表读数为：$t'_D = D_d/v = D_j/(\gamma v)$，跳到 S'' 后，手表读数仍为 t'_D

但 Danial 跳到 S'' 后，他的手表应显示 S'' 的时刻，也即 Daniel 必须校正他的手表(像跨时区旅行)

在 S'' 系，跳跃事件 J 发生于 t''_J，而 Daniel 手表读数为 t'_D，因此完成跳跃后

Daniel 手表必须往前拨：$\Delta t = t''_J - t'_D = 2\gamma v D_j/c^2$ 以保证其手表显示的是 S'' 的时刻

Daniel 回到地球为 R 事件：$(x_R, t_R) = (0, 2D_j/v) \quad \Longrightarrow \quad (x''_R, t''_R) = (2\gamma D_j, 2\gamma D_j/v)$

故回到地球时，Daniel 手表读数：$t''_R = 2\gamma D_j/v$,

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件 $t''_J = \gamma D_j(1+\beta^2)/v$

跳前，Danial 手表读数为：$t'_D = D_d/v = D_j/(\gamma v)$，跳到 S'' 后，手表读数仍为 t'_D

但 Danial 跳到 S'' 后，他的手表应显示 S'' 的时刻，也即 Daniel 必须校正他的手表(像跨时区旅行)

在 S'' 系，跳跃事件 J 发生于 t''_J，而 Daniel 手表读数为 t'_D，因此完成跳跃后

Daniel 手表必须往前拨：$\Delta t = t''_J - t'_D = 2\gamma v D_j/c^2$ 以保证其手表显示的是 S'' 的时刻

Daniel 回到地球为 R 事件：$(x_R, t_R) = (0, 2D_j/v) \quad \Longrightarrow \quad (x''_R, t''_R) = (2\gamma D_j, 2\gamma D_j/v)$

故回到地球时，Daniel 手表读数：$t''_R = 2\gamma D_j/v$， 记得出发时 Daniel 手表读数为 0

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件 $t''_J = \gamma D_j(1+\beta^2)/v$

跳前，Danial 手表读数为：$t'_D = D_d/v = D_j/(\gamma v)$，跳到 S'' 后，手表读数仍为 t'_D

但 Danial 跳到 S'' 后，他的手表应显示 S'' 的时刻，也即 Daniel 必须校正他的手表(像跨时区旅行)

在 S'' 系，跳跃事件 J 发生于 t''_J，而 Daniel 手表读数为 t'_D，因此完成跳跃后

Daniel 手表必须往前拨：$\Delta t = t''_J - t'_D = 2\gamma v D_j/c^2$ 以保证其手表显示的是 S'' 的时刻

Daniel 回到地球为 R 事件：$(x_R, t_R) = (0, 2D_j/v) \quad \Longrightarrow \quad (x''_R, t''_R) = (2\gamma D_j, 2\gamma D_j/v)$

故回到地球时，Daniel 手表读数：$t''_R = 2\gamma D_j/v$， 记得出发时 Daniel 手表读数为 0

因此，Daniel 老了：$t''_R - 0 - \Delta t = 2D_j/(\gamma v)$

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件 $t''_J = \gamma D_j(1+\beta^2)/v$

跳前，Danial 手表读数为：$t'_D = D_d/v = D_j/(\gamma v)$，跳到 S'' 后，手表读数仍为 t'_D

但 Danial 跳到 S'' 后，他的手表应显示 S'' 的时刻，也即 Daniel 必须校正他的手表(像跨时区旅行)

在 S'' 系，跳跃事件 J 发生于 t''_J，而 Daniel 手表读数为 t'_D，因此完成跳跃后

Daniel 手表必须往前拨：$\Delta t = t''_J - t'_D = 2\gamma v D_j/c^2$ 以保证其手表显示的是 S'' 的时刻

Daniel 回到地球为 R 事件：$(x_R, t_R) = (0, 2D_j/v) \quad \Longrightarrow \quad (x''_R, t''_R) = (2\gamma D_j, 2\gamma D_j/v)$

故回到地球时，Daniel 手表读数：$t''_R = 2\gamma D_j/v$， 记得出发时 Daniel 手表读数为 0

因此，Daniel 老了：$t''_R - 0 - \Delta t = 2D_j/(\gamma v)$ Dianie 曾经把手表往前拨了 Δt，这部分应扣去

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件 $t''_J = \gamma D_j(1+\beta^2)/v$

跳前，Danial 手表读数为：$t'_D = D_d/v = D_j/(\gamma v)$，跳到 S'' 后，手表读数仍为 t'_D

但 Danial 跳到 S'' 后，他的手表应显示 S'' 的时刻，也即 Daniel 必须校正他的手表(像跨时区旅行)

在 S'' 系，跳跃事件 J 发生于 t''_J，而 Daniel 手表读数为 t'_D，因此完成跳跃后

Daniel 手表必须往前拨：$\Delta t = t''_J - t'_D = 2\gamma v D_j/c^2$ 以保证其手表显示的是 S'' 的时刻

Daniel 回到地球为 R 事件：$(x_R, t_R) = (0, 2D_j/v) \quad \Longrightarrow \quad (x''_R, t''_R) = (2\gamma D_j, 2\gamma D_j/v)$

故回到地球时，Daniel 手表读数：$t''_R = 2\gamma D_j/v$， 记得出发时 Daniel 手表读数为 0

因此，Daniel 老了：$t''_R - 0 - \Delta t = 2D_j/(\gamma v)$ Dianie 曾经把手表往前拨了 Δt，这部分应扣去

而 John 则老了：$t_R - 0 = 2D_j/v$

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件　$t''_J = \gamma D_j(1+\beta^2)/v$

跳前，Danial 手表读数为：$t'_D = D_d/v = D_j/(\gamma v)$，跳到 S'' 后，手表读数仍为 t'_D

但 Danial 跳到 S'' 后，他的手表应显示 S'' 的时刻，也即 Daniel 必须校正他的手表(像跨时区旅行)

在 S'' 系，跳跃事件 J 发生于 t''_J，而 Daniel 手表读数为 t'_D，因此完成跳跃后

Daniel 手表必须往前拨：$\Delta t = t''_J - t'_D = 2\gamma v D_j/c^2$　以保证其手表显示的是 S'' 的时刻

Daniel 回到地球为 R 事件：$(x_R, t_R) = (0, 2D_j/v) \quad \Longrightarrow \quad (x''_R, t''_R) = (2\gamma D_j, 2\gamma D_j/v)$

故回到地球时，Daniel 手表读数：$t''_R = 2\gamma D_j/v$，　记得出发时 Daniel 手表读数为 0

因此，Daniel 老了：$t''_R - 0 - \Delta t = 2D_j/(\gamma v)$　　Dianie 曾经把手表往前拨了 Δt，这部分应扣去

而 John 则老了：$t_R - 0 = 2D_j/v$

Daniel 比 John 年轻了：$\dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件 $t''_J = \gamma D_j(1+\beta^2)/v$

跳前，Danial 手表读数为：$t'_D = D_d/v = D_j/(\gamma v)$，跳到 S'' 后，手表读数仍为 t'_D

但 Danial 跳到 S'' 后，他的手表应显示 S'' 的时刻，也即 Daniel 必须校正他的手表(像跨时区旅行)

在 S'' 系，跳跃事件 J 发生于 t''_J，而 Daniel 手表读数为 t'_D，因此完成跳跃后

Daniel 手表必须往前拨：$\Delta t = t''_J - t'_D = 2\gamma v D_j/c^2$ 以保证其手表显示的是 S'' 的时刻

Daniel 回到地球为 R 事件：$(x_R, t_R) = (0, 2D_j/v) \quad \Longrightarrow \quad (x''_R, t''_R) = (2\gamma D_j, 2\gamma D_j/v)$

故回到地球时，Daniel 手表读数：$t''_R = 2\gamma D_j/v$， 记得出发时 Daniel 手表读数为 0

因此，Daniel 老了：$t''_R - 0 - \Delta t = 2D_j/(\gamma v)$ Dianie 曾经把手表往前拨了 Δt，这部分应扣去

而 John 则老了：$t_R - 0 = 2D_j/v$

Daniel 比 John 年轻了：$\dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$ —— 与 S 系的计算相同。

Let there be light

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件 $t''_J = \gamma D_j(1+\beta^2)/v$

跳前，Danial 手表读数为：$t'_D = D_d/v = D_j/(\gamma v)$，跳到 S'' 后，手表读数仍为 t'_D

但 Danial 跳到 S'' 后，他的手表应显示 S'' 的时刻，也即 Daniel 必须校正他的手表(像跨时区旅行)

在 S'' 系，跳跃事件 J 发生于 t''_J，而 Daniel 手表读数为 t'_D，因此完成跳跃后

Daniel 手表必须往前拨：$\Delta t = t''_J - t'_D = 2\gamma v D_j/c^2$ 以保证其手表显示的是 S'' 的时刻

Daniel 回到地球为 R 事件：$(x_R, t_R) = (0, 2D_j/v) \implies (x''_R, t''_R) = (2\gamma D_j, 2\gamma D_j/v)$

故回到地球时，Daniel 手表读数：$t''_R = 2\gamma D_j/v$， 记得出发时 Daniel 手表读数为 0

因此，Daniel 老了：$t''_R - 0 - \Delta t = 2D_j/(\gamma v)$ Dianie 曾经把手表往前拨了 Δt，这部分应扣去

而 John 则老了：$t_R - 0 = 2D_j/v$

Daniel 比 John 年轻了：$\dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$ —— 与 S 系的计算相同。 客观上，Daniel 较为年轻。

Let there be light

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件 $\quad t''_J = \gamma D_j(1+\beta^2)/v$

跳前，Danial 手表读数为：$t'_D = D_d/v = D_j/(\gamma v)$，跳到 S'' 后，手表读数仍为 t'_D

但 Danial 跳到 S'' 后，他的手表应显示 S'' 的时刻，也即 Daniel 必须校正他的手表(像跨时区旅行)

在 S'' 系，跳跃事件 J 发生于 t''_J，而 Daniel 手表读数为 t'_D，因此完成跳跃后

Daniel 手表必须往前拨：$\Delta t = t''_J - t'_D = 2\gamma v D_j/c^2$ 以保证其手表显示的是 S'' 的时刻

Daniel 回到地球为 R 事件：$(x_R, t_R) = (0, 2D_j/v) \quad \Longrightarrow \quad (x''_R, t''_R) = (2\gamma D_j, 2\gamma D_j/v)$

故回到地球时，Daniel 手表读数：$t''_R = 2\gamma D_j/v$，记得出发时 Daniel 手表读数为 0

因此，Daniel 老了：$t''_R - 0 - \Delta t = 2D_j/(\gamma v)$ Dianie 曾经把手表往前拨了 Δt，这部分应扣去

而 John 则老了：$t_R - 0 = 2D_j/v$

Daniel 比 John 年轻了：$\dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$ —— 与 S 系的计算相同。 客观上，Daniel 较为年轻。

自然界中的相对论效应 —— 铯频标原子钟

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件　$t''_J = \gamma D_j(1+\beta^2)/v$

跳前，Danial 手表读数为：$t'_D = D_d/v = D_j/(\gamma v)$，跳到 S'' 后，手表读数仍为 t'_D

但 Danial 跳到 S'' 后，他的手表应显示 S'' 的时刻，也即 Daniel 必须校正他的手表(像跨时区旅行)

在 S'' 系，跳跃事件 J 发生于 t''_J，而 Daniel 手表读数为 t'_D，因此完成跳跃后

Daniel 手表必须往前拨：$\Delta t = t''_J - t'_D = 2\gamma v D_j/c^2$　以保证其手表显示的是 S'' 的时刻

Daniel 回到地球为 R 事件：$(x_R, t_R) = (0, 2D_j/v) \quad \Longrightarrow \quad (x''_R, t''_R) = (2\gamma D_j, 2\gamma D_j/v)$

故回到地球时，Daniel 手表读数：$t''_R = 2\gamma D_j/v$，　记得出发时 Daniel 手表读数为 0

因此，Daniel 老了：$t''_R - 0 - \Delta t = 2D_j/(\gamma v)$　　Dianie 曾经把手表往前拨了 Δt，这部分应扣去

而 John 则老了：$t_R - 0 = 2D_j/v$

Daniel 比 John 年轻了：$\dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$　—— 与 S 系的计算相同。　客观上，Daniel 较为年轻。

自然界中的相对论效应 —— 铯频标原子钟

1972 年两个校准的铯频标原子钟，一个放在超音速飞机绕地球一周，一个留在地球

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件 $t''_J=\gamma D_j(1+\beta^2)/v$

跳前，Danial 手表读数为：$t'_D=D_d/v=D_j/(\gamma v)$，跳到 S'' 后，手表读数仍为 t'_D

但 Danial 跳到 S'' 后，他的手表应显示 S'' 的时刻，也即 Daniel 必须校正他的手表(像跨时区旅行)

在 S'' 系，跳跃事件 J 发生于 t''_J，而 Daniel 手表读数为 t'_D，因此完成跳跃后

Daniel 手表必须往前拨：$\Delta t=t''_J-t'_D=2\gamma v D_j/c^2$ 以保证其手表显示的是 S'' 的时刻

Daniel 回到地球为 R 事件：$(x_R,t_R)=(0,2D_j/v) \quad\Longrightarrow\quad (x''_R,t''_R)=(2\gamma D_j,2\gamma D_j/v)$

故回到地球时，Daniel 手表读数：$t''_R=2\gamma D_j/v$， 记得出发时 Daniel 手表读数为 0

因此，Daniel 老了：$t''_R-0-\Delta t=2D_j/(\gamma v)$ Dianie 曾经把手表往前拨了 Δt，这部分应扣去

而 John 则老了：$t_R-0=2D_j/v$

Daniel 比 John 年轻了：$\dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma-1)$ —— 与 S 系的计算相同。 客观上，Daniel 较为年轻。

自然界中的相对论效应 —— 铯频标原子钟

1972 年两个校准的铯频标原子钟，一个放在超音速飞机绕地球一周，一个留在地球

实验发现：飞过的钟慢了 10^{-7} 秒（原子钟精度为 10^{-13} 秒。）

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件 $t''_J = \gamma D_j(1+\beta^2)/v$

跳前，Danial 手表读数为：$t'_D = D_d/v = D_j/(\gamma v)$，跳到 S'' 后，手表读数仍为 t'_D

但 Danial 跳到 S'' 后，他的手表应显示 S'' 的时刻，也即 Daniel 必须校正他的手表(像跨时区旅行)

在 S'' 系，跳跃事件 J 发生于 t''_J，而 Daniel 手表读数为 t'_D，因此完成跳跃后

Daniel 手表必须往前拨：$\Delta t = t''_J - t'_D = 2\gamma v D_j/c^2$ 以保证其手表显示的是 S'' 的时刻

Daniel 回到地球为 R 事件：$(x_R, t_R) = (0, 2D_j/v) \implies (x''_R, t''_R) = (2\gamma D_j, 2\gamma D_j/v)$

故回到地球时，Daniel 手表读数：$t''_R = 2\gamma D_j/v$， 记得出发时 Daniel 手表读数为 0

因此，Daniel 老了：$t''_R - 0 - \Delta t = 2D_j/(\gamma v)$ Dianie 曾经把手表往前拨了 Δt，这部分应扣去

而 John 则老了：$t_R - 0 = 2D_j/v$

Daniel 比 John 年轻了：$\dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$ —— 与 S 系的计算相同。 客观上，Daniel 较为年轻。

自然界中的相对论效应 —— 铯频标原子钟

1972 年两个校准的铯频标原子钟，一个放在超音速飞机绕地球一周，一个留在地球

实验发现：飞过的钟慢了 10^{-7} 秒（原子钟精度为 10^{-13} 秒。） —— Science **177**, 166

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件 $t''_J = \gamma D_j(1+\beta^2)/v$

跳前，Danial 手表读数为：$t'_D = D_d/v = D_j/(\gamma v)$，跳到 S'' 后，手表读数仍为 t'_D

但 Danial 跳到 S'' 后，他的手表应显示 S'' 的时刻，也即 Daniel 必须校正他的手表(像跨时区旅行)

在 S'' 系，跳跃事件 J 发生于 t''_J，而 Daniel 手表读数为 t'_D，因此完成跳跃后

Daniel 手表必须往前拨：$\Delta t = t''_J - t'_D = 2\gamma v D_j/c^2$ 以保证其手表显示的是 S'' 的时刻

Daniel 回到地球为 R 事件：$(x_R, t_R) = (0, 2D_j/v) \implies (x''_R, t''_R) = (2\gamma D_j, 2\gamma D_j/v)$

故回到地球时，Daniel 手表读数：$t''_R = 2\gamma D_j/v$， 记得出发时 Daniel 手表读数为 0

因此，Daniel 老了：$t''_R - 0 - \Delta t = 2D_j/(\gamma v)$ Dianie 曾经把手表往前拨了 Δt，这部分应扣去

而 John 则老了：$t_R - 0 = 2D_j/v$

Daniel 比 John 年轻了：$\dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$ —— 与 S 系的计算相同。 客观上，Daniel 较为年轻。

自然界中的相对论效应 —— 铯频标原子钟

1972 年两个校准的铯频标原子钟，一个放在超音速飞机绕地球一周，一个留在地球

实验发现：飞过的钟慢了 10^{-7} 秒（原子钟精度为 10^{-13} 秒。） —— Science **177**, 166

人类社会中的相对论效应 —— 老夫少妻现象。

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件 $t''_J = \gamma D_j(1+\beta^2)/v$

跳前，Danial 手表读数为：$t'_D = D_d/v = D_j/(\gamma v)$，跳到 S'' 后，手表读数仍为 t'_D

但 Danial 跳到 S'' 后，他的手表应显示 S'' 的时刻，也即 Daniel 必须校正他的手表(像跨时区旅行)

在 S'' 系，跳跃事件 J 发生于 t''_J，而 Daniel 手表读数为 t'_D，因此完成跳跃后

Daniel 手表必须往前拨：$\Delta t = t''_J - t'_D = 2\gamma v D_j/c^2$ 以保证其手表显示的是 S'' 的时刻

Daniel 回到地球为 R 事件：$(x_R, t_R) = (0, 2D_j/v) \quad \Longrightarrow \quad (x''_R, t''_R) = (2\gamma D_j, 2\gamma D_j/v)$

故回到地球时，Daniel 手表读数：$t''_R = 2\gamma D_j/v$， 记得出发时 Daniel 手表读数为 0

因此，Daniel 老了：$t''_R - 0 - \Delta t = 2D_j/(\gamma v)$ Dianie 曾经把手表往前拨了 Δt，这部分应扣去

而 John 则老了：$t_R - 0 = 2D_j/v$

Daniel 比 John 年轻了：$\dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$ —— 与 S 系的计算相同。 客观上，Daniel 较为年轻。

自然界中的相对论效应 —— 铯频标原子钟

1972 年两个校准的铯频标原子钟，一个放在超音速飞机绕地球一周，一个留在地球

实验发现：飞过的钟慢了 10^{-7} 秒（原子钟精度为 10^{-13} 秒。） —— Science **177**, 166

人类社会中的相对论效应 —— 老夫少妻现象。

往往老的一方“能量”较高，“运动速度”大。他们像 Daniel 一样比其孪生兄弟 John 年轻。外界却将其孪生兄弟 John 的年龄当成他们的年龄。实际上，他们像 Daniel 一样，比社会上替他们计算的年龄年轻

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件 $t''_J = \gamma D_j(1+\beta^2)/v$

跳前，Danial 手表读数为：$t'_D = D_d/v = D_j/(\gamma v)$，跳到 S'' 后，手表读数仍为 t'_D

但 Danial 跳到 S'' 后，他的手表应显示 S'' 的时刻，也即 Daniel 必须校正他的手表(像跨时区旅行)

在 S'' 系，跳跃事件 J 发生于 t''_J，而 Daniel 手表读数为 t'_D，因此完成跳跃后

Daniel 手表必须往前拨：$\Delta t = t''_J - t'_D = 2\gamma v D_j/c^2$ 以保证其手表显示的是 S'' 的时刻

Daniel 回到地球为 R 事件：$(x_R, t_R) = (0, 2D_j/v) \quad \Longrightarrow \quad (x''_R, t''_R) = (2\gamma D_j, 2\gamma D_j/v)$

故回到地球时，Daniel 手表读数：$t''_R = 2\gamma D_j/v$， 记得出发时 Daniel 手表读数为 0

因此，Daniel 老了：$t''_R - 0 - \Delta t = 2D_j/(\gamma v)$ Dianie 曾经把手表往前拨了 Δt，这部分应扣去

而 John 则老了：$t_R - 0 = 2D_j/v$

Daniel 比 John 年轻了：$\dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$ —— 与 S 系的计算相同。 客观上，Daniel 较为年轻。

自然界中的相对论效应 —— 铯频标原子钟

1972 年两个校准的铯频标原子钟，一个放在超音速飞机绕地球一周，一个留在地球

实验发现：飞过的钟慢了 10^{-7} 秒（原子钟精度为 10^{-13} 秒。） —— Science **177**, 166

人类社会中的相对论效应 —— 老夫少妻现象。

往往老的一方“能量”较高，“运动速度”大。他们像 Daniel 一样比其孪生兄弟 John 年轻。外界却将其孪生兄弟 John 的年龄当成他们的年龄。实际上，他们像 Daniel 一样，比社会上替他们计算的年龄年轻 —— Pseudo-Science **8**, 88

Let there be light

在 S'' 系：Daniel 跳到 S'' 系的事件为 J 事件 $\quad t''_J = \gamma D_j(1+\beta^2)/v$

跳前，Danial 手表读数为：$t'_D = D_d/v = D_j/(\gamma v)$，跳到 S'' 后，手表读数仍为 t'_D

但 Danial 跳到 S'' 后，他的手表应显示 S'' 的时刻，也即 Daniel 必须校正他的手表(像跨时区旅行)

在 S'' 系，跳跃事件 J 发生于 t''_J，而 Daniel 手表读数为 t'_D，因此完成跳跃后

Daniel 手表必须往前拨：$\Delta t = t''_J - t'_D = 2\gamma v D_j/c^2$ 以保证其手表显示的是 S'' 的时刻

Daniel 回到地球为 R 事件：$(x_R, t_R) = (0, 2D_j/v) \quad \Longrightarrow \quad (x''_R, t''_R) = (2\gamma D_j, 2\gamma D_j/v)$

故回到地球时，Daniel 手表读数：$t''_R = 2\gamma D_j/v$， 记得出发时 Daniel 手表读数为 0

因此，Daniel 老了：$t''_R - 0 - \Delta t = 2D_j/(\gamma v)$ Dianie 曾经把手表往前拨了 Δt，这部分应扣去

而 John 则老了：$t_R - 0 = 2D_j/v$

Daniel 比 John 年轻了：$\dfrac{2D_j}{\gamma v}(\gamma - 1)$ —— 与 S 系的计算相同。 客观上，Daniel 较为年轻。

自然界中的相对论效应 —— 铯频标原子钟

1972 年两个校准的铯频标原子钟，一个放在超音速飞机绕地球一周，一个留在地球

实验发现：飞过的钟慢了 10^{-7} 秒（原子钟精度为 10^{-13} 秒。） —— Science **177**, 166

人类社会中的相对论效应 —— 老夫少妻现象。

往往老的一方“能量”较高，“运动速度”大。他们像 Daniel 一样比其孪生兄弟 John 年轻。外界却将其孪生兄弟 John 的年龄当成他们的年龄。实际上，他们像 Daniel 一样，比社会上替他们计算的年龄年轻 —— Pseudo-Science **8**, 88

例 2：仓库梯子佯谬

有一个 $l_0 = 10$ 米长的梯子想放进农夫 $d_0 = 9$ 米长的仓库中，农夫认为只要奔跑者以 $v = 0.6c$ 的速度拿着梯子奔跑，由于 Lorentz 收缩，梯子长度变为 $l = l_0/\gamma = 8 < d_0$，仓库即能装进梯子。而奔跑者则认为，仓库在以速度 $v = 0.6c$ 运动，Lorentz 收缩使仓库的长度变为 $d = d_0/\gamma = 7.2 < l_0$，梯子更放不进去了。

例 2：仓库梯子佯谬

有一个 $l_0 = 10$ 米长的梯子想放进农夫 $d_0 = 9$ 米长的仓库中，农夫认为只要奔跑者以 $v = 0.6c$ 的速度拿着梯子奔跑，由于 Lorentz 收缩，梯子长度变为 $l = l_0/\gamma = 8 < d_0$，仓库即能装进梯子。而奔跑者则认为，仓库在以速度 $v = 0.6c$ 运动，Lorentz 收缩使仓库的长度变为 $d = d_0/\gamma = 7.2 < l_0$，梯子更放不进去了。

仓库和梯子惯性系分别为 S 和 S' —— 特殊相关惯性系

例 2：仓库梯子佯谬

有一个 $l_0 = 10$ 米长的梯子想放进农夫 $d_0 = 9$ 米长的仓库中，农夫认为只要奔跑者以 $v = 0.6c$ 的速度拿着梯子奔跑，由于 Lorentz 收缩，梯子长度变为 $l = l_0/\gamma = 8 < d_0$，仓库即能装进梯子。而奔跑者则认为，仓库在以速度 $v = 0.6c$ 运动，Lorentz 收缩使仓库的长度变为 $d = d_0/\gamma = 7.2 < l_0$，梯子更放不进去了。

仓库和梯子惯性系分别为 S 和 S' —— 特殊相关惯性系 梯子前端到达门为：$t = t' = 0$

例 2：仓库梯子佯谬

有一个 $l_0 = 10$ 米长的梯子想放进农夫 $d_0 = 9$ 米长的仓库中，农夫认为只要奔跑者以 $v = 0.6c$ 的速度拿着梯子奔跑，由于 Lorentz 收缩，梯子长度变为 $l = l_0/\gamma = 8 < d_0$，仓库即能装进梯子。而奔跑者则认为，仓库在以速度 $v = 0.6c$ 运动，Lorentz 收缩使仓库的长度变为 $d = d_0/\gamma = 7.2 < l_0$，梯子更放不进去了。

仓库和梯子惯性系分别为 S 和 S' —— 特殊相关惯性系　　梯子前端到达门为：$t = t' = 0$

梯子前端到达墙壁为 A 事件，梯子后端到达门为 B 事件

例 2：仓库梯子佯谬

有一个 $l_0 = 10$ 米长的梯子想放进农夫 $d_0 = 9$ 米长的仓库中，农夫认为只要奔跑者以 $v = 0.6c$ 的速度拿着梯子奔跑，由于 Lorentz 收缩，梯子长度变为 $l = l_0/\gamma = 8 < d_0$，仓库即能装进梯子。而奔跑者则认为，仓库在以速度 $v = 0.6c$ 运动，Lorentz 收缩使仓库的长度变为 $d = d_0/\gamma = 7.2 < l_0$，梯子更放不进去了。

仓库和梯子惯性系分别为 S 和 S' —— 特殊相关惯性系　　梯子前端到达门为：$t = t' = 0$

梯子前端到达墙壁为 A 事件，梯子后端到达门为 B 事件

$x_A = d_0, \quad t_A = d_0/v = 9/0.6,$

例 2：仓库梯子佯谬

有一个 $l_0 = 10$ 米长的梯子想放进农夫 $d_0 = 9$ 米长的仓库中，农夫认为只要奔跑者以 $v = 0.6c$ 的速度拿着梯子奔跑，由于 Lorentz 收缩，梯子长度变为 $l = l_0/\gamma = 8 < d_0$，仓库即能装进梯子。而奔跑者则认为，仓库在以速度 $v = 0.6c$ 运动，Lorentz 收缩使仓库的长度变为 $d = d_0/\gamma = 7.2 < l_0$，梯子更放不进去了。

仓库和梯子惯性系分别为 S 和 S' —— 特殊相关惯性系　　梯子前端到达门为：$t = t' = 0$

梯子前端到达墙壁为 A 事件，梯子后端到达门为 B 事件

$$x_A = d_0, \quad t_A = d_0/v = 9/0.6, \qquad \Longrightarrow \qquad t'_A = \gamma(t_A - x_A v/c^2) = d_0/(\gamma v) = 7.2/0.6$$

例 2：仓库梯子佯谬

有一个 $l_0 = 10$ 米长的梯子想放进农夫 $d_0 = 9$ 米长的仓库中，农夫认为只要奔跑者以 $v = 0.6c$ 的速度拿着梯子奔跑，由于 Lorentz 收缩，梯子长度变为 $l = l_0/\gamma = 8 < d_0$，仓库即能装进梯子。而奔跑者则认为，仓库在以速度 $v = 0.6c$ 运动，Lorentz 收缩使仓库的长度变为 $d = d_0/\gamma = 7.2 < l_0$，梯子更放不进去了。

仓库和梯子惯性系分别为 S 和 S' —— 特殊相关惯性系　　梯子前端到达门为：$t = t' = 0$

梯子前端到达墙壁为 A 事件，梯子后端到达门为 B 事件

$$x_A = d_0, \quad t_A = d_0/v = 9/0.6, \qquad \Longrightarrow \qquad t'_A = \gamma(t_A - x_A v/c^2) = d_0/(\gamma v) = 7.2/0.6$$

$$x_B = 0, \quad t_B = (l_0/\gamma)/v = 8/0.6$$

例 2：仓库梯子佯谬

有一个 $l_0 = 10$ 米长的梯子想放进农夫 $d_0 = 9$ 米长的仓库中，农夫认为只要奔跑者以 $v = 0.6c$ 的速度拿着梯子奔跑，由于 Lorentz 收缩，梯子长度变为 $l = l_0/\gamma = 8 < d_0$，仓库即能装进梯子。而奔跑者则认为，仓库在以速度 $v = 0.6c$ 运动，Lorentz 收缩使仓库的长度变为 $d = d_0/\gamma = 7.2 < l_0$，梯子更放不进去了。

仓库和梯子惯性系分别为 S 和 S' —— 特殊相关惯性系　　梯子前端到达门为：$t = t' = 0$

梯子前端到达墙壁为 A 事件，梯子后端到达门为 B 事件

$$x_A = d_0, \quad t_A = d_0/v = 9/0.6, \qquad \Longrightarrow \qquad t'_A = \gamma(t_A - x_A v/c^2) = d_0/(\gamma v) = 7.2/0.6$$

$$x_B = 0, \quad t_B = (l_0/\gamma)/v = 8/0.6 \qquad \Longrightarrow \qquad t'_B = \gamma(t_B - x_B v/c^2) = l_0/v = 10/0.6$$

例 2：仓库梯子佯谬

有一个 $l_0 = 10$ 米长的梯子想放进农夫 $d_0 = 9$ 米长的仓库中，农夫认为只要奔跑者以 $v = 0.6c$ 的速度拿着梯子奔跑，由于 Lorentz 收缩，梯子长度变为 $l = l_0/\gamma = 8 < d_0$，仓库即能装进梯子。而奔跑者则认为，仓库在以速度 $v = 0.6c$ 运动，Lorentz 收缩使仓库的长度变为 $d = d_0/\gamma = 7.2 < l_0$，梯子更放不进去了。

仓库和梯子惯性系分别为 S 和 S' —— 特殊相关惯性系　　梯子前端到达门为：$t = t' = 0$

梯子前端到达墙壁为 A 事件，梯子后端到达门为 B 事件

$$x_A = d_0, \quad t_A = d_0/v = 9/0.6, \qquad \Longrightarrow \qquad t'_A = \gamma(t_A - x_A v/c^2) = d_0/(\gamma v) = 7.2/0.6$$

$$x_B = 0, \quad t_B = (l_0/\gamma)/v = 8/0.6 \qquad \Longrightarrow \qquad t'_B = \gamma(t_B - x_B v/c^2) = l_0/v = 10/0.6$$

农夫看来：$t_B < t_A$,

例 2：仓库梯子佯谬

有一个 $l_0 = 10$ 米长的梯子想放进农夫 $d_0 = 9$ 米长的仓库中，农夫认为只要奔跑者以 $v = 0.6c$ 的速度拿着梯子奔跑，由于 Lorentz 收缩，梯子长度变为 $l = l_0/\gamma = 8 < d_0$，仓库即能装进梯子。而奔跑者则认为，仓库在以速度 $v = 0.6c$ 运动，Lorentz 收缩使仓库的长度变为 $d = d_0/\gamma = 7.2 < l_0$，梯子更放不进去了。

仓库和梯子惯性系分别为 S 和 S' —— 特殊相关惯性系　　梯子前端到达门为：$t = t' = 0$

梯子前端到达墙壁为 A 事件，梯子后端到达门为 B 事件

$$x_A = d_0, \quad t_A = d_0/v = 9/0.6, \qquad \Longrightarrow \qquad t'_A = \gamma(t_A - x_A v/c^2) = d_0/(\gamma v) = 7.2/0.6$$

$$x_B = 0, \quad t_B = (l_0/\gamma)/v = 8/0.6 \qquad \Longrightarrow \qquad t'_B = \gamma(t_B - x_B v/c^2) = l_0/v = 10/0.6$$

农夫看来：$t_B < t_A$，

—— 梯子后端先进门前端再碰壁，故必有一个时刻，梯子前后两端同时在仓库里

例 2：仓库梯子佯谬

有一个 $l_0 = 10$ 米长的梯子想放进农夫 $d_0 = 9$ 米长的仓库中，农夫认为只要奔跑者以 $v = 0.6c$ 的速度拿着梯子奔跑，由于 Lorentz 收缩，梯子长度变为 $l = l_0/\gamma = 8 < d_0$，仓库即能装进梯子。而奔跑者则认为，仓库在以速度 $v = 0.6c$ 运动，Lorentz 收缩使仓库的长度变为 $d = d_0/\gamma = 7.2 < l_0$，梯子更放不进去了。

仓库和梯子惯性系分别为 S 和 S' —— 特殊相关惯性系　　梯子前端到达门为：$t = t' = 0$

梯子前端到达墙壁为 A 事件，梯子后端到达门为 B 事件

$$x_A = d_0, \quad t_A = d_0/v = 9/0.6, \qquad \Longrightarrow \qquad t'_A = \gamma(t_A - x_A v/c^2) = d_0/(\gamma v) = 7.2/0.6$$

$$x_B = 0, \quad t_B = (l_0/\gamma)/v = 8/0.6 \qquad \Longrightarrow \qquad t'_B = \gamma(t_B - x_B v/c^2) = l_0/v = 10/0.6$$

农夫看来：$t_B < t_A$,

—— 梯子后端先进门前端再碰壁，故必有一个时刻，梯子前后两端同时在仓库里

奔跑者看来：$t'_B > t'_A$,

例 2：仓库梯子佯谬

有一个 $l_0 = 10$ 米长的梯子想放进农夫 $d_0 = 9$ 米长的仓库中，农夫认为只要奔跑者以 $v = 0.6c$ 的速度拿着梯子奔跑，由于 Lorentz 收缩，梯子长度变为 $l = l_0/\gamma = 8 < d_0$，仓库即能装进梯子。而奔跑者则认为，仓库在以速度 $v = 0.6c$ 运动，Lorentz 收缩使仓库的长度变为 $d = d_0/\gamma = 7.2 < l_0$，梯子更放不进去了。

仓库和梯子惯性系分别为 S 和 S' —— 特殊相关惯性系　　梯子前端到达门为：$t = t' = 0$

梯子前端到达墙壁为 A 事件，梯子后端到达门为 B 事件

$$x_A = d_0, \quad t_A = d_0/v = 9/0.6, \qquad \Longrightarrow \qquad t'_A = \gamma(t_A - x_A v/c^2) = d_0/(\gamma v) = 7.2/0.6$$

$$x_B = 0, \quad t_B = (l_0/\gamma)/v = 8/0.6 \qquad \Longrightarrow \qquad t'_B = \gamma(t_B - x_B v/c^2) = l_0/v = 10/0.6$$

农夫看来：$t_B < t_A$,

—— 梯子后端先进门前端再碰壁，故必有一个时刻，梯子前后两端同时在仓库里

奔跑者看来：$t'_B > t'_A$,

—— 梯子前端已碰壁，后端还未到达门，梯子前后两端不可能同时在仓库里

例 2：仓库梯子佯谬

有一个 $l_0 = 10$ 米长的梯子想放进农夫 $d_0 = 9$ 米长的仓库中，农夫认为只要奔跑者以 $v = 0.6c$ 的速度拿着梯子奔跑，由于 Lorentz 收缩，梯子长度变为 $l = l_0/\gamma = 8 < d_0$，仓库即能装进梯子。而奔跑者则认为，仓库在以速度 $v = 0.6c$ 运动，Lorentz 收缩使仓库的长度变为 $d = d_0/\gamma = 7.2 < l_0$，梯子更放不进去了。

仓库和梯子惯性系分别为 S 和 S' —— 特殊相关惯性系　　梯子前端到达门为：$t = t' = 0$

梯子前端到达墙壁为 A 事件，梯子后端到达门为 B 事件

$$x_A = d_0,\quad t_A = d_0/v = 9/0.6, \qquad \Longrightarrow \qquad t'_A = \gamma(t_A - x_A v/c^2) = d_0/(\gamma v) = 7.2/0.6$$

$$x_B = 0,\quad t_B = (l_0/\gamma)/v = 8/0.6 \qquad \Longrightarrow \qquad t'_B = \gamma(t_B - x_B v/c^2) = l_0/v = 10/0.6$$

农夫看来：$t_B < t_A$，

—— 梯子后端先进门前端再碰壁，故必有一个时刻，梯子前后两端同时在仓库里

奔跑者看来：$t'_B > t'_A$，

—— 梯子前端已碰壁，后端还未到达门，梯子前后两端不可能同时在仓库里

由于同时的相对性，因此两者的说法都是对的。

例 2：仓库梯子佯谬

有一个 $l_0 = 10$ 米长的梯子想放进农夫 $d_0 = 9$ 米长的仓库中，农夫认为只要奔跑者以 $v = 0.6c$ 的速度拿着梯子奔跑，由于 Lorentz 收缩，梯子长度变为 $l = l_0/\gamma = 8 < d_0$，仓库即能装进梯子。而奔跑者则认为，仓库在以速度 $v = 0.6c$ 运动，Lorentz 收缩使仓库的长度变为 $d = d_0/\gamma = 7.2 < l_0$，梯子更放不进去了。

仓库和梯子惯性系分别为 S 和 S' —— 特殊相关惯性系　梯子前端到达门为：$t = t' = 0$

梯子前端到达墙壁为 A 事件，梯子后端到达门为 B 事件

$$x_A = d_0, \quad t_A = d_0/v = 9/0.6, \quad \Longrightarrow \quad t'_A = \gamma(t_A - x_A v/c^2) = d_0/(\gamma v) = 7.2/0.6$$

$$x_B = 0, \quad t_B = (l_0/\gamma)/v = 8/0.6 \quad \Longrightarrow \quad t'_B = \gamma(t_B - x_B v/c^2) = l_0/v = 10/0.6$$

农夫看来：$t_B < t_A$,

—— 梯子后端先进门前端再碰壁，故必有一个时刻，梯子前后两端同时在仓库里

奔跑者看来：$t'_B > t'_A$,

—— 梯子前端已碰壁，后端还未到达门，梯子前后两端不可能同时在仓库里

由于同时的相对性，因此两者的说法都是对的。但到底能否将梯子放进仓库呢？

例 2：仓库梯子佯谬

有一个 $l_0 = 10$ 米长的梯子想放进农夫 $d_0 = 9$ 米长的仓库中，农夫认为只要奔跑者以 $v = 0.6c$ 的速度拿着梯子奔跑，由于 Lorentz 收缩，梯子长度变为 $l = l_0/\gamma = 8 < d_0$，仓库即能装进梯子。而奔跑者则认为，仓库在以速度 $v = 0.6c$ 运动，Lorentz 收缩使仓库的长度变为 $d = d_0/\gamma = 7.2 < l_0$，梯子更放不进去了。

仓库和梯子惯性系分别为 S 和 S' —— 特殊相关惯性系　　梯子前端到达门为：$t = t' = 0$

梯子前端到达墙壁为 A 事件，梯子后端到达门为 B 事件

$$x_A = d_0, \quad t_A = d_0/v = 9/0.6, \qquad \Longrightarrow \qquad t'_A = \gamma(t_A - x_A v/c^2) = d_0/(\gamma v) = 7.2/0.6$$

$$x_B = 0, \quad t_B = (l_0/\gamma)/v = 8/0.6 \qquad \Longrightarrow \qquad t'_B = \gamma(t_B - x_B v/c^2) = l_0/v = 10/0.6$$

农夫看来：$t_B < t_A$，

—— 梯子后端先进门前端再碰壁，故必有一个时刻，梯子前后两端同时在仓库里

奔跑者看来：$t'_B > t'_A$，

—— 梯子前端已碰壁，后端还未到达门，梯子前后两端不可能同时在仓库里

由于同时的相对性，因此两者的说法都是对的。但到底能否将梯子放进仓库呢？

假设农夫在梯子进门时抓住梯子后端使之停下同时关门，能否把梯子关进仓库？

例 2：仓库梯子佯谬

有一个 $l_0 = 10$ 米长的梯子想放进农夫 $d_0 = 9$ 米长的仓库中，农夫认为只要奔跑者以 $v = 0.6c$ 的速度拿着梯子奔跑，由于 Lorentz 收缩，梯子长度变为 $l = l_0/\gamma = 8 < d_0$，仓库即能装进梯子。而奔跑者则认为，仓库在以速度 $v = 0.6c$ 运动，Lorentz 收缩使仓库的长度变为 $d = d_0/\gamma = 7.2 < l_0$，梯子更放不进去了。

仓库和梯子惯性系分别为 S 和 S' —— 特殊相关惯性系　　梯子前端到达门为：$t = t' = 0$

梯子前端到达墙壁为 A 事件，梯子后端到达门为 B 事件

$$x_A = d_0, \quad t_A = d_0/v = 9/0.6, \qquad \Longrightarrow \qquad t'_A = \gamma(t_A - x_A v/c^2) = d_0/(\gamma v) = 7.2/0.6$$

$$x_B = 0, \quad t_B = (l_0/\gamma)/v = 8/0.6 \qquad \Longrightarrow \qquad t'_B = \gamma(t_B - x_B v/c^2) = l_0/v = 10/0.6$$

农夫看来：$t_B < t_A$，

—— 梯子后端先进门前端再碰壁，故必有一个时刻，梯子前后两端同时在仓库里

奔跑者看来：$t'_B > t'_A$，

—— 梯子前端已碰壁，后端还未到达门，梯子前后两端不可能同时在仓库里

由于同时的相对性，因此两者的说法都是对的。但到底能否将梯子放进仓库呢？

假设农夫在梯子进门时抓住梯子后端使之停下同时关门，能否把梯子关进仓库？　　不能

例 2：仓库梯子佯谬

有一个 $l_0 = 10$ 米长的梯子想放进农夫 $d_0 = 9$ 米长的仓库中，农夫认为只要奔跑者以 $v = 0.6c$ 的速度拿着梯子奔跑，由于 Lorentz 收缩，梯子长度变为 $l = l_0/\gamma = 8 < d_0$，仓库即能装进梯子。而奔跑者则认为，仓库在以速度 $v = 0.6c$ 运动，Lorentz 收缩使仓库的长度变为 $d = d_0/\gamma = 7.2 < l_0$，梯子更放不进去了。

仓库和梯子惯性系分别为 S 和 S' —— 特殊相关惯性系　　梯子前端到达门为：$t = t' = 0$

梯子前端到达墙壁为 A 事件，梯子后端到达门为 B 事件

$$x_A = d_0, \quad t_A = d_0/v = 9/0.6, \quad \Longrightarrow \quad t'_A = \gamma(t_A - x_A v/c^2) = d_0/(\gamma v) = 7.2/0.6$$

$$x_B = 0, \quad t_B = (l_0/\gamma)/v = 8/0.6 \quad \Longrightarrow \quad t'_B = \gamma(t_B - x_B v/c^2) = l_0/v = 10/0.6$$

农夫看来：$t_B < t_A$，

—— 梯子后端先进门前端再碰壁，故必有一个时刻，梯子前后两端同时在仓库里

奔跑者看来：$t'_B > t'_A$，

—— 梯子前端已碰壁，后端还未到达门，梯子前后两端不可能同时在仓库里

由于同时的相对性，因此两者的说法都是对的。但到底能否将梯子放进仓库呢？

假设农夫在梯子进门时抓住梯子后端使之停下同时关门，能否把梯子关进仓库？　　不能

即使后端停止，前端仍在运动（因为信号传播速度有限），因此梯子将像手风琴一样被拉长。

例 2：仓库梯子佯谬

有一个 $l_0 = 10$ 米长的梯子想放进农夫 $d_0 = 9$ 米长的仓库中，农夫认为只要奔跑者以 $v = 0.6c$ 的速度拿着梯子奔跑，由于 Lorentz 收缩，梯子长度变为 $l = l_0/\gamma = 8 < d_0$，仓库即能装进梯子。而奔跑者则认为，仓库在以速度 $v = 0.6c$ 运动，Lorentz 收缩使仓库的长度变为 $d = d_0/\gamma = 7.2 < l_0$，梯子更放不进去了。

仓库和梯子惯性系分别为 S 和 S' —— 特殊相关惯性系　　梯子前端到达门为：$t = t' = 0$

梯子前端到达墙壁为 A 事件，梯子后端到达门为 B 事件

$$x_A = d_0,\quad t_A = d_0/v = 9/0.6, \qquad \Longrightarrow \qquad t'_A = \gamma(t_A - x_A v/c^2) = d_0/(\gamma v) = 7.2/0.6$$

$$x_B = 0,\quad t_B = (l_0/\gamma)/v = 8/0.6 \qquad \Longrightarrow \qquad t'_B = \gamma(t_B - x_B v/c^2) = l_0/v = 10/0.6$$

农夫看来：$t_B < t_A$,

—— 梯子后端先进门前端再碰壁，故必有一个时刻，梯子前后两端同时在仓库里

奔跑者看来：$t'_B > t'_A$,

—— 梯子前端已碰壁，后端还未到达门，梯子前后两端不可能同时在仓库里

由于同时的相对性，因此两者的说法都是对的。但到底能否将梯子放进仓库呢？

假设农夫在梯子进门时抓住梯子后端使之停下同时关门，能否把梯子关进仓库？　　不能

即使后端停止，前端仍在运动（因为信号传播速度有限），因此梯子将像手风琴一样被拉长。

最后结果，梯子前端必然撞墙，要么梯子断，要么墙穿洞。

例 2：仓库梯子佯谬

有一个 $l_0 = 10$ 米长的梯子想放进农夫 $d_0 = 9$ 米长的仓库中，农夫认为只要奔跑者以 $v = 0.6c$ 的速度拿着梯子奔跑，由于 Lorentz 收缩，梯子长度变为 $l = l_0/\gamma = 8 < d_0$，仓库即能装进梯子。而奔跑者则认为，仓库在以速度 $v = 0.6c$ 运动，Lorentz 收缩使仓库的长度变为 $d = d_0/\gamma = 7.2 < l_0$，梯子更放不进去了。

仓库和梯子惯性系分别为 S 和 S' —— 特殊相关惯性系　　梯子前端到达门为：$t = t' = 0$

梯子前端到达墙壁为 A 事件，梯子后端到达门为 B 事件

$$x_A = d_0, \quad t_A = d_0/v = 9/0.6, \qquad \Longrightarrow \qquad t'_A = \gamma(t_A - x_A v/c^2) = d_0/(\gamma v) = 7.2/0.6$$

$$x_B = 0, \quad t_B = (l_0/\gamma)/v = 8/0.6 \qquad \Longrightarrow \qquad t'_B = \gamma(t_B - x_B v/c^2) = l_0/v = 10/0.6$$

农夫看来：$t_B < t_A$，

—— 梯子后端先进门前端再碰壁，故必有一个时刻，梯子前后两端同时在仓库里

奔跑者看来：$t'_B > t'_A$，

—— 梯子前端已碰壁，后端还未到达门，梯子前后两端不可能同时在仓库里

由于同时的相对性，因此两者的说法都是对的。但到底能否将梯子放进仓库呢？

假设农夫在梯子进门时抓住梯子后端使之停下同时关门，能否把梯子关进仓库？　　不能

即使后端停止，前端仍在运动（因为信号传播速度有限），因此梯子将像手风琴一样被拉长。

最后结果，梯子前端必然撞墙，要么梯子断，要么墙穿洞。

思考：农夫在门处测到 B 事件后能否通知梯子另一端的人，使梯子前后两端同时停下？

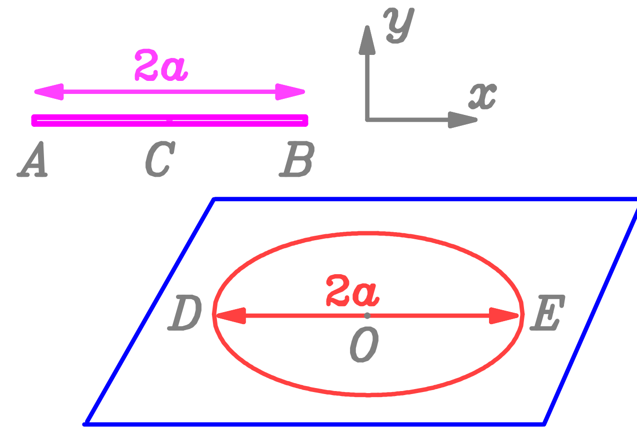
例 3：穿孔佯谬

如图，板上有直径为 $2a$ 的圆孔，以速度 u 沿 y 向运动，板厚度可略。有一杆静止长度 $2a$，以速度 v 沿 x 向运动，杆直径可略。设在某时刻杆中心 C 和板孔中心 O 刚好可以重合，试问杆能否穿过圆孔。

例 3：穿孔佯谬

如图，板上有直径为 $2a$ 的圆孔，以速度 u 沿 y 向运动，板厚度可略。有一杆静止长度 $2a$，以速度 v 沿 x 向运动，杆直径可略。设在某时刻杆中心 C 和板孔中心 O 刚好可以重合，试问杆能否穿过圆孔。

从板上看，杆运动，杆长缩短，杆短孔大，杆应能穿过圆孔。

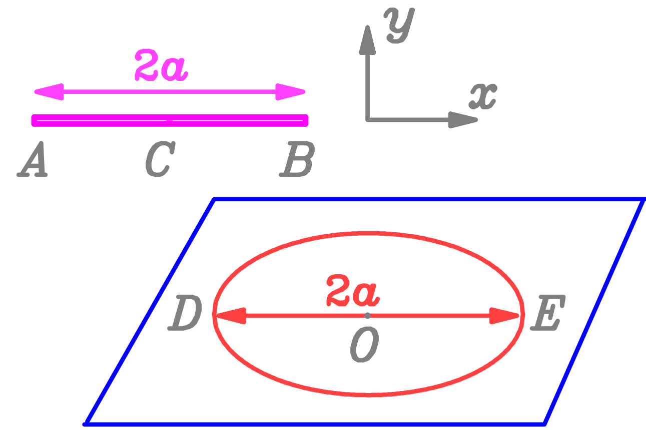


例 3：穿孔佯谬

如图，板上有直径为 $2a$ 的圆孔，以速度 u 沿 y 向运动，板厚度可略。有一杆静止长度 $2a$，以速度 v 沿 x 向运动，杆直径可略。设在某时刻杆中心 C 和板孔中心 O 刚好可以重合，试问杆能否穿过圆孔。

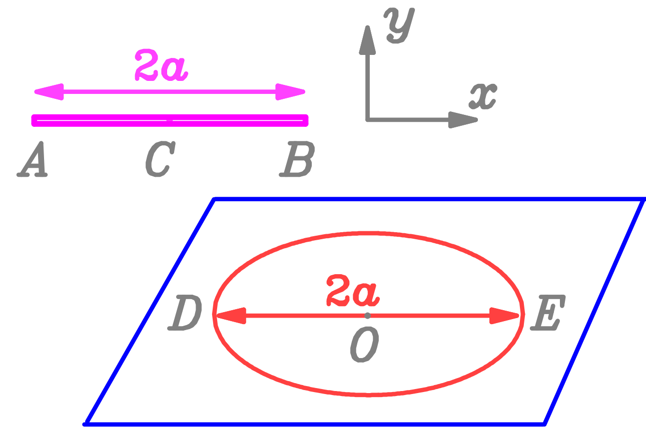
从板上看，杆运动，杆长缩短，杆短孔大，杆应能穿过圆孔。

从杆上看，圆孔在运动，孔径缩小，杆长孔小，杆无法穿过。



例 3：穿孔佯谬

如图，板上有直径为 $2a$ 的圆孔，以速度 u 沿 y 向运动，板厚度可略。有一杆静止长度 $2a$，以速度 v 沿 x 向运动，杆直径可略。设在某时刻杆中心 C 和板孔中心 O 刚好可以重合，试问杆能否穿过圆孔。



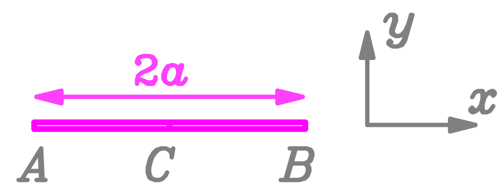
从板上看，杆运动，杆长缩短，杆短孔大，杆应能穿过圆孔。

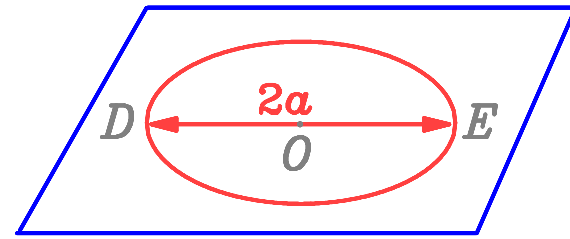
从杆上看，圆孔在运动，孔径缩小，杆长孔小，杆无法穿过。

有三个惯性系，S, S', 与 S_b，分别为静止、杆和板惯性系。

例 3：穿孔佯谬

如图，板上有直径为 $2a$ 的圆孔，以速度 u 沿 y 向运动，板厚度可略。有一杆静止长度 $2a$，以速度 v 沿 x 向运动，杆直径可略。设在某时刻杆中心 C 和板孔中心 O 刚好可以重合，试问杆能否穿过圆孔。





从板上看，杆运动，杆长缩短，杆短孔大，杆应能穿过圆孔。

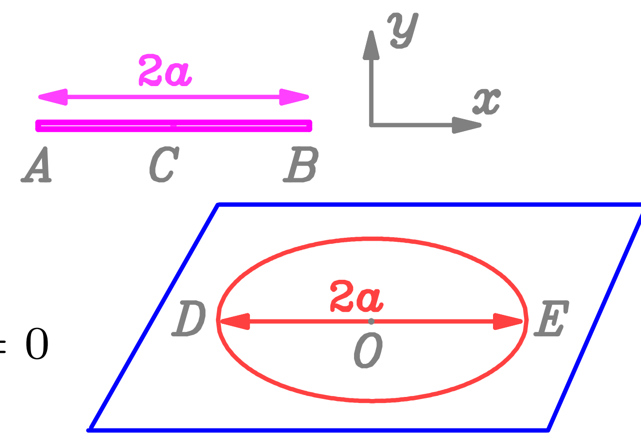
从杆上看，圆孔在运动，孔径缩小，杆长孔小，杆无法穿过。

有三个惯性系，S, S', 与 S_b，分别为静止、杆和板惯性系。

设 C 和 O 重合时三坐标系重合，取为公共零点：$t = t' = t_b = 0$

例3：穿孔佯谬

如图，板上有直径为 $2a$ 的圆孔，以速度 u 沿 y 向运动，板厚度可略。有一杆静止长度 $2a$，以速度 v 沿 x 向运动，杆直径可略。设在某时刻杆中心 C 和板孔中心 O 刚好可以重合，试问杆能否穿过圆孔。



从板上看，杆运动，杆长缩短，杆短孔大，杆应能穿过圆孔。

从杆上看，圆孔在运动，孔径缩小，杆长孔小，杆无法穿过。

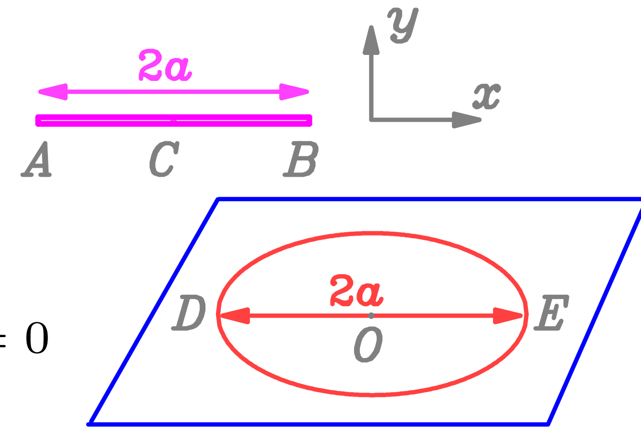
有三个惯性系，S, S', 与 S_b，分别为静止、杆和板惯性系。

设 C 和 O 重合时三坐标系重合，取为公共零点：$t = t' = t_b = 0$

现在在杆惯性系 S' 系观察板孔边缘点 E 的运动轨迹。

例 3：穿孔佯谬

如图，板上有直径为 $2a$ 的圆孔，以速度 u 沿 y 向运动，板厚度可略。有一杆静止长度 $2a$，以速度 v 沿 x 向运动，杆直径可略。设在某时刻杆中心 C 和板孔中心 O 刚好可以重合，试问杆能否穿过圆孔。



从板上看，杆运动，杆长缩短，杆短孔大，杆应能穿过圆孔。

从杆上看，圆孔在运动，孔径缩小，杆长孔小，杆无法穿过。

有三个惯性系，S, S', 与 S_b，分别为静止、杆和板惯性系。

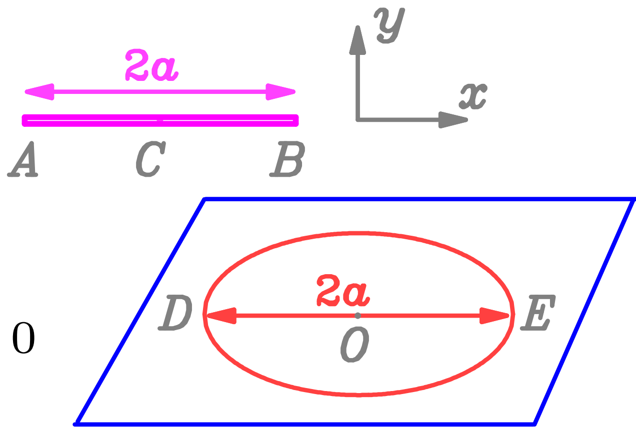
设 C 和 O 重合时三坐标系重合，取为公共零点：$t = t' = t_b = 0$

现在在杆惯性系 S' 系观察板孔边缘点 E 的运动轨迹。

在板惯性系 S_b：$x_b = a$，$y_b = 0$，$t_b = t_b$

例 3：穿孔佯谬

如图，板上有直径为 $2a$ 的圆孔，以速度 u 沿 y 向运动，板厚度可略。有一杆静止长度 $2a$，以速度 v 沿 x 向运动，杆直径可略。设在某时刻杆中心 C 和板孔中心 O 刚好可以重合，试问杆能否穿过圆孔。



从板上看，杆运动，杆长缩短，杆短孔大，杆应能穿过圆孔。

从杆上看，圆孔在运动，孔径缩小，杆长孔小，杆无法穿过。

有三个惯性系，S, S', 与 S_b，分别为静止、杆和板惯性系。

设 C 和 O 重合时三坐标系重合，取为公共零点：$t = t' = t_b = 0$

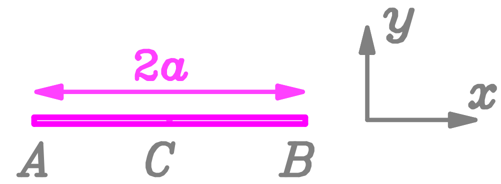
现在在杆惯性系 S' 系观察板孔边缘点 E 的运动轨迹。

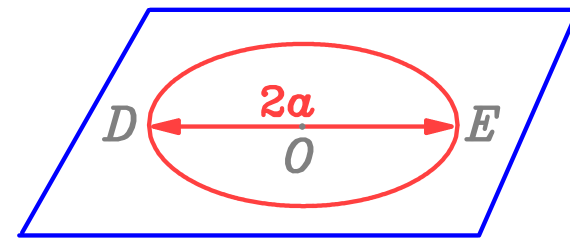
在板惯性系 S_b：$x_b = a$，$y_b = 0$，$t_b = t_b$

变换到 S 系，注意 S_b 相对于 S 以速度 u 沿 y 向运动：

例3：穿孔佯谬

如图，板上有直径为 $2a$ 的圆孔，以速度 u 沿 y 向运动，板厚度可略。有一杆静止长度 $2a$，以速度 v 沿 x 向运动，杆直径可略。设在某时刻杆中心 C 和板孔中心 O 刚好可以重合，试问杆能否穿过圆孔。





从板上看，杆运动，杆长缩短，杆短孔大，杆应能穿过圆孔。

从杆上看，圆孔在运动，孔径缩小，杆长孔小，杆无法穿过。

有三个惯性系，S, S', 与 S_b，分别为静止、杆和板惯性系。

设 C 和 O 重合时三坐标系重合，取为公共零点：$t = t' = t_b = 0$

现在在杆惯性系 S' 系观察板孔边缘点 E 的运动轨迹。

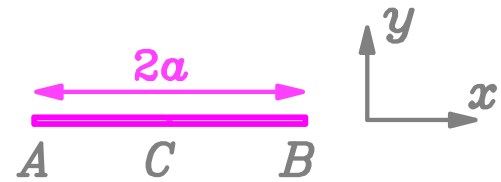
在板惯性系 S_b：$x_b = a$，$y_b = 0$，$t_b = t_b$

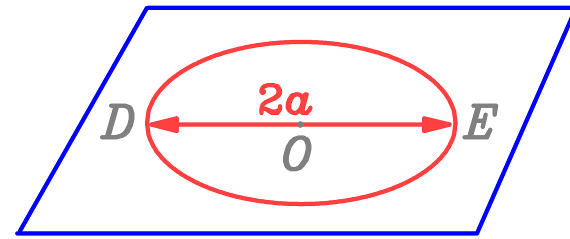
变换到 S 系，注意 S_b 相对于 S 以速度 u 沿 y 向运动：

$$x = x_b,\ y = \gamma_u(y_b + ut_b),\ t = \gamma_u(t_b + uy_b/c^2)$$

例 3：穿孔佯谬

如图，板上有直径为 $2a$ 的圆孔，以速度 u 沿 y 向运动，板厚度可略。有一杆静止长度 $2a$，以速度 v 沿 x 向运动，杆直径可略。设在某时刻杆中心 C 和板孔中心 O 刚好可以重合，试问杆能否穿过圆孔。





从板上看，杆运动，杆长缩短，杆短孔大，杆应能穿过圆孔。

从杆上看，圆孔在运动，孔径缩小，杆长孔小，杆无法穿过。

有三个惯性系，S, S', 与 S_b，分别为静止、杆和板惯性系。

设 C 和 O 重合时三坐标系重合，取为公共零点：$t = t' = t_b = 0$

现在在杆惯性系 S' 系观察板孔边缘点 E 的运动轨迹。

在板惯性系 S_b：$x_b = a$，$y_b = 0$，$t_b = t_b$

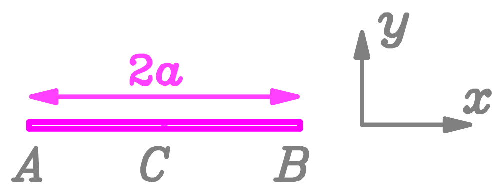
变换到 S 系，注意 S_b 相对于 S 以速度 u 沿 y 向运动：

$$x = x_b,\ y = \gamma_u(y_b + ut_b),\ t = \gamma_u(t_b + uy_b/c^2)$$

变换到 S' 系，注意 S' 相对于 S 以速度 v 沿 x 向运动：

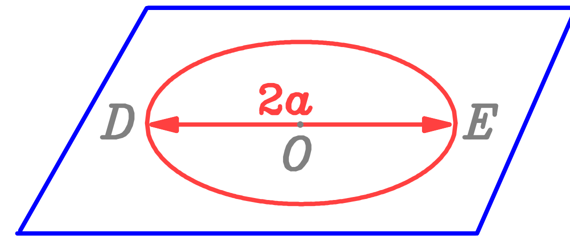
例 3：穿孔佯谬

如图，板上有直径为 $2a$ 的圆孔，以速度 u 沿 y 向运动，板厚度可略。有一杆静止长度 $2a$，以速度 v 沿 x 向运动，杆直径可略。设在某时刻杆中心 C 和板孔中心 O 刚好可以重合，试问杆能否穿过圆孔。



从板上看，杆运动，杆长缩短，杆短孔大，杆应能穿过圆孔。

从杆上看，圆孔在运动，孔径缩小，杆长孔小，杆无法穿过。



有三个惯性系，S, S', 与 S_b，分别为静止、杆和板惯性系。

设 C 和 O 重合时三坐标系重合，取为公共零点：$t = t' = t_b = 0$

现在在杆惯性系 S' 系观察板孔边缘点 E 的运动轨迹。

在板惯性系 S_b：$x_b = a$，$y_b = 0$，$t_b = t_b$

变换到 S 系，注意 S_b 相对于 S 以速度 u 沿 y 向运动：

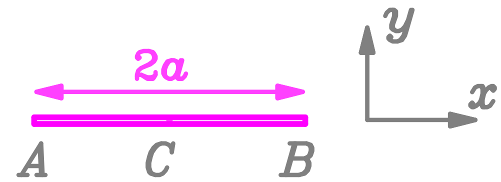
$$x = x_b,\ y = \gamma_u(y_b + ut_b),\ t = \gamma_u(t_b + uy_b/c^2)$$

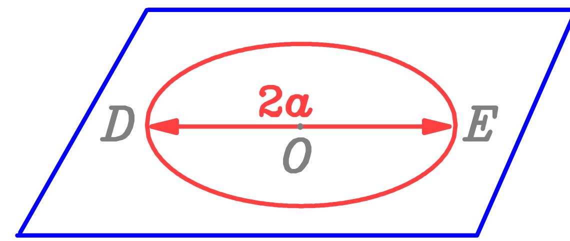
变换到 S' 系，注意 S' 相对于 S 以速度 v 沿 x 向运动：

$$x' = \gamma_v(x - vt),\ y' = y,\ t' = \gamma_v(t - vx/c^2)$$

例 3：穿孔佯谬

如图，板上有直径为 $2a$ 的圆孔，以速度 u 沿 y 向运动，板厚度可略。有一杆静止长度 $2a$，以速度 v 沿 x 向运动，杆直径可略。设在某时刻杆中心 C 和板孔中心 O 刚好可以重合，试问杆能否穿过圆孔。





从板上看，杆运动，杆长缩短，杆短孔大，杆应能穿过圆孔。

从杆上看，圆孔在运动，孔径缩小，杆长孔小，杆无法穿过。

有三个惯性系，S, S', 与 S_b，分别为静止、杆和板惯性系。

设 C 和 O 重合时三坐标系重合，取为公共零点：$t = t' = t_b = 0$

现在在杆惯性系 S' 系观察板孔边缘点 E 的运动轨迹。

在板惯性系 S_b：$x_b = a$，$y_b = 0$，$t_b = t_b$

变换到 S 系，注意 S_b 相对于 S 以速度 u 沿 y 向运动：

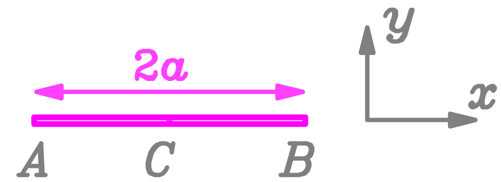
$x = x_b$，$y = \gamma_u(y_b + ut_b)$，$t = \gamma_u(t_b + uy_b/c^2)$

变换到 S' 系，注意 S' 相对于 S 以速度 v 沿 x 向运动：

$x' = \gamma_v(x - vt)$，$y' = y$，$t' = \gamma_v(t - vx/c^2)$　化简：

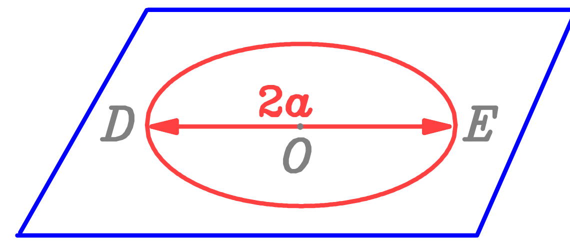
例 3：穿孔佯谬

如图，板上有直径为 $2a$ 的圆孔，以速度 u 沿 y 向运动，板厚度可略。有一杆静止长度 $2a$，以速度 v 沿 x 向运动，杆直径可略。设在某时刻杆中心 C 和板孔中心 O 刚好可以重合，试问杆能否穿过圆孔。



从板上看，杆运动，杆长缩短，杆短孔大，杆应能穿过圆孔。

从杆上看，圆孔在运动，孔径缩小，杆长孔小，杆无法穿过。



有三个惯性系，S, S', 与 S_b，分别为静止、杆和板惯性系。

设 C 和 O 重合时三坐标系重合，取为公共零点：$t = t' = t_b = 0$

现在在杆惯性系 S' 系观察板孔边缘点 E 的运动轨迹。

在板惯性系 S_b：$x_b = a$，$y_b = 0$，$t_b = t_b$

变换到 S 系，注意 S_b 相对于 S 以速度 u 沿 y 向运动：

$$x = x_b,\ y = \gamma_u(y_b + ut_b),\ t = \gamma_u(t_b + uy_b/c^2)$$

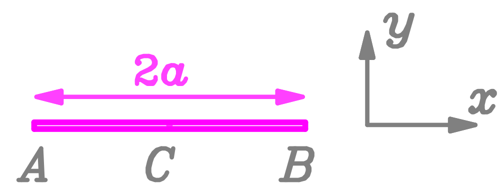
变换到 S' 系，注意 S' 相对于 S 以速度 v 沿 x 向运动：

$$x' = \gamma_v(x - vt),\ y' = y,\ t' = \gamma_v(t - vx/c^2)$$ 化简：

$$x' = \gamma_v(a - v\gamma_u t_b),\ y' = u\gamma_u t_b,\ t' = \gamma_v(\gamma_u t_b - va/c^2)$$

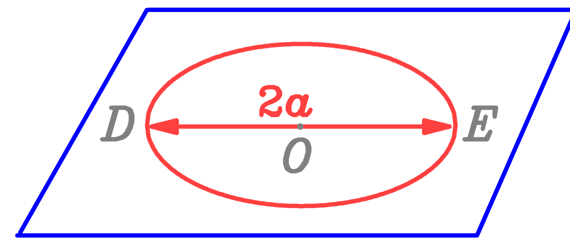
例 3：穿孔佯谬

如图，板上有直径为 $2a$ 的圆孔，以速度 u 沿 y 向运动，板厚度可略。有一杆静止长度 $2a$，以速度 v 沿 x 向运动，杆直径可略。设在某时刻杆中心 C 和板孔中心 O 刚好可以重合，试问杆能否穿过圆孔。



从板上看，杆运动，杆长缩短，杆短孔大，杆应能穿过圆孔。

从杆上看，圆孔在运动，孔径缩小，杆长孔小，杆无法穿过。



有三个惯性系，S, S', 与 S_b，分别为静止、杆和板惯性系。

设 C 和 O 重合时三坐标系重合，取为公共零点：$t = t' = t_b = 0$

现在在杆惯性系 S' 系观察板孔边缘点 E 的运动轨迹。

在板惯性系 S_b：$x_b = a$，$y_b = 0$，$t_b = t_b$

变换到 S 系，注意 S_b 相对于 S 以速度 u 沿 y 向运动：

$$x = x_b,\ y = \gamma_u(y_b + ut_b),\ t = \gamma_u(t_b + uy_b/c^2)$$

变换到 S' 系，注意 S' 相对于 S 以速度 v 沿 x 向运动：

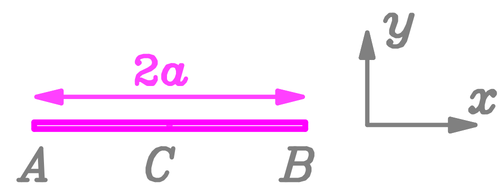
$$x' = \gamma_v(x - vt),\ y' = y,\ t' = \gamma_v(t - vx/c^2)$$ 化简：

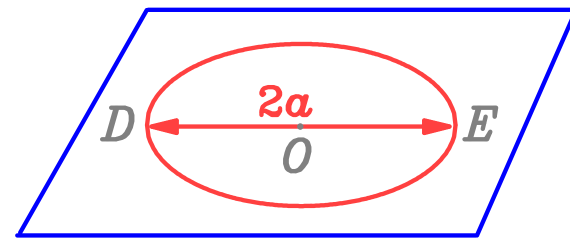
$$x' = \gamma_v(a - v\gamma_u t_b),\ y' = u\gamma_u t_b,\ t' = \gamma_v(\gamma_u t_b - va/c^2)$$

消去 t_b：

例 3：穿孔佯谬

如图，板上有直径为 $2a$ 的圆孔，以速度 u 沿 y 向运动，板厚度可略。有一杆静止长度 $2a$，以速度 v 沿 x 向运动，杆直径可略。设在某时刻杆中心 C 和板孔中心 O 刚好可以重合，试问杆能否穿过圆孔。





从板上看，杆运动，杆长缩短，杆短孔大，杆应能穿过圆孔。

从杆上看，圆孔在运动，孔径缩小，杆长孔小，杆无法穿过。

有三个惯性系，S, S', 与 S_b，分别为静止、杆和板惯性系。

设 C 和 O 重合时三坐标系重合，取为公共零点：$t = t' = t_b = 0$

现在在杆惯性系 S' 系观察板孔边缘点 E 的运动轨迹。

在板惯性系 S_b：$x_b = a$，$y_b = 0$，$t_b = t_b$

变换到 S 系，注意 S_b 相对于 S 以速度 u 沿 y 向运动：

$x = x_b$，$y = \gamma_u(y_b + ut_b)$，$t = \gamma_u(t_b + uy_b/c^2)$

变换到 S' 系，注意 S' 相对于 S 以速度 v 沿 x 向运动：

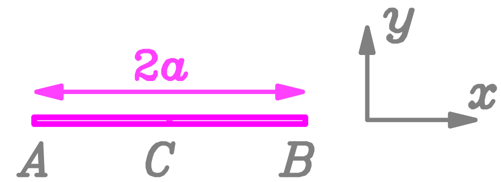
$x' = \gamma_v(x - vt)$，$y' = y$，$t' = \gamma_v(t - vx/c^2)$　化简：

$x' = \gamma_v(a - v\gamma_u t_b)$，$y' = u\gamma_u t_b$，$t' = \gamma_v(\gamma_u t_b - va/c^2)$

消去 t_b：$\begin{cases} x' = \dfrac{a}{\gamma_v} - vt' \\ y' = \dfrac{ut'}{\gamma_v} + \dfrac{uva}{c^2} \end{cases}$

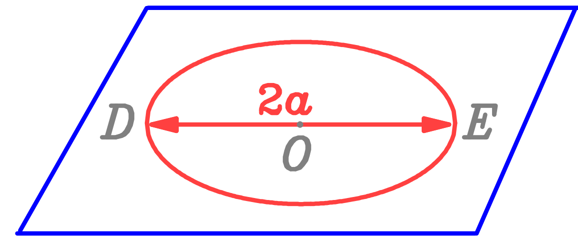
例 3：穿孔佯谬

如图，板上有直径为 $2a$ 的圆孔，以速度 u 沿 y 向运动，板厚度可略。有一杆静止长度 $2a$，以速度 v 沿 x 向运动，杆直径可略。设在某时刻杆中心 C 和板孔中心 O 刚好可以重合，试问杆能否穿过圆孔。



从板上看，杆运动，杆长缩短，杆短孔大，杆应能穿过圆孔。

从杆上看，圆孔在运动，孔径缩小，杆长孔小，杆无法穿过。



有三个惯性系，S，S'，与 S_b，分别为静止、杆和板惯性系。

设 C 和 O 重合时三坐标系重合，取为公共零点：$t = t' = t_b = 0$

现在在杆惯性系 S' 系观察板孔边缘点 E 的运动轨迹。

在板惯性系 S_b：$x_b = a$，$y_b = 0$，$t_b = t_b$

变换到 S 系，注意 S_b 相对于 S 以速度 u 沿 y 向运动：

$$x = x_b,\ y = \gamma_u(y_b + ut_b),\ t = \gamma_u(t_b + uy_b/c^2)$$

变换到 S' 系，注意 S' 相对于 S 以速度 v 沿 x 向运动：

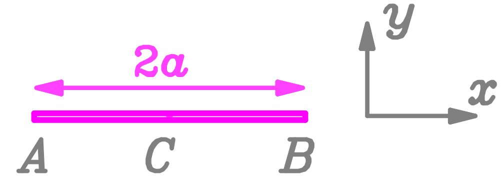
$$x' = \gamma_v(x - vt),\ y' = y,\ t' = \gamma_v(t - vx/c^2)$$ 化简：

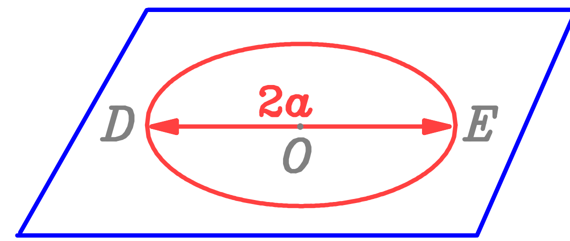
$$x' = \gamma_v(a - v\gamma_u t_b),\ y' = u\gamma_u t_b,\ t' = \gamma_v(\gamma_u t_b - va/c^2)$$

消去 t_b：$\begin{cases} x' = \dfrac{a}{\gamma_v} - vt' \\ y' = \dfrac{ut'}{\gamma_v} + \dfrac{uva}{c^2} \end{cases}$ 在 S' 看 E 点的轨迹是一条直线，如图。

例 3：穿孔佯谬

如图，板上有直径为 $2a$ 的圆孔，以速度 u 沿 y 向运动，板厚度可略。有一杆静止长度 $2a$，以速度 v 沿 x 向运动，杆直径可略。设在某时刻杆中心 C 和板孔中心 O 刚好可以重合，试问杆能否穿过圆孔。





从板上看，杆运动，杆长缩短，杆短孔大，杆应能穿过圆孔。

从杆上看，圆孔在运动，孔径缩小，杆长孔小，杆无法穿过。

有三个惯性系，S, S', 与 S_b，分别为静止、杆和板惯性系。

设 C 和 O 重合时三坐标系重合，取为公共零点：$t = t' = t_b = 0$

现在在杆惯性系 S' 系观察板孔边缘点 E 的运动轨迹。

在板惯性系 S_b：$x_b = a$，$y_b = 0$，$t_b = t_b$

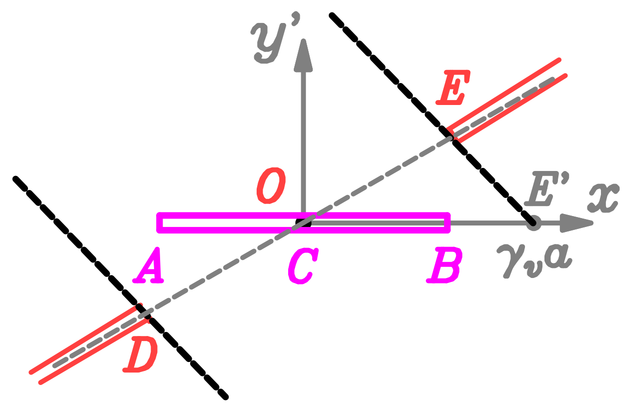
变换到 S 系，注意 S_b 相对于 S 以速度 u 沿 y 向运动：

$$x = x_b,\ y = \gamma_u(y_b + ut_b),\ t = \gamma_u(t_b + uy_b/c^2)$$

变换到 S' 系，注意 S' 相对于 S 以速度 v 沿 x 向运动：

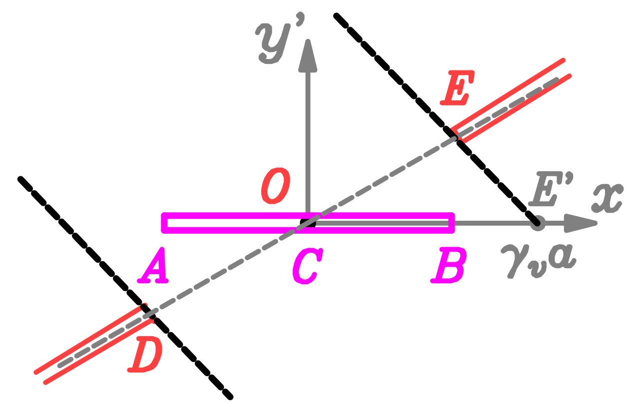
$$x' = \gamma_v(x - vt),\ y' = y,\ t' = \gamma_v(t - vx/c^2) \quad \text{化简：}$$

$$x' = \gamma_v(a - v\gamma_u t_b),\ y' = u\gamma_u t_b,\ t' = \gamma_v(\gamma_u t_b - va/c^2)$$

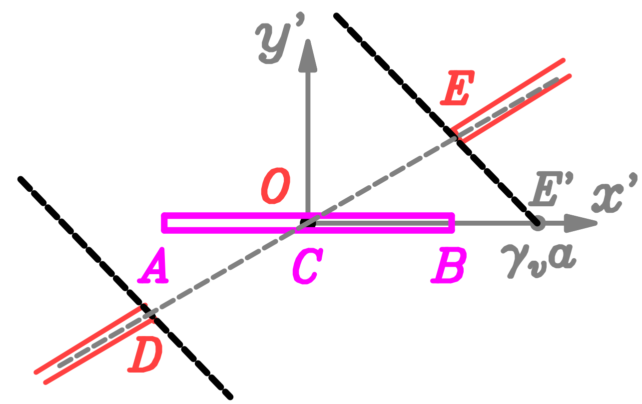


消去 t_b：
$$\begin{cases} x' = \dfrac{a}{\gamma_v} - vt' \\ y' = \dfrac{ut'}{\gamma_v} + \dfrac{uva}{c^2} \end{cases}$$

在 S' 看 E 点的轨迹是一条直线，如图。

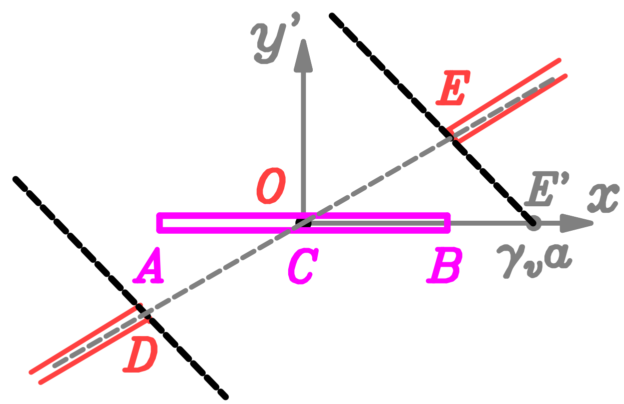

y'
E
O
E'
x'
A
C
B
$\gamma_v a$
D

在 S' 系看，E 点轨迹为一条直线：
$$\begin{cases} x' = \dfrac{a}{\gamma_v} - vt' & (1) \\ y' = \dfrac{ut'}{\gamma_v} + \dfrac{uva}{c^2} & (2) \end{cases}$$



在 S' 系看，E 点轨迹为一条直线：
$$\begin{cases} x' = \dfrac{a}{\gamma_v} - vt' & (1) \\ y' = \dfrac{ut'}{\gamma_v} + \dfrac{uva}{c^2} & (2) \end{cases}$$

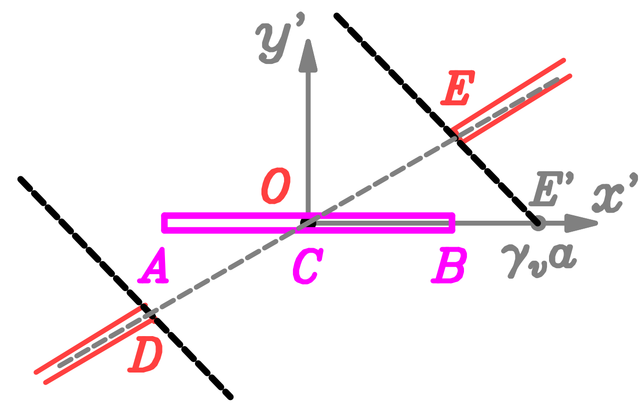
确定直线的两点：



在 S' 系看，E 点轨迹为一条直线：
$$\begin{cases} x' = \dfrac{a}{\gamma_v} - vt' & (1) \\ y' = \dfrac{ut'}{\gamma_v} + \dfrac{uva}{c^2} & (2) \end{cases}$$

确定直线的两点：

$t' = 0$ 时，杆中心 C 与圆孔中心 O 重合，E 点坐标：$(x',\ y') = (a/\gamma_v,\ uva/\gamma_v)$

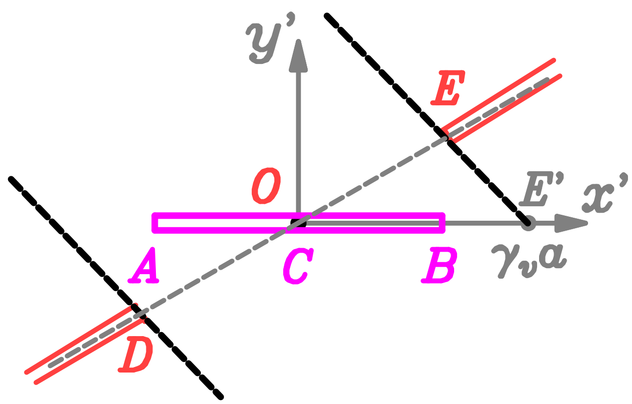


在 S' 系看，E 点轨迹为一条直线：
$$\begin{cases} x' = \dfrac{a}{\gamma_v} - vt' & (1) \\ y' = \dfrac{ut'}{\gamma_v} + \dfrac{uva}{c^2} & (2) \end{cases}$$

确定直线的两点：

$t' = 0$ 时，杆中心 C 与 圆孔中心 O 重合，E 点坐标：$(x',\ y') = (a/\gamma_v,\ uva/\gamma_v)$

$y' = 0$ 时，由 (2) 得 t' 代入 (1)：$x' = \gamma_v a > a$



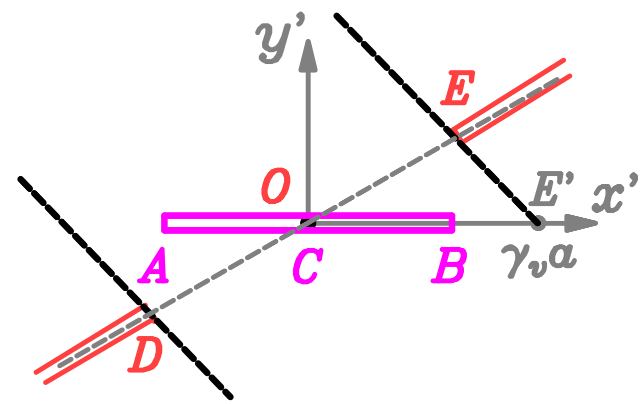
在 S' 系看，E 点轨迹为一条直线：$\begin{cases} x' = \dfrac{a}{\gamma_v} - vt' & (1) \\ y' = \dfrac{ut'}{\gamma_v} + \dfrac{uva}{c^2} & (2) \end{cases}$

确定直线的两点：

$t' = 0$ 时，杆中心 C 与圆孔中心 O 重合，E 点坐标：$(x',\ y') = (a/\gamma_v,\ uva/\gamma_v)$

$y' = 0$ 时，由 (2) 得 t' 代入 (1)：$x' = \gamma_v a > a$

E 点轨迹如图所示，注意 $(BC) = a$，故 E 不会与杆相交。



在 S' 系看，E 点轨迹为一条直线：
$$\begin{cases} x' = \dfrac{a}{\gamma_v} - vt' & (1) \\ y' = \dfrac{ut'}{\gamma_v} + \dfrac{uva}{c^2} & (2) \end{cases}$$

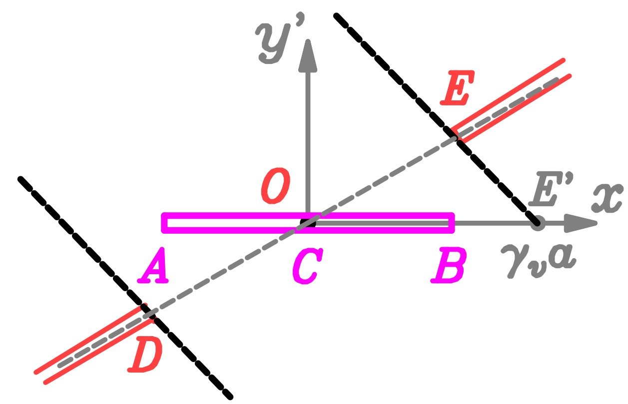
确定直线的两点：

$t' = 0$ 时，杆中心 C 与圆孔中心 O 重合，E 点坐标：$(x',\ y') = (a/\gamma_v,\ uva/\gamma_v)$

$y' = 0$ 时，由 (2) 得 t' 代入 (1)：$x' = \gamma_v a > a$

E 点轨迹如图所示，注意 $(BC) = a$，故 E 不会与杆相交。

把 a 换成 $-a$ （或由对称性）得，圆孔另一边缘点 D 点轨迹，如图所示



在 S' 系看，E 点轨迹为一条直线：
$$\begin{cases} x' = \dfrac{a}{\gamma_v} - vt' & (1) \\ y' = \dfrac{ut'}{\gamma_v} + \dfrac{uva}{c^2} & (2) \end{cases}$$

确定直线的两点：

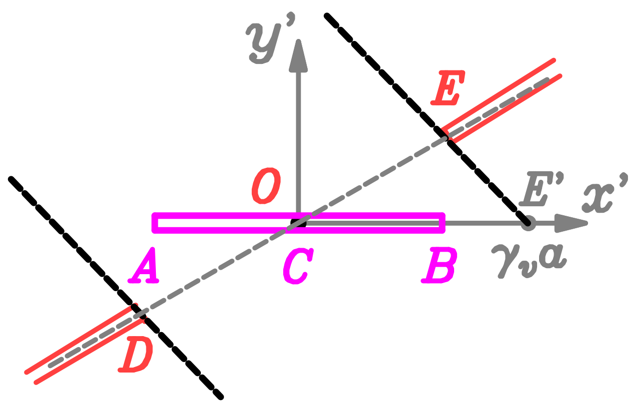
$t' = 0$ 时，杆中心 C 与圆孔中心 O 重合，E 点坐标：$(x',\ y') = (a/\gamma_v,\ uva/\gamma_v)$

$y' = 0$ 时，由 (2) 得 t' 代入 (1)：$x' = \gamma_v a > a$

E 点轨迹如图所示，注意 $(BC) = a$，故 E 不会与杆相交。

把 a 换成 $-a$ （或由对称性）得，圆孔另一边缘点 D 点轨迹，如图所示

D、E 两点均不与杆相交 —— 杆可以穿过圆孔。



在 S' 系看，E 点轨迹为一条直线：
$$\begin{cases} x' = \dfrac{a}{\gamma_v} - vt' & (1) \\ y' = \dfrac{ut'}{\gamma_v} + \dfrac{uva}{c^2} & (2) \end{cases}$$

确定直线的两点：

$t' = 0$ 时，杆中心 C 与 圆孔中心 O 重合，E 点坐标：$(x',\ y') = (a/\gamma_v,\ uva/\gamma_v)$

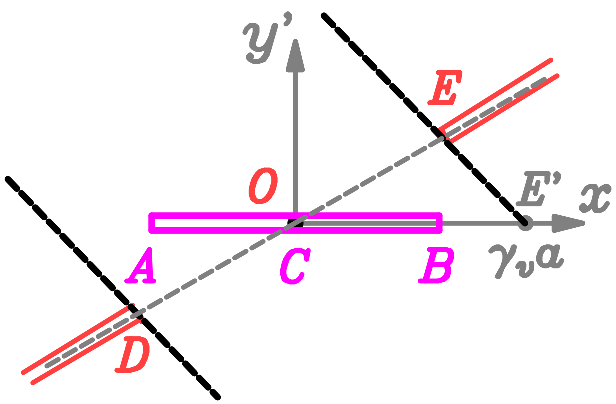
$y' = 0$ 时，由 (2) 得 t' 代入 (1)：$x' = \gamma_v a > a$

E 点轨迹如图所示，注意 $(BC) = a$，故 E 不会与杆相交。

把 a 换成 $-a$ （或由对称性）得，圆孔另一边缘点 D 点轨迹，如图所示

D、E 两点均不与杆相交 —— 杆可以穿过圆孔。

注意在杆上看，板是斜的，也即，杆斜穿过圆孔。



在 S' 系看，E 点轨迹为一条直线：
$$\begin{cases} x' = \dfrac{a}{\gamma_v} - vt' & (1) \\ y' = \dfrac{ut'}{\gamma_v} + \dfrac{uva}{c^2} & (2) \end{cases}$$

确定直线的两点：

$t' = 0$ 时，杆中心 C 与圆孔中心 O 重合，E 点坐标：$(x',\ y') = (a/\gamma_v,\ uva/\gamma_v)$

$y' = 0$ 时，由 (2) 得 t' 代入 (1)：$x' = \gamma_v a > a$

E 点轨迹如图所示，注意 $(BC) = a$，故 E 不会与杆相交。

把 a 换成 $-a$ （或由对称性）得，圆孔另一边缘点 D 点轨迹，如图所示

D、E 两点均不与杆相交 —— 杆可以穿过圆孔。

注意在杆上看，板是斜的，也即，杆斜穿过圆孔。

思考：若杆长 $2b$ 大于圆孔直径 $2a$，杆是否还能穿过圆孔？