大学物理B(1)

周 次	日 期	教学及考试安排
7	4月3日	相对论
	4月5日	清明放假停课
8	4月10日	相对论
	4月12日	相对论
9	4月17日	相对论、振动
	4月19日	**移至第9周 周六（22日）上午 期中考试**

多选题 1分

设置

一刚体定轴转动，角速度不变，则

A 刚体受到的合外力一定为零

B 刚体受到的沿旋转轴方向的合外力矩一定为零

C 刚体受到的合外力矩一定为零

提交

狭义相对论诞生的背景

经典物理理论完美的形式和预言的正确性：

1 牛顿力学预言海王星

2 热学与分子运动论

3 波动光学的成就

4 麦克斯韦电磁理论对电磁波的预言

……

"物理学的大厦已基本建成，后辈物理学家只要做些修补工作就行了"。

著名的英国物理学家**J.J.汤姆孙**

经典物理的大厦基本建成……

在经典物理晴空中飘浮着两朵乌云，令人不安

---K.W.汤姆孙1900 新千年的祝词

1)以太 - 迈克尔逊莫雷实验；
2)黑体辐射规律 - 能量均分定理

经典物理的大厦基本建成 ……

在经典物理晴空中飘浮着两朵乌云，令人不安

---K.W.汤姆孙1900 新千年的祝词

1)以太 - 迈克尔逊莫雷实验；
2)黑体辐射规律 - 能量均分定理

两朵乌云背后是另一片更广阔的天地

▲ 相对论

狭义相对论

广义相对论 —— 引力、时空

▲ 量子力学

近代物理学

第八章　　狭义相对论基础

special relativity

§1 力学相对性原理和伽利略变换

§2 狭义相对论的基本假设

§3 同时性的相对性

§4 洛仑兹变换

§5 时间膨胀　长度缩短

§6 相对论速度变换

§7 相对论的质量和动量

§8 相对论能量

*§9 相对论动量能量的变换

*§10 相对论力的变换

§1 力学相对性原理和伽利略变换

在两个惯性系中考察同一物理事件

时空坐标 (x, y, z, t)

§1 力学相对性原理和伽利略变换

在两个惯性系中考察同一物理事件

时空坐标 (x, y, z, t)

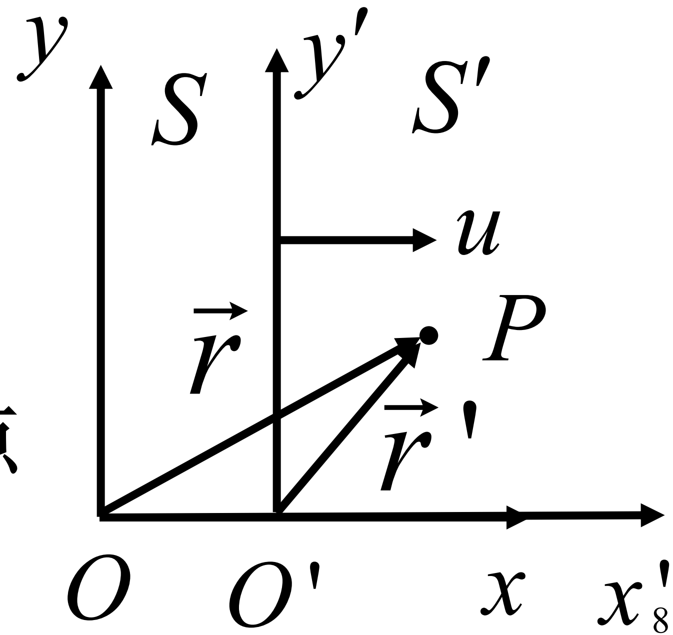
一. 伽利略变换 Galilean transformation

设惯性系S 和相对S 运动的惯性系 $\mathbf{S}'$

时间0点 $(\mathbf{0}, \mathbf{0}, \mathbf{0}, \mathbf{0})$

$\boldsymbol{t} = \mathbf{0}$, **O和O`重合**

事件P： t 时刻，物体在P点

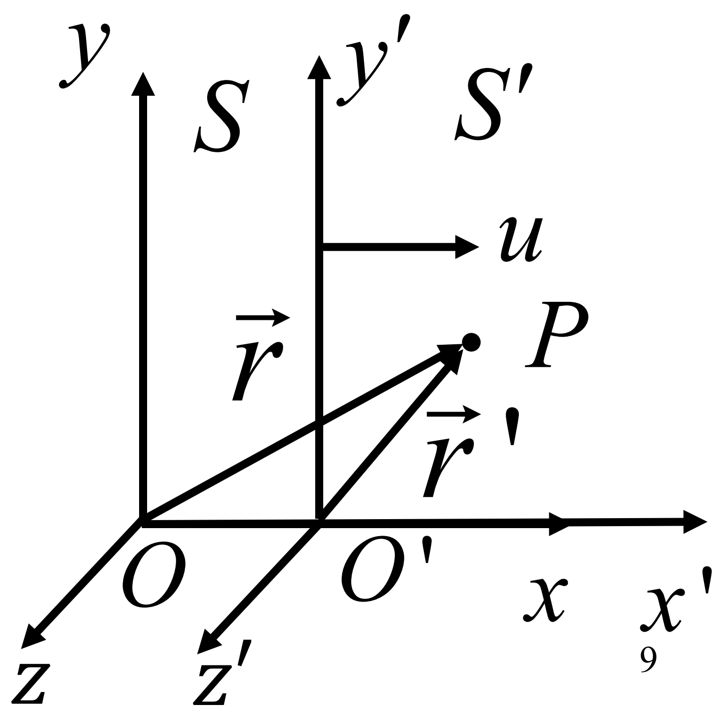


$\boxed{S}$ $\vec{r}(x,y,z,t)$ $\vec{v}$ $\vec{a}$

$\boxed{S'}$ $\vec{r}'(x',y',z',t')$ $\vec{v}'$ $\vec{a}'$

时空变换

正变换	逆变换
$x' = x - ut$	$x = x' + ut'$
$y' = y$	$y = y'$
$z' = z$	$z = z'$
$t' = t$	$t = t'$



速度变换与加速度变换

正

$$\boxed{\begin{aligned} v'_x &= v_x - u \\ v'_y &= v_y \\ v'_z &= v_z \end{aligned}}$$

$$\boxed{\begin{aligned} a'_x &= a_x \\ a'_y &= a_y \\ a'_z &= a_z \end{aligned}}$$

两个都是
惯性系

逆

$$\boxed{\begin{aligned} v_x &= v'_x + u \\ v_y &= v'_y \\ v_z &= v'_z \end{aligned}}$$

$$\boxed{\begin{aligned} a_x &= a'_x \\ a_y &= a'_y \\ a_z &= a'_z \end{aligned}}$$

二. 牛顿的相对性原理

Newton Principle of relativity

$\boxed{S}$ $\quad \vec{F} \quad m \quad \vec{a}$

$\boxed{S'}$ $\quad \vec{F}' \quad m' \quad \vec{a}'$

●在牛顿力学中

力与参考系无关 $\vec{F} = \vec{F}'$

质量与运动无关 $m = m'$

惯性系S 和惯性系 S' $\vec{a} = \vec{a}'$

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

$$\vec{F}' = m'\vec{a}'$$

力学规律

在任何惯性系中形式相同

或 牛顿力学规律在伽利略变换下形式不变

或 牛顿力学规律是伽利略不变式

或 牛顿力学规律具有伽利略变换对称性

其它推论如：动量守恒定律

$\boxed{S}$ $$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}_{10} + m_2\vec{v}_{20}$$

$\boxed{S'}$ $$m_1'\vec{v}_1' + m_2'\vec{v}_2' = m_1'\vec{v}_{10}' + m_2'\vec{v}_{20}'$$

绝对时空观

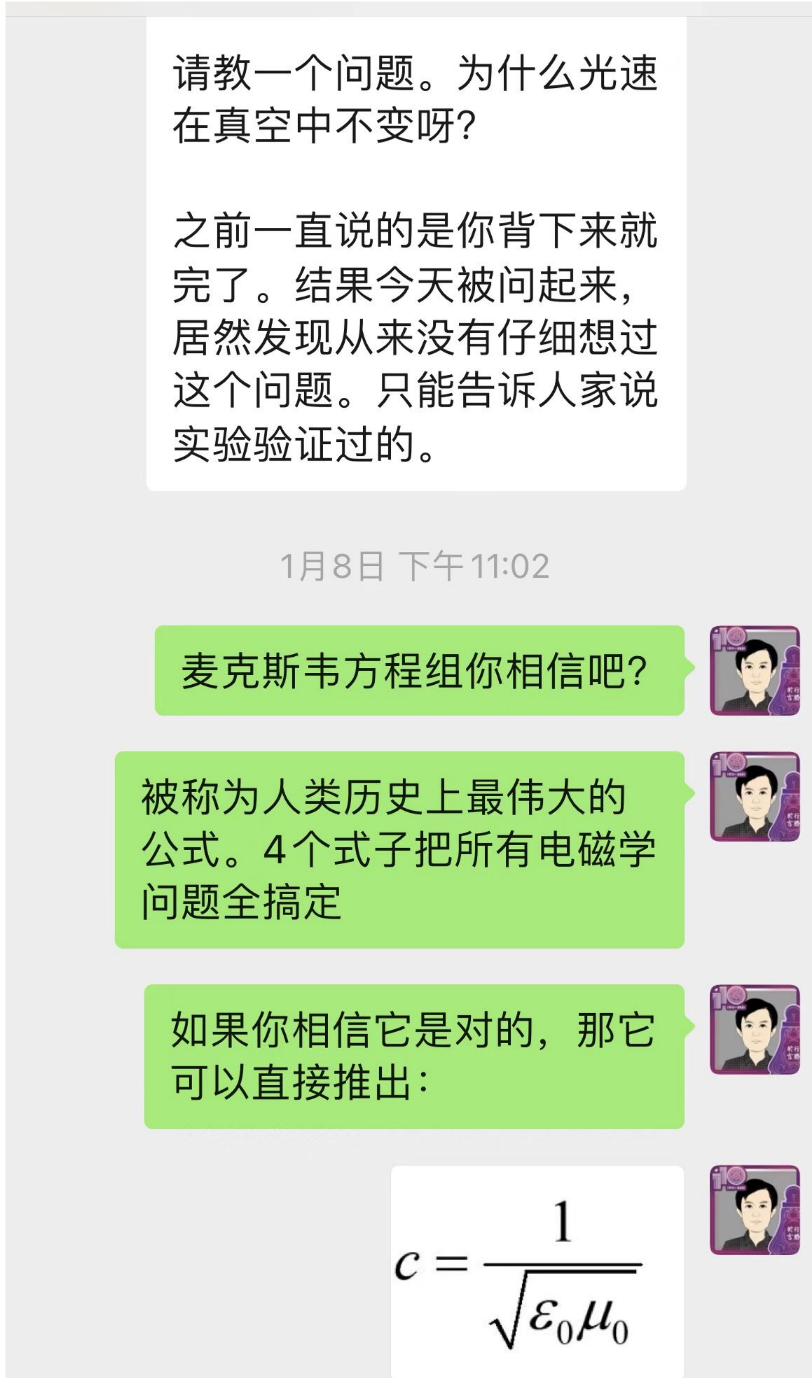
时空不影响运动

电磁学规律呢？

请教一个问题。为什么光速在真空中不变呀?

之前一直说的是你背下来就完了。结果今天被问起来，居然发现从来没有仔细想过这个问题。只能告诉人家说实验验证过的。

1月8日 下午11:02


请教一个问题。为什么光速在真空中不变呀?
之前一直说的是你背下来就完了。结果今天被问起来，居然发现从来没有仔细想过这个问题。只能告诉人家说实验验证过的。
1月8日 下午11:02
麦克斯韦方程组你相信吧?
被称为人类历史上最伟大的公式。4个式子把所有电磁学问题全搞定
如果你相信它是对的，那它可以直接推出:
$c=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$

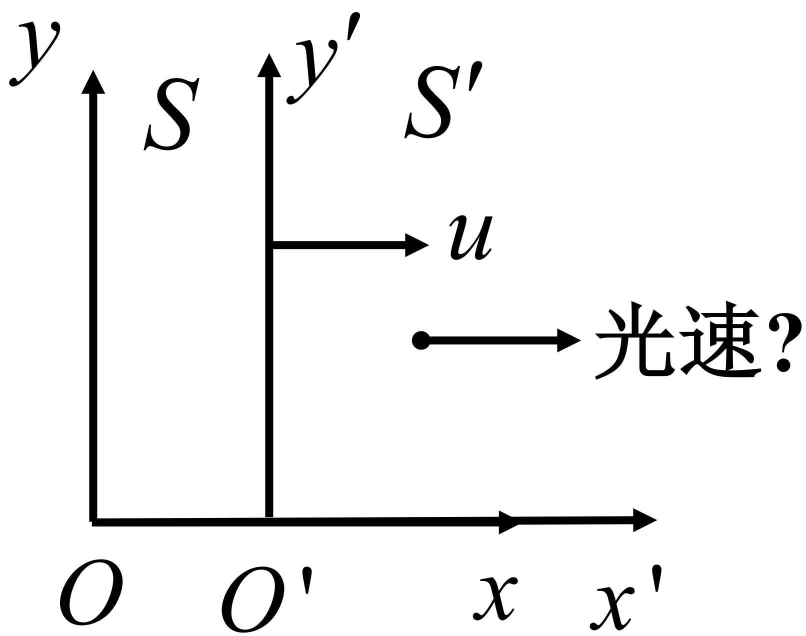
§2 狭义相对论的基本假设

一. 伽利略变换的困难

电磁场麦克斯韦方程组不服从伽利略变换

光速c 是普适常量

$$c=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$$



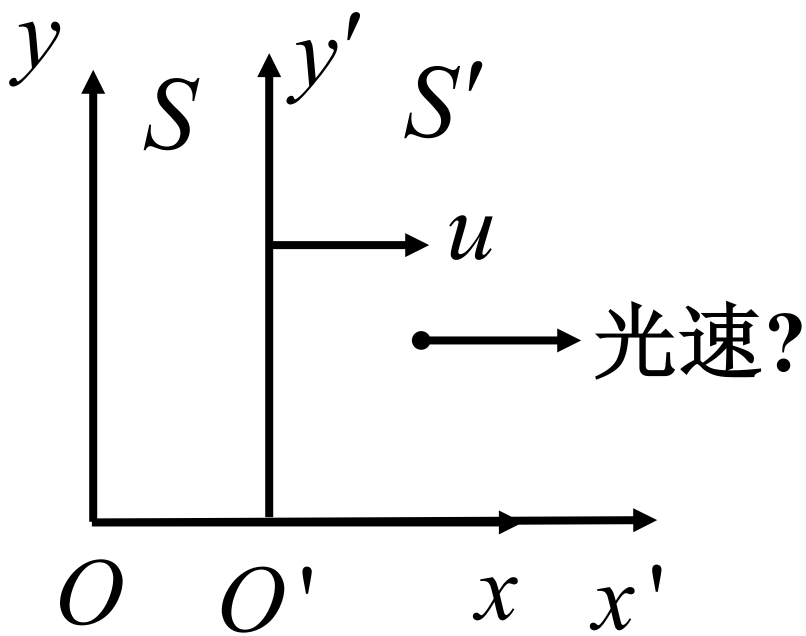
§2 狭义相对论的基本假设

一. 伽利略变换的困难

电磁场麦克斯韦方程组不服从伽利略变换

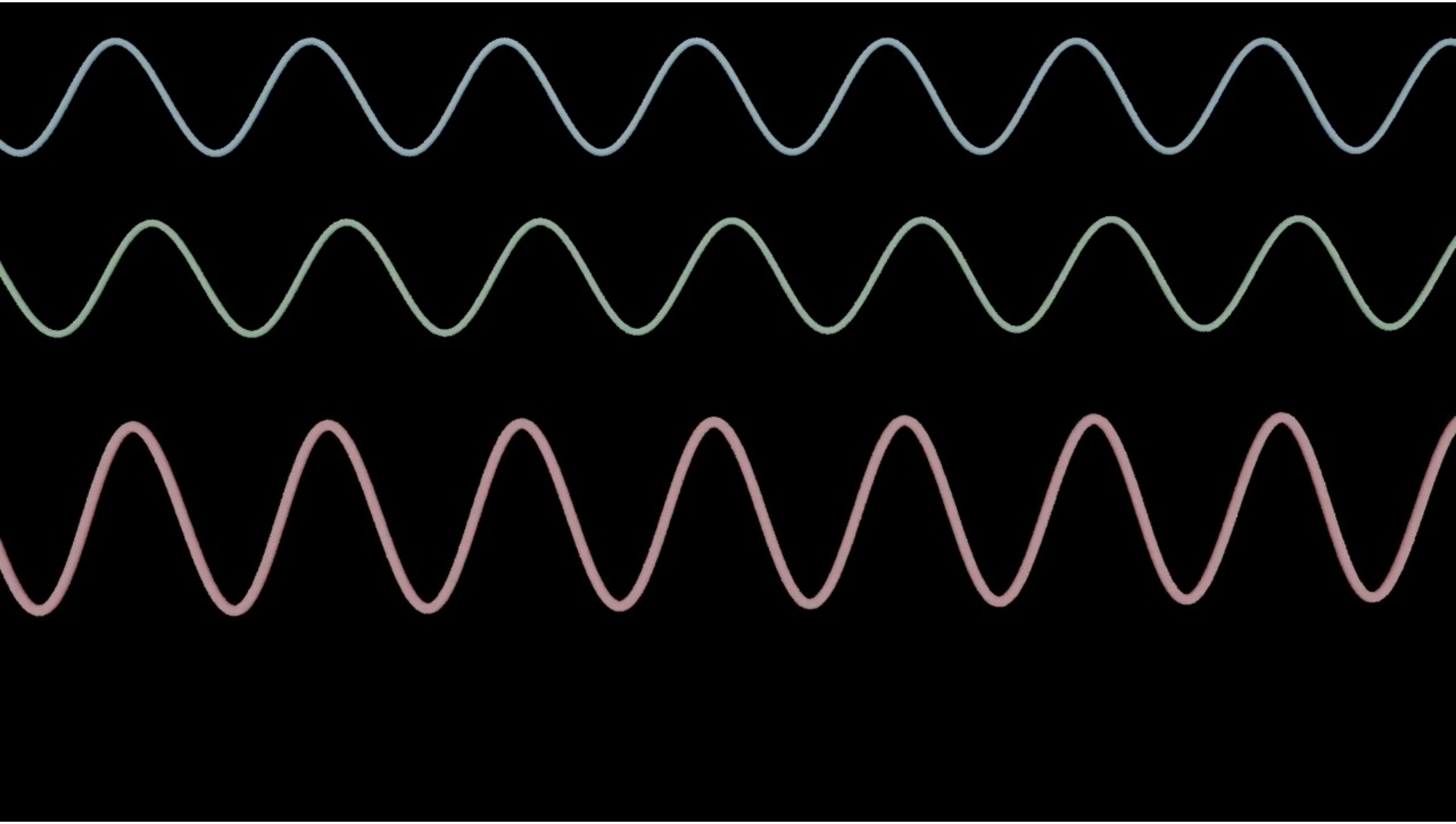
光速c 是普适常量

$$c=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$$

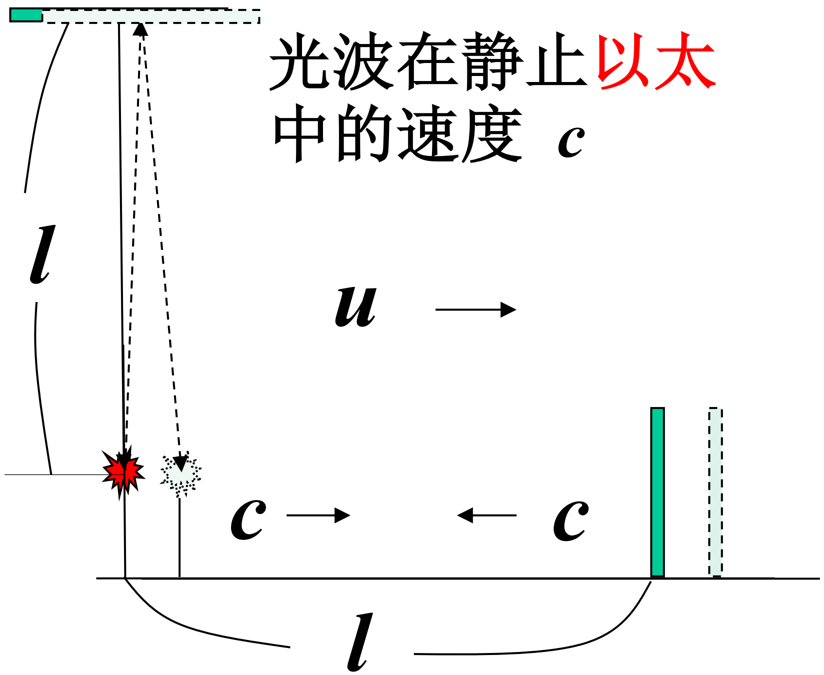


1.修改电磁学?让光速可变，满足伽利略变化

2.以太?特殊的惯性系



实验结果：迈克耳逊-莫雷的 0 结果

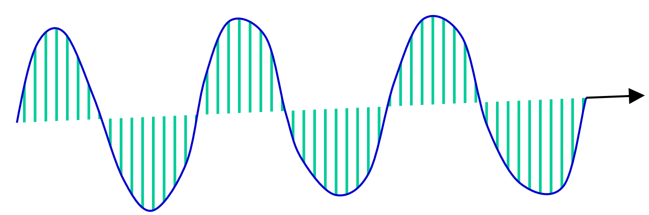


$$t_1 = \frac{l}{c-u} + \frac{l}{c+u} = \frac{2l}{c}\frac{1}{(1-\frac{u^2}{c^2})}$$

$$t_2 = \frac{2l}{\sqrt{c^2-u^2}}$$

$$\Delta t \approx \frac{lu^2}{c^3}$$

迈克尔逊干涉仪没有测到!



π_0介子衰变

爱因斯坦追光理想实验

二. 爱因斯坦的狭义相对论基本假设

（否定了前述两种尝试）

1. 一切物理规律在任何惯性系中形式相同

--- 相对性原理

（否定了特殊的惯性系：以太）

① 公理

② *Einstein* 的相对性理论 是 *Newton*理论的发展

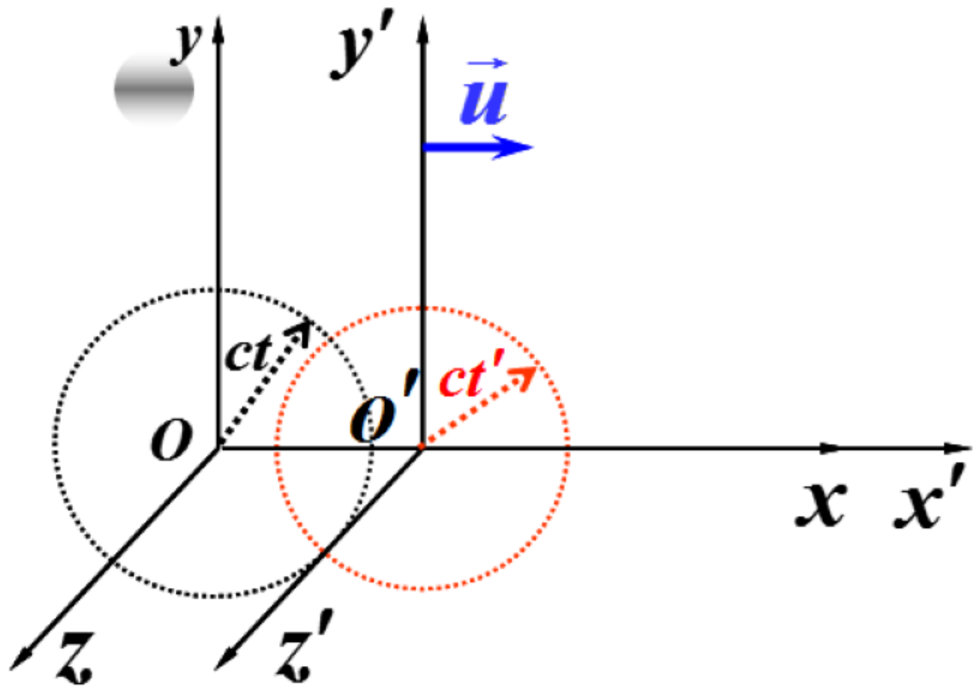
一切物理规律

力学规律

2. 光在真空中的速度与发射体的运动状态无关

—— 光速不变原理

（否定了修改了电磁学的尝试）



在S系看和在S`系看

单选题 1分

设置

火车匀速运动，假设地面火车这两个惯性系在t=0时刻原点重合，原点处发出闪光，假如闪光装置是在火车上，则t时刻光传播到各点构成的面（光波阵面）是

A 在火车上观察是球面，地面上看不是球面

B 在火车和地面上观察都是球面，但地面上看到球面波的球心在火车的原点

C 在火车和地面上观察都是球面，球面的球心在各自的原点

提交

光速不变与伽利略变换

与伽利略的速度变换原理相孛

观念上的改变！

伽利略变换有问题！

牛顿力学

时间标度

长度标度

质量的测量

与参考系无关 → 速度与参考系有关（相对性）

狭义相对论力学

光速不变 → 长度 时间 质量 与参考系有关（相对性）

时间相对性？

§3 同时性的相对性

relativity of simultaneity

一. 同时性

1. 什么是时间？

有关同时性的判断，如，事件与钟

2. 同步钟 synchronized clocks

§3 同时性的相对性

relativity of simultaneity

一. 同时性

1. 什么是时间？

有关同时性的判断，如，事件与钟

2. 同步钟 synchronized clocks

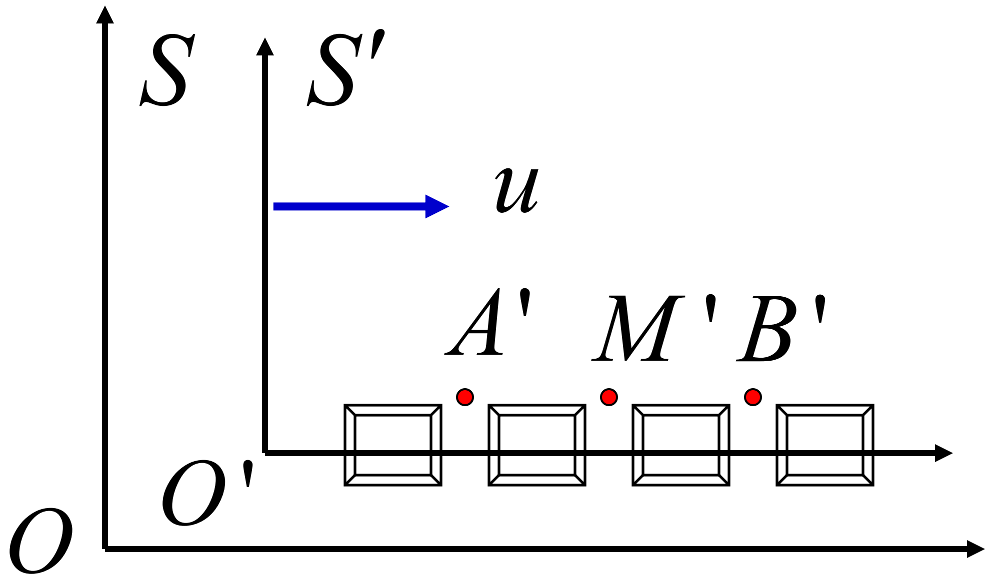
二. 同时性的相对性

-- 光速不变原理的直接结果

以爱因斯坦火车（Einstein train）为例

S' Einstein train

S 地面参考系



实验装置

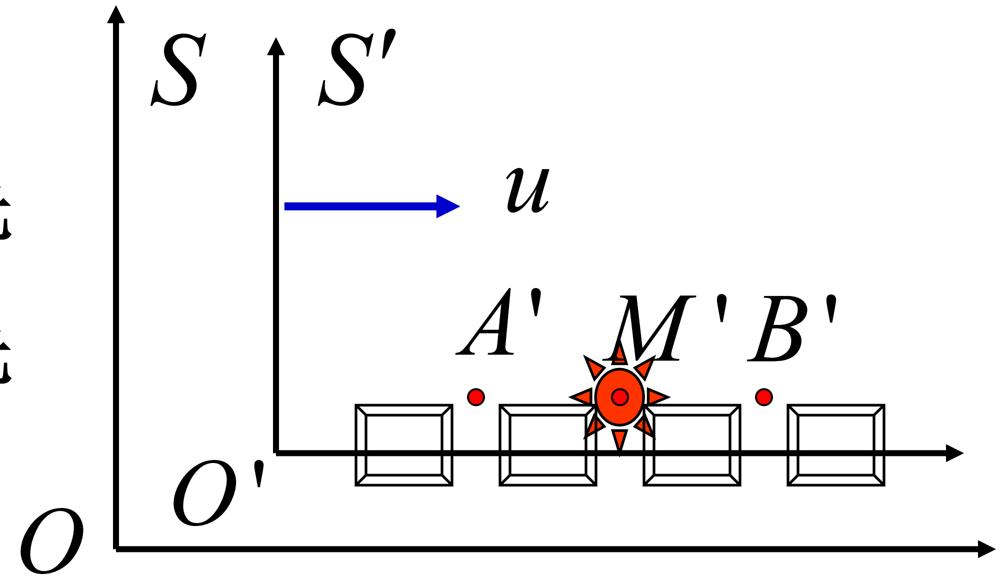
在火车上 A' B' 分别放置信号接收器

中点 M' 放置光信号发生器

$t = t' = 0$ M' 发一光信号

事件1　　A' 接收到闪光

事件2　　B' 接收到闪光



研究的问题

两事件发生的时序　　S' ?　　S ?

$\boxed{S'}$　　M' 发出的闪光　光速为 c

$A'M' = B'M'$　　A', B' 同时接收到光信号

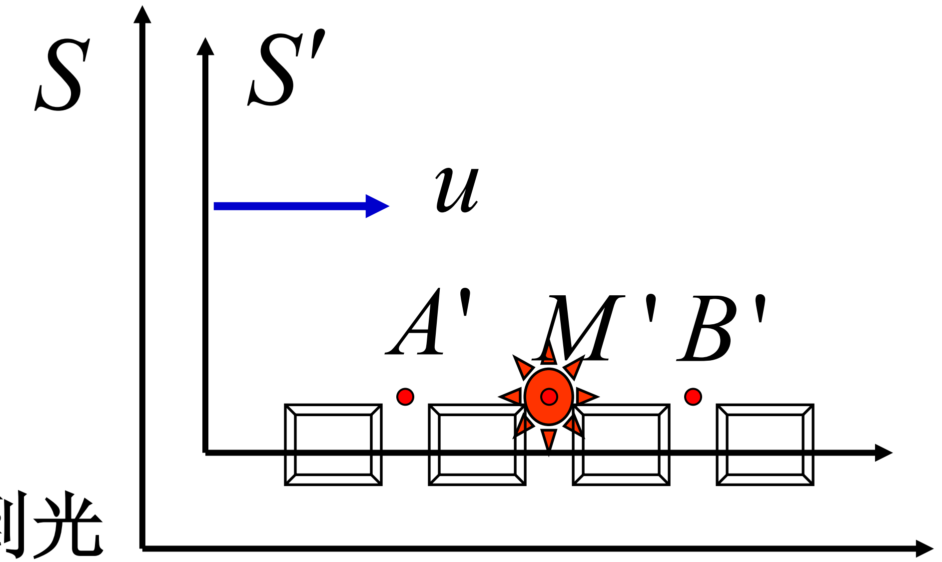
$\boxed{\text{事件1、事件2　同时发生}}$

$\boxed{S}$ 系中的观察者又如何看呢？

M' 闪光　光速也为 c

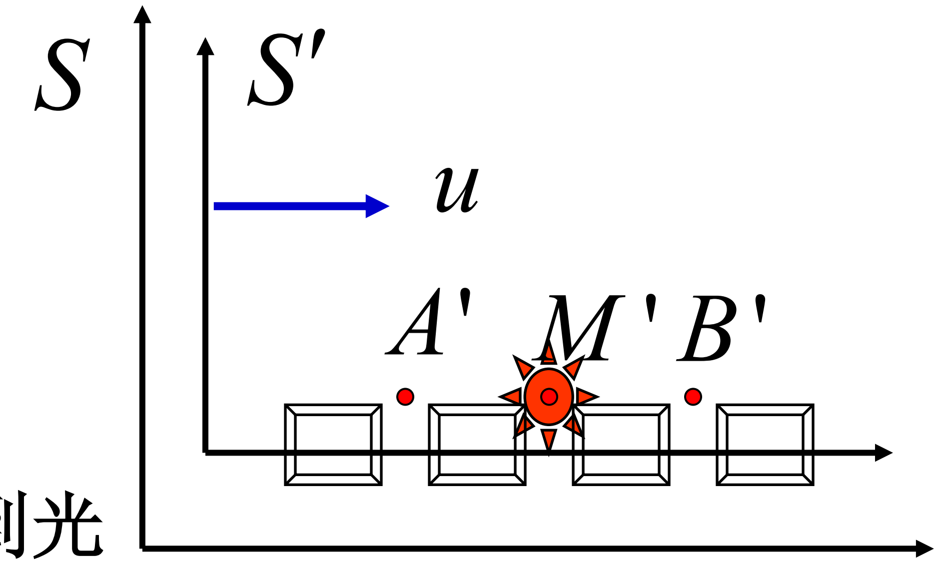
A' B' 随 S' 运动

A' 迎着光　比 B' 早接收到光



事件1、事件2　不同时发生　　事件1先发生

$\boxed{S}$ 系中的观察者又如何看呢？



M' 闪光　光速也为 c

A' B' 随 S' 运动

A' 迎着光　比 B' 早接收到光

事件1、事件2　不同时发生　　事件1先发生

① 同时性的相对性是光速不变原理的直接结果

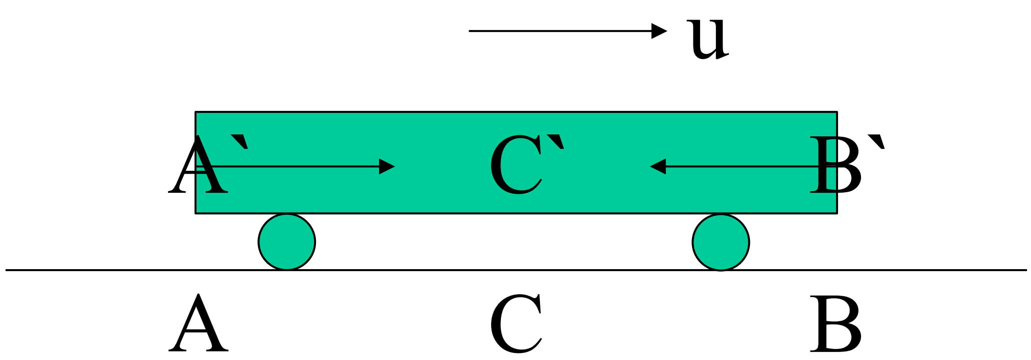
② 时间间隔是相对的

③ 当速度远远小于 c 时，两个惯性系结果相同

同时性与惯性系相关 ---时间随惯性系变化

多选题 1分

设置



一辆车以速度u运动。在地面参考系，车两端同时发出闪光。若人在地面C点观察，将同时收到AB发来的光。若人在车上C`点观察，由于C`向B运动且光速有限，则

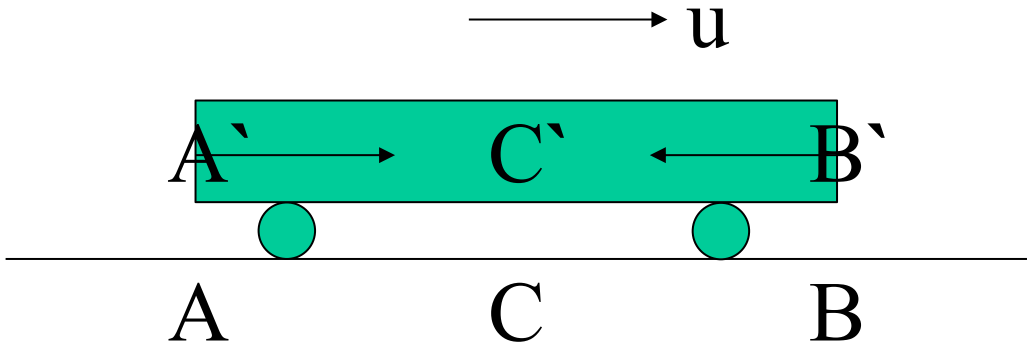
A 先收到B发来的光

B 先收到A发来的光

C 同时收到AB发来的光

D 不同时收到AB发来的光，所以同时性是相对的

提交



地面系看，
AB同时发光
$t_{A0} = t_{B0}$

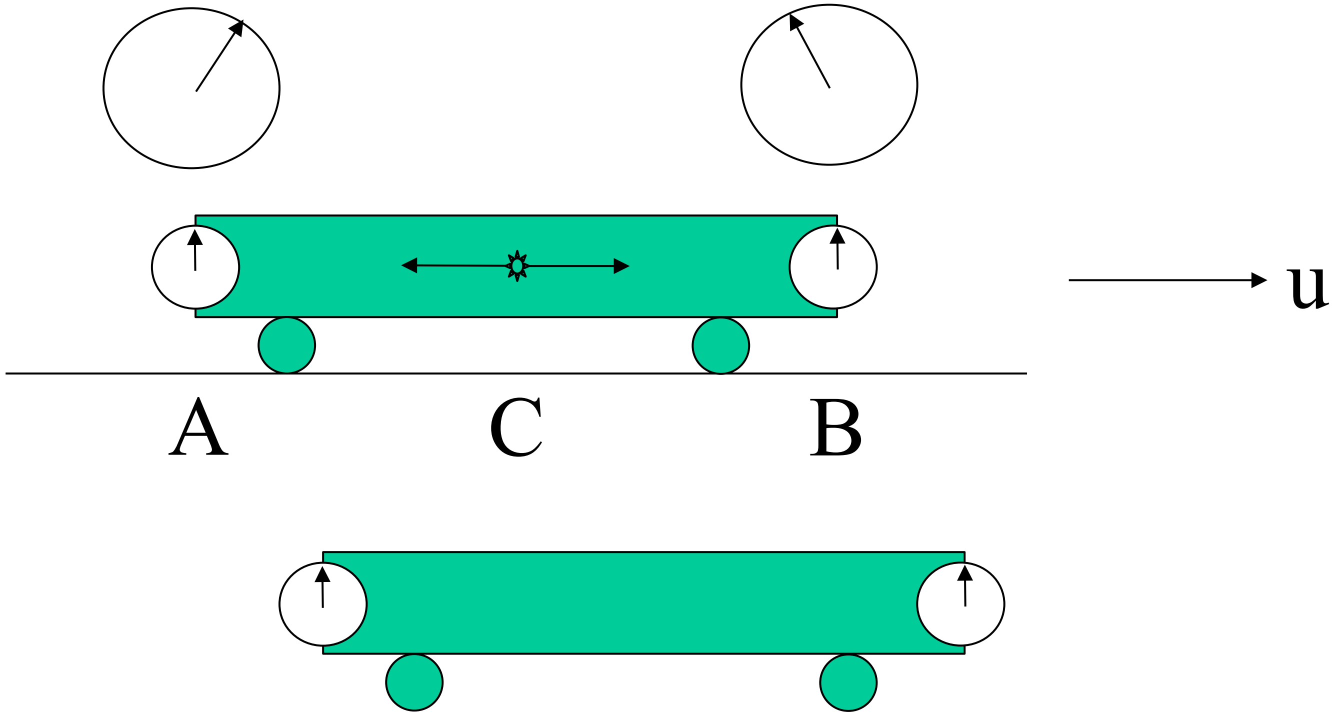
车参考系：

光需走的路程 $A`C` = C`B`$

牛　　　爱

两端发来的光速 $c\text{-}u < c+u$	$c = c$
所需时间 $\delta t_{A`} > \delta t_{B`}$	$\delta t_{A`} = \delta t_{B`}$
光发出的时间 $t_{A0`} = t_{B0`}$	$t_{A0`} > t_{B0`}$

先收到B发来的光　$t_{A`} > t_{B`}$



在一个参考系，根据光速不变对准的那些钟，从另一个有相对运动的参考系看，没有对准。

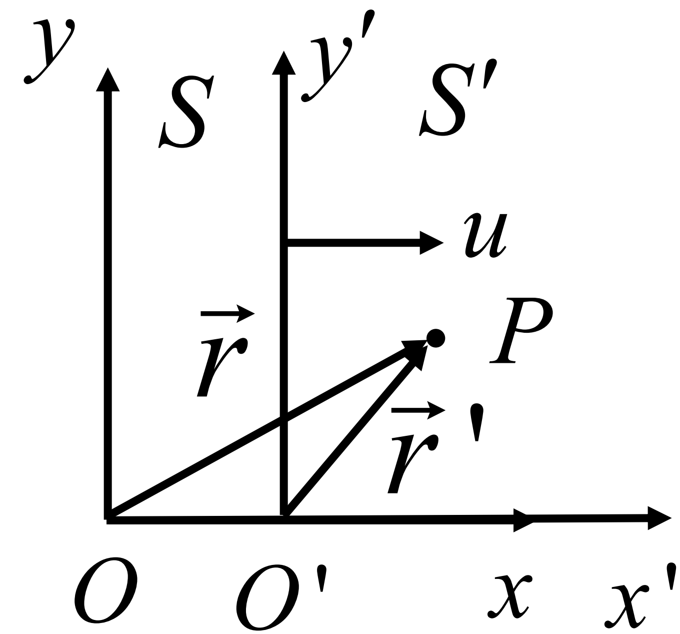
§ 4 洛仑兹变换 Lorentz transformation

一. 洛仑兹变换的导出

$t = t' = 0$ o, o′ 重合

此时自原点发出闪光

经一段时间 光传到 P点



$\boxed{S}$ $P(x, y, z, t)$

$\boxed{S'}$ $P(x', y', z', t')$? 寻找 →

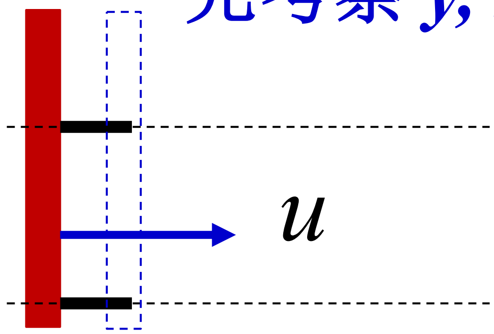
两个参考系中相应的坐标值之间的关系

• 由光速不变原理：

$$x^2+y^2+z^2=c^2t^2$$

$$x'^2+y'^2+z'^2=c^2t'^2$$

先考察 *y, z* 坐标



两个参考系对称

$$y'=y$$

$$z'=z$$

$x'\neq x$ 与 $t'=t$ 矛盾

伽利略变换不行，寻找新的变换

• 假设线性变换关系

（匀速运动物体在所有惯性系都是匀速运动）

$$x' = a x + b t$$

$$t' = \xi x + \eta t$$ 求 $\boldsymbol{a, b, \xi, \eta}$

代入光速不变关系式

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2$$

$$(ax + bt)^2 + y'^2 + z'^2 = c^2(\xi x + \eta t)^2$$

$$ab = c^2 \xi \eta, \quad a^2 - c^2 \xi^2 = c^2 \eta^2 - b^2 = 1$$

$$x' = a\,x + b\,t \qquad t' = \xi\,x + \eta\,t$$

$$x' = 0, \quad \frac{dx}{dt} = u \qquad x = 0, \quad \frac{dx'}{dt'} = -u$$

$$au + b = 0 \qquad -u = \frac{b}{\eta}$$

$$a = \eta, \quad b = c^2 \xi, \quad b = -au$$

$$a \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

二. 结果

坐标变换式

正变换

$$
\begin{cases}
x' = \dfrac{x - ut}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}} \\
y' = y \\
z' = z \\
t' = \dfrac{t - \dfrac{u}{c^2}x}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}}
\end{cases}
$$

洛伦兹变换

（满足光速不变原理，不需要以太）

伽利略变换

$$
\boxed{
\begin{aligned}
x' &= x - ut \\
y' &= y \\
z' &= z \\
t' &= t
\end{aligned}
}
$$

令 $\beta \equiv \frac{u}{c}$ $\gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ 则

正变换

$$\boxed{\begin{aligned} x' &= \gamma\left(x - c\beta t\right) \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= \gamma\left(t - \frac{\beta}{c}x\right) \end{aligned}}$$

令 $\beta \equiv \frac{u}{c}$　　$\gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$　　则

正变换

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

逆变换

$$\begin{cases} x = \gamma(x' + c\beta t') \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \gamma\left(t' + \dfrac{\beta}{c}x\right) \end{cases}$$

正变换

$$x' = \gamma\left(x - c\beta t\right)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \gamma\left(t - \frac{\beta}{c}x\right)$$

① 时空坐标（互相联系）

② $u << c \qquad \gamma \to 1$

$$\beta \equiv \frac{u}{c} \qquad \gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$x' = x - ut$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

伽利略变换

继承

裁缝用尺量，
爱因斯坦可
以用尺，也
可以用钟量

$\beta \equiv \frac{u}{c}$ $\gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$

③ $u \geq c$ 变换无意义 速度有极限 参考系

④ 由洛仑兹变换看同时性的相对性

事件对	S'	S
事件1	(x_1', t_1')	(x_1, t_1)
事件2	(x_2', t_2')	(x_2, t_2)

y、z 不讨论 时空坐标表示事件

$$x_1' = \gamma\left(x_1 - c\beta t_1\right); \qquad t_1' = \gamma\left(t_1 - \frac{\beta}{c}x_1\right)$$

$$x_2' = \gamma\left(x_2 - c\beta t_2\right); \qquad t_2' = \gamma\left(t_2 - \frac{\beta}{c}x_2\right)$$

$$x_2' - x_1' = \gamma\left[x_2 - x_1 - c\beta(t_2 - t_1)\right];$$

$$t_2' - t_1' = \gamma\left(t_2 - t_1 - \frac{\beta}{c}(x_2 - x_1)\right)$$

$$\Delta x' = \gamma\left(\Delta x - c\beta\Delta t\right);$$

$$\Delta t' = \gamma\left(\Delta t - \frac{\beta}{c}\Delta x\right)$$

间隔

正变换

$$\Delta x' = \gamma\left(\Delta x - c\beta\Delta t\right)$$
$$\Delta y' = \Delta y$$
$$\Delta z' = \Delta z$$
$$\Delta t' = \gamma\left(\Delta t - \frac{\beta}{c}\Delta x\right)$$

逆变换

$$\Delta x = \gamma\left(\Delta x' + c\beta\Delta t'\right)$$
$$\Delta y = \Delta y'$$
$$\Delta z = \Delta z'$$
$$\Delta t = \gamma\left(\Delta t' + \frac{\beta}{c}\Delta x'\right)$$

间隔满足洛伦兹变换

洛仑兹变换公式是联系某个事件和原点事件

$$x = x' = 0 \qquad t = t' = 0$$

两事件同时发生　$t_1' = t_2'$

$$\Delta t' = t_2' - t_1' = 0 \qquad \Delta t = t_2 - t_1 \quad ?$$

$$\Delta t' = t_2' - t_1' = \frac{\Delta t - \dfrac{u}{c^2}\Delta x}{\sqrt{1 - \dfrac{u^2}{c^2}}}$$

$$\left.\begin{aligned} &\text{若}\quad \Delta x \neq 0 \\ &\text{已知}\quad \Delta t' = 0 \end{aligned}\right\} \quad \Delta t \neq 0$$

同时性的相对性

＊ 时序　因果关系

设P_1、P_2为两个事件，它们在S系和S`系中的时空坐标分别为

$$S: \quad P_1(x_1, \quad t_1) \qquad P_2(x_2, \quad t_2)$$

$$S': \quad P_1(x_1', \quad t_1') \qquad P_2(x_2', \quad t_2')$$

由洛仑兹变换有：

$$\Delta t' = t_2' - t_1' = \gamma\left[(t_2 - \frac{\beta}{c}x_2) - (t_1 - \frac{\beta}{c}x_1)\right]$$

$$= \gamma(t_2 - t_1)\left[1 - \frac{\beta}{c}\cdot\frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}\right] = \gamma\,\Delta\,t(1 - \frac{u}{c^2}\cdot v_s)$$

$$\boxed{\Delta t' = \gamma\,\Delta\,t(1-\frac{u}{c^2}\cdot v_s)}$$

$$v_s = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$

若P_1为因，P_2是果，则v_s是联系两者的“信号”速度（或作用速度），

$$v_s \le c \qquad u < c \qquad \therefore \quad 1-\frac{u}{c^2}v_s > 0$$

故 $\Delta t'$和Δt 同号

两事件在两个参考系中因果关系不变。

若P_1、P_2为相互独立事件，则可能有$v_s>c$，导致 $\Delta t'$和Δt反号，时序可能颠倒。但由于P_1，P_2无因果关系，故时序颠倒不违背因果律。

三. 时空不变量

$$c^2(\Delta t)^2-[(\Delta x)^2+(\Delta y)^2+(\Delta z)^2]=\Delta s^2$$

时空间隔

$$=c^2(\Delta t')^2-[(\Delta x')^2+(\Delta y')^2+(\Delta z')^2]$$

洛仑兹不变量

证明：

$$\Delta y=\Delta y' \qquad \Delta z=\Delta z'$$

$$c^2\Delta t'^2-\Delta x'^2=c^2\gamma^2(\Delta t-\frac{\beta}{c}\Delta x)^2-\gamma^2(\Delta x-\beta c\Delta t)^2$$

$$=\gamma^2(c\Delta t-\beta\Delta x-\Delta x+\beta c\Delta t)(c\Delta t-\beta\Delta x+\Delta x-\beta c\Delta t)$$

$$=\gamma^2(1+\beta)(c\Delta t-\Delta x)(1-\beta)(c\Delta t+\Delta x)$$

$$=\gamma^2(1-\beta^2)(c^2\Delta t^2-\Delta x^2)=c^2\Delta t^2-\Delta x^2$$

单选题 1分

设置

远处太空站距离地球距离为L。有一艘宇航飞船以速度V刚刚从地球起飞，飞向太空站。假如要从地球发送信息到太空站，是地球上发过去更快，还是飞船上发更快？

A 地球上发更快

B 飞船上发更快

C 一样快

D 以上说法都不对，要考虑在哪个参考系看

提交

§5 时间膨胀　长度缩短

一. 时间膨胀　**time dilation**　运动时钟变慢

在研究一个物理过程的时间间隔中 考察一只钟

研究的问题是：

在某系（运动火车）中，同一地点先后发生的两个事件的时间间隔(同一只钟测量），

与另一系中（地面），在两个地点的这两个事件的时间间隔(两只钟分别测量)的关系。

1. 原时 Proper time

在某一参考系中，同一地点先后发生的两个事件的时间间隔叫原时。 否则为两地时

2. 原时最短 时间膨胀

考察 S' 中的一只钟

$\Delta x' = 0$ 两事件发生在同一地点

$\Delta t' \equiv \tau$ 原时

换到S系： $\Delta x = \gamma\left(\Delta x' + u\Delta t'\right)$ Δt 两地时？

由洛仑兹逆变换

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

$$\Delta x'=0$$

$$\Delta t'\equiv\tau$$

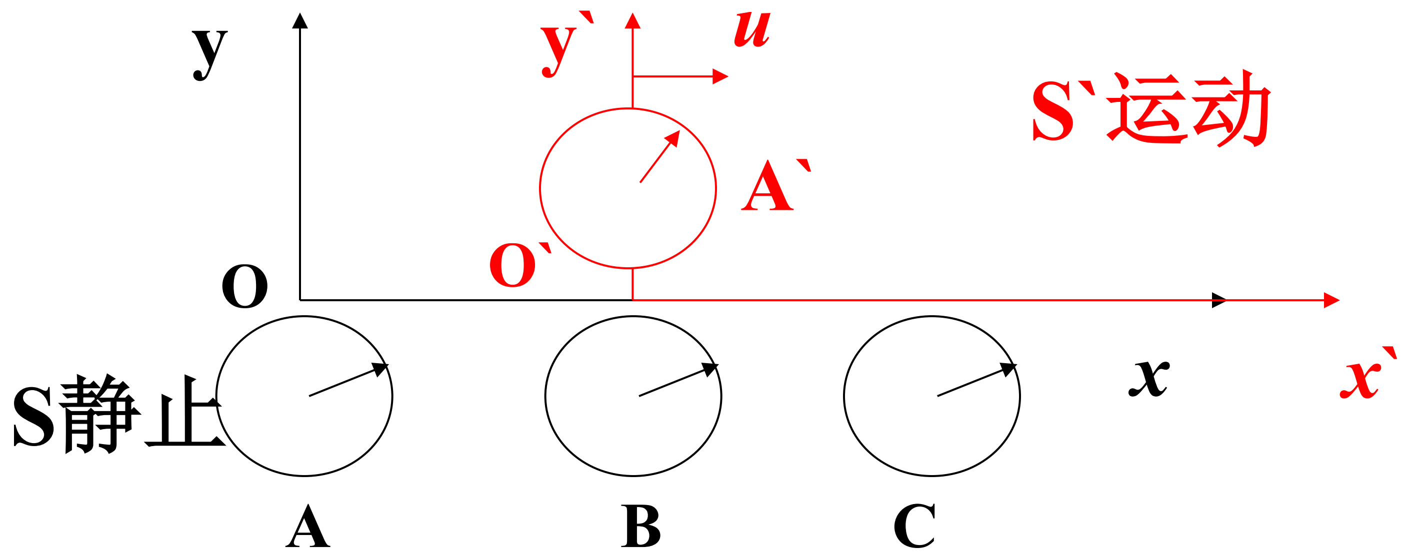
$$\Delta t=\frac{\tau}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$$

$$\frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}>1$$

$$\Delta t>\tau$$

原时最短

原时最短(S`) = 时间膨胀(S) = 运动时钟变慢效应(S`)



O和O`点重合时，A和A`为零时

在静止的S系的观察者比较A`和S系的一系列同步钟

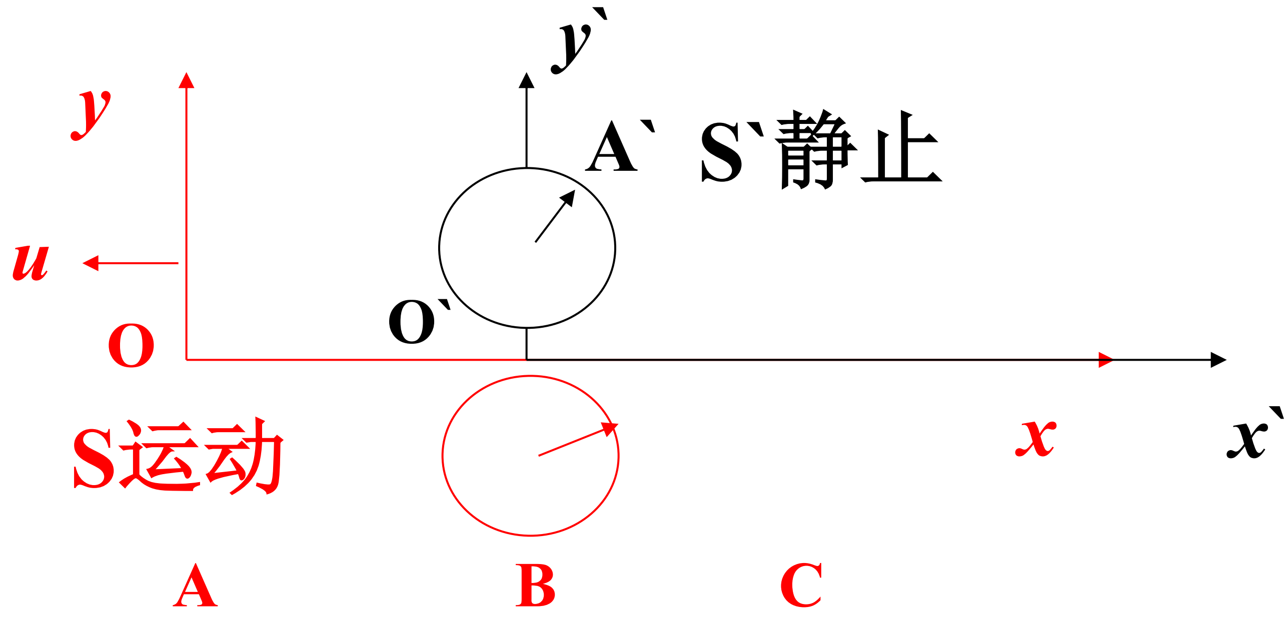
事件1：A`遇A　　事件2：A`遇B

在S`是原时，原时最短，A`钟慢

在S系观察， S`系运动， S`系运动时钟变慢

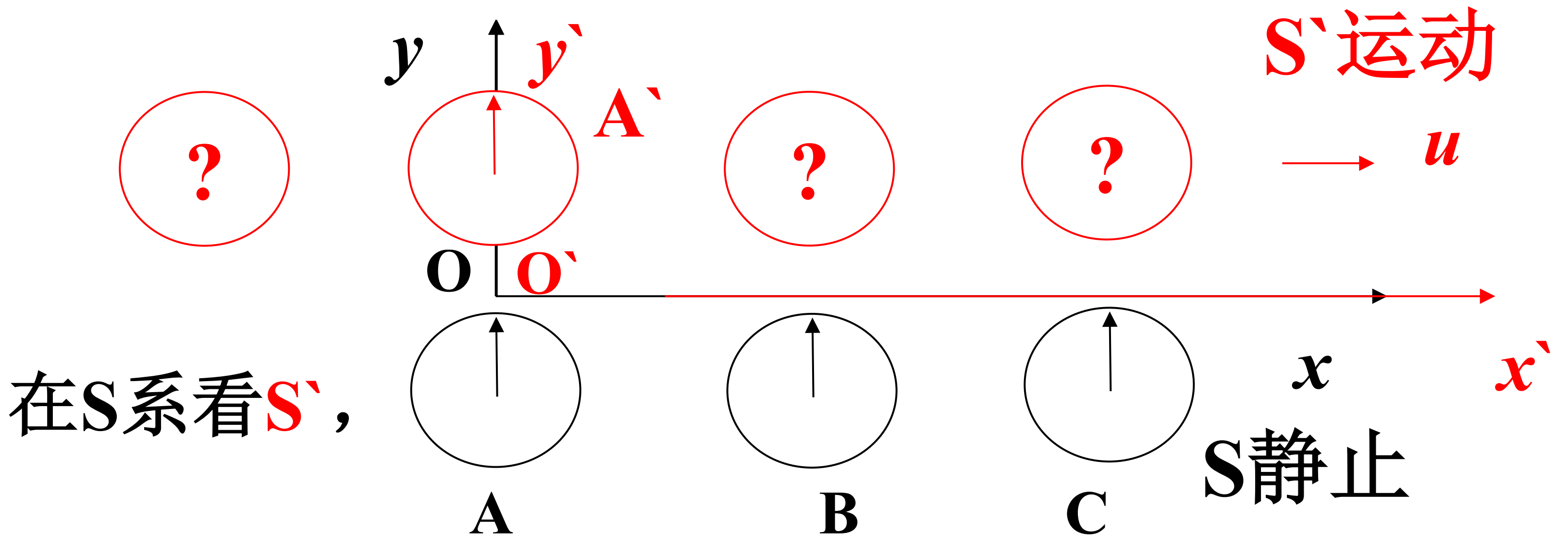
但运动是相对的，S`系的观察者应该发现
S系运动，S系的钟变慢

有矛盾吗？

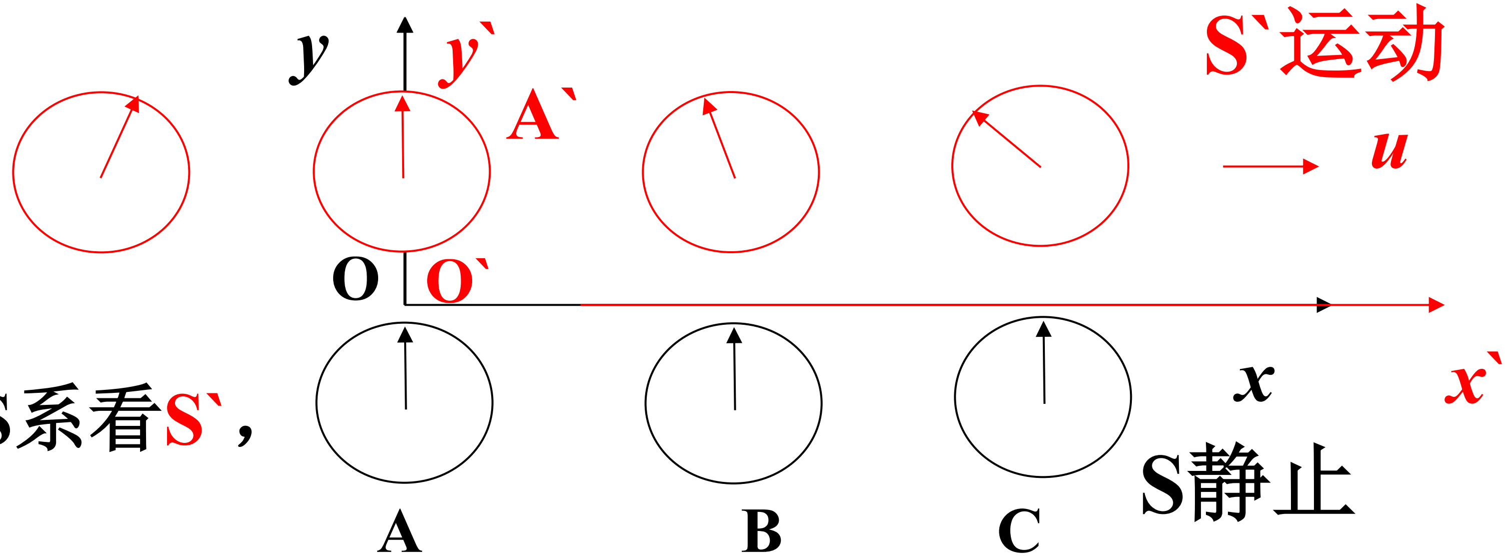


O和O`点重合时，A和A`为零时

O和O`点重合时，A和A`为零时



O和O`点重合时，A和A`为零时



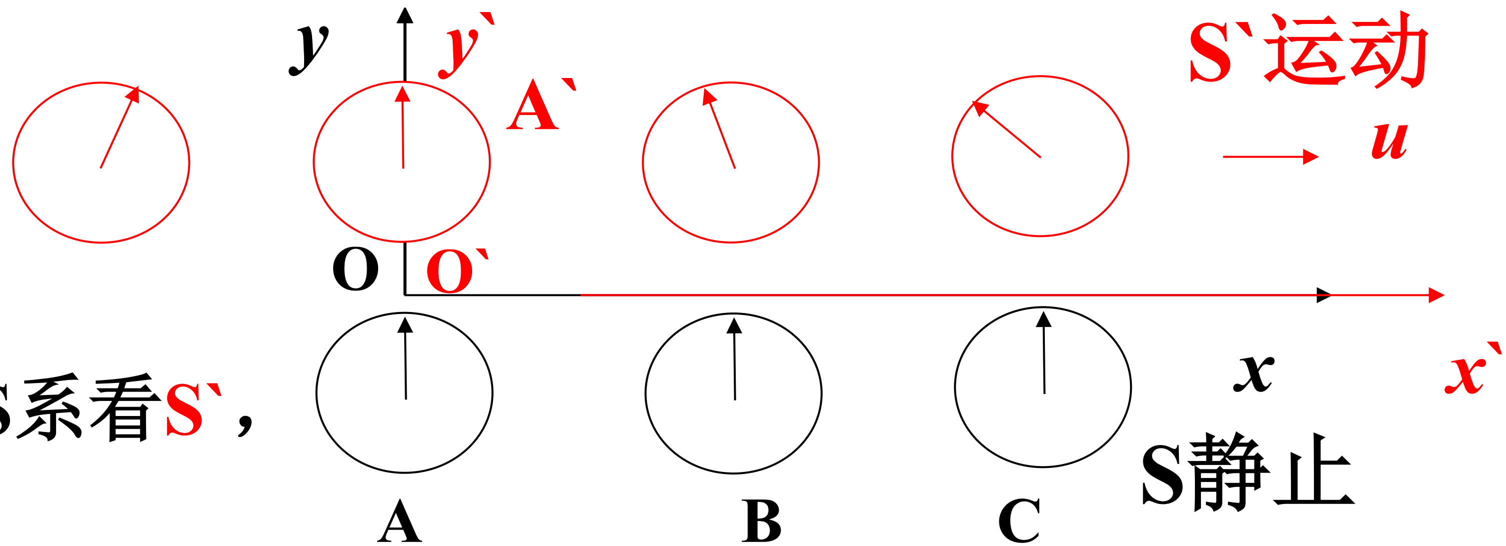
在S系看S`，

$$t' = \gamma\left(\underset{0}{t} - \frac{\beta}{c}x\right) = -\frac{\beta}{c}x\gamma \neq 0$$

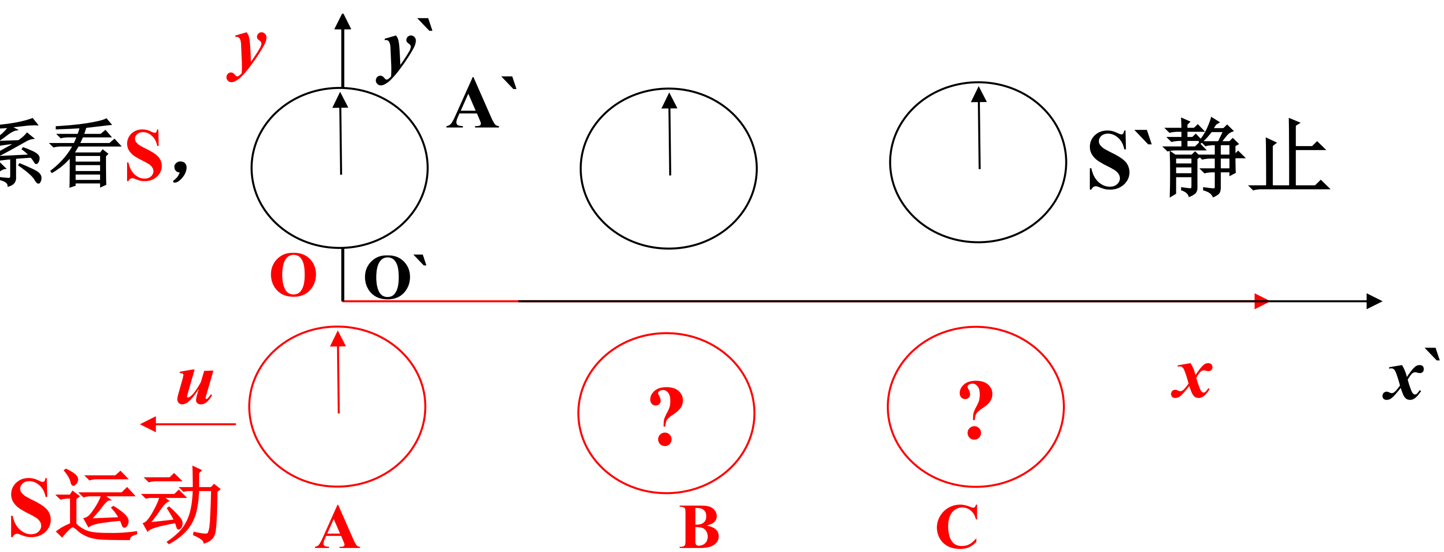
发现运动的S`系里的钟没有都对准在零！

O和O`点重合时，A和A`为零时

在S系看S`，



在S`系看S，

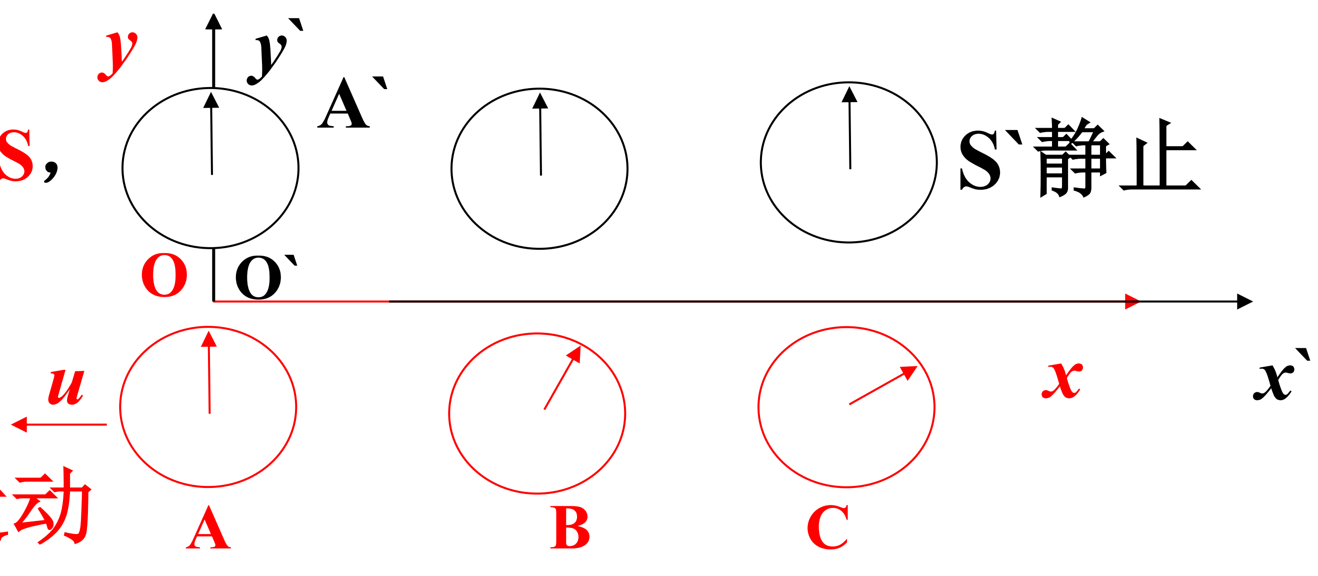


O和O`点重合时，A和A`为零时

$$t_B = \gamma\left(\underbrace{t'}_{0} + \frac{\beta}{c}x'\right) = \frac{\beta}{c}x'_B\gamma \neq 0$$

运动的S系里的钟没有都对准在零

在S`系看S，

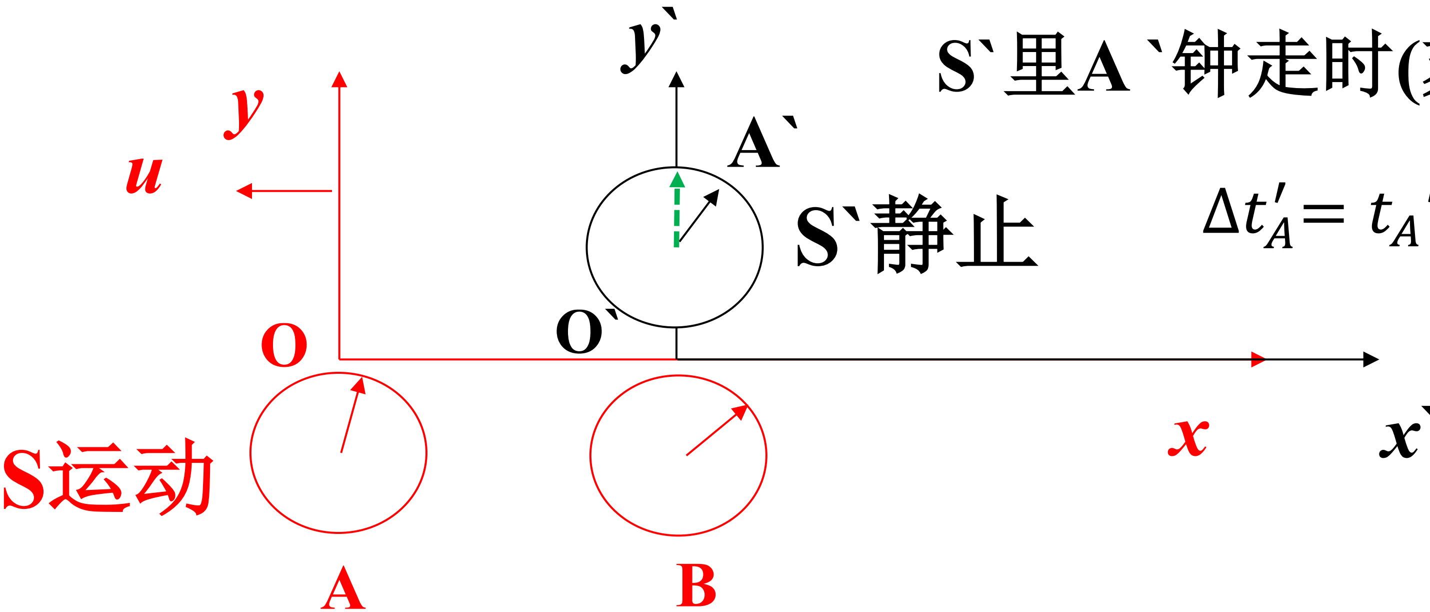


S`静止

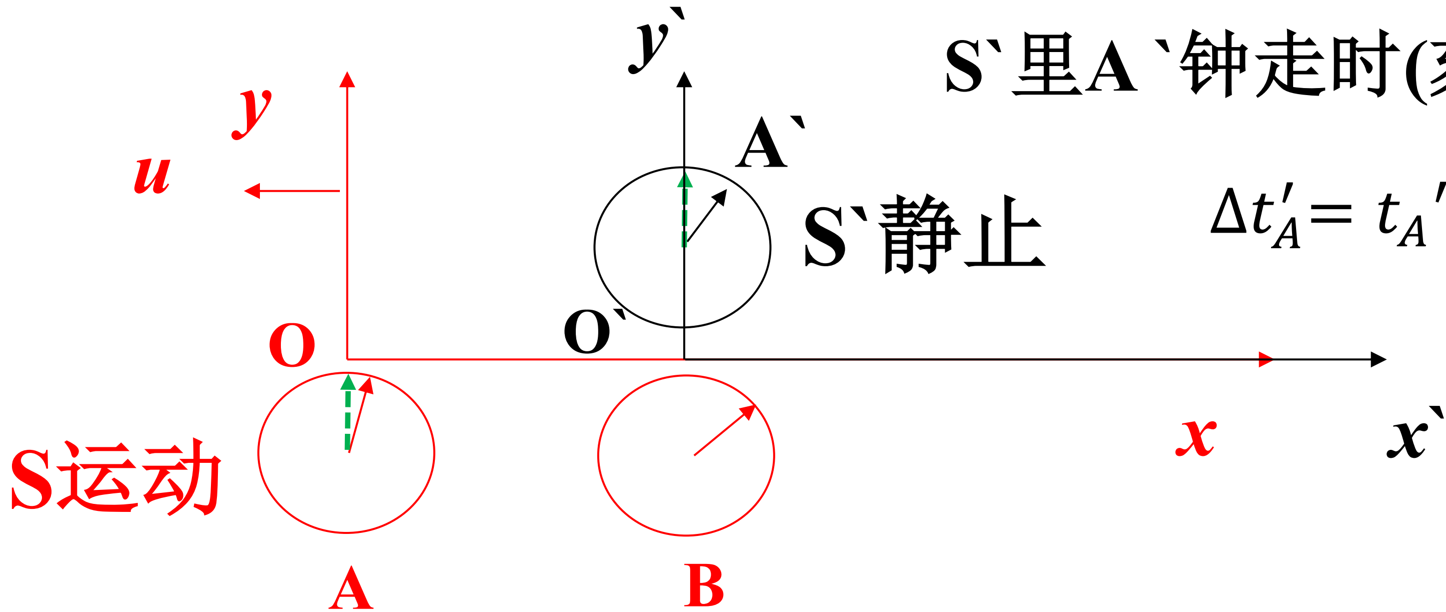
S运动

S`里A`钟走时(刻度)

$$\Delta t_A' = t_A{}' = \frac{x_B{}'}{c\beta}$$



在S`系看S：



S`里A`钟走时(刻度)

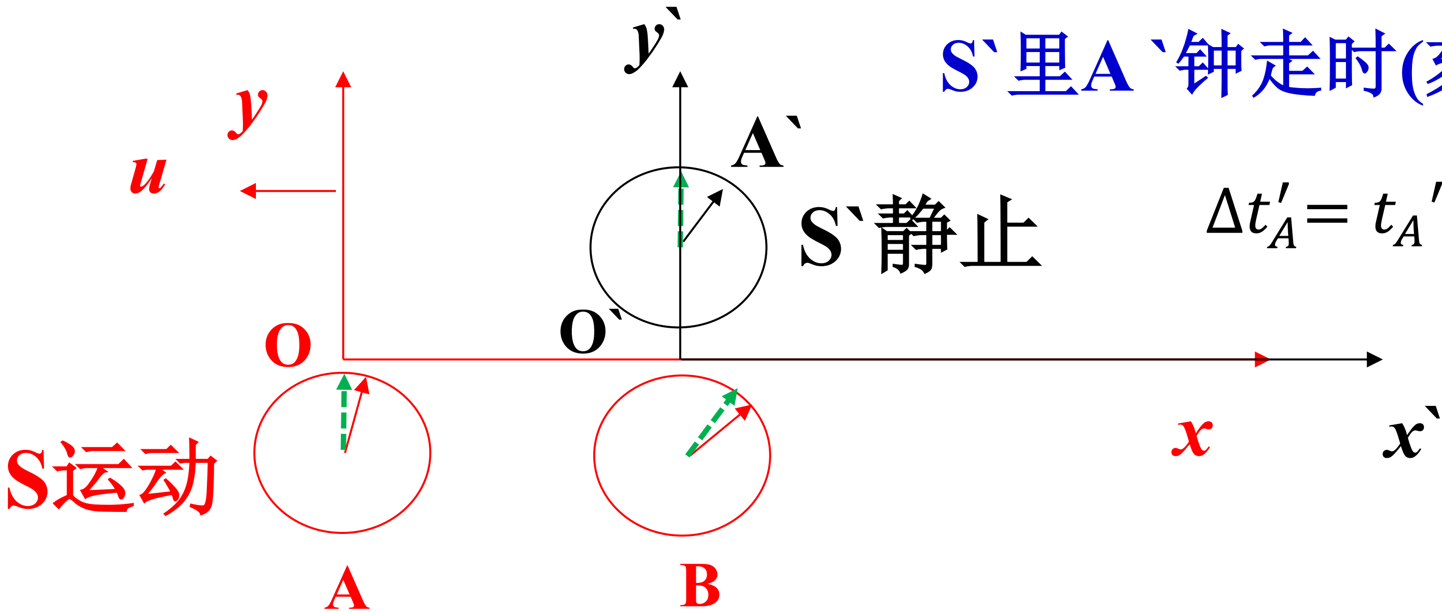
$$\Delta t_A' = t_A{}' = \frac{x_B{}'}{c\beta}$$

在S`系看S:

A钟刻度（走时）

$$\Delta t_A = t_A = \gamma\left(t' + \frac{\beta}{c}x'\right) = \gamma\left(t_A{}' + \frac{\beta}{c}(-x_B{}')\right) = \frac{x_B{}'}{c\beta\gamma} < \Delta t_A'$$

S`里A`钟走时(刻度)



$$\Delta t_A' = t_A{}' = \frac{x_B{}'}{c\beta}$$

在S`系看S：

B钟刻度 $$t_B = \gamma\left(t' + \frac{\beta}{c}x'\right) = \gamma t_A' > t_A'$$

B钟走时 $$\Delta t_B = \gamma\frac{x_B{}'}{c\beta} - \gamma\frac{\beta}{c}x_B{}' = \frac{x_B{}'}{c\beta\gamma} = \Delta t_A < \Delta t_A'$$

$$\frac{\Delta t_B}{\Delta t_A{}'} = \frac{\Delta t_A}{\Delta t_A{}'} = \frac{1}{\gamma} = \sqrt{1-\beta^2} = \sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}} < 1$$

S`系的观察者发现运动的S系的钟慢　无矛盾

***与钟一起运动的观测者是感受不到钟变慢的。**