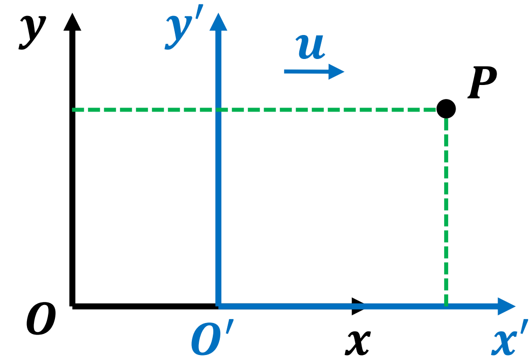
基础物理学 A1
2025年春季学期

谢柯盼
kpxie@buaa.edu.cn
物理学院

第八章 相对论

（标准）洛伦兹变换

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



相关题目的解题要点

1. 要跳出“一遇到时间或长度换算必乘除$\sqrt{1 - u^2/c^2}$因子”的思维误区，此为最易错点
2. 列出事件表格求解。第一个事件通常可以取为时空零点，并根据表格中的空缺列出方程求解
3. 当既存在若干惯性系，又存在运动的质点时，要注意区分u（参考系的相对运动速度，出现在坐标变换公式中）和v（质点的运动速度，出现在固有时和后续的相对论力学计算中）

例：飞船以$0.8c$的速度匀速飞行，经过地球时把时钟和地球同步到12:00。舱内时间显示12:30时，飞船经过与地球相对静止且使用地球时间的空间站。

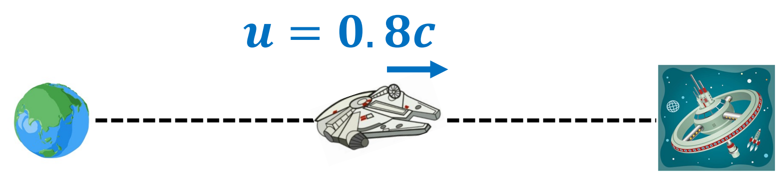
一． 空间站认为飞船何时到达？

二． 按照地球上的坐标，空间站离地球多远？

三． 此时飞船给地球发信，地球时间何时收到？

四． 地球秒回信息，飞船时间何时收到回信？

（此为课本1.7题）

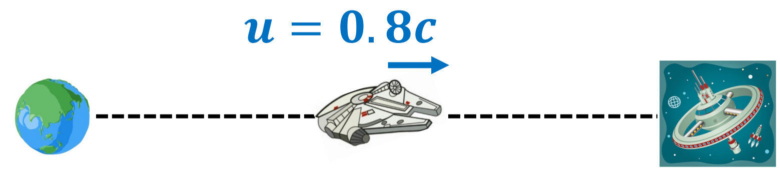


解：按题意列出4个事件

1. 飞船经过地球并将时钟与地面校准
2. 飞船经过空间站并向地球发信
3. 地球收信并秒回
4. 飞船收到回信

可按因果顺序串联起来并求解

解：以地球为S系，飞船为S'系，事件1为时空原点



事件2：S'系中$(x', t') = (0, T)$，这里$T = 30\ \mathrm{min}$

变换到S系得$(x, t) = (4cT/3, 5T/3)$

可回答第一、二问：空间站认为飞船12:50经过，空间站与地球距离$L = 4cT/3 \approx 7.2\times10^{11}\ \mathrm{m}$

飞船向地球发的信需要$L/c = 4T/3$时间才能收到，

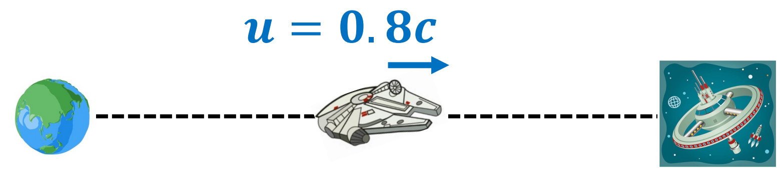
故事件3发生于S系的$5T/3 + 4T/3 = 3T$时刻，或称地球时钟示数13:30（第三问）

事件3对应S系$(x, t) = (0, 3T)$，变换到S'系得$(x', t') = (-4cT, 5T)$，可知该地点距离飞船$L' = 4cT$

故信号经过$L'/c = 4T$时间才能收到

收到时S'系的时刻为$5T + 4T = 9T$，或称时钟示数16:30（第四问）

解：如果列表格求解，则过程如下



	S系坐标(x,t)	S'系坐标(x',t')
事件1（飞船过地球）	$(0,0)$	$(0,0)$
事件2（飞船发信）	$(4cT/3, 5T/3)$	$(0,T)$
事件3（地球收信和回信）	$(0,3T)$	$(-4cT,5T)$
事件4（飞船收信）	能算，但题目没问	$(0,9T)$

令“→”为洛伦兹变换的计算方向，而“→”为光信号的传播计算，则如上图所示

列表格时，同一行的时空坐标由洛伦兹变换相联系，由题目所给信息能导出未知信息

同一列的时空坐标通常由相互作用的传递相联系，如光信号的传播或者质点的运动

计算同一列的坐标时，注意不要被另一个参考系影响

要更好地理解相对论的时空观，一个很好的方法是考察它的各种佯谬

相对论的很多推论较为反常识、反直觉，令人觉得不可思议且似乎能找到论证中的漏洞，从而在思辩上驳倒相对论

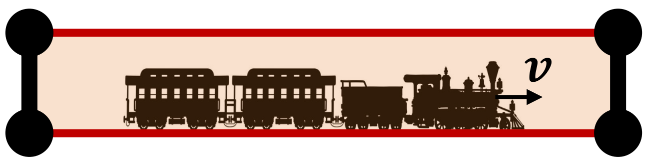
实际上，狭义相对论的假设很简洁，且都经历了实验验证，理论推导则是自洽的，没有内部矛盾

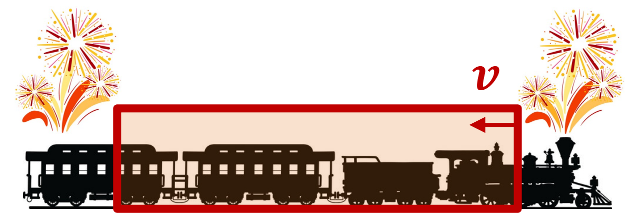
任何表观上的“悖论”或“矛盾”均是因为我们对经典时空观放弃得不够彻底而出现的假象，而不是真正的矛盾。例如上次课说过的：

- 飞船过双空间站对钟问题，飞船和空间站彼此觉得对方钟慢，洛伦兹变换完美解释
- 双生子问题，利用固有时概念完美解释

思考和解决这些佯谬有助于更好地理解相对论

例：火车隧道悖论（亦称为梯子谷仓悖论）。设火车静止时与隧道一样长。现火车高速通过隧道，则以下哪种情况为真？





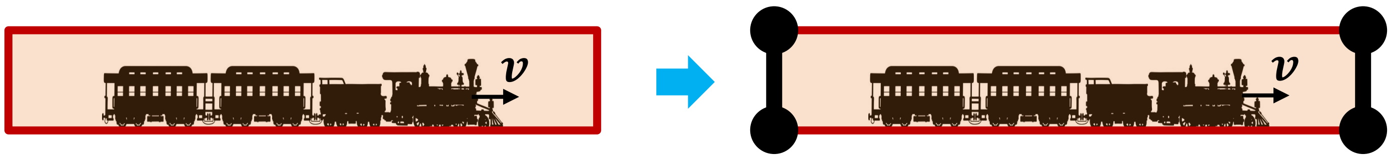
地面上的人认为：
火车运动，长度收缩，
因而可以完全装进隧道
在这段时间内关上隧道两端的屏蔽门，可以把火车完全困在里面
这就能证明火车确实比隧道短

火车上的人认为：
隧道运动，长度收缩，
因而火车首尾可以同时在隧道之外
在这段时间内车头车尾可以同时向天空放烟花
这就能证明隧道确实比火车短

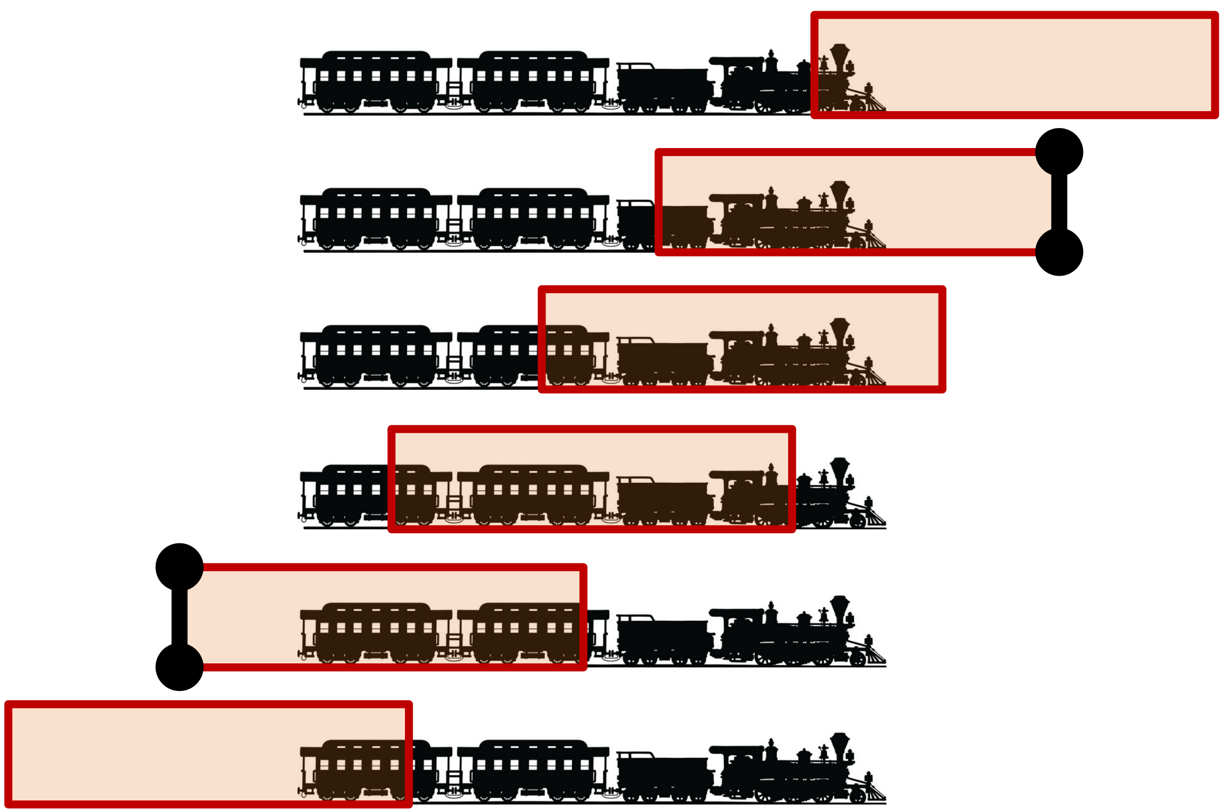
谁描述的过程能完成？到底是谁缩短了？

解：两种情况均为真，因为**同时**具有相对性

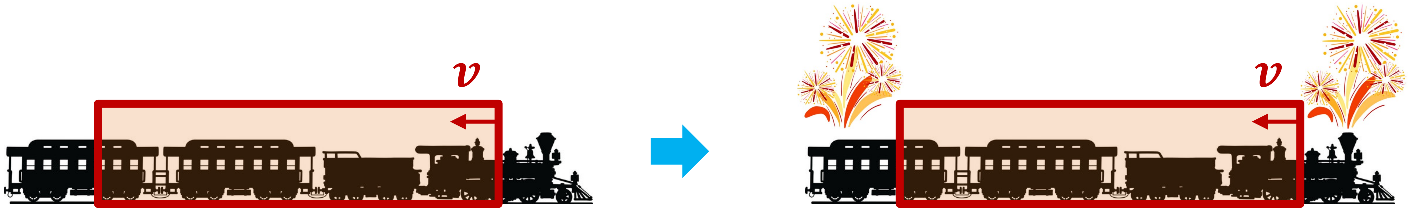
地面观测者认为隧道两端的门是**同时开闭**的



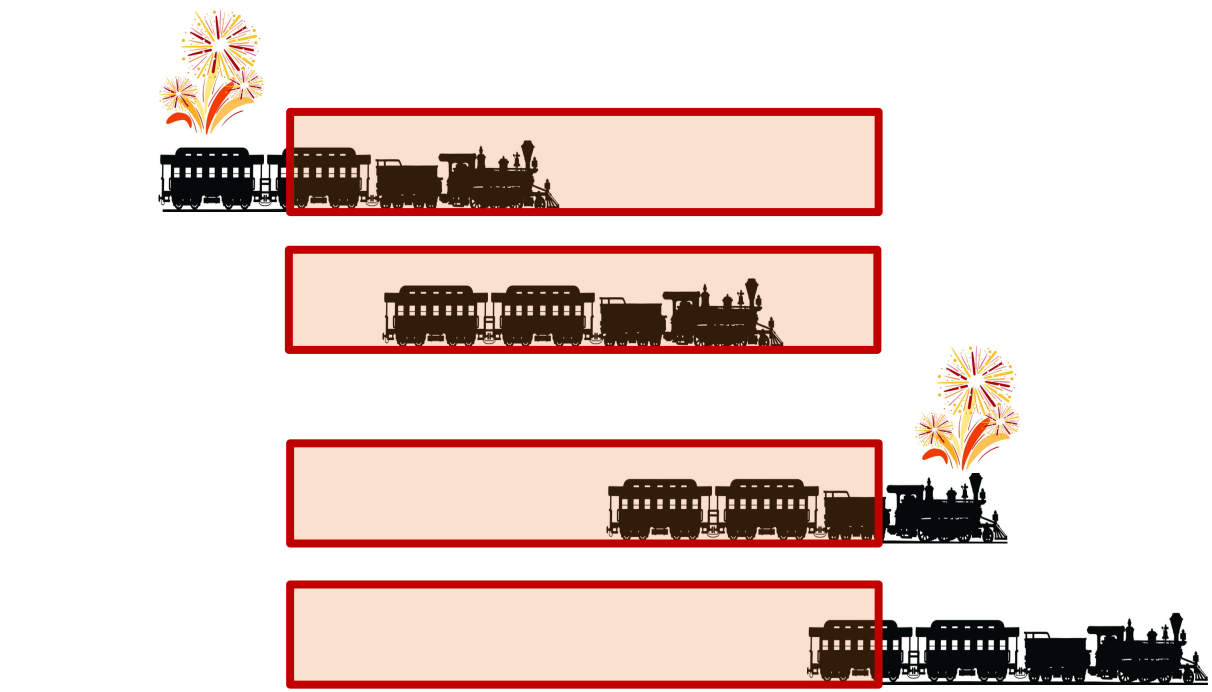
而火车上的人认为前后两端的门**不是同时开闭**的：



火车上的观测者认为车头车尾同时放烟花



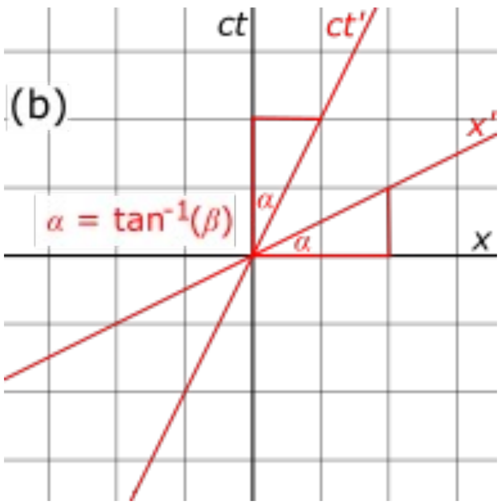
而地面上的人认为这两件事绝非同时

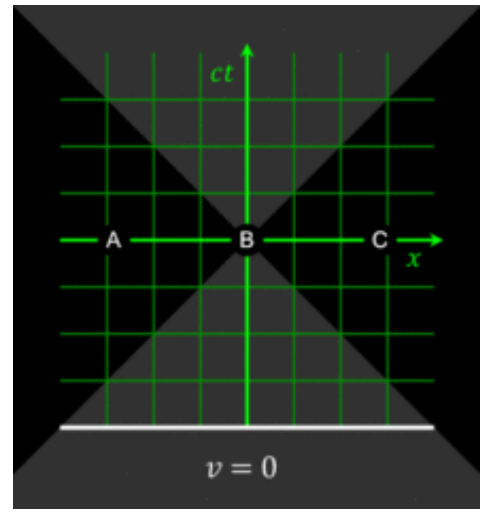


记$\beta = u/c$，$\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$，则洛伦兹变换改写为

$$\begin{pmatrix} ct' \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\beta\gamma \\ -\beta\gamma & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ct \\ x \end{pmatrix}$$

可视为时空平面上的坐标变换





事件的先后次序在不同惯性系中可以不同

质点在时空图中的轨迹形成**世界线**

同一世界线在不同惯性系里形状不同，由洛伦兹变换联系。**四维时空图**无法画在纸上，但可由数学来把握

注意：存在因果关系的事件，次序不会因变换而改变

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

若两事件之间存在因果关系，则有$|\Delta x| \le c\Delta t$，因为相互作用传递的最快速度是光速

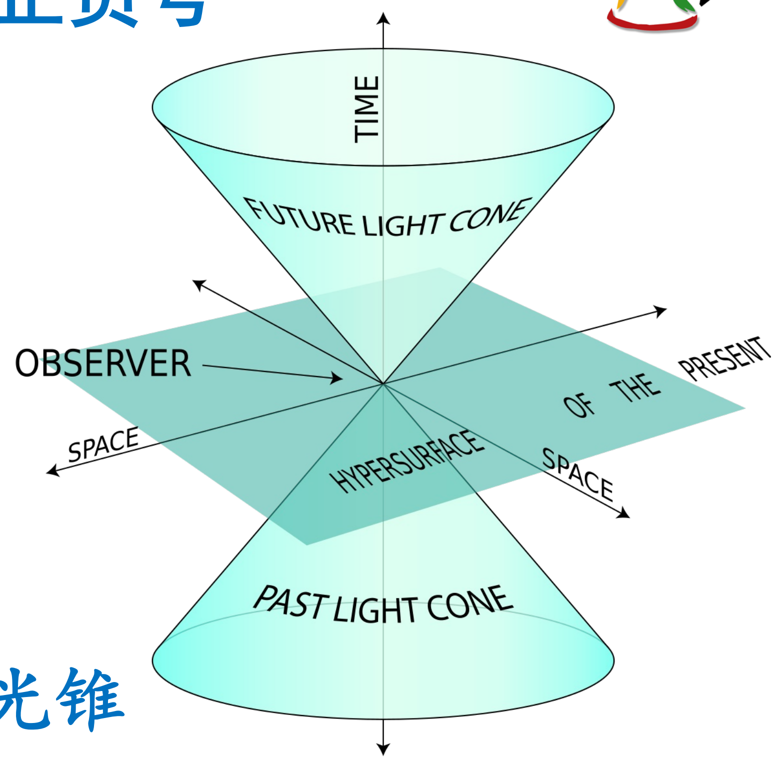
结合$|u| < c$知$\Delta t'$与Δt有同样的正负号

另一视角：四维距离模方

$$\Delta s^2 \equiv c^2\Delta t^2 - |\Delta \vec{r}|^2$$

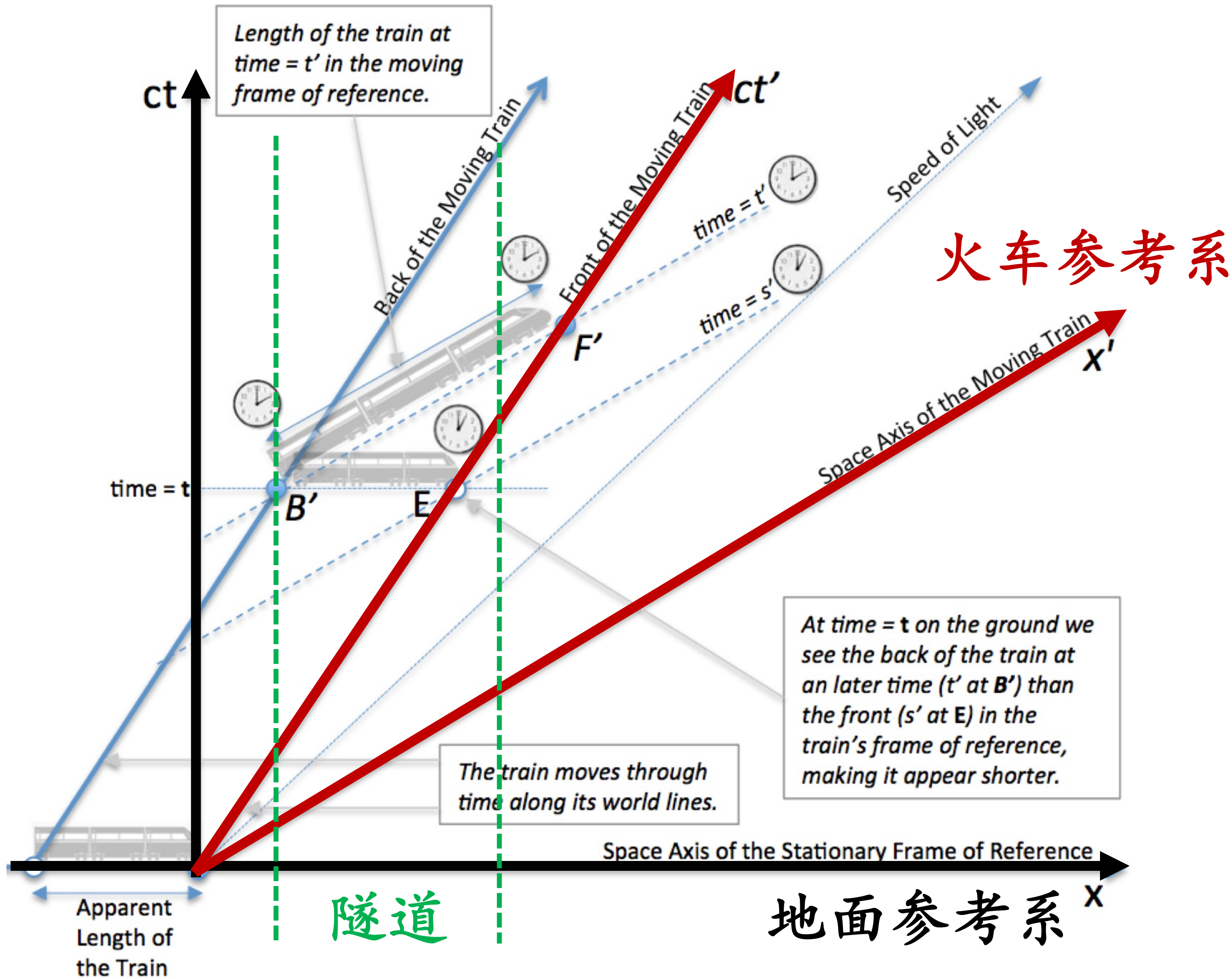
若$\Delta s^2 \ge 0$，两事件可以有因果关系；$\Delta s^2 < 0$则无因果关系

Δs^2在洛伦兹变换下不改变，故因果性也不会在变换下改变

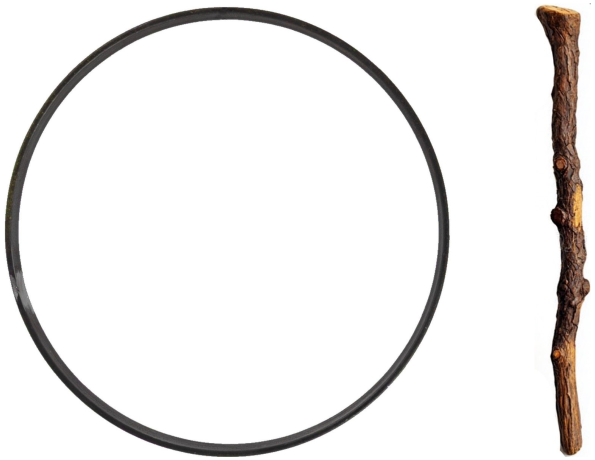


因果性的分界线（面）称为光锥

用时空图可以很清楚地把整个图景讲清楚



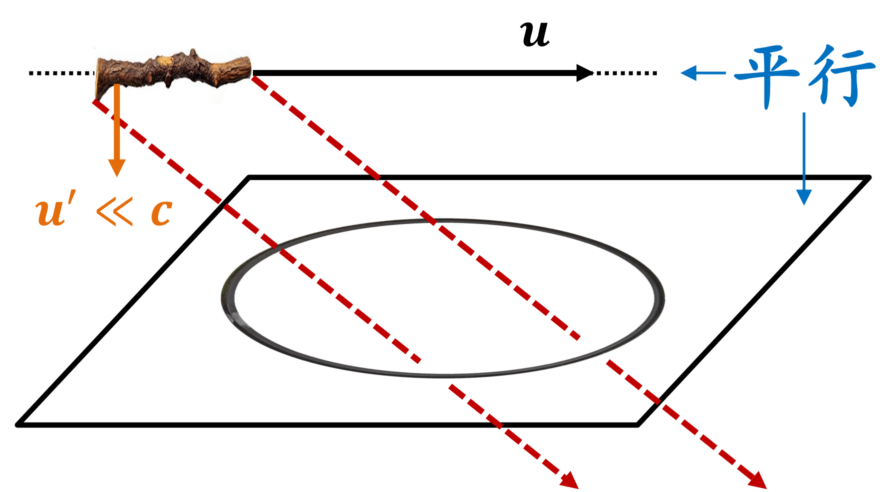
例：棍环悖论（bar and ring）



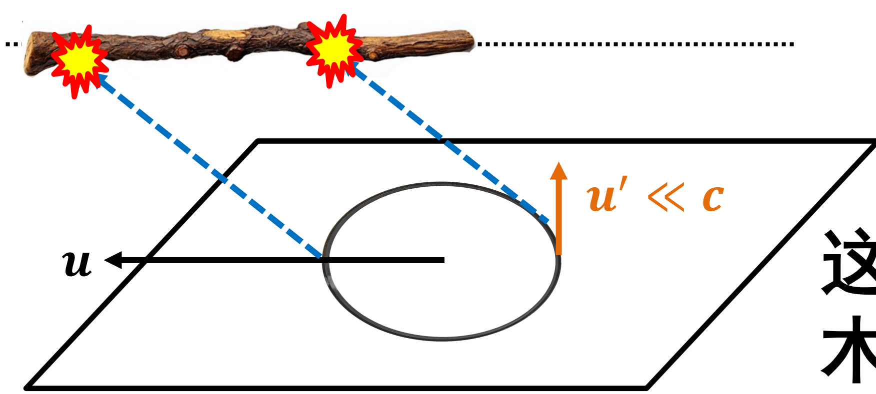
静止时，铁环直径与木棍长度相等

微小垂直速度

高速沿棍方向运动



铁环静止系：木棍缩短了，可以穿过



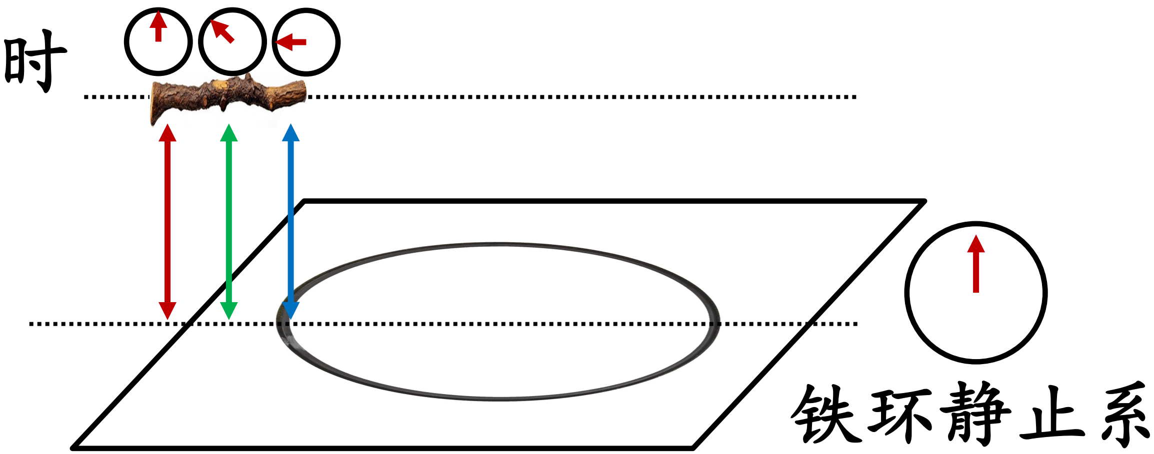
但是，木棍静止系认为：铁环变窄了，无法穿过

这就出现了矛盾！
木棍到底能不能穿过圆环呢？

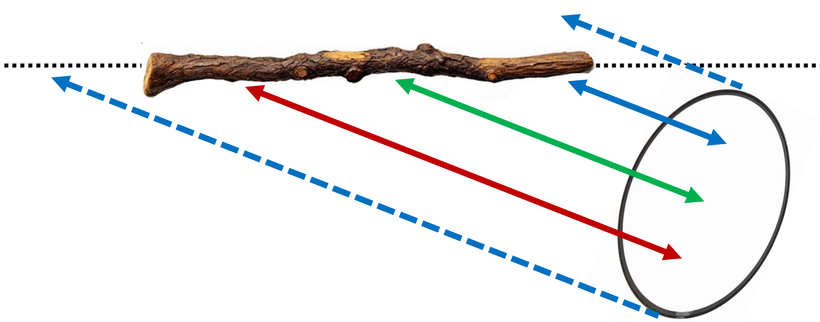
解：铁环静止系中，“木棍平行于环所在平面”

其含义为在环系的某一瞬间，红绿蓝三线段长度相等

棍系的钟此时并不同步！



因此，在棍系的某一瞬间看来，长度应是红 > 绿 > 蓝



在木棍静止系看来，铁环与自己所在直线成一倾角

二者并不平行！

即使铁环运动变窄，通过此角度依然可以实现无损穿过，不存在矛盾！*上图仅为定性示意

另一种理解方式：

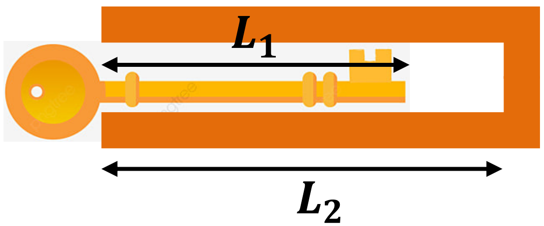
- 在环系中，棍上的任意一点均同时穿过了环所在平面，但“同时”具有相对性
- 由刚才“隧道关火车”的例子可知，棍系应认为是越靠前的部分越早穿过
- 故棍系认为铁环与棍所在直线并不平行，二者成一倾角，使得木棍恰好能穿过变窄了的铁环

由此可见平行的相对性：一惯性系认为平行的两个物体，另一惯性系不一定认为其平行

额外的评述：

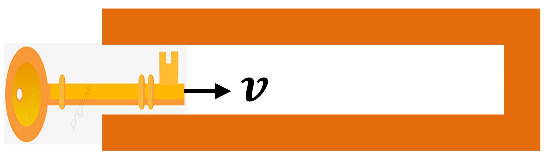
1. 这里平行出现相对性，是因为木棍有一横向速度；若无此速度，则木棍系也会认为其与铁环平行
2. 这里涉及了运动速度与坐标轴不平行的非标准洛伦兹变换，故掌握其定性解释即可

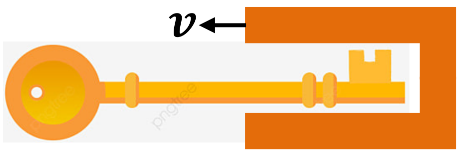
例：锁钥悖论（lock and key）



锁与钥匙均用刚性材料制成。静止时钥匙长度小于锁的深度，钥匙碰不到锁的底部

现在令钥匙向锁以速度$v=\beta c$高速运动，且当钥匙和锁碰撞时就会停止





锁静止系认为：
钥匙运动，长度收缩为

$$L_1' = L_1\sqrt{1-\beta^2}$$

更碰不到底部了！

钥匙静止系认为：
锁运动，深度收缩为

$$L_2' = L_2\sqrt{1-\beta^2}$$

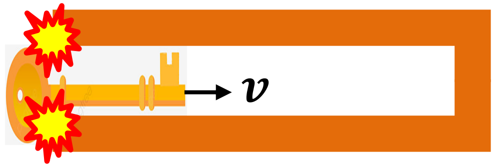
只要$L_2' < L_1$就能碰到

出现**矛盾**！钥匙到底能不能碰到锁的底部？

解：在锁静止系

$$L_1' = L_1\sqrt{1-\beta^2} < L_2$$

钥匙的后端会先撞上锁并停下



相互作用传递到前端需要经历时间

$$t_1 = L_1\sqrt{1-\beta^2}/(c-v)$$

在此期间，钥匙前端尚未感知到碰撞，仍会继续以v运动

因而，在感知到碰撞前，前端运动的距离为$\Delta L_1 = vt_1$

若$L_1' + \Delta L_1 > L_2$，则前端可碰到锁的底部，即

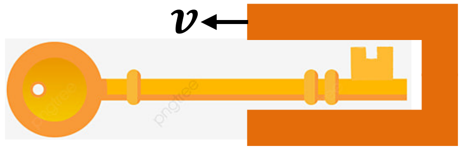
$$L_1\sqrt{(1+\beta)/(1-\beta)} > L_2$$

此为能否碰到的判定条件

注意其与上页的钥匙静止系初步估算并不一样！

是否可以继续深究？

解：在钥匙静止系，锁孔变浅



$$L_2' = L_2\sqrt{1-\beta^2}$$

若$L_2' < L_1$，则必能碰到底部，无需多言

但若L_2'仍大于L_1呢？这时变浅了的锁孔的深度仍大于钥匙的长度，锁口会先撞上钥匙后端

但相互作用的传递需要时间，该碰撞传递到锁孔底部要

$$t_2 = L_2\sqrt{1-\beta^2}/(c+v)$$

在感知到碰撞前，底部运动的距离为$\Delta L_2 = vt_2$

若$L_1 + \Delta L_2 > L_2'$，则锁底可碰到钥匙，得

$$L_1\sqrt{(1+\beta)/(1-\beta)} > L_2$$

与上页的结果完全一致，说明了相对论的自洽性

钥匙与锁在运动中的变形并非自身材料问题，而是时空本身的变化导致

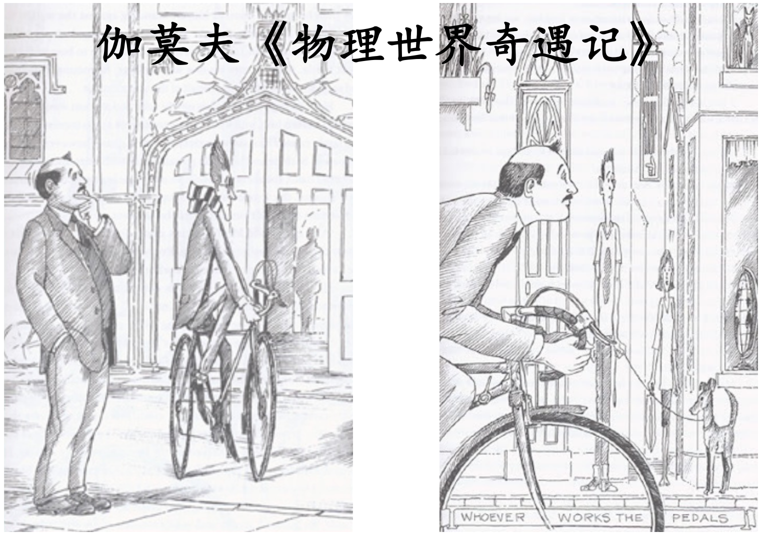
相对论中不允许绝对刚体的存在，因为相互作用传递速度存在上限（真空光速），但刚体隐含着相互作用传递速度无穷大

若金箍棒为刚体且其伸长至1亿公里，则在其一端以1°/s的角速度旋转金箍棒时，其另一端线速度约为6倍光速

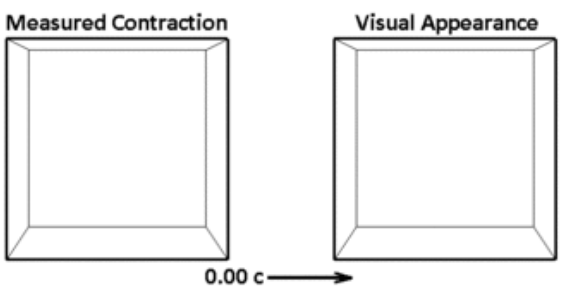
相对论中只有不参与相互作用的惯性坐标标架才可认为是刚性的，参与相互作用的物体都会因为时空效应而变形

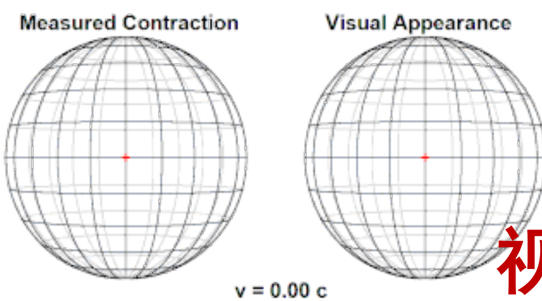
思考佯谬有利于更好地理解相对论时空观及发现其与经典时空观、“常识”之间的不同之处

洛伦兹收缩的视觉效果：真如汤普金斯先生所见吗？

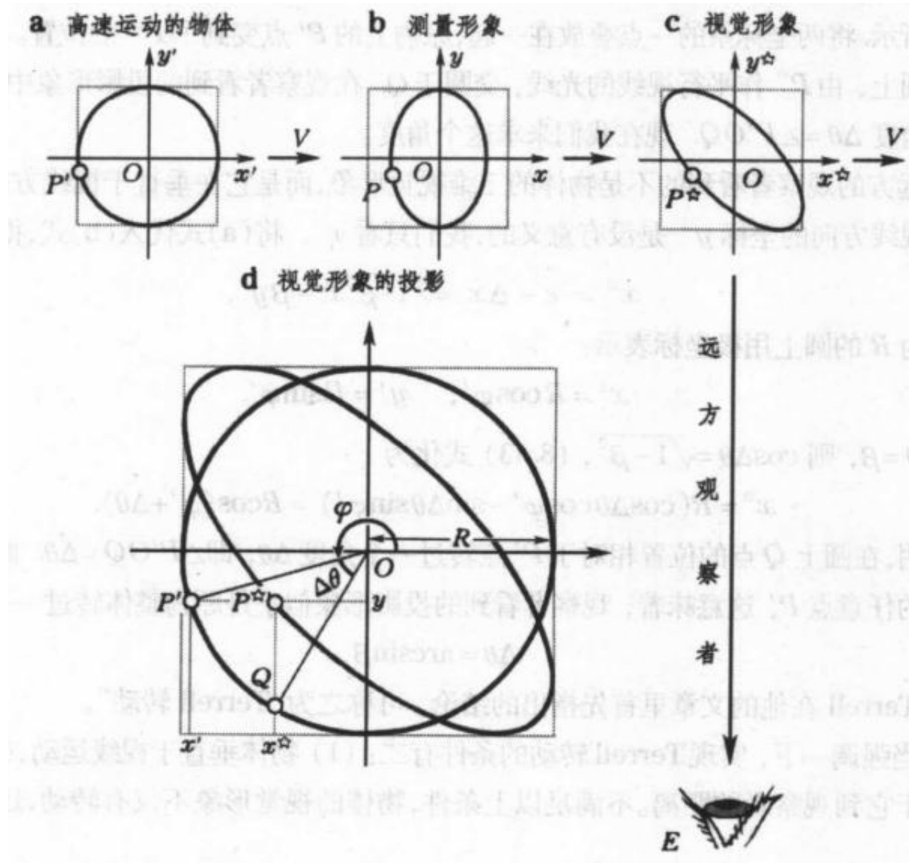


伽莫夫《物理世界奇遇记》





实际上长度收缩的物理效应和其视觉效果并不一样：

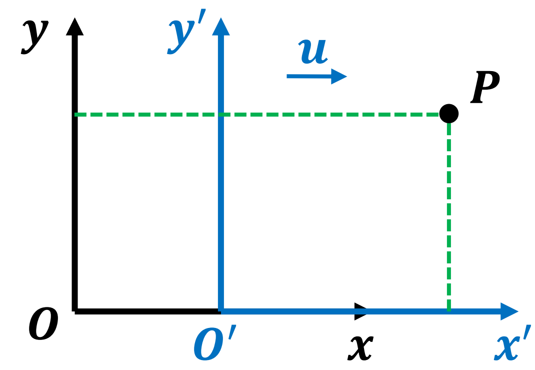


视觉效果取决于同一时间到达眼睛的光

§8-6 速度变换公式

质点P在S系速度为$\vec{v} = \left(v_x, v_y, v_z\right)$

在S'系速度为$\vec{v}' = \left(v'_x, v'_y, v'_z\right)$



伽利略变换坐标微分

$$\begin{cases} \mathrm{d}x' = \mathrm{d}x - u\mathrm{d}t \\ \mathrm{d}y' = \mathrm{d}y \\ \mathrm{d}z' = \mathrm{d}z \\ \mathrm{d}t' = \mathrm{d}t \end{cases}$$

速度分量可写为$v_x = \mathrm{d}x/\mathrm{d}t$，$v'_x = \mathrm{d}x'/\mathrm{d}t'$，…

得到伽利略速度变换律

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

即二者相差一个**牵连速度**

洛伦兹变换给出（这里$\beta = u/c$）

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

速度分量可写为$v_x = \mathrm{d}x/\mathrm{d}t$，$v'_x = \mathrm{d}x'/\mathrm{d}t'$，...

$$v'_x = \frac{v_x - u}{1 - \beta v_x/c} \qquad v'_y = \frac{v_y\sqrt{1-\beta^2}}{1 - \beta v_x/c}$$

$$v'_z = \frac{v_z\sqrt{1-\beta^2}}{1 - \beta v_x/c}$$

x方向分量变换更复杂了

y、z方向分量和x方向有关了

洛伦兹速度变换

$$\begin{cases} v'_x = \dfrac{v_x - u}{1 - \beta v_x / c} \\ v'_y = \dfrac{v_y\sqrt{1-\beta^2}}{1 - \beta v_x / c} \\ v'_z = \dfrac{v_z\sqrt{1-\beta^2}}{1 - \beta v_x / c} \end{cases}$$

洛伦兹速度逆变换

$$\begin{cases} v_x = \dfrac{v'_x + u}{1 + \beta v'_x / c} \\ v_y = \dfrac{v'_y\sqrt{1-\beta^2}}{1 + \beta v'_x / c} \\ v_z = \dfrac{v'_z\sqrt{1-\beta^2}}{1 + \beta v'_x / c} \end{cases}$$

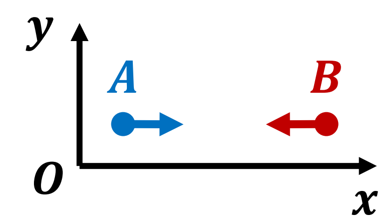
在$c \to \infty$时回归到伽利略速度变换律

直接计算可发现，若$|\vec{v}| = c$，则$|\vec{v}'| = c$，即光速变换后还是光速，反映了光速不变原理

在质点作一维运动的情况下，退化为

$$v' = \frac{v - u}{1 - uv/c^2}, \qquad v = \frac{v' + u}{1 + uv'/c^2}$$

例：两质点A和B相向运动，其相对地面系的速率均为$0.9c$，求A相对于B的速率。



解：所谓A相对于B的速率，是指在B静止系中看A的速率

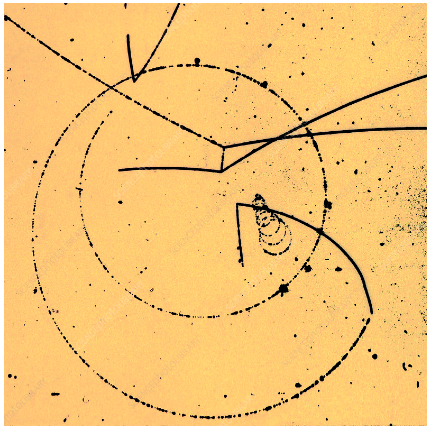
建立B静止系S'，速度为$u=-0.9c$

A在地面系S中的速度为$v=0.9c$，由洛伦兹速度变换公式得

$$v'=\frac{0.9c-(-0.9c)}{1-(-0.9c)\cdot 0.9c/c^2}=0.9945c$$

叠加后速率仍然小于c，体现了相对论的自洽性

例：已知K^0介子可衰变为π^+和π^-两个介子，且静止的K^0衰变出来的$\pi^\pm$速率均为$0.85c$，今有一相对于实验室以速率$0.90c$运动的K^0衰变，问末态$\pi^\pm$可能的最大和最小速率分别是多少？



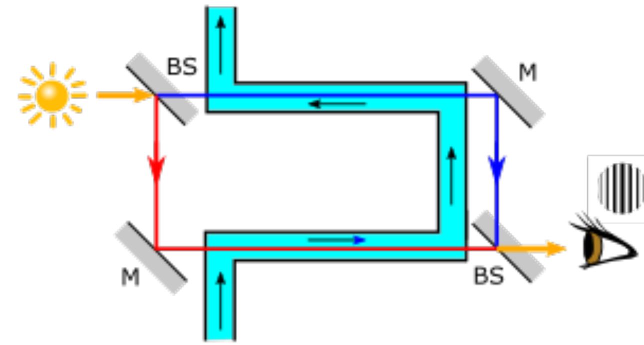
解：当末态粒子速度与母粒子同向时，速率最大

$$v'_{\max} = \frac{0.90c + 0.85c}{1 + (0.85c \times 0.90c)/c^2} = 0.9915c$$

当末态粒子与速度反向时，速率最小

$$v'_{\min} = \frac{0.90c - 0.85c}{1 - (0.85c \times 0.90c)/c^2} = 0.2128c$$

例：斐索实验。已知光在静止水中的速度为c/n，其中水的折射率$n=1.33$。当光顺着以速率v流动的水传播时，测量到水中的光速为



$$c'=\frac{c}{n}+v\left(1-\frac{1}{n^2}\right)$$

试解释其原因。

解：利用相对论速度叠加律

$$c'=\frac{c/n+v}{1+(v\cdot c/n)/c^2}=\frac{c}{n}+v\left(1-\frac{1}{n^2}\right)+\mathcal{O}(v^2)$$

上式泰勒展开考虑到了$v\ll c$

因而，斐索实验不是水“部分拖曳”了以太，而只是相对论速度叠加律的体现

爱因斯坦多次提及斐索实验对他的启发，认为这是他提出相对论的实验基础之一

§8-7 质量、能量和动量

考虑质点加速度$\vec{a}=\left(a_x,a_y,a_z\right)$在洛伦兹变换下的变换

将洛伦兹速度变换微分，结合时空变换，利用$a_x=\mathrm{d}v_x/\mathrm{d}t$，$a'_x=\mathrm{d}v'_x/\mathrm{d}t'$ ...可得

$$\begin{cases} a'_x=\dfrac{a_x\left(1-\beta^2\right)^{3/2}}{(1-\beta v_x/c)^3} \\ a'_y=\dfrac{a_y\left(1-\beta^2\right)}{(1-\beta v_x/c)^2}+\dfrac{a_x\left(1-\beta^2\right)\beta v_y/c}{(1-\beta v_x/c)^3} \\ a'_z=\dfrac{a_z\left(1-\beta^2\right)}{(1-\beta v_x/c)^2}+\dfrac{a_x\left(1-\beta^2\right)\beta v_z/c}{(1-\beta v_x/c)^3} \end{cases}$$

加速度的变换式
了解即可

因此，$\vec{a}$在不同惯性系中不同，若S系中$\vec{F}=m\vec{a}$，则S'系中不一定有$\vec{F}'=m\vec{a}'$

因而相对论时空观下牛顿第二定律不符合相对性原理

牛顿力学不符合相对论时空观的另一依据：

根据$\vec{F} = m\vec{a}$，恒力作用下的质点（例如恒定电场中的电子）加速度恒定，可以持续加速，速度没有上限

这与相对论中的“极限速度为光速”直接矛盾

据此，我们需要一套符合相对论的新动力学定律

	经典时空观	相对论时空观
坐标变换	伽利略变换	洛伦兹变换
动力学定律	牛顿三定律	???

“???”必须满足：

- 符合相对论时空观，在洛伦兹变换下保持不变
- 在$c \to \infty$时回归到牛顿力学，因为后者在低速时通过了大量实验的检验

探索：如何修改牛顿三定律使之符合相对论时空观？

第一定律只涉及不参与相互作用或受力平衡的质点，故不需要修改

第二定律需要修正为符合洛伦兹变换的形式

第三定律涉及到同时性，可将其表述改为孤立体系动量守恒；不过，动量的定义还需要探索

因而，相对论动力学的关键在于新的动量定义，第二、第三定律都需要用到

要怎么修改$\vec{F}=m\vec{a}$才可以使其符合相对论？

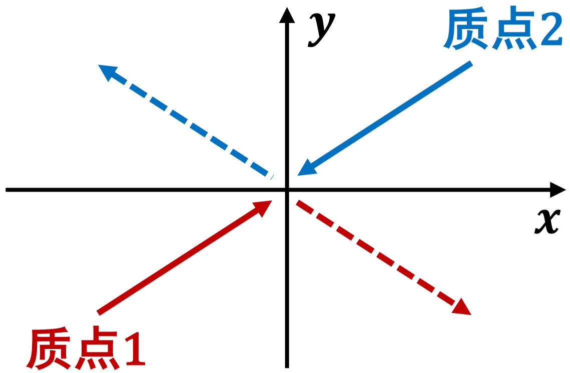
- 如果在速率v接近光速时，质量m会显著增大，则$\vec{a}$会随之降低，使质点速率不会超过光速
- 因此可以考虑令$m(v)$依赖于速率v。且该公式必然依赖于c，并在$c\to\infty$时回归到牛顿力学

此时，相比于使用力等于质量乘以加速度$\vec{F}=m(v)\vec{a}$

使用力等于动量的变化率$\vec{F}=\mathrm{d}\vec{p}/\mathrm{d}t$的表述方式会更方便，因为

- 后者的物理意义更明显：力改变了物体的运动，而运动的度量就是动量
- 即使在牛顿力学中，前者也只是后者在m为常数时的推论
- 在技术上，$\vec{p}=m(v)\vec{v}$，而速度的变换比加速度的变换更简单，更容易处理

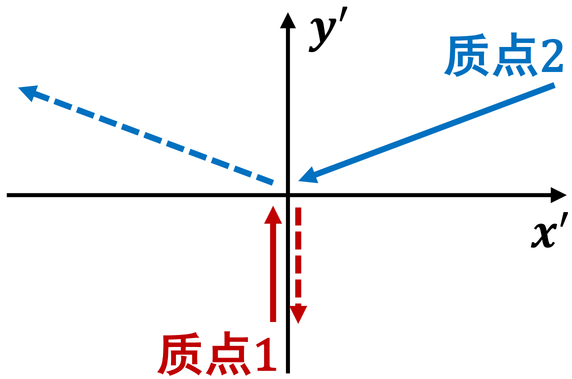
为得出$m(v)$，考虑以下两个全同粒子的碰撞



在质心系S中的描述

- 质点1：$(v_x, v_y) \to (v_x, -v_y)$
- 质点2：$(-v_x, -v_y) \to (-v_x, v_y)$

碰撞前后总动量均为零（守恒）



考虑在沿x轴以$u = v_x$运动的S'系中的描述

利用第21页的速度变换公式得

- 质点1：$\left(0, \frac{v_y}{\sqrt{1-\beta^2}}\right) \to \left(0, -\frac{v_y}{\sqrt{1-\beta^2}}\right)$
- 质点2：$\left(\frac{-2v_x}{1+\beta^2}, \frac{-v_y\sqrt{1-\beta^2}}{1+\beta^2}\right) \to \left(\frac{-2v_x}{1+\beta^2}, \frac{v_y\sqrt{1-\beta^2}}{1+\beta^2}\right)$

其中$\beta = v_x/c$

在S'系中，质点1沿着y轴运动，碰撞后速度反向

S'系中碰撞前后质点1的速率均为（已代入$\beta = v_x/c$）

$$v_1 = \frac{v_y}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{v_y}{\sqrt{1-v_x^2/c^2}}$$

类似地可以算出碰撞前后质点2的速率则均为

$$v_2 = \frac{\sqrt{4v_x^2 + v_y^2 - v_x^2 v_y^2/c^2}}{1+v_x^2/c^2}$$

假定S'系中动量守恒，则对y方向有

$$m(v_1)\frac{v_y}{\sqrt{1-v_x^2/c^2}} = m(v_2)\frac{v_y\sqrt{1-v_x^2/c^2}}{1+v_x^2/c^2}$$

其中$m(v_1)$为质点1在速率为v_1时的质量，$m(v_2)$为质点2在速率为v_2时的质量

该表达式应对任何实数v_x和v_y成立，只要$v_x^2 + v_y^2 < c^2$

将上页的公式改写，得到

$$m(v_1) = m(v_2)\frac{1 - v_x^2/c^2}{1 + v_x^2/c^2}$$

重申：该表达式应对**任何实数**v_x和v_y成立

那么考虑取$v_y \to 0$的极限来简化该式，此时$v_1 \to 0$，

而$v_2 \to 2v_x/(1 + v_x^2/c^2)$

动量守恒式则化为

$$m(0) = m\left(\frac{2v_x}{1 + v_x^2/c^2}\right)\frac{1 - v_x^2/c^2}{1 + v_x^2/c^2}$$

令速率$w = 2v_x/(1 + v_x^2/c^2)$，则可改写该式为

$$\frac{m(w)}{m(0)} = \frac{1}{\sqrt{1 - w^2/c^2}}$$

此为质点的质量在速率w时与静止时的比值

刚才我们考察了相对论时空观下的全同粒子碰撞

若假定动量定义为$\vec{p} = m(v)\vec{v}$，假定动量守恒在任意惯性系中成立，则可以得出质点的质量与速度的关系

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

其中m_0是质点静止时的质量

- 质量随着速度增大，当$v \to c$时$m \to \infty$
- $c \to \infty$时回归到经典力学的结论：质量与速度无关

以上推导并非演绎推理，而是基于合理假设的猜测

类比：牛顿三定律并非推导得到，而是基于大量实验事实的归纳总结

相对论质速关系（及将要学习的动力学定律）也并非由推导得出，而是基于牛顿力学及相对论时空观做出的探索和猜测，其正确与否，要靠实验检验

质速关系的实验检验：19世纪末，早在相对论建立之前，人们就已猜测**电子**质量会随速度着变化

$+$

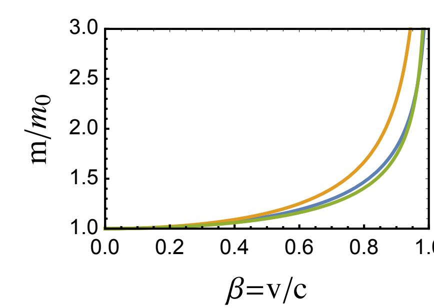
$$\begin{aligned}\nabla\cdot\mathbf{D} &= \rho\\ \nabla\cdot\mathbf{B} &= 0\\ \nabla\times\mathbf{E} &= -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t}\\ \nabla\times\mathbf{H} &= \mathbf{J}+\frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t}\end{aligned}$$

麦克斯韦方程组

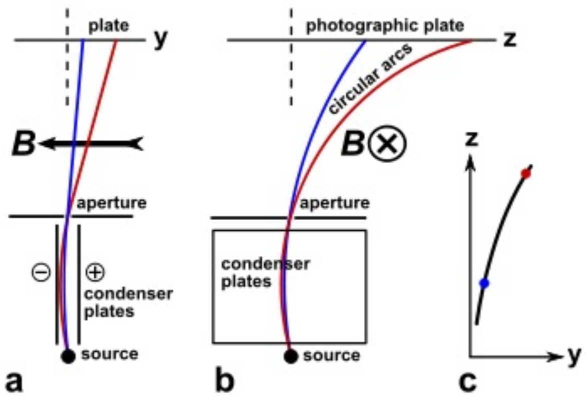
人们认为：电子携带电场，故加速电子时也加速了电场，即电场体现在电子的惯性（质量）里

麦克斯韦理论指出，电场在运动时会变化，故电子的质量在运动时**也应变化**。令$\beta = v/c$，

1. **亚伯拉罕**：$m = \frac{3m_0}{4\beta^2}\left(\frac{1+\beta^2}{2\beta}\log\frac{1+\beta}{1-\beta} - 1\right)$
2. **洛伦兹-爱因斯坦**：$m = m_0/\sqrt{1-\beta^2}$
3. **布赫雷尔-朗之万**：$m = m_0/\sqrt[3]{1-\beta^2}$



1901-1915年：德国考夫曼实验



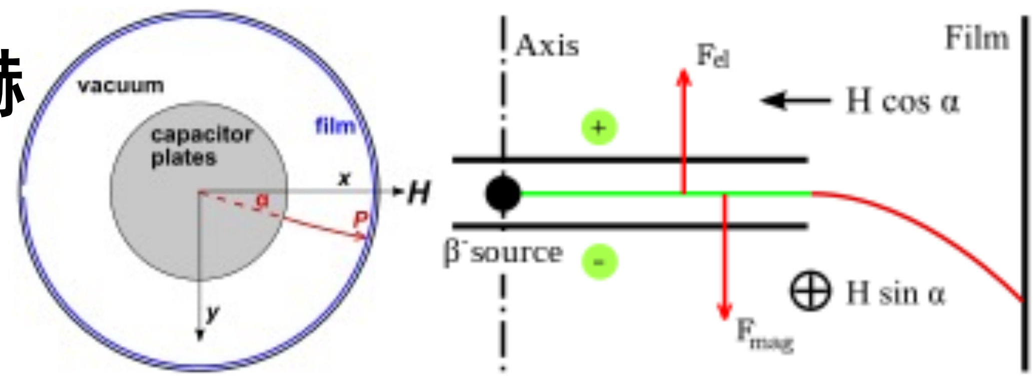
利用相互平行的电场和磁场，测量电子的偏转

实验结果排除了爱因斯坦的公式，认为正确答案应是上页的1或3

爱因斯坦（1907）：尽管实验看上去更符合另外两个理论，但那两个理论的基础不如相对论般令人信服。因而他更相信自己的理论

1908年以后：德国布赫雷尔等人

利用正交电场和磁场，验证了爱因斯坦的公式



后续实验均支持爱因斯坦，至今已有无数实验验证

为什么爱因斯坦认为自己的质速关系式比其他两家更令人信服?

我们在猜出相对论质速关系式的时候，只利用了洛伦兹变换和动量守恒

- 因此这一关系式来源于时空性质，对一切质点适用

另外两家的计算则有以下局限性

- 仅针对带电质点，因为计算中涉及到具体的电子电荷分布，存在额外的假设
- 不能明确地回答中性质点（例如中子，或甚至宏观不带电物体）的质量是否会随着速度变化

故相对论质速关系更为普遍也更简洁

实验验证了该公式，证实了前文的探索是合理的

本节课小结

洛伦兹变换的应用

- 不可生搬硬套$\sqrt{1-u^2/c^2}$因子；要列表精算

相对论时空观的学习和掌握

- 同时的相对性；长度测量的相对性
- 各类佯谬或“悖论”的解决
- 相对论速度变换公式的导出和应用

相对论力学初步

- 牛顿力学与相对论时空观不相容
- 要拓展牛顿力学，将之修正至相对论版本
- 质速关系、动量公式

第八章作业

《近代物理》分册

1.2, 1.4, 1.6, 1.10, 1.12, 1.14, 1.15, 1.16, 1.18

第1.10题已可完成，但第1.12题及其后的题目需要用到下次课才讲述的知识，如感到困难可先不完成

作业扫描提交至spoc.buaa.edu.cn，助教线上批改

提交时间段：4月11日0:00至4月25日00:00

以系统时间戳为准，原则上不接受其他解释