物理与工程　Vol.27　No.6　2017

狭义相对论的两个基本假设一个都不能少

张元仲

（中国科学院理论物理研究所，北京　100190）

NEITHER OF THE TWO POSTULATES IN SPECIAL RELATIVITY CAN BE LOST

Zhang Yuanzhong

(Institute of Theoretial Physics, Chenese Academy of Sciences)

注：本文是在下面报告 ppt 的基础上修改而成的

2017-6-19　《物理与工程》编辑部小型报告会

2017-6-21　北京理工大学小型报告会

2017-8-24　桂林“2017 年全国高等学校物理基础课程教育研讨会”

2017-8-26　华中科技大学引力中心

2017-9-07　华中科技大学粒子与天体物理研究所

2017-9-08　华中科技大学物理学院

报告内容：

一、狭义相对性原理和光速不变原理所包含的内容

二、建立狭义相对论的步骤
　1. 定义惯性系（就是定义 时间坐标-即定义同时性-亦即对钟）
　2. 用二个基本原理推导洛伦兹变换（两个假设一个都不能少）
　3. 依据狭义相对性原理建立所有近代物理学理论的动力学方程
　——所以说狭义相对论是近代物理学的一大支柱

三、不同的平直时空理论之间的唯一差别是时间坐标的定义不同

四、洛伦兹1904年的“洛伦兹变换”
　　不是狭义相对论的洛伦兹变换

五、狭义相对论的钟慢、尺缩（尺缩佯谬）、同时性的相对性、一道习题的解答（正确的解答需要使用全部这几个效应）

六、几个问题：
　1. 对钟能否避开单向光速的具体数值？
　2. 用中点对钟方法对好的时钟能否测出单向光速？
　3. 一位作者的思想实验方案能否判断单向光速各向同性？
　4. 不用光速不变原理定义坐标变换中的常数、时间坐标和速度就绝不是狭义相对论中的洛伦兹变换

1

报告题目是：
“狭义相对论的两个基本假设一个都不能少”

报告题目取这个名字是针对如下两种极为错误的观点：

第一种错误观点：光速不变原理可以由相对性原理推出
参见：N D Mermin, “relativity without light”, Am. J. Phys. 52(1984)119

第二种错误观点：
相对性原理可以由光速不变原理推出来

2

一、狭义相对性原理和光速不变原理所包含的内容

1. 狭义相对性原理：一切物理定律 在所有惯性系中均有效

力学相对性原理：力学定律 在所有惯性系中均有效；所以狭义相对性原理只是力学相对性原理的推广；如爱因斯坦说的“狭义相对论与经典力学的分歧不在相对性原理”

说明：
1. 相对性原理只在惯性系中成立，所以必须首先定义惯性系！
2. 相对性原理必须同时涉及2个惯性系，即涉及的是2个惯性系之间的关系
3. 相对性原理只涉及动力学（即物理定律），不能用于运动学
　　动力学：含动力学变量对时间的2阶微分（加速度）
　　运动学：不含加速度～例如，同时性、速度、尺缩、钟慢等

光速不变原理不可能推出狭义相对性原理的上述内容！

狭义相对论性原理的2个用途：
　1. 与光速不变原理一起推导洛伦兹变换；
　2. 用于构造近代物理理论，没有这条原理就没有所有近代物理学

3

2. 光速不变原理：光在真空中总是以不变速度 c 传播且与光源的运动状态无关

说明：

这条原理也只在惯性系中才有，所以也必须首先定义惯性系！

真空光速 不变 包含：
（1）在每一个惯性系中 c 都与光的频率无关（光在真空中传播没有色散）
（2）在每一个惯性系 c 都与光的传播方向无关，即单向光速各向同性
　　（这个假设用来对钟，即定义时间坐标亦即定义同时性）
（3）c 与光源的运动状态（惯性运动或非惯性运动）无关

●上面的（1）和（3）可以用实验检验；（2）不能用实验检验只能假定即单向光速不可测量

只涉及动力学的狭义相对性原理不可能推出上述涉及运动学的光速不变原理！所以光速不变原理只能单独假设！光速不变原理也有两个用途：
　1. 定义同时性（即定义时间坐标，亦即对钟）
　2. 与相对性原理一起推导洛伦兹变换

4

收稿日期：

作者简介：张元仲，男，研究员，主要研究领域是相对论、引力物理与宇宙学，著有专著《狭义相对论实验基础》。

引文格式：张元仲. 狭义相对论的两个基本假设一个都不能少[J]. 物理与工程，2017，27(6)：00-00.

光速不变原理涉及的是光速——是运动学；
相对性原理涉及的是物理定律——是动力学。
所以两条原理必须独立地假设。缺少哪一条都推不出狭义相对论的洛伦兹变换；即两条假设一条都不能少！

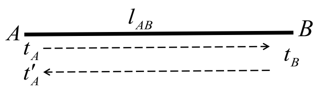
为何必须假定单向光速不变？
– 彭加勒在狭义相对论之前就给出了说明：

彭加勒在1898年发表的“时间测量”的论文中写道：“光具有不变的速度，尤其是它的速度在一切方向上都是相同的，这是一个公设，没有这个公设，就无法量度光速。这个公设从来也不能直接用经验来验证；……”（参见：宋德生、李醒民、王身立著《科学发现集》湖南科学技术出版社（1998）

爱因斯坦假定单向光速各向同性就是为了对钟（即定义同时性也就是定义时间坐标）

5

为何说假定了单向光速各向同性就能度量光速？
答案由单向光速与双程光速的关系给出：



$(t_B - t_A)$ 是光信号从*A*到*B*的时间，所以这个方向的单向光速是

$$c_{AB} = l_{AB} / (t_B - t_A)$$

$(t'_A - t_B)$ 是光信号从*B*返回*A*的时间，所以这个方向的单向光速是

$$c_{BA} = l_{AB} / (t'_A - t_B)$$

$(t'_A - t_A)$ 是光信号从*A*到*B*再回到*A*的时间，所以双程光速是

$$\frac{1}{c_{ABA}} = \frac{(t'_A - t_A)}{2l_{AB}} = \frac{1}{2}\left[\frac{t'_A - t_B}{l_{AB}} + \frac{t_B - t_A}{l_{AB}}\right] = \frac{1}{2}\left[\frac{1}{c_{AB}} + \frac{1}{c_{BA}}\right]$$

6

假定单向光速各向同性，即 $c_{AB} = c_{BA} = c_{\text{爱}}$

那么单向光速就等于双程光速：

$$c_{AB} = c_{BA} = c_{\text{爱}} = c_{ABA} = \frac{2l_{AB}}{t'_A - t_A} \approx 30\text{万公里/秒}$$

$(t'_A - t_A)$ 是同一地点的A钟测量的时间间隔（固有时间隔）
是实验可测量量，即双程光速可由实验直接测量出来

这就是说，假定了单向光速各向同性之后
单向光速 c 的数值才能取双程光速的测量值（实验给出的真空光速都是双程光速～30万公里/秒）

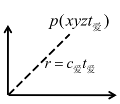
固有时—proper time（同一只时钟显示的时间差 $(t'_A - t_A)$ 与同时性定义无关 ）
坐标时—coordinate time (异地时钟的时间差 $(t_B - t_A)$ 与同时性定义有关)

7

二、建立狭义相对论的步骤
1. 定义惯性系（主要是定义同时性）；2. 用二个基本原理推导洛伦兹变换；
3. 依据狭义相对性原理建立近代物理理论的动力学方程。

1. 定义惯性系：$S(x,y,z,t) \quad S'(x',y',z',t') \quad S''(x'',y'',z'',t'')\cdots$

两条基本原理都只在惯性系中才有，所以首先要定义惯性系；真空中可以有无穷多相互匀速直线运动的惯性系，它们是平权的没有哪个更优越，所以定义了其中的一个也就定义了全部。



惯性系的3维空间是欧氏空间，*x,y,z*轴取为互相垂直的坐标轴（跟经典力学中的没区别）

时间坐标 t 就是全空间的时钟互相对准后的“公共时间”；在每一个参考系都使用光速各向同性的假设定义时间坐标：在初始时刻从坐标原点发射的光信号到达点 $p(r,t_{\text{爱}})$ 时把那里的时间调成 $t_{\text{爱}} = r / c_{\text{爱}}$ 这就定义了时间坐标（给光速c和时间 t 添加了下标“爱”表示：光速是光速不变原理中的光速，时间坐标是由单向光速各向同性定义的即爱因斯坦同时性，以便区别于其他的定义（参见下面）

8

“对钟”、“同时性定义”、“时间坐标定义”说的是同一件事情：

$r = c_{\text{爱}}t_{\text{爱}}$ 单向光速不变的光路径方程

$\updownarrow$

$t_{\text{爱}} = r / c_{\text{爱}}$ 这是爱因斯坦的同时性定义

其平方形式：$x^2 + y^2 + z^2 - c_{\text{爱}}^2 t_{\text{爱}}^2 = 0$

在 S' 系是同样的定义：$t'_{\text{爱}} = r' / c_{\text{爱}} \leftrightarrow r' = c_{\text{爱}}t'_{\text{爱}}$

其平方形式：$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c_{\text{爱}}^2 t'^2_{\text{爱}} = 0$

惯性系就是在其中惯性定律成立的那种参考系；惯性定律：不受力的物体作匀速直线运动。定义了空间坐标才有直线的定义，定义了时间坐标才有速度的定义；这样才有惯性定律的上述表述，也就才有惯性系的定义。

9

对于球面方程 $x^2 + y^2 + z^2 - c_{\text{爱}}^2 t_{\text{爱}}^2 = 0 \quad \leftrightarrow \quad r = c_{\text{爱}}t_{\text{爱}}$ 光速各向同性

通常解释成球面波的光波

这里解释成：在空间坐标原点同时向四面八方发射的光信号在同一时刻处于同一个球面（即单向光速各向同性 ）

说明：在推导洛伦兹变换的过程中使用光信号运动轨迹的平方形式就是使用了光速各向同性的假设定义同时性即定义时间坐标
～大多数的书籍和文章中使用了上面的球面方程而没有说明这就是同时性的定义，但是在爱因斯坦1905年的狭义相对论的论文《论动体的电动力学》中以及在柏格曼的著作《相对论引论》中在使用光速不变性假设推导洛伦兹变换之前首先明确了同时性定义 →

10

爱因斯坦狭义相对论（1905）的第一篇论文

论动体的电动力学

大家知道，麦克斯韦电动力学——像现在通常为人们所理解的那样——应用到运动的物体上时，就要引起一些不对称，而这种不对称似乎不是现象所固有的。比如设想一个磁体同一个导体之间的电动力的相互作用。在这里，可观察到的现象只同导体和磁体的相对运动有关，可是按照通常的看法，这两个物体之中，究竟是这个在运动，还是那个在运动，却是截然不同的两回事。如果是磁体在运动，导体静止着，那末在磁体附近就会出现一个具有一定能量的电场，它在导体各部分所在的地方产生一股电流。但是如果磁体是静止的，而导体在运动，那末磁体附近就没有电场，可是在导体中却有一电动势，这种电动势本身虽然并不相当于能量，但是它——假

A. 运动学部分

1. 同时性的定义

设有一个牛顿力学方程在其中有效的坐标系。为了使我们的陈述比较严谨，并且便于将这坐标系同以后要引进来的别的坐标系在字面上加以区别，我们叫它“静系”。

如果一个质点相对于这个坐标系是静止的，那末它相对于后者的位置就能够用刚性的量杆按照欧几里得几何的方法来定出，并且能用笛卡儿坐标来表示。

如果我们要描述一个质点的运动，我们就以时间的函数来给出它的坐标值。现在我们必须记住，这样的数学描述，只有在我们十分清楚地懂得“时间”在这里指的是什么之后才有物理意义。我们应当考虑到：凡是时间在里面起作用的我们的一切判断，总是关于同时的事件的判断。比如我说，“那列火车7点钟到达这里”，这大概是说：“我的钟的短针指到7同

11

如果在空间的 A 点放一只钟，那末对于贴近 A 处的事件的时间，A 处的一个观察者能够由找出同这些事件同时出现的时针位置来加以测定。如果又在空间的 B 点放一只钟，这是一只同放在 A 处的那只完全一样的钟，那末，通过在 B 处的观察者，也能够求出贴近 B 处的事件的时间。但要是没有进一步的规定，就不可能把 A 处的事件同 B 处的事件在时间上进行比较；到此为止，我们只定义了“A 时间”和“B 时间”，但是并没有定义对于 A 和 B 是公共的“时间”。只有当我们通过定义，把光从 A 到 B 所需要的“时间”规定为等于它从 B 到 A 所需要的“时间”，我们才能够定义 A 和 B 的公共“时间”

这就是爱因斯坦假定单向光速各向同性来定义同时性即对钟

12

柏格曼著《相对论引论》（二十世纪四十年代）

为了补偿传播中所消失的有限的时間，我們把仪器放置在两事件 A 和 B 的联綫的中点上。当每个事件发生时，都发出一个光訊号，如果两个訊号同时到达中点，那么我們就說两个事件是同时发生的。这个实验可以用来决定两个事件的同时性，而不必用特

柏格曼定义了同时性之后才用光速不变原理（即光线路径方程的平方形式）推导洛伦兹变换→

13

$$\boxed{x^{*}=\alpha(x-vt),} \tag{4.1}$$

式中 α 为一待定的恒量。

一条与 X 轴垂直的直綫，也必然垂直于 X^{*} 轴（角度分别由 S 和 S^{*} 中的观察者测量），这一点并不是很明显的。但是我們若不作这样的假定，那么对 X 轴的左右对称性质就会被变换所破坏。由于同样的理由我們假定，从任一坐标系观察时，Y 轴和 Z 轴互相垂直。并且这对 Y^{*} 轴和 Z^{*} 轴来說也是正确的。

前面已說过，若許多杆子互相平行，并且与相对运动的方向垂直，我們就能用不变的方式来比較許多处于不同运动狀态的杆的长度。如果它們相应的端点互相重合，那么，由相对性原理，可以断定它們是等长的。否則 S 和 S^{*} 間的关系不会是可倒轉的。

基于这一点，我們又能規定两个变换方程：

$$\boxed{\left.\begin{aligned} y^{*}&=y,\\ z^{*}&=z.\end{aligned}\right\}} \tag{4.2}$$

要使这組方程完全，我們必须写出一个方程来联系 S^{*} 中测量的时間 t^{*} 与 S 中的时間和空間坐标的关系。由于所謂空間和时間的“均匀性”，t^{*} 必須是綫性地依賴于 t，x，y 和 z。由于对称性，我們进一步假定，t^{*} 与 y 和 z 无关。否則，在 $Y^{*}Z^{*}$ 平面上的两个 S^{*} 鈡，从 S 中观察时将不一致。选擇时間的原点，使变换方程中的非齐次（常数）项等于零。我們有

$$\boxed{t^{*}=\beta t+\gamma x.} \tag{4.3}$$

14

36　　第一部分　狭义相对論

程。

假定在 $t=0$ 时，一个球面电磁波离开 S 的原点，（在这一时刻它和 S^{*} 的原点重合）。波的傳播速率在各个方向都是一样的，并且在任何一个坐标系中都等于 c。所以，波的进行可由下列两个方程中的任何一个来描述：

$$x^{2}+y^{2}+z^{2}=c^{2}t^{2}, \tag{4.4}$$

$$x^{*2}+y^{*2}+z^{*2}=c^{2}t^{*2} \tag{4.5}$$

应用（4.1），（4.2）和（4.3）式，我們可以把（4.5）式中带星号的量完全用不带星号的量来代替，

$$c^{2}(\beta t+\gamma x)^{2}=\alpha^{2}(x-vt)^{2}+y^{2}+z^{2}. \tag{4.6}$$

移项整理后，我們得到

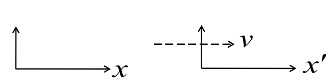
$$(c^{2}\beta^{2}-v^{2}\alpha^{2})t^{2}=(\alpha^{2}-c^{2}\gamma^{2})x^{2}+y^{2}+z^{2}-2(v\alpha^{2}+c^{2}\beta\gamma)xt. \tag{4.7}$$

只当方程（4.7）中 t^{2} 和 x^{2} 的系数和（4.4）式中的相同，又若（4.7）式中項 xt 的系数为零，那么（4.7）式就变为方程（4.4）。所以

$$\boxed{\left.\begin{aligned} c^{2}\beta^{2}-v^{2}\alpha^{2}&=c^{2},\\ \alpha^{2}-c^{2}\gamma^{2}&=1,\\ v\alpha^{2}+c^{2}\beta\gamma&=0\end{aligned}\right\}} \tag{4.8}$$

15

2. 用二个基本原理推导洛伦兹变换



初始时刻二惯性系重合，相对性原理要求坐标变换取线性形式（如果不先定义同时性则在时间和速度的下标加上问号）：

$$\left.\begin{aligned} x' &= \alpha(x-v_{?}t_{?})\\ t'_{?} &= \gamma t_{?}+\beta x\end{aligned}\right\} \xrightarrow{\text{令 } t'_{?}=t'_{爱} \quad t_{?}=t_{爱}} \begin{aligned} t'_{爱} &= r'/c_{爱}\\ &\Downarrow\\ t_{爱} &= r/c_{爱}\end{aligned}$$

推导过程见下页

这个变换要保证单向光速的不变性：所以要求代入带撇公式后要变成不带撇公式，由此来确定线性变换中的三个参数，即得到通常的洛伦兹变换

使用这二个公式也就是包含了用不变的光速对钟，因为只有令 $t'_{?}=t'_{爱}$　$t_{?}=t_{爱}$ 才能做代入

16

光信号运动轨迹的平方形式：

$$\alpha^2\left(x-v_{爱}t_{爱}\right)^2+y^2+z^2-c_{爱}^2\left(\gamma t_{爱}+\beta x\right)^2=0$$

$$\left(\alpha^2-c_{爱}^2\beta^2\right)x^2+\left(y^2+z^2\right)-2\left(\alpha^2 v_{爱}+c_{爱}^2\beta\gamma\right)xt_{爱}+\left(\alpha^2 v^2_{爱}-c_{爱}^2\gamma^2\right)t^2=0$$

$$y^2+z^2=c_{爱}^2t_{爱}^2-x^2 \longrightarrow$$

$$\left(\alpha^2-c_{爱}^2\beta^2-1\right)x^2-2\left(\alpha^2 v_{爱}+c_{爱}^2\beta\gamma\right)xt_{爱}+\left(\alpha^2 v_{爱}^2-c_{爱}^2\gamma^2+c_{爱}^2\right)t_{爱}^2=0$$

时空坐标前的系数必须为零

$$\left.\begin{aligned}&\alpha^2-c_{爱}^2\beta^2-1=0\\&\alpha^2 v_{爱}^2+c_{爱}^2\beta\gamma=0\\&\alpha^2 v_{爱}^2-c_{爱}^2\gamma^2+c_{爱}^2=0\end{aligned}\right\}\longrightarrow\begin{cases}\beta=-\dfrac{v_{爱}}{c_{爱}^2}\gamma\\ \alpha^2=\gamma^2=\dfrac{1}{1-v_{爱}^2/c_{爱}^2}\\ \alpha=\gamma=\pm\dfrac{1}{\sqrt{1-v_{爱}^2/c_{爱}^2}}\end{cases}$$

V=0时两个惯性系是同一个，所以必须取正号；这就是狭义相对论的洛伦兹变换

17

3. 狭义相对论是近代物理学的一大支柱

爱因斯坦的洛伦兹变换：

$$\begin{cases}x'=\dfrac{1}{\sqrt{1-v_{爱}{}^2/c_{爱}{}^2}}\left(x-v_{爱}t_{爱}\right)\\ t'_{爱}=\dfrac{1}{\sqrt{1-v_{爱}{}^2/c_{爱}{}^2}}\left(t_{爱}-\dfrac{v_{爱}}{c_{爱}{}^2}x\right)\end{cases}$$

- **再谈狭义相对性原理：**

有了洛伦兹变换之后，狭义相对性原理才能具体地陈述为：
一切物理定律的方程式在洛伦兹变换下保持形式不变。

- **相对性原理的这种表述为我们提供了构造近代物理理论的具体方法**

18

建立狭义相对论性的近代物理理论的作用量方法
——构造洛伦兹变换不变的作用量（狭义相对性原理）：

$S=\int dx^4 L$ 其中拉格朗日量（密度）$L\left(\varphi_a,\ \partial_\mu\varphi_a\right)$是洛伦兹不变量

最小作用量变分原理 $\delta S=0$ **物理系统处在能量最低状态**

$$0=\delta S=\int dx^4\left[\frac{\partial L}{\partial\varphi_a}\delta\varphi_a+\frac{\partial L}{\partial\left(\partial_\mu\varphi_a\right)}\delta\left(\partial_\mu\varphi_a\right)\right]$$

$$=\int dx^4\delta\varphi_a\left[\frac{\partial L}{\partial\varphi_a}-\partial_\mu\left(\frac{\partial L}{\partial\left(\partial_\mu\varphi_a\right)}\right)\right]$$

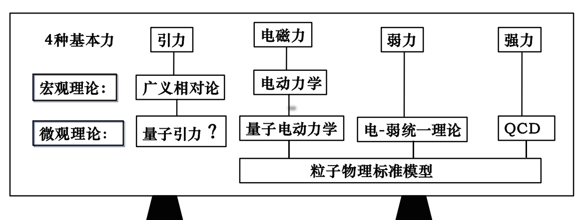
例如：$\vec{F}=-\nabla\varphi$
负号就是使物理
系统趋向更低能态

拉氏运动方程（欧拉-拉格朗日方程） $\dfrac{\partial L}{\partial\varphi_a}-\partial_\mu\left(\dfrac{\partial L}{\partial\left(\partial_\mu\varphi_a\right)}\right)=0$

1. 拉氏量在洛伦兹变换下的不变性 → 角动量守恒定律
2. 拉氏量在时-空平移（彭加勒时-空平移）下的不变性
→能量守恒定律和动量守恒定律

19

没有狭义相对论 就没有近代物理学大厦



狭义相对论 与量子力学是近代物理学的两大支柱

说明：“近代物理学”是指“相对论性物理理论”；上面只罗列出描写4种基本相互作用的理论，其他的还有“相对论力学”、“相对论量子力学”、“相对论热力学（还未成功）”等，其中的“相对论”都是指“狭义相对论”与“广义相对论”无关！所谓“相对论性的理论”是指这类理论是依据狭义相对论的第一个基本假设即狭义相对性原理进行构造的——其动力学方程在洛伦兹变换下形式不变——所以才说狭义相对论是近代物理学的一大支柱！

20

某些博士论文和专家基金申请书写有：广义相对论是现代物理理论的支柱～这是物理概念的错误；为纠正这类错误，最近的文章“为什么说狭义相对论是近代物理学的一大支柱”发在《物理与工程》V27（2）p3（2017）

航天器上的原子钟与地面原子钟进行时频比对时需要做相对论修正，这种修正既包含引力红移（广义相对论中的引力势差引起的钟慢效应）也包含速度红移（狭义相对论的钟慢效应）。宇宙学的基础不只是引力理论（广义相对论）因为宇宙学中除了引力物理外还有其他的物理（例如等离子体物理、粒子物理、核物理等）——只用广义相对论而不用这些其他的物理学给不出宇宙微波背景辐射和轻元素原初丰度的理论预言！

说广义相对论是近代引力物理学（包含宇宙学中的引力物理学）的基础，这话是大实话，因为广义相对论是公认的描写引力相互作用的一种引力理论，但是这话等于没说，因为照此说法我们一样可以说：“电动力学是宏观电磁学的基础；量子电动力学是微观电磁学的基础；粒子物理理论是粒子物理学的基础；……这些话都是大实话但也都等于没说！

广义相对论只是引力相互作用的理论，你可以说“广义相对论是近代引力物理学的基础”，但是绝不能说广义相对论是电磁学的基础，一样不能说广义相对论是粒子物理学的基础，……

如果把广义相对论的名字换成“弯曲时空的引力理论”，绝不会有人说：“弯曲时空的引力理论是电磁学、粒子物理学、相对论力学、相对论量子力学的基础”！

21

建立狭义相对论的关键是用各向同性的光速定义时间坐标，否则就得不到狭义相对论，“典型”例子：

1. 彭加勒（1898）发现了光速不变原理：

“光具有不变的速度，尤其是它的速度在一切方向上都是相同的，这是一个公设，没有这个公设，就无法量度光速。这个公设从来也不能直接用经验来验证；…”

但是彭加勒没有发现狭义相对论，其原因就是他没有用不变的光速去定义同时性（也就是惯性系的时间坐标）也就不可能进而推导洛伦兹变换

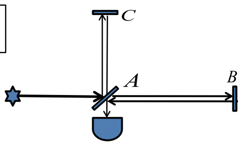
2. 洛伦兹（1904）发表了他的“洛伦兹变换”

但是他也没有发现狭义相对论，原因是 1. 没有放弃牛顿的绝对时间概念 2. 没有接受彭加勒的“光速不变原理”并用它定义时间坐标。

所以说，有了光速不变原理（如同彭加勒）而不用它定义同时性并推导洛伦兹变换就得不到狭义相对论；同样地，有了形式类似的“洛伦兹变换”（如同洛伦兹）而不用光速不变原理定义其中的时间坐标一样得不到狭义相对论。

22

关于迈克尔逊-莫雷实验
与爱因斯坦建立狭义相对论的关系



说实验的零结果表明以太不存在
这只是一种观点!
因为实验可以证明“有”，不能证明“无”

实验观测二个方向的光束往返的时间之差，这是固有时不需要定义同时性
～而爱因斯坦发现狭义相对论的关键是用单向光速不变的假设定义同时性

解释实验零结果的三种假说：1. 静止以太说，2. 静止以太说+洛伦兹长度收缩，3. 双程光速各向同性假设
～参见《物理与工程》V27(6) p1 (2017)
～“光以太”实验（迈-莫实验只是其中的一个）的零结果促使爱因斯坦假设相对性原理也适用于电动力学定律和光学定律。但是在后来的很多有关狭义相对论的书籍和文章中为何在众多的检验以太的实验中单单把迈克尔逊-莫雷实验挑出来作为爱因斯坦建立狭义相对论的重要基础其原由既无据可查也不合理

23

三、不同惯性系定义之间的唯一差别是时间定义不同

例如：

牛顿的：$S(x,y,z,t_{牛})$　等价于用瞬时信号定义时间坐标

洛伦兹的：$S(x,y,z,t_{罗})$　从牛顿时间出发最后说不清楚

爱因斯坦的：$S(x,y,z,t_{爱})$　用单向光速不变的假设定义时间坐标

爱德瓦兹的：$S(x,y,z,t_{瓦})$　用双程光速不变而单向光速可变的假定定义时间坐标

等等

24

时间坐标定义不同的惯性系之间的坐标变换也就不同：

伽利略变换：

$$\begin{cases} x' = (x - v_{牛}t_{牛}) \\ t'_{牛} = (t_{牛}) \end{cases}$$

原始的洛伦兹变换
（1887 Voigt，洛伦兹1904）
这不是狭义相对论的洛伦兹变换：

$$\begin{cases} x' = \dfrac{1}{\sqrt{1 - v_{罗}^2 / c_{罗}^2}}(x - v_{罗}t_{罗}) \\ t'_{罗} = \dfrac{1}{\sqrt{1 - v_{罗}^2 / c_{罗}^2}}\left(t_{罗} - \dfrac{v_{罗}}{c_{罗}^2}x\right) \end{cases}$$

爱因斯坦的洛伦兹变（1905）：

$$\begin{cases} x' = \dfrac{1}{\sqrt{1 - v_{爱}{}^2 / c_{爱}{}^2}}(x - v_{爱}t_{爱}) \\ t'_{爱} = \dfrac{1}{\sqrt{1 - v_{爱}{}^2 / c_{爱}{}^2}}\left(t_{爱} - \dfrac{v_{爱}}{c_{爱}{}^2}x\right) \end{cases}$$

爱德瓦兹变换（1963）：

$$x' = \eta(x - v_{瓦}t_{瓦})$$

$$t_{瓦}' = \eta\left\{\left[1 + (q + q')\frac{v_{瓦}}{c_{ABA}}\right]t_{瓦} - \left[(1 - q^2)\frac{v_{瓦}}{c_{ABA}} + (q' - q)\right]\frac{x}{c_{ABA}}\right\}$$

$$\eta \equiv \frac{1}{\sqrt{(1 + qv_{瓦}/c_{ABA})^2 - v_{瓦}{}^2/c_{ABA}^2}}$$

这些变换之间的唯一差别只在于时间坐标的定义不同，同时速度的定义也不同，所以对它们添加了不同的下标

25

现有平直时空理论的关系图

洛伦兹变换　←　$q=0$　←　爱德瓦兹变换

↑　　　　　　　　　　↑

$c_{\parallel} = c_{\perp} = c$　　　　$c_{\parallel} = c_{\perp} = c$

$d = 1$　　　　　　　　$d = 1$

↑　　　　　　　　　　↑

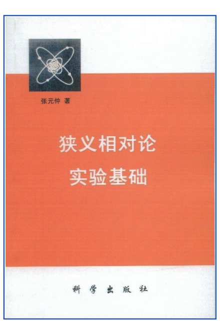
Robertson变换　←　$q=0$　←　M-S变换

↑

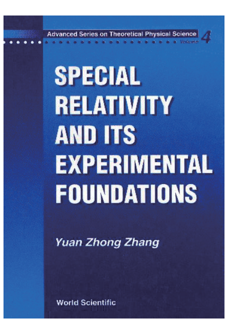
多余的变换

26

不同的同时性定义对应不同的时空理论（参见我下面的书）：



1979年



1998年

27

上面坐标变换中的速度也都加了下标，是因为不同的同时性定义其对应的速度会不同；为了说明速度与时间坐标的定义有关，现在简单介绍
爱德瓦兹同时性与爱因斯坦同时性的关系～参阅我的中文和英文书，或者参见2015年发表的评述文章“爱因斯坦建立狭义相对论的关键一步——同时性定义”《物理与工程》25卷（2015）第3期第3页

双程光速与可变的单程光速的关系：

$c_{+} = \dfrac{c_{ABA}}{1-q}$，是沿 x轴 正方向的单向光速

$-1 \le q \le 1$，

$c_{-} = \dfrac{c_{ABA}}{1+q}$，是沿 x轴 负方向的单向光速

q 是方向性参数，它的取值有无穷多对应于无穷多的同时性定义

$q=0$ 是单向光速各向同性～爱因斯坦同时性定义；这就是早年文献中说的：

“同时性定义有无穷多种，爱因斯坦同时性定义只是其中最简单的一种”

常数 c_{ABA} 是双程光速 $\equiv \dfrac{2AB}{t_{AB} + t_{BA}} = \dfrac{2AB}{AB/c_{+} + BA/c_{-}} = \dfrac{2c_{ABA}}{1-q+1+q} = c_{ABA}$

28

物理与工程 Vol. 27 No. 6 2017

爱德瓦兹和爱因斯坦时间坐标的差别：

c_{+} $\quad t_{瓦}$

$\vdash$- - - - - - - - - - - - - -$\rightarrow x$

$c_{爱}$ $\quad t_{爱}$

$t_{瓦}=t_{原点}+x/c_{+}$

$t_{爱}=t_{原点}+x/c_{爱}$

在原点的 $t_{原点}$ 时刻发射的光信号到达 x 点时，爱德瓦兹的时间调成 $t_{瓦}$ 而爱因斯坦的时间则调成 $t_{爱}$

在这同一个空间点 x 处的爱德瓦兹时间坐标和爱因斯坦时间坐标的差别：

$$t_{瓦}\text{-}t_{爱}=\frac{x}{c_{+}}-\frac{x}{c_{爱}}=\frac{x}{c_{ABA}}(1-q)-\frac{x}{c_{ABA}}=-q\frac{x}{c_{ABA}},\quad c_{爱}=c_{ABA}$$

即 $$t_{瓦}=t_{爱}-q\frac{x}{c_{ABA}}$$

29

用这样的二只时钟测量同一物体的速度会不同：

$$u_{瓦}=\frac{x}{t_{瓦}}=\frac{x}{t_{爱}-qx/c_{ABA}}=\frac{x/t_{爱}}{1-qx/t_{爱}c_{ABA}}=\frac{u_{爱}}{1-qu_{爱}/c_{ABA}},$$

即 $$u_{瓦}=\frac{u_{爱}}{1-qu_{爱}/c_{ABA}}.$$

S' 系中的定义类似。
在爱因斯坦的洛伦兹变换中把爱氏时间坐标换成瓦氏的；同时把爱氏的速度换成瓦氏的，那么爱氏的洛伦兹变换就变成爱德瓦兹变换

●爱德瓦兹变换与爱因斯坦的洛伦兹变换 在物理上等价
●具体地说：当用这二个坐标变换与实验测量结果比较时没有区别
● 即光速的方向性参数不起作用，也就是单向光速不能由实验给出只能假定

30

● 速度互易性与同时性定义相关

●洛伦兹变换具有速度互易性：

你看我是 $\dfrac{x}{t}=v$

我看你是 $\dfrac{x'}{t'}=-v$

●爱德瓦兹变换并没有速度的这种互易性：

你看我是 $\dfrac{x}{t}=v$

我看你是 $\dfrac{x'}{t'}=-\dfrac{v}{(1+2qv/c)}$

31

四、洛伦兹1904年的"洛伦兹变换"
不是狭义相对论的洛伦兹变换

不用 光速不变原理 的 坐标变换 绝不是狭义相对论
第一个是洛伦兹按照他的电子论推出的，1904年发表，彭加勒命名"洛伦兹变换"，但这不是狭义相对论中的洛伦兹变换

原始的洛伦兹变换（1904），不是狭义相对论的洛伦兹变换：

$$\begin{cases} x'=\dfrac{1}{\sqrt{1-v_{罗}^{2}/c_{罗}^{2}}}(x-v_{罗}t_{罗}) \\ t'_{罗}=\dfrac{1}{\sqrt{1-v_{罗}^{2}/c_{罗}^{2}}}\left(t_{罗}-\dfrac{v_{罗}}{c_{罗}^{2}}x\right) \end{cases}$$

爱因斯坦的洛伦兹变换（1905）：

$$\begin{cases} x'=\dfrac{1}{\sqrt{1-v_{爱}^{2}/c_{爱}^{2}}}(x-v_{爱}t_{爱}) \\ t'_{爱}=\dfrac{1}{\sqrt{1-v_{爱}^{2}/c_{爱}^{2}}}\left(t_{爱}-\dfrac{v_{爱}}{c_{爱}^{2}}x\right) \end{cases}$$

洛伦兹的变换中的光速的定义、时间坐标的定义及速度的定义，其物理意义都与爱因斯坦的洛伦兹变换中的有本质的区别，下面进行对比 →

32

对比 爱因斯坦的洛伦兹变换 与 "洛伦兹的洛伦兹变换"

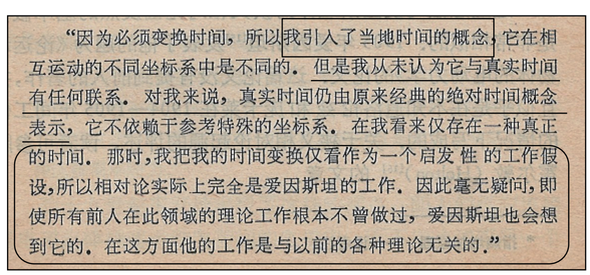
	爱因斯坦的	洛伦兹的
参考系	$S(xyzt)$ 系同 $S'(x'y'z't')$ 系等价	$S(xyzt)$ 静止以太系（绝对系） $S'(x'y'z't')$ 相对以太的运动系
光速	$c_{爱}$ 是光速不变原理中的光速	$c_{罗}$ 静止以太系中的光速 运动系 S' 中的光速 $\vec{c}'_{罗}=\vec{c}_{罗}-\vec{v}_{牛}$
时间	$t_{爱},t'_{爱}$ 都是光速不变原理定义的	$t_{罗}$ 绝对系中的牛顿时间 $t'_{罗}$"当地时间"无物理意义
速度	$v_{爱}$ 由 $t_{爱}$ 定义	$v_{罗}$ 由牛顿时间定义

所以说："洛伦兹的洛伦兹变换"（1904）不是狭义相对论中的洛伦兹变换

33

洛伦兹明确说他的时间定义仍然是牛顿的绝对时间：

Lorentz, H A. Astrophys J [J], 1928, 68; 350.
（中译文参见科学出版社1980年出版的罗瑟，W G V.《相对论导论》第69页））：


"因为必须变换时间，所以我引入了当地时间的概念，它在相互运动的不同坐标系中是不同的. 但是我从未认为它与真实时间有任何联系. 对我来说，真实时间仍由原来经典的绝对时间概念表示，它不依赖于参考特殊的坐标系. 在我看来仅存在一种真正的时间. 那时，我把我的时间变换仅看作为一个启发性的工作假设，所以相对论实际上完全是爱因斯坦的工作. 因此毫无疑问，即使所有前人在此领域的理论工作根本不曾做过，爱因斯坦也会想到它的. 在这方面他的工作是与以前的各种理论无关的."

34

$$x'=\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}(x-vt)$$
$$t'=\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\left(t-\frac{v}{c^2}x\right)$$

下面都是狭义相对论，所以都去掉了下标“爱”

时空间隔的洛伦兹（正）变换

$$\Delta x'=\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}(\Delta x-v\Delta t)$$
$$\Delta t'=\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\left(\Delta t-\frac{v}{c^2}\Delta x\right)$$

逆变换

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

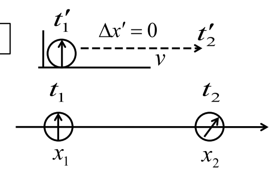
$\Delta x=x_2-x_1$，$\Delta x'=x_2'-x_1'$，$\Delta t=t_2-t_1$，$\Delta t'=t_2'-t_1'$

35

五、钟慢、尺缩（尺缩佯谬）、同时性的相对性

钟慢效应

$\Delta x'=0$ 代入时空间隔的逆变换：



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

$$\Delta x=\frac{v\Delta t'}{\sqrt{1-v^2/c^2}}>0$$ **表示2只钟不在同一地点**

$$\Delta t=\frac{\Delta t'}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\to\Delta t'=\Delta t\sqrt{1-v^2/c^2}$$ **时间膨胀（钟慢）公式**

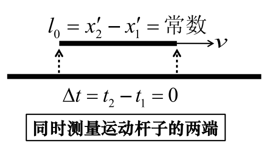
$\Delta t'$(运动的一只钟)$<\Delta t$(静止的2只不在同一地点的钟)

固有时间隔 < 坐标时间隔

36

尺缩效应

$\Delta t=0$ 代入时空间隔的正变换：



$$\Delta x'=\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}(\Delta x-v\Delta t)$$
$$\Delta t'=\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\left(\Delta t-\frac{v}{c^2}\Delta x\right)$$

$$(l)_{\Delta t=0}=l_0\sqrt{1-v^2/c^2}$$ **运动长度< 静止长度**

$$\Delta t'=-\frac{v}{c^2}\frac{(l)_{\Delta t=0}}{\sqrt{1-v^2/c^2}}<0$$

$\Delta t=t_2-t_1=0$ **同时**

$\Delta t'=t_2'-t_1'<0$ **不同时**

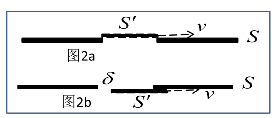
在带撇系看来 $\Delta t'$ 的时间内不带撇系相对于带撇系向反方向运动的距离：

同时性的相对性

$$\delta=v\Delta t'=\frac{l}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\frac{v^2}{c^2}=l_0\frac{v^2}{c^2}$$

37

尺缩佯谬：桌面（S系）上的沟槽与杆子(S’系)一样长，杆子运动时在桌面看来其长度缩短所以可以掉入沟槽；但是在杆子的系统看来是桌面运动因而沟槽变短所以杆子不能掉入沟槽，似乎出现矛盾。



在桌面看来杆子缩短是同时按下运动杆子两端的结果（见上面“尺缩效应”的推导过程）

由于同时性的相对性，杆子看到先按了前端，过了 $\Delta t'$ 后才按下尾端此时桌面已经在反方向运动了 δ 距离，即杆子的尾端已经处于沟槽之内（见图2b）

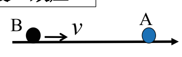
$$\delta=v\Delta t'=\frac{l}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\frac{v^2}{c^2}=l_0\frac{v^2}{c^2}$$

即在 杆子看来它的前端先进入沟槽，尾端后进入沟槽（当然在忽略桌面厚度的情况下杆子是“钻入”沟槽的），所以不存在矛盾。

38

习题：
两只时钟A，B 以 0.6c 的相对速度互相接近，如果A所在参考系的观测者测得两钟距离为 $l=3\times10^8m$ 时，B所在参考系的观察者测得两钟还要经过多长时间相遇？（解法中用到钟慢、尺缩、同时性的相对性）

解法1．“钟慢”效应：



在A看来，B在离它 $l=3\times10^8m$ 的位置以速度V与它相遇的时间是：

$$\Delta t_{AB}=l/v=3\times10^8m/0.6c=(1/0.6)s=1.67s$$

运动的B钟相应的时间由钟慢给出：

$$\Delta t_B'=\Delta t_{AB}\sqrt{1-v^2/c^2}=1.67s\sqrt{1-0.6^2}=1.34s$$

39

解法2．“尺缩+同时性的相对性”效应：

$$(l)_{\Delta t=0}=3\times10^8m$$ **这是A系测量运动的B与A之间的距离**

按照尺缩公式，B系中的相应的固有距离是 $l_0=(l)_{\Delta t=0}/\sqrt{1-v^2/c^2}$

但是像前面尺缩情况那样，在B系看来是先测了头部后测的尾端，这期间A和B之间相互靠近了

$$\delta=v\Delta t'=\frac{l}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\frac{v^2}{c^2}=l_0\frac{v^2}{c^2}$$

所以在B看来A和B之间的距离应当是 固有距离减去 δ：

$$l_B'=l_0-\delta=\frac{l}{\sqrt{1-v^2/c^2}}-\frac{l}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\frac{v^2}{c^2}=l\sqrt{1-v^2/c^2}$$

因而，在B看来A运动到B的时间间隔（由B钟记录的时间间隔）是

$$\Delta t_B'=\frac{l_B'}{v}=\frac{l}{v}\sqrt{1-v^2/c^2}=\Delta t_{AB}\sqrt{1-v^2/c^2}=1.67s\sqrt{1-0.6^2}=1.34s$$

这就是解法1 的钟慢公式

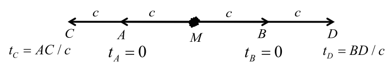
不考虑同时性的相对性
即不扣除δ，就错了！

40

六、回答几个问题→

问题1：对钟能否避开单向光速的具体数值？答案是不能。

中点M对钟法只对准A和B两只钟可以不用c的具体数值；但是要使全空间无数的异地钟都对准就必须知道c的具体数值，例如考虑4只钟：

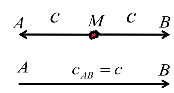


A和B调成0，C和D收到信号时调到什么时间？不知道光速c的具体数值就无法将D钟与B钟对准，同样也无法把C和A对准！

对钟就是定义时间坐标，必须要光速的具体数值；而且，洛伦兹变换中的c也必须知道具体数值，否则就没办法把狭义相对论的预言与实验数值去比较，所以c的具体数值是回避不了的！

41

问题2：用中点对钟方法对好的时钟能否测出单向光速？答案是不能

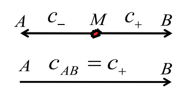


假定光速是常数c来对准A和B钟，用这样的两只钟测量出的单向光速一定是c，否则就出现矛盾：如果测出的不是c那说明两只钟没对准～用没对准的钟测量的速度没有意义——只能说，假定了单向光速是什么就测出什么光速

为了证明这个结论，下面使用单向速度各向异性的光速（其中包含了单向光速各向同性的情况）对准A和B，然后测量光的单向速度：

$$c_+ = \frac{c_{ABA}}{1-q},\quad c_- = \frac{c_{ABA}}{1+q},$$

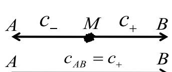
$$c_{ABA} = \frac{2AB}{AB/c_- + AB/c_+}$$ 是双程（往返）光速



42

A和B收到M的信号时分别调成：

$t_{A-0} = \frac{AB/2}{c_-}$



$t_{B-0} = \frac{AB/2}{c_+}$

设 $c_+ > c_-$，则从 M 同时发的信号先到 B 后到 A，两者的时差是 $\delta = \left(\frac{AB/2}{c_-} - \frac{AB/2}{c_+}\right)$

B 收到 M 的信号时调到 $t_{B\text{-}0} = \frac{AB/2}{c_+}$，$A$ 收到 M 的信号时调到 $t_{A\text{-}0} = \frac{AB/2}{c_-}$ 此时从 A 向 B 发光信号（用 A 和 B 钟测量它的速度），这时 B 钟向前走了 δ（因为对钟时信号先到 B）时间，所以此时 B 钟的时间是 $t_{B\text{-}0} + \delta$，从 A 发向 B 的信号到达 B 所用时间是 $t_{AB} = \frac{AB}{c_+}$，

该信号到 B 时 B 的时间就是 $t_B = t_{B\text{-}0} + \delta + t_{AB}$，则该信号用 B 和 A 钟记录的时间间隔是：

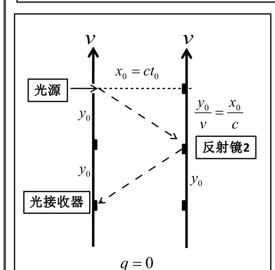
$$t_B - t_{A\text{-}0} = t_{B\text{-}0} + \delta + t_{AB} - t_{A\text{-}0} = \frac{AB/2}{c_+} + \left(\frac{AB/2}{c_-} - \frac{AB/2}{c_+}\right) + \frac{AB}{c_+} - \frac{AB/2}{c_-} = \frac{AB}{c_+}$$

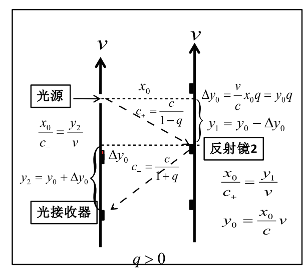
所以用 A 和 B 钟测得从 A 向 B 的光速是：$c_{AB} = \frac{AB}{t_B - t_{A\text{-}0}} = c_+$

这就是说，用什么样的光的速度对钟就测出什么样的光速（光速各向同性的情况一样）

43

问题3：一位作者设计的检验单向光速各向同性的思想实验方案





两板子以速度v向上运动，透过左板子上方小孔的光脉冲经过 t_0 时间被右板子反射镜2反射后，再经过 t_0 时间被左板的光接收器收到（能判断光速各向同性吗？答案是不能～见右图）

往返速度不同但双程光速是c的光脉冲一样可以完成左边的过程，只要两块板子的相对位置如该图所示。问题是两块板子的同时性没定义好就无法判断两块板子的相对位置是左图的还是右图的

44

问题4：不用光速不变原理定义坐标变换中的常数、时间坐标和速度就绝不是狭义相对论中的洛伦兹变换

$$\left.\begin{aligned} x' &= \alpha(x - v_? t_?) \\ t'_? &= \gamma t_? + \beta x \end{aligned}\right\}$$

一些作者在不定义时间坐标的情况下就出现速度的记号，那么相对性原理给出的线性变换中的时间坐标和速度就是没有定义的物理量，所以在左边的线性变换中对它们添加了下标“？”

如果在确定线性变换中的3个参数 α, β, γ 的过程中仍然不用光速不变原理，那么在得到坐标变换之后必须对时间坐标 $t_?$ 速度 $v_?$ 以及另一个常数进行定义，如果仍然不用光速不变原理定义这些量，那么他们的坐标变换就绝不是狭义相对论的洛伦兹变换（前面已经说明：相应于牛顿时间的变换是伽利略变换，相应于爱德瓦兹时间的变换是爱德瓦兹变换，相应于爱因斯坦时间的变换才是狭义相对论的洛伦兹变换），当然他们的变换可以叫做“张三变换”或“李四变换”但是它们与狭义相对论毫无关系，如同洛伦兹1904年的变换不是狭义相对论的洛伦兹变换一样！

45

小结：

1. （1）光速不变原理首先用于定义惯性系的时间坐标（即对钟）；
（2）然后很自然地用于推导洛伦兹变换。

2. （1）狭义相对性原理与光速不变原理一起推导洛伦兹变换；
（2）并且用于建立狭义相对论的动力学：
一切物理系统的动力学方程要在洛伦兹变换下保持形式不变，因而成为近代物理学大厦的一大支柱！

3. 光速不变原理和相对性原理是互相独立的两个基本假设；
其中单向光速不可测量只能假设，并用此假设对钟
所以狭义相对论的两个基本假设一个都不能少

4. 不用光速不变原理得到的坐标变换绝不是狭义相对论的洛伦兹变换
（当然，可以叫“张三变换”或“李四变换”）
因而也就得不到狭义相对论

46