

相对论问答录之一

赵 峥



问题一、狭义相对论建立在哪两条公理的基础之上？

狭义相对论建立在“相对性原理”和“光速不变原理”这两条公理的基础之上。

相对性原理是说，物理规律在所有惯性系中都相同。需要强调，这里所说的相对性原理已经是伽利略相对性原理的推广。伽利略相对性原理只针对力学效应，这里谈论的相对性原理针对一切物理效应。按照此原理，在一个惯性系中静止并被封闭的观测者（即看不见外界，例如封闭在一个没有窗户的车厢或船舱中的观测者）不可能用任何实验（不管是力学的，电学的，光学的，还是其他的）检验自己所处的惯性系是在做匀速直线运动还是处于静止状态。例如，封闭在车厢中的观测者，无法用任何实验检验自己的车厢是静止在铁路上，还是沿铁路在做匀速直线运动。

“光速不变原理”是说，真空中的光速在任何惯性系中都是同一个常数 c ，与光源相对于观测者的运动无关。这就是说，“光速是绝对的”。不管观测者相对于光源是静止，还是迎着或顺着光射来的方向运动，他测得的光速都是同一个 c 。这条公理与人们通常的生活经验似乎有很大抵触。

问题二、什么是“同时的相对性”？

我们介绍一下相对论的核心观念——“同时”的相对性。

在人们日常观念中，两个事件是否发生在同一个地点，不是绝对的，具有相对性。例如，在公共汽车上，汽车启动的时刻，一位乘客把钱交给售票员，然后售票员把票交给乘客。这两件事，在车上的人看来，发生在同一地点（车厢的同一位置）。但在车下的人看来，乘客把钱交给售票员时，车正启动，还在车站上。当售票员把票交给乘客时，车已开了一段距离，已不在车站上。所以，车下的人认为，这两件事发生在不同的地点（以地面为参考

系），前一件事发生在汽车站内，后一件事发生在汽车站内。这种相对观念，是人们熟知的，大家不以为怪。

然而，在日常观念中，人们认为“同时”却是绝对的，两个事件是否同时发生，具有绝对意义。例如，在公共汽车的头尾各放一个鞭炮（即使在不禁放爆竹的城市，这也是绝对禁止的游戏！），如果车上的人认为这两个炮是同时响的，那么车下的人当然也认为是同时响的。这就是“同时”的绝对性，以往没有任何人怀疑“同时”的这种绝对性。但是，光速的绝对性要求“同时”必须是一个相对的概念。在相对论中，车上的钟是用“约定光速各向同性而且是一个常数 c 来校准”的；车下的钟也是用同一个约定（光速是同一个常数 c ）来校准的。这样，车上观测者认为“同时”发生的两件事，车下的人会认为不是“同时”发生的，反之亦然。这就是说，相对论告诉我们，“同时”和“同地”一样也是相对的。因而在车上的人看来，车头、车尾同时发生的两件事，对车下的人来说，只要车在运动，这两件事就不会是同时发生的。

爱因斯坦在《狭义与广义相对论浅说》一书中叙述了以下的例子。考虑一列火车沿站台驶过的情况，这时有两个闪电分别击中了站台上的 A 点和 B 点。静止于 AB 这段距离中点 M 的站长，同时看到来自 A 处和 B 处的闪光，由于光速各向同性，他认为“闪电击中 A ”与“闪电击中 B ”是两个“同时”发生的事件。

然而事件 A 和事件 B 也分别对应于火车上的 A 点和 B 点。下面我们将看到在火车上静止于 AB 这段距离中点 M' 的车长不认为这两个事件是同时发生的。站台上的人认为，闪电同时击中 A 与 B 时，位于列车上 M' 点的车长恰好与位于站台上 M 点的站长相遇。由于光信号的传播需要时间，沿着 $A \rightarrow B$ 方向行驶的火车，在闪电击中 A 、 B 两点，闪光传到车长眼睛的这段时间里，已向车头 B 的方向移动了一段距离。所以虽然静止于 M 的站长会同时看到

编者按：2010年7月，赵峥教授的新书《相对论百问》由北京师范大学出版社出版。本刊从中选出关注度较高的十几个问题，共分三期刊出。

来自 A、B 两处的闪光，但车长将先看到来自车头 B 的闪光，后看到来自车尾 A 的闪光。车长静止于列车 AB 的中点，他也认为在他的参考系（火车系）里光速各向同性，既然先看到闪电击中 B，后看到闪电击中 A，他当然认为事件 A 与事件 B 不是同时发生的，“闪电击中 B”是先发生的事件，“闪电击中 A”则是后发生的事件。

“同时”的这种相对性，与人们的日常观念大不相同，很难被接受。为什么我们通常感觉不到“同时”的相对性呢？那是因为，这种相对性只有在接近光速（每秒 30 万千米）运动时，才会明显表现出来。我们通常接触的汽车、飞机甚至火箭，运动速度都太小了，感觉不出这点差异。

问题三、怎样从洛伦兹变换导出同时的相对性？

下面我们给出“同时相对性”的数学推导。

洛伦兹变换公式为

$$\begin{aligned} x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \\ t' &= \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \end{aligned} \quad (1)$$

式中 (x, y, z, t) 为一个指定的事件在相对于以太（即绝对空间）静止的惯性系中的空间坐标和时间坐标， (x', y', z', t') 为同一个事件在运动惯性系中的空间坐标和时间坐标。 x' 轴与 x 轴重合， y' 轴与 y 轴、 z' 轴与 z 轴分别平行，运动方向沿 x 轴。 v 是运动系相对于静止系（绝对空间）的速度， c 是光速。

爱因斯坦在相对论中独立给出了两个惯性系 S 和 S' 之间的洛伦兹变换，公式与洛伦兹给出的 (1) 式完全相同。 S' 系的 x' 轴与 S 系的 x 轴重合， y' 、 z' 轴分别与 y 、 z 轴平行。 S' 系沿 x 轴正向相对于 S 系以匀速 v 运动。在 $t=0$ 时， $t'=0$ ，而且这时 x' 轴的原点与 x 轴的原点重合。(1) 式把 S 系看作静止系，把 S' 系看作运动系，反映了静止在 S 系中的观测者的观点。由于运动的相对性， S' 系中的观测者会认为 S' 系是静止的， S 系相对于他以速度 $(-v)$ 做匀速运动，他所选用的洛伦兹变换应是上式的逆变换，容易看出，这个逆变换是

$$\begin{aligned} x &= \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \\ y &= y', \\ z &= z', \end{aligned} \quad (2)$$

$$t = \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

我们假设，在 S 系中，沿 x 轴静止放置了一列已同步好的钟，它们指示的时间是 t 。在 S' 系中沿 x' 轴也静止放置了一列同步好的钟，它们指示的时间是 t' 。现在，我们来讨论这两个惯性系之间的时空关系。

设在 S 系中， t_1 时刻在 x_1 处发生了一件事， t_2 时刻在 x_2 处发生了另一件事，这两件事的时间差 dt 和空间差 dx 分别为

$$dt = t_2 - t_1, \quad dx = x_2 - x_1.$$

现在微分 (1) 第 4 式，得

$$dt' = \frac{dt - \frac{v}{c^2}dx}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (3)$$

如果在 S 系中看，这两件事同时发生，那么 $t_1=t_2$ ， $dt=0$ 。但是，只要这两件事发生的地点不同， $dx = x_2 - x_1 \neq 0$ ，从 (3) 就会得到 $dt' \neq 0$ ，这就是说，在 S' 系看来，这两件事没有同时发生。

反过来也是一样，微分 (2) 第 4 式可得

$$dt = \frac{dt' + \frac{v}{c^2}dx'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (4)$$

从此式可以看出，在 S' 系中同时发生的两件事 ($dt'=0$)，只要不发生在同一地点 ($dx' \neq 0$)，在 S 系中看，这两件事就不是同时发生的 ($dt \neq 0$)。

我们看到，相对论预言了同时的相对性。在一个惯性系中不同地点同时发生的事件，在另一个相对于它运动 ($v \neq 0$) 的惯性系中看，并不同时发生。

理解“同时”的相对性，是弄清相对论的关键。

问题四、相对论如何解释洛伦兹收缩？

洛伦兹等人提出运动刚尺的收缩效应，即相对于绝对空间运动的刚尺，会在运动方向上产生收缩

$$l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}. \quad (5)$$

这一收缩被称为洛伦兹收缩。式中 l_0 是刚尺相对于绝对空间静止时的长度， l 是刚尺相对于绝对空间以速度 v 运动时的长度， c 是真空中光速。运动刚尺的收缩效应，是斐兹杰惹和洛伦兹等人最先提出的。但他们认为，这是刚尺相对于绝对空间运动时发生的效应。刚尺只有在相对于绝对空间运动时才会发生收缩，如果刚尺只是相对于某个惯性系运动，

相对于绝对空间并不运动,则不会发生收缩。他们认为这是一种真实的物理效应,发生这种效应时,构成刚尺的原子的结构会发生变化,甚至原子内部的电荷分布也会发生变化。爱因斯坦的相对论也认为有这种收缩,但他认为这种收缩是相对的,是一种时空效应,发生这种效应时,构成刚尺的原子结构和原子内部的电荷分布都不会发生任何变化。相对论还认为,运动刚尺的收缩是相对的,两个做相对运动的刚尺,都会认为对方缩短,这与“同时”的相对性有关。总之,洛伦兹收缩与绝对空间没有关系,相对论认为根本不存在绝对空间。

现在来看,如何从相对论得出动尺收缩的结论。

我们分别把(1)的第1式与(2)的第1式微分,得

$$dx' = \frac{dx - vdt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (6)$$

和

$$dx = \frac{dx' + vdt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}。 \quad (7)$$

设尺A静止在S'系中,沿x'轴放置,长度为dx'。由于尺A静止在S'系中,所以S'系中测得的尺A的长度dx'就是尺A的静止长度l₀,即dx'=l₀。测量静止的尺的长度,可以分别测量它的两端的坐标(不要求同时测量,即不要求dt'=0),然后相减。在S系中看,尺A是动尺,由于动尺在运动,静系S中的观测者必须“同时”去测量动尺A的两端。S中的“同时”意味着dt=0,从(6)式可得S系测得的尺A运动时的长度为l=dx,

$$dx = dx' \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}, \quad (8)$$

即

$$l = l_0 \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}。 \quad (9)$$

反过来,设B为与A相同的尺,把它静置在S系中,沿x轴放置。由于B静止在S系中,所以S系测得的尺B的长度dx就是它的静止长度l₀。对于S系中的观测者,由于B尺不动,他可以先测B尺一端的坐标,再测另一端的坐标,然后相减,不必“同时”去测B尺的两端,即不要求dt=0。另一方面,尺B相对于S'系运动,在S'中必须“同时”测量它的两端(即dt'=0,注意此处不能用dt=0,dt'=0表示S'系中的“同时”,而dt=0则表示S系中

的“同时”)。从(7)式可知,在S'系中测得的尺B运动时的长度l=dx'为

$$dx' = dx \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}, \quad (10)$$

它同样可表为(9)式的形式。

以上讨论表明,无论从哪个参考系看,运动的尺都一定会产生洛伦兹收缩。

问题五、什么是动钟变慢效应?

运动时钟变慢也是相对的。两列平行放置、相对运动的钟,让对方的一个钟依次与自己的一系列钟比较,都会认为对方的(相对于自己运动的)钟变慢(图1)。

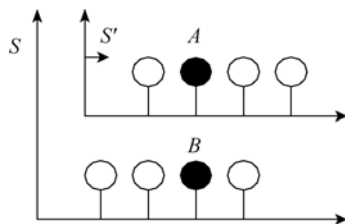


图1 动钟变慢

设钟A固定在S'系中。在S系中看,它以速度v运动,在运动过程中,它与S系中已同步好的一列钟依次相遇,可以相互比较时间。由于A钟固定在S'系的一个点上,dx'=0,所以从(4)可得

$$dt = dt' / \sqrt{1 - v^2/c^2}。 \quad (11)$$

它表明,当A钟走过时间dt'时,S系中的钟将走过时间dt。(11)中的分母小于1,所以有dt>dt'。A钟每走1秒钟(dt'=1),S系中的钟必走过大于1秒的时间(dt>1)。所以,在S系中看,运动的A钟变慢了。

反之,一个固定在S系中的钟B,在S'系看来,也是一个以速度v运动的钟。它依次与静置于S'系(沿x'轴放置)中的一列钟相遇。由于这列钟已校准同步,B可与它们相互比较时间。因为B钟固定在S系的一个点上,dx=0,注意dx只出现在(3)中,不出现在(4)中,我们现在利用(3)式来讨论,dx=0将导致

$$dt' = dt / \sqrt{1 - v^2/c^2}。 \quad (12)$$

这表明动钟B每走1秒钟(dt=1),S'系中的钟将走过大于1秒的时间(dt'>1)。结论是,在S'系中的观测者看来,运动的B钟变慢了。

上述时钟变慢效应是真实的,已被大量实验所证实。例如μ子是不稳定的,会衰变成电子和中微子。实验表明静止的μ子的平均寿命为2.2微秒,但当它以速度0.995c运动时,寿命延长为22微秒,延长的时间与(11)式算出的精确一致。

然而，这里讨论的时钟变慢效应又是相对的。S系和S'系中的观测者都认为对方的钟是动钟，都认为动钟变慢了。那么，到底谁对呢？都对。动钟是选定的一个钟，静钟则是一系列钟，正是这一个动钟相对一系列静钟变慢了。

再强调一下，在动钟变慢的讨论中，总是用一个钟（动钟）和一系列钟（静钟）比较。变慢的一定是那个单一的钟。对于初学相对论的人，记住这一点可以少犯错误。

对于任何一个静钟而言，特定的动钟只与它相遇一次，就一去不复返了。如果让这个动钟返回来，再与它比较，就必须使动钟反向加速，这时，动钟就不再属于惯性系了。仅用上述讨论解决不了这一难题。我们将在“双生子佯谬”中探讨动钟返回的问题。

问题六、什么是双生子佯谬？

相对论中有一个著名的双生子佯谬，这个佯谬是相对论诞生初期，法国物理学家郎之万提出来的。该佯谬说，有双胞胎兄弟A与B，A一直生活在地球上，B乘宇宙飞船到外星球去旅行，回来时B将比A年轻。如果飞船加速到接近光速，然后再返回，B将比A年轻许多，可能A已是老头子了，B还很年轻。这种貌似天方夜谭的事情，真是可能的吗？相对论回答说，这是可能的，而且是千真万确的，星际旅行者将比他留在地球上的双胞胎兄弟年轻。

现在让我们来解释这一佯谬。我们每个人都可以看作三维空间中的一个点，静止的人，上下前后左右都固定，在三维坐标系中就是一个不动的点。三维空间再加上时间，就变成了四维时空。由于时间总在不停地流逝，任何物体和人都必须与时俱进，所以三维空间中的质点，在四维时空中一定会描出一条线。

我们用一条横坐标轴代表三维空间（图2），纵坐标代表时间，三维空间中静止的质点（例如人）在此四维时空中描出一条与时间轴（t轴）平行的直线。匀速运动的质点，由于位置随时间变化，将描出一条斜线。变速运动的质点将描出一条曲线。这种描述质点在四维时空中位置变化的曲线或直线，在相对论中称为世界线。其中做惯性运动的质点描出的世界线称为测地线（或短程线），在平直时空的惯性系中，测地线就是直线。相对论中，一个质点描出的世界线的长度是用伴随它运动的真实的钟所

走的时间来参数化的。所以质点描出的世界线的长度，与它经历的真实时间成正比。换句话说，质点指出的世界线的长度就是它经历的真实时间，在相对论中称为该质点的固有时间。

图2中直线A，就是留在地球上的双胞胎中的A描出的世界线，地球绕日的运动可以忽略不计，因此A的空间位置可近似看作不变，A描出的世界线可以近似看作测地线。曲线B是星际旅行者B描出的世界线。它的飞船先加速，接近外星球时减速，降落，然后再启动返回地球，先加速，接近地球后减速，最后降落，与他留在地球上的同胞兄弟相会。显然，曲线B不是测地线。

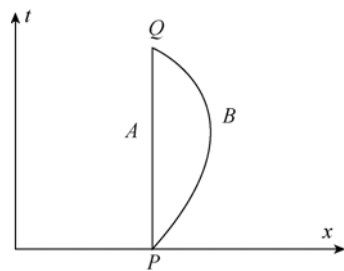


图2 双生子佯谬

我们已经讲过，相对论认为世界线A的长度就是留在地球上的兄弟A经历的时间，B的长度就是做星际旅行的兄弟B经历的时间，从图可以看出，A线与B线不一样长，也就是说，双胞胎兄弟二人经历了不同长度的时间。哪一个人经历的时间长呢？看图2后有人可能会认为B比A长，看来B会比A老。这不是与我们前面说的矛盾吗？双生子佯谬不是说B比A年轻吗？怎么会反过来呢？其实，并没有反过来，你之所以认为B线比A线长，是犯了用欧式几何的习惯来判断闵氏几何的4维线长的错误。我们通常用的几何是欧氏几何，斜边的平方等于两条直角边的平方和($d^2=dx^2+dy^2$)，所以两点之间以直线距离为最短。但在相对论中，四维时空的几何不是欧氏的，而是闵氏的，闵氏几何属于伪欧几何。在这张用闵氏几何表达的时空图中，斜边的平方等于两条直角边的平方差 ($d\tau^2 = dt^2 - \frac{1}{c^2} dx^2$ ，

式中 τ 为固有时，即质点世界线的长度)，两点之间以直线距离为最长。所以曲线B比直线A短，B经历的时间也就比A短。双胞胎中的星际旅行者经历的时间比地球上的同胞兄弟经历的时间短。因此返航会面时，B将比A年轻。

也许有人会说，你的上述说法都是以地球为静止参考系的，飞船跑出去，又跑回来。如果以飞船为静止参考系，在飞船上的人看来，自己没

有动，地球跑向远方，又跑回来。这样不就会得出相反的结论，认为地球上的 A 比飞船上的 B 年轻吗？

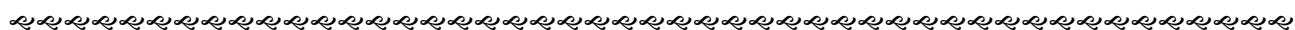
这种说法是不对的。参考系确实可以任意选择，运动也是相对的，即速度是相对的，三维加速度（即我们通常谈论的相对加速度）也是相对的；但四维加速度（又称固有加速度，即亲历者自身感受到的、与惯性力成正比的加速度）是绝对的。

这就是说，观测者 A 与 B 的固有加速度是否为零，有没有受到惯性力，是否在做惯性运动，是绝对的。

双生子佯谬问题本质上是讨论图中 P 、 Q 两点之间有没有最长线，哪一条是最长线的问题。欧几里得空间中两点间一定有最短线，它就是连接这两点的直线。研究表明，闵可夫斯基时空中有因果关

系的两点之间没有最短线，但有最长线，它就是做惯性运动的质点描出的测地线。具体到我们讨论的情况，就是图 2 中 A 描出的那条直线。如果换一个参考系，换一张图（例如上例中以飞船为参考系的情况）， A 描出的线形式上可能不是直线，但 A 做惯性运动，固有加速度为零，它描出的世界线一定是测地线。 B 的固有加速度不为零，不做惯性运动，它的世界线一定不是测地线。因此，究竟哪一条是测地线，这一点是绝对的，也就是说四维时空中世界线的长度是绝对的，它不随坐标变换、参考系或观测者的选择而改变。换句话说，时空几何是绝对的。所以， A 描出的世界线最长， A 经历的时间最长， A 比 B 老。这个结论是绝对的，是时空几何决定的，与参考系的选择无关。

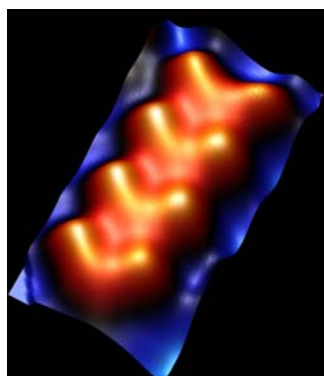
（北京师范大学物理系 100875）



科苑快讯

分子链组成的最小超导体

用金属导体制造纳米级电路几乎是不可能的——因为纳米线越细、电阻越大，导致线路因过热而熔化，这已成为制造纳米级设备的一个障碍。几个原子或分子能组成超导体吗？4 对分子组成的有机盐合成分子 $(\text{BETS})_2\text{GaCl}_4$ —— BETS 指的是双（乙烯基二硫代）四硒富瓦烯， GaCl_4 是四氯化镓——成为最小的超导体（如图）。



俄亥俄大学纳米量子现象和天文学研究所物理学副教授萨瓦·拉（Saw-Wai Hla）的研究小组认真研究了这种合成分子，将其置于银金属的表面。通过利用扫描隧道谱，科学家们观察到不同长度的分子链中的超导性。对于长度小于 50 纳米的分子链，其超导性会随着长度的减少逐渐变弱。然而，在长度仅仅为 3.5 纳米或仅仅为 4 对分子结构的分子链中仍然可以发现超导性，但这需要将分子冷却到 10K 的低温。这种分子超导结构可以用在纳米级的电子设备上，是一个重大突破。

（高凌云编译自 2010 年第 6 期《欧洲核子研究中心快报》）

美激光武器击落飞机

据美国和英国媒体报道，在今年 7 月份举办的英国范保罗国际航空展上，一家美国军火公司——雷神公司展出了其最新的激光防空武器系统，并披露，今年 5 月底，在美国加利福尼亚州沿海的一个美国海军武器试验场上，这种激光武器系统接受了秘密试验，与眼下在阿富汗和伊拉克战场风头正劲的无人飞机展开了较量。试验中，安装在战舰上的激光武器系统在战舰雷达系统的指引下，向距离舰大约 3.2 千米之外、以 480 千米时速飞行的 4 架无人飞机射击，激光器 32 千瓦的能量在数秒之内就将无人飞机烧毁。

美国雷神公司的激光武器系统所使用的是 6 套商用激光设备，将其安装在战舰上，合成一束威力强大的高能激光，这套激光武器系统与美军战舰上的“密集阵”舰炮防御系统结合，使用后者的雷达系统瞄准目标。除了可用于打击无人飞机外，这套系统还可用于打击小型舰只、追击炮弹和火箭弹。据估计，该激光武器系统将于 2016 年投入使用。

与之前的激光武器所不同的是，该激光武器系统所使用的是固态光线激光（由陶瓷等固态物质产生的激光光束）。英国著名军事期刊《简氏防卫周刊》的编辑彼得·菲尔斯特德说，这一武器系统标志着固态激光军事化应用的开始。

（摘编自 2010 年 7 月 21 日《广州日报》）