

[物理故事]

双生子佯谬

文_赵 峰

赵峰，1967年毕业于中国科技大学物理系，1981年于北京师范大学天文系获硕士学位，1987年于布鲁塞尔自由大学获博士学位。曾任北京师范大学研究生院副院长、物理系主任、中国引力与相对论天体物理学会理事长、中国物理学会理事。现为北京师范大学物理系教授，理论物理博士生导师、教育学博士生导师。

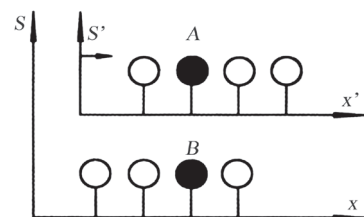


图1 动钟变慢

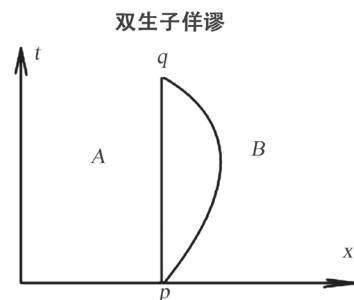


图2 双生子佯谬的时空图

相对论还预言运动的钟会变慢。设想在 S 系中沿 x 轴放置一系列钟，把它们校准，即时刻对好。在 S' 系中也沿 x' 轴放置一系列钟，同样把它们校准（图1）。

在 S 系中看，静置于 S' 系中的钟都是动钟。 S 系中的观测者任意关注1个 S' 系中的钟（图中黑点所示）。这个动钟在运动过程中依次和 S 系中的一系列钟相遇。每与1个 S 钟相遇，与它相遇的 S 钟就比较一下双方的时间。由于 S 系中所有的钟都是同步的， S 中的观测者就会发现，运动的那个钟（即图1中黑点所示的静置于 S' 系中的那个钟）越来越慢。

反过来，静止在 S' 系中的观测者，也可用自己的一系列钟与任意1个动钟比较。对他来说，动钟就是静止于 S 系中的钟。我们任意选择1个 S 系中的钟，用图中 S 系中的黑点表示。 S' 系中的观测者看到，这个动钟依次从自己的一系列钟前面运动过去。在与自己的一系列钟相继核对过后， S' 系中的观测者也会认为这个运动的钟变慢了。

相对论认为，动钟变慢也是相对的。静置在任何一个惯性系中的观测者，都会认为自己的钟没有变慢，相对于它运动的那个钟变慢了。

应该注意，在所有这些例子中，动钟都是1个，虽然是任意选定的1个，但肯定只是1个，而静钟都是一列。所以，都是单独的那个动钟，比一系列静钟变慢了。

动钟变慢的效应，已有不少实验验证。例如，有一种寿命极短的基本粒子—— μ 子，在地球上测量静止 μ 子的平均寿命为2.2微秒，当它以接近光速的速度0.995c运动时，寿命可延长到22微秒。实验观测与理论计算符合得很好。

在动钟变慢的讨论中，常常有这样的问题：如果有2个在一起的钟，分别向不同的方向以不同方式运动，双方都认为自己是静止的，对方在运动，对方会变慢，它们再次相遇后，到底哪个钟会变慢呢？

如果2个钟都一直坚持作惯性运动，即都一直作匀速直线运动，那么它们根

本不可能再次相遇。必须至少其中一个钟有加速和减速的过程，它们才可能在分别后又重新相遇。不过，即使其中一个钟有加速、减速过程，或2个钟都有加速、减速过程，其中任何一个钟似乎都可以认为自己是静钟，对方是动钟，对方会变慢。

到底哪一个变慢，是不是真的有这种变慢效应存在，在学术界曾引起长期争论。法国物理学家郎之万具体提出了一个例子，供大家讨论。

设想地球上有双胞胎兄弟，哥哥乘宇宙飞船到外太空去旅行，弟弟留在地面上。多年后，哥哥完成对遥远的外星的访问，返回来了。这时他们哪一个年轻？还是一样年轻？留在地球上的弟弟，可以认为一直近似处在静止状态，地球绕日那点儿运动可以忽略。哥哥飞出去先经历一个加速过程，到达外星时又经历一个减速过程，返回时重新经历一次先加速后减速的过程。所以弟弟一直处在惯性状态，哥哥则不是（如图2）。

我们知道，一个人在三维空间固定，可以看作一个点。但如果把时间加进来，作为第四维，我们就得到一个四维时空。在四维时空中，一个人不会再是一个点，由于时间在流逝，他一定会在四维时空中描出一根线，这种四维时空中的曲线，在相对论中称为世界线。在空间不动的人，会描出一根与时间轴平行的世界线，作匀速直线运动的人则会描出一根斜的世界线，这两种世界线都是直线。一个作变速运动的人则会描出一根弯曲的世界线。图2中，A是留在地球上的弟弟的世界线，B是哥哥的世界线，他往返时各经历了一次先加速后减速的过程，所以世界线是曲线。在时刻 p ，哥哥离开弟弟外出旅行，在时刻 q 返回到地球，与弟弟重逢。重逢时二人一样年轻吗？相对论认为，一个人描出的世界线的长度，就是他经历的时间。现在，两条世界线明显不同，长短应该不一样。谁经历的时间长呢？有的读者会说，哥哥经历的时间长，因为他的世界线是曲线，

曲线肯定比直线长，所以哥哥应该年老。你错了。因为曲线B比直线A短，所以哥哥会比弟弟年轻。为什么曲线反而比直线短呢？这是因为相对论中的几何不是通常的欧氏几何，在欧氏几何中，斜边的平方等于两条直角边的平方和，所以曲线一定比直线长。而相对论中的四维时空（称为闵可夫斯基时空）是伪欧时空，斜边的平方等于两条直角边的平方差，所以曲线反而比直线短。

通过相对论的认真研究，确认了作星际旅行的宇航员经历的时间会比地球上的人经历的时间短，所以哥哥将比弟弟年轻。这就是著名的双生子佯谬。“谬”是“错误”的意思，“佯”是“假”的意思。“佯谬”就是“假错误”，当然也就是正确的了。

人类早已开始作宇宙航行，已经有不少飞上太空的宇航员，还有一些宇航员曾到月球去旅行，然后又返回了地球。但我们似乎没有感觉到他们比地球上的同龄人年轻啊，这是怎么回事呢？

这是因为他们还飞得不够快，加速和减速的时间也太短，所以双生子佯谬效应在他们身上几乎看不出来。如果他们到更远的星球去旅行，经历加速和减速过程的时间大大加长，达到的速度也接近光速，则双生子佯谬的效应将会十分明显。

有人计算过，如果一艘飞船去比邻星旅行，双生子佯谬的效应会有多大。比邻星距离我们4光年，也就是说它的光传过来需要4年时间，真是够远的。但在天文学上，这是一个很近的距离，比邻星是除太阳以外离我们最近的一颗恒星。我们通常熟知的牛郎星距离我们16.5光年，织女星距离我们26.3光年。牛郎星距织女星要16光年，它们之间一个电报往返需要32年，真是难以想象，他们怎么能在每年农历的七月初七会面。

科学家设想，飞船先以3g的加速度（g是重力加速度）加速，即以通常地面上的重力加速度的3倍加速，这是一个可以较长时间承受的加速度。加

速时宇航员会感受到超重现象，重80千克的人，以3g的加速度加速时，体重会变为240千克。如果飞船的加速度太大，宇航员会被压坏。

他们设想以3g的加速度把飞船加速到接近光速的25万千米/秒，然后关闭发动机，飞船作惯性飞行，宇航员处于失重状态。快到比邻星时，飞船反向加速，使速度降到0。在比邻星附近的行星降落探测后，再以同样的方式先以3g加速，再改作惯性飞行，然后再以3g减速返回地球。计算表明，地球上的人认为飞船往返用了12年时间，而宇航员则觉得自己只飞行了7年。所以回到地球上的哥哥，会比留在地球上的弟弟年轻5岁。

如果认为这一效应还不够明显，则可以让飞船到银河系中心附近旅行一次。太阳系距离银心2.8万光年。飞船先以2g的加速度一直加速，飞到路途的中点后再以2g的加速度反向加速。在银心附近完成考察后，再以同样的方式返回。计算表明，宇航员觉得完成此次飞行用了40年。如果他们20岁时离开地球，60岁回来，还是可以的。那么地球上的人呢？地球上的人会觉得飞船经历了6万年才回来！回来时，宇航员认识的人都早已作古。如果真的完成了这样一次宇宙航行，飞船返抵时，地球人肯定会开一次盛大的庆功会，欢迎自己6万年前的祖宗回来了。

我们看到，处于惯性状态的人经历的时间最长，经历加速过程的人会觉得年轻。有人会想，在火箭上的人看来自己没有动，地球跑出去转了一圈回来，地球经历了加速过程，似乎地球人应该更年轻。到底谁年轻呢？宇航员在加减速过程中感受到了惯性力，他们是真加速。他们看到的地球人的加速是表观加速、假加速，因为地球人没有受到惯性力。所以结论是肯定的：宇航员更年轻！■

本文节选自上海教育出版社出版的《爱因斯坦与相对论——写在广义相对论创建100周年之际》，有删改。