

双生子佯谬新解

1. 什么是双生子佯谬？

1911年，法国物理学家朗之万提出“双生子佯谬”。他描述了这样一个情形：双生子弟弟留在地球，哥哥以接近光速的速度离开地球前往遥远的恒星旅行，然后以同样的方式返回地球。根据相对论，由于运动的时钟会变慢，哥哥返回地球时应该比弟弟年轻；另一方面，由于运动的相对性，从哥哥的角度来看，是弟弟离开飞船进行了长途旅行，返回时弟弟应该比哥哥年轻。谁更年轻？这就是所谓的双生子佯谬。

自从郎之万提出双生子佯谬之后，一百多年来，物理学家们写了成千上万的论文，提出了各种方案试图解释这个悖论。特别是有了互联网之后，面向大众关于双生子佯谬的解释的视频更是铺天盖地。这些解释都经不起推敲，因而不能使人信服，所以也有很多人对此提出疑问，批评这些解释。

郎之万提出的双生子悖论的核心问题是双生子的相对运动的对称性疑难，即双生子的对称性是怎样被打破的。

以往的解释是计算出旅行的双生子的钟变慢，因而旅行的双生子更年轻，这是郎之万通过计算已经知道的，不是双生子佯谬的核心。对于双生子悖论，要回答的是怎样解释运动的相对性，两者是明明相互运动的，为什么是旅行的双生子年轻，而不是地球上的弟弟年轻？

2. 以往的解释

(1) 只用狭义相对论

理由：飞船的巡航时间可以安排任意长时间，而加速时间可以设计使之任意短。比如，巡航100年，加速一个月。因此加速过程可以忽略不计。

计算方法：

$$\Delta t = \frac{\Delta \tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \text{ 其中 } \Delta t = \frac{L}{v}, \Delta \tau = \frac{\ell}{v} = \frac{L\sqrt{1 - v^2/c^2}}{v}.$$

传统结论：旅行的哥哥回来后比在地球上的弟弟年轻。弟弟已经是一个白发老头，而哥哥还是一个帅小伙。

疑问：由于运动的相对性，在哥哥看来，弟弟是运动的，弟弟应该年轻才对，那究竟谁年轻？这是双生子佯谬的关键点！

以往的答案：哥哥来回换了两个参照系，而弟弟始终在地球上没有动，又根据时空图，是哥哥来回切换了两个惯性参照系使得哥哥更年轻。

进一步的疑问：由于忽略了加速度，哥哥和弟弟的运动是完全等同的，在哥哥看来，弟弟也更换了两个惯性参照系，弟弟应该更年轻！

结论：以往的解释没有回答郎之万的问题，双生子佯谬并没有解决。

(2) 要用广义相对论

由于双生子哥哥经历了加速减速的过程，人们认为双生子佯谬问题需要用广义相对论的知识，导致双生子年龄差异的原因是加速度。

3.对“加速论”反驳

科格特博士 (Dr. John B. Kogut) 在他的书中描述了这样一个理想实验：想象一家有三胞胎，一个留在地球上，另外两个兄弟，一个乘宇宙飞船从地球向某星球飞去，另一个从遥远地方也向这个星球飞来，并最终到达地球。他们在那个星球相遇，同步他们的时钟，但保持各自速度不变。等那个兄弟回到地球后与在地球上的时钟进行比较，看谁的钟变慢了。在这个例子中，旅行兄弟的物理加速度没有直接作用。



采用前面介绍的狭义相对论方法计算，知道飞行的兄弟的时钟确实变慢了。这说明时钟变慢不是加速度引起的。旅行的兄弟变年轻与加速度无关！

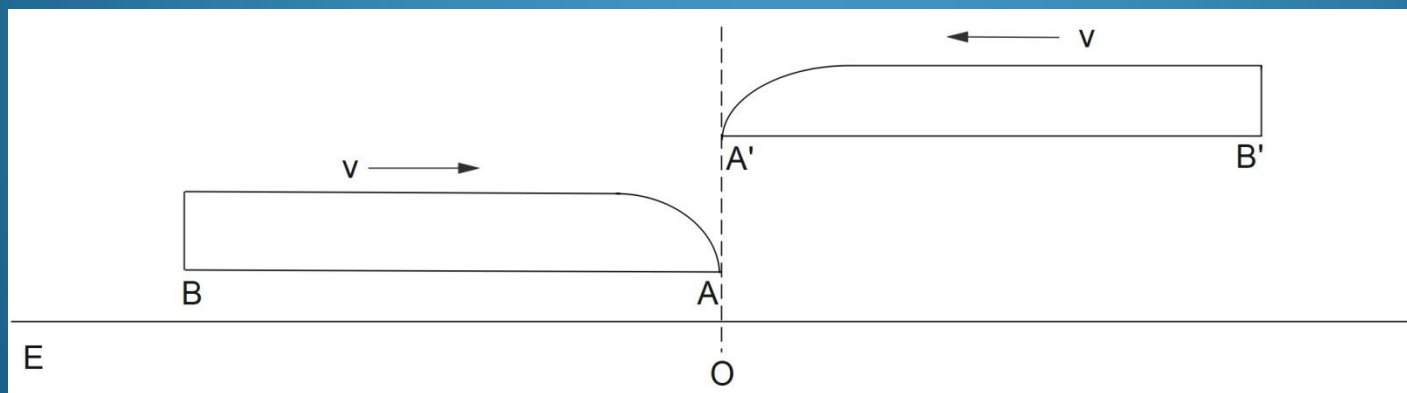
4.对“参照系切换论”的反驳

在地球上的双胞胎弟弟可以派助手预先到达遥远的星星，提前同步他们的时钟，然后测量旅行双胞胎哥哥的单程旅行时间。当哥哥经过那个星星时，哥哥和双胞胎的助手互相发送信号，通告他们自己的时钟记录的时间。这样他们就会知道各自的时钟的快慢。这个实验避免了加速度和参照系切换的影响。采用前面介绍的狭义相对论的方法计算，仍然会出现年龄差异，旅行双胞胎哥哥比地球上双胞胎弟弟年轻。因此，我们不应该将年龄老化差异的原因归结为加速度和参照系切换。

5. 一个新的理想实验

那究竟是什么原因引起这个年龄老化差异呢？我们通过一个理想实验来进行分析，找到答案。

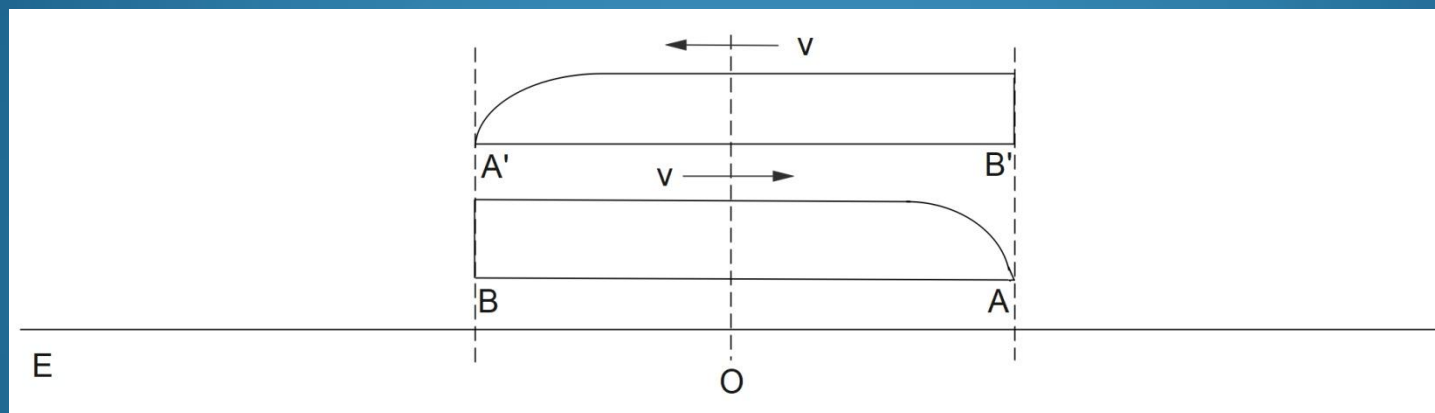
设想有两个非常长的具有相同本真（静止）长度 L 的宇宙飞船 AB 和 $A'B'$ 相对于地球以相同的速度 v 在相邻的平行轨道上对开。



下面分三种情况讨论

(1) 在地面上观测两个飞船

这两个飞船将在地球的某一时刻同时首尾对齐，也就是A'和B对齐与B'和A对齐是同时的。



此时，

$$\overline{AB} = \overline{A'B'} = L\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

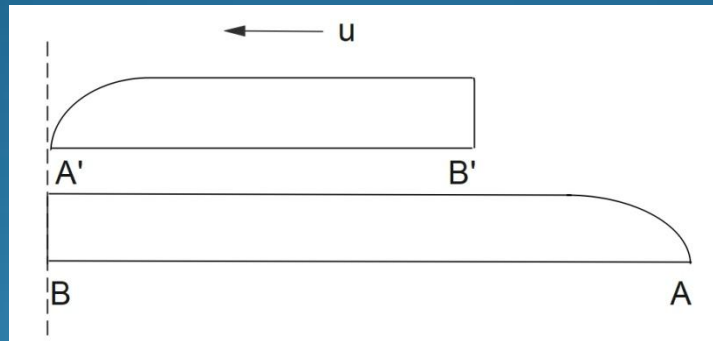
$$T_E = \frac{\overline{AB}}{2} \cdot \frac{1}{v} = \frac{\overline{A'B'}}{2} \cdot \frac{1}{v} = \frac{L\sqrt{1 - v^2/c^2}}{2v}$$

(2) 在飞船AB上观测飞船A' B'

在这种情况下，我们会看到飞船A' B' 一飞而过，飞船A' B' 相当对于飞船AB的速度是

$$u = \frac{(-v) - v}{1 - (-v)v/c^2} = -\frac{2v}{1 + v^2/c^2}.$$

现在观测飞船A' B' 有两种情形出现：第一种情形，飞船A' B' 的船头 A' 从飞船AB 的船头 A (事件 PP) 运动到船尾 B (事件 PS)。我们称这种情形为“PP-PS” (头头然后头尾)；第二种情形，观察者的时间记录从飞船A' B' 的船头 A' 经过飞船AB 的船头A那一刻开始到船尾B' 到达船头A为止。我们称这种情形为“PP-SP” (头头然后尾头)。



在第一种情形，飞船A' B' 飞行的距离是L，时间是

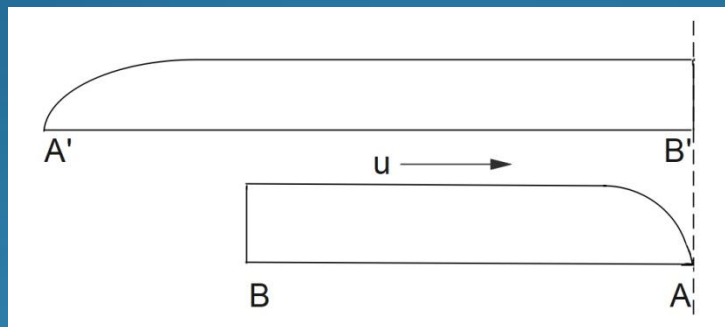
$$T_{PP-PS} = L/u.$$

而在第二种情形，飞行的距离是 $l = L\sqrt{1-u^2/c^2}$ ，
时间是

$$T_{PP-SP} = \frac{l}{u} = \frac{L\sqrt{1-u^2/c^2}}{u}.$$

我们看到在情形PP-PS中飞船飞行的时间比在情形 PP-SP中飞行的时间长。实际上，在情形PP-PS中，在船头 A' 到达船尾 B 之前，船尾 B' 已经通过了船头 A；而在情形PP-SP中，在船尾 B' 通过船头A后，船头 A' 还没有到达船尾 B。这意味着，在飞船 AB中观测时，船头 A' 到达船尾 B（事件 PS）和船尾 B' 通过船头A（事件 SP）这两个事件不再是同时的。

(3) 在飞船A'B'上观测飞船AB

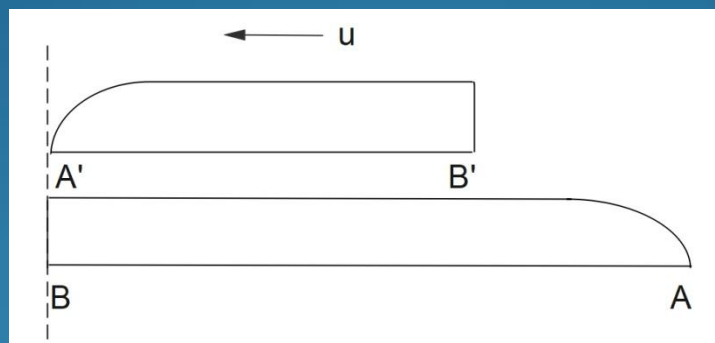


由于飞船AB 和飞船A' B' 的运动是完全对称，在飞船 A' B' 上观测飞船 AB，同样的情形也会发生。在情形PP-PS（从船头和船头对齐开始然后船头接近船尾）中飞船飞行的时间比在情形 PP-SP（从船头和船头对齐开始然后船尾接近船头）中飞行的时间长，事件 PS（船头接近船尾）和事件 SP（船尾接近船头）这两个事件不再同时，也就是两个飞船的头尾不再会同时对齐了。原本在地球上，它们是有同时对齐的瞬间。

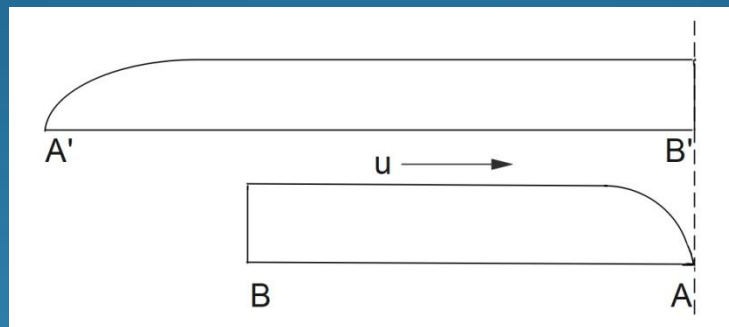
(4) 结论

从上面的讨论中，我们发现情形 PP-PS 中的记录时间总是比情形PP-SP 中的长。这个差异与我们选择测量哪种情形，或者在飞船的两个船头通过以后选择哪个时间点作为最后记录点有关。

(5) 在确定最终记录时间点以后，飞船AB和飞船A' B' 中的观察情形正好相反



若选择时间点 $A' B$ 作为最终记录时间点，也就是 A' 和 B 对齐的那一刻，对于在飞船 AB 中的观测者来说，是船头 A' 从船头 A 到达船尾 B ，飞船 AB 中的观察者观察到的是 $PP-PS$ 情形，而在飞船 $A' B'$ 中的观察者看到的是飞船 AB 的船头 A 经过船头 A' 后，船尾 B 到达船头 A' ，此时观察到的是 $PP-SP$ 情形。因此在飞船 AB 中的时钟记录的时间比在飞船 $A' B'$ 中的时钟记录的时间长。我们发现时间在飞船 $A' B'$ 中变慢了。



反过来，如果选择时间点 B' A作为最终记录时间点，对于飞船 $A' B'$ 中的观测者来说，是船头A从船头 A' 到达船尾 B' ，即观察到的是PP-PS情形；而对于飞船AB中的观测者来说，此时是飞船 $A' B'$ 的船头 A' 经过船头A后，船尾 B' 到达船头A，他观察到的是PP-SP情形。这样飞船 $A' B'$ 中的时钟记录的时间比飞船 AB 中的时钟更长。我们发现飞船AB 中的时间变慢了。

6. 双生子佯谬情形

在双生子佯谬情形中，地球和遥远的恒星可以被视为一个惯性参考系，而飞船是另一个惯性参考系。可以把地星系统想象成一个飞船，它的船头是地球，船尾是遥远的恒星；而一般飞船中的哥哥只被看作是一艘非常长的飞船的船头，因为一般飞船的长度和它们的飞行距离比较起来通常是非常短。

双胞胎弟弟和他的助手看到哥哥从地球到恒星，这个情形是 PP-PS。然而，哥哥发现地球（船头）离开他远去，后来恒星（船尾）向他飞来，最后的记录时间点是恒星（船尾）到达哥哥的时刻。这颗恒星已被预先选择为目的地。对于哥哥而言，观察到的情形是 PP-SP。因此，弟弟和他的助手记录的时间比哥哥记录的时间长。哥哥的时间变慢了。当哥哥回来时，哥哥观察到的情形仍然是 PP-SP，而弟弟所观察到的情形仍然是 PP-PS。因此，哥哥也比弟弟年轻。在前往和返回之后，哥哥将比弟弟年轻。

7. 引起年龄老化差异的真正原因是什么？

通过以上描述，我们发现哥哥在宇宙中来回穿梭始终观察到的是PP-SP情形，不可能是PP-PS情形。这是因为，对于太空飞行，人们总是在地星参考系中运动，并在地星参考系中选择目的地，而不是在飞船中选择。这意味着目的地的选择存在不对称性！目的地（恒星）相对于地球始终是静止的，而相对于飞船是运动的。因此，旅行者哥哥只能记录到更短的时间，所以更年轻。如果飞船的长度很长，等于地球到遥远恒星的距离（静止长度），旅行者哥哥站在飞船的船头，他的助手站在飞船的船尾，他们会看到地球从哥哥（超长飞船的船头）到达他的助手（超长飞船的船尾）。他们选择地球到达超长飞船的船尾的时刻作为最终记录时间点。现在目的地（船尾）相对于哥哥是静止的，而相对于地球是运动的。在这个情形中，哥哥观察到的是PP-PS情形，而弟弟观察到的是PP-SP情形。因此旅行者哥哥和他的助手也可以观察到弟弟比他们年轻。这说明哥哥和弟弟的运动是相对的。请注意，在这种情况下，在地球到达非常长的飞船的船尾（旅行者的助手待在那里）之前，旅行者哥哥已经通过了遥远的恒星。

8. 总结

以往关于双生子佯谬的计算，只计算了双生子两者的年龄差，没有说清楚年龄老化差异的原因，从而没有回答郎之万的关于双生子的对称性问题，也就是双生子佯谬，而这正是双生子佯谬的关键点。我们说明了加速度和参照系的切换都不是双生子年龄老化差异真正原因，通过提出一个理想实验，发现两个双胞胎观测者作为两个参照系，对于旅行目的地选择在哪个参照系中是非常重要的。这是导致两者不对称的根本原因。通常对于太空旅行，我们总是把旅行目的地选在地星参照系中，而不是在飞船参照系中，这就是我们只能观测到旅行双胞胎总是比地球上的双胞胎年轻。加速度和参照系切换都不影响双胞胎运动的对称性。从这个意义上来说，在我们的宇宙中存在一个特殊的参照系，那就是宇宙中的恒星系，或者说是宇宙背景辐射。太空旅行逃不出这个参照系。

谢谢大家观看！



(Gordon Liu)

想深入了解这个话题的观众请阅读我的相关论文：

<https://www.preprints.org/manuscript/202202.0130/v1>

我们将在“高登望远”这个平台不定期地推出有关数学和物理方面的录像与大家分享。

欢迎大家订阅，点赞！