

如何理解相对论

刘正荣

ZJL@CS.Stanford.EDU

此内容由人工智能(AI)辅助翻译, 若未达意, 请查阅[原文](#)

光速恒定

观察为我们揭示自然规律提供了重要线索。为了解释这些观察结果, 物理学家发展出各种理论模型。例如, 阿尔伯特·爱因斯坦提出的狭义相对论, 正是为了说明光速恒定这一实验现象。因此, 光速不变性构成了狭义相对论的核心概念。

在低速条件下的经典物理中, 速度是相对的, 并且可以叠加。例如, 一名乘客在以每秒20米行驶的列车上, 以每秒10米的速度抛出一个橄榄球, 则在地面观察者看来, 球的速度为每秒30米。长期以来, 人们认为光的传播依赖于一种假想的充满整个空间承载光波的介质, “以太”(luminiferous aether)。在这种假设下, 光速也应具有可叠加性。因此, 人们预期光的传播速度应随其方向与地球运动方向之间的夹角而变化, 例如顺着地球运动方向的光速应不同于垂直方向的光速。

1887年, 迈克耳孙和莫雷设计并实施了一项精密实验, 旨在探测地球穿过以太时所产生的光速差异。结果却出人意料: 他们未能测得任何方向上的光速差异。这一发现动摇了“以太”存在的理论基础, 首次强有力地表明光速是一个与光源和观察者状态无关的常数。

此外, 艾萨克·牛顿曾通过实验指出, 不同颜色的光以相同速度传播。而麦克斯韦方程组则从理论上推导出电磁波的传播速度, 该速度由真空中的电常数与磁常数决定, 与运动状态无关, 从而为光速恒定提供了理论支持。

$$(1) \quad c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 299,792,458 \text{ m/s}$$

其中, ϵ_0 表示真空介电常数, μ_0 表示真空磁导率。由这两个常数推导出的电磁波传播速度恰好等于光速, 这表明光是一种电磁波。电磁波的速度由自然常数决定, 不依赖于任何特定的参考系或观察者, 这与迈克耳孙-莫雷实验所揭示的结果高度一致。上述观察共同指向一个结论: 光速在任何参考系中都是恒定的, 无论光源或观察者是否运动。对光速不变性的确认, 正是理解狭义相对论的理论起点。

时间膨胀

既然光速是固定不变的, 那么空间和时间必然发生相应的变化。在物理学中, 速度由两个基本量决定: 时间和空间, 其中空间通常以距离来衡量。

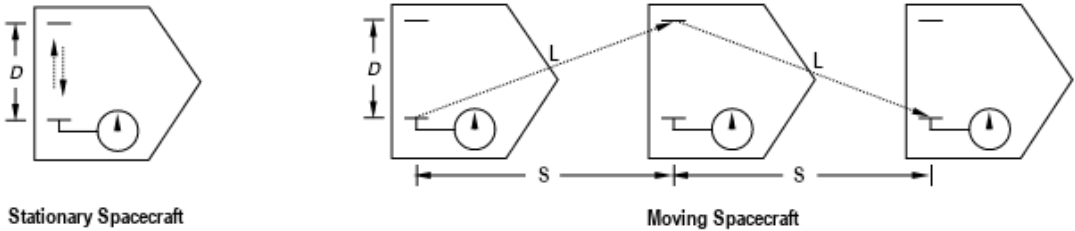
$$(2) \quad \text{速度} = \frac{\text{距离}}{\text{时间}}$$

在牛顿力学框架下, 时间和空间被认为是绝对且不变的, 因此不同观察者间它们会发生变化的观点显得违背直觉。然而, 为了使公式(2)中的速度定义与光速恒定的实验事实相符合, 方程右侧的时间和空间必须作出相应的调整。

那么，时间到底如何定义呢？时间通常是通过事件之间的间隔来衡量的。例如，一天被定义为地球自转一周的时间，并进一步划分为24小时。更精确的时间测量则依赖于特定晶体的振动周期或电子的跃迁周期。这些时间测量方法都基于一个隐含前提—某些过程的速度是恒定不变的。换言之，当某个物理现象以固定速度发生时，两事件之间的时间间隔或周期可以通过测量距离来确定，其关系表达为：

$$(3) \quad \text{时间} = \frac{\text{距离}}{\text{速度}}$$

这实际上是公式(2)的变形，因此包含了速度的定义。利用光速这一常数，时间可以通过公式(3)被统一且准确地定义和测量。由此，运动物体的时间膨胀效应得以清晰展示。设想一个简单的光子钟，由两面相距距离D的平行镜子组成，光子在两镜子间来回反射。每当光子击中下方镜子时，光子钟计数一次。图中左侧显示该光子钟安装在地面上的静止飞船内，右侧则是安装在以速度v相对于地面飞船运动的飞船内的光子钟。



对于地面上的“静止”观察者来说，光子钟一次计时的周期等于光子在静止飞船内往返两次镜子间距2D所用的时间：

$$(4) \quad \Delta t_0 = \frac{2D}{c}$$

其中，c是光速， Δt_0 是静止时钟的滴答周期。处于飞船内部的观察者同样使用与公式(4)相同的方式计算飞船内时钟的周期。

对于地面上的静止观察者来说，飞船内运动时钟中光子的传播路径更长。运动时钟的滴答周期是光子沿对角线往返路径2L所需的总时间：

$$(5) \quad \Delta t = \frac{2L}{c}$$

在同一周期里，飞船内的观察者测得光子传播的距离为2D，周期为 Δt_0 ，由公式(4)计算得出。这个周期比地面静止观察者测得的 Δt 要短。换言之，运动中的时钟相较于地面上的静止时钟走得更慢。

根据勾股定理，

$$(6) \quad L^2 = D^2 + S^2$$

其中，S是飞船在半个周期 $\frac{1}{2}\Delta t$ 内所行驶的距离：

$$(7) \quad S = \frac{1}{2}\Delta t v$$

现在, 通过将这四个方程中的D、L和S消去, 即可求得 Δt :

$$(8) \quad \Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

由此可见, 运动中的时钟走得比静止时钟更慢, 这正是运动参考系中的时间膨胀效应。

长度收缩

空间在运动参考系中会发生收缩。假设地面上的静止观察者测得飞船在飞船内时钟的一次滴答周期内运动了 L_0 米。对于飞船内部的观察者来说, 时钟的滴答周期为 Δt_0 (见公式4), 而地面观察者测得的时间周期为 Δt (见公式5)。那么, 对于飞船内的观察者来说, 在相同时间内飞船运动的距离L应该是多少? 由于两位观察者都处于惯性参考系, 他们应当一致地测得飞船在该过程中的速度相同:

$$(9) \quad \frac{L}{\Delta t_0} = \frac{L_0}{\Delta t}$$

等式右侧表示地面静止观察者测得的速度, 左侧则为飞船内运动观察者计算出的速度。利用公式(8)中的时间膨胀关系, 我们可以进一步推导出空间收缩的表达式:

$$(10) \quad L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

相对质量

质量同样具有相对性。设想一颗球在飞船内部自由下落, 球在飞船内时钟的一次滴答周期内垂直下落了S米。对于飞船内部的观察者来说, 球的动量由公式(11)计算得出:

$$(11) \quad p_0 = m_0 v_0 = m_0 \frac{S}{\Delta t_0}$$

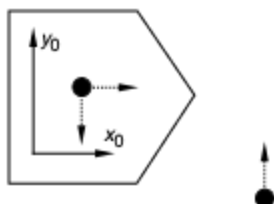
其中, m_0 是球的静质量, v_0 是球的速度, Δt_0 是飞船内本地时钟的周期。而对于地面上的静止观察者, 球的垂直动量由下面的公式计算:

$$(12) \quad p = mv = m \frac{S}{\Delta t}$$

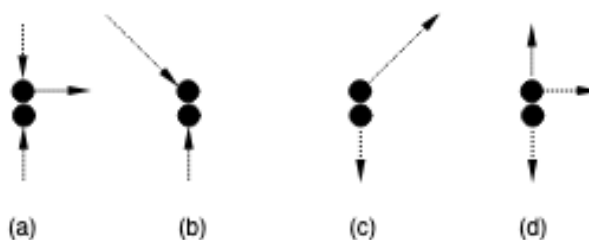
其中, m是球的相对论质量, v是球的垂直速度, Δt 是运动时钟的周期。垂直距离 S对两位观察者来说是相同的, 但地面观察者测得的时间被膨胀为 Δt 。由于两位观察者都处于惯性参考系, 且忽略水平方向的速度分量, 他们应当观测到球在下落过程中的垂直动量相同:

$$(13) \quad m_0 \frac{S}{\Delta t_0} = m \frac{S}{\Delta t}$$

公式(13)也可以从另一种角度推导得出。设想用与先前下落的球相同的静质量和速度，将另一颗球以相反方向发射，使两球在中点相撞，如下图所示。



对于地面观察者而言，向上运动的球的动量大小与公式(11)所示相同，但方向相反。碰撞发生后，忽略水平方向的影响，两球将以相同的垂直动量沿相反方向弹回，如下图所示。



借助时间膨胀公式(8)，公式(13)可以简化为：

$$(14) \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

这表明运动物体的质量会增加。

结论

所有相对于观察者静止的物理量测量结果，与牛顿力学中的测量一致，这类测量称为本征测量(proper measurements)。而相对论测量则是指对运动中的物体进行的测量。例如，当你观察一位在高速飞船内喝咖啡的人时，会觉得他的动作变得缓慢；但如果你与他同处飞船内，由于速度相同，你会觉得他的行为完全正常。

版本更新

- 09/17/2019: 本文在斯坦福初始发布

- [11/02/2025: 在Zenodo上发表](#)
- [12/18/2025: 增加相关文章摘要连接](#)

相关文章摘要链接

- <https://cs.stanford.edu/people/zjl/abstractc.html>, PDF
- <https://sites.google.com/view/zjlc/>, PDF
- <https://xenon.stanford.edu/~zjl/abstractc.html>, PDF
- <https://doi.org/10.5281/zenodo.17972005>, PDF

相关文献

- [热力学中的错误概念](#) (PDF: DOI) (中文: DOI)
- [克鲁克斯辐射计旋转的驱动机制](#) (PDF: DOI) (中文: DOI)
- [布朗运动的原动力](#) (PDF: DOI) (中文: DOI)
- [温度是分子平均动能的标志吗?](#) (PDF: DOI) (中文: DOI)
- [绝对零度的本质](#) (PDF: DOI) (中文: DOI)
- [能量转换三角](#) (PDF: DOI) (中文: DOI)
- [热膨胀是由于粒子振动引起的吗?](#) (PDF: DOI) (中文: DOI)
- [超流体不是流体](#) (PDF: DOI) (中文: DOI)
- [为什么相变温度保持恒定](#) (PDF: DOI) (中文: DOI)
- [摩擦为何会产生热量?](#) (PDF: DOI) (中文: DOI)
- [简明熵概念](#) (PDF: DOI) (中文: DOI)
- [熵可以减少](#) (PDF: DOI) (中文: DOI)
- [回归原理](#) (PDF: DOI) (中文: DOI)
- [金属中是否存在自由电子海?](#) (PDF: DOI) (中文: DOI)
- [电子通道: 导体超导统一论](#) (PDF: DOI) (中文: DOI)
- [低温和高温超导统一理论](#) (PDF: DOI) (中文: DOI)
- [LK-99的局限和意义](#) (PDF: DOI) (中文: DOI)
- [地球磁场超导起源说](#) (PDF: DOI) (中文: DOI)
- [关于质量的本质问题](#) (PDF: DOI) (中文: DOI)
- [从万有引力定律到广义相对论的演化](#) (PDF: DOI) (中文: DOI)
- [爱因斯坦质能方程的最简单推导](#) (PDF: DOI) (中文: DOI)
- [如何理解相对论](#) (PDF: DOI) (中文: DOI)
- [数学并非科学](#) (PDF: DOI) (中文: DOI)
- [潮汐能并非可再生能源](#) (PDF: DOI) (中文: DOI)
- [AI 知识污染](#) (PDF) (中文)
- [DeepSeek pk ChatGPT](#) (PDF) (中文)