

第二十章.狭义相对论基础

从本质上来看，狭义相对论仍然属于经典的物理学，因为实际上牛顿力学本身在逻辑上还有一些漏洞，特别是与电磁学还不能相容。狭义相对论彻底从逻辑上完善了牛顿力学，并且使得经典力学和电磁学完全自恰了。

伽利略变换。经典力学时空观。

首先我们必须了解所谓伽利略相对性原理在牛顿力学里所具有的根本重要性。

让我们回顾一下牛顿力学的基本思想，这样能有助于我们理解这些概念的相互关系，而不至于造成概念混乱。

我们知道牛顿第一定律的实质就是确立惯性参照系在自然界的地位，而牛顿第二定律则只是相对于惯性参照系才成立，那么接下来的问题就是如何判断一个参照系是否惯性参照系。

牛顿给出的答案是假设自然界存在一个绝对时空，然后任何相对于这个绝对时空作匀速直线运动的参照系就可以作为惯性参照系。

然而我们实际上无法判断绝对时空。如果我们已知一个惯性参照系，那么我们就可以根据牛顿第一定律，相应地得到所有的惯性参照系，可是我们却无法判断哪个参照系是绝对时空；而如果我们找不到任何一个惯性参照系，那就同样意味着找不到绝对时空。这也就是说，或者我们能够找到所有的惯性参照系，包括绝对时空，或者我们找不到任何一个惯性参照系，当然也包括绝对时空。

关键的是，为什么我们找到一系列的惯性参照系，会无法从其中辨别出绝对时空呢？

这就是伽利略相对性原理所决定的。这个原理的直观说法就是：在一个惯性参照系里所观察到的任何现象，所得到的任何物理规律，在另外的任何一个参照系里都必定是以同样的形式被观察到，反过来也就是说，不存在任何一个物理实验，可以使得我们能够分辨出我们所处的惯性参照系与别的惯性参照系的区别。

最基本的牛顿运动三定律，就是在任何的惯性参照系里都表现为同样的形式。这一点在牛顿力学里只需要引入伽利略变换就可以作到。

设两个惯性参照系S和S'的Y轴与Z轴重合，在X轴方向上存在速度为u的相对运动，那么对于同一个事件，在这两个不同参照系的描述有下列关系：

$$\begin{cases} x' = x - ut \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases}$$

可以看出，这个变换所依据的基本假设是在不同的惯性参照系里，时间间隔，空间长度以及质量都是不变的。从伽利略变换当然能够得到我们所需要的结论，就是我们无法测量绝对速度，而只能测量绝对加速度。那么同时反过来，伽利略相对性原理是否也一定意味着时间间隔，长度，还有质量都是不能通过改变惯性参照系来改变测量值的呢？

时间间隔，长度，不能通过改变惯性参照系来改变测量值的这个结论是和伽利略变换等价的。注意这个变换的特征就是使得在不同的惯性参照系里，运动方程的形式变换总是能够保证时间间隔，空间长度的不变性质。反过来，从时间间隔与空间长度的绝对不变性也能推出伽利略变换。

可以体会到，伽利略相对性原理实际上否定了特定的具有一定优越性的绝对时空的存在性。而伽利略变换则可以说是刻画了经典时空观念的核心。

那么剩下的关键的问题就是伽利略相对性原理与伽利略变换是必然联系在一起的吗？后面我们再进一步讨论这点。

迈克尔孙-莫雷实验。

真正要否定绝对时空的存在性，还是要从实验入手。而迈克尔孙-莫雷实验就是试图利用电磁现象来分辨出绝对运动。

迈克尔孙-莫雷实验主要是应用一个迈克尔孙干涉仪，来分辨微小的空间位移差异。我们知道迈克尔孙干涉仪的工作原理是把同一束光通过一个半反半透镜，分成两束相干光，并且这两束相干光在相互垂直的空间路径上行进，经过反射后，再一次通过半反半透镜，从而在空间相干。正是利用了两束光的路径的相互垂直，如果存在地球相对于绝对时空的某个方向的运动，依据伽利略变换，当这两束光在地球的水平面上的方向发生改变时，这两束光的光程应该发生相应的改变。同时，迈克尔孙干涉仪应该能分辨出这个光程差别来，因为根据计算，如果只是考虑地球的公转，就足够得到0.4的干涉条纹移动数目，而迈克尔孙干涉仪能分辨最小条纹移动数目是0.01。但这个实验的结果是完全否定性的。就是说，即使地球存在无可置疑的公转，也不能说地球相对于绝对空间存在相对运动。

必须注意一点，就是迈克尔孙-莫雷实验里的运动物体已经不是经典牛顿力学里常常考虑的运动对象，而是电磁理论里的基本对象—光的传播。

这个实验所揭示的尖锐矛盾，预示着经典物理学的基本观念要想容纳下新的电磁理论，必须得到修改。

爱因斯坦狭义相对论的基本假设。洛伦兹变换。

爱因斯坦仔细检查了牛顿力学与电磁理论的相容性问题，确立了两个基本的出发点：

- (1) 必须坚持伽利略相对性原理，就是说任何物理定律都必须与应用这个物理定律时所参照的具体的惯性系无关，不同的惯性参照系不影响任何物理定律，而不只是牛顿力学的定律，还应该包括新发展出来的电磁理论等。这可以称为相对性原理。
- (2) 无论光源的运动状态如何，我们测量得到的光速都相同。也就是说，光速在任何参照系里测量都是相同的。这可以称为光速不变原理。

从原则上来讲，这两个基本出发点是可能被证明的，因为任何的实验验证都一定是具体的某个现象，而具体的现象总是无穷无尽的，我们只能满足于是否能被实验验证，之所以把这两点作为基本出发点，正是因为这两点能够很容易地通过实验加以验证。

更仔细地分析这两点，就会发现相对性原理直接否定了绝对时空的存在，而光速不变原理则直接与伽利略变换相矛盾。

这就意味着我们在保存了伽利略相对性原理后，又必须放弃伽利略变换。这实际上就是提出了一种可能性，即使得不同的惯性参照系之间满足相对性原理的物理定律的变换关系，可能并不是只有伽利略变换这么一种形式，如果能够使用另外一种物理定律变换形式，同时相容于相对性原理与光速不变性原理，就可以解决牛顿力学与电磁理论不相容的问题。

洛伦兹变换就是满足这个要求的变换关系。

在两个不同的惯性参照系S和S'里，设这两个参照系只是在x轴上存在相对运动，其它两个坐标轴重合，则对于同一个事件有不同的两个坐标描述： (x, y, z, t) 和 (x', y', z', t') ，这两个坐标描述之间的关系是：

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} (x - ut) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \left(t - \frac{ux}{c^2} \right) \end{array} \right.$$

可以证明，麦克斯韦方程在这个变换下严格保存不变，而牛顿运动定律在这个变换下却会发生改变，

但这种差异在两个惯性参照系的相对速度远小于光速时，会是非常小的。这也就是说，当两个惯性参照系的相对速度远小于光速时，经过洛伦兹变换后的物理定律在实际测量中的表现和应用伽利略变换得到的结果难以区分。

但无论如何，毕竟通过这种惯性参照系之间的时空变换关系的重新定义，牛顿运动定律不再是精确的物理规律，而只是某种近似了。

相对论中的长度，时间和同时性。

从狭义相对论的基本前提出发，就可以得到在不同的惯性参照系之间，时间间隔，空间长度，质量都不是保持不变的了。这种变化的根源在于这些物理量本质上是以测量为基础的，现在我们的测量本身的物理意义发生了变化，即光速的有限性导致我们本质上不可能得到即时的测量，因为测量首先是一种物理作用，而任何物理作用的传播速度不可能超过光速。这样一来，实际上就限制了我们对这些物理量的使用。也就是说，这些物理量不再是对象本身的固有属性，而是依赖于我们的观察与测量。

(1) 长度发生收缩。

首先我们必须理解所谓长度并不是描述空间本身的物理量，而是描述空间中的物体的物理量，因此当我们说测量长度的时候，必须是具体说明测量什么对象的长度。而在空间中的长度不发生变化的物体我们就是定义为刚体的，因此，考虑测量长度这么一个物理事件，具体而言实际上就是测量一个刚体的长度。

假设对一个刚体在X轴方向上测量其长度，并且是分别在两个惯性参照系里进行的。这两个参照系的Y轴和Z轴重合，X轴方向上存在相对速度为u的相对运动。一个参照系相对于刚体静止，测量得到刚体的长度为 L_0 ，另一个参照系相对于刚体运动，测量得到刚体的长度为L。这两个长度存在如下关系：

$$L_0 = g \cdot L$$

$$\text{其中 } g = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

可见，参照系相对刚体的运动速度越快，测量得到长度越短。

(2) 时间产生膨胀。

类似地，对于时间，我们也必须理解为具体物理事件中的时间，比如以一定的物理过程为基础的时钟本身所给出的时间度量，这样我们对于同一个事件中的同一个时间间隔，在不同的惯性参照系里进行测量，就可以得到两个时间间隔的关系：

$$\Delta t = g \Delta t'$$

可见，参照系相对于事件的速度越快，测量得到的时间间隔越长。

(3) 不存在绝对同时性。

按照经典的观念，在一个惯性参照系里，两个不同地点的两个事件，如果通过测量发现是同时发生的，那么对于一切惯性参照系来说，通过测量可以发现这两个事件也都是同时的，因为测量是可以超距而即时地进行，也就不需要对同一个测量事件进行不同惯性参照系之间的坐标变换。但以狭义相对论的观念，除了同一个地点，同一个时刻所发生的事件可以称为对于任何惯性参照系来说都是同时，不同地点所发生的事件就无法作到对于所有的惯性参照系来说都是同时的。不过，按照经典的时空观念，在同一个地点，同一个时刻，就只是存在一个质点而已，说一个质点在一个时刻发生了两个事件是没有意义的。因此在狭义相对论的意义下，不存在绝对的对于所有惯性参照系都成立的同时性。

相对论动力学基础。

既然时间间隔与空间长度都发生了本质上的变化，可以想象牛顿力学的其它概念也会发生相应的改变，才能保证在洛伦兹变换下形式不变。

(1) 动量守恒定律。

如果要求动量守恒定律在洛伦兹变换下保持不变，则必须使得质量在不同的参照系下的测量值满足如

下关系：

$$m = \gamma m_0$$

可见，参照系相对一个物体的速度越大，在这个参照系测量物体的质量越大。

应用这个对质量的定义，得到相应的动量的定义，在这个意义下，动量守恒定律就得到了保持。

而如果牛顿第二定律里的质量也用这个定义代替就可以得到狭义相对论意义下基本运动方程：

$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = \frac{d(\gamma m_0 \vec{v})}{dt} = m \frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{v} \frac{dm}{dt}$$

(2) 动能。

同样地，代入相对论的质量公式，可以得到静质量为 m_0 ，运动速率为 v 的相对论动能表达式为：

$$E_k = mc^2 - mc_0^2$$

特别的，定义 mc_0^2 为物体的静能，而 $E = E_k + mc_0^2 = mc^2$ 为物体的总能量。

(3) 质能关系。

从 $E = mc^2$ 就可以知道质量变化意味着能量的变化：

$$\Delta E = c^2 \Delta m$$

这就是所谓质能关系。它的重要应用就是原子能。

(4) 能量与动量的关系。

从能量与动量的表达式中，消去运动速度 v ，可以得到能量与动量的关系：

$$E^2 = p^2 c^2 + E_0^2。$$