

狭义相对论

刘 辽 张允中

河北教育出版社

狭义相对论

刘 辽 张允中

河北教育出版社

狭义相对论

刘 辽 张允中

河北教育出版社出版（石家庄市北马路45号）

河北新华印刷一厂印刷 河北省新华书店发行

737×1092毫米 1/32	4.75印张	96,000字	印数：1—1,500	1987年9月第1版
1987年9月第1次印刷		统一书号：13509·1	定价：0.80元	

序 言

刘辽先生是我国知名的物理学教授，在相对论方面的造诣颇深。一九八三年五月，我有幸参加在南京师范学院举办的“相对论讨论会”。刘先生在会上讲学，并印发了一份《狭义相对论》讲义。我也把我写的有关狭义相对论的文章拿给刘先生审阅。在讨论中我们深切感到，由我国自己培养的物理学工作者，在相对论领域著书立说，对于发展我国的基础理论研究工作，是十分必要的。共同的理想和信念，促使我们愉快合作，当即商定以刘先生的讲义为基础，编写一本《狭义相对论》。我们定下的宗旨是要有自己的特色：第一，深入浅出，简明扼要。第二，把概念讲透，特别在相对论的历史背景、洛伦兹变换的意义以及相对论时空观方面，作重点论述。第三，把研究方法交代清楚，因而有必要利用张量作工具，来展开相对论电学和相对论力学的主要内容。至于本书的实际内容是否体现了这一宗旨，尚有待读者检验。

书稿几经修改与补充。在去年完稿以后，刘先生即赴美作研究工作；这篇序言就只好由我独自捉刀了。

在这里，我们由衷地感谢冯麟保教授，他仔细地审阅了

书稿，提出了许多极为有益的意见和建议。另外，本书难免还有错误或不妥之处，敬请同行赐教。

张允中

1986年5月

目 录

§ 1	引言	(1)
§ 2	经典物理学的时空观	(6)
§ 3	电动力学和相对性原理	(12)
§ 4	几个重要的经典实验	(16)
§ 5	狭义相对论的基本原理	(26)
§ 6	洛伦兹变换	(32)
§ 7	洛伦兹变换的群论性质 固有洛伦兹变换	(40)
§ 8	同时的相对性	(47)
§ 9	空间距离的相对性 时间间隔的相对性	(53)
§ 10	时序和因果律	(61)
§ 11	明可夫斯基四维时空	(66)
§ 12	固有时间和时钟佯谬	(73)
§ 13	张量简介	(79)
§ 14	明可夫斯基时空中的张量	(92)
§ 15	电磁场方程的协变性	(99)
§ 16	电磁场能量-动量张量	(107)
§ 17	相对论运动方程	(113)

§ 18 质量能量关系式 实验验证	(121)
§ 19 能量-动量矢量 光子的动量	(127)
附录 洛伦兹变换的严格推导	(136)

引 言

在当代,“相对论”已经是一个家喻户晓的名词了.然而,如果我们问一问相对论的基本精神是什么?不少人大概会这样回答:一根棒的长短和一座钟的快慢是相对的;不同运动状态的观测者,测量同一根棒的长度和同一座钟的快慢是不同的.这就是相对论.

我们要着重指出,虽然相对论确实告诉我们棒的长短和钟的快慢是相对的,但是相对论的基本精神却是认为一切真实的物理规律应当具有绝对性;或者说一切真实的物理规律不应当因为观测者采用了不同运动状态的参照系而有所不同.用数学术语来说,相对论断言:一切真实的物理规律在一定种类的时空坐标变换下,其数学形式应当不变,亦即具有某种协变性.

为了测定物体在空间的位置以及本身的大小,必须采用一根标准尺来度量.标准尺可以是任意约定的刚体.为了测定物体运动所经历时间的久暂,必须采用一座标准钟来度量.标准钟可以是任意约定的物体的运动或变化.为了方便起见,一般都采用周期运动.

上述物理度量若用数学语言来表述,就是采用一定的空间坐标 (x, y, z) 和时间坐标 t 来对物体的位置、大小、运动

和变化进行描述。

经典物理学认为空间和时间是独立无关的。相对论否定了这种直觉的经验观念。1908年明可夫斯基把空间和时间所构成的四维集合 (x, y, z, t) 叫做“世界”，后人遂把四维时空叫做明可夫斯基时空。为了在平面上形象的图示四维时

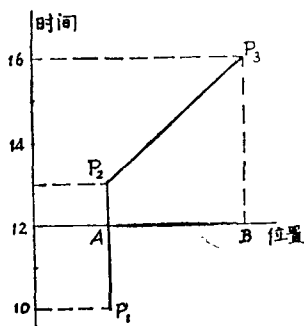


图 1

空，明可夫斯基建议取横坐标代表三维空间坐标（通常只写一维），取纵坐标代表时间坐标，构成如图 1 的时空坐标图。宇宙中任一事物均在四维时空中占有一个点，叫做“世界点”或者“事件”。例如午前十时火车到达北京站。北京站的地理位置（空间坐标 A）和午前十时就构成了明可夫斯基

时空内的一个事件 P_1 。假如火车停了三小时，虽然位置未变（相对于地面），但是时间坐标却移动了三小时，故该事件在四维时空内仍然画出了一条轨迹，而后到达事件 P_2 。此后火车从 13 时开车，16 时径直开到天津。天津的地理位置 B 和 16 时，构成事件 P_3 。可见任一事物从它产生到消灭，均在时空图中描绘出一条连续的曲线轨迹。此轨迹叫做世界线。需要注意，相对静止的事物也描绘一条世界线，和时间轴平行，如图 1 中 P_1P_2 。

时空坐标系是参考系的数学表示。原则上，任何物体均可以用作参考系。不过宇宙中的物体受有多种作用，它的机

机械运动是十分复杂的。有时在一段时间内，它受到的各种作用极微弱，以致于认为它是自由的。这种自由质点的机械运动是最简单的，它做惯性运动。用自由质点做参照物所建立的时空坐标系就是惯性系。原则上说，自由质点是无限多的，而且它们之间也没有相互作用。所以宇宙中可能的惯性系是无限多的，它们之间互相作惯性运动。站在某一惯性系上观测，另外的惯性系（或者自由质点）做匀速直线运动。

显然，惯性系是一种理想的坐标系，因为物质间至少存在着引力作用。只有当某一质点离开其它物体非常遥远时，它才有资格充当惯性系。这样一来，惯性原理实在含有循环论证的漏洞。因为确定质点是否很孤立，需要观测它是否做惯性运动；而是否做惯性运动又以它是否很孤立为前提。说到底，惯性系是个定义问题。不过，深入讨论惯性系的意义不是我们的任务。在这里只指出，在局部范围和一段时间内，惯性系的确是具有实际意义的最简单的时空坐标系。

惯性运动在时空图上的世界线是直线。在四维时空中做直线运动的质点群，构造成一群互相等价的惯性系群。

在狭义相对论中，就采用惯性坐标系，它们之间的时空坐标变换就是洛伦兹变换。在广义相对论中，采用任意参照物，它们之间的变换是广义坐标变换。

以电磁现象为例。我们知道，地球带着我们的实验室在其公转轨道上以每小时约十万七千公里（大约九十倍声速！）的巨大速度运动着。地球在春季和秋季的运动方向恰好相反，可以近似看作处在相互作用匀速直线运动的两个惯性系中。假如电磁规律因观测者所在的惯性系不同而异，我们又

怎么可能发现经受住实践考验的电磁规律——麦克斯韦方程组呢？

由此可见，任何一个物理学规律之所以能被人类发现，或者说它配称为规律，正是由于它在时空坐标变换下具有不变性，亦即具有绝对性。可以这样说，没有不变性就没有物理现象的规律性。相对论就是研究物理规律在某种时空坐标变换下的不变性或协变性的学科。

爱因斯坦和英费尔德在《物理学的进化》一书中谈到，“相对论的兴起……是由于旧理论中严重的深刻的矛盾已经无法避免了”。相对论并不是某个人或者某几个天才学者的自由创造。大家知道，从光的波动理论建立初期开始，到1905年为止，物理学家对“以太”探寻了将近二个世纪之久。正是在许多物理学家长期工作的基础之上，伟大的物理学家爱因斯坦才最终创立了相对论。

在1905年以前，经典电动力学有两个重要问题尚未解决。第一个问题是，电磁波究竟只是某种弹性媒质的运动形式呢？抑或它本身就是某种运动实体？以太论者认为电磁波应该是名为“以太”的某种弹性媒质的运动形式。从1678年开始的对以太的探寻是导致发现狭义相对论的原因之一。第二个问题是，麦克斯韦电动力学规律在不同惯性系中是否同样成立？就是说尽管物理现象具有相对性，物理规律是否应当具有绝对性？对于这个问题的探索是导致发现狭义相对论的原因之二。

最容易被人们接受的常识往往并不一定就是真理；而真理又往往离开常识较远。相对论就是这样的。为了使读者容

易接受，我们先迁就常识，看看遵循常识所能接受的牛顿力学究竟能够走到多远。我们最终会发现牛顿时空观和牛顿力学的破绽，而唯一的出路就是接受相对论。

狭义相对论和量子论是二十世纪初物理学理论基础的两大革命。前者大大改变了我们的时空观，而后者则使我们开始认识到物质的微观结构。从本世纪二十年代末开始，狭义相对论和量子论相结合又产生了相对论量子力学和量子场论。迄今为止，它们一直是我们探寻微观世界物理规律的强有力工具。

经典物理学的时空观

时间和空间是物质的基本属性，也是认识论中最根本的概念之一。如果我们仔细分析一下这两个概念就会发现，时间概念来自事物运动变化的顺序性；空间概念则来自物质实体的广延性。显然，没有物质的存在，就不会有抽象的位置排列、运动和变化，时间和空间两个概念也就失去它们存在的前提了。

可是二十世纪以前的经典物理学（牛顿力学）却认为时间和空间与运动着的物质没有任何联系，它们是先验地存在于人的意识之中的。只是在建立了相对论以后，人们才认识到时间和空间与运动着的物质密切相关。

经典时空观首先由牛顿所提出。牛顿在他的名著《自然哲学的数学原理》一书中，对绝对时间和绝对空间是这样表述的：

“绝对的、真正的数学的时间，本质上是一种与外界物体无关的匀速流动。”

“绝对的空间，本质上是与外界无关的，是同一的和静止的、不动的。”

因此，经典时空观又叫做牛顿时空观，或者绝对时空观。

1. 伽里略变换

上一节以自由质点为参照物所定义的惯性坐标系，仅仅要求时间和空间构成四维流形，并没有先验地认定时间和空间是否存在联系。以经典时空观为前提，亦即认为时间空间独立无关，反映不同惯性系之间变换关系的公式，是所谓伽里略变换。

如图 2，设 S 和 S' 是两个惯性坐标系。取 x 轴沿两者

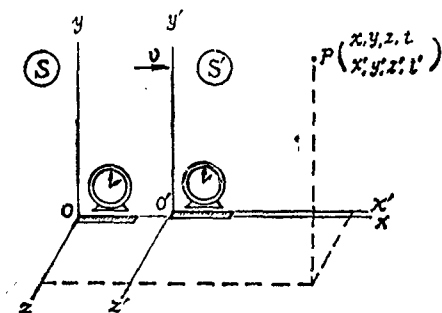


图 2

的相对速度方向，而且在开始时，两坐标系的原点重合。每个坐标系中均备有完全相同的标准尺和完全同步的标准钟；又设开始时，两个标准钟均校准为零。牛顿力学告诉我们，上述两个时空坐标系之间应当存在如下的变换关系

$$\left. \begin{aligned} x' &= x - vt \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= t \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

这就是有名的伽里略变换。

(1) 式虽然通俗易懂，但却包含着深邃的物理涵义。首先，从(1)式的最后一个等式立即得到

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

这个结果说明只要预先把 S 和 S' 系中的两个标准钟调整同步，并且保证机件不失灵的话（这只是一个技术问题，原则上总是可以办到的），那么牛顿力学以及我们的常识都确信：不同的惯性系可以有一个共同的时间度量标准；时钟的快慢或时间过程的久暂，与惯性系的选择无关，也和被研究的物体的匀速运动状态无关。对于一个非惯性系来说，在任意一个无限小时间内，都可以看成是一个特定速度 $v(t)$ 的惯性系。那么，上述结果意味着，时间和坐标系的任意选择，或者和物体的运动状态无关；时间是绝对的。

再看空间的度量。设在 x 轴上有两点，它们在 S 系中的坐标是 x_1 和 x_2 ，在 S' 系中的坐标是 x'_1 和 x'_2 。根据(1)式和时间的绝对性得

$$x'_1 = x_1 - vt$$

$$x'_2 = x_2 - vt$$

相减得

$$\Delta x' = \Delta x$$

这个结果说明只要 S 和 S' 系中的标准尺完全相同，并且保证不受外界条件影响的话（这也是一个技术问题，原则上总是可以办到），那么牛顿力学和我们的常识确信：不同的惯性系可以有一个共同的空间度量标准；标准尺的长度或者物体所占据空间的大小，和惯性系的选择无关，也和物体的匀速运

动状态无关。基于同样的考虑，长度的度量和坐标系的任意选择无关，也和物体的任意运动无关。因而空间也是绝对的。

绝对的时间、空间，和伽里略变换是水乳相容的。由绝对时空观得到的伽里略变换式，反过来也可以看作绝对时间、空间的定义。

2. 相对性原理

大家知道，经典力学规律仅在惯性系中才成立。

地面坐标系对于地面上大多数力学现象而言，可以近似地看作是“不错”的惯性系（忽略惯性离心力和科里奥利力效应的话），但是对于天文现象来说，它就是一个很“糟”的惯性系了。

哥白尼的伟大贡献就在于他指明了在描绘天体运动方面，日心坐标系才是一个比较好的惯性系。事实上，太阳也以大约每秒钟二百五十公里的巨大速度绕银河系中心公转（按 Allen）。天文学上往往认为与全体恒星的平均位置相对静止的坐标系才是较理想的惯性系。但是严格说来，恒星之间也有相对运动。二十世纪以前的物理学家于是假定宇宙间存在一个“绝对静止的原始惯性系”，牛顿力学对于它才是绝对正确的。

但是牛顿力学毕竟是居住在地球上的人类发现的。我们自然要问，何以处在相对于原始惯性系以如此巨大速度运动着的地球上，竟能发现牛顿定律呢？

1632年伽里略首先通过实验观察指出，相对于原始惯性

系作匀速直线运动的任一坐标系（即惯性系），力学规律是完全相同的。更明确地说，在伽里略变换下，牛顿运动定律的形式不变。

设在 S 系中牛顿运动定律的形式为

$$f = m \frac{d^2 x}{dt^2}$$

由伽里略变换(1)式可以得出 S' 系的量（加撇表示）

$$dt' = dt, \quad dx' = dx$$

所以

$$\frac{d^2 x'}{dt'^2} = \frac{d^2 x}{dt^2}$$

至于质量 m 则可用同一个弹簧来度量。设弹簧的弹性系数为 k ，伸长为 Δl ，此弹性力使待测质量的物体产生加速度。若测得加速度大小为 a ，则物体的质量为

$$m = \frac{f}{a} = \frac{k \cdot \Delta l}{a}$$

这样一来，质量的度量就化为时间和长度的度量。既然时间、长度的绝对性已如前述，那么质量就是不变量了，即

$$m' = m$$

结果是

$$m' \frac{d^2 x'}{dt'^2} = m \frac{d^2 x}{dt^2}$$

由此即得，在 S' 系中牛顿运动定律具有和 S 系完全相同的形式。

我们约定，如果某一物理规律在伽里略变换下形式不变