

33  
4

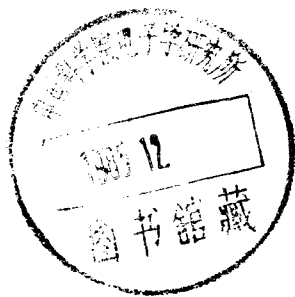
爱因斯坦  
和相对论

AIYINSHAN HE XIANGDUILUN

3.5.1.13  
1984

# 爱因斯坦和相对论

尤广建 编著



新时代出版社

8510672

2065/01

## 内 容 简 介

这是一本比较通俗的介绍相对论的书。这本书主要讨论狭义相对论，只简略地介绍广义相对论，中心是阐明相对论的基本思想。这本书的主要对象是各个学科的大学生，可以作为他们学习相对论的参考书。具有高中毕业文化程度的读者，也能阅读这本书，虽然会遇到数学上的困难，只要承认它的结果，就可以了解书中的基本内容。这本书结合相对论的介绍，对爱因斯坦的思想作了一些探讨，可供读者参考。

## 爱因斯坦和相对论

尤广建 编著

---

新时代出版社出版 新华书店北京发行所发行

国防工业出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 5.25印张 112千字

1985年7月第1版 1985年7月北京第1次印刷

印数：0,001—9,500册

---

统一书号：15241·57 定价：1.00元

## 序 言

尤广建同志所著《爱因斯坦和相对论》，用比较通俗的文字和简单的数学推导阐明了爱因斯坦相对论的基本思想，是一本很值得推荐的参考书。科学知识所反映的现象与现象间的关系，主要应该是量与量间的关系。为着掌握这些知识，数学的推导是非常重要的。本书所用的数学，大体上没有超出高中的水平；更详细的数学推导在附录中给出，供读者进一步学习和参考。最后一章还介绍了有关相对论的哲学和辩证唯物论的观点，可以启发读者作深入的探索。我愿意借此机会向读者强调一下：至少狭义相对论在高速运动领域内已被实践证实为客观真理，就象牛顿力学已在低速运动领域内被实践证明是客观真理一样。前几年，有一批人怀疑光速不变这个假定，认为只要能用实验证明这个假定不完全正确，相对论就自然失去实验基础而垮台了。但是大量的近代物理实验已经证明狭义相对论是完全正确的。这些实验是狭义相对论的真正的实验基础。当然，在更高的运动速度或在更微观的领域内可能会发现更新的规律来替代狭义相对论。但在现有实验能力所能达到的范围内，没有发现任何偏离狭义相对论的迹象。

胡 宁

## 前 言

这是一本比较通俗的介绍相对论的书，对象是各个学科的大学生和具有高中毕业文化程度的读者。这本书主要讨论狭义相对论，并简略地介绍广义相对论，中心是阐明相对论的基本思想。

本书的第一章，相对论的起源，是从物理思想的历史发展过程，探讨相对论产生的渊源。第二章到第五章，介绍狭义相对论。第二章，狭义相对论的基本思想，集中讨论狭义相对论关于时间和空间的概念。关于时空的概念是相对论的基本问题，对它的讨论是贯穿于全书的，这一章只阐明狭义相对论的看法，最后一章还要讨论广义相对论的时空观。第三章是关于运动学的问题，除了介绍长度收缩、时间膨胀效应和多普勒效应外，还讨论了“双生子佯谬”的问题。对于这个问题，本书没有从理论上推导一般性的结论，只是假想了一个简单的例子，通过对这个具体事例的计算，得到了协调一致的结果。第四章是关于动力学的问题，其中着重讨论了质能关系式的意义。第五章是关于电磁理论，因为电磁理论涉及数学和物理学的知识比较深，这里只能简单地介绍。本章的内容只打算说明两点：（1）电磁场的规律是洛伦兹变换不变的；（2）电磁场是统一的张量场。由于本书不准备系统地介绍张量的理论和运算，所以就在这一章简要地给出明可夫斯基的四维时空坐标系和张量的概念。第六章介绍广义相对论，只就爱因斯坦为什么要提出广义相对论，以及

他是如何解决广义相对论的问题，作一个概述。这里主要谈了爱因斯坦建立广义相对论的思路，以及广义相对论已经被验证到什么程度。

相对论是二十世纪初物理学革命的重要组成部分，它必然要涉及到许多哲学问题，介绍相对论是不能回避哲学问题的。所以，本书第七章，专门讨论了几个与哲学有关的问题。关于相对论的哲学问题，学术界是有不同意见的，本书提出的一些看法只是作为一种探讨，请有关的专家和读者指教。

介绍相对论必然要用数学。为了适合只有高中毕业文化水平的读者，本书的正文中把数学公式和数学推导压缩到可能的最低限度。为了满足具有大学数理水平的读者的需要，本书又特意增添了一组附录，将相对论的重要的数学推导系统地给出。这组附录所用数学，大体上是大学一二年级所学的高等数学的水平。

这本书以爱因斯坦的一些文章和谈话作为主要依据，着重探讨了爱因斯坦是怎样建立相对论的，同时也探讨了爱因斯坦的哲学思想。可以这样说，这本书的主要目的是阐明爱因斯坦相对论的基本思想，所以本书取名为《爱因斯坦和相对论》。

这本书的初稿，先后请钱尚武、章立源、陈熙谋三位同志审阅，并根据他们提出的宝贵意见作了修改。修改后的书稿，又请胡宁先生审阅。胡宁先生看过后，特意为本书写了序言。在此，谨向胡宁先生，钱尚武、章立源、陈熙谋三位同志，表示感谢。

1983年3月1日

## 目 录

**第一章 相对论的起源**

- 一 二十世纪的一颗新星..... 1
- 二 惯性参考系和伽利略变换..... 4
- 三 牛顿运动定律和力学相对性原理..... 8
- 四 电磁理论提出的问题..... 12
- 五 迈克耳孙-莫雷实验..... 15
- 六 光行差现象和斐索实验..... 18
- 七 洛伦兹的重大贡献..... 22
- 八 爱因斯坦提出了狭义相对论..... 24

**第二章 狭义相对论的基本思想**

- 一 两个原理..... 26
- 二 对时空概念的考察..... 27
- 三 从时间的校准进一步考察同时的相对性..... 31
- 四 狭义相对论的时空概念..... 36
- 五 洛伦兹变换..... 36
- 六 速度变换与速度极限..... 38

**第三章 相对的空间与时间**

- 一 运动物体的长度缩短..... 42
- 二 运动物体的时间膨胀..... 46
- 三 人的寿命会延长吗? ..... 50
- 四 时间的次序会颠倒吗? ..... 58
- 五 多普勒效应..... 60

**第四章 相对论质量和能量**

- 一 弹性碰撞的启示..... 66

二	质量和动量的新概念	69
三	质能关系式	72
四	粒子的质量、动量和能量	79
<b>第五章 四维时空与电磁场</b>		
一	电磁规律的不变性	82
二	匀速运动带电粒子的电磁场	84
三	四维时空坐标系	89
四	张量	93
五	电磁场张量	96
<b>第六章 广义相对论</b>		
一	问题的提出	98
二	等效原理	99
三	弯曲的空间	102
四	引力场的性质	105
五	广义相对论的实验验证	106
六	宇宙学问题	109
<b>第七章 相对论的哲学问题与爱因斯坦的哲学思想</b>		
一	关于相对论的时空观	113
二	实践在相对论中的地位	115
三	相对论与马赫主义有关吗?	118
四	爱因斯坦的哲学倾向	121
<b>附录</b>		
A	迈克耳孙实验的数学推导	125
B	洛伦兹变换公式的推导	128
C	速度变换公式的推导	132
D	多普勒效应的推导	133
E	质量、动量、能量和力变换公式的推导	136
F	电荷密度与电流密度变换公式的推导	140
G	电场强度和磁感应强度变换公式的推导	141



VIII

H	麦克斯韦方程组洛伦兹变换不变性的证明 .....	145
I	电磁场张量的推导 .....	152
J	$g_{\mu\nu}$ 张量和引力场方程 .....	157
	参考资料 .....	160

520010

# 第一章 相对论的起源

## 一 二十世纪的一颗新星

1902~1909年，在瑞士专利局工作的一位青年，发表了一系列关于物理学的论文。这些论文，由于思想的深邃和逻辑的完美，引起物理学界的极大重视。这位青年很快就成为物理学界一颗光彩夺目的新星，他就是爱因斯坦。爱因斯坦的论文，以全新的观点解决了当时物理学所遇到的一些问题。他在普朗克热辐射理论的基础上，提出光量子的假说，解释了著名的光电效应实验，为二十世纪量子理论的发展开辟了道路。他于1905年发表的《动体的电动力学》一文，首次提出相对论的理论，完美地说明了一系列的物理现象，从而深刻地改变了人们关于时间与空间的观念。二十世纪物理学理论的最重大成果，是相对论和量子理论，爱因斯坦都为其发展做出了重要贡献，尤其是相对论，更与爱因斯坦的名字直接联系在一起。

爱因斯坦是一个什么样的人呢？1879年爱因斯坦出生在德国一个犹太人的家里。虽然他的父母没有宗教信仰，可是学校却把宗教灌输给每一个儿童，爱因斯坦的幼年是深信宗教的。但是少年时代的爱因斯坦却喜爱科学，他读了许多通俗的科学书籍，很快就相信，《圣经》里的故事有许多可能是真实的。十二岁那年，他突然中止了宗教信仰，产生了一种狂热的自由思想，并且怀疑国家是故意用谎言来欺骗年

8510672

青人的。爱因斯坦抛弃了宗教的天堂，发现在我们之外有一个巨大的世界，它离开我们人类而独立存在。于是，追求这个客观世界的谜，引导爱因斯坦走上了一条艰辛的科学道路。

爱因斯坦是在德国上的中学，但是他很不满意“那种依赖训练、外界权威和追求名利的教育”。十六岁那年，他来到瑞士的苏黎世，投考联邦工业大学工程系，没有被录取。大学校长推荐他到阿劳州立中学去补习功课。在这所中学，自由行动和自我负责的教育，教师们的纯朴热情，给了爱因斯坦难忘的印象，使他深深地感受到这种教育的优越。同狭义相对论有关的第一个朴素的思想——倘使一个人以光速跟着光波跑，他就处在不随时间而改变的波场之中，就是在阿劳州立中学这一年产生的。

1896年，他考入苏黎世工业大学师范系。他没有心甘情愿地把精力完全集中于学校规定的课程，而是自己去安排学习那些他感兴趣的东西。他以极大的兴趣去听物理学的课程，常常去物理实验室里工作，并且以极大的热忱在家里向理论物理学的大师们学习；而对于那些没有兴趣的功课，只有借助于同学的笔记来应付考试。自学是爱因斯坦早有的习惯，爱好沉思则是他突出的性格。物理实验室的工作和物理学大师们的著作，把这个二十多岁的青年，引导到当时物理学的前沿。

1902年，他来到瑞士专利局工作。在这里他不用为生活操心了，而且明确规定技术专利权的工作，迫使他从事多方面的思考，这对物理的思索也有重大的激励作用。他很高兴有这样一件工作，因为在本职工作以外，他可以埋头研究他所爱好的问题，而不必有任何负担。这几年是他最愉快的年

代，也是他最富于创造性活动的年代，相对论就是在1905年诞生的，那一年爱因斯坦只有26岁。

爱因斯坦在物理学上的成功，使他很快名扬四海，接连受聘于许多著名的大学，并且于1921年获得诺贝尔物理学奖金<sup>①</sup>。在巨大的荣誉面前，爱因斯坦本人非常清醒。他没有把功劳全部归于自己，而是看到了科学发展的历史规律，看到了前人的工作给他创造的条件，看到后人只是在继承了前人工作基础上的再创造。爱因斯坦于1921年6月13日在伦敦皇家学院的讲话，充分表达了他的这种思想。他说：

“我能够荣幸地在这个曾经产生过理论物理学的许多最重要基本观念的国家首都发表讲话，特别感到高兴。我想到的是牛顿所给我们的物体运动和引力理论，以及法拉第和麦克斯韦借以把物理学放到新基础上的电磁场概念。相对论实在可以说是对麦克斯韦和洛伦兹的伟大构思画了最后的一笔，因为它力图把场物理学扩充到包括引力在内的一切现象。

回到相对论的本身上来，我急于要请大家注意到这样的事实：这理论并不是起源于思辨；它的创建完全由于想要使物理理论尽可能适用于观察到的事实。我们在这里并没有革命行动，而不过是一条可以回溯几世纪的路线的自然继续。要放弃某些迄今被认为是基本的，同空间、时间和运动有关的观念，决不可认为是随意的，而只能认为是由观察到的事实所决定的”<sup>②</sup>。

● 爱因斯坦获得诺贝尔物理学奖金，是因为他对理论物理学的贡献，其中特别提到的是发现光电效应的定律。没有特别提出相对论，是因为当时对相对论的意义，科学家们的认识还不一致。

● 《爱因斯坦文集》第一卷 164页。

爱因斯坦的这段话就是本章的引言。为了透彻地了解相对论的起源，让我们回溯到十六、十七世纪，从哥白尼建立日心说，伽利略建立惯性定律开始，以便看清“几世纪的路线”是怎样“自然继续”下来的，看清爱因斯坦是在什么样的基础上创立相对论的。

## 二 惯性参考系和伽利略变换

在古代，由于人们知识的贫乏，把人类生存的地球看作宇宙的中心是很自然的。然而宗教发展起来以后，把地心说神化了，认为我们生存的空间是由上帝创造安排的、十全十美的、绝对不变的世界。宗教的教义严重地束缚着人们的思想，教会的权威更残酷地迫害每一个敢于反对它的人，科学处于宗教的桎梏之中。打破神化宇宙观的第一位科学家，是十六世纪的波兰天文学家哥白尼。他通过天文观测和计算，发现当时已知的几个行星，不是围绕地球运行的，恰好相反，地球也是一个行星，连同地球在内的所有行星，都是围绕太阳运行的。哥白尼证明了存在着地球绕日运动，从而否定了地球处于绝对的宇宙中心的地位。科学的观测，否定了神学的假话，许多科学家为坚持真理而遭到教会的残酷迫害，但是科学毕竟冲破了宗教的羁绊，解放了人们的思想。

哥白尼创立日心说以后，人们自然要问：地球不是宇宙的中心，太阳是否就是宇宙的中心呢？是否存在着宇宙的绝对中心呢？这样的问题，哥白尼没有回答，它只能通过进一步的科学观测和科学理论的发展来解决。

十七世纪初期意大利人伽利略，经过对物体运动情况的长期观测，发现了物体的惯性，提出了惯性定律。物体没有受到外力作用时，它总是保持原来的运动状态；静止的物体

仍然静止,运动的物体作匀速直线运动。伽利略把物体保持原来运动状态的性质叫做物体的惯性,上面这句话就是惯性定律的表述。有了伽利略的惯性定律,才开始了力学建立的进程。

当人们要具体地研究物体运动的情况时,就会发现,这种研究的首先一个条件,是选择参考系。什么是参考系?让我们举一个现代的例子来说明。例如一列行进中的火车,车厢内桌上放着一只茶杯,车内的人认为它是静止的,然而车外路旁的人,看到这只茶杯一闪而过,认为它是运动着的。他们对同一事件得出不同的结论,是因为他们各处于不同的参考系,前者处于行进的火车中,后者处于火车之外的地面上。因此,研究物体的运动状况,首先要选择好参考系,然后才能说某个物体对于这个参考系是怎样运动的。所谓参考系,就是研究物体运动时,选来作为参考的物体或物体系。

有了惯性定律,通常把参考系分为两类,一类是惯性参考系,一类是非惯性参考系。凡是遵从惯性定律的参考系是惯性参考系,否则是非惯性参考系。例如,路旁的人看匀速前进的列车中的那只茶杯,在水平方向没有受到什么力,它和火车一起匀速前进,保持原来的运动状态。因此,路旁的人以地面为参考系所作的观测,是遵从惯性定律的,地面可以作为惯性参考系。如果火车正在匀速直线前进,在车厢内的人看到那只茶杯,水平方向也没有受到什么力,原来静止,一直静止,也遵从惯性定律,这时候的火车也可以作为惯性参考系。关于惯性参考系有一条规则:凡是相对于某一个惯性参考系作匀速直线运动的参考系,同样是惯性参考系。匀速直线前进的火车和地面正是这种关系,如果一个是惯性参考系,另一个也是惯性参考系。

但是,当火车从车站启动,由静止到正常的运行速度,

有一个加速过程，这时候的火车就不是惯性参考系了。车厢内的人看到路旁的人，没有受到水平方向的力，却向相反的方向加速运动，这就不遵从惯性定律了。因此，加速运动的火车不是惯性参考系，而是非惯性参考系。

前面讲到地面参考系时，只是说可以作为惯性参考系，并没有直截了当地说就是惯性参考系。因为，就地球表面来说，并不是严格的惯性参考系。当研究太阳系各行星的运动时，太阳是很好的惯性参考系，地球就不是惯性参考系。地球相对于太阳并不是匀速直线运动，而是沿着椭圆轨道作变速运动；地球还有自转，地球表面相对于太阳时时都在变化着方向。因此，地球及其表面不是严格的惯性参考系。但是，当我们研究的物体，是在地球表面的一个很小的地区，一个不长的时间以内的运动状况，以这局部的地面为参考系，实践证明是可以作为惯性参考系的。例如我们在实验室做实验，就可以把地面作为惯性参考系。

为了准确地研究物体的运动状况，就要作数量上的分析，只有参考系不行，还要在参考系上建立坐标系。坐标系是在选定的参考系上引进的对空间的数学表示，通常选用三维直角坐标系，即笛卡儿坐标系。

研究物体运动的规律，选用惯性参考系及其坐标系比较简单。伽利略、牛顿建立的经典力学，物理学的各分支，都是以惯性参考系为基础的，只是在特殊的情况下才用非惯性参考系来处理。以下对惯性参考系简称为惯性系，非惯性参考系简称为非惯性系。

既然研究物体的运动可以选用不同的惯性系和坐标系，那么就需要知道不同惯性系之间的坐标变换关系。如果有两个惯性系 $K$ 和 $K'$ ，惯性系 $K'$ 相对于惯性系 $K$ 以速度 $v$ 运动，

通常这样来确定两个惯性系上的坐标系。使 $K'$ 系的 $x'$ 轴与 $K$ 系的 $x$ 轴重合，并且与速度 $v$ 的方向一致，如图1-1所示；

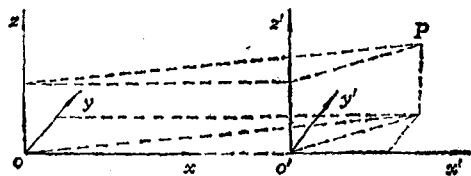


图1-1 伽利略坐标变换

再取两个坐标系完全重合时，为 $t' = t = 0$ 的时刻。这样，伽利略坐标变换公式为：

$$\begin{cases} x' = x - vt & (1.1) \\ y' = y & (1.2) \\ z' = z & (1.3) \\ t' = t & (1.4) \end{cases} \quad \begin{cases} x = x' + vt' & (1.1') \\ y = y' & (1.2') \\ z = z' & (1.3') \\ t = t' & (1.4') \end{cases}$$

这个变换中的第4式： $t' = t$ ，表明各个惯性系有共同的时间，这一点并没有给以证明，而是认为自然成立的。这在我们日常生活经验中没有发生问题，无论是地面上的车站，还是行进中的火车，都用共同的时间，不但没有问题，而且还是必须的。在伽利略变换中，时间不与空间发生关系，各个惯性系有共同的时间，这是一种绝对的时间观念。与此相应，在伽利略变换中，长度也是不变的。一个刚性物体，在 $K$ 系测量其长度是 $l$ ：

$$l = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

变换到 $K'$ 系其长度 $l' = l$ 。证明如下：



$$\begin{aligned}
 l' &= \sqrt{(x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2 + (z'_2 - z'_1)^2} \\
 &= \sqrt{[(x_2 - vt) - (x_1 - vt)]^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \\
 &= \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \\
 &= l
 \end{aligned}$$

这种绝对的时间和绝对的长度，也就是绝对的 空间的观念，在我们日常生活经验中是从来没有怀疑过的。然而，这种绝对的时间观念并没有经过严格的科学证明，绝对的空间是在伽利略变换基础上的证明，是否存在问题，还有待于进一步的实践检验。

### 三 牛顿运动定律和力学相对性原理

伽利略之后，牛顿建立了完整的经典力学，即牛顿三定律和万有引力定律。牛顿第一定律就是惯性定律。牛顿第二定律通常叫做牛顿运动定律，是经典力学的基本定律，它的数学表达式为：

$$F = ma \quad (1.5)$$

这里， $F$  代表作用于物体上的外力的矢量和， $m$  是物体的质量， $a$  是物体所产生的加速度。严格地说，这个公式只适合于质点的情况；非质点的情况，数学形式要复杂一些。第二定律引进了质量的概念，这里的质量是以数量表示物体的惯性，它是物体惯性的量度，是物体的惯性质量。牛顿第二定律原来的数学形式为：

$$F = \frac{d\mathbf{p}}{dt} \quad (1.6)$$

这里， $\mathbf{p}$  是物体的动量，它定义为物体的质量和速度的乘积，即  $\mathbf{p} = m\mathbf{u}$ ， $\mathbf{u}$  是物体的速度。式(1.6)也可以看作是力的定