汉译世界学术名著丛书

分科本◎哲 学

纪念版

狭义与广义相对论浅说

〔美〕阿尔伯特·爱因斯坦 著

SINCE1897
商務印書館
The Commercial Press

汉译世界学术名著丛书

分科本◎哲学

纪念版

狭义与广义相对论浅说

〔美〕阿尔伯特·爱因斯坦 著

张卜天 译

商务印书馆

2017年·北京

图书在版编目(CIP)数据

狭义与广义相对论浅说/(美)阿尔伯特·爱因斯坦著；
张卜天译. —北京：商务印书馆，2017
(汉译世界学术名著丛书：120年纪念版. 分科本. 哲学)
ISBN 978-7-100-13582-5

Ⅰ. ①狭… Ⅱ. ①阿… ②张… Ⅲ. ①狭义相对论
②广义相对论 Ⅳ. ①O412.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第089940号

权利保留，侵权必究。

汉译世界学术名著丛书
(120年纪念版·分科本)
狭义与广义相对论浅说
〔美〕阿尔伯特·爱因斯坦 著
张卜天 译

商 务 印 书 馆 出 版
(北京王府井大街36号 邮政编码100710)
商 务 印 书 馆 发 行
北 京 冠 中 印 刷 厂 印 刷
ISBN 978-7-100-13582-5

2017年7月第1版 开本880×1240 1/32
2017年7月北京第1次印刷 印张3⅝ 插页1
定价：15.00元

汉译世界学术名著丛书
（120年纪念版·分科本）

出 版 说 明

2017年2月11日，商务印书馆迎来120岁的生日。120年前，商务印书馆前贤怀揣文化救国的理想，抱持“昌明教育，开启民智”的使命，立足本土，放眼寰宇，以出版为津梁，沟通中西，为中国、为世界提供最富智慧的思想文化成果。无论世事白云苍狗，潮流左右激荡，甚至战火硝烟弥漫，始终践行学术报国之志，无改初心。

迻译世界各国学术名著，即其一端。早在20世纪初年便出版《原富》《天演论》等影响至今的代表性著作，1950年代后更致力于外国哲学和社会科学经典的译介，及至1980年代，辑为“汉译世界学术名著丛书”，汇涓为流，蔚为大观。丛书自1981年开始出版，历时三十余年，迄今已推出七百种，是我国现代出版史上规模最大、最为重要的学术翻译工程。

丛书所选之书，立场观点不囿于一派，学科领域不限于一门，皆为文明开启以来，各时代、各国家、各民族的思想与文化精粹，代表着人类已经到达过的精神境界。丛书系统译介世界学术经典，

引领时代思想，为本土原创学术的发展提供丰富的文化滋养，为推动中国现代学术和现代化进程做出了突出的贡献。

为纪念商务印书馆成立120周年，我们整体推出“汉译世界学术名著丛书”120年纪念版的分科本，延续传统分为橙色、绿色、蓝色、黄色和赭石色五类，对应收录哲学、政治·法律·社会学、经济、历史·地理和语言学等学科的学术经典著作，既利于文化积累，又便于研读查考，同时向长期支持丛书出版的译者、编者和读者致以敬意。

两甲子后的今天，商务印书馆又站在了一个新的历史时间节点上。我们不仅要铭记先辈的身影和足迹，更须让我们的步伐充满新的时代精神。这是商务人代代相传的事业，更是与国家和民族的命运始终紧密相连的事业。我们责无旁贷，必须做好我们这代人的传承与创造，让我们的努力和成果不仅凝聚成民族文化的记忆，还能成为后来人可以接续的事业。唯此，才能不负前贤，无愧来者。

商务印书馆编辑部

2017年5月

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com

前　言

本书旨在让那些从一般科学和哲学的角度对相对论有兴趣而又没有掌握理论物理的数学工具的读者能够尽可能确切地理解相对论。本书假定读者已具备相当于大学入学的知识水平，尽管篇幅不长，读者仍须付出相当大的耐心和毅力。作者力求尽可能简单清晰地介绍相对论的主要思想，并且大体上按照这些思想实际发生的顺序和联系来叙述。为清晰起见，我不得不经常有所重复，而不去顾及叙述是否优雅。我谨守卓越的理论物理学家玻耳兹曼的格言，认为是否优雅的问题应当留给裁缝和鞋匠去考虑。但我不敢说如此已为读者消除了相对论中固有的困难。另一方面，我有意以一种“继母”的方式来处理相对论的经验物理基础，以便不熟悉物理学的读者不致感到像一个只见树木不见森林的漫游者。愿读者阅读本书时能够度过一段启发思考的愉快时光！

阿尔伯特·爱因斯坦

1916 年 12 月

目　录

第一部分　狭义相对论…… 1
1.几何命题的物理意义…… 1
2.坐标系…… 3
3.经典力学中的空间和时间…… 5
4.伽利略坐标系…… 7
5.相对性原理(狭义)…… 7
6.符合经典力学的速度相加定理 …… 10
7.光的传播定律与相对性原理表面上不相容 …… 10
8.物理学中的时间概念 …… 12
9.同时的相对性 …… 15
10.距离概念的相对性…… 17
11.洛伦兹变换…… 18
12.运动中的量杆和钟的行为…… 22
13.速度相加定理　斐索实验…… 24
14.相对论的启发价值…… 26
15.狭义相对论的普遍结果…… 27
16.狭义相对论与经验…… 31
17.闵可夫斯基的四维空间…… 34

第二部分　广义相对论 …… 37
18.狭义与广义相对性原理 …… 37
19.引力场 …… 39
20.惯性质量与引力质量相等作为广义相对性公设的一个论据 …… 41
21.经典力学的基础和狭义相对论的基础在哪些方面不能令人满意？ …… 44
22.广义相对性原理的几个推论 …… 46
23.转动的参照物上钟和量杆的行为 …… 49
24.欧几里得连续区和非欧几里得连续区 …… 51
25.高斯坐标 …… 54
26.狭义相对论的空时连续区可以当做欧几里得连续区 …… 57
27.广义相对论的空时连续区不是欧几里得连续区 …… 58
28.广义相对性原理的严格表述 …… 60
29.基于广义相对性原理解决引力问题 …… 62

对整个宇宙的一些思考 …… 66
30.牛顿理论在宇宙论方面的困难 …… 66
31.一个有限无界宇宙的可能性 …… 67
32.以广义相对论为依据的空间结构 …… 71

附录 …… 73
1.洛伦兹变换的简单推导 …… 73
2.闵可夫斯基的四维世界 …… 78

3. 对广义相对论的实验证实 …… 79
4. 与广义相对论相关联的空间结构 …… 86
5. 相对性与空间问题 …… 88

索引 …… 105

第一部分　狭义相对论

1. 几何命题的物理意义

亲爱的读者，您大概从小就已经熟悉了欧几里得几何学的宏伟大厦。回想起这座宏伟的建筑，您也许敬多于爱。在其高高的楼梯上，认真的教师曾使您在数不清的日子里疲于奔命。凭借您过去的经验，谁若是宣称这门科学中哪怕最冷僻的命题是不真实的，您一定会嗤之以鼻。但如果有人问，“您说这些命题是真的，这究竟是什么意思呢？”您那种颇为得意的确定感兴许会立刻消失。让我们考虑一下这个问题。

几何学从“平面”、“点”和“直线”等一些基本概念出发，我们能把大体上清晰的观念与这些概念联系起来；几何学还从一些简单的命题（公理）出发，基于这些观念，我们倾向于把这些命题（公理）当做“真的”接受下来。然后，利用我们不得不认为正当的一种逻辑方法，所有其余命题都可以追溯到这些公理，亦即得到证明。于是，只要一个命题可以通过公认的方法由公理推导出来，这个命题就是正确的或“真的”。这样，各个几何命题是否为“真”的问题就归结为公理是否为“真”的问题。但人们早已知道，后面这个问题

8 不仅用几何学的方法无法回答，而且它本身就是毫无意义的。我们不能问“过两点只有一条直线”是否为真，而只能说，欧几里得几何学涉及一种被称为“直线”的形体，几何学赋予直线一种性质，即直线可由其上两点清楚地确定下来。“真”这个概念对于纯粹几何学的陈述是不适用的，因为我们习惯上总是用“真”这个词来指与一个“实在的”客体相符合；然而几何学并不涉及它所包含的概念与经验客体之间的关系，而只涉及这些概念彼此之间的逻辑联系。

不难理解，为什么尽管如此我们还是感到不得不把几何命题称为“真的”。几何概念多多少少对应于自然界中具有精确形状的客体，而这些客体无疑是产生这些概念的唯一根源。几何学应当放弃这样做，才能使其结构获得最大程度的逻辑一致性。例如，通过一个刚体上两个标明的位置来查看“距离”，这在我们的思维习惯中根深蒂固。如果恰当地选择观察位置，用一只眼睛观察而能使三个点的视位置相互重合，我们也习惯于认为这三个点位于一条直线上。

2

现在，如果按照我们的思维习惯，在欧几里得几何学的命题中补充这样一个命题，即一个刚体上的两点永远对应于同一距离，而与物体可能发生的位置变化无关，那么欧几里得几何学的命题就

9 可以归结为关于刚体的可能相对位置的命题。[①] 我们可以把作了如此补充的几何学当成物理学的一个分支来处理。现在我们可以合法地提出经过这样解释的几何命题是否为“真”的问题，因为我

① 因此，一个自然物也与一条直线相联系。设 A、B、C 是一个刚体上的三个点，如果给定 A 点和 C 点，选择 B 点使距离 AB 与 BC 之和最小，则这三点位于一条直线上。对于我们目前的讨论来说，这一不完整的提法是足够的。

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com

们可以问，对于被我们归入几何概念的那些实在的东西来说，这些命题是否适用。我们也可以不太精确地说，我们把此种意义上几何命题的“真”理解为该命题对于尺规作图的有效性。

当然，确信此种意义下的几何命题为“真”，仅仅是以极不完整的经验为基础的。我们先假定几何命题为真，然后在最后一个部分（讨论广义相对论时）会看到，这种真在何种程度上是有限度的。

2. 坐标系

根据上述对距离的物理解释，我们也能在测量的基础上确定一个刚体上两点间的距离。为此，我们需要有一个始终可用作测量标准的“距离”（杆 S）。设 A 和 B 是一个刚体上的两点，我们可以根据几何学规则用一条直线将两点连接起来：然后从 A 开始，一次次标定距离 S，一直到 B。此操作的重复次数就是距离 AB 的尺寸，这是一切长度测量的基础。①

描述某个事件或物体的空间位置，都是以在一个刚体（参照物）上标定与该事件或物体相重合的点为根据的。这不仅适用于科学描述，而且适用于日常生活。比如分析一下“柏林波茨坦广场”这一位置标记，我会得出以下结果。地球是该位置标记所参照的刚体；“柏林波茨坦广场”是地球上业已标明的、配有名称的一

① 这里假定测量无余数，即测量结果是一个整数。我们可以用一个带有分刻度的量杆来摆脱这一困难，引入这种量杆并不要求有任何全新的方法。

点，事件在空间上与该点相重合。[①]

这种标记位置的原始方法只适用于刚体表面上的位置，而且只有当刚体表面上存在着可区分的各个点时才能使用这种方法。但我们可以摆脱这两种限制，而不改变位置标记的本质。比如波茨坦广场上空飘着一朵云，我们可以在波茨坦广场上垂直竖起一根长竿直抵这朵云，以确定这朵云相对于地球表面的位置。用标准量杆量出这根竿的长度，再结合这根竿底端的位置标记，我们就获得了这朵云完整的位置标记。通过这个例子我们可以看出位置概念是如何得到改进的。

(1)我们将位置标记所参照的刚体加以延伸，使之抵达待确定位置的物体。

(2)确定物体位置时，我们使用一个数(这里是指用量杆量出的竿长)，而不使用选定的参考点。

(3)即使未把抵达云端的竿竖立起来，我们也可以谈及云的高度。我们从地面上各个地方对云进行光学观测，并考虑光的传播特性，就能确定竿需要多长才能抵达云端。

从以上论述可以看出，如果在描述位置时能够使用测量数值，而不必考虑刚性参照物上是否存在着(具有名称的)标定的位置，那会比较方便。通过应用笛卡儿坐标系，测量物理学达到了这个目的。

笛卡儿坐标系包含三个相互垂直的平面，这三个平面与一个

① 这里无须对“在空间上重合”的含义作进一步研究；这个概念足够清楚，对其在实际情况下是否适当，不大会产生意见分歧。

刚体牢固地连在一起。任何事件相对于坐标系的地点(本质上)通过从事件地点向三个平面所作垂线的长度或坐标(x，y，z)来描述。这三条垂线的长度可以按照欧几里得几何学所确立的规则和方法用刚性量杆经过一系列操作来确定。

实际上，构成坐标系的刚性平面一般来说是没有的；此外，坐标并非真是通过刚性量杆结构确定的，而是用间接方法确定的。要使物理学和天文学的结果保持其清晰性，就必须始终依照上述 12
思考来寻求位置标记的物理意义。①

由此可以得到以下结果：对事件的任何空间描述都要使用一个刚体作为事件的空间参照。所得出的关系假定了欧几里得几何学的定理适用于“距离”，而“距离”在物理上由一个刚体上的两个标记来表示。

3. 经典力学中的空间和时间

如果我未经认真思考和详细解释就把力学的任务表述为“力学旨在描述物体在空间中的位置如何随时间而改变”，那么我的良心会因为违背了清晰性的神圣精神而背负深重的罪孽。让我们来揭示这些罪孽。

这里的“位置”和“空间”应当如何理解是不清楚的。假定有一列火车正在匀速行驶，我站在车窗前把一块石头丢到路基上(而不

① 在本书第二部分开始讨论广义相对论之前，还不需要对这些看法加以完善和修改。

是将其抛出)。那么,如果不计空气阻力的影响,我会看到石头沿直线下落。而在人行道上观察这一不端行为的行人则看到,石头沿抛物线落到了地面上。现在我问:石头经过的各个"位置""究竟"是在一条直线上还是在一条抛物线上?此外,这里所谓的"在空间中"运动是什么意思呢?根据第 2 节的论述,回答是自明的。

13 首先,让我们完全避开"空间"这个模糊的字眼,我们必须老实承认,对于"空间",我们无法作任何思考;因此我们代之以"相对于一个刚性参照物的运动"。关于相对于参照物(火车车厢或铁路路基)的位置,前面几节已经作了详细定义。如果引入"坐标系"这个有利于数学描述的概念来代替"参照物",我们就可以说,石头相对于与车厢牢固连接在一起的坐标系走过了一条直线,相对于与地面牢固连接在一起的坐标系走过了一条抛物线。由这个例子可以清楚地看出,并不存在轨线[①]本身,只存在相对于特定参照物的轨线。

要想对运动作出完整描述,我们必须指明物体如何随时间改变位置,即物体在什么时刻位于轨线上的每一个点上。必须补充一种时间定义才能使这些说明变得完整,根据这种定义,这些时间值可以被看做本质上可观测的量(即测量结果)。如果基于经典力学的观点,我们针对此例子可以如下方式满足此要求。设想有两个构造完全相同的钟,站在车厢窗口的人和站在人行道上的人各拿一个。两人各自按照自己所持时钟的滴答声来确定石头相对于其参照物所处的位置。这里我们没有考虑因光的传播速度有限而

① 即物体沿着运动的曲线。

导致的不准确性。关于这一点以及这里的另一个主要困难，我们将在以后详细讨论。

4. 伽利略坐标系

众所周知，伽利略－牛顿力学的基本定律（即所谓的惯性定律）可以表述如下：一个与其他物体足够远的物体保持静止状态或匀速直线运动状态。该定律不仅谈到了物体的运动，而且谈到了力学所允许的、可用于力学描述的参照物或坐标系。相对于可见的恒星，惯性定律无疑能在相当高的近似程度上成立。如果现在我们使用一个与地球牢固连接在一起的坐标系，那么相对于这个坐标系，每颗恒星在一（天文）日当中都会描出一个巨大半径的圆，此结果与惯性定律的说法是矛盾的。因此，要想坚持这个定律，我们只能参照恒星在其中不作圆周运动的坐标系来考察物体的运动。如果某个坐标系的运动状态使惯性定律适用于该坐标系，我们就把该坐标系称为“伽利略坐标系”。只有相对于一个伽利略坐标系，伽利略－牛顿力学的诸定律才是有效的。

5. 相对性原理（狭义）

为使论述尽可能地清晰，我们回到那个匀速行驶的火车车厢的例子。我们把它的运动称为一种匀速平移（称为“匀速”是因为速率和方向是恒定的，称为“平移”是因为虽然车厢相对于路基改变了位置，但在此过程中并无转动）。设想一只乌鸦从空中飞过，

15 从路基上看它作的是匀速直线运动，那么从行驶的车厢上看，乌鸦虽然是以另一种速率和方向在飞行，但仍然是匀速直线运动。抽象地说：若质量 m 相对于坐标系 K 作匀速直线运动，那么只要第二个坐标系 K' 相对于 K 作匀速平移运动，该质量相对于 K' 亦作匀速直线运动。根据上节论述，由此可以推出：

若 K 为伽利略坐标系，则其他任何相对于 K 作匀速平移运动的坐标系 K′亦为伽利略坐标系。和相对于 K 一样，伽利略—牛顿力学定律相对于 K' 也成立。

我们作如下更进一步推广：如果 K' 是一个相对于 K 作匀速运动而无转动的坐标系，那么自然现象相对于坐标系 K' 的发展所遵循的普遍定律将与相对于坐标系 K 相同。我们把这一陈述称为“相对性原理”（狭义）。

只要确信一切自然现象都能借助于经典力学来表述，就没有必要怀疑这一相对性原理的有效性。然而随着电动力学和光学的新近发展，人们越来越清楚地看到，经典力学不足以充当一切自然现象的物理描述的基础。到这个时候，讨论相对性原理的有效性问题的时机已经成熟，而且对这个问题给出否定的回答并不是不可能的。

不过有两个一般事实从一开始就非常有利于相对性原理的有

16 效性。即使经典力学没有为一切物理现象的理论表述提供足够广泛的基础，我们也必须承认它包含着相当程度的真理内容，因为经典力学对实际天体运动的描述惊人地准确。因此，相对性原理在力学领域中的应用必然达到了很高的准确度。然而一条具有如此普遍性的原理，在一个现象领域有如此之高的准确度，而在另一个

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com