

狭义与广义相对论浅说

# 狭义与广义相对论浅说

A·爱因斯坦著

53.23/487  
术出版社



上海科学技术出版社

A. 爱 因 斯 坦 著

---

# 狭义与广义相对论浅说

杨润殷 译 胡刚复 校

上海科学技术出版社

---

## 内 容 提 要

本书是物理学学科中的重要经典著作之一。正文分成三篇，第一篇为“狭义相对论”，第二篇为“广义相对论”，第三篇为“关于整个宇宙的一些考虑”。每篇中又分成若干小节，以生动的笔调和浅显的事例说明相对论的基本原理。本书可供对相对论感兴趣的一般科技人员及具有高中以上文化水平的青年阅读，对宇宙论研究者也有参考价值。

## RELATIVITY

The Special and The General Theory  
(A Popular Exposition)

Albert Einstein

Methuen & Co. Ltd. London (1955)

## 狭义与广义相对论浅说

杨润殷 译 胡刚复 校

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

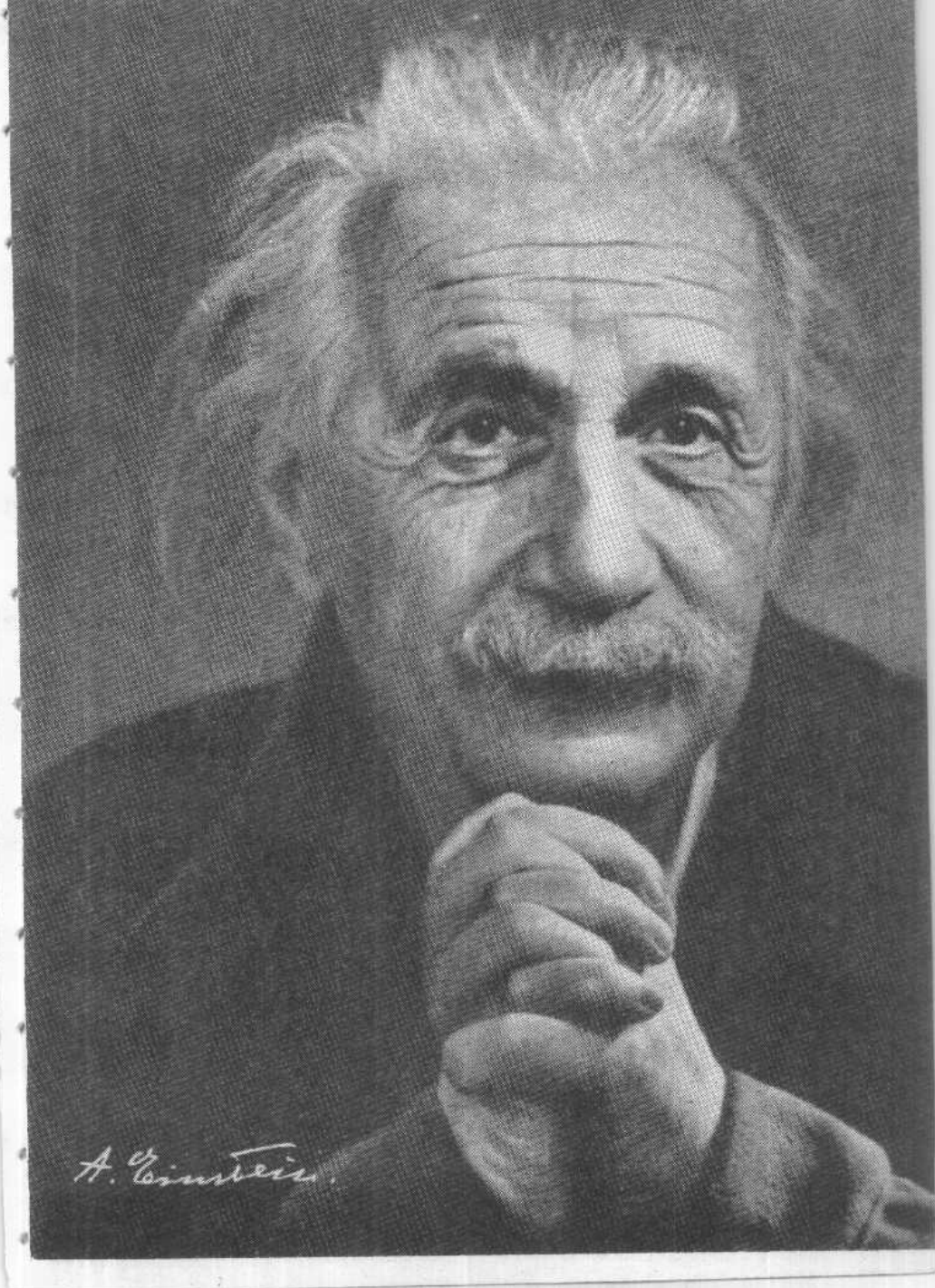
本书由上海发行所发行 上海日历印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 4 插页 1 字数 90,000

1964年8月第1版 1979年4月第3次印刷

印数 25,001—85,000

书号: 13119·563 定价: 0.37 元



## 序

本书的目的，是尽可能使那些从一般科学和哲学的角度对相对论有兴趣而又不熟悉理论物理的数学工具的读者对相对论有一个正确的了解。本书假定读者已具备相当于大学入学考试的知识水平，而且，尽管本书篇幅不长，读者仍须具有相当大的耐心和毅力。作者力求以最简单、最明了的方式来介绍相对论的主要概念，并大体上按照其实际创生的次序和联系来叙述。为了便于明了起见，我感到不能不经常有所重复，而不去考虑文体的优美与否。我严谨地遵照杰出的理论物理学家玻耳兹曼的格言，即形式是否优美的问题应该留给裁缝和鞋匠去考虑。但是我不敢说这样已可为读者解除相对论中固有的难处。另一方面，我在论述相对论的经验性物理基础时，又有意识地采用了“继母”式的做法，以便不熟悉物理的读者不致感到象一个只见树木不见森林的迷路者。但愿本书能为某些读者招致愉快的思考时间。

爱因斯坦 1916 年 12 月

34527

# 目 录

序

第十五版说明

## 第一部分 狭义相对论

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 1. 几何命题的物理意义 .....         | 2  |
| 2. 坐标系 .....               | 5  |
| 3. 经典力学中的空间和时间 .....       | 8  |
| 4. 伽利略坐标系 .....            | 10 |
| 5. 相对性原理(狭义) .....         | 11 |
| 6. 经典力学中所用的速度相加定理 .....    | 14 |
| 7. 光的传播定律与相对性原理的表面抵触 ..... | 15 |
| 8. 物理学的时间观 .....           | 18 |
| 9. 同时性的相对性 .....           | 21 |
| 10. 距离概念的相对性 .....         | 24 |
| 11. 洛伦兹变换 .....            | 26 |
| 12. 量杆和钟在运动时的行为 .....      | 30 |
| 13. 速度相加定理 斐索实验 .....      | 32 |
| 14. 相对论的启发作用 .....         | 35 |
| 15. 狭义相对论的普遍性结果 .....      | 37 |
| 16. 经验和狭义相对论 .....         | 41 |
| 17. 闵可夫斯基四维空间 .....        | 45 |

## 第二部分 广义相对论

|                      |    |
|----------------------|----|
| 18. 狭义和广义相对性原理 ..... | 50 |
|----------------------|----|

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 19. 引力场 .....                         | 53 |
| 20. 惯性质量和引力质量相等是广义相对性公设的一个论据 .....    | 56 |
| 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 ..... | 60 |
| 22. 广义相对性原理的几个推论 .....                | 62 |
| 23. 在转动的参考物体上的钟和量杆的行为 .....           | 65 |
| 24. 欧几里得和非欧几里得连续区域 .....              | 68 |
| 25. 高斯坐标 .....                        | 71 |
| 26. 狭义相对论的时空连续区可以当作欧几里得连续区 .....      | 74 |
| 27. 广义相对论的时空连续区不是欧几里得连续区 .....        | 76 |
| 28. 广义相对性原理的严格表述 .....                | 79 |
| 29. 在广义相对性原理的基础上解引力问题 .....           | 82 |

### 第三部分 关于整个宇宙的一些考虑

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 30. 牛顿理论在宇宙论方面的困难 .....       | 88 |
| 31. 一个“有限”而又“无界”的宇宙的可能性 ..... | 90 |
| 32. 以广义相对论为依据的空间结构 .....      | 95 |

### 附 录

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 一、洛伦兹变换的简单推导 .....      | 97  |
| 二、闵可夫斯基四维空间(“世界”) ..... | 101 |
| 三、广义相对论的实验证实 .....      | 102 |
| (1) 水星近日点的运动 .....      | 103 |
| (2) 光线在引力场中的偏转 .....    | 104 |
| (3) 光谱线的红向移动 .....      | 105 |
| 四、以广义相对论为依据的空间结构 .....  | 108 |
| 五、相对论与空间问题 .....        | 109 |
| (1) 场 .....             | 114 |
| (2) 广义相对论的空间概念 .....    | 118 |
| (3) 广义的引力论 .....        | 121 |

## 第一部分

### 狭义相对论



## 几何命题的物理意义

阅读本书的读者，大多数在做学生的时候就熟悉欧几里得几何学的宏伟大厦。你们或许会以一种敬多于爱的心情记起这座伟大的建筑。在这座建筑的高高的楼梯上，你们曾被认真的教师追迫了不知多少时间。凭着你们过去的经验，谁要是说这门科学中的那怕是最冷僻的命题是不真实的，你们都一定会嗤之以鼻。但是，如果有人这样问你们，“你们说这些命题是真实的，你们究竟是如何理解的呢？”那么你们这种认为理所当然的骄傲态度或许就会马上消失。让我们来考虑一下这个问题。

几何学是从某些象“平面”、“点”和“直线”之类的概念出发的，我们可以有大体上是确定的观念和这些概念相联系；同时，几何学还从一些简单的命题（公理）出发，由于这些观念，我们倾向于把这些简单的命题当作“真理”接受下来。然后，根据我们自己感到不得不认为是正当的一种逻辑推理过程，阐明其余的命题是这些公理的推论，也就是说这些命题已得到证明。于是，只要一个命题是以公认的方法从公理中推导出来的，这个命题就是正确的（就是“真实的”）。这样，各个几何命题是否“真实”的问题就归结为公理是否“真实”的问题。可是人们早就知道，上述最后一个问题不仅是用几何学的方

法无法解答的,而且这个问题本身就是完全没有意义的.我们不能问“过两点只有一直线”是否真实.我们只能说,欧几里得几何学研究的是称之为“直线”的东西,它说明每一直线具有由该直线上的两点来唯一地确定的性质.“真实”这一概念与纯几何学的论点是不相符的,因为“真实”一词我们在习惯上总是指与一个“实在的”客体相当的意思;然而几何学并不涉及其中所包含的观念与经验客体之间的关系,而只是涉及这些观念本身之间的逻辑联系.

不难理解,为什么尽管如此我们还是感到不得不将这些几何命题称为“真理”.几何观念大体上对应于自然界中具有正确形状的客体,而这些客体无疑是产生这些观念的唯一渊源.几何学应避免遵循这一途径,以便能够使其结构获得最大限度的逻辑一致性.例如,通过位于一个在实践上可视为刚性的物体上的两个有记号的位置来查看“距离”的办法,在我们的思想习惯中是根深蒂固的.如果我们适当地选择我们的观察位置,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.

如果,按照我们的思想习惯,我们现在在欧几里得几何学的命题中补充一个这样的命题,即在一个在实践上可视为刚性的物体上的两个点永远对应于同一距离(直线间隔),而与我们可能使该物体的位置发生的任何变化无关,那么,欧几里得几何学的命题就归结为关于各个在实践上可以视为刚性的物体的所有相对位置的命题<sup>①</sup>.作了这样补充的几何学可以看作物理学的一个分支.现在我们就能够合法地提出经过这样解释的几何命题是否“真理”的问题;因为我们有理由问,对于与我们的几何观念相联系的那些实在的东西来说,这些命题是否被满足.用不大精确的措词来表达,上面这句话可以

说成为，我们把此种意义的几何命题的“真实性”理解为这个几何命题对于用圆规和直尺作图的有效性。

当然，以此种意义断定的几何命题的“真实性”，是仅仅以不大完整的经验为基础的。目下，我们暂先认定几何命题的“真实性”。然后我们在后一阶段（在论述广义相对论时）将会看到，这种“真实性”是有限的，那时我们将讨论这种有限性范围的大小。

- 
- 由此推论，一个自然客体也是与一条直线相联系的。一个刚体上的三个点  $A$ 、 $B$  和  $C$ ，如果已经给定  $A$  点和  $C$  点，而  $B$  点的选择已使距离  $AB$  和  $BC$  之和为最小，则这三点位于一直线上。这一不完整的提法对我们目前的讨论是能够满足的。

## 2

### 坐 标 系

根据前已说明的对距离的物理理解，我们也能够用量度的方法确立一刚体上两点间的距离。为此目的，我们需要有一直可用来作为量度标准的一个“距离”(杆  $S$ )。如果  $A$  和  $B$  是一刚体上的两点，我们可以按照几何学的规则作一直线连接该两点；然后以  $A$  为起点，一次一次地记取距离  $S$ ，直到到达  $B$  点为止。所需记取的次数就是距离  $AB$  的数值量度。这是一切长度测量的基础●。

描述一事件发生的地点或一物体在空间中的位置，都是以能够在一刚体(参考物体)上确定该事件或该物体的相重点为根据的。不仅科学描述如此，对于日常生活来说亦如此。如果我来分析一下“北京天安门广场”●这一位置标记，我就得出下列结果。地球是该位置标记所参照的刚体；“北京天安门广场”是地球上已明确规定的一点，已经给它取上了名称，而所考虑的事件则在空间上与该点是相重合的●。

这种标记位置的原始方法只适用于刚体表面上的位置，而且只有在刚体表面上存在着可以相互区分的各个点的情况下才能够使用这种方法。但是我们可以摆脱这两种限制，而不致改变我们的位置标记的本质。譬如有一块白云飘浮在天安门广场上空，这时我们可以在天安门广场上垂直地竖起一

根竿子直抵这块白云，来确定这块白云相对于地球表面的位置。用标准量杆量度这根竿子的长度，结合对这根竿子下端的位置标记，我们就获得了关于这块白云的完整的位置标记。根据这个例子，我们就能够看出位置的概念是如何改进提高的。

(1) 我们设想将确定位置所参照的刚体加以补充，补充后的刚体延伸到我们需要确定其位置的物体。

(2) 在确定物体的位置时，我们使用一个数（在这里是用量杆量出来的竿子长度），而不使用选定的参考点。

(3) 即使未曾把高达云端的竿子竖立起来，我们也可以讲出云的高度。我们从地面上各个地方，用光学的方法对这块云进行观测，并考虑光传播的特性，就能够确定那需要把它升上云端的竿子的长度。

从以上的论述我们看到，如果在描述位置时我们能够使用数值量度，而不必考虑在刚性参考物体上是否存在着标定的位置（具有名称的），那就会比较方便。在物理测量中应用笛卡儿坐标系达到了这个目的。

笛卡儿坐标系包含三个相互垂直的平面，这三个平面与一刚体牢固地连接起来。在一个坐标系中，任何事件发生的地点（主要）由从事件发生的地点向该三个平面所作垂线的长度或坐标 $(x, y, z)$ 来确定。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的操作予以确定。

实际上，构成坐标系的刚性平面一般来说是用不着的；还有，坐标的大小不是用刚杆结构确定的，而是用间接的方法确定的。如果要物理学和天文学所得的结果保持其清楚明确的性质，就必须始终按照上述考虑来寻求位置标示的物理

意义<sup>①</sup>。

由此我们得到如下的结果：事件在空间中的位置的每一种描述都要使用为描述这些事件而必须参照的一个刚体。所得出的关系系以假定欧几里得几何学的定理适用于“距离”为依据；“距离”在物理上一般习惯是以一刚体上的两个标记来表示。

---

① 这里我们假定没有任何剩余的部分，亦即量度的结果是一个整数。我们可以使用一个有分刻度的量杆来克服这一困难，引进这种量杆并不需要对量度的方法作任何根本性的改变。

② 原书举德国地名，英文版举英国地名，为便于我国读者阅读起见，改用我国地名。——译者注

③ “在空间上重合”一语的意义在这里无需进一步深究。这一概念足够明了，对其在实际运用中是否适当，不大会发生意见分歧。

④ 在开始论述广义相对论（将在本书第二部分讨论）之前，还不需要对这些看法加以纯化和修改。

### 3

## 经典力学中的空间和时间

力学的目的在于描述物体在空间中的位置如何随“时间”而改变。如果我未经认真思考、不加详细的解释就来表述上述的力学的目的，我的良心会承担违背力求清楚明确的神圣精神的严重过失。让我们来揭示这些过失。

这里，“位置”和“空间”应如何理解是不清楚的。设一列火车正在匀速地行驶，我站在车厢窗口松手丢下（不是用力投掷）一块石头到路基上。那么，如果不计空气阻力的影响，我看见石头是沿直线落下的。从人行道上观察这一举动的行人则看到石头是沿抛物线落到地面上的。现在我问：石头所经过的各个“位置”是“的确”在一条直线上，还是在一条抛物线上的呢？还有，所谓“在空间中”的运动在这里是什么意思呢？根据前一节的论述，就可以作出十分明白的答案。首先，我们要完全避开“空间”这一模糊的字眼。我们必须老实承认，对于“空间”一词，我们无法构成丝毫概念；因此我们代之以“相对于在实际上可看作刚性的一个参考物体的运动”。关于相对于参考物体（火车车厢或铁路路基）的位置，在前节中已作了详细的规定。如果我们引入“坐标系”这个有利于数学描述的观念来代替“参考物体”，我们就可以说：石块相对于与车厢牢固地连接在一起的坐标系走过了一条直线，但相对于与地

面(路基)牢固地连接在一起的坐标系,则石块走过了一条抛物线.借助于这一实例可以清楚地知道不会有独立存在的轨线(字面意义是“路程——曲线”<sup>①</sup>);而只有相对于特定的参考物体的轨线.

为了对运动作完整的描述,我们必须说明物体如何随时间而改变其位置;亦即对于轨线上的每一个点必须说明该物体在什么时刻位于该点上.这些数据必须补充这样一个关于时间的定义,依靠这个定义,这些时间值可以在本质上看作可观测的量(即测量的结果).如果我们从经典力学的观点出发,我们就能够举出下述方式的实例来满足这个要求.设想有两个构造完全相同的钟;站在车厢窗口的人拿着其中的一个,在人行道上的人拿着另一个.两个观察者各自按照自己所持时钟的每一声滴嗒刻划下的时间来确定石块相对于他自己的参考物体所占据的位置.在这里我们没有计入因光的传播速度的有限性而造成的不准确性.对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.

---

① 即物体沿着运动的曲线.



# 4

## 伽利略坐标系

如所周知,伽利略-牛顿力学的基本定律(称为惯性定律)可以表述如下:一物体在离其他物体足够远时,一直保持静止状态或保持匀速直线运动状态.这个定律不仅谈到了物体的运动,而且指出了不违反力学原理的、可在力学描述中加以应用的参考物体或坐标系.相对于人眼可见的恒星那样的物体,惯性定律无疑是在相当高的近似程度上能够成立的.现在如果我们使用一个与地球牢固地连接在一起的坐标系,那么,相对于这一坐标系,每一颗恒星在一个天文日当中都要描画一个具有莫大的半径的圆,这个结果与惯性定律的陈述是相反的.因此,如果我们要遵循这个定律,我们就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.若一坐标系的运动状态使惯性定律对于该坐标系而言是成立的,该坐标系即称为“伽利略坐标系”.伽利略-牛顿力学诸定律只有对于伽利略坐标系来说才能认为是有效的.