

相 对 论 导 论

张永立 编著

云南人民出版社

责任编辑：林德球

封面设计：傅贵德

相对论导论

张永立 编著

云南人民出版社出版

(昆明市书林街100号)

云南新华印刷二厂印刷 云南省新华书店发行

开本：850×1168 $1/32$ 印张：14 字数：280,000

1980年1月第一版 1980年1月第一次印刷

印数：1—6,000

统一书号：13116·59 定价：1.75元

出 版 说 明

张永立同志生前是云南大学物理系教授，中国物理学会理论物理专业委员会委员，云南省物理协会副理事长。早年留学国外，在著名数学家德·拉·瓦尔·甫山 (De La Vallee Poussion) 和著名物理学家兼天文学家雷美德 (G. E. Lemaitre) 的指导下从事数学和物理研究。一九三九年从比利时回国，历任上海震旦大学、大夏大学、贵州农工学院、贵阳师范学院、贵州大学、云南大学教授。解放后，在党的领导下，张永立教授焕发出革命的青春，把自己的全部精力贡献给了祖国的科学和教育事业。在科研方面，他对宇宙线锥体理论的建立作出过贡献，在分子振动理论、数学、光学等方面也有所建树。在教学上兢兢业业，诲人不倦，培养出许多人材，为祖国的社会主义建设贡献了力量。

爱因斯坦所创建的相对论，是张永立教授的主要研究和教学课题之一。相对论是研究时间、空间和物质运动的理论，它的建立给整个物理学带来了巨大的变革和极为深远的影响，开辟了物理学的新纪元。张永立教授通过对相对论的深入研究，根据科研和教学的需要，写出了《相对论导论》这部书稿，力图用辩证唯物主义和历史唯物主义观点阐述相对论的产生和发展；对相对论

的重要基础实验和基本概念作了较详尽的分析讨论；同时，为了使读者对相对论本身的内容和意义及其对整个物理学的深远影响有更深认识，还适当介绍了相对论所涉及的某些重要物理领域，如相对性量子力学等。书中引入概念和公式比较自然，语言精炼，深入浅出地阐述了这一难度较高的物理理论，使读者易于理解和掌握。

《相对论导论》是张永立教授的最后部著作，在一九六三年到一九六五年曾用于教学中，普遍受到学习者的欢迎。为使这部著作更好地为我国的社会主义现代化服务，现将遗稿整理出版，供省内外读者学习参考。

云南人民出版社编辑部

一九七八年十二月

目 录

上 篇 狭义相对论

第 一 章 狭义相对论的历史背景

§ 1.1 引 言	(1)
§ 1.2 绝对量和相对量的意义	(2)
§ 1.3 绝对时间和绝对空间的分析	(5)
§ 1.4 加速度的绝对性	(7)
§ 1.5 经典力学的相对性原理 伽利略变换	(10)
§ 1.6 力学中的“标准参考系”	(13)
§ 1.7 电动力学中的“标准参考系” “以太”	(15)
§ 1.8 光行差	(18)
§ 1.9 菲琐实验	(20)
§ 1.10 迈克尔孙实验	(23)
§ 1.11 用力学原理解释迈克尔孙实验结果的失败	(27)
§ 1.12 经典力学与电动力学的矛盾	(29)
§ 1.13 狭义相对性原理	(33)

第 二 章 狭义相对论的基础

§ 2.1 同时事件的判别	(35)
§ 2.2 光速不变性与洛伦茨变换	(38)
§ 2.3 时间和空间的相对性	(42)
§ 2.4 长度的收缩	(44)
§ 2.5 时间的膨胀	(46)
§ 2.6 速度的合成	(47)
§ 2.7 菲琐实验的相对论解释	(49)
§ 2.8 加速度的变换	(50)

§ 2.9 敏考士基的四维空间	(51)
§ 2.10 事偶的性质	(53)
§ 2.11 自 时	(55)
§ 2.12 敏考士基几何	(59)
§ 2.13 敏考士基空间的矢量和张量	(64)
§ 2.14 广义速度和广义加速度	(71)
§ 2.15 敏考士基空间的旋转	(74)
§ 2.16 普遍的洛伦茨变换	(77)
§ 2.17 多玛进动	(82)
§ 2.18 广义的洛伦茨变换	(86)

第 三 章 相对性质点动力学

§ 3.1 质量与速度的关系	(90)
§ 3.2 运动方程	(92)
§ 3.3 力的变换	(96)
§ 3.4 质量和能量的联系	(97)
§ 3.5 动量能量四维矢	(101)
§ 3.6 高速电子的弹性碰撞	(104)
§ 3.7 康普登效应	(107)
§ 3.8 阈 能	(109)
§ 3.9 带电粒子在恒定电磁场内的运动	(111)
§ 3.10 运动方程的四维矢形式(附惯性系变换中的热量变换)	(114)
§ 3.11 可变静止质量的质点运动	(120)
§ 3.12 中心力场中的质点运动	(125)
§ 3.13 刻卜勒运动	(128)
§ 3.14 索墨菲的氢原子光谱理论	(129)

第 四 章 相对性连续体力学

§ 4.1 连续方程	(134)
§ 4.2 运动方程(无应力情况) 能量张量	(138)

§ 4.3	应力及其变换式	(144)
§ 4.4	运动方程和连续方程 (应力作用下的连续体)	(147)
§ 4.5	动量密度和密度的变换式	(148)
§ 4.6	运动方程的四维形式	(151)
§ 4.7	有限连续体的质量与动量	(155)
§ 4.8	角矩 直角尺平衡的解释	(160)

第 五 章 电动力学

§ 5.1	惯性系变换中的电磁场变换式	(164)
§ 5.2	电荷不变性	(169)
§ 5.3	电磁场变换式的直接应用	(172)
§ 5.4	电磁四维势矢	(178)
§ 5.5	电磁场方程的张量表示	(182)
§ 5.6	电磁力作用下的物体运动方程	(183)
§ 5.7	电磁能量张量	(186)
§ 5.8	图鲁吞—诺布尔实验	(190)
§ 5.9	电磁波周相的不变性	(197)
§ 5.10	多普勒效应	(200)
§ 5.11	光行差的相对论解释	(204)
§ 5.12	运动中的全反射镜 辐射压强	(206)
§ 5.13	普朗克公式的协变性	(209)
§ 5.14	运动物体的电动力学	(210)
§ 5.15	爱亨瓦里德实验 威尔逊实验	(214)

第 六 章 相对性量子力学和场论

§ 6.1	物质波 薛定格方程	(217)
§ 6.2	戈登—克莱因方程	(224)
§ 6.3	狄拉克方程	(227)
§ 6.4	狄拉克方程的洛伦茨协变性	(231)
§ 6.5	洛伦茨变换的 γ 矩阵表示法	(236)
§ 6.6	场的变分原理	(240)

§ 6.7 场的能量张量	(245)
§ 6.8 角总矩 自旋	(247)

下 篇 广义相对论

第 七 章 广义相对论基础

§ 7.1 广义相对性原理	(251)
§ 7.2 惯性质量和引力质量	(254)
§ 7.3 等效原理	(257)
§ 7.4 引力场中的长度和时间	(260)
§ 7.5 曲面的曲坐标与度规张量	(263)
§ 7.6 高斯几何在四维空间的扩展	(267)
§ 7.7 度规张量的性质	(273)
§ 7.8 度规张量和长度时间的测量	(275)
§ 7.9 测地线	(279)
§ 7.10 经典引力场中运动方程的近似性	(281)
§ 7.11 萨里雅克效应	(283)
§ 7.12 时钟佯谬性	(286)

第 八 章 张量分析

§ 8.1 逆变四维矢和协变四维矢	(297)
§ 8.2 逆变张量和协变张量	(302)
§ 8.3 张量的基本运算	(303)
§ 8.4 张量的判别法 商定则	(306)
§ 8.5 度规张量的逆变形式和协变形式	(307)
§ 8.6 联系张量	(309)
§ 8.7 四维体元 张量密度	(311)
§ 8.8 克利斯托费尔符号	(313)
§ 8.9 测地线坐标系	(316)
§ 8.10 四维矢的协变导数	(318)
§ 8.11 张量的协变导数和逆变导数	(321)

§ 8.12 张量的散度 拉普拉斯量	(325)
§ 8.13 史托克斯定理	(329)
§ 8.14 协变导数的意义 平行移动	(331)
§ 8.15 曲率张量 (黎曼—克利托费尔张量)	(334)
§ 8.16 比扬基恒等式和它的降秩形式	(337)

第 九 章 引力场方程及其应用

§ 9.1 引言	(340)
§ 9.2 曲坐标中的能量张量	(342)
§ 9.3 引力场方程	(344)
§ 9.4 牛顿万有引力定律的近似性	(348)
§ 9.5 弱引力场 引力的有限速度传播	(351)
§ 9.6 引力场的变分原理	(357)
§ 9.7 引力场方程的拉格朗日形式	(361)
§ 9.8 动量和能量的守恒	(366)
§ 9.9 动量密度和能量密度	(371)
§ 9.10 引力波	(375)
§ 9.11 球对称形式的时空弧元	(380)
§ 9.12 席瓦尔西尔德的外部解	(381)
§ 9.13 完全流体内的席瓦尔西尔德内部解	(388)
§ 9.14 引力场中的电动力学方程	(396)
§ 9.15 荷电质点所产生的引力场	(400)
§ 9.16 运动方程	(404)

第 十 章 广义相对论的判别性验证

§ 10.1 中心力场中的质点运动	(410)
§ 10.2 水星近日点的进动	(414)
§ 10.3 光线在引力场中的偏折	(417)
§ 10.4 恒星光谱的红向位移	(420)
§ 10.5 光谱线红向位移在实验室中的验证	(423)

索 引	(428)
-----	-------

上 篇 狭义相对论

第一章 狭义相对论的历史背景

§1.1. 引言

空间和时间是物质存在的客观形式。空间是表征物质客观的广延性的物质存在形式，时间是表征物质过程的持续性和连贯性、反映着物质运动的客观联系的物质存在形式。说得形象化一些，所谓广延性和持续性，就是我国古代所指称的：“四方上下曰宇，往古来今曰宙”^①。

人们对时间空间的认识，也和认识其它的物质客观规律一样，是阶段性地不断进步着的；是由疏略到精密逐步逼近客观真实情况的。在物理学进展的过程中，过去一直认为时空分别独立，不相联系；它们标志出物质运动在何时何地发生，但它们并不受物质运动的影响，是可以脱离物质而独立存在的，即所谓绝对时间和绝对空间。直到狭义相对论出现(1905年)，物理学中才承认时空的不可分割性，即所谓相对时间和相对空间的联系性；只有时空的统一描述，才能正确反映物质运动的规律。广义相对论的出现(1916年)，更进一步体现出时间空间和物质运动的紧密联系；物质质量的大小，直接影响到时空的结构。相对论的发现使人们对时间空间的认识“由表及里”，而成为“抓着了世界的规

① 见淮南子原道训“絃宇宙而章三光”句中高诱的注解。

律性的认识^①”，这是科学史上具有革命意义的重大事件。

相对论对时间和空间的崭新的认识，是具有实际意义的。一个正确的理论必然具有指导实践的作用。广义相对论解决了多年使人们困惑的水星近日点进动的偏差；它预言光线在引力场中受到的弯曲；它预言大星体光谱线的红向位移，都得到实测的证实。狭义相对论推导出物质质量和能量成比例变化的关系，已经成为研究原子能的钥匙；物质的质量随速度变化的关系也成为设计粒子加速器时必须考虑的公式，对实践起到重大的指导作用。但这仅是从直接作用来看。如果我们考虑到任何物质运动都不能脱离时空进行，那么，对时间空间更深刻的认识就必然要求对旧的物理知识完全重新估价，并以它作为基础，开拓新的物理领域（例如量子场论），从而，相对论的指导意义就更为显明了。

相对论的时空关系不是凭人们的臆想制造出来的，它是人们在实践中大量积累的关于物理规律的更概括的总结。因此，在阐述相对论以前，必须对它的实验基础有所叙述。而这些实验，都不是无目的的资料堆集，它们是为了解决牛顿力学和电动力学在时空问题上所出现的矛盾而进行的，也就是为了追求地球的绝对运动而进行的。正是为了解决牛顿力学和电动力学之间的矛盾，解释若干实验结果所表现出的不协调，才导致爱因斯坦（*A. Einstein* 1879—1955年）发现狭义相对性原理。因此，在阐述相对论时，就不能割断历史，对牛顿力学的时空观，对电动力学的坐标变换，以及它们之间所出现的矛盾，就不得不有所叙述。

§ 1.2. 绝对量和相对量的意义

今后，我们将不断提到绝对量和相对量，物理学的严格性要求我们明确定义它们的含义。

① 《毛泽东选集》第268，第269页。

空间和时间是客观存在的，要认识与它们有关的客观规律，必须通过生产实践和科学实验进行测量。随着测量技术精密程度的不同，人们对时空的认识就存在着不同程度的、近似的差别，成为各个不同时期的相对真理。正如列宁所说：“关于空间与时间的人的表象是相对的，可是从这些相对的表象中构成绝对的真理，这些相对的表象在自己的发展中走向绝对的真理，接近绝对的真理”^①。

过去，人们通过当时的测量和日常生活的经验，将空间理解为处处均等、各向同性的三维欧几里德空间（简称三维欧氏空间），并引入坐标系，用来确定物体的位置。例如，在空间任取一点 O 作为原点，通过原点取三条互相垂直的直线 ox, oy, oz ，作为坐标轴，质点 M 的位置就可以由 OM 在三轴上的射影 (x, y, z) 确定，称为点的坐标。这就是笛卡儿坐标系，或直角坐标系（在几何学中，有许多和直角坐标系等效的坐标系，如极坐标、半极坐标等，不赘述）。时间也是均匀的，可以选择任意时刻作为初刻，以未来作为计时的正方向。时间独自、独立地变化着，质点在不同时刻占据不同位置，它的坐标 x, y, z ，就成为时间 t 的函数。这是描述物体运动的方法。

如果仅限于确定物体的位置，上面笼统叙述的坐标选择法总是可行的。在几何空间，随意选择两个坐标系，它们同样起到确定物体位置的目的。一旦牵涉到物理量的测量，问题就不同了。例如，测量水里两个浮标的距离，在行动着的船上和在岸上的人应当测得同样的数值；而在测量汽车的速度时，由于他们各以自己的立足点（船和岸）作为标准，不免要得出不同的结果。

在物理测量中，人们总是先选择一个标准，再来观测其它物

① 列宁：《唯物论与经验批判论》，北京人民出版社1955年版，第163页。

体对标准的相对运动。通常称这个标准为参考系，或参照系，并假定观测者对他所选择的参考系是静止的。观测者可以随意选取固定于参考系的坐标系，以便精确定量，并作为计算系统。原则上，观测者、参考系和坐标系不能混为一谈。但在叙述问题时，常将这三个名词不加区别地使用，以代替“某参考系上固定观测者所使用的坐标系”或“固定于某观测者的参考系”等，而不会导致错误。

测量的数值随观测者运动状态而变的物理量，称为相对量。不论观测者处在什么运动状态，总对它测得同样数值的物理量，称为绝对量。

直观的经验告诉我们，两点间的距离是绝对量。通常说：长度是绝对的。同样，面积和体积也是绝对的。两直线间的夹角也是绝对的。总的说来，几何图形既不随观测者的运动状态而变形，也不因自身的运动而变形。这种不变性构成绝对空间的主要内容。欧几里德几何就是这种空间性质的抽象研究。

根据直观经验的总结，两个事件之间的时间间隔也不随观测者的运动状态而变，它不受任何坐标系变换的影响，这就是绝对时间。

相反地，实测结果的比较，使我们确信速度随观测者的运动状态而变。我们所熟知的“速度矢量合成定律”正是在处理不同观测者所得的不同结果时而总结出的规律。可见，速度是一个相对量；有时也说，速度是相对的。

至于加速度，它是绝对量呢？还是相对量？要答复这个问题，不能单纯从运动学的观点来考虑。作为一个物理量，加速度和力有紧密联系。只有通过力学坐标变换的研讨，才能得出正确结论。

绝对量和相对量的区分是够明确的。可是，人们对某个量是绝对量或是相对量的判别，却是会发展变化的。在爱因斯坦以

前，甚至远在牛顿、伽利略以前，远在欧几里德、淮南子以前，科学上总是将时间和长度当成物理上的绝对量。因为在过去的生产实践和科学实验中，最精密的测量也只能提供这样的结论。直到爱因斯坦，才根据更精密的实测结果[迈克尔孙(Michelson)实验]明确认识到，和我们直观的常识相反，长度和时间间隔也随观测者的运动状态而变，它们也是相对量，而不是绝对量。

§ 1.3. 绝对时间和绝对空间的分析

长度和时间不随参考系的运动状态而变，是绝对空间和绝对时间最基本的内容。表面上，这是最简单的经验总结。可是，进一步分析，就会发觉实际上它还联系着更多的基本假设。

首先注意，所谓长度不随参考系运动状态而变的提法，即令在绝对时空中，也是有条件的。某个物体的长度，或两个事件的空间距离，总是需要通过测量来决定的。例如，要测量停在地上的汽车的长度，无论在车上或在地上，总可以选取一根标准尺，和车身长度作比较（一尺尺地量）。地面的观测者还可以将车头、车尾的位置，在地面上作上标记，待车开后，再测量地面标记的距离。两种测量当然得到同样结果。但要测得行驶着的车身长度，车上的人固然可以设法一尺尺地从车头量到车尾，地面的人就只能在道旁或地面作出车头车尾的标记，再测量标记的距离。显然，如果先标记车头的位置，过一会再作车尾的标记，地上人测得的长度，肯定比车上人测得的数值要短些。如果先标记车尾，后标记车头，地面上测得的长度又会比车上测得的长些。我们当然不承认这样的测量，并且认为测得的数值是错误的。因为要测定运动着的车身的长度，只能对车头车尾同时进行标记。按照郎之万(Langevin)的定义，“物体的形状是它所包含的一切点的同时刻位置的集合”。由此可见，在一个参考系上测量静止物体的长度，固然可以不考虑时间，但牵涉到相互运动的两个

参考系的长度测量时，就必须考虑时间因素。测量运动物体的长度，需要明确同时的概念。

在同一地点，同时的概念比较容易明确。棒槌敲在鼓上，发出声音，这是同时同地发生的两个事件。要在不同地点明确同时的概念，问题就复杂了。在可能的条件下，可以利用构造完全相同的两个计时器，在同一地点 A 进行校准。确证它们的计时功效完全相同以后，将一个留在 A ，另一个移到地点 B ，经过足够长的时间，再将它放回 A 重新比较，如果计时的功效仍旧相同，就可以放心地将两个计时器分别放在 A 、 B 两地，利用它们记录两地所发生的事件，通过记录的对比，就可以确定两地同时发生些什么事件。但这种方法，只能在相当狭小的空间范围内进行。在不能互相传递计时器的两个地方，只能依靠信号的传递（例如用光作为信号）。在一般情况下，信号的传递才是在不同地点比较时间的实用办法。

要在 A 、 B 两地用信号校准时间，可以在 A 地的时刻 t_1 发出信号，信号以传播速度 v 到达 B 时， B 的时刻是 t'_B ；扣除了信号由 A 到 B 的时间 $t' = \frac{AB}{v}$ ，就可以认为 B 地的时间 $t'_B - t'$ 和 A 地的

t_1 同时。但要知道信号在 A 、 B 之间的传输速度，就需要先校准 A 、 B 两地的时间，才能对速度进行测定。这是一个逻辑上的恶性循环，实际上不能用来严格判断两地的时刻是否同时。我们还可以设想，信号到达 B 时，立刻向 A 反射回来。如果 A 接到反射信号的时刻是 t_2 ，就可以认为 A 的时刻 $\frac{t_1 + t_2}{2}$ 和 t'_B 同时。可是，这

只有当信号往返的速度相等时才能成立。要知道往返速度是否相等，仍然先要作速度测量，仍然不能避免上述逻辑上的恶性循环。

如果信号传递不需要时间， B 接到信号和 A 发出信号的時刻，自然就可以无问题地看作同时。事实上，只有假定存在着—

种“超距作用”才能够将一种信号或某种力的作用，以无限大的速度向任何地点传输，才能保证在任意参考系上，无论运动情况如何，都能校准两地发生的事件是否同时。这是绝对的同时。由此可见，在绝对时空中，要严格判断两地所发生的事件是否同时，就离不了超距作用的假设。在牛顿的整套力学理论中，引力场正是以超距作用传播着的。

能明确判断两地所发生的事件是否同时以后，从 A 点先后发两个信号，它们的时间间隔，就是 B 点接到两个信号的时间间隔。于是，在任何坐标系上，都有可能使用一种共同的标准时间，这就是绝对时间。

明确了同时的意义，就可能测量运动着的物体的长度。在所述的例子中，如果地面观测者同时标记车头车尾在地面的位置，他所测得的车身长度，一般认为应当和车上观测者的测量符合。有什么保证能使我们作这样的论断呢？一般相信车身不随运动状况而变形（假定没有颠簸中的振动），测量的直尺在地面参考系和对它运动着的汽车参考系上，既不变形，也不改变长度。这种想法，实质上又假定了绝对刚体的存在。有绝对刚体的假设，才能保证长度的绝对性。

绝对刚体、超距作用、绝对的同时、绝对时间间隔、绝对空间等概念，是互相协调的。假定用一个绝对刚体作成杠杆，施力于杠杆的一端，使它运动，由于绝对刚体不能变形，它端必然同时运动。无论杠杆长到何等程度，一端受力的作用，立刻“同时”传达到它端。这就是超距作用。这些假设互相牵联，互相依赖，构成一个和谐的完整体系。这当中，只要发觉有一个假设不成立，即将导致绝对时空整个体系的全部瓦解。

§ 1.4. 加速度的绝对性

牛顿 (*Sir I. Newton*, 1642—1727) 总结了前人所积累的

有关机械运动的知识，得出著名的牛顿力学三定律，成为经典力学的基础。实践证明，作为反映物质机械运动的客观规律，它是相当成功的。牛顿除了承认长度和时间间隔的不变性而外，还根据当时的经验总结，承认物质质量的不变性。在这样的基础上，可以通过适当的坐标系，将力学定律用数学形式写成运动方程。假定在坐标系 $oxyz$ 上，力学方程是正确的。用 x, y, z 表示某一质点 M 的坐标， t 表示时间， m 表示质点的质量，并用 X, Y, Z 表示作用于质点的力 F 在这个坐标系上的射影，运动方程的形式是：

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = X, \quad m \frac{d^2 y}{dt^2} = Y, \quad m \frac{d^2 z}{dt^2} = Z. \quad (1.4.1) \textcircled{1}$$

我们将证明，存在着这样的坐标系，在它上面，力学方程并不保持(1)的形式。

例如②，另取一个坐标系 $o'x'y'z'$ 。 o' 和 o 重合， $o'z'$ 和 oz 重合， $x'o'y'$ 面以等角速 ω 绕 oz 轴旋转（见图1.1）。这个坐标系上的时间 t' 仍和 t 相等：

$$t' = t. \quad (1.4.2)$$

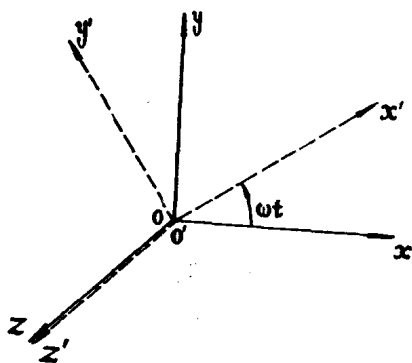


图 1.1

-
- ① 每一公式的编号，采用三个数，第一个数表示章，第二个数表示节，第三个数表示公式。例如 (1.4.6) 表示第一章§4的第6式。引用同一章内的公式时，略去第一数字，在同节内引用公式时，并略去第二个数字。
- ② 普遍性的讨论，可参阅经典力学的若干著作。例如，周培源：《理论力学》，第二章，第九章。