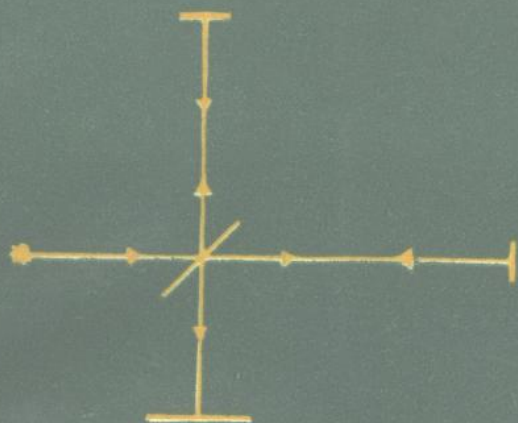




狭义相对论实验基础

张元仲 著

57

科学出版社

狭义相对论实验基础

张元仲 著

科学出版社

1994

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

狭义相对论在近代物理学中已有广泛的应用,是物理学的基础理论之一,它的基本假设和结论有着牢固的实验基础。本书评述了狭义相对论的基本原理和主要内容,并分六个方面综述了实验检验的情况。这六个方面是:光速不变原理、时间膨胀效应、缓慢运动物体的电磁现象、相对论力学、光子静质量上限和托马斯进动。

本书可供物理学工作者以及其他对相对论感兴趣的读者参考。

3P60/2920

狭义相对论实验基础

张元仲 著

*

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

香河县第二印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1979年9月第一版 开本: 850×1168 1/32

1994年8月第三次印刷 印张: 6 5/8

印数: 50 341—52 340 字数: 165 000

ISBN 7-03-004195-X/O · 730

定价: 6.00 元

序

初次学习狭义相对论的人，往往误认为迈克尔逊（Michelson）实验或“光速不变性”是狭义相对论的实验基础。但是，在相对论出现以前，斐兹杰惹（Fitzgerald）和洛伦兹（Lorentz）已经在以太论的基础上对迈克尔逊实验的结果给出了解释。因此，迈克尔逊实验的零结果既可用以太论来解释，也可用相对论来解释，也就是说，它既不否定光速不变，也不肯定光速不变。所以，企图用迈克尔逊类型的实验来进一步更准确地验证光速不变将是没有意义的。事实上，“光速不变原理”是爱因斯坦在那些企图寻找“以太”的实验所显示的否定结果启发下，为了解决电磁现象与经典力学理论之间的矛盾而提出的一个新的科学假设，并进而从这个假设和相对性原理出发建立了狭义相对论。

很显然，“光速不变原理”在它最初被提出时只是一个假设，而不是迈克尔逊实验的结论。但它代表一个划时代的理论思维的飞跃。狭义相对论的真正实验基础，是半个多世纪以来的大量实验事实。这些实验事实只能用相对论来解释和预见。只是在有了这些牢固的实验基础以后，人们才能回过来说光速不变假设和相对性原理是反映客观现实的真理。本书详细分析和介绍了验证狭义相对论的大部分实验的原理和测量结果，从而展示出狭义相对论的真正的实验基础，这是有重要意义的。它使人们得以重温这个理论经过严格的实践检验终于被接受为客观真理的过程，并进一步体会相对论在近代物理学（如量子场论）以及它在工业（如原子能应用）的发展中所处的重要地位。我们认为，只有深刻地认识这些才算是狭义相对论有了真正的认识。

胡 宁

1978 年春

重 印 说 明

借本书重印的机会，我想对几个基本问题作些说明，并对狭义相对论的几种检验理论作些简要的介绍。

1. 坐标系与同时性定义

狭义相对论和经典力学一样，是以惯性定律为基础的，就是说它只适用于惯性系。惯性系就是那些使惯性定律在其中有效的坐标系。惯性定律可以陈述为：不受力的物体将保持静止或作匀速直线运动的状态。但是，何为“匀速”，并未给出严格的定义。因为我们只有对同时性给予明确无误的定义之后，才能描述物体的速度。事实上，“速度”并非直接的测量量，它是空间的距离和时间间隔的比值。我们可以依靠标准尺应用欧几里德几何对空间任意两点间的距离进行测量。空间中每一点的“当地时间”可以用置于该点的标准钟的读数给出。然而这还不够，因为定义速度所需要的时间间隔是位于不同地点（不管这两点相距多么近）的两只时钟的读数之差。所以我们还得事先将这两只时钟调得“同步”，即校准。这就需要不同地点时钟的同时性定义。说是“定义”，是因为我们并没有一种先验的校钟方法。这就是说，每一个惯性坐标系都必须用某种方法将其中各个空间点上放置的相互静止的标准时钟调节成“同步”。经典力学中的“同步”（或说同时性）是瞬时的。狭义相对论用光信号校钟，并假定光速各向同性。因此，狭义相对论中的惯性系定义与经典力学中的惯性系定义之间的唯一差别，在于同时性定义的不同。

2. 理论预言与实验数据的比较

实际上，我们已在§1.2中对这个问题给予了回答。首先，我们知道这样一个事实，即迄今为止，实验室一般都是使用光信号校准时间的，并假定光速为常数 $c \approx 30$ 万公里/秒。这就是说，

文献中给出的两地时钟的读数之差或某物体的速度 v 的数值，都是相对于爱因斯坦同时性定义的。所以，这些数据与狭义相对论的预言进行比较是直接了当的。然而，我们却不能将这些数值直接同经典力学（以及其他检验理论）的预言进行比较，因为经典力学用的是瞬时同时性定义。为了与实验数据进行比较，我们必须使用公式 (1.21) 和 (1.22)（取 $X = X' = 1$ ，相应于 $C_x = C_{x'} \rightarrow \infty$ ，瞬时传播信号）将伽利略变换式 ($x' = x - vt$, $t' = t$) 中的时间 t 和 t' 以及速度 v 转换成可以同实验数据直接进行比较的量： t_0 , t'_0 和 v_0 。转换关系是： $t = t_0 - \frac{x}{c}$, $t' = t'_0 - \frac{x'}{c}$, $v = v_0 / \left(1 - \frac{v_0}{c}\right)$ 。

3. 时间和空间的概念

狭义相对论虽然改变了经典力学中的时空观念的某些绝对性，但并未从根本上变更。从某种意义上说，狭义相对论的时空观也是一种绝对的时空观。首先，惯性系的建立就需要事先有一个空虚的空间和离开物质而独立存在的时间。说得绝对一点就是：如果物质消失了，还会剩下空间和时间作为表演物理事件的一种舞台。当我们考查一个物体在空虚空间中作加速运动时，我们同样会遇到经典力学中的概念问题：惯性运动和加速运动有着严格的区别；加速指的是“对于空间的加速度”，而惯性指的是对加速度的抵抗；这就是说，空间对物质发生作用，而物质对空间没有影响。这也就是牛顿所说的“空间是绝对的”。所以说，狭义相对论中的时间和空间虽然有了某种联系，但仍没有摆脱时空的绝对性（指不受物质影响）。广义相对论对这个问题给出了自己的回答：引力场由时空度规描写，时空度规的源是物质的能量——动量（张量），即物质决定时空；狭义相对论中的闵可夫斯基时空只不过是广义相对论中爱因斯坦场方程的一种特殊的解，或者说它是由物质分布所决定的一种特殊形式的引力场，即系统的最低能态（真空态）。

4. 狭义相对论的检验理论和单向光速的不可观测性

本书的一些章节已经花费了不少笔墨从原理上阐述了单向光

速的不可观测性,通过对检验光速不变原理和同时性定义的各类实验的详细分析而说明了这类实验所检验的不是单向光速而是往返双程平均光速的不变性。理解这一问题的关键是要认识到这样一个事实,即我们并没有先验的同时性定义,而光速的定义又依赖于同时性定义。爱因斯坦从1905年第一篇论文开始,就对这一问题阐述得十分清楚了。后来Edwards的检验理论又进一步论证了这个问题。尽管如此,我们仍不时在各种文章和某些通俗读物上看到“光速各向同性已被实验证实”诸如此类的臆断^[1-5]。其中,最值得一提的是,有些作者最近使用所谓的Mansouri-Sexl检验理论直接同实验数据进行了比较,进而给出了所谓的单向光速各向不同性的某种上限^[6]。因此,仔细分析这类检验理论是十分必要的。为此,我最近在台湾中央大学访问期间,同Nester教授进行了讨论,并总结成一篇文章投给了美国的《物理评论》杂志^[9]。由于篇幅的关系,在此无法详细讨论这一问题,只对其主要结果简述如下。

狭义相对论的检验理论有三类:Edwards变换(1963年)^[6], Robertson变换(1949)^[7],以及Mansouri-Sexl变换(1977年)^[8]。同洛伦兹变换相比较,Edwards变换只多了一个方向性参数 $X(X')$,我们已在§1.2作了详细说明。Robertson变换中的参数可以用三个新参数 $(\bar{C}_{||}, \bar{C}_{\perp}, d)$ 代替,其中参数 $\bar{C}_{||}$ 和 $\bar{C}_{\perp}$ 分别代表光信号平行于和垂直于两惯性系相对运动方向的往返平均速度。Mansouri-Sexl(以下简称MS)变换比Robertson变换也是只多一个方向性参数 $X(X')$ 。所以我们可以知道:在洛伦兹变换中单向光速为各向同性;在Edwards检验理论中单向光速可变(由 X 和 X' 的非零值表征),而平均往返光速不变($\bar{C}_{||} = \bar{C}_{\perp} = C$);在Robertson检验理论中, $\bar{C}_{||} \neq \bar{C}_{\perp} \neq C$ 且单向光速等于平光速;在MS检验理论中, $\bar{C}_{||} \neq \bar{C}_{\perp} \neq C$ 且单向光速不等于平光速而与方向性参数 X 有关。所以,MS变换对Robertson变换的推广恰如Edwards变换对洛伦兹变换的推广。当把这些变换与物理实验进行比较时,必须考虑到检验理论中的同时性定义与实

验室通常使用的爱因斯坦同时性定义不同, 这种不同已在 § 1.2 中用公式 (1.21) 和 (1.22) 表达了出来。因此, 与实验数据的正确比较 (犹如在 § 1.2 中所做的那样) 会使我们看到, 方向性参数 X 不会在任何物理预言中出现。所以, MS 变换在物理上不比 Robertson 变换多任何东西, 恰如 Edwards 变换在物理上不比洛伦兹变换多任何东西一样。Robertson 变换 (也就是 MS 变换) 所能检验的是 $\bar{C}_{//}$ 与 $\bar{C}_{\perp}$ 的差别, 也就是双程平均光速的方向性 (因为任意方向上的双程平均光速可以表达成 $\bar{C}_{//}$ 和 $\bar{C}_{\perp}$ 的函数)。

关于单向光速的方向性问题, 我们再补充几句。如果我们在自然界中发现大于光速的新信号存在, 我们就可以在原则上用新信号校准时钟, 从而对单向光速的方向性作出判断。但是, 新信号的单向速度的方向性却成了一个不可观测的问题。除非我们发现瞬时传播的信号, 否则, 用于校准时钟的那种 (速度最快的) 信号的单向速度的问题总是一个无法检验的问题。

参考文献

- [1] H. Aspden, *Phys. Lett.* 92A, 165 (1982) .
- [2] Y. Z. Zhang, *Phys. Lett.* 95A, 225 (1983) .
- [3] D. W. MacArthur, *Phys. Rev.*A33, 1 (1986) .
- [4] M. P. Haugan and C. M. Will, *Phys. Today* 40, 69 (1987) .
- [5] C. M. Will, *Phys. Rev.* D45, 403 (1992) .
- [6] W. F. Edwards, *Am. J. Phys.* 31, 482 (1963) .
- [7] H. P. Robertson, *Rev. Mod. Phys.* 21, 378 (1949) .
- [8] R. Mansouri and R. U. Sexl, *Gen. Relativ. Gravit.* 8, 497(1977) ; 8, 515 (1977) ; 8, 809 (1977) .
- [9] Y. Z. Zhang and J. M. Nester, "On Test Theories of Special Relativity", 中科院理论物理所 预印本: AS-ITP-93-50; 已投 *Phys. Rev. D*.

作者 1993年10月

前 言

从1905年爱因斯坦提出狭义相对论到今天已经七十多年了。随着科学的发展,这个理论已在许多领域得到了应用,成了近代物理学的主要基础之一。另一方面,为了检验这个理论的基本假设和各种相对论效应,人们反复不断地采用各种新的实验方法和测量技术进行了观察,为这个理论提供了丰富的实验证据。许多实验的测量精度都是很高的,但也有一些方面精度较低。今后,人们将会继续采取各种可能的方法,来更为精确地检验各种相对论效应。我们的主要目的是想从理论的角度(因而我们将不注意具体的实验技术和测量细节)总结和分析检验狭义相对论的几种主要实验类型的原理和测量结果,以展示实验在哪些方面、通过什么样的方式对狭义相对论进行过检验,和检验到什么程度。我们认为,这样的一本书是有意义的。

本书先介绍狭义相对论的基本内容和主要结论,然后分别总结和分析如下几种类型的实验原理和观察结果:狭义相对性原理、光速不变原理、时间膨胀效应、缓慢运动物体的电磁现象、相对论力学和光子静质量上限。我们所依据和参考的是1976年以前的有关文献,这些文献我们将在书末列出。

在本书编写过程中承胡宁、何祚庥、戴元本、王祝翔、郭汉英诸同志以及邹振隆同志给予不少帮助,提出不少宝贵意见,并承胡宁同志写序,在此表示衷心感谢。

作 者

1977年10月

再 版 前 言

在第一版前言中我们已指出，本书的主要目的是想从理论角度(因而我们将不注意具体的实验技术和测量细节)总结和分析检验狭义相对论的几种主要实验类型的原理和测量结果，以展示实验在哪些方面、通过什么样的方式对狭义相对论进行过检验，和检验到什么程度。因此，在这一版中，我们保留了第一版的全部内容，只改正了其中的一些印刷错误。此外，增加了一章介绍托马斯进动，因为它是狭义相对论的一种比较重要的运动学效应，而且轻子的($g-2$)因子实验精度也非常高。为此，我们把托马斯进动的推导、应用以及与实验的比较做了较详细的总结，这对读者可能是有用的。

作 者

1981 年 12 月

目 录

序	i
前言	vi
再版前言	vii
第一章 狭义相对论基础	1
§ 1.1 爱因斯坦狭义相对论	1
1.1.1 狭义相对论的主要内容	4
(一) 无穷小洛伦兹变换	6
(二) 爱因斯坦速度相加定律	7
(三) 长度收缩	8
(四) 时间膨胀(延缓)	8
(五) 多普勒频移效应	9
(六) 相对论力学	10
(七) 光子的静质量	11
1.1.2 狭义相对论实验的主要类型	12
§ 1.2 回路光速不变的狭义相对论	14
第二章 光速不变原理实验	22
§ 2.1 光速不变性实验	23
2.1.1 闭合光路实验	24
(一) 迈克尔逊-莫雷型实验	24
(二) 回路干涉仪实验	28
(三) Kennedy-Thorndike 实验	30
2.1.2 “单向”光路实验	30
(一) 两梅塞实验	31
(二) 转动圆盘的穆斯堡尔效应实验	31
(三) 两莱塞实验	32
§ 2.2 运动光源实验	34
2.2.1 天体光源和实验室宏观光源	34
(一) 天文学证据	34

(二) 干涉仪实验	37
(三) 其他实验	40
2.2.2 运动介质实验	40
(一) 运动的反射镜实验	40
(二) 运动的透明介质片	42
2.2.3 高速微观粒子的 γ 辐射	46
§ 2.3 小结	55
第三章 时间膨胀效应	59
§ 3.1 原子钟的环球航行实验	61
§ 3.2 多普勒频移效应	65
3.2.1 氢的极隧射线实验	68
3.2.2 原子核俘获反应中的 γ 射线发射	72
3.2.3 穆斯堡尔效应实验	74
(一) 穆斯堡尔效应对温度的依赖性	75
(二) 横向二阶多普勒移动	77
3.2.4 运动原子对激光的饱和吸收效应	80
§ 3.3 飞行介子的寿命增长	80
3.3.1 宇宙线中的 μ 介子	82
3.3.2 测量宇宙线 μ 介子寿命	82
3.3.3 测量加速器产生的介子的寿命	83
§ 3.4 小结	85
第四章 缓慢运动物体的电磁现象	90
§ 4.1 运动介质电动力学(麦克斯韦-闵柯夫斯基电磁理论)	91
4.1.1 场方程、场量变换和组成关系	92
4.1.2 电磁波在运动介质中的传播	95
4.1.3 折射和反射	97
§ 4.2 运动物体的电磁感应实验	99
4.2.1 单极感应	99
4.2.2 运动电介质的磁效应	101
4.2.3 威尔逊-威尔逊实验	103
§ 4.3 菲涅耳牵引效应	105

4.3.1	斐索实验和塞曼实验	107
4.3.2	横向“牵引”实验	113
4.3.3	环路莱塞实验	115
§ 4.4	光在平面镜上的反射实验	120
§ 4.5	小结	121
第五章	相对论力学实验	124
§ 5.1	质量对速度的依赖关系	126
5.1.1	带电粒子的磁偏转	127
5.1.2	静电磁偏转法	129
5.1.3	回旋加速器的运转	135
5.1.4	其他实验	136
5.1.5	测量飞行时间	138
5.1.6	弹性碰撞	139
5.1.7	原子光谱的精细结构	142
5.1.8	小结	143
§ 5.2	质能关系	144
第六章	光子静质量上限	152
§ 6.1	真空光速的色散效应	154
6.1.1	光速的测定	156
6.1.2	星光到达地球的时间差	157
§ 6.2	对库仑定律的检验	159
§ 6.3	静磁场方法	165
6.3.1	薛定谔外来场方法	166
6.3.2	地磁场随高度的变化	170
6.3.3	偏心偶极子(“垂直电流”效应)	171
§ 6.4	星际等离子体(磁流体力学)效应	172
6.4.1	磁流体力学波	173
6.4.2	星际磁场的耗散效应	176
6.4.3	星际等离子体的不稳定性问题	180
§ 6.5	其他方法	181
§ 6.6	小结	183

第七章 托马斯进动	185
§ 7.1 两个相继的洛伦兹变换(托马斯进动).....	186
§ 7.2 原子光谱的精细结构.....	190
§ 7.3 电子的 g 因子实验.....	192

第一章 狭义相对论基础

§1.1 爱因斯坦狭义相对论

经典力学以惯性定律为基础。惯性定律可以陈述为：任何物体在不受其他物体的作用时，将保持静止或作匀速直线运动的状态。我们知道，说一个物体是静止的或是运动的，都是相对于其他物体（参考物体或坐标系）而言的。惯性定律的上述陈述并不是对任何坐标系都适用，而只是对那些称之为“惯性系”的坐标系才有效。或者反过来说，惯性定律成立的那些坐标系叫做“惯性系”。相对于一个惯性系作匀速直线运动的坐标系也是惯性系。在经典力学中，联系任意两个惯性系之间的坐标变换是伽利略变换：

$$x' = x - vt,$$

$$t' = t.$$

借助于伽利略变换，我们可以把力学中的相对性原理陈述如下：一切力学定律在伽利略变换下保持形式不变。或者说，如果物体在某一惯性系中遵循某种力学规律，那么它在一切惯性系中也都遵循同样的力学规律。在以上述惯性定律和伽利略相对性原理为基础的经典力学中，空间和时间是绝对的、相互分离的：物体的大小与惯性参考系无关；时间的流逝不因惯性运动而改变；不同地点的同时性是绝对不变的，即对于发生在不同地点的两个事件，如果在一个惯性系中看来是同时发生的，那么在其他任何惯性系中看来也都是同时发生的。

十九世纪，随着对电磁现象的深入研究，出现了不少与经典力学相抵触的情况。首先，运动物体的电磁感应现象（例如一个磁体和一个导体之间的电动力的相互作用现象）表现出运动的相对性——是磁体运动，还是导体运动，其效果一样。但是，当把麦克

斯韦电动力学应用到运动物体上时就要引起不对称性；其次，把伽利略变换应用于真空中的麦克斯韦电磁场方程时，我们可以发现它不再是协变的了，即电磁现象不满足相对性原理；第三，寻找“以太”的实验给出的是负的结果。我们知道，“以太”的概念首先是在力学中引入的。在力学里，曾经有两种力的概念存在，一种是接触力（如碰撞、压力或拉力等等），另一种是超距作用力（如重力）。但是，如果我们试图以完备的因果关系来概括关于物体的经验时，似乎除了由直接接触所产生的那些作用之外不应有别的作用。按照这样的观念，人们曾试图以接触作用力来解释牛顿的超距作用力，即认为超距作用力实际上是靠充满空间的媒质来传递的，传递方式或是靠这种媒质的运动，或是靠它的弹性形变。这样，便提出了以太假说。当人们深入研究电磁现象时，为了把电磁现象纳入统一的力学图象，发展了“光以太”假说。根据这种观点，以太是电磁作用传播的媒质，电和磁是以太的应力和应变，电磁波（或光）是以太的波动（机械振动）。为了寻找光以太相对于地球的运动，迈克尔逊（Michelson）和莫雷（Morley）用干涉仪做了实验观察。但是得到的结果是否定的；第四，实验发现，电子的惯性质量随电子运动速度的增加而加大，这种现象是与经典力学的质量概念矛盾的。

1905年，爱因斯坦在前人，特别是洛伦兹和彭加勒（Poincaré）工作的基础上，分析了经典力学与电磁实验之间的矛盾，提出了一些崭新的物理观念。第一，他抛弃了“以太”，认为“电磁场不是媒质的状态，而是独立的实体，正象有重物质的原子那样，不能归结为任何别的东西，也不能依附在任何载体之上。”第二，他把力学中的伽利略相对性原理进行了推广，使之包括电动力学和光学现象，提出了“狭义相对性原理”。第三，最重要的，也是与经典力学有本质区别的概念就是关于同时性的定义。在经典力学中隐含着绝对同时性的假定。在实践中如何实现绝对同时性呢？如果设想有一种瞬时传播的（传播速度为无限大的）信号存在，那么我们就可以借助于这种信号传递信息（校钟）来确定远处发生的事件的真实时刻，但是，在自然界中人们从来没有找到这样的信号。爱因斯坦仔

细分析了同时性问题,指出“如果要描写一个质点的运动,我们就要给出它的坐标值的时间函数。这里我们必须记住,这样的数学描述只有在我们十分清楚‘时间’指的是什么之后才有物理意义。”如果只涉及某一地点的“时间”,那么用位于该地点的一只表来定义就足够了。“但是如果要把发生在不同地点的一系列事件在时间上联系起来,或者说——其结果依然一样——要定出那些在远离这只表的地点所发生的事件的时间,那么这个定义就不够了”。例如,在空间的 A 点放一只钟就可定义 A 点处发生的事件的时间;在空间的 B 点也放一只同样结构的钟,就可定义 B 点处发生的事件的时间,这样我们就定义了“ A 时间”和“ B 时间”。但是,如果我们不进一步定义 A 和 B 的公共“时间”(即不同地点的同时性),就不可能把 A 处的事件同 B 处的事件在时间上进行比较。然而,当我们通过定义光从 A 到 B 所需要的“时间”等于它从 B 到 A 所需要的“时间”的时候, A 和 B 的公共“时间”也就定义了。这样,爱因斯坦提出了光速不变的假设,并且在狭义相对性原理和光速不变原理的基础上建立了狭义相对论,突破了牛顿的绝对时空观,确立了崭新的时空观念。这个理论解释了经典物理理论所不能解释的各种电磁现象;对麦克斯韦电磁场方程给出了形式上的澄清,特别是对电场和磁场本质上是同一的东西的理解;导致了不同地点同时性的相对性(在某一惯性系中发生在不同地点的同时事件,在其他惯性系中看来不再是同时发生的了);预言了长度收缩、时钟变慢效应;给出了质量随速度变化的公式和质量-能量关系式。从形式上看,狭义相对论的成就可以表征为:它一般地指出了普适常数 c (真空中的光速)在自然定律中所起的作用,并且表明了时间和空间坐标在自然定律中存在一种密切的联系。长期以来,狭义相对论已获得了广泛的应用,成了近代物理学理论的重要基础之一。下面我们先简单介绍一下狭义相对论的基本内容,然后分别说明检验这些内容的几种主要实验类型。为了明显起见,我们采用三维形式而不采用闵柯夫斯基(Minkowski)四维几何学。