

现代物理基础丛书

19

狭义相对论

(第二版)

刘辽 费保俊 张允中 编著



科学出版社

www.sciencep.com

现代物理基础丛书 19

狭义相对论

(第二版)

刘 辽 费保俊 张允中 编著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在 1987 年初版基础上作了全面修订和扩充,较系统地叙述了狭义相对论的基本内容.全书共分 6 章,分别讨论狭义相对论的产生背景,狭义相对论的基本原理和时空观,四维闵可夫斯基时空几何及其四维张量,电动力学的相对论形式,相对论质点运动学、质点动力学和连续介质力学以及相对论的拉格朗日和哈密顿表述,并附有颇具争议的“时间机器”简介和狭义相对论发展简史.

本书可作为高等学校理工科本科生、研究生以及有关科技工作者和教师的参考用书.

图书在版编目(CIP)数据

狭义相对论/刘辽,费保俊,张允中编著.—2 版.—北京:科学出版社,2008

(现代物理基础丛书;19)

ISBN 978-7-03-022615-0

I. 狭 II. ①刘…②费…③张… III. 狭义相对论 IV. O412.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 113308 号

责任编辑:胡 凯 刘凤娟/责任校对:陈玉凤

责任印制:赵德静/封面设计:王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 7 月第 二 版 开本: B5 (720×1000)

2008 年 7 月第一次印刷 印张: 13

印数: 1—3 000 字数: 236 000

定价: 42.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新蕾〉)

第二版序

第一版“序”仍在，然“序”的作者张允中教授和初版审校者冯麟保教授均已不幸离世，而我本人亦已年近耄耋，垂垂老矣。我的学生费保俊教授有意助我汰旧纳新出一个新版，感谢黄超光研究员对新版提出的修改意见，在陆埏院士、李惕碚院士和科学出版社的大力支持和协助下，本书第二版才得以问世。

刘 辽

2007年12月

第一版序

刘辽先生是我国知名的物理学教授，在相对论方面的造诣颇深。一九八三年五月，我有幸参加在南京师范学院举办的“相对论讨论会”。刘先生在会上讲学，并印发了一份《狭义相对论》讲义。我也把我写的有关狭义相对论的文章拿给刘先生审阅。在讨论中我们深切感到，由我国自己培养的物理学工作者，在相对论领域著书立说，对于发展我国的基础理论研究工作，是十分必要的。共同的理想和信念，促使我们愉快合作，当即商定以刘先生的讲义为基础，编写一本《狭义相对论》。我们定下的宗旨是要有自己的特色：第一，深入浅出，简明扼要。第二，把概念讲透，特别在相对论的历史背景、洛伦兹变换的意义以及相对论时空观方面，作重点论述。第三，把研究方法交代清楚，因而有必要利用张量作为工具，来展开相对论电学和相对论力学的主要内容。至于本书的实际内容是否体现了这一宗旨，尚有待读者检验。

书稿几经修改与补充，在去年完稿以后刘先生即赴美做研究工作，这篇序言就只好由我独自捉刀了。在这里，我们由衷地感谢冯麟保教授，他仔细地审阅了书稿，提出了许多极为有益的意见和建议。另外，本书难免还有错误或不妥之处，敬请同行赐教。

张允中

1986年5月

引 言

在当代,“相对论”已经是一个家喻户晓的名词了.如果我们问相对论的基本精神是什么?不少人大概会这样回答:一根棒的长短和一座钟的快慢是相对的,不同运动状态的观测者,测量同一根棒的长度和同一座钟的快慢是不同的,这就是相对论.

然而,我们要着重指出,虽然相对论确实告诉我们棒的长短和钟的快慢是相对的,但是相对论的基本精神却是认为一切真实的物理规律应当具有绝对性,或者说一切真实的物理规律不应当因为观测者采用了不同运动状态的参照系而有所不同.用数学术语来说,相对论断言:一切真实的物理规律在一定种类的时空坐标变换下,其数学形式应当不变,亦即具有某种协变性.

为了测定物体在空间的位置以及它的大小,必须采用一根标准尺来度量,标准尺可以是任意约定的刚体.为了测定物体运动所经历时间的久暂,必须采用一坐标准钟来度量,标准钟可以是任意约定的物体的运动或变化.为了方便起见,一般都采用周期运动.上述物理度量若用数学语言来表述,就是采用一定的空间坐标和时间坐标来对物体的位置、大小、运动和变化来进行描述.

经典物理学认为空间和时间是独立无关的.相对论否定了这种直觉的经验观念.1908年闵可夫斯基把空间和时间构成的四维集合叫做“世界”,后人遂把四维时空叫做闵可夫斯基时空.

时空坐标系是参考系的数学表示.原则上,任何物体均可以用作参考系.不过宇宙中的物体受到多种作用,它的机械运动是十分复杂的.有时在一段时间内,它受到的各种作用极微弱,以至于认为它是自由的.这种自由质点的机械运动是最简单的,它做惯性运动.用自由质点做参照物所建立的时空坐标系就是惯性系.原则上说,自由质点是无限多的,而且它们之间也没有相互作用.所以宇宙中可能的惯性系是无限多的,它们之间互相作惯性运动.站在某一惯性系上观测,另外的惯性系(或者自由质点)做匀速直线运动.

显然,惯性系是一种理想的坐标系,因为物质间至少存在着引力作用.只有当某一质点离开其他物体非常遥远时,它才有资格充当惯性系.这样一来,惯性原理实在含有循环论证的漏洞.因为确定质点是否很孤立,需要观测它是否做惯性运动;而是否做惯性运动又以它是否很孤立为前提.说到底,惯性系是个定义问题.不过深入讨论惯性系的意义不是我们的任务.在这里只指出,在局部范围和一段时间内,惯性系的确是具有实际意义的最简单的时空坐标系.

惯性运动在时空图上的世界线是直线。在四维时空中做直线运动的质点群，构成一群互相等价的惯性系群。在狭义相对论中，就采用惯性坐标系，它们之间的时空坐标变换就是洛伦兹变换。在广义相对论中，采用任意参照物，它们之间的变换是广义坐标变换。

以电磁现象为例。我们知道，地球带着我们的实验室在其公转轨道上以每小时约十万七千公里（大约九十倍声速）的巨大速度运动着。地球在夏季和冬季的运动方向恰好相反，可以近似看作处在相互做匀速直线运动的两个惯性系中。假如电磁规律因观测者所在的惯性系不同而异，我们又怎么可能发现经受住实践考验的电磁规律——麦克斯韦方程组呢？

由此可见，任何一个物理学规律之所以能被人类发现，或者说它配称为规律，正是由于它在某种时空坐标变换下具有某种不变性，亦即具有绝对性。可以这样说，没有不变性就没有物理现象的规律性。相对论就是研究物理规律在某种时空坐标变换下的不变性或协变性的学科。

爱因斯坦和英费尔德在《物理学的进化》一书中谈到：“相对论的兴起……是由于旧理论中严重的深刻的矛盾已经无法避免了。”相对论并不是某个人或者某几个天才学者的自由创造。大家知道，从光的波动理论建立初期开始到1905年为止，物理学家对“以太”探寻了将近两个世纪之久。正是在许多物理学家长期工作的基础之上，伟大的物理学家爱因斯坦才最终创立了相对论。

在1905年以前，经典电动力学有两个重要问题尚未解决。第一个问题是，电磁波究竟只是某种弹性介质的运动形式呢？抑或它本身就是某种运动实体？以太论者认为电磁波应该是名为“以太”的某种弹性介质的运动形式。从1678年开始的对以太的探寻是导致发现狭义相对论的原因之一。第二个问题是，麦克斯韦电动力学规律在不同惯性系中是否同样成立？就是说尽管物理现象具有相对性，物理规律是否应当具有绝对性？对于这个问题的探索是导致发现狭义相对论的原因之一。

最容易被人们接受的常识往往并不一定是真理，而真理又往往离开常识较远，相对论就是这样的。为了使读者容易接受，我们先迁就常识，看看遵循常识所能接受的牛顿力学究竟能够走到多远。我们最终会发现牛顿时空观和牛顿力学的破绽，而唯一的出路就是接受相对论。

狭义相对论和量子论是20世纪初物理学理论基础的两大革命。前者大大改变了我们的时空观，而后者则使我们开始认识到物质的微观结构。从20世纪20年代末开始，狭义相对论和量子论相结合又产生了相对论量子力学和量子场论。迄今为止，它们一直是我们探寻微观世界物理规律的强有力工具。

目 录

第 1 章 经典时空观及其危机	1
1 经典物理的时空观	1
1.1 伽利略变换	1
1.2 伽利略相对性原理	3
1.3 以太假说	5
2 几个重要的经典实验	6
2.1 霍克实验	7
2.2 斐佐实验	8
2.3 迈克耳孙-莫雷实验	9
2.4 特鲁顿-诺伯尔实验	10
3 经典时空观的危机	12
3.1 洛伦兹的收缩理论	12
3.2 里兹的发射理论	14
3.3 庞加莱对相对论的贡献	14
第 2 章 狭义相对论时空观	16
4 狭义相对论的基本原理	16
5 洛伦兹变换	18
5.1 洛伦兹时空变换	18
5.2 洛伦兹速度变换	20
5.3 洛伦兹变换群	22
6 同时的相对性	24
7 空间距离的相对性	27
8 时间间隔的相对性	30
9 因果律和光速极值原理	34
9.1 事件的时间序列性	34
9.2 因果律和光速极值原理	35
9.3 关于光速极限原理的说明	37
第 3 章 四维闵可夫斯基时空	42
10 闵可夫斯基几何	42
10.1 闵可夫斯基时空结构	42
10.2 闵氏时空的长度和角度度量	44
10.3 类时世界线长度与固有时间	46

10.4	闵氏时空中的洛伦兹变换	48
11	相对论时空观的几何表示	49
11.1	同时的相对性	49
11.2	长度收缩和时间延缓	50
11.3	例: 时钟佯谬	51
11.4	例: 长度收缩佯谬	53
11.5	例: 双生子佯谬	54
12	欧氏空间的张量分析	56
12.1	欧氏度规和线元	56
12.2	欧氏空间的转动变换	57
12.3	三维张量及其变换	61
12.4	三维张量的运算规则	64
12.5	例: 连续介质和电磁场的应力张量	67
13	闵氏时空的张量分析	69
13.1	闵氏度规和线元——时空间隔	69
13.2	闵氏时空的转动变换——洛伦兹变换	70
13.3	四维张量及其变换	72
13.4	四维张量的运算规则	74
第4章	电动力学的相对论形式	78
14	电磁场方程的协变性	78
14.1	麦克斯韦电磁场方程	78
14.2	场方程的四维电磁势表示	79
14.3	场方程的电磁场张量表示	80
14.4	介质中场方程的电磁场张量表示	82
15	电磁场的洛伦兹变换	85
15.1	电磁势和场强的洛伦兹变换	85
15.2	电场和磁场的相互关系	87
15.3	运动电荷产生的电磁场	89
16	电磁场的运动方程	92
16.1	电磁场动量定理和能量定理	92
16.2	四维运动方程和电磁场能动张量	94
16.3	电磁场能动张量的洛伦兹变换	96
第5章	相对论力学	98
17	相对论质点运动学	98
17.1	瞬时惯性系与固有量	98
17.2	四维位移和四维速度	99
17.3	四维加速度和加速度变换	100

17.4	固有洛伦兹变换	102
17.5	托马斯进动	106
18	相对论质点运动方程	108
18.1	四维力和力的变换	108
18.2	相对论质点运动方程	110
18.3	电磁场中的质点运动方程	111
19	相对论质量、动量和能量	114
19.1	相对论质量和质速关系	114
19.2	相对论能量和质能关系	115
19.3	能量动量矢量及其变换	118
19.4	质点系能量动量守恒律	120
20	光子的能量动量及其效应	122
20.1	四维波矢量和相位不变性	122
20.2	多普勒效应	123
20.3	光行差效应	125
20.4	高速运动物体的视像问题	127
21	微观粒子的能量动量及其守恒律	129
21.1	微观粒子的德布罗意波	129
21.2	能量动量守恒律的矢量解法	130
21.3	例:康普顿散射和逆康普顿散射	132
22	相对论连续介质力学	134
22.1	连续介质的连续性方程	134
22.2	四维运动方程和能动张量	135
22.3	理想流体的运动方程和能动张量	137
22.4	荷电理想流体的运动方程和能动张量	139
第6章	相对论的拉格朗日表述	141
23	运动方程的拉格朗日表述	141
23.1	变分原理和哈密顿原理	141
23.2	拉格朗日和哈密顿正则方程	144
23.3	质点运动方程的拉格朗日表述	146
24	场方程的拉格朗日表述	148
24.1	哈密顿原理的场量形式	148
24.2	拉格朗日和哈密顿正则方程的场量形式	150
24.3	电磁场方程的拉格朗日表述	151
25	时空对称性与守恒律	154
25.1	对称变换和对称性	154
25.2	对称性与守恒律——诺特定理	157

25.3 闵氏时空的对称性与守恒律	160
25.4 电磁场能动张量及守恒律	162
附录 A 固有洛伦兹变换的严格推导	164
附录 B 关于“时间机器”	171
附录 C 狭义相对论大事记	175
参考文献	181
索引	186

绝对的、真正的数学的时间，由其特性决定，自身均匀地流逝，与一切外界事物无关……绝对空间：其自身特性与一切外界事物无关，处处均匀，永不移动。

——牛顿《自然哲学的数学原理》

第 1 章 经典时空观及其危机

1 经典物理的时空观

时间和空间是物质的基本属性，也是认识论中最根本的概念之一。如果我们仔细分析一下这两个概念就会发现，时间概念来自事物运动变化的顺序性；空间概念则来自物质实体的广延性。显然，没有物质的存在，就不会有抽象的位置排列、运动 and 变化，时间和空间两个概念也就失去它们存在的前提了。

可是 20 世纪以前的经典物理学(牛顿力学)却认为时间和空间与运动着的物质没有任何联系，它们是先验地存在于人的意识之中的。只是在建立了相对论以后，人们才认识到时间和空间与运动着的物质密切相关。

经典时空观首先由牛顿明确提出，牛顿在他的名著《自然哲学的数学原理》一书中，对绝对时间和绝对空间作了明确的表述(见本章“题记”)，因此又叫做牛顿时空观。所谓绝对，是指时间和空间与观测者的运动状态无关。实际上，绝对时空观是人们在低速状态下的经验总结。例如我国唐代大诗人李白的著名诗句：“夫天地者，万物之逆旅；光阴者，百代之过客”，就是对绝对空间和绝对时间的形象比喻。

1.1 伽利略变换

以自由质点为参照物所定义的惯性坐标系，仅仅要求时间和空间构成四维连续域，并没有先验地认定时间和空间是否存在着联系。以经典时空观为前提，亦即认为时间空间独立无关，反映不同惯性系之间变换关系的公式，是所谓伽利略变换。

如图 1.1 所示，设 S 和 S' 是两个惯性坐标系，取 x 和 x' 轴沿两者的相对速度 v 方向，而且在开始时，两坐标系的原点重合。每个坐标系中均备有完全相同的标准尺和完全同步的标准钟。又设开始时，两个标准钟均校准为零。牛

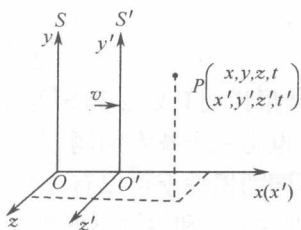


图 1.1 惯性系 S 和 S' 的坐标设置

顿力学告诉我们, 上述两个时空坐标系之间应当存在如下的变换关系:

$$\begin{cases} x' = x - ut, \\ y' = y, \\ z' = z, \\ t' = t. \end{cases} \quad (1.1)$$

这就是著名的伽利略变换. 由此可得伽利略速度变换:

$$\begin{cases} u'_x = u_x - v, \\ u'_y = u_y, \\ u'_z = u_z. \end{cases} \quad (1.2)$$

或者写成矢量形式:

$$\mathbf{u}' = \mathbf{u} - \mathbf{v}. \quad (1.2')$$

式中

$$\mathbf{u}' = \frac{d\mathbf{x}'}{dt'}, \quad \mathbf{u} = \frac{d\mathbf{x}}{dt},$$

分别表示粒子在 S' 和 S 中的速度, 不同于惯性系的相对速度 $\mathbf{v}$.

伽利略变换虽然通俗易懂, 却包含着深邃的物理含义.

首先, 从(1.1)式的最后一个等式立即得到

$$\Delta t' = \Delta t = t_2 - t_1. \quad (1.3)$$

这个结果说明只要预先把 S 和 S' 系中的两个标准钟调整同步, 并且保证机件不失灵的话(这只是一个技术问题, 原则上总是可以办到的), 那么牛顿力学以及我们的常识都确信: 不同的惯性系可以有一个共同的时间度量标准, 时钟的快慢或时间过程的久暂, 与惯性系的选择无关, 也和被研究的物体的匀速运动状态无关. 对于一个非惯性系来说, 在任意一个无限小时间内, 都可以看成是一个特定速度 $\mathbf{v}(t)$ 的惯性系. 那么, 上述结果意味着, 时间和空间坐标系的任意选择或者和物体的运动状态无关, 时间是绝对的.

再看空间的度量. 设在 x 轴上有两点, 它们在 S 系中的坐标是 x_1 和 x_2 , 在 S' 系中的坐标是 x'_1 和 x'_2 . 根据(1.1)和(1.3)式

$$x'_1 = x_1 - ut_1, \quad x'_2 = x_2 - ut_2,$$

相减得

$$\Delta x' = \Delta x, \quad \Delta t' = \Delta t = 0. \quad (1.4)$$

这个结果说明只要 S 和 S' 系中的标准尺完全相同, 并且保证不受外界条件影响的话(这也是一个技术问题, 原则上总可以办到), 那么牛顿力学和我们的常识确信: 不同的惯性系可以有一个共同的空间度量标准, 标准尺的长度或者物体所占据空间的大小, 和惯性系的选择无关, 也和物体的匀速运动状态无关. 基于同样的考虑, 长度的度量和坐标系的任意选择无关, 也和物体的任意运动无关, 因而空

间也是绝对的.

绝对的时间、空间和伽利略变换是水乳交融的. 由绝对时空观得到的伽利略变换式, 反过来也可以看作绝对时间、空间的定义. 也就是说, 伽利略变换是绝对时空观的数学表述.

1.2 伽利略相对性原理

大家知道, 经典力学仅在惯性系中才成立.

地面坐标系对于地面上大多数力学现象而言, 可以近似地看做是“不错”的惯性系(忽略惯性离心力和科里奥利力效应的话), 但是对于天文现象来说, 它就是一个很“糟糕”的惯性系了. 哥白尼的伟大贡献就在于他指明了在描绘天体运动方面, 日心坐标系才是一个比较好的惯性系. 事实上, 太阳也以大约每秒钟二百五十公里的巨大速度绕银河系中心公转. 天文学上往往认为与全体恒星的平均位置相对静止的坐标系才是较理想的惯性系. 但是严格说来, 恒星之间也有相对运动. 20 世纪以前的物理学家于是假定宇宙间存在一个“绝对静止的原始惯性系”, 牛顿力学对于它才是绝对正确的.

但是牛顿力学毕竟是居住在地球上的人类发现的. 我们自然要问, 何以处在相对于原始惯性系以如此巨大速度运动着的地球上, 竟能发现牛顿定律呢?

1632 年伽利略首先通过实验观察指出, 相对于原始惯性系做匀速直线运动的任一坐标系(即惯性系), 力学规律是完全相同的. 这就是伽利略相对性原理或力学相对性原理. 更明确地说, 在伽利略变换下, 牛顿运动定律的形式不变.

设在 S 系中牛顿运动定律的形式为

$$\mathbf{F} = m \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2},$$

由伽利略速度变换(1.2)式可以得出加速度不变:

$$\frac{d^2 \mathbf{x}'}{dt'^2} = \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2}. \quad (1.5)$$

至于质量 m , 则可用同一个弹簧来度量, 设弹簧的弹性系数为 k , 伸长为 Δx , 此弹性力使待测质量的物体产生加速度. 若测得加速度大小为 a , 则物体的质量为

$$m = \frac{F}{a} = \frac{k\Delta x}{a},$$

这样一来, 质量的度量就化为加速度和长度的度量, 由(1.4)和(1.5)式可知长度和加速度与惯性系无关, 那么质量就是不变量了, 即 $m' = m$. 于是得到

$$m' \frac{d^2 \mathbf{x}'}{dt'^2} = m \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2}. \quad (1.6)$$

可见在 S' 系中牛顿运动定律具有和 S 系完全相同的形式.

我们约定, 如果某一物理规律在伽利略变换下形式不变(协变性), 就说此物

理规律遵从伽利略相对性原理. 正是由于力学现象服从伽利略相对性原理, 以及对于某些力学现象而言, 地球可以近似地认为是惯性系, 才使得我们有可能在地球上发现牛顿力学规律.

总之, 我们分析了 20 世纪以前的力学, 可以得到如下两条结论:

- (1) 牛顿力学的时空观是绝对时空观;
- (2) 牛顿力学服从伽利略相对性原理.

在 20 世纪以前, 物理学家们已经意识到任何一个真实的物理理论都应当满足一个必要条件, 这就是在一切惯性系中, 该理论所描述的自然规律的数学形式应当完全相同. 通常我们把满足这种要求的理论叫做服从相对性原理. 由于力学的成功以及囿于经验, 人们往往想当然地认为满足伽利略不变性和服从相对性原理是等同的. 其实两者是有区别的. 相对性原理是对各种物理定律的总的要求, 它体现着自然理论的客观性和普适性. 至于规律的不变性则依赖于具体的时空坐标变换; 不同的时空坐标结构, 满足相对性原理的具体变换形式亦不同. 只有爱因斯坦敏锐地揭示了两者的区别.

既然 20 世纪以前的物理学家把伽利略不变性和相对性原理等同起来, 因而认为牛顿力学是符合相对性原理的. 人们自然要问: 麦克斯韦的电磁理论也符合相对性原理吗? 经典物理学家对于这个问题的回答是去考察它是否满足伽利略不变性.

设在 S 系真空中的电磁现象服从麦克斯韦电动力学. 我们知道, 电磁矢势 $\mathbf{A}$ 和标势 φ 表示的真空电磁场方程为

$$\begin{cases} \nabla^2 \mathbf{A} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = 0, \\ \nabla^2 \varphi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0. \end{cases}$$

这是一组波动方程, 表明电磁波在真空中的传播速度为

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.997\,924\,85 \times 10^8 \text{ m/s}, \quad (1.7)$$

式中 ϵ_0 和 μ_0 是由实验决定的真空电容率和磁导率, 均为常值.

由伽利略速度变换(1.2)式, 得 S' 系的真空中光速应该是

$$c' = c - v. \quad (1.8)$$

可见在 S' 系中, 光速 c' 不再由 ϵ_0 和 μ_0 所决定. 这说明在 S' 系中电磁现象不再服从麦氏电动力学. 20 世纪以前的经典物理学认为伽利略变换以及由它导出的经典速度变换是不容怀疑的. 因此他们把麦氏电动力学在伽利略变换下并非形式不变看成是麦氏电动力学不符合相对性原理的有力证据.

这样一来, 似乎麦氏电动力学便没有绝对性了: 它仅在某一特殊惯性系中才

成立. 换句话说, 只有在某一特殊惯性系中, 真空中的光速才是 c . 那么, 这个特殊惯性系是什么呢? 于是人们不得不求助于以太假说.

1.3 以太假说

以太的观念是在古希腊形成的, 当时人们想像空间弥漫着某种介质, 称作“以太”, 相当于我国古代元气说中的“气”. 真正明确赋予以太物理意义的是法国数学和物理学家笛卡儿. 在 17 世纪, 笛卡儿为了否定牛顿力学的超距作用, 认为物体间的相互作用(例如万有引力)是通过以太这种介质传播的. 但是, 用他提出的以太观念解释物理现象时, 暴露出许多矛盾, 不能自圆其说, 并且牛顿力学在各个领域获得了巨大成功, 以太假说没有被人们接受.

直到 19 世纪, 人们一致认为光是由极小的微粒组成的, 即牛顿的微粒说. 随着对电磁现象的深入研究, 又提出了光的波动说. 菲涅尔在 1918 年用光的波动说解释光行差现象时, 再次引入了以太的观念. 当时人们认为和所有机械波一样, 光波的传播也需要有介质——就是所谓的光以太, 当赫兹证明光是电磁波后, 光以太和电磁以太就统一起来了. 光波需要借助于以太传播, 在绝对静止以太中真空的光速等于 c . 若在以太中浸入某个相对于以太绝对静止的介质, 则在其中光速等于 c/n (n 是介质的折射率). 于是绝对静止的以太就充当了特殊惯性系的角色.

实际上, 地球上的测量仪器总是处于地球的大气层介质之内, 所以在测量光速以便探索以太的存在之前, 必须首先回答相对于绝对静止以太运动的介质中的光速是多少, 这就牵涉运动介质和以太之间的关系. 在 19 世纪曾经提出过三种假说(实际上也就是三种可能), 即

- (a) 介质完全不拖动以太说;
- (b) 介质完全拖动以太说(斯托克斯, 1845);
- (c) 介质部分拖动以太说(菲涅尔, 1818).

详细讨论如下:

在图 1.2 中, S 代表绝对静止的以太, S' 代表以速度 v 相对于 S 运动的介质, 斜线代表被拖动的以太.

图 1.2(a) 表示介质完全不拖动以太, 以太永远静止. 前面已经说过, 当介质相对于以太静止时, 光在其中的速度是 c/n , 故在 S 中静止介质中的光速是

$$c_s = \frac{c}{n}, \quad (1.9)$$

今介质相对于以太的速度是 v , 由(1.8)式知光在 S' 系中的速度是

$$c'_s = \frac{c}{n} - v. \quad (1.10)$$

图 1.2(b) 表示介质完全拖动以太. 在 S' 系中以太和介质相对静止, 光在 S' 系

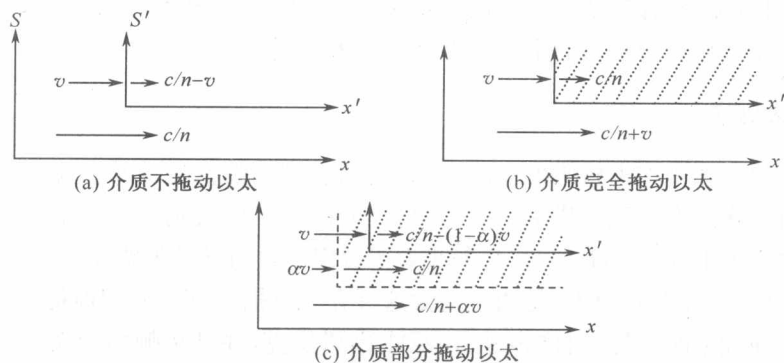


图 1.2 三种以太假说示意图

中的速度是

$$c'_S = \frac{c}{n}, \quad (1.11)$$

在 S 系中的速度则是

$$c_S = \frac{c}{n} + v. \quad (1.12)$$

图 1.2(c) 表示以太被运动介质部分拖动, 相对于 S 的速度为 αv ($0 < \alpha < 1$), α 叫做拖曳系数. 因光在运动介质的速度等于 c/n , 故光在 S 系中的速度是

$$c_S = \frac{c}{n} + \alpha v, \quad (1.13)$$

在 S' 系中的速度则是

$$c'_S = \frac{c}{n} + \alpha v - v = \frac{c}{n} - (1 - \alpha)v. \quad (1.14)$$

究竟哪一种说法正确或者都不正确, 唯有通过实验来加以检验.

2 几个重要的经典实验

如果宇宙中真的布满了绝对静止的以太, 那么地球就相当于在以太海中航行. 我们略去地球的自转, 只计公转速度(前者只及后者的百分之一), 打算通过地面实验来判定地面介质究竟是完全拖动、还是完全不拖动、抑或部分地拖动以太. 证实了任意一种学说, 无疑也就证实了以太的存在.

实验可以分为两类: 第一类是一阶效应实验, 其结果与 v/c 的一次方成正比, 例如霍克实验和斐佐实验. 第二类是二阶效应实验, 其结果与 v/c 的二次方成正比, 例如迈克耳孙-莫雷实验和特鲁顿-诺伯尔实验. 下面分别介绍这四个实验.