

SCHAUM'S
ouTlines

全美经典 学习指导系列

近代物理学

(原第二版)

[美] R. 戈特罗 W. 萨万 著

孙宗扬 译

486余道详细解答的习题

各种优秀教材的辅导材料

理想的考前复习资料

涵盖夸克与超导等内容



科学出版社

麦格劳-希尔教育出版集团

内 容 简 介

作为一本优秀的近代物理学辅导读物,本书的第一版曾被译成4种文字出版,受到读者的欢迎。

本书共分6部分24章,涵盖了狭义相对论、电磁辐射和物质的量子理论、氢原子、多电子原子、核物理以及原子系统等方面的内容。一些章节还反映了基本粒子和超导领域的主要进展。全书的每章开头都简要介绍了相关的原理、概念等,然后给出了大量的例题,这些例题有助于读者掌握相关的理论和解题技巧。本书是各种近代物理学教程的补充。

读者为对物理知识要求较高的相关专业的本科生。

Ronald Gantreau, William Savin; Schaum's Outline of Theory and Problems of Modern Physics, Second Edition

ISBN:0-07-024830-3

Copyright © 1999 by the McGraw-Hill Companies, Inc.

Authorized translation from the English language edition published by McGraw-Hill Companies, Inc.

All rights reserved.

本书中文简体字版由科学出版社和美国麦格劳-希尔教育出版集团合作出版。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

图字:01-2001-1758号

图书在版编目(CIP)数据

近代物理学/(美)戈特罗,萨万著;孙宗扬译.一北京:科学出版社,2002
(全美经典学习指导系列)

ISBN 7-03-009790-4

I. 近… II. ①戈… ②萨… ③孙… III. 物理学 IV. O41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 070190 号

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002年2月第一版 开本:A4(890×1240)

2002年2月第一次印刷 印张:15 3/4

印数:1—4 000 字数:447 000

定价:24.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

序 言

近代物理包含了大致是 20 世纪所确立的课题. 这些课题激动人心, 有爱因斯坦狭义相对论所指出的时间效应, 或者实际一些, 基于固体能带理论的各种半导体元件.

本书的范围可以从目录上看出, 每一章都先简单扼要地讲述原理, 随之给出大批有详细解答的例题, 它们自然地阐述了主题并且说明了原理. 作者希望这些例题对学习会有裨益. 解答比较扼要, 点出关键之处, 从易到难排列. 后面还有未加解答的补充习题, 但有答案, 它可帮助读者检查自己对资料理解的程度.

读者需要读过标准的普通物理导论, 本书主要与二年级或三年级水平相衔接, 其中还有一些前沿性质的问题. 本书可以当作是近代物理教程的补充, 对于学习近代物理来说, 本书是全面的并且是完备的.

我们特别感谢 David Beckwith, 他对第一版做了细致的编辑工作, 并且对清样做了改进. 书中的错误由作者自己负责, 并且祈望得到指正. 最后, 感谢我们的家庭在本书的长期准备中所给予的关怀.

R. 戈特罗

W. 萨 万

新泽西理工学院

目 录

第 I 部分 狭义相对论

第 1 章 伽利略变换	(1)
1.1 事件和坐标	(1)
1.2 伽利略坐标变换	(1)
1.3 伽利略速度变换	(1)
1.4 伽利略加速度变换	(2)
1.5 方程的不变性	(2)
第 2 章 爱因斯坦假说	(6)
2.1 绝对空间和以太	(6)
2.2 迈克耳孙-莫雷实验	(6)
2.3 长度和时间的测量——原理性问题	(6)
2.4 爱因斯坦假定	(6)
第 3 章 洛伦兹坐标变换	(10)
3.1 光速的不变性	(10)
3.2 在求解包含洛伦兹变换在内的问题的一般考虑	(10)
3.3 同时性	(11)
第 4 章 相对论长度收缩	(14)
4.1 长度定义	(14)
第 5 章 相对论时间延长	(16)
5.1 原时	(16)
5.2 时间延长	(16)
第 6 章 相对论时-空测量	(19)
第 7 章 相对论速度变换	(26)
7.1 洛伦兹速度变换和光速	(26)
7.2 在求解速度问题时的一般考虑	(26)
7.3 相对论多普勒效应	(26)
第 8 章 相对论中的质量、能量和动量	(32)
8.1 重新定义经典动量的需要	(32)
8.2 质量随速度的变化	(32)
8.3 在相对论中的牛顿第二定律	(32)
8.4 质量和能量关系: $E = mc^2$	(32)
8.5 动量和能量关系	(33)
8.6 能量和动量的单位	(33)
8.7 在求解质量-能量问题中的一般考虑	(33)

第 II 部分 电磁辐射和物质的量子理论

第 9 章 电磁辐射——光子	(41)
9.1 光子理论	(41)
9.2 光电效应	(41)
9.3 康普顿效应	(42)
9.4 对产生和对湮没	(43)

9.5 光子的吸收	(44)
第 10 章 物质波	(57)
10.1 德布罗意波	(57)
10.2 德布罗意假设的实验验证	(57)
10.3 德布罗意波的概率解释	(58)
10.4 海森伯测不准原理	(59)

第Ⅲ部分 类氢原子

第 11 章 玻尔原子	(72)
11.1 氢光谱	(72)
11.2 氢原子的玻尔理论	(72)
11.3 玻尔理论中辐射的放出	(73)
11.4 能级图	(73)
11.5 类氢原子	(74)
第 12 章 电子轨道运动	(82)
12.1 经典观念的轨道角动量	(82)
12.2 经典磁偶极矩	(82)
12.3 在外磁场中磁偶极矩的经典能量	(83)
12.4 塞曼实验	(83)
12.5 轨道动量矩大小的量子化	(83)
12.6 轨道角动量方向的量子化	(83)
12.7 塞曼效应的解释	(84)
第 13 章 电子自旋	(88)
13.1 斯特恩-盖拉赫实验	(88)
13.2 电子自旋	(88)
13.3 自旋-轨道耦合	(89)
13.4 精细结构	(89)
13.5 总角动量(矢量模型)	(91)

第Ⅳ部分 多电子原子

第 14 章 泡利不相容原理	(94)
14.1 多于 1 个电子的量子力学系统	(94)
14.2 泡利不相容原理	(94)
14.3 在一维箱子中的单个质点	(94)
14.4 在一维箱子中的多个质点	(95)
第 15 章 多电子原子和周期表	(98)
15.1 原子中电子组态的光谱标记	(98)
15.2 周期表和原子壳层模型	(98)
15.3 原子态的光谱标记	(99)
15.4 原子激发态和 LS 耦合	(99)
15.5 反常塞曼效应	(100)
第 16 章 X 射线	(110)
16.1 X 射线装置	(110)
16.2 韧致辐射的产生	(110)
16.3 X 射线特征谱线的产生	(111)

16.4	莫塞莱关系	(112)
16.5	X 射线吸收边	(112)
16.6	俄歇效应	(113)
16.7	X 射线荧光	(113)

第 V 部分 核物理

第 17 章	核的性质	(120)
17.1	核子	(120)
17.2	核力	(120)
17.3	氘	(120)
17.4	核	(121)
17.5	当作一个球的核	(121)
17.6	核结合能	(122)
第 18 章	核模型	(126)
18.1	液滴模型	(126)
18.2	壳层模型	(127)
第 19 章	不稳定核的衰变	(136)
19.1	核衰变	(136)
19.2	统计辐射衰变规律	(136)
19.3	γ 衰变	(136)
19.4	α 衰变	(137)
19.5	β 衰变和中微子	(137)
第 20 章	核反应	(147)
20.1	标记	(147)
20.2	核反应的分类	(147)
20.3	实验室系和质心系	(148)
20.4	核反应的能量学说	(149)
20.5	核截面	(149)
20.6	核裂变	(149)
20.7	核聚变	(150)
第 21 章	粒子物理	(159)
21.1	粒子谱系	(159)
21.2	粒子相互作用	(160)
21.3	守恒律	(160)
21.4	轻子守恒	(161)
21.5	重子守恒	(161)
21.6	奇异性守恒	(161)
21.7	同位旋和宇称守恒	(161)
21.8	短寿命粒子和共振态	(162)
21.9	八重方式	(162)
21.10	夸克	(163)

第 VI 部分 原子系统

第 22 章	分子	(173)
22.1	分子键	(173)

22.2 双原子分子的激发	(174)
第 23 章 气体运动论	(184)
23.1 气体中的平均值	(184)
23.2 理想气体定律	(184)
第 24 章 分布函数	(190)
24.1 离散分布函数	(190)
24.2 连续分布函数	(192)
24.3 基本分布函数和态密度	(192)
第 25 章 经典统计:麦克斯韦-玻尔兹曼分布	(197)
第 26 章 量子统计:费米-狄拉克和玻色-爱因斯坦分布	(205)
26.1 费米-狄拉克统计	(205)
26.2 玻色-爱因斯坦统计	(205)
26.3 高温极限	(205)
26.4 两个有用的积分	(206)
26.5 黑体辐射	(206)
26.6 金属的自由电子理论	(208)
26.7 晶体的比热	(212)
26.8 量子力学理想气体	(215)
26.9 量子分布函数的推导	(218)
第 27 章 固体	(221)
27.1 固体的能带理论	(221)
27.2 超导电性	(228)
附 录	(232)
在常用单位下的某些基本常数	(232)
一些常用单位换算关系	(232)
某些粒子的质量	(232)
中性原子质量	(232)
译者后记	(242)

第 I 部分 狭义相对论

第 1 章 伽利略变换

1.1 事件和坐标

我们开始考虑物理事件的概念. 这个事件可以是闪电击中一棵树或者两个粒子的碰撞, 它在某一时刻发生在某一空间点. 观察者对一个事件指定了四个坐标: 三个位置坐标 x, y, z , 它表征与观察者所在处的坐标原点的距离和时间坐标 t , 它是用观察者自己的钟记录的.

考虑两个观察者, O 及 O' , O' 相对于 O 以常速 v 沿着它们共同的 $x-x'$ 轴移动 (图 1-1), 两个观察者各有自己的米尺及钟来确定事件的坐标. 另外, 两个观察者已校准了他们的钟, 当它们在 $x = x' = 0$ 处相遇时, 各自的钟读数是 $t = t' = 0$. 任何一个事件有 8 个数字, 其中四坐标 (x, y, z, t) 由 O 观察到, 而由 O' 观察到的 (代表同样事件的) 四坐标是 (x', y', z', t') .

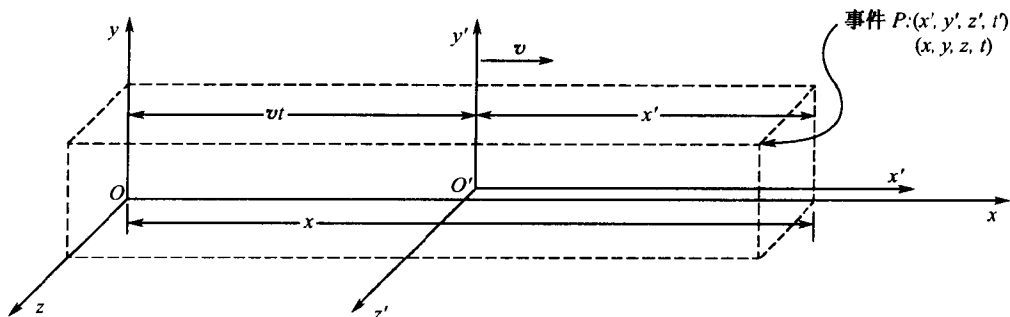


图 1-1

1.2 伽利略坐标变换

对于同一事件在 O 的测量 (x, y, z, t) 和 O' 的测量 (x', y', z', t') 之间有关系

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z$$

另外, 在经典物理中还暗含着假定

$$t' = t$$

这四个方程称为伽利略坐标变换.

1.3 伽利略速度变换

除了坐标之外, 对质点的速度也有兴趣. 观察者 O 及 O' 都将以三个分量描述质点的速度, O 测到的速度分量是 (u_x, u_y, u_z) 而 O' 测到的速度分量是 (u'_x, u'_y, u'_z)

(u_x, u_y, u_z) 和 (u'_x, u'_y, u'_z) 之间的关系由伽利略变换对时间微分得到. 于是, 从 $x' = x - vt$,

$$u'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{d}{dt}(x - vt) = u_x - v$$

归结在一起,伽利略速度变换是

$$u'_x = u_x - v, \quad u'_y = u_y, \quad u'_z = u_z$$

1.4 伽利略加速度变换

质点的加速度是它的速度的时间导数,即 $a_x = du_x/dt$ 等. 为了找到伽利略加速度变换,我们微分速度变换并且利用事实 $t' = t$ 和 $v = \text{常数}$, 得到

$$a'_x = a_x, \quad a'_y = a_y, \quad a'_z = a_z$$

于是对于以常值相对速度运动的各观察者来说,所测得的加速度分量是相同的.

1.5 方程的不变性

方程的不变性是指由两个观察者所确定的方程具有同样的形式. 在经典理论中,假定两个观察者的空间和时间测量是由伽利略变换联系起来的. 于是,由一个观察者确定了方程的一个形式,将伽利略变换用到这个形式上可得到由另外观察者所确定的形式. 如果两个形式相同,这些方程在伽利略变换下不变. 看问题 1.11 和 1.12.

例题详解

- 1.1 火车乘客以 30m/s 在 $t = t' = 0$ 时与站在站台上的人相遇. 在相遇之后 20 s, 站台上的人观察到一只鸟沿着同方向的车行轨道飞行了 800 m. 由乘客确定的这只鸟的坐标?

解 由站台上的人所确定的鸟的坐标是

$$(x, y, z, t) = (800 \text{ m}, 0, 0, 20\text{s})$$

由乘客测得的鸟的距离是

$$x' = x - vt = 800 \text{ m} - (30 \text{ m/s})(20\text{s}) = 200\text{m}$$

因此由乘客确定的鸟坐标是

$$(x', y', z', t') = (200 \text{ m}, 0, 0, 20\text{s})$$

- 1.2 参见题 1.1. 站台上的人在第一次测量之后 5 s, 发现鸟已飞到 850 m 处. 由这些数据求出鸟的速度(设为常速), 对于站台上的人和对于车中的乘客说来分别是多少?

解 站台上的人测到的鸟在第二个位置的坐标是

$$(x_2, y_2, z_2, t_2) = (850 \text{ m}, 0, 0, 25 \text{ s})$$

而由站台上的人所测到的鸟的速度 u_x 是

$$u_x = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{850 \text{ m} - 800 \text{ m}}{25 \text{ s} - 20\text{s}} = +10 \text{ m/s}$$

这里正号表示鸟沿正 x 方向飞行. 乘客找到的鸟的第二个位置 x'_2 是

$$x'_2 = x_2 - vt_2 = 850 \text{ m} - (30 \text{ m/s})(25 \text{ s}) = 100 \text{ m}$$

于是 $(x'_2, y'_2, z'_2, t'_2) = (100 \text{ m}, 0, 0, 25 \text{ s})$, 而由车中乘客测得的鸟的速度 u'_x 是

$$u'_x = \frac{x'_2 - x'_1}{t'_2 - t'_1} = \frac{100 \text{ m} - 200 \text{ m}}{25 \text{ s} - 20 \text{ s}} = -20 \text{ m/s}$$

所以乘客测量到鸟沿负 x' 方向飞行. 这个结果与从伽利略速度变换所得的一致

$$u'_x = u_x - v = 10 \text{ m/s} - 30 \text{ m/s} = -20 \text{ m/s}$$

- 1.3 实验室中静置着一个放射性物质样品, 它放出两个方向相反的电子. 由实验室人员测得一个电子的速率为 $0.6c$, 另一个速率为 $0.7c$. 按照经典速度变换, 一个电子相对于另一个电子的速率是多少?

解 设观察者 O 静止在实验室中, 观察 O' 与以 $0.6c$ 运动的电子相对静止(设运动方向为正).

于是从伽利略速度变换,

$$u'_x = u_x - v = -0.7c - 0.6c = -1.3c$$

这个结果说明,按照伽利略变换,速度大于光速是可能的,这个结论与狭义相对论抵触.

- 1.4 火车以 60 mi/h(译者按:mi/h 即英里/小时)速度在 12:00 通过一车站.20 s 以后,在铁路的延伸方向上距车站一英里处,一个闪电留下一个击痕.由站台上的观察者及火车上的技师观察到的闪电的坐标分别是多少?

解 两个人所观察到的坐标是

$$t' = t = (20 \text{ s}) \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) = \frac{1}{180} \text{ h}$$

在车站上的观察者看到的空间坐标是 $x = 1 \text{ mi}$. 火车上技师确定的空间坐标是

$$x' = x - vt = 1 \text{ mi} - 60 \text{ mi/h} \left(\frac{1}{180} \text{ h} \right) = \frac{2}{3} \text{ mi}$$

- 1.5 地面上射手在东北方向射出一颗子弹,击中离射手 0.25 英里远的一只鹿.子弹以 1800 mi/h 速率穿行.在子弹击发瞬间,一架飞机以高 $h = 1 \text{ mi}$ 的姿态并且以 600 mi/h 的速率向东运动.当子弹击中鹿时,由飞机上观察者看到的坐标是什么?

解 $t' = t = \frac{0.25 \text{ mi}}{1800 \text{ mi/h}} = 1.39 \times 10^{-4} \text{ h}$

$$x' = x - vt = (0.25 \text{ mi}) \cos 45^\circ - (600 \text{ mi/h}) \cdot (1.39 \times 10^{-4} \text{ h}) = 0.094 \text{ mi}$$

$$y' = y = (0.25 \text{ mi}) \sin 45^\circ = 0.177 \text{ mi}$$

$$z' = z - h = 0 - 1 \text{ mi} = -1 \text{ mi}$$

- 1.6 在地面上静止的观察者看到下述碰撞.一个质量 $m_1 = 3 \text{ kg}$ 以速度 $u_1 = 4 \text{ m/s}$ 沿 x 轴正向运动的质点与一个质量 $m_2 = 1 \text{ kg}$ 以速度 $u_2 = -3 \text{ m/s}$ 沿 x 轴运动的质点相遇.在迎头碰撞之后,地面上的人观察到 m_2 的速度为 $u_2^* = -3 \text{ m/s}$,沿 x 轴运动.求出碰撞后 m_1 的速率 $u_1^* = ?$

解 初始动量 = 终了动量

$$(3 \text{ kg})(4 \text{ m/s}) + (1 \text{ kg})(-3 \text{ m/s}) = (3 \text{ kg})u_1^* + (1 \text{ kg})(-3 \text{ m/s})$$

$$9 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = (3 \text{ kg})u_1^* + 3 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

解出 $u_1^* = 2 \text{ m/s}$.

- 1.7 第二个观察者以速度 2 m/s 沿地面 x 轴运动,看到题 1.6 所描述的碰撞.他观察到的系统碰撞前后的动量是多少?

解 利用伽利略速度变换,

$$u_1' = u_1 - v = 4 \text{ m/s} - 2 \text{ m/s} = 2 \text{ m/s}$$

$$u_2' = u_2 - v = -3 \text{ m/s} - 2 \text{ m/s} = -5 \text{ m/s}$$

$$u_1^{*'} = u_1^* - v = 2 \text{ m/s} - 2 \text{ m/s} = 0$$

$$u_2^{*'} = u_2^* - v = -3 \text{ m/s} - 2 \text{ m/s} = -5 \text{ m/s}$$

$$(\text{初始动量})' = m_1 u_1' + m_2 u_2' = (3 \text{ kg})(2 \text{ m/s}) + (1 \text{ kg})(-5 \text{ m/s})$$

$$= 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

$$(\text{终了动量})' = m_1 u_1^{*'} + m_2 u_2^{*'} = (3 \text{ kg})(0) + (1 \text{ kg})(-5 \text{ m/s})$$

$$= -5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

于是,作为伽利略变换的结果,在 O' 系动量仍旧守恒(但与 O 系有不同的数值).

- 1.8 敞篷汽车以 100 ft/s 开行,车上有一小孩向上抛出一个速度为 20 ft/s 的球.写出由(a)小孩;(b)路边站台的观察者所看到的运动方程(给出位置与时间的关系).

解 对于车上的小孩,该球垂直升降,所以

$$y' = v_0 t' + \frac{1}{2} a t'^2 = (20 \text{ ft/s}) t' + \frac{1}{2} (-32 \text{ ft/s}^2) t'^2$$

$$= 20 t' - 16 t'^2$$

$$x' = z' = 0$$

对于站台上的观察者,从伽利略变换得到

$$t = t'$$

$$x = x' + vt = 0 + 20t, y = y' = 20t - 16t^2, z = z' = 0$$

- 1.9 考虑一个与弹簧连接并且在水平无摩擦表面运动的物体. 证明从经典变换规律看来, 无论是在表面的观察者还是以恒定速度沿弹簧方向移动的观察者的, 所得的物体运动方程相同.

解 由静止在表面上的观察所确定的物体运动方程是 $F = ma$, 或者

$$-k(x - x_0) = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (1)$$

第二个观察者所确定的运动方程是, 利用伽利略变换得到

$$x = x' + vt', \quad x_0 = x'_0 + vt', \quad \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{d^2 x'}{dt'^2}$$

将这些关系代入式(1)中有

$$-k(x' - x'_0) = m \frac{d^2 x'}{dt'^2} \quad (2)$$

因为式(1)和式(2)具有同样形式, 运动方程在伽利略变换下不变.

1.10 证明电磁波方程

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0$$

在伽利略变换下不能保持不变.

证 方程不变是指用新变数 x', y', z', t' 表示时形式不变. 从伽利略变换有

$$\frac{\partial t'}{\partial x} = 1, \quad \frac{\partial x'}{\partial t} = -v, \quad \frac{\partial t'}{\partial t} = \frac{\partial y'}{\partial y} = \frac{\partial z'}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial x'}{\partial y} = \frac{\partial x'}{\partial z} = \frac{\partial y'}{\partial x} = \frac{\partial t'}{\partial x} = \dots = 0$$

按照复合求导规则并利用上面的结果有

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial x'} \frac{\partial x'}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial y'} \frac{\partial y'}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial z'} \frac{\partial z'}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial t'} \frac{\partial t'}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial x'}, \quad \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x'^2}$$

类似地

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y'^2}, \quad \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial z'^2}$$

并且

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -v \frac{\partial \phi}{\partial x'} + \frac{\partial \phi}{\partial t'}, \quad \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial t'^2} - 2v \frac{\partial^2 \phi}{\partial x' \partial t'} + v^2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x'^2}$$

将这些结果代入波动方程中, 有

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y'^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z'^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t'^2} + \frac{1}{c^2} \left(2v \frac{\partial^2 \phi}{\partial x' \partial t'} - v^2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x'^2} \right) = 0$$

于是波动方程在伽利略变换下不再不变, 方程的左方因增添了一个附加项而改变了形式.

电磁波方程可从电磁理论的麦克斯韦方程导出. 将这里描述的方法用到麦克斯韦方程中去, 我们发现在伽利略变换下麦克斯韦方程也要改变形式. 与题 6.23 相比, 在那里证明电磁波方程在洛伦兹变换下不变.

补充习题

- 1.11 在以 30 ft/s 行进, 长为 20 ft 的运货车车尾有一个人(O'), 在他遇到地面上的人(O)之后两秒钟, 记录下车头闪光灯的一次闪烁. 对于这两个人来说, 他们对于这个事件坐标的记录分别是什么.

答案: $(x', t') = (20 \text{ ft}, 2 \text{ s}); (x, t) = (80 \text{ ft}, 2 \text{ s})$

- 1.12 一个小孩看到一头鹿从沿他的前面跑走. 鹿以 20 mi/h 的速度向前跑. 小孩前去追捕, 以 8 mi/h 速率向前跑. 鹿相对于小孩的速度是多少?

答案: 12 mi/h

- 1.13 在火车上一个男孩在车行方向上扔出一个速率为 20 mi/h 的球. 如果火车以 80 mi/h 速率运转. 地面上

的人测到的球的速率是多少?

答案:100 mi/h

- 1.14 一个旅客在火车车厢中以速率 2 mi/h 沿车行方向相反的方向散步,而火车在地面上以 60 mi/h 速率直线开行.地面上的观察者看到的这个旅客的速率是多少?

答案:58mi/h

- 1.15 铁路站台上一个管理人员与正在以 60 mi/h 运行的列车的前端的技术员对表.列车有 $1/4$ mi 长.两分钟之后火车离开站台,这时尾车上的安全员倒了一杯咖啡.由技术员及由管理人员所确定的安全员倒咖啡事件的坐标分别是多少?

答案: $(x', t') = \left(-\frac{1}{4} \text{ mi}, 2 \text{ min}\right); (x, t) = \left(1\frac{3}{4} \text{ mi}, 2 \text{ min}\right)$

- 1.16 车上一位太太倒了两杯咖啡.第二杯在第一杯之后 10 分钟.火车以 20 m/s 按直线运行.地面上的人看到这两次冲倒之间相隔了多少距离?

答案:12 000 m

- 1.17 一个 1 kg 的球以 3 m/s 向北运动.它与一个静止的完全相同的球进行了完全弹性碰撞,而在碰撞之后,两个球在北—南轴上运动.在这个实验室系中,计算出碰撞前和碰撞后的总动量.

答案:3 kg·m/s

- 1.18 见题 1.17, 计算碰撞前和碰撞后的总能量.

答案:4.5 J

- 1.19 参照题 1.17, 当观察者以 1.5 m/s 朝北运动时, 计算碰撞前和碰撞后动量.

答案:0

- 1.20 对于题 1.19 中的观察者, 碰撞前和碰撞后的能量是多少.

答案:2.25 J

- 1.21 当观察者以 2 m/s 向东移动时, 重复题 1.19 和 1.20 的讨论.

答案:2.5 kg·m/s 西偏北 37° , 6.25 J

- 1.22 一个人在船上以 15 ft/s 向东划去.在通过码头时刻,码头上有一人向北扔出一块石头.这块石头 6 秒钟后落入与码头相距 150 ft 的水中.找出由船上的人确定这溅落事件的坐标.

答案: $(x, y, t) = (-90 \text{ ft}, 150 \text{ ft}, 6 \text{ s})$

- 1.23 考虑一维弹性碰撞, 它发生在 O 系的 x 轴上.用经典变换方程证明, 对于以常速 u 沿着 O 系 x 轴运动的第二个观察者 O' 来说, 动能也是守恒的.

第2章 爱因斯坦假说

2.1 绝对空间和以太

伽利略速度变换的一个推论是:如果某个观察者测到光讯号以速度 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 传播,则其他任何相对他运动的观察者来测量同样的光讯号的传播速度与 c 有区别.能不能确定特殊的坐标系,如果观察者相对于它静止,则对于这个特殊的观察者来说测到的光讯号速度是 c 值?

在爱因斯坦之前,一般认为这个特殊的观察者就是觉得麦克斯韦方程成立的观察者.麦克斯韦方程用来描述电磁理论,并且指出电磁波将以速率 $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 传播.相对于这个特殊的观察者静止的空间称为“绝对空间”.相对于绝对空间运动的其他观察者将测到光速与 c 有差别.因为光是电磁波,19世纪的物理学家觉得光所赖以传播的介质必须存在.于是认为“以太”充满了整个绝对空间.

2.2 迈克耳孙-莫雷实验

如果以太存在,在地球上的观察者在以太中运动将感觉到“以太风”.一个对于测量地球通过假设的以太运动敏感的装置由迈克耳孙在1881年制成,而由迈克耳孙和莫雷在1887年改进.实验的结论是没有探测到通过以太的运动.见题2.5,2.6和2.7.

2.3 长度和时间的测量——原理性问题

对于迈克耳孙-莫雷实验的零结果和麦克斯韦方程仅对于特殊观察者才成立的一个共同因素是伽利略变换.这个“明显的”变换被爱因斯坦从“操作”观点加以重新研究.爱因斯坦认为,涉及物理理论的任何量至少在原则上有一个完全确定的测量手续.如果这样的手续未能形成,那么这个量不能在物理中起作用.爱因斯坦从操作观念上指出无法判明伽利略变换 $t' = t$,即测量同一事件的时间的两个观察者所得的结果相同这一说法是正确的.因此,变换 $t' = t$,还有其他的伽利略变换被爱因斯坦放弃.

2.4 爱因斯坦假定

爱因斯坦的指导性概念,称为相对性原理,指出,所有的非加速观察者在各方面都处于同等地位,即使他们(按照恒定速度)相对运动.这个原理可总结如下:

假定 1:物理规律对于全部惯性系(无加速系)的观察者都是相同的.

牛顿运动规律与相对性原理一致,但麦克斯韦方程加上伽利略变换与它相抵触.爱因斯坦认为在动力学和电磁规律之间不存在基本的差别.从而他有

假定 2:由惯性系中的观察者测到的真空中的光速都是

$$c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

与源的运动无关.

例题详解

2.1 设钟 B 与观察者的距离为 L ,怎样将这个钟与放在观察者处的 A 钟调整一致.

解 将(不走的)钟 B 调到指示 $t_B = L/c$.当(由钟 A 记录到) $t_A = 0$ 时送出一个光讯号到有一定距离的钟 B 处. B 钟在接到讯号后开动.

- 2.2 一个闪光灯放在离观察者 30 km 处. 当灯泡点着而观察者在 1:00 PM 时刻看到它的闪烁. 问灯泡点着的实际时间是多少?

解 光讯号传播 30 km 的时间是

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{c} = \frac{30 \times 10^3 \text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 1 \times 10^{-4} \text{ s}$$

于是, 这个闪光灯在 1:00PM 之前 $1 \times 10^{-4} \text{ s}$ 时刻点着.

- 2.3 一棒由左向右运动. 当棒的左端通过相机时摄下一幅棒与静置的带刻度米尺放在一起的照片. 在所显示的图形中, 棒的左端与米尺上的零刻度重合而右端与 0.9m 刻度相重. 如果棒以 $0.8c$ 相对于相机移动, 确定棒的实际长度.

解 当棒右端的光讯号被相机摄上时, 它必须是提前一段时间

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{c} = \frac{0.90 \text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 3 \times 10^{-9} \text{ s}$$

在这一段时间内, 棒的左端前进了一段距离 Δs^* , 它的大小是(图 2-1)

$$\Delta s^* = v \Delta t = (0.8 \times 3 \times 10^8 \text{ m/s})(3 \times 10^{-9} \text{ s}) = 0.72 \text{ m}$$

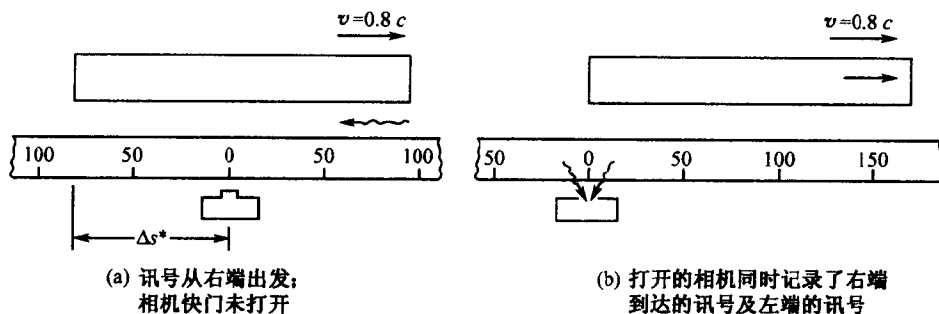


图 2-1

于是棒的实际长度是 $L = 0.90 \text{ m} + 0.72 \text{ m} = 1.62 \text{ m}$. 这个结果说明了照下一根移动棒并不能得到它的正确长度.

- 2.4 设离观察者距离相等的两个地方各发生一个事件. 设观察者采用下述声明作为等距离事件的同时性的定义: “如果每一个事件发生的光讯号同时到达我处, 这两个事件是同时发生的.” 证明, 按照这个定义, 如果观察者确定了两个事件是同时的, 那么相对于他运动的另一个观察者看到这两个事件一般是不同时的.

解 参见图 2-2, 如果两个光讯号从第一个观察者(O)看来是同时的, 它们必然以不同的时间到达第二个观察者(O')处. 因为这两个讯号发出时与 O' 等距离, 按照上述定义这两个事件并不同时发生, 而是事件 B 的发生要早于事件 A .

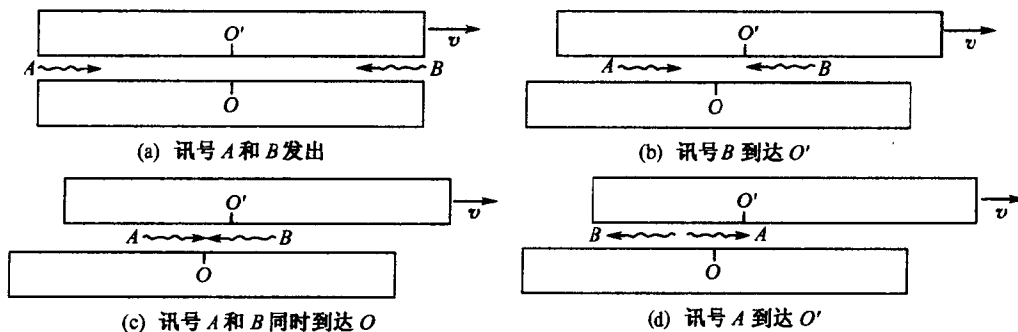


图 2-2

- 2.5 图 2-3 画的是迈克耳孙-莫雷干涉仪, 它的一臂(l_A)与“以太风”平行. 证明如果这个装置旋转 90° , 移动过望远镜叉丝的条纹数 ΔN 与 $(v/c)^2$ 成正比.

$$\Delta N = \frac{v^2}{\lambda c^2} (l_A + l_B)$$

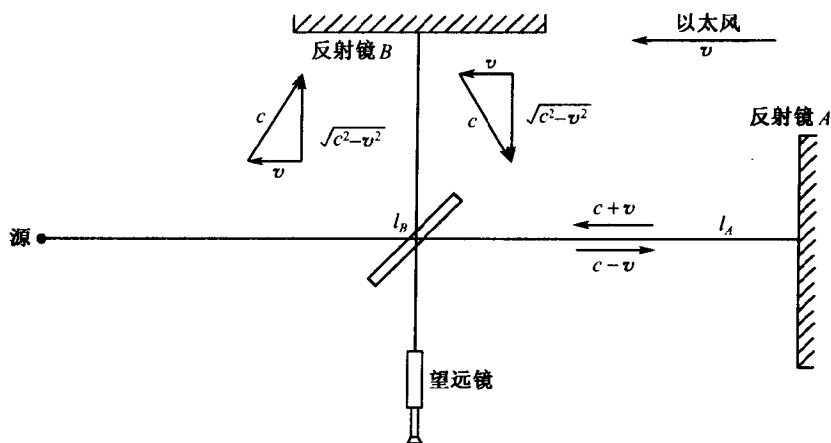


图 2-3

解 从臂 l_A , 光到达镜 A 的时间等于臂长 l_A 除以光速, 按照伽利略变换光速等于 $c - v$. 折回时路线长度仍旧是 l_A , 但是传播速度为 $c + v$, 因此来回传播的总时间是

$$t_A = \frac{l_A}{c - v} + \frac{l_A}{c + v} = \frac{2l_A/c}{1 - v^2/c^2}$$

在另一个臂传播的光线必需保证最终速度(在以太中的速度加上以太相对于干涉仪的速度)矢量与臂 l_A 垂直. 这个结果给出了沿路线 l_B 来回的速率都是 $\sqrt{c^2 - v^2}$, 所以往返所需的时间为

$$t_B = \frac{2l_B}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2l_B/c}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}$$

如果假设 $v/c \ll 1$, 时间 t_A 和 t_B 可展到 $(v/c)^2$ 的一阶而时间差是

$$t_A \approx \frac{2l_A}{c} \left(1 + \frac{v^2}{c^2} \right), \quad t_B \approx \frac{2l_B}{c} \left(1 + \frac{v^2}{2c^2} \right)$$

而

$$\delta = t_A - t_B \approx \frac{2(l_A - l_B)}{c} + \frac{2l_A v^2}{c^3} - \frac{l_B v^2}{c^3}$$

注意如果干涉仪旋转 90° , l_A 和 l_B 交换位置, 还有时间差的交换

$$\delta' \approx \frac{2(l_A - l_B)}{c} + \frac{l_A v^2}{c^3} - \frac{2l_B v^2}{c^3}$$

而在干涉图样上将有 ΔN 个条纹的移动, 这里

$$\Delta N = \frac{\delta - \delta'}{T} = \frac{c(\delta' - \delta)}{\lambda} = \frac{(l_A + l_B)v^2}{c^2 \lambda}$$

其中 T 和 λ 是光的周期和波长.

- 2.6 假定地球通过以太的速度就是轨道速度, 所以 $v = 10^{-4}c$. 考虑迈克耳孙-莫雷实验, 这里干涉仪的每条臂长都是 10 m, 其中一条臂沿着地球穿过以太的运动方向. 计算沿各个臂传播的两个光波的时间差.

解 参照题 2.5

$$\delta \approx \frac{2}{c} (l_A - l_B) + \frac{2v^2}{c^3} \left(l_A - \frac{1}{2} l_B \right) = \frac{2(10^{-4}c)^2}{(3 \times 10^8 \text{ m/s})c^2} (5\text{ m}) = 3.33 \times 10^{-16} \text{ s}$$

- 2.7 原始的迈克耳孙-莫雷实验使用臂长为 11 m 的干涉仪和 $5900\text{\AA}$ 的钠光. 这个实验可显示出 0.005 个的条纹移动. 这对于地球通过以太的运动速率设置了多大的上限?

解 从题 2.5, 看到的通过望远镜叉丝的条纹数 ΔN ,

$$\Delta N = \frac{v^2}{\lambda c^2} (l_A + l_B) = \frac{2lv^2}{\lambda c^2}$$

$$0.005 = \frac{2(11\text{m})v^2}{(5900 \times 10^{-10}\text{m})(3 \times 10^8\text{m/s})}$$

解出 $v = 3.47 \times 10^3 \text{m/s}$.

地球轨道速度是 $3 \times 10^4 \text{m/s}$, 所以干涉仪可以足够敏感地测定这个运动, 但没有看到条纹移动.

补充习题

2.8 重复题 2.3, 但照片是棒的右端通过相机时摄下的.

答案: 0.18 m

2.9 当一根移动的米尺中点通过相机时, 相机快门打开并且照得一根米尺及一根静止的带刻度尺在一起的照片. 如果相对于照相机的速率是 $0.8c$, 记录到照片上的米尺长度是多少?

答案: 3.24 m

2.10 参照题 2.4. 如果两个讯号同时到达 O' , 由 O 确定的时间顺序是什么?

答案: A 在 B 之前

2.11 设地球的轨道速率 $3 \times 10^4 \text{m/s}$ 是地球穿过以太的速率. 如果光走过等臂迈克耳孙-莫雷装置在平行于运动方向上需要 t 秒, 问传过垂直运动方向上的需要多少秒?

答案: $(1 - 0.5 \times 10^{-8})t_A$

第3章 洛伦兹坐标变换

2.4 节假定 2 要求伽利略坐标变换代之以洛伦兹坐标变换. 对于图 1-1 的两个观察者有

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z \quad (3.1)$$

这些方程可以倒过来而给出

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad t = \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad y = y', \quad z = z' \quad (3.2)$$

在式(3.1)和(3.2)中, v 是 O' 相对于 O 沿着共同轴的速度: 如 O' 沿正 x 方向移动, v 是正值; 而沿负 x 方向移动则是负值. 还假定原点相重时开动时钟, 于是 $x' = x = 0$ 时 $t' = t = 0$. 注意逆变换可从第一组变换中将带撇变数和不带撇变数互换, 然令 $v \rightarrow -v$ 而得. 这个符合假定 1 的要求, 因为两个观察者是完全等价的, 而观察者 O 以速度 $-v$ 相对于 O' 运动.

3.1 光速的不变性

设 O 和 O' 相遇时(在 $t = t' = 0$), 一个光讯号从它们的共同原点在正 $x \sim x'$ 方向发出. 如果 O 得到讯号的空间和时间坐标满足关系 $x = ct$, 那么, 按照式(3.1), 在 O' 中有

$$\begin{aligned} x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} = \frac{ct - vt}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} = \frac{ct[1 - (v/c)]}{\sqrt{[1 - (v/c)][1 + (v/c)]}} \\ &= \sqrt{\frac{1 - (v/c)}{1 + (v/c)}} ct \\ t' &= \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} = \frac{t - \frac{v}{c^2}ct}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} = \frac{t[1 - (v/c)]}{\sqrt{[1 - (v/c)][1 + (v/c)]}} \\ &= \sqrt{\frac{1 - (v/c)}{1 + (v/c)}} t \end{aligned}$$

在 O' 中有 $x' = ct'$ 与爱因斯坦的第二个假定一致. 还注意对于这个光讯号事件, $t' \neq t$, 与伽利略假设肯定不一样.

3.2 在求解包含洛伦兹变换在内的问题的一般考虑

在接触到任何空-时问题时, 记住关键的概念是“事件”. 最大量的问题是两个观察者测量事件(或事件集)的空间和时间坐标. 于是每个事件有与它相联系的 8 个数: 由 O 指定的 (x, y, z, t) 和由 O' 指定的 (x', y', z', t') . 洛伦兹变换表达了这些参数之间的变换关系.

很多时候, 要考虑在两个事件之间的空间区间和/或时间区间的确定. 这时, 一个有用的技巧是将描述每个事件的合适的洛伦兹变换彼此相减. 例如, 设观察者 O' 测得在事件 A 和 B 之间的时间和空间区间, 并且也需要得到由 O 测得的同样的两个事件之间的时间区间. 由式(3.2), 从 t_B 减去 t_A

$$t_B - t_A = \frac{(t'_B - t'_A) + (v/c^2)(x'_B - x'_A)}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \quad (3.3)$$

因为方程右方的量全是已知的, $t_B - t_A$ 可以确定.