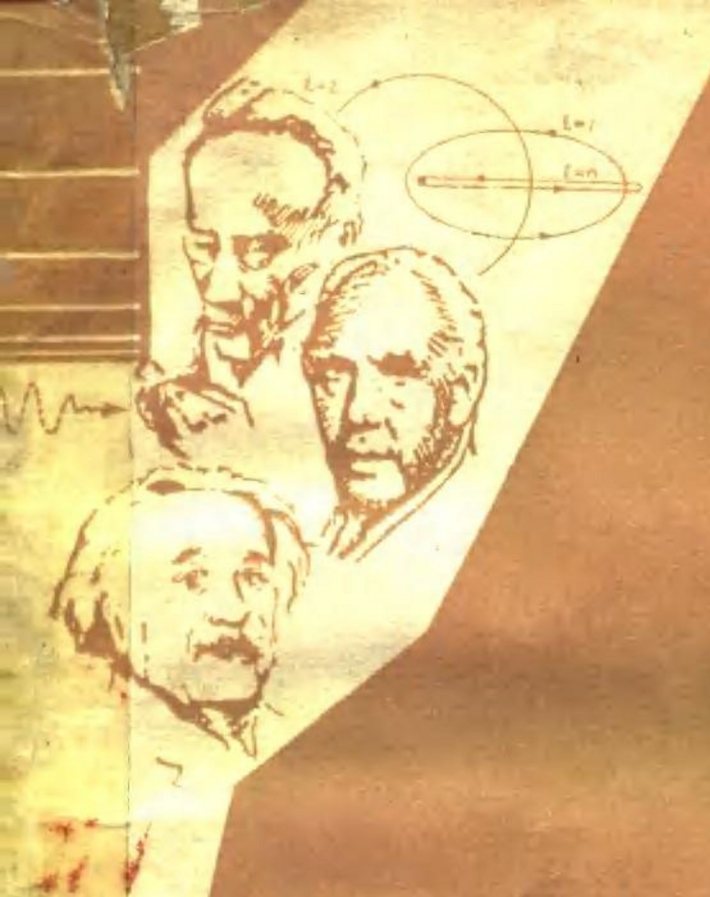


胡素芬 编



近代物理基础

高等学校教学用书

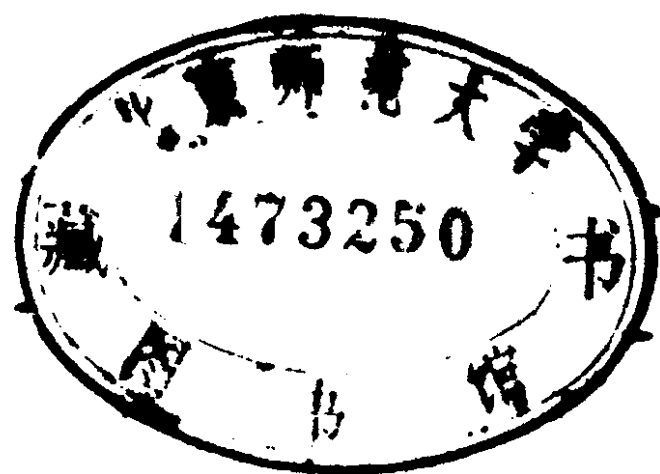
浙江大學出版社

高等学校教学用书

近代物理基础

胡素芬 编

JY1/65 1/3



浙江大学出版社

内 容 简 介

本书简明地介绍了近代物理的两大支柱：相对论和量子力学及其主要领域（原子物理、分子物理、固体、激光、原子核、基本粒子）。

本书注意突出物理概念和物理图像，有较强的可读性，并注意反映当今科技的新面貌。内容较新，介绍了较多的应用（如喇曼散射，超导性简介，激光同位素分离，穆斯堡尔效应，核磁共振的应用等）。书中有相当数量的例题和习题，书末附有习题答案及习题选解，供读者自我校对。

本书可作为高等院校物理专业及其它理工科有关专业的教材，也可供有关科技人员阅读参考。

近代物理基础

胡素芬 编

责任编辑 陈晓嘉

* * *

浙江大学出版社出版

浙江省良渚印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

* * *

850×1168 32开本 16印张 385千字

1988年5月第1版 1988年6月第1次印刷

印数：1—5000

ISBN 7-308-000-52-4

O·012 定价：3.15元

编 者 的 话

本书是在编者授课的《近代物理》讲义基础上,根据《1986——1990年应用物理专业教材规划表》对《近代物理基础》教材所提出的要求,进行修改编写而成。

全书共分12章,第1章相对论,介绍狭义相对论的基本概念和基本原理,并对广义相对论作了简介;第2章至第7章叙述量子论的历史发展过程、原子物理,并以原子结构为中心,在分析实验事实的基础上讲述量子力学的基本概念、基本处理方法及其结果;第8章至第12章分别介绍分子、固体、激光、原子核和基本粒子的基本理论和基本知识。

在编写中,尽量注意了突出物理概念和物理图像,力求说理清楚、简明易懂;并注意联系当今科技方面的应用,力图使读者了解近代物理各领域的新发展、新成就,以开扩眼界。

应用物理专业教材委员会曾组织有关专家评审了本书的初稿,根据他们的意见,编者进行了修改和补充,之后承北京工业大学陈纲教授审阅,现已被应用物理专业教材委员会推荐为教材。徐亚伯教授、李文铸教授对本书的修改提出了指导性意见;孙威教授、张森副教授及胡炳勋等同志对本书的编写给予了许多有益的帮助;编者所在的单位也从各方面给予大力支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于水平有限,时间仓促,错误和不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

胡素芬

1987年8月于浙江大学

引 言

一般认为，近代物理学应包括本世纪开始前后发展起来的那些物理课题。其中“相对论”和“量子力学”是近代物理的两大基本支柱。

习惯上，人们把牛顿力学、热力学与经典统计、麦克斯韦电磁理论等称为经典物理，以区别于二十世纪以来发展起来的相对论和量子理论。

十九世纪末，经典物理学理论已发展到相当完善的阶段：作机械运动的物体，当运动速度远小于真空中的光速时，准确地遵从牛顿力学规律；分子热运动的规律，有完整的热力学和统计力学理论；电磁运动的规律有麦克斯韦方程加以描述；光的现象有光的波动理论（最后也归结为麦克斯韦方程）来说明。这些物理学上的成就，使得当时一些物理学家认为：整个物理世界的重要规律都已发现，以后的工作只是重复前人的实验，提高实验精度，在测量数据的小数点后面多添加几位有效数字而已。著名英国物理学家开尔文(Kelvin)在1893年“展望二十世纪物理学”的一次演说中，就表明了以上的观点。人们普遍认为，在物理学晴朗的天空中，只剩下两朵小小的乌云未驱散，这就是当时经典物理无法解释的黑体辐射实验和迈克尔逊-莫雷实验。

十九世纪末二十世纪初，物理学发展到了深入研究微观现象的新阶段。随着生产力的发展，技术和实验手段的改进，在十九世纪末认为是两朵小小的乌云上，爆发了物理学的大革命：1900年，为了解释黑体辐射实验，普朗克提出了能量子的假设（它被认为是量子理论的开端），接着光电效应、康普顿效应及在原子结构等一系列问题上，经典物理遇到了很大困难，这就导致了描述微观世界的理论——量子力学的建立；而迈克尔逊-莫雷实验和

其它实验事实一起，否定了经典电磁理论的以太假说。1905年爱因斯坦在前人实验的基础上，大胆地抛弃“以太”假说，提出了相对论的两点基本假设，建立了相对论，确立了崭新的时空概念。

到本世纪二十年代，相对论和量子理论已发展成为完整的理论，并且被广泛地应用于物理学的所有领域：原子物理，分子物理，原子核物理，基本粒子物理，凝聚态物理（固体物理及其各个分支等），等离子体物理等。到了七十年代，随着工程技术和科学研究的高速发展，相对论和量子理论从理论阶段进入了实用阶段。例如各类固体材料、半导体、激光、超导、原子能、高能粒子的研究都需要相对论和量子论知识。可以说，我们这个二十世纪世界的生产技术一刻也不能离开近代物理，近代物理的基本理论对其它自然科学学科（如近代化学、近代生物学、近代宇宙学……）已产生了不可磨灭的影响。所以，近代物理是整个自然科学和现代技术的基础；近代物理在各个领域取得的成就极大地深化了人类对自然界的认识。对于物质的存在方式及其运动形态；时间和空间；实物和场；粒子和波；连续和间断；质量和能量；物质的结构层次等等基本问题的认识，近代物理的原理和观念比之经典物理是一次质变和飞跃。近代物理改造了人类的思想方法，并对哲学思想和其它社会思想产生了深刻的影响。由于近代物理如此重要，七十年代以来，国外理工科大学都把近代物理纳入大学基础物理的课程中；近几年来，国内许多高等院校也把近代物理列为应用物理专业或理工科有关专业的必修课。

要学好近代物理，需要了解它所具有的与经典物理不同的特点。近代物理的内容，尤其是相对论和量子力学的概念和原理是比较抽象的。相对论是描述高速运动物体（接近光速）的力学，量子力学是描述微观物体运动的力学，这两方面距离人类的日常生活经验都相当遥远。所以，在学习时应注意培养自己的抽象思维能力

和逻辑思维能力，而不能事事要求直观性和经典物理图像。每一种理论都有自己的发展历史和实验依据，近代物理也不例外。我们应从历史的联系中，从实验基础的背景上去了解它们。

必须说明，近代物理学中并未完全否定经典规律，我们将看到，有许多经典物理学的概念和定律可沿用于近代物理学。

目 录

引言

1 相对论简介

- 1-1 伽利略变换·力学的相对性原理 (1)
- 1-2 迈克尔逊-莫雷实验 (5)
- 1-3 相对论的两个基本假设·洛伦兹变换 (12)
- 1-4 同时的相对性·长度收缩·时间膨胀 (18)
- 1-5 相对论速度相加·多普勒频移效应 (27)
- 1-6 相对论动量、质量和动力学基本方程 (31)
- 1-7 相对论能量·质能关系 (38)
- 1-8 广义相对论简介 (45)

习题

2 电磁辐射的粒子性

- 2-1 黑体的热辐射 (55)
- 2-2 光电效应 (66)
- 2-3 康普顿效应 (78)
- 2-4 电磁辐射的二象性 (83)

习题

3 原子结构和玻尔-索末菲原子理论

- 3-1 原子模型 (88)
- 3-2 原子光谱的实验规律 (98)
- 3-3 玻尔氢原子理论 (101)
- 3-4 类氢离子的光谱 (107)
- 3-5 夫兰克-赫兹实验 (112)
- 3-6 索末菲椭圆轨道 (115)
- 3-7 斯特恩-盖拉赫实验与原子空间取向的量子化 (123)
- 3-8 对应原理·对玻尔理论的评价 (128)

习题

4 量子力学初步

- 4-1 物质的二象性 (135)
- 4-2 测不准原理 (140)
- 4-3 波函数及其物理意义 (144)
- 4-4 薛定谔方程 (150)
- 4-5 力学量与算符 (156)
- 4-6 量子力学问题的几个简例 (160)
- 4-7 量子力学对氢原子的描述 (172)

习题

5 碱金属原子和电子自旋

- 5-1 碱金属原子的光谱 (187)
- 5-2 碱金属原子结构  (189)
- 5-3 碱金属原子光谱的精细结构和电子自旋 (197)
- 5-4 氢原子光谱的精细结构 (208)

习题

6 多电子原子

- 6-1 两个价电子原子的光谱和能级 (216)
- 6-2 具有两个价电子的原子态 (220)
- 6-3 多电子原子光谱的一般规律 (229)
- 6-4 泡里原理和原子的电子壳层结构 (233)
- 6-5 X 射线与内层电子的跃迁 (243)

习题

7 外场中的原子

- 7-1 原子的磁矩 (254)
- 7-2 外磁场对原子的作用 (258)
- 7-3 斯特恩-盖拉赫实验的结果 (261)
- 7-4 顺磁共振 (263)
- 7-5 塞曼效应·帕邢-巴克效应 (266)
- 7-6 斯塔克效应 (276)

习题

8 分子结构和分子光谱

- 8-1 分子的键结合 (282)
- 8-2 分子光谱和分子能级 (286)
- 8-3 分子的转动光谱 (289)
- 8-4 分子的振动光谱 (292)
- 8-5 分子中电子能级跃迁产生的光谱 (298)
- 8-6 组合散射(喇曼效应) (303)

习题

9 固体物理简介

- 9-1 晶态固体的基本性质 (312)
- 9-2 晶体中的电子状态·能带结构 (317)
- 9-3 导体、绝缘体和半导体 (322)
- 9-4 本征半导体·杂质半导体 (326)
- 9-5 半导体的结和器件 (330)
- 9-6 超导电性简介 (333)

习题

10 激光与激光光谱学简介

- 10-1 光的自发辐射、受激辐射与受激吸收 (345)
- 10-2 光谱线的宽度 (350)
- 10-3 激光 (358)
- 10-4 激光光谱学应用举例 (366)

习题

11 原子核物理简介

- 11-1 原子核的基本性质 (377)
- 11-2 原子核的放射性 (385)
- 11-3 原子核反应 (402)
- 11-4 原子核的裂变和聚变 (411)
- 11-5 核磁共振与应用 (418)

习题

12 基本粒子简介

12-1 基本粒子的性质和分类 (427)

12-2 粒子加速器 (433)

12-3 基本粒子的相互作用和守恒定律 (443)

12-4 共振态 (455)

12-5 基本粒子模型 (458)

习题

附录

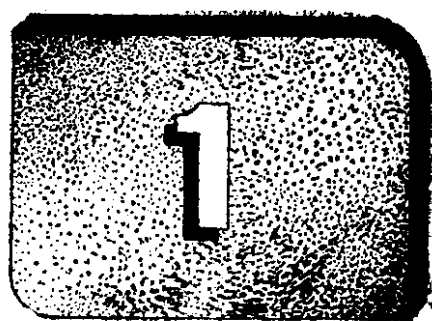
1. 参考书籍 (463)

2. 习题答案 (464)

3. 常用物理常数 (471)

4. 换算因子 (472)

5. 习题选解 (473)



相 对 论 简 介

相对论包括**狭义相对论**和**广义相对论**两方面内容。狭义相对论是1905年由爱因斯坦(A. Einstein)提出的,它涉及到相互以匀速运动着的不同惯性系里的观察者对物理现象的测量结果。其结论可用较少量的数学导出,并能够应用于物理学和工程技术中所遇到的各种不同情况。广义相对论也是由爱因斯坦等人提出的(1916年前后),它讨论任意运动的非惯性系中的观察者对物理现象的观测结果,主要应用于引力范围。它在宇宙学中是很重要的,但在物理学的其它领域或工程技术里,目前还难于说明其应用。由于对广义相对论的深入了解需要许多复杂的数学,本章着重阐述狭义相对论,仅在最后一节简短地介绍广义相对论。

1-1 伽利略变换·力学的相对性原理

在经典力学中,考虑一个惯性参照系 K' 相对于另一惯性参照系 K 作匀速直线运动,在 K' 系上取坐标系 $O'x'y'z'$, K 系上取坐标系 $Oxyz$ 。为方便起见,设各对应坐标轴互相平行, K' 系相对于 K 系以速度 v 沿 x 轴方向运动(见图1-1)。以 O' 和 O 重合的时刻作为计时的起点,则同一质点 P 在 K 系和 K' 系内的坐标变换由伽利略(Galilean)坐标变换

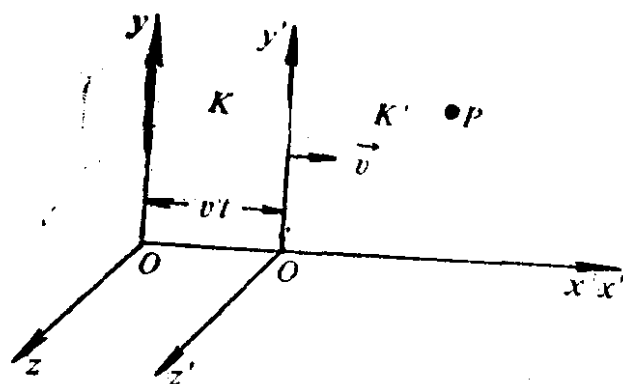


图1-1 惯性参照系 K 和 K'

$$\begin{aligned} x' &= x - vt \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= t \end{aligned} \quad (1.1)$$

确定。其中 x, y, z 和 x', y', z' 分别是质点 P 在 K 和 K' 系中的空间坐标， t 和 t' 分别是 K 和 K' 系的时间坐标。

将(1.1)式对时间取导数，就得到 P 点的速度变换关系：

$$\begin{aligned} u_x' &= u_x - v \\ u_y' &= u_y \\ u_z' &= u_z \end{aligned} \quad (1.2a)$$

写成矢量形式，则为

$$\vec{u}' = \vec{u} - \vec{v} \quad (1.2b)$$

(1.2a)或(1.2b)就是经典力学的速度相加定理。

再将(1.2a)对时间取导数，就得到 P 点的加速度变换关系：

$$\begin{aligned} a_x' &= a_x \\ a_y' &= a_y \\ a_z' &= a_z \end{aligned} \quad (1.3a)$$

写成矢量形式，则为

$$\vec{a}' = \vec{a} \quad (1.3b)$$

上式表明，在不同惯性参照系中，质点的加速度是相同的。

经典力学认为，物体的质量与参照系无关。由(1.3a)或(1.3b)可知，在相互作用匀速直线运动的不同惯性参照系内，牛顿第二定律的形式是相同的，即

$$\begin{aligned} f_x &= f'_x = ma_x \\ f_y &= f'_y = ma_y \end{aligned} \quad (1.4a)$$

$$\begin{aligned} \underline{f_z} &= \underline{f'_z} = m\underline{a_z} \\ \text{或} \quad \underline{f} &= \underline{f'} = m\underline{a} \end{aligned} \quad (1.4b)$$

这就是说尽管质点的速度、动量和能量在不同的惯性参照系内是不同的，可是力、质量和加速度在不同的惯性参照系内是相同的，即动力学定律在一切惯性参照系内是完全相同的。因为在力学中，各种守恒定律都可以证明为牛顿第二定律的推论，所以，**力学定律在一切惯性参照系内是相同的，并不存在一个比其它惯性参照系更为优越的惯性参照系。在一个惯性系内部所作的任何力学实验，均不能确定这惯性参照系本身是处在静止状态，还是在作匀速直线运动。这就是伽利略相对性原理或力学的相对性原理。**

由伽利略变换(1.1)的第四式 $t = t'$ 可得 $\Delta t' = \Delta t$ 。其物理意义是：在任何两个惯性参照系 K 和 K' 中的时钟对好以后（令原点 O 与 O' 重合的时刻为时间的起点， $t' = t = 0$ ），两惯性参照系中的时钟所显示的时间总是一致的，它们所测出的同一事件所经历的时间间隔是相同的。因此，在一切惯性参照系中，时间的量度是一致的。这就是说，在经典力学中，时间是绝对的。

设有一沿 x 轴方向放置的直杆，直杆的两端在 K 系和 K' 系中的空间位置分别为 x_1 ， x_2 和 x'_1 和 x'_2 ，则在 K 和 K' 中测得的长度分别为

$$l = x_2 - x_1 \quad l' = x'_2 - x'_1$$

由伽利略变换(1.1)的前三式知

$$l = l'$$

因此，在一切惯性参照系中，直杆长度不变。这就是说，在经典力学中，长度是绝对的。

伽利略相对性原理肯定了所有惯性系在力学上的等价性。我们要问，除了力学定律之外的其他物理定律（例如电磁学定律）在伽利略变换下是不是不变量？

十九世纪生产的发展，要求进一步研究电磁规律。十九世纪六十年代，麦克斯韦（Maxwell）总结了电磁运动规律，建立了麦克斯韦方程组，这个方程组可以解释一切宏观电磁现象。麦克斯韦预言了电磁波的存在，并把光波与电磁波统一起来。后来赫芝又用实验证实了电磁波的存在。然而，当时物理学家认为电磁波和机械波一样，是在弹性媒质中传播的，这种传播电磁波的弹性媒介就是所谓绝对静止的“以太”，它充满整个宇宙空间。

就伽利略变换而言，要立即看出电磁学情况与力学情况的不同，可以考察一个光脉冲（即一个电磁波脉冲），以速度 c 相对于“以太”向右传播。为简单起见，取“以太”为惯性参照系 K 。如果观测者在 K 中测得的光速正好是 $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0} = 2.997925 \times 10^8$ 米/秒，则根据伽利略变换，在相对于“以太”参照系以恒定速度 v 运动的参照系 K' 中，观察者就会测得光脉冲的不同速度。按相对运动的方向相同或相反，这个速度可以是 $c - v$ 或 $c + v$ 。这样在伽利略变换下，不同的惯性参照系中测得的光速就不同，即麦克斯韦方程组中的 c 在不同惯性参照系中有不同的数值。因而，在不同惯性系中，麦克斯韦方程组是不同的，以至各种电磁效应可能不会相同。只有相对于“以太”静止的那个惯性参照系中的光速为 $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0} = 2.997925 \times 10^8$ 米/秒。于是就存在一个特别优越的惯性参照系，只有在这个惯性参照系中，麦克斯韦方程组中的 c 取 $1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0} = 2.997925 \times 10^8$ 米/秒。这样，根据伽利略相对性原理，尽管人们不能通过力学实验发现这一绝对参照

系，但却可以通过电磁学实验（如测量光速实验）来发现这一绝对参照系。而且由于在其它惯性系中测得的光速只和常数 c 及该系相对于“以太”系的速度有关，人们便可以通过测量光速的实验来确定我们的惯性系相对于“以太”系的速度了。

1-2 迈克尔逊-莫雷实验

按照“以太”假说，地球是在“以太”的海洋里运动着，只要在地球上做测量光速的实验，就可以推算出地球相对于绝对参照系的速度。例如，一束光先逆着“以太”风的方向行进距离 l_1 后再返回（图1-2），所需的时间是

$$t_1 = \frac{l_1}{c-v} + \frac{l_1}{c+v} = l_1 \frac{2c}{c^2 - v^2} = \frac{2l_1}{c} \left(\frac{1}{1 - v^2/c^2} \right) \quad (1.5)$$

其中 v 是地球相对于“以太”的速度。若地球相对于“以太”静止，即不存在“以太”风，

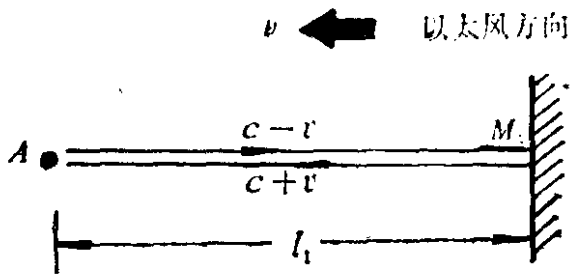


图1-2 光束沿逆-顺流方向传播
A-光源， M_1 -平面镜（相对于地球静止）

则光传播距离 l_1 后再返回所需的时间为 $2l_1/c$ 。从(1.5)式可见，当光沿逆-顺“以太”风方向行进时，所需时间要乘以因子 $1/(1 - v^2/c^2)$ 。

光垂直于“以太”流的方向行进一段距离后再返回，所需时间的计算方法如下：

设地面上的观察者看到一束光垂直于“以太”风的方向传播距离 l_2 再返回〔图1-3(a)〕，所需的时间为 t_2 （注意，对地面上的观察者来说，这束光的速率不等于 c ，所以 $t_2 \neq 2l_2/c$ ）。对于“以太”参照系来说，这束光将沿图1-3(b)的途径以速率 c 行

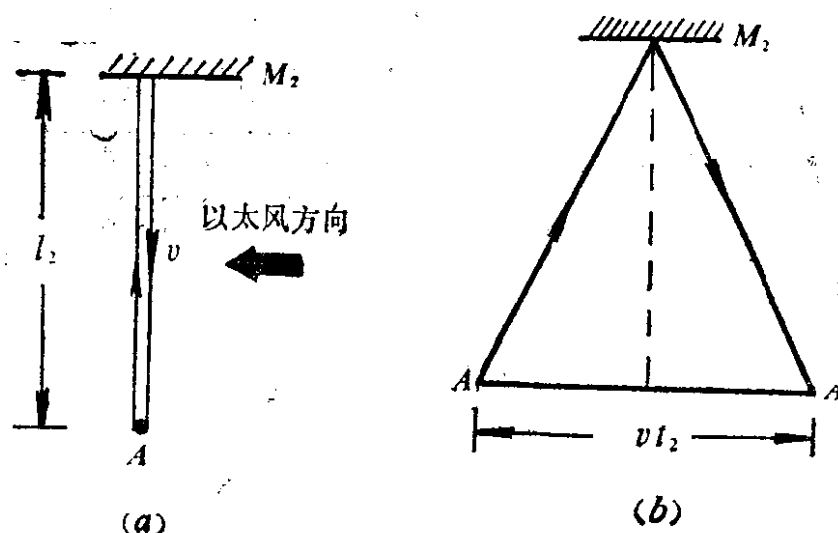


图1-3 (a) 在地面上垂直“以太”风方向来回传播的光束

(b) 从“以太”参照系看到的光束传播途径(光速为 c)

进。当光束经过时间 t_2 返回至 A 点时,光源 A 点的位置已经沿“以太”风方向移动了一段距离 vt_2 ,于是根据图中的直角三角形可得

$$\left(c \frac{t_2}{2}\right)^2 = l_2^2 + \left(\frac{1}{2}vt_2\right)^2 \text{ 即}$$

$$t_2 = \frac{2l_2}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2l_2}{c} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) \quad (1.6)$$

若地球相对于“以太”静止,即不存在“以太”风,则光束行进距离 l_2 后再返回所需的时间为 $2l_2/c$ 。从(1.6)式可见,当光沿垂直于“以太”流的方向行进时,所需时间要乘以因子 $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ 。

考虑到 $v/c \ll 1$,故(1.5)式可写成

$$t_1 \approx \frac{2l_1}{c} \left(1 + \frac{v^2}{c^2} \right)$$

(1.6)式可写成

$$t_2 \approx \frac{2l_2}{c} \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{c^2} \right)$$