

现代物理概念



〔美〕 阿瑟·贝塞 著
何 瑁 等译 王承瑞 校

现代物理概念

〔美〕阿瑟·贝塞 著

何 瑁 等译

王承瑞 校

上海科学技术出版社

内 容 提 要

《现代物理概念》是一本现代物理的入门书。它分为基本概念、原子理论、物质性质和原子核四大部分共十三章。

本书的显著特色是概念论述简单明确，文字流畅易懂，插图生动醒目，图文并茂。

本书可作为理工科大学原子物理或近代物理课程的教科书，也可作为学习普通物理课程的参考书。

ZPS1/27

Concepts of Modern Physics

(Second Edition, 1973)

Arthur Beiser

McGraw-Hill Book Company

现代物理概念

〔美〕阿瑟·贝塞 著

何 瑁 等译

王承瑞 校

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 江苏扬中印刷厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 13.625 字数 360,000

1984 年 5 月第 1 版 1984 年 5 月第 1 次印刷

印数：1—12,200

书号：13119·1116 定价：(科五)2.20 元

译 者 序

《现代物理概念》是一本介绍现代物理的入门教材。全书分基本概念、原子、物质的性质和原子核四大部分。本书的特色是始终强调物理基本概念。书中避免了实验的细节描述和理论的繁复推导,但又能时时注意到理论与实验之间的联系。叙述清楚明确,文字流畅易懂,插图生动醒目,图文并茂是本书的重要特色。本书为经典物理和现代物理之间、宏观物理和微观物理之间,提供了一个很好的桥梁,可以作为理工科大学原子物理课的教科书或普通物理课的参考书。

本书的翻译分工如下:第1~3章——何瑁,第4~5章——曹培园,第6~7章——王承瑞,第8~9章——侯云智,第10~11章——杨楚良,第12~13章——谢去病。全书由王承瑞教授校阅。翻译工作有不妥之处,欢迎读者批评指正。

作者序

本书旨在供一个学期的现代物理学课程使用，要求具备初等经典物理学和微积分的知识。书中先介绍相对论和量子理论，为学习原子物理学和原子核物理学打下基础。然后介绍原子理论，强调量子力学概念，接着讨论原子集合的性质。最后研究原子核和基本粒子。

本书内容有意识地偏重于概念方面，而不是实验方法和实际应用方面，因为我相信，对于初学者来说，在其现代物理学的入门学习中，概念的框架比大量的个别细节更为适用。然而，一切物理学理论的成败在于实验之剑，而为了严格地说明一个抽象概念如何能同实际的测量联系起来，则需要进行若干冗长的推导。许多教师不希望学生陷入比较繁复的（虽在数学上不一定是很困难的）讨论中，因此我将一些节次标上星号，这些节次可以跳过去，但并不影响学习的连续性；以这些节次内容为基础的习题也标有星号。当然，其他内容的删节也是允许的。例如，相对论也许已经学过；再如，若将第三部分放在后继课程里去学习，那么也可将整个第三部分删去。因此，本书给教师留有余地，以适应他所希望的课程类型（或者全面概述，或者有选择地深入介绍一些内容）和选择对学生适宜的讲授水平。

本书的一本详尽的改写本是作者所写的《现代物理学展望》，属于本丛书中的一种高级教科书，但不要求更高的数学预备知识。其他的高级教科书则详细讨论现代物理学的专门问题。

在着手《现代物理概念》的这一版时，原来版本中许多内容已经重新加以整理和予以改写，若干课题的范围已加扩大，若干边缘领域的材料已被删去。Y·比尔斯和T·萨托在这方面提供了有益的建议，作者在此表示感谢。

阿瑟·贝塞

目 录

译者序

作者序

第一部分 基本概念

第一章 狭义相对论	1
§ 1.1 迈克耳孙-莫雷实验	1
§ 1.2 狭义相对论	7
§ 1.3 时间膨胀	9
§ 1.4 孪生佯谬	13
§ 1.5 长度收缩	14
§ 1.6 介子衰变	17
*§ 1.7 洛仑兹变换	19
*§ 1.8 洛仑兹逆变换	23
*§ 1.9 速度加法	24
§ 1.10 质量的相对性	26
§ 1.11 质量和能量	30
§ 1.12 质量和能量: 另一推导方法	33
习题	34
第二章 波的粒子性	37
§ 2.1 光电效应	37
§ 2.2 光的量子理论	41
§ 2.3 X 射线	44
§ 2.4 X 射线的衍射	49
§ 2.5 康普顿效应	52
§ 2.6 对产生	57
*§ 2.7 引力红移	58
习题	61

第三章 粒子的波动性	64
§ 3.1 德布罗意波	64
§ 3.2 波函数	65
§ 3.3 德布罗意波的速度	67
§ 3.4 相速度与群速度	70
§ 3.5 粒子的衍射	73
§ 3.6 测不准原理	76
§ 3.7 测不准原理的应用	81
§ 3.8 波-粒二象性	83
习题	86

第二部分 原 子

第四章 原子结构	88
§ 4.1 原子模型	88
*§ 4.2 α 粒子散射	91
*§ 4.3 卢瑟福散射公式	95
§ 4.4 原子的大小	98
§ 4.5 电子轨道	99
§ 4.6 原子光谱	103
§ 4.7 玻尔原子	106
§ 4.8 能级与光谱	109
§ 4.9 原子核的运动	112
§ 4.10 原子的激发	114
§ 4.11 对应原理	116
习题	118
第五章 量子力学	121
§ 5.1 量子力学简引	121
§ 5.2 波动方程	122
§ 5.3 薛定谔方程: 显含时间的形式	124
§ 5.4 期待值	127
§ 5.5 薛定谔方程: 定态的形式	128
§ 5.6 盒中的粒子: 能量量子化	131

§ 5.7	盒中的粒子: 波函数	134
§ 5.8	非刚性盒中的粒子	136
§ 5.9	谐振子	138
*§ 5.10	谐振子: 薛定谔方程的解	143
	习题	148
第六章 氢原子的量子理论		151
§ 6.1	氢原子的薛定谔方程	151
*§ 6.2	分离变量法	153
*§ 6.3	量子数	155
§ 6.4	主量子数	158
§ 6.5	轨道量子数	159
§ 6.6	磁量子数	161
§ 6.7	正常塞曼效应	164
§ 6.8	电子几率密度	166
§ 6.9	辐射跃迁	172
§ 6.10	选择定则	175
	习题	177
第七章 多电子原子		179
§ 7.1	电子自旋	179
§ 7.2	自旋-轨道耦合	183
§ 7.3	不相容原理	185
§ 7.4	电子组态	188
§ 7.5	周期表	190
§ 7.6	洪德定则	197
*§ 7.7	总角动量	198
*§ 7.8	LS 耦合	201
*§ 7.9	jj 耦合	203
*§ 7.10	单电子光谱	205
*§ 7.11	双电子光谱	207
§ 7.12	X 射线谱	210
	习题	212

第三部分 物质的性质

第八章 分子物理学	215
§ 8.1 分子的形成	215
§ 8.2 电子共有	217
§ 8.3 H_2^+ 分子离子	219
§ 8.4 H_2 分子	224
§ 8.5 分子轨函数	226
§ 8.6 杂化轨函数	234
§ 8.7 碳-碳键	237
§ 8.8 转动能级	240
§ 8.9 振动能级	244
§ 8.10 分子的电子光谱	251
习题	254
第九章 统计力学	256
§ 9.1 统计分布律	256
§ 9.2 相空间	257
*§ 9.3 麦克斯韦-玻耳兹曼分布	258
*§ 9.4 常数的计算	262
§ 9.5 理想气体中的分子能量	264
§ 9.6 转动光谱	267
*§ 9.7 玻色-爱因斯坦分布	270
§ 9.8 黑体辐射	272
*§ 9.9 费密-狄喇克分布	277
§ 9.10 结果比较	278
§ 9.11 激光	279
习题	282
第十章 固态	284
§ 10.1 晶态和非晶态固体	284
§ 10.2 离子晶体	285
§ 10.3 共价晶体	292
§ 10.4 范德瓦耳斯力	294
§ 10.5 金属键	297

§ 10.6	固体能带论	300
*§ 10.7	费密能量	304
*§ 10.8	电子能量分布	307
*§ 10.9	布里渊区	308
*§ 10.10	禁带的起源	312
§ 10.11	有效质量	318
	习题	318

第四部分 原子核

第十一章	原子核	321
§ 11.1	原子质量	321
§ 11.2	中子	324
§ 11.3	稳定核	326
§ 11.4	原子核的大小和形状	329
§ 11.5	结合能	331
*§ 11.6	氘核	333
*§ 11.7	氘核的基态	337
§ 11.8	三重态和独态	339
§ 11.9	液滴模型	339
§ 11.10	壳层模型	342
	习题	346
第十二章	核转化	348
§ 12.1	放射性衰变	348
§ 12.2	放射系	352
§ 12.3	α 衰变	354
*§ 12.4	势垒贯穿	357
*§ 12.5	α 衰变理论	362
§ 12.6	β 衰变	365
§ 12.7	逆 β 衰变	368
§ 12.8	γ 衰变	369
§ 12.9	截面	370
§ 12.10	复合核	374

§ 12.11 核裂变	377
§ 12.12 铀后元素	380
§ 12.13 热核能	380
习题	383
第十三章 基本粒子	386
§ 13.1 反粒子	386
§ 13.2 核力的介子理论	388
§ 13.3 π 介子和 μ 子	391
§ 13.4 K 介子和超子	393
§ 13.5 基本粒子的分类	395
§ 13.6 奇异数	399
§ 13.7 同位旋	401
§ 13.8 对称性和守恒原理	403
§ 13.9 基本粒子理论	407
习题	409
奇数习题答案	411
索引	417

第一部分 基本概念

第一章 狭义相对论

我们学习近代物理,以讨论狭义相对论开始。这是一个合乎逻辑的起点,因为物理学的各部分最终都要涉及到测量,而相对论则分析测量如何依赖于观察者及被测对象的问题。在由相对论产生的新力学中,空间与时间之间、质量与能量之间存在着密切的关系。没有这些关系,就不可能弄清楚原子内部的微观世界,而弄清原子内部的结构,是近代物理的中心问题。

§ 1.1 迈克耳孙-莫雷实验

在弄清光波的电磁本质之前几十年,就已经提出了光的波动理论并得到完善。对于光学的先驱者来说,有理由认为光波是在充满整个空间称之为以太的弹性媒质中的一种波动。他们用以太波成功地解释了衍射和干涉现象,致使以太的概念为人熟知,它的存在毫无疑问地被人们接受。1864年麦克斯韦(Maxwell)对光的电磁理论的发展以及1887年赫兹(Hertz)对此所作的实验验证,否定了以太的大多数性质。但在那时,似乎没有人愿意抛弃由以太所表明的基本概念:即光相对于某种普适参考系而传播。我们举一个例子,借助一个简单的类比来说明这个概念的含义。

图1-1是宽度为 D ,流速为 v 的小河简图。两只船以相同的速度 V 从河岸某点出发。 A 船横渡小河,到达对岸与出发点直接相对的一点后返回,而 B 船则顺流前进距离 D 后返回到起点。我们来计算每只船往返所需的时间。

我们先考虑 A 船。如果 A 垂直水流方向横渡小河,则水流将

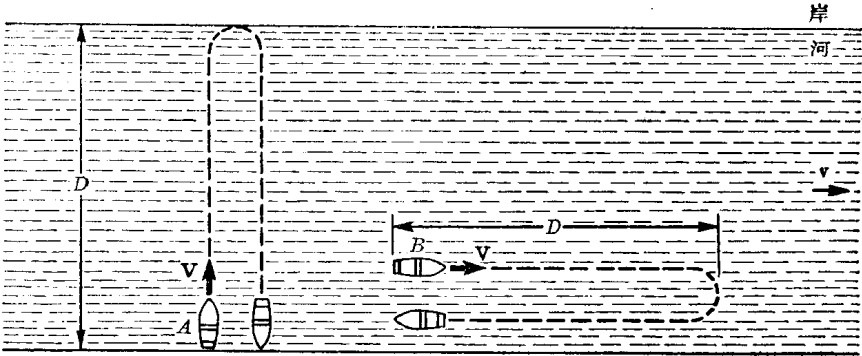


图 1-1 A 船横渡小河然后回到起始点; B 船顺流前进同样距离, 然后回到起点

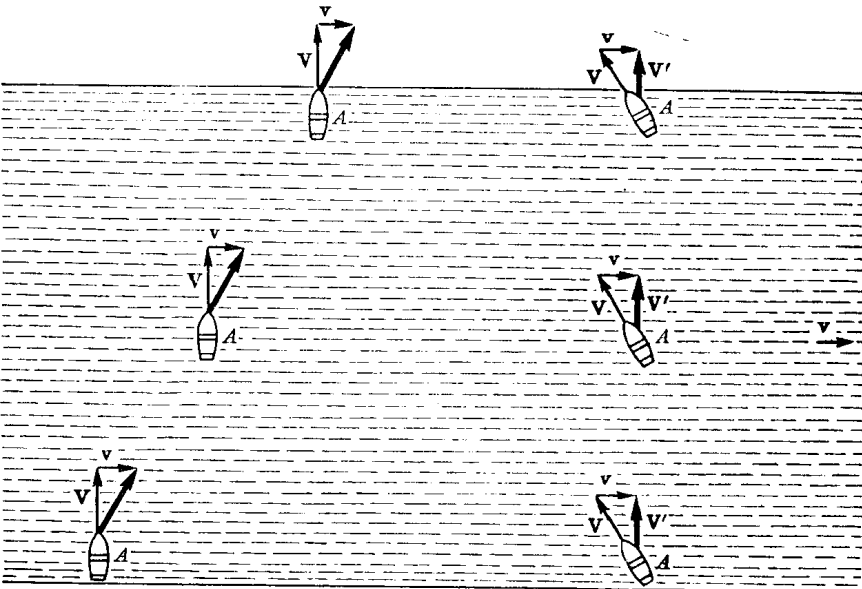


图 1-2 为了补偿水流速, A 船必须逆流前进

使它顺流而下, 偏离对岸的目的地(图 1-2)。因此, 必须稍微逆流而上, 才能补偿水的流动。要达到这个目的, 速度的逆流分量应为 $-v$, 以与水流速度 v 相抵消, 剩下的速度分量 V' 作为船横渡小河的净速度。从图 1-2 我们看到, 这些速度有以下关系:

$$V^2 = V'^2 + v^2,$$

所以 A 船横渡小河的实际速度为

$$V' = \sqrt{V^2 - v^2} = V\sqrt{1 - v^2/V^2}.$$

因此, 过河所需的时间为距离 D 除以速度 V' . 由于返回的时间完全相同, 总的往返时间 t_A 是 D/V' 的两倍, 即写成

$$t_A = \frac{2D/V}{\sqrt{1 - v^2/V^2}}. \quad (1.1)$$

B 船的情况有些不同. 当它顺流前进时, 相对于岸的速度为其自身速度 V 加上水流速度 v (图 1-3), 顺流通过距离 D 的时间为 $D/(V+v)$. 但在其返回的路程中, B 相对于岸的速度为其自身速度 V 减去水流速度 v . 因此返程通过距离 D 回到出发点需要较长的时间 $D/(V-v)$. 总的往返时间 t_B 为两段时间之和, 即

$$t_B = \frac{D}{V+v} + \frac{D}{V-v}.$$

用 $(V+v)(V-v)$ 对两项通分母后, 得

$$\begin{aligned} t_B &= \frac{D(V-v) + D(V+v)}{(V+v)(V-v)} = \frac{2DV}{V^2 - v^2} \\ &= \frac{2D/V}{1 - v^2/V^2}, \end{aligned} \quad (1.2)$$

该时间大于 A 船相应的往返时间 t_A .

时间 t_A 和 t_B 的比值为

$$\frac{t_A}{t_B} = \sqrt{1 - v^2/V^2}. \quad (1.3)$$

如果已知两船的共同的速度 V , 并测量出比值 t_A/t_B , 我们就可以

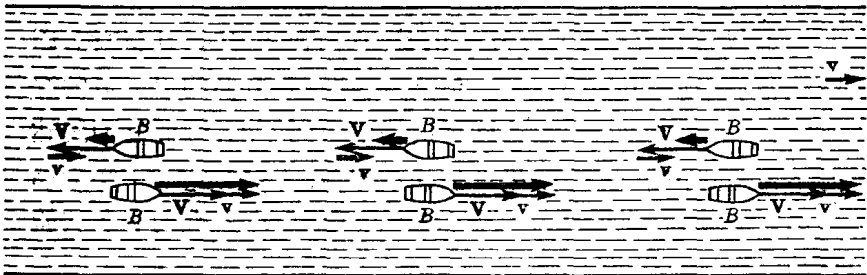


图 1-3 B 船相对于河岸的速度, 顺流时要加上水流速度, 逆流时应减去水流速度

确定水流速度 v 。

上述推理可以用到光波通过以太的类似问题中去。如果有一种充满空间的以太的话，我们至少会以地球围绕太阳作轨道运动的速度 3×10^4 米/秒 (1.85 英里/秒) 通过它；如果太阳也是在运动的话，我们通过以太的速度甚至更大 (图 1-4)。在地球上的观察者看来，以太正在通过地球运动。为了探测这个运动，我们用一半镀银的反射镜形成的两束光代替前面的两只小船 (图 1-5)。其中一束光沿着垂直于以太流的路径直接射向反射镜，另一束光沿着平行于以太流的方向射向反射镜。通过光学装置使两束光回到同一观察屏上。透明玻璃板的作用是使两束光通过空气和玻璃的厚度相同。

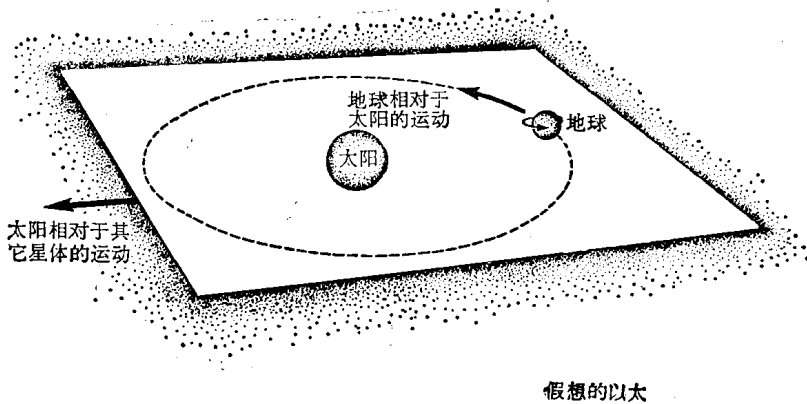


图 1-4 地球相对于假想以太的运动

如果两束光的路程长度完全相同，它们到达屏时为同位相，因而产生相长干涉，出现亮视场。但是，犹如图示方向的以太流的存在，使两束光从半镀银反射镜到屏所需的时间不同，因而它们到达屏时不再是同位相的了，结果产生相消干涉。这就是 1887 年美国物理学家迈克耳孙 (Michelson) 和莫雷 (Morley) 所做的著名实验的要领。

在实际的实验中，两面反射镜不是完全垂直的，其结果由于相邻光波的光程差，在观察屏上出现明暗交替的干涉条纹 (图 1-6)。

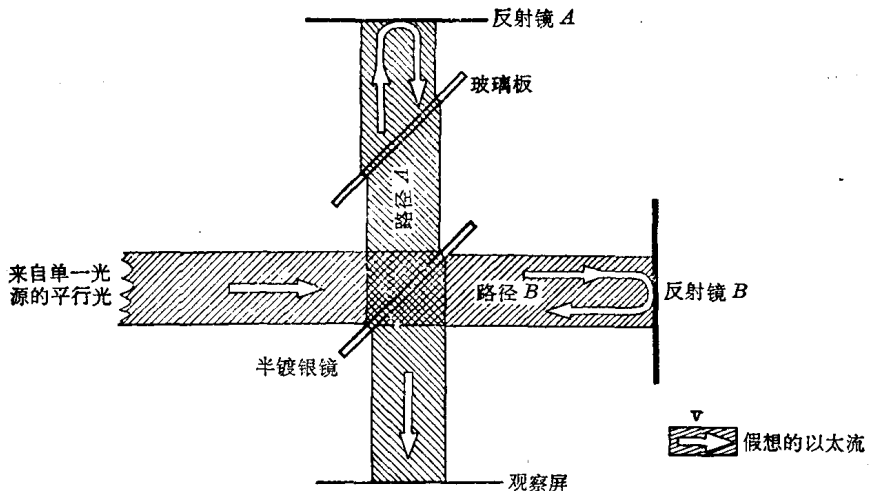


图 1-5 迈克耳孙-莫雷实验

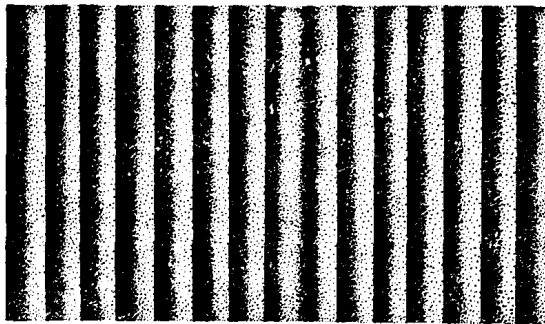


图 1-6 迈克耳孙-莫雷实验中观察到的干涉条纹

如果改变装置中任一光程的长度，当屏上每点的波相继发生增强和减弱时，干涉条纹就沿屏移动。然而，静止的装置无法得知两条光程的时间差，但是，当仪器装置转动 90° 时，两条光程相对于假想的以太流的方位发生变化，因此先前往返需要的时间为 t_A 的光束，现在则需要时间 t_B 了，反之亦然。如果这两个时间不一样，则在转动时干涉条纹将在屏上移动。

我们根据以太理论来计算干涉条纹的移动。由式 (1.1) 和 (1.2) 可得由于以太漂移而形成的两条光程的时间差

$$\Delta t = t_B - t_A = \frac{2D/V}{1 - v^2/V^2} - \frac{2D/V}{\sqrt{1 - v^2/V^2}},$$

这里, v 是以太的速度, 我们取它为地球的轨道速度 3×10^4 米/秒;
 V 为光速 c , $c = 3 \times 10^8$ 米/秒, 因此

$$\frac{v^2}{V^2} = \frac{v^2}{c^2} = 10^{-8},$$

它远小于 1. 根据二项式定理, 当 x 远小于 1 时

$$(1 \pm x)^n \approx 1 \pm nx,$$

所以 Δt 可很好地近似表示为

$$\Delta t = \frac{2D}{c} \left[\left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right) - \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}\right) \right] = \left(\frac{D}{c}\right) \left(\frac{v^2}{c^2}\right),$$

这里 D 是半镀银平面镜和其他任一反射镜间的距离. 与时间差 Δt 对应的光程差 d 为

$$d = c\Delta t.$$

如果 d 相应于 n 条条纹的移动, 则

$$d = n\lambda,$$

式中 λ 是所用光的波长. 令这两个 d 的表示式相等, 我们得到

$$n = \frac{c\Delta t}{\lambda} = \frac{Dv^2}{\lambda c^2}.$$

在实际的实验中, 迈克耳孙和莫雷通过多次反射使 D 的有效长度约为 10 米, 所用光的波长约为 5000 \AA ($1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ 米). 因此, 当仪器转动 90° 时, 每条光程引起的条纹移动数为

$$n = \frac{Dv^2}{\lambda c^2} = \frac{10 \times (3 \times 10^4)^2}{5 \times 10^{-7} \times (3 \times 10^8)^2} = 0.2 \text{ 条}.$$

因为两条光程都引起条纹移动, 所以条纹移动的总数为 $2n$ 或 0.4 条. 这样大小的移动是容易观察到的, 因此迈克耳孙和莫雷指望直接证实以太的存在.

令人惊奇的是, 没有发现任何条纹之移动. 无论实验在不同季节和不同地点进行, 还是为相同目的而进行的其它实验, 结果都是一样: 探测不到通过以太的运动.

迈克耳孙-莫雷实验的负结果得出两个结论. 第一, 实验表明以太没有可观测的性质, 使得以太的假设站不住脚——一度被