

第 1 卷

费曼物理学讲义

R.P. 费曼 著
(美) R.B. 莱登 著
M. 桑兹 著

上海科学技术出版社

THE FEYNMAN LECTURES ON PHYSICS

R. P. Feynman R. B. Leighton M. Sands
Addison-Wesley Publishing Company, 1964

费曼物理学讲义

第一卷

【美】R. P. 费曼 R. B. 莱登 M. 桑兹

本书翻译组译

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

该书在上海发行所发行 浙江湖州印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 33.25 字数 800,000

1983 年 7 月第 1 版 1983 年 7 月第 1 次印刷

印数 1—11,700

统一书号: 13119·1072 定价: (科四) 3.05 元

译者序

六十年代初,美国一些理工科大学鉴于当时的大学基础物理教学与现代科学技术的发展不相适应,纷纷试行教学改革,加利福尼亚理工学院就是其中之一。该校于1961年9月至1963年5月特请著名物理学家理查德·费曼主讲一、二年级的基础物理课,事后又根据讲课录音编辑出版了《费曼物理学讲义》。本讲义共分三卷,第一卷包括力学、相对论、光学、气体分子运动论、热力学、波等,第二卷主要是电磁学,第三卷是量子力学。全书内容十分丰富,在深度和广度上都超过了传统的普通物理教材。

当时美国大学物理教学改革试图解决的一个主要问题是基础物理教学应尽可能反映近代物理的巨大成就。《费曼物理学讲义》在基础物理的水平上对二十世纪物理学的两大重要成就——相对论和量子力学——作了系统的介绍,对于量子力学,费曼教授还特地准备了一套适合大学二年级水平的讲法。教学改革试图解决的另一个问题是按照当前物理学工作者在各个前沿研究领域所使用的方式来介绍物理学的内容。在《费曼物理学讲义》一书中对一些问题的分析和处理方法反映了费曼自己以及其他在前沿研究领域工作的物理学家所通常采用的分析和处理方法。全书对基本概念、定理和定律的讲解不仅生动清晰,通俗易懂,而且特别注重从物理上作出深刻的叙述。为了扩大学生的知识面,全书还列举了许多基本物理原理在各个方面(诸如天体物理、地球物理、生物物理等)的应用,以及物理学的一些最新成就。由于全书是根据课堂讲授的录音整理编辑的,它在一定程度保留了费曼讲课的生动活泼、引人入胜的独特风格。

《费曼物理学讲义》从普通物理水平出发,注重物理分析,深入浅出,避免运用高深烦琐的数学方程,因此具有高中以上物理水平和初等微积分知识的读者阅读起来不会感到十分困难。至于大学物理系的师生和物理工作者更能从此书中获得教益。为此我们特将此书译成中文,以飨读者。本书的序言和编者的话、第一至十章、十五、十六章、三十七至四十八章、五十二章由吴子仪翻译,第十一章、十七至二十五章由华宏鸣翻译,第十二章、四十九章由诸长生翻译,第十三、十四章由范膺翻译,第二十六至三十四章由郑永令翻译,第三十五、三十六章由潘笃武翻译,第五十、五十一章由钟万衡翻译。第五、六、七、十五、十六、二十六、二十七、三十五、三十六诸章由王福山校阅,第八、九、十、十一、十七至二十五诸章由苏汝铿校阅,其余各章由郑广垣校阅。此外,郑广垣还统校了第一卷全书。由于译者水平所限,错误在所难免,欢迎广大读者批评指正。

《费曼物理学讲义》第1卷翻译组

1982年7月

序 言

这是我前年与去年在加利福尼亚理工学院对一、二年级学生讲授物理学的讲义。当然，这本讲义并不是课堂讲授的逐字逐句记录，而是或多或少地经过编辑加工的。我们的课堂讲授只是整个课程的一个部分。180个学生每周两次聚集在大教室里听课，然后分成15到20人的小组由助教进行辅导。此外，每周还有一次实验课。

在这些讲授中，我们想要抓住的特殊问题是，要使充满热情而又相当聪明的中学毕业生进入加利福尼亚理工学院后仍旧保持他们的兴趣。在进入学院前，他们就听到过不少关于物理学——相对论、量子力学以及其他的新概念如何有趣以及如何引人入胜。但是，一旦他们学完两年以前的那种课程后，许多人就泄气了，因为教给他们的很少是意义重大、新颖和现代的物理概念。他们所要学习的只是斜面、静电学以及诸如此类的内容，两年过去，不免相当失望。因此，问题在于，我们是否能够设置一门课程来顾全那些比较优秀的、兴致勃勃的学生，使其保持求知热情。

我们的讲授丝毫不意味着仅仅是介绍一些概况，而是需要极其认真对待的。我设想这些课程是对班级中最聪明的学生而讲的，并且可能的话，如果在主要内容之外再从各方面提出有关概念的应用，那么甚至最聪明的学生也无法完全消化讲课中的所有内容。不过，为了这个缘故，我企图尽量使所有的陈述尽可能准确，并在每种场合都指明有关的方程式和概念在物理学的整体中占有什么地位，以及随着学习的深入，应怎样作出修正。我还感到，重要的是要向这样的学生指出，他们应能理解——如果他们够聪明的话——哪些是从已学过的内容中推演出来的结论，哪些是作为新的概念而引进的。当出现新的概念时，假若这些概念是可推演的，我就尽量把它们推演出来，否则就直接说明这是一个新的概念，它根本不能用已学过的东西来阐明，也不可能予以证明，因而是直接引进的。

在开始讲授时，我假定学生们在中学已学过一些内容，如几何光学、简单的化学概念等等。而且我看不出有任何理由要按一定的次序——也就是说在准备详细讨论某些内容之前，不得不提到这些内容——来讲授。在讲授中，我曾提到过许多内容，而没有进行充分讨论。比较完整的讨论要到以后学生的预备知识更齐全时再进行。电感和能级的概念就是两个例子；起先，只是以非常定性的方式引入这些概念，后来再进行较全面的讨论。

在针对那些较积极的学生的同时，我也希望照顾到另一些学生；对他们来说，所有这些外加的概念和次要的应用只会使其感到头痛，也根本不能要求他们掌握讲授中的大部分内容。对这些学生而言，我希望至少会有一个他们能学到手的中心内容或主要材料。即使他们中间的一位不理解一堂课中的所有内容，我希望他也不要紧张不安。我并不要求他理解所有的内容，只要求他理解最核心和最直接的特征。当然，他也应当具有一定的理解能力，来领会哪些是主要定理和主要概念，哪些则是需要进一步发挥的枝节问题和应用，后者只有在以后他才会理解。

在讲课中出现的一个严重困难是：关于讲授的效果究竟如何，缺乏来自学生的任何反

应。这的确是一个很严重的困难，我不知道讲课的实际效果有多大。整个事情实质上是一种尝试。假如要再讲一次的话，我将不会按同样的方式去讲——我希望我不会再来一次！然而，我想就物理内容来说，第一年的情形还是不错的。

但在第二年，我就不那么满意了。课程的第一部分涉及电学和磁学，我想不出什么真正独特的或不同的处理方法，也想不出什么比通常的讲授方式格外引人入胜的处理方法。因此在讲授电磁学时，我并不认为自己做了很多事情。在第二年末，我原来打算在电磁学后再讲一些物性方面的内容，主要讨论基本模式，扩散方程的解，振动系统，正交函数等等，并且阐述通常称为《数理方法》的初等部分内容。回顾起来，我想如果再讲一次的话，就必然要回到原来的想法上去，但由于没有要我再讲一次这种课程的打算，有人就建议介绍一些量子力学——就是你们将在第三卷中见到的——或许是有益的。

显然，主修物理学的学生们可以等到第三年再学量子力学。但是，另一方面，有一种说法认为许多听课的学生只是把学习物理作为他们学习其他专业的基础；而通常处理量子力学的方式使得大多数学生几乎无法利用这门学科，因为他们必须花费相当长的时间来学习它。然而，在量子力学的实际应用中——特别是较复杂的应用中，如电机工程和化学领域内，整个微分方程的处理方法实际上是用不到的。所以，我试图这样来描述量子力学的原理，即不要求学生首先掌握有关偏微分方程的数学。我想，即使对一个物理学家来说，由于在讲课中会明了的种种理由，试图按照这种颠倒的方式来介绍量子力学也是一件有趣的事。不过我认为，在量子力学方面的尝试不是很成功的，这主要是因为到最后我实际上已没有足够的时间（例如，我应该再多讲三、四次来比较完整地讨论能带、几率幅的空间相倚性等这类问题）。而且，我过去从未以这种方式讲授过这部分课程，因此缺乏来自学生的反应就尤其严重了。我现在相信，还是应当迟一些讲授量子力学。或许总有一天我还会有机会来讲授这部分内容，到那时我将尽量讲好它。

在这本讲义中没有列入有关解题的内容，这是因为另有辅导课。虽然在第一年中，我的确讲授过三次关于怎样解题的内容，但没有将它们收在这里。此外，在转动系统后面还讲过一次惯性导航，遗憾的是在这里也略去了。第五讲和第六讲实际上是桑兹 (Matthew Sands) 讲授的，那时我正外出。

当然，问题在于我们这个尝试的效果究竟如何。我个人的看法是悲观的，虽然与学生接触的大部分教师似乎并不这样看。我并不认为自己在对待学生方面做得很出色。当我看到大多数学生在考试中采取的处理问题的方法时，我认为这种方式是失败了。当然，朋友们提醒我，也有一、二十来个学生——非常出人意外地——几乎理解讲授的全部内容，并且非常积极地攻读有关材料，兴奋地、感兴趣地钻研许多问题。我相信，这些学生现在已具备了第一流的物理基础，他们毕竟是我想要培养的学生。但是，这一点正如吉本斯 (Gibbons) 所指出的“教育之力量鲜见成效，除非施之于天资敏悟者，然若此又实为多余。”

或许我曾经把一些学生丢在一边，但是，我并不希望使任何一个学生完全落在后面。我想，我们能够更好地帮助学生的一个办法是，多花一些精力去编纂一批能够阐明讲课中的某些概念的习题。习题能够充实课堂讲授，使讲过的概念更加实际，更加完整和更加易于牢记。

然而，我认为要解决这个教育问题就要认识到只有当学生和优秀的教师之间建立起个人的直接联系——这时学生可以讨论概念，考虑问题，谈论问题——才能教好学好，除此之

外,别无其他办法. 仅仅坐着听课或者只做指定的习题是不可能学到许多东西的. 但是,现在我们有这么多学生要教育,因此我们必须尽量找出一种代替理想情况的办法. 或许,我的讲义可以作出一些贡献; 也许在某些小地方有个别教师和学生会从讲义中受到一些启示或获得某些观念,也许他们乐于彻底思考讲授内容,或者乐于进一步发展其中的一些想法.

R. P. 费曼

1963年6月

编者的话

本书是根据 R. P. 费曼教授在加利福尼亚理工学院 1961~62 学年所讲物理学导论课编写的;它包括全校一、二年级学生念的二年导论课的第一年的内容,在 1962~63 学年还继续讲授了这门课程的第二年的内容。这些讲授构成四年来对导论课所作的根本性修改的主要部分。

课程要进行彻底的修改,不但是由于近数十年来物理学迅速发展的需要,而且还有鉴于高中数学课内容改进后,入校新生的数学能力有了稳步的提高。我们希望利用有利的条件,并且希望能在课程中介绍足够的现代题材,从而使这门课程能引起学生的注意和兴趣,并能体现出现代物理的状况。

在应当包括哪些内容上以及怎样介绍这些内容方面,为了能形成各种想法,我们鼓励物理系的许多教师以提纲的形式对课程的修改提出意见。人们对其中的几种想法进行了详细的讨论和评论。大家几乎立即认为仅仅换一本教科书或者重新写一本教科书,是不可能完成这门课程的彻底修改的。新的课程应当以每周讲二、三次的一系列讲授为中心,而相应的教材编写则作为次要的工作,在讲课的同时,也要安排适当的实验来配合讲授内容。据此提出了课程的初步轮廓。但大家也认识到,这是不完全的和试验性的,有待于实际承担讲授工作的人作出相当大的修改。

关于最后究竟以什么方式来编写好这门课程,大家考虑过几种方案。这些方案大多类似,由 N 个人进行合作,均匀地分担责任,即每个人负责编写 $1/N$ 的材料,进行讲授,并使他这部分成文。然而,由于没有足够的教师,同时因为参加者的个性与哲学见解不同,很难保持一致的观点。因此这种方案看来难以实现。

桑兹教授令人鼓舞的想法是他领悟到,我们实际上所拥有的能力不只是可以建立一门新的、不同的物理课程,而且有可能创立一门完全独特的课程。他建议由费曼教授来准备和进行讲授,并用磁带录音。将这些录音抄写出来并加以编辑,就成为新课程的教科书了。我们所采用的基本上就是这样的方案。

起先我们估计必要的编辑工作不会很多,大体上只是一些补充图画、核对标点、语法之类的事,完全可以由一、二个研究生花部分时间去完成。遗憾的是我们很快就发现这种估计是不正确的。事实上,即使对题材不进行重新组织或修改——有时这是必要的,只是把逐字逐句的记录改写成可供阅读的形式,就需要相当多的编辑工作。而且,这不是一个技术编辑或一个研究生就能办得了的事,而是需要一位专业物理工作者对每次讲授的内容专心一致地花上 10 到 20 小时才行!

编辑任务的艰巨,再加上要尽快把材料发给学生,这就大大地限制了对材料所能作出的推敲润饰工作。因此,我们只能指望完成一本初步的、但专业上保持正确的、立即可以使用的讲义,而不是一本可视为最终的或完备的讲义。由于本校学生急需的份数较多,同时还由于一些校外师生的鼓励和关心,我们决定不再等待进一步的大量修改——这样的工作也许

不再会做——就将这些材料以这种初步的形式出版。我们对内容的完整,文体的流畅或组织的逻辑性都不抱幻想;事实上,我们打算在最近的将来对课程作一些小的修改,并且希望它无论在形式上还是在内容上,都不要停滞不前。

除去构成课程核心部分的讲授外,还有必要向学生提供适当的练习来启发他们的经验和才智,以及提供适当的实验使他们在实验室中能与讲课内容有第一手的接触。这两方面都还没有象讲课内容那样成熟,但也都取得了很大的进展。在讲授过程中已选编了一些习题,并已进行增补扩充以供下一年使用。然而,我们还不能认为,在应用讲课内容方面,这些习题已具有足够的深度和广度,从而可使学生充分发挥其才智。所以,我们将这本习题集单独出版,以便鼓励经常的修订。

尼赫尔(H. V. Neher)教授为新课程设想了许多新实验。其中有几个实验利用了空气轴承所显示的极低摩擦,例如新的直线气槽,用它可以对一维运动、碰撞和简谐振动作定量测量;利用空气支承、空气驱动的麦克斯韦陀螺可以研究加速转动,回转仪的进动和章动。预计发展新的供实验室用的实验这件事将会持续相当一段时间。

R. B. 莱登

1963年7月

第 1 章 原子的运动1	§ 7-2 开普勒定律63
§ 1-1 引言1	§ 7-3 动力学的发展64
§ 1-2 物质是原子构成的2	§ 7-4 牛顿引力定律65
§ 1-3 原子过程5	§ 7-5 万有引力67
§ 1-4 化学反应7	§ 7-6 开文迪士实验71
第 2 章 基本物理10	§ 7-7 什么是引力?72
§ 2-1 引言10	§ 7-8 引力与相对论74
§ 2-2 1920 年以前的物理学12	第 8 章 运动75
§ 2-3 量子物理学15	§ 8-1 运动的描述75
§ 2-4 原子核与粒子17	§ 8-2 速率77
第 3 章 物理学与其他科学的关系21	✓ § 8-3 速率作为导数80
§ 3-1 引言21	✓ § 8-4 距离作为积分81
§ 3-2 化学21	§ 8-5 加速度82
§ 3-3 生物学22	第 9 章 牛顿的动力学定律86
§ 3-4 天文学23	§ 9-1 动量和力86
§ 3-5 地质学27	§ 9-2 速率与速度87
§ 3-6 心理学28	§ 9-3 速度、加速度以及力的分量88
§ 3-7 情况何以会如此?29	§ 9-4 什么是力?88
第 4 章 能量守恒31	✓ § 9-5 动力学方程的含义89
§ 4-1 什么是能量31	✓ § 9-6 方程的数值解90
§ 4-2 重力势能32	§ 9-7 行星运动92
§ 4-3 动能36	第 10 章 动量守恒96
§ 4-4 能量的其他形式56	§ 10-1 牛顿第三定律96
第 5 章 时间与距离40	§ 10-2 动量守恒97
§ 5-1 运动40	§ 10-3 动量是守恒的!99
§ 5-2 时间40	§ 10-4 动量和能量102
§ 5-3 短的时间41	§ 10-5 相对论性动量103
§ 5-4 长的时间43	✓ 第 11 章 矢量106
§ 5-5 时间的单位和标准44	§ 11-1 物理学中的对称性106
§ 5-6 长的距离45	§ 11-2 平移106
§ 5-7 短的距离47	§ 11-3 转动108
第 6 章 几率51	§ 11-4 矢量110
§ 6-1 机会和可能性51	§ 11-5 矢量代数111
§ 6-2 起伏53	§ 11-6 牛顿定律的矢量表示法113
§ 6-3 无规行走55	§ 11-7 矢量的标积114
§ 6-4 几率分布58	第 12 章 力的特性117
§ 6-5 测不准原理61	§ 12-1 什么是力117
第 7 章 万有引力理论63	§ 12-2 摩擦119
§ 7-1 行星运动63	§ 12-3 分子力121

§ 12-4	基本力, 场	123	§ 19-4	转动动能	191
§ 12-5	摩擦力	126	第 20 章	空间转动	194
§ 12-6	核力	123	§ 20-1	三维空间中的转矩	194
第 13 章	功与势能(上)	129	§ 20-2	用叉积表示的转动方程式	197
§ 13-1	落体的能量	129	§ 20-3	回转器	198
§ 13-2	万有引力所作的功	131	§ 20-4	固体的角动量	201
§ 13-3	能量的求和	134	第 21 章	谐振子	202
§ 13-4	巨大物体的引力场	136	§ 21-1	线性微分方程	202
第 14 章	功与势能(下)	139	§ 21-2	谐振子	202
§ 14-1	功	139	§ 21-3	简谐运动和圆周运动	205
§ 14-2	约束运动	140	§ 21-4	初始条件	205
§ 14-3	保守力	141	§ 21-5	受迫振动	207
§ 14-4	非保守力	144	第 22 章	代数学	208
§ 14-5	势与场	145	§ 22-1	加法和乘法	208
第 15 章	狭义相对论	148	§ 22-2	逆运算	209
§ 15-1	相对性原理	148	§ 22-3	抽象和推广	210
§ 15-2	洛伦兹变换	150	§ 22-4	无理数的近似计算	211
§ 15-3	迈克耳孙-莫雷实验	150	§ 22-5	复数	214
§ 15-4	时间的变换	152	§ 22-6	虚指数	216
§ 15-5	洛伦兹收缩	154	第 23 章	共振	219
§ 15-6	同时性	155	§ 23-1	复数和简谐运动	219
§ 15-7	四维矢量	155	§ 23-2	有阻尼的受迫振子	220
§ 15-8	相对论动力学	156	§ 23-3	电共振	223
§ 15-9	质能相当性	157	§ 23-4	自然界中的共振现象	225
第 16 章	相对论中的能量与动量	159	第 24 章	瞬变态	229
§ 16-1	相对论与哲学家	159	§ 24-1	振子的能量	229
§ 16-2	孪生子佯谬	161	§ 24-2	阻尼振动	231
§ 16-3	速度的变换	162	§ 24-3	电瞬变态	233
§ 16-4	相对论性质量	164	第 25 章	线性系统及其综述	235
§ 16-5	相对论性能量	166	§ 25-1	线性微分方程	235
第 17 章	空间-时间	169	§ 25-2	解的迭加	236
§ 17-1	空-时几何学	169	§ 25-3	在线性系统中的振动	239
§ 17-2	空-时间隔	171	§ 25-4	物理学中的类比	241
§ 17-3	过去, 现在和将来	172	§ 25-5	串联和并联阻抗	242
§ 17-4	四维矢量的进一步讨论	173	第 26 章	光学: 最短时间原理	244
§ 17-5	四维矢量代数	175	§ 26-1	光	244
第 18 章	两维空间中的转动	178	§ 26-2	反射与折射	245
§ 18-1	质心	178	§ 26-3	费马最短时间原理	246
§ 18-2	刚体的转动	179	§ 26-4	费马原理的应用	248
§ 18-3	角动量	182	§ 26-5	费马原理的更精确表述	251
§ 18-4	角动量守恒	183	§ 26-6	最短时间原理是怎样起作用的	252
第 19 章	质心, 转动惯量	185	第 27 章	几何光学	253
§ 19-1	质心的性质	185	§ 27-1	引言	253
§ 19-2	质心位置的确定	187	§ 27-2	球面的焦距	253
§ 19-3	转动惯量的求法	188			

§ 27-3	透镜的焦距	256	§ 33-7	反常折射	316
§ 27-4	放大率	258	第 34 章	辐射中的相对论性效应	319
§ 27-5	透镜组	258	§ 34-1	运动辐射源	319
§ 27-6	象差	259	§ 34-2	求“表观”运动	320
§ 27-7	分辨本领	260	§ 34-3	同步加速器辐射	321
第 28 章	电磁辐射	262	§ 34-4	宇宙中的同步加速器辐射	323
§ 28-1	电磁学	262	§ 34-5	韧致辐射	325
§ 28-2	辐射	264	§ 34-6	多普勒效应	325
§ 28-3	偶极辐射子	265	§ 34-7	ω, k 四元矢量	327
§ 28-4	干涉	267	§ 34-8	光行差	328
第 29 章	干涉	269	§ 34-9	光的动量	329
§ 29-1	电磁波	269	第 35 章	色视觉	331
§ 29-2	辐射的能量	270	§ 35-1	人眼	331
§ 29-3	正弦波	270	§ 35-2	颜色依赖于光的强度	332
§ 29-4	两个偶极辐射子	271	§ 35-3	色感觉的测量	333
§ 29-5	干涉的数学	274	§ 35-4	色品图	337
第 30 章	衍射	277	§ 35-5	色视觉的机制	338
§ 30-1	n 个相同振子的合振幅	277	§ 35-6	色视觉的生理化学	339
§ 30-2	衍射光栅	279	第 36 章	视觉的机制	342
§ 30-3	光栅的分辨本领	282	§ 36-1	颜色的感觉	342
§ 30-4	抛物形天线	283	§ 36-2	眼睛的生理学	344
§ 30-5	彩色薄膜, 晶体	284	§ 36-3	杆状细胞	347
§ 30-6	不透明屏的衍射	284	§ 36-4	(昆虫的)复眼	348
§ 30-7	振荡电荷组成的平面所产生的场	286	§ 36-5	其他的眼睛	351
第 31 章	折射率的起源	289	§ 36-6	视觉的神经学	351
§ 31-1	折射率	289	第 37 章	量子行为	356
§ 31-2	物质引起的场	292	§ 37-1	原子力学	356
§ 31-3	色散	293	§ 37-2	子弹的实验	357
§ 31-4	吸收	295	§ 37-3	波的实验	358
§ 31-5	电波所携带的能量	296	§ 37-4	电子的实验	359
§ 31-6	屏的衍射	297	§ 37-5	电子波的干涉	361
第 32 章	辐射阻尼, 光的散射	300	§ 37-6	追踪电子	362
§ 32-1	辐射电阻	300	§ 37-7	量子力学的基本原理	365
§ 32-2	能量辐射率	301	§ 37-8	测不准原理	366
§ 32-3	辐射阻尼	302	第 38 章	波动观点与粒子观点的关系	368
§ 32-4	独立的辐射源	304	§ 38-1	几率波幅	368
§ 32-5	光的散射	305	§ 38-2	位置与动量的测量	369
第 33 章	偏振	309	§ 38-3	晶体衍射	371
§ 33-1	光的电矢量	309	§ 38-4	原子的大小	373
§ 33-2	散射光的偏振性	310	§ 38-5	能级	374
§ 33-3	双折射	311	§ 38-6	哲学含义	375
§ 33-4	起偏振器	312	第 39 章	气体分子运动论	378
§ 33-5	旋光性	313	§ 39-1	物质的性质	378
§ 33-6	反射光的强度	314	§ 39-2	气体的压强	379

§ 39-3	辐射的压缩性	383	§ 46-4	不可逆性	453
§ 39-4	温度和动能	383	§ 46-5	序与熵	460
§ 39-5	理想气体定律	387	第 47 章	声, 波动方程	462
第 40 章	统计力学原理	390	§ 47-1	波	462
§ 40-1	大气的指数变化律	390	§ 47-2	声的传播	464
§ 40-2	玻尔兹曼定律	391	§ 47-3	波动方程	465
§ 40-3	液体的蒸发	392	§ 47-4	波动方程的解	467
§ 40-4	分子的速率分布	393	§ 47-5	声速	468
§ 40-5	气体比热	396	第 48 章	拍	470
§ 40-6	经典物理的失败	398	§ 48-1	两列波的相加	470
第 41 章	布朗运动	401	§ 48-2	拍符和调制	472
§ 41-1	能量均分	401	§ 48-3	旁频带	473
§ 41-2	辐射的热平衡	403	§ 48-4	定域波列	474
§ 41-3	能量均分与量子涨落	406	§ 48-5	粒子的几率幅	476
§ 41-4	无规行走	409	§ 48-6	三维空间的波	478
第 42 章	分子运动论的应用	412	§ 48-7	简正模式	479
§ 42-1	蒸发	412	第 49 章	波模	481
§ 42-2	热离子发射	415	§ 49-1	波的反射	481
§ 42-3	热电离	416	§ 49-2	具有固有频率的约束波	482
§ 42-4	化学动力学	417	§ 49-3	二维波模	484
§ 42-5	爱因斯坦辐射律	419	§ 49-4	耦合摆	486
第 43 章	扩散	422	§ 49-5	线性系统	487
§ 43-1	分子间的碰撞	422	第 50 章	谐波	489
§ 43-2	平均自由程	424	§ 50-1	乐音	489
§ 43-3	漂移速率	425	§ 50-2	傅里叶级数	490
§ 43-4	离子导电性	427	§ 50-3	音色与谐和	491
§ 43-5	分子扩散	428	§ 50-4	傅里叶系数	493
§ 43-6	热导率	430	§ 50-5	能量定理	495
第 44 章	热力学定律	432	§ 50-6	非线性响应	496
§ 44-1	热机, 第一定律	432	第 51 章	波	499
§ 44-2	第二定律	434	§ 51-1	弦波	499
§ 44-3	可逆机	435	§ 51-2	冲击波	500
§ 44-4	理想热机的效率	438	§ 51-3	固体中的波	502
§ 44-5	热力学温度	440	§ 51-4	表面波	505
§ 44-6	熵	441	第 52 章	物理定律的对称性	509
第 45 章	热力学示例	445	§ 52-1	对称操作	509
§ 45-1	内能	445	§ 52-2	空间与时间的对称性	509
§ 45-2	应用	448	§ 52-3	对称性与守恒定律	512
§ 45-3	克劳胥斯-克拉珀龙方程	450	§ 52-4	镜面反射	512
第 46 章	棘轮和掣爪	454	§ 52-5	极矢量与轴矢量	514
§ 46-1	棘轮是怎样工作的	454	§ 52-6	哪一只右手!	516
§ 46-2	作为热机的棘轮	455	§ 52-7	宇称不守恒!	517
§ 46-3	力学中的可逆性	457	§ 52-8	反物质	518
			§ 52-9	不完整的对称性	519

§ 1-1 引 言

这是一门两学年的物理课，我们开设这门课程是着眼于你们，读者们，将成为物理学工作者。当然，情况并非一定如此，但是每门学科的教授都是这样设想的！假如你打算成为一个物理学工作者，就要学习很多东西；这是一个 200 年以来空前蓬勃发展的知识领域。事实上，你会想到，这么多的知识是不可能四年内学完的，确实不可能；你们还得到研究院去继续学习。

相当出人意外的是，尽管在这么长时间中做了极其大量的工作，但却有可能把这一大堆成果大大地加以浓缩。这就是说，找到一些概括我们所有知识的定律。不过，即使如此，掌握这些定律也是颇为困难的。因此，在你对科学的这部分与那部分题材之间的关系还没有一个大致的了解之前就让你去钻研这个庞大的课题的话，就不公平了。根据这种看法，前三章将略述物理学与其他科学的关系，各门学科之间的相互联系以及科学的含义，这有助于你们对本学科产生一种切身的感受。

你们可能会问，在讲授欧几里德几何时，先是陈述公理，然后作出各种各样的推论，那为什么在讲授物理学时不能先直截了当地列出基本定律，然后再就一切可能的情况说明定律的应用呢？（这样一来，如果你不满足于要花四年时间来学习物理，那你是否打算在 4 分钟内学完它？）我们不能这样做是由于两个理由。第一，我们还不知道所有的基本定律：未知领域的边界在不断地扩展。第二，正确地叙述物理定律要涉及到一些非常陌生的概念，而叙述这些概念又要用到高等数学。因此，即使为了知道词的含义，也需要大量的预备性的训练。的确，那样做是行不通的，我们只能一步一步地来。

大自然整体的每一部分始终只不过是对于整个真理——或者说，对于我们至今所了解的整个真理——的逼近。实际上，人们知道的每件事都只是某种近似，因为我们懂得，到目前为止，我们确实还不知道所有的定律，因此，我们之所以需要学习一些东西，正是为了要抛弃以前的谬见，或者更可能的是为了改正以前的谬见。

科学的原则——或者简直可称为科学的定义为：实验是一切知识的试金石。实验是科学“真理”的唯一鉴定者。但是什么是知识的源泉呢？那些要检验的定律又是从何而来的呢？从某种意义上说，实验为我们提供了种种线索，因此可以说是实验本身促成了这些定律的产生。但是，要从这些线索中作出重大的判断，还需要有丰富的想象力去对蕴藏在所有这些线索后面的令人惊讶、简单、而又非常奇特的图象进行猜测，然后，再用实验来验证我们的猜测究竟对不对。这个想象过程是很艰难的，因此在物理学中有所分工，理论物理学家进行想象、推演和猜测新的定律，但并不做实验；而实验物理学家则进行实验、想象、推演和猜测。

我们说过，自然的定律是近似的：起先我们找到的是“错”的定律，然后才发现“对”的定律。那么，一个实验怎么可能是“错误”的呢？首先，通常是：仪器上有些毛病，而你又没有注

意,但是这种问题是容易确定的,可以反复检查. 如果不去纠缠在这种次要的问题上,那么实验的结果怎么可能是错误的呢? 这只能是由于不够精确罢了. 例如,一个物体的质量似乎是从来不变的:转动的陀螺与静止的陀螺一样重. 结果就发现了一条“定律”:质量是个常数,与速率无关. 然而现在发现这条“定律”却是不正确的. 质量实际上随着速度的加大而增加,但是要速度接近于光速,才会显著增加. 正确的定律是:如果一个物体的速率小于100海里/秒,那么它的质量的变化不超过百万分之一. 在这种近似形式下,这就是一条正确的定律. 因此,人们可能认为新的定律实际上并没有什么有意义的差别. 当然,这可以说对,也可以说不对. 对于一般的速率我们当然可以忘掉它,而用简单的质量守恒定律作为一种很好的近似. 但是对于高速情况这就不正确了:速率越高,就越不正确.

最后,最有趣的是,就哲学上而言,使用近似的定律是完全错误的. 纵然质量的变化只是一点点,我们的整个世界图景也得改变. 这是有关在定律后面的哲学或基本观念的一件十分特殊的事. 即使是极小的效应有时在我们的观念上也要引起深刻的变化.

那么,我们应该首先教什么呢? 是否应先教那些正确的、陌生的定律以及有关的奇特而困难的观念,例如相对论,四维时空等等之类? 还是应先教简单的“质量守恒”定律,即那条虽然只是近似的,但并不包含那种困难的观念的定律? 前一条定律比较引人入胜,比较奇特和比较有趣,但是后一条定律在开始时比较容易掌握,它是真正理解前一种观念的第一步. 这个问题在物理教学中会一再出现,在不同的时候,我们将要用不同的方式去解决它. 但是在每个阶段都值得去弄明白:我们现在所知道的是什么,它的正确性如何,它怎样适应其他各种事情,以及当我们进一步学习后它会有怎样的变化.

让我们按照我们所理解的当代科学(特别是物理学,但是也包括周围有关的其他科学)的轮廓继续讲下去,这样,当我们以后专门注意某些特殊问题时,就会对于背景情况有所了解——为什么这些特殊问题是有趣的,它们又是怎样适应整体结构的.

那么,我们世界的总体图象是怎样的呢?

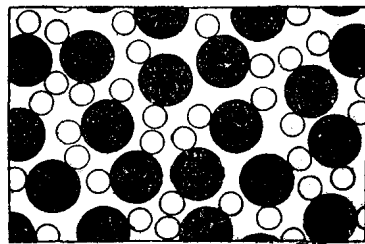
§ 1-2 物质是原子构成的

假如由于某种大灾难,所有的科学知识都丢失了,只有一句话传给下一代,那么怎样才能用最少的词汇来表达最多的信息呢? 我相信这句话是原子的假设(或者说原子的事实,无论你愿意怎样称呼都行):所有的物体都是用原子构成的——这些原子是一些小小的粒子,它们一直不停地运动着. 当彼此略微离开时相互吸引,当彼此过于挤紧时又互相排斥. 只要稍微想一下,你就会发现,在这一句话中包含了大量的有关世界的信息.

为了说明原子观念的重要作用,假设有一滴直径为 $1/4$ 英寸的水滴,即使我们非常贴近地观察,也只能见到光滑的、连续的水,而没有任何其他东西. 并且即使我们用最好的光学显微镜(大致可放大2000倍)把这滴水放大到40英尺左右(相当于一个大房间那样大),然后再靠得相当近地去观察,我们所看到的仍然是比较光滑的水,不过到处有一些足球状的东西在来回游动,非常有趣. 这些东西是草履虫. 你们可能就到此为止,对草履虫以及它的摆动的纤毛和卷曲的身体感到十分好奇. 也许除了把草履虫放得更大一些,看看它的内部外,就不再进一步观察了. 当然这是生物学的课题,但是现在我们继续观察下去,再把水放大2000倍更接近地观察水这种物质本身. 这时,水滴已放大到有15英里那样大了,如果你再十分贴近地观察,你将看到水中充满了某种不再具有光滑外表的东西,而是有些象从远处看

过去挤在足球场上的人群。为了能看出挤满的究竟是些什么东西，我们再把它放大250倍后就会看到某种类似于图1-1所示的情形。这是放大了

10亿倍的水的图象，但是在以下这几方面是理想化了的。首先，各种粒子用简单的方式画成有明显的边缘，这是不精确的。其次，为了简便起见，把它们都画成二维的排列，实际上它们当然是在三维空间中运动的。注意在图中有两类“斑点”或圆，它们各表示氧原子(黑色)和氢原子(白色)，而每个氧原子有两个氢原子和它联结在一起(一个氧原子与两个氢原子组成的一个小组称为一个分子)。图象中还有一个被理想化的地方是自然界中的真实粒子总是在不停地跳动，彼此绕来绕去地转着，因而你必须把这幅画面想象成能动的而不是静止的。另一件不能在图上说明的事实是粒子为“粘在一起”的，它们彼此吸引着，这个被那个拉住等等，可以说，整个一群“胶合在一起”。另一方面，这些粒子也不是挤到一块儿，如果你把两个粒子挤得很紧，它们就互相推斥。



放大10亿倍的水

图 1-1

原子的半径约为 $1\sim 2\times 10^{-8}$ 厘米， 10^{-8} 厘米现在称为 1 \AA (这只是另一个名称)，所以我们说原子的半径为 $1\sim 2\text{ \AA}$ 。另一个记住原子大小的方法是这样的：如果把苹果放大到地球那样大，那么苹果中的原子就差不多有原来的苹果那样大。

现在，想象这个大水滴是由所有这些跳动的粒子一个挨一个地“粘合”起来的，水能保持一定的体积而并不散开，因为它的分子彼此吸引。如果水滴在一个斜面上，它能从一个位置移动到另一个位置。水会流动，但是并不会消失——它们并没有飞逝，因为分子之间有吸引力。这种跳动就是我们所说的热运动。当温度升高时，这种运动就增强了。如果我们加热水滴，跳动就增加，原子之间的空隙也增大。如果继续加热到分子间的引力不足以将彼此拉住时，它们就分开来飞散了。当然，这正是我们从水制取水蒸气的方法——提高温度。粒子由于运动的增强而飞散。图1-2是一幅水蒸气的图象。这张水蒸气图象有一个不足之处：在通常的气压下在整个房间里只有少数几个分子。决不可能在这样一张图象中有三个以上的分子。在大多数情况下，这样大小的方块中可能连一个都不会有——不过碰巧在这张图中有两个半或三个分子(只有这样图象才不会是完全空白的)。现在，比起水来，在水蒸气的情况下，我们可以更清楚地看到水所特有的分子。为了简单起见，将分子画成具有 120° 的夹角，实际上，这个角是 $105^\circ 3'$ ，氢原子中心与氧原子中心之间的距离是 0.957 \AA 。这样看来，我们对这个分子了解得很清楚了。



水蒸气

图 1-2

让我们来看一下，水蒸气或任何其他气体具有一些什么性质。这些气体分子是彼此分离的，它们打在墙上时，会反弹回来。设想在一个房间里有一些网球(100个左右)不断地来回跳动，当它们打到墙上后，就将墙推离原位(当然，我们必须将墙推回去)。这意味着，气体施加一个“颤动”的力，而我们的粗糙的感官(并没有被我们自己放大十亿倍)只感到一个平均的推力。为了把气体限制在一定的范围之内，我们必须施加一个压力。图1-3是一个盛气体的标准容器(所有教科书中都有这种图)，一个配有活塞的汽缸，由于不论水分子的形状如何，情况都是一样，因此为简单起见，我们把它们画成网球形状或者小黑点。这些东西

沿着所有的方向不停地运动着。由于有这么多的气体分子一直在撞击顶端的活塞，因此要使活塞不被这种不断的碰撞逐渐顶出来必须施加一定的力把活塞压下去，这个力称为压力（实际上，是压强乘以面积）。很清楚，这个力正比于面积，因为如果我们增大面积而保持每立方厘米内的分子数不变的话，那么分子与活塞碰撞次数增加的比例与面积增加的比例是相同的。

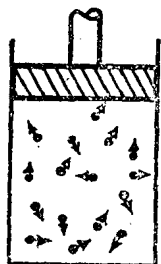


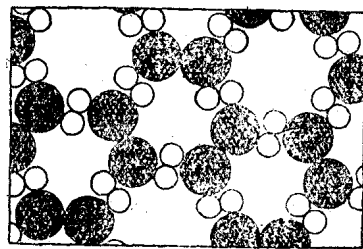
图 1-3

现在，让我们在这个容器内放入两倍的分子，以使密度增加一倍，同时让它们具有同样的速度，即相同的温度。那么，作为一种很好的近似，碰撞的次数也将增加一倍，由于每次碰撞仍然和先前那样“有力”，压力就正比于密度。如果我们考虑到原子之间的力的真实性质，那么由于原子之间的吸引，可以预期压力略有减少；而由于原子也占有有限的体积，则可以预期压力略有增加。无论如何，作为一个很好的近似，如果原子较少，密度足够低，那么，压力正比于密度。

我们还可以看一下其他情况。如果提高温度而不改变气体密度，亦即只增加原子的速度，那么在压力上会出现什么情况？当然，原子将撞击得更剧烈一些，因为它们运动得更快一些。此外，它们的碰撞更频繁了，因此压力将增加，你们看，原子理论的概念是多么简单！

我们来考虑另一种情况，假定活塞向下移动，原子就慢慢地被压缩在一个较小的空间里。当原子碰到运动着的活塞时，会发生什么情况呢？很显然，原子由于碰撞而提高了速率，例如，你可以试一下乒乓球从一个朝前运动的球拍弹回来时的情况，你会发现弹回的速率比打到球拍上的速率更大一些（一个特例是：如果一个原子恰好静止不动，那么在活塞碰上它以后，当然就运动了）。这样原子在弹离活塞时比碰上去之前更“热”。因此所有容器中的分子的速率都提高了。这意味着，当我们缓慢压缩气体时，气体的温度会升高。结果，在缓慢压缩时，气体的温度将升高；而在缓慢膨胀时，气体的温度将降低。

现在回到我们的那滴水上去，从另一个角度去观察一下。假定现在降低水滴的温度，并且假定水的原子、分子的跳动逐渐减小。我们知道在原子之间存在着引力，因而过一会儿，它们就不能再跳得那么厉害了。图 1-4 表示在很低的温度下会出现什么样的情况。这时分子连接成一种新的图象，这就是冰。这个特殊的冰的图象是不正确的，因为它只是二维的，但是它在定性上是正确的。有趣的一点是，对于每一个原子，都有它的确定位置。你们可以很容易地设想，如果我们用某种方式使冰滴一端的所有的原子按一定的方式排列，并让每个原子处在一定的位置上，那么由于互相连接的结构很牢固，几英里之外（在我们放大的比例下）的另一端也将有确定的位置。如果我们抓住一根冰棍的一端，另一端就会阻止我们把它拉出去。这种情况不象水那样由于跳动加强以致所有的原子以种种方式到处跑来跑去，因而结构也就被破坏了。固体与液体的差别就在于：在固体中，原子以某种称为晶体排列的方式排列着，即使在较长的距离上它们的位置也不能杂乱无章。晶体一端的原子位置取决于晶体另一端的与之相距千百万个原子的排列位置。图 1-4 是一种虚构的冰的排列状况，它虽然包括了冰的许多正确的特征，但并不是真实的排列情况。正确的特征之一是这里具有一种六边形的对称性。你们可以看到：如果把画面绕一根轴转动 120° 的话，它仍然回到原来的形状，因此，在冰里存在着一定的对称性，这说明为什么雪花具有六边形的外表，从图 1-4 中还可以看到为



冰

图 1-4

什么冰融解时会缩小。在这里列出的冰的晶体图样中有许多“孔”，真实的冰的结构也是如此，在排列打散后，这些孔就可以容纳分子。除水和活字合金外，许多简单的物质在融解时都要膨胀，因为在固体的晶体结构中，原子是密集堆积的，而当熔解时，需要有更多的空间供原子活动，但是敞形结构则会倒坍，体积反而收缩了，就象水的情况那样。

虽然冰有一种“刚性的”结晶形态，它的温度也会变化——冰也储存热量，如果我们愿意的话，就可以改变热量的储存。对冰来说，这种热量指的是什么呢？冰的原子并不是静止不动的，它们不断地摇晃着、振动着，所以虽然晶体存在着一种确定的次序——一种确定的结构，所有的原子仍都“在适当的位置”上振动，当我们提高温度时，它们振动的幅度就越来越大，直到离开原来的位置为止。我们把这个过程称为熔解，当降低温度时，振动的幅度越来越小，直到绝对零度原子仍能有最低限度的振动，而不是停止振动。原子所具有的这种最低的振动不足以使物质熔解，只有一个例外，即氦。在温度降低时，氦原子的运动只是尽可能地减弱，但即使在绝对零度时也有足够的运动使之不致于凝固，除非把压力加得这样大以致将原子都挤在一起。如果我们提高压力，就可以使它凝固。

§1-3 原子过程

关于从原子的观点来描写固体、液体和气体，我们就讲到这里。然而原子的假设也可以描写过程，所以我们现在从原子的观点来考察一些过程。我们要考察的第一个过程与水的表面有关。在水的表面有些什么情况呢？设想水的表面上是空气，现在我们来把图画得更复杂一些——也更实际一些，如图1-5所示。我们看到，水分子仍然象先前那样，组成大量的水，但现在还看到水的表面。

在水面上我们发现一些东西：首先，水面上有水的分子，这就是水的蒸气，在水面上总是有水蒸气的。（在水蒸气与水之间存在着一种平衡，这种平衡我们以后再讲。）此外，我们还发现一些别的分子：这里是两个氧原子彼此结合在一起组成一个氧分子，那里是两个氮原子结合在一起组成一个氮分子。空气几乎完全是由氮气、氧气、水蒸气组成的，此外还有少量的二氧化碳、氩气和其他一些气体。所以



空气中水的蒸发

氧 氢 氮

图 1-5

在水面上的是含有一些水蒸气的气体。那么，在这种情况下会发生什么事呢？水里的分子不断地晃来晃去。有时，在水面上有个别分子碰巧受到比通常情况下更大的冲击而被“踢”出表面。因为图1-5是静止的画面，所以在图上难以看出所发生的事。但是我们可以想象表面附近的某一个分子刚好受到碰撞而飞了出去，或者也许另一个分子也受到碰撞而飞了出去。分子一个接着一个地跑了出去，水就消失了——蒸发了。但是如果把容器盖上，过一会儿就会发现在空气分子中有大量的水分子。水蒸气的分子不时地飞到水面，又回到水中。结果，我们看到那个看来死气沉沉的、无趣的事情——一杯盖上的可能已放了二十年的水——实在包含了一直生气勃勃而有趣的现象。对我们这双肉眼而言，看不出有任何变化，但是如果放大十亿倍来看的话，我们就能发现情况一直在变化：一些分子离开水面，又一些分子则回到了水面。

为什么我们看不出变化呢？因为有多少分子离开水面就会有多少分子回到水面！归根到底“没有任何事情发生”。如果现在我们把容器盖打开，使潮湿的空气吹走而代之以干燥