

北京大学教材

# 近代物理学

王正行 编著

北京大学出版社

北京大学教材

# 近代物理学

王正行 编著

北京大学出版社

新登字(京)159号

图书在版编目(CIP)数据

近代物理学/王正行编著. —北京:北京大学出版社,

1995.1

ISBN 7-301-02670-6

I. 近… II. 王… III. 物理学-近代 IV. 04

书 名: 近代物理学

著作责任者: 王正行

责任编辑: 瞿 定

标准书号: ISBN 7-301-02670-6/O·345

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区中关村北京大学校内 100871

电 话: 出版部 2502015 发行部 2559712 编辑部 2502032

排 印 者: 北京大学印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

版 本 记 录: 850×1168 毫米 32 开本 19.75 印张 500 千字

1995 年 1 月第一版 1998 年 8 月第四次印刷

印 数: 6201—9200 册

定 价: 19.00 元

## 内 容 简 介

本书是北京大学技术物理系普通物理课程在虞福春教授指导下从1986年开始进行改革的一个成果。主题是讲述相对论和量子力学的基本概念和物理图象，以及支配物质运动和变化的基本相互作用，并在此基础上讨论物质结构的粒子、原子核、原子、分子、固体、量子液体直到天体和宇宙各个层次的性质、特点和规律，其中讨论了阿哈罗诺夫-玻姆效应、光子和中子在引力场中的效应、超流、超导与超导量子干涉器件、核物质与致密星体结构等当前研究的前沿和热点问题，而对许多传统问题也都采取了新颖的讲法。本书起点不高，讨论深入，叙述简洁，信息量大，读者对象是大学低年级学生，可以作为理工科大学和师范院校有关专业近代物理、量子物理、原子物理等基础课的教材或教学参考书。

## 序

北京大学技术物理系核物理专业的普通物理课，1986年开始在虞福春教授指导下进行改革，至今已有8年。我们尝试把普通物理的教学由以传授物理知识、训练解题技巧为主，转变为以启发学生思考、培养学生提出、分析和解决问题的能力为主。为此我们修订了教学计划，把原来的力学、热学、电磁学、光学和原子物理学五门课合并成一门周期为两年的普通物理课，以突出物理学的整体性，强调物理学各部分之间的联系。在此基础上，我们把原来的原子物理学扩展为现在的近代物理学。这本《近代物理学》，就是这种尝试的一个结果。

我们为《近代物理学》这门课程设定的主题，是用普通物理的风格来讲述相对论和量子力学的基本概念和物理图象，以及支配物质运动和变化的基本相互作用，并在此基础上讨论物质结构从粒子、原子核、原子、分子、固体、气体和凝聚态直到天体和宇宙各个层次的性质、特点和规律，而把原子结构作为重点。在讲述时，我们避免把每一部分讲成近代物理中自成体系的独立分支，而是力图让学生对近代物理学基础从整体上有一基本、具体和定量的了解。

本书普通物理的风格，我们主要是指现象描述与理论分析并重，从物理现象和实验的分析来形成物理图象和概念，提出物理定律和公式，建立物理模型和理论，并在进一步的实验中求得支持和发展。典型的做法，就是从简单具体的实例中得出结论，然后指出这个结论的适用范围。此外，定量分析只用简单的数学，即代数运算和微积分，至多是简单的常微分方程。

对于狭义相对论，已有许多成功的做法可供参考。困难在于

如何找到一种方法，像电磁学中讲高斯定律那样，用普通物理的风格和程度来定量地讲授量子力学和广义相对论的基本内容。我们采用的一种做法，就像在波动光学中引入惠更斯-菲涅耳原理和菲涅耳-基尔霍夫积分那样，是适当地引入一些第二性的原理和公式，从而避开从第一原理出发会遇到的数学困难。例如避开薛定谔方程的微扰论求解，通过适当的物理考虑给出散射波的玻恩近似公式和跃迁概率的费米公式，直接从它们出发来推导卢瑟福散射公式和讨论各种粒子物理过程；又如绕过爱因斯坦引力场方程的求解，直接从施瓦西度规和能量角动量守恒出发来讨论广义相对论的可观测效应，等等。

我们不是像通常那样沿历史的线索，而是按逻辑的线索来安排内容。比如先讲光电效应和康普顿效应等光量子的动力学性质，再讲其统计性质普朗克黑体辐射定律；先讲电子的波动性，再讲氢原子结构的玻尔理论，等等。一个合乎逻辑的知识结构可以使学生长期受益，有利于他们将来进一步扩充知识范围，处理新吸收的信息。不过我们无意追求理论的系统与完整，因为这是普通物理。普通物理最重要的是使学生掌握一些典型和具体的实例。

本书并没有专门安排一章统计物理，但是讲了光子气体、声子气体、自由电子气体和玻色-爱因斯坦凝聚。只要学生掌握了这几个具体例子，他不难自己归纳出量子统计的基本特征和规律。

本书这种论述方式是与传统学习方式迥然不同的另一种学习方式：让学生在学一些具体知识时，不知不觉地学到了重要的物理原理和规律。我想这在一定意义上就是杨振宁先生多次强调的渗透式的学习。实际现象和事实是物理学的基础和出发点。学物理最重要的是各种具体物理现象，它们是物理概念和理论的源泉。新的物理现象，一定孕育着新的物理。我希望把学生的兴趣和注意力从公式演算和解题技巧引导到了解和熟悉具体物理现象上来。本书的行文，常常是直接把自己领进物理现象和推理的情景之中，让他自己去感觉、去体验、去发现、去思索，从而获得对它们具

体和实在的了解。

在内容选择上，除了近代物理中成熟、定型、已有定论的基本内容外，还适当涉及到一些正在研究、尚未定型、可以争辩的 open problem, 比如中微子有没有质量？质子会不会衰变？我们的宇宙是封闭的还是开放的？核物质的压缩和相变，等等。涉及这些问题，是为了让学生接触近代物理正在发展的活跃前沿，只要求学生知道和了解，不必也不可能要求学生深入理解。其次，本书选入了一些传统课程的较深题材，例如穆斯堡尔效应，超流与超导，几个广义相对论效应的定量分析，基本相互作用和弱电相互作用的统一，等等。选入这些内容，是为了使学生扩大视野和提高视角，以加深对近代物理学基础的理解；在讲法上尽量深入浅出，着重讲清物理图象和概念，只要求学生能够理解而不一定完全掌握。最后，对于占全书70%以上的近代物理学基本内容，则讲清讲透，要求学生完全掌握并能运用。把课程的内容和对学生的要求区分成上述三个层次，是我们对这门课程改革的主要指导思想之一。

最难处理的是第二类内容。例如如何用简单初浅的办法来估计一个粒子物理过程发生概率的数量级，1950年E. 费米在耶鲁大学西里曼讲座中就做过尝试，而直到最近国外出版的粒子物理教材中这种尝试还在继续。可以说，如何把传统课程的较深题材深入浅出地在普通物理的水准下讲出来，这本身就是一个需要研究和探索的课题，还没有成熟、定型、被普遍接受的讲法。在这个意义上，5.6节中子单缝和双缝衍射实验，5.7节N-A形状弹性散射，6.2节卢瑟福散射公式，7.9节规范不变性原理，7.10节阿哈罗诺夫-玻姆效应，12.7节声子，13章超流与超导，14.2节原子核的几何性质，14.8节核物质，15.6节相互作用，15.7节弱电统一和中间玻色子，16章广义相对论的基本概念，17章天体和宇宙，以及其他一些章节的有些内容的处理，都只能当作 Seminar 式的可以争辩的尝试。

本书的主要内容曾分别给北大核物理专业86、88和90级讲过。许方官教授给87、89和91级讲相应的课程时也参考过我的讲稿。作为一本教材，在阐述时我努力做到简明扼要，避免科学普及读物式的比喻、引伸和发挥。作为普通物理教材，本书只开列了主要参考书目。基本物理常数和数据取自美国《物理学评论》1994年D50卷第3-I期粒子性质评论。

我们的改革尝试得到中国物理学会教学委员会特别是赵凯华教授的关心和鼓励。这项计划在执行中得到北京大学常务副校长王义道教授和自然科学处原副处长毕源章的支持和鼓励。本书的出版得到虞福春教授、胡济民教授、高崇寿教授和北京大学教材建设委员会及北京大学出版社的大力帮助。许方官教授、汪厚基副教授、张敏钊副教授和苏育棉硕士看过本书初稿，高崇寿教授仔细审阅了有关章节，提出了许多宝贵意见。赵强同学核对了部分习题答案。我在此表示衷心的感谢。我学浅识疏，经验不足，错误与不妥之处，请各位读者指正。

作者

1994年秋于北京中关村



# 目 录

序 .....	( I )
1 引言 .....	( 1 )
1.1 从经典物理到近代物理 .....	( 1 )
1.2 近代物理学的基本问题 .....	( 5 )
1.3 单位和常数 .....	( 11 )
2 狭义相对论时空性质 .....	( 14 )
2.1 迈克耳孙-莫雷实验 .....	( 14 )
2.2 爱因斯坦相对性原理 .....	( 16 )
2.3 时间的相对性 .....	( 17 )
2.4 长度的相对性 .....	( 20 )
2.5 洛伦兹变换和速度叠加 .....	( 22 )
2.6 支持洛伦兹变换的实验 .....	( 27 )
2.7 四维时空间隔 .....	( 31 )
2.8 闵可夫斯基空间 .....	( 33 )
3 狭义相对论质点力学 .....	( 39 )
3.1 粒子的运动学描述 .....	( 39 )
3.2 粒子的动力学关系 .....	( 43 )
3.3 能量动量关系的讨论 .....	( 48 )
3.4 相互作用多粒子体系 .....	( 52 )
3.5 粒子的衰变 .....	( 55 )
3.6 两体反应 .....	( 59 )
3.7 相对论多普勒效应 .....	( 64 )
4 辐射的量子性 .....	( 68 )
4.1 光电效应 .....	( 68 )
4.2 X射线及其在晶体上的衍射 .....	( 71 )
4.3 X射线韧致辐射谱 .....	( 75 )

4.4	康普顿效应	(78)
4.5	电子偶的产生和湮灭	(81)
4.6	光子的吸收	(84)
4.7	穆斯堡尔效应	(86)
4.8	引力场中的光子	(89)
4.9	电磁波的统计诠释	(91)
4.10	光子的测不准关系	(95)
5	粒子的波动性	(98)
5.1	电子	(98)
5.2	德布罗意波	(101)
5.3	电子晶体衍射实验	(103)
5.4	电子双缝衍射实验	(107)
5.5	中子晶体衍射实验	(109)
5.6	中子单缝和双缝衍射实验	(112)
5.7	N-A 形状弹性散射	(115)
5.8	引力场的效应	(118)
5.9	波函数的统计诠释	(121)
5.10	粒子的测不准关系	(126)
6	卢瑟福-玻尔原子模型	(133)
6.1	原子模型问题	(133)
6.2	卢瑟福散射公式	(137)
6.3	卢瑟福散射公式的实验验证	(141)
6.4	原子的电子结构问题	(147)
6.5	氢原子光谱的巴尔末-里德伯公式	(150)
6.6	玻尔理论	(153)
6.7	玻尔理论的应用	(159)
7	波动方程	(163)
7.1	波动方程的提出	(163)
7.2	量子化的能级	(166)
7.3	夫兰克-赫兹实验	(172)
7.4	轨道角动量	(175)

7.5	斯特恩-盖拉赫实验 .....	(181)
7.6	电子自旋 .....	(185)
7.7	隧道效应 .....	(189)
7.8	矢量势 .....	(194)
7.9	规范不变性原理 .....	(197)
7.10	阿哈罗诺夫-玻姆效应 .....	(201)
8	氢原子和类氢离子 .....	(205)
8.1	能级和径向波函数 .....	(205)
8.2	辐射跃迁和选择定则 .....	(212)
8.3	矢量模型和角动量相加 .....	(217)
8.4	自旋-轨道耦合 .....	(220)
8.5	氢原子能级的精细结构 .....	(223)
8.6	兰姆移位 .....	(227)
8.7	氢原子的磁矩 .....	(229)
8.8	氢原子能级的超精细结构 .....	(231)
9	多电子原子 .....	(234)
9.1	氦原子基态 .....	(234)
9.2	泡利不相容原理 .....	(237)
9.3	原子基态的电子组态 .....	(239)
9.4	角动量耦合和能级的精细结构 .....	(248)
9.5	原子的基态 .....	(253)
9.6	单电子光谱 .....	(256)
9.7	双电子光谱 .....	(262)
9.8	内层电子激发和X射线谱 .....	(266)
9.9	塞曼效应 .....	(273)
9.10	顺磁共振 .....	(278)
10	辐射场的统计性质 .....	(280)
10.1	热辐射 .....	(280)
10.2	黑体辐射 .....	(283)
10.3	普朗克黑体辐射定律 .....	(286)
10.4	辐射场(光子气体)的热力学 .....	(290)
10.5	宇宙微波背景辐射 .....	(292)

10.6	爱因斯坦辐射理论 .....	(296)
10.7	谱线的宽度 .....	(299)
10.8	激光的基本概念 .....	(302)
11	分子结构 .....	(305)
11.1	氢分子离子 .....	(305)
11.2	s-共价键分子 .....	(309)
11.3	其它共价键分子 .....	(310)
11.4	离子键与电离度 .....	(317)
11.5	分子的振动 .....	(320)
11.6	分子的转动 .....	(324)
11.7	分子的振动转动谱带 .....	(328)
12	固体 .....	(333)
12.1	离子晶体 .....	(333)
12.2	其它类型晶体 .....	(338)
12.3	晶态和非晶态固体 .....	(343)
12.4	固体的能带 .....	(349)
12.5	金属中的自由电子气体 .....	(355)
12.6	晶格的振动 .....	(363)
12.7	声子 .....	(368)
13	超流与超导 .....	(374)
13.1	液氦 II .....	(374)
13.2	环流量子化 .....	(379)
13.3	玻色-爱因斯坦分布 .....	(381)
13.4	玻色-爱因斯坦凝聚 .....	(384)
13.5	超导电性 .....	(388)
13.6	库珀对和BCS理论 .....	(397)
13.7	伦敦方程和磁通量子化 .....	(401)
13.8	约瑟夫森效应和SQUID .....	(405)
14	原子核 .....	(412)
14.1	从天然放射性到中子的发现 .....	(412)
14.2	原子核的几何性质 .....	(418)

14.3	原子核的结合能和稳定性 .....	(425)
14.4	氘核 .....	(429)
14.5	核力 .....	(432)
14.6	原子核结构模型 .....	(438)
14.7	原子核衰变 .....	(445)
14.8	核物质 .....	(451)
15	粒子物理 .....	(456)
15.1	正反粒子对称性 .....	(456)
15.2	时空对称性 .....	(460)
15.3	$\pi$ 介子 .....	(464)
15.4	同位旋 .....	(468)
15.5	中性K介子 .....	(474)
15.6	相互作用 .....	(478)
15.7	弱电统一和中间玻色子 .....	(487)
15.8	夸克模型和QCD .....	(492)
16	广义相对论的基本概念 .....	(500)
16.1	等效原理和局部惯性系 .....	(500)
16.2	时空弯曲和短程线 .....	(503)
16.3	引力场中的时空和施瓦西度规 .....	(507)
16.4	行星近日点的进动 .....	(511)
16.5	星光的引力偏转和雷达回波的延迟 .....	(515)
16.6	光频在引力场中的移动 .....	(521)
16.7	黑洞 .....	(522)
17	天体和宇宙 .....	(527)
17.1	物质结构的层次 .....	(527)
17.2	行星尺度 .....	(530)
17.3	恒星尺度 .....	(536)
17.4	恒星中的核反应 .....	(545)
17.5	宇宙大尺度结构 .....	(550)
17.6	膨胀宇宙 .....	(556)
17.7	宇宙的演化 .....	(562)

18 结语 .....	(568)
附录 .....	(571)
A1 元素周期表 .....	(571)
A2 凝聚态元素性质 .....	(572)
A3 同位素简表 .....	(576)
A4 太阳系简表 .....	(578)
习题 .....	(580)
主要参考书目 .....	(617)

在本世纪初，发生了三次概念上的革命，它们深刻地改变了人们对物理世界的了解，这就是狭义相对论（1905年）、广义相对论（1916年）和量子力学（1925年）。

——杨振宁

《爱因斯坦对理论物理学的影响》，1979

## 1 引 言

### 1.1 从经典物理到近代物理

20世纪初，物理学基本观念经历了三次影响深远的革命。作为这三次革命的标志和成果，就是狭义相对论、广义相对论和量子力学的建立。

#### a. 狭义相对论

狭义相对论修改了关于时间和空间的观念。在相对论建立之前，物理学关于时间和空间的观念，是牛顿（Isaac Newton）的绝对时空观念。牛顿绝对时空观念，认为时间与空间互相独立，各都具有绝对的含意，与物质和运动的情形无关。而在速度接近光速的高速领域，物理研究的经验表明，时间与空间互相联系，并不互相独立。它们作为统一的四维时空的不同侧面，与惯性参考系的选择有关，只有统一的四维时空，才具有与惯性参考系选择无关的绝对意义。这就是爱因斯坦（Albert Einstein）狭义相对论的时空观念。爱因斯坦于1905年提出他的相对性原理和光速不变性原理，在此基础上建立了狭义相对论。按照狭义相对论，只有当所涉及的速率  $v$  比光速  $c$  小得多时，即

$$v/c \ll 1, \quad (1.1)$$

牛顿绝对时空观念才近似适用，而当所涉及的速度可与光速相比时，应代之以相对论的时空观念。

### b. 广义相对论

爱因斯坦1916年进一步建立了广义相对论。广义相对论的基础，是根据惯性质量与引力质量相等提出的等效原理。等效原理认为局部范围的引力场等效于加速的非惯性参考系。把等效原理与狭义相对论相结合，就会发现时钟与标尺会受到引力场的影响，从而时空性质不仅依赖于参考系的选择，还依赖于物质及其运动的情形，而不具有任何绝对的含意。这就是爱因斯坦广义相对论的时空观念。只有当引力场较弱时，亦即

$$\frac{G_N M}{c^2 r} \ll 1, \quad (1.2)$$

才能近似忽略物质对时空性质的影响。其中  $G_N$  是万有引力常数， $M$  是产生引力场的质量， $r$  是场点到引力中心的距离。

### c. 量子力学

量子力学是物理学研究的经验扩充到微观领域的结果。它修改了物理学中关于物理世界的描述以及物理规律的陈述的基本观念，影响更深远。

上一世纪末，相继发现天然放射性、X射线和阴极射线，物理学研究深入到原子结构的微观物理世界。探索微观世界所积累的物理经验逐渐表明，微观现象的基本特征是波粒二象性。对于波粒二象性所包含的物理，玻恩 (Max Born) 于1926年提出了波函数的统计诠释，认为描述微观现象波动性的波函数只是用来计算测量结果出现概率的数学工具，不具有实在的物理含意。这就在两个方面改变了物理学的基本观念：一是关于物理世界的描述方式，即物理图象问题；另一是关于物理规律的表达形式，即因果关系问题。



对宏观物理现象，例如海鸥在天空的飞翔，可以用时空中的轨迹来描述，有一幅直观而且实在的物理图象。微观物理现象不同，虽然可以形象地描述两束电子波的干涉，或者氢原子中的电子云分布，但这是概率波而不是物理实在的干涉或分布。在照相底片的乳胶或云室中探测到的电子是实在的，但却不能在时空中追踪它的运动。量子力学不再能在时空中描绘一幅既直观形象而又具有物理实在性的图象。

在宏观物理中，原因与结果之间一定可以找到明确肯定的联系。天王星轨道意外的摄动一定对应某种原因。这种观念直接导致了海王星的发现，而这种关于原因与结果之间有决定性联系的因果观念则被称为拉普拉斯 (Laplace) 决定论的因果关系。微观物理则不同。在电子束的双缝衍射中，不可能预言电子将肯定落到屏幕上哪一点。它落到屏幕上任何一点都是可能的，只能预言它落到屏幕上每一点的概率有多大。在钴60的 $\beta$ 衰变中，不可能预言钴核将肯定在什么时刻放出电子。它在任何时刻都可能衰变，只能预言它在某一时刻衰变的概率有多大。量子力学表达的物理规律是统计性的，在原因与结果之间不再能给出明确肯定的联系，对一定的物理条件，它只能预言可以测到哪些结果，以及测到每一种可能结果的概率是多少。

一个物理过程的作用量  $S$  可以写成

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L(q, \dot{q}, t) dt, \quad (1.3)$$

其中  $L(q, \dot{q}, t)$  称为体系的拉格朗日 (Lagrange) 函数，定义为体系动能与势能之差，作为广义坐标  $q$  与广义速度  $\dot{q}$  的函数。在数量级上， $S$  大致比例于能量与时间的乘积，或动量与位移的乘积。量子力学表明，只有当作用量  $S$  比约化普朗克 (M. Planck) 常数  $\hbar$  大得多时，亦即

$$S \gg \hbar, \quad (1.4)$$

才能近似忽略量子效应，而使用轨道的描述和拉普拉斯决定论的