

· 物理学教程 ·

夏学江 史斌星 主编

量子物理

史斌星 编著

清华大学出版社

021762



科工委学院802 2 0045368 5

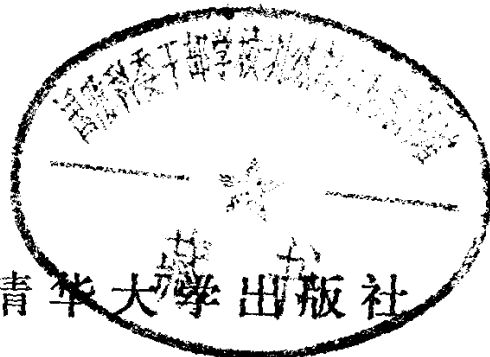
清华大学教材

物理学教程

主编 夏学江 史斌星

量子物理

史斌星 编著



清华大学出版社

1982

内 容 简 介

《物理学教程》是清华大学新编的教材，计划分为《力学与热学》、《电磁学》、《波动与光学》、《量子物理》及《量子与统计力学基础》等五个分卷出版。其中《量子物理》首先出版。

《量子物理》一书分两部分。一为基本内容，包括微观粒子二象性、原子与分子光谱等；二为选修内容，包括量子跃迁理论和应用（激光、喇曼光谱、核磁共振、穆斯堡尔效应、光谱线的宽度等），原子核和基本粒子。

本书尽量采用由量子力学得出的关于微观粒子运动的观点来分析问题，把旧量子论作为引入量子概念的桥樑。编写过程力求把问题说得详尽、明了（尤其对于重点内容和教学难点部分）使本书便于自学，书末附有习题答案和有 * 题提示。

本书可作为理科和偏理工科大学物理教学用书，也可作为科技人员参考书和青年读者自学用书。

量 子 物 理

史斌星 编著



清华大学出版社出版

北京 海淀 清华园

清华大学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售



开本：850×1168 1/23 印张 16 3/4 字数 449（千字）

1982年8月第一版 1982年8月第一次印刷

印数1—30000

统一书号：15235·43 定价：2.00元

物理学教程

序 言

本书是参照我国通用的高等学校理科类与工科类物理课教学大纲，作为一套普通物理教材而编写的，希望它可供理、工科各专业使用或参考。本书的大部分内容曾在清华大学物理学时较多的几个专业以讲义的形式试用；现在经过修改、重写后计划分为《力学与热学》、《电磁学》、《波动与光学》、《量子物理》及《量子与统计力学基础》等五个分卷陆续出版。

本书编者的共同愿望是这套书能帮助读者较好地掌握物理学的基本内容。我们力图把物理学的基本定律、概念、方法准确地叙述清楚；力求帮助读者分清主次，克服学习难点；对于容易产生误解的地方也力图给予必要的说明。有些问题虽然在学生学习中容易产生疑问，但因属于细节问题，常常没有包括在教材中。本书对某些这样的问题也试图在小字段落、脚注、加*号章节或附录中给以一些说明，供读者有余力时参考。

物理学是研究自然界最基本规律的一门科学，学习物理和世界观的建立有密切的联系。本书在内容的安排与阐述中力求贯彻辩证唯物主义思想，帮助读者获得对客观世界的正确认识。在人们对物理概念与规律的认识过程中，实验与理论的结合起着极重要的作用，本书在阐明原理概念时，特别是在说明近代物理概念的发展时，也希望能将这一情况反映出来，对于若干重要的实验以及它们与建立理论、发展概念的关系给予较详细的说明。

物理学日新月异的发展使它在现代科学技术领域中有着越来越广泛和重要的应用。在着重阐明基本原理的基础上，我们也尽可能地 toward 读者介绍一些物理原理的应用和物理学新近发展的材料，使读者增加学习兴趣，开阔眼界和提高理解新技术及其应用的能力。

为了使本书有较大的适应性，我们把内容作了如下安排，凡是不带*号的各章节属于最基本的内容，可独立于带*号的章节学习。学时较少的各专业只需学习这些章节。理科专业或学时较多的工科专业则可用带*号章节、小字段落、附录等作为补充内容。从全书看，五个分卷前三卷是基本教材，我们希望对于一般理科和工科各专业都能适用或可供参考；第四卷可作基本教材也可作选修课教材，视专业而定；最后一卷属于选修课教材。

在编写本书时，我们力图使它便于自学。我们的体会是：学生在学习过程中不仅应该获得知识与应用知识，还应该锻炼与提高学习的能力。因此在教学中必须注意培养与提高学生的学习能力，其中也包括培养与提高学生读书的能力。我们希望这套教材可供学生独立阅读，有助于培养学生的读书习惯与能力。另一方面，我们认为，如果教材便于自学，则明确了恰当的学习要求与份量后，就可以在课堂上详讲某些部分，略讲某些部分，再留一些部分给学生自学。这会有利于启发与指导学生，培养学生正确的学习习惯。此外，我们也希望这套书能供在职科技人员和自学的青年使用。

作习题是学习理论的重要环节。本书各分卷中都附有一定数量的复习思考题和习题。除基本的习题外，我们还选编了若干有一定难度的题以反映提高的要求（有的题是参考了国内外研究生入学试题选编的）。书末附有习题答案。

本书各分卷一律采用国际单位制，物理量的名称和符号也尽可能地符合国际标准化组织（ISO）提出的国际标准。

在本书的编写过程中得到了许多同志的热情帮助。刘绍唐教授审阅了全部内容，从编写的指导思想到具体内容都提出了宝贵的意

见；清华大学物理系的许多位年长同志如孟昭英、徐璋本、何成钧、徐亦庄、张礼等教授分别承担了本书某些分卷或某些部分的审阅工作；还有许多同志分别在各分卷中为编写习题、核对答案、制图、抄稿、出版等各方面作了大量的工作；在此对他们表示衷心的感谢。

在编写本书各分卷时，都参考了若干现有的教材，在许多地方得到启发与教益。这里难于一一指出，在此一并致谢。

由于编者能力有限，编写时间仓促，书中一定有不少缺点、错误，欢迎批评指正。

夏学江

史斌星

1982 年于清华大学

编 者 的 话

本书是清华大学编写的“物理学教程”的一个分卷，主要包括光与微观粒子二象性、原子与分子光谱、原子核与基本粒子等内容。

在这部分内容中如何对待玻尔、索末菲等提出的旧量子论是一个教学上值得探讨的问题。旧量子论不仅在历史上起过重要作用，而且从教学角度看，有助于初学者从经典物理过渡到现代量子理论。但另一方面它毕竟只是一种过渡性理论，对它也不宜过分强调。基于这一考虑，本书中仅把玻尔理论作为引导学员进入量子领域的一座桥梁，通过它帮助学员建立能量、角动量量子化等概念，而不作详细的讨论。

本书没有引入薛定谔方程，准备把它放在本教程另一分卷“量子与统计力学基础”中讨论。但书中尽量采用量子力学得出的关于微观粒子运动的观点来分析问题，例如加强了几率波的概念，并用它来分析测不准关系、电子衍射等问题，角动量合成的引入也采用了量子力学中常见的叙述方式等。我们感到不增加数学难度而加强现代量子论的概念是值得尝试的。

本书中较为详细地介绍了激光、喇曼效应、核磁共振，穆斯堡尔效应、光谱线的宽度等有关量子理论的应用课题，这些内容将有助于加深对理论的理解。

量子物理的发展过程充分说明，能够突破原有局限观点的束缚，善于根据实验事实提出新观点建立新学说的重要意义。本书对普朗克量子论的提出、玻尔原子理论的建立、德布罗意假设的提出以及穆斯堡尔效应的发现等都作了一定的介绍，希望能对读者有所

启发.

学习这本书前,读者应先学过力学、热学与分子物理学、电磁学、波动与光学等方面内容,数学上除微积分外没有其它先修要求.

从教学上看本书可分成两部分.第一至五章为第一部分,包括微观粒子二象性、原子与分子光谱等.这是本书的基本内容.第六至八章为第二部分,可作为选修内容,其中包括量子跃迁理论和各种量子过程的应用,以及原子核、基本粒子等内容.

除习题答案外,对于带*号的题还给了提示,提示放在书的末尾而不是随题目给出,这是由于不希望让读者刚读完题目就看到提示.带*号的题并非全是难题,而是编者感到有必要加一个提示的那些题.

刘绍唐同志审查了本书,徐亦庄同志审查了本书部分内容,张礼同志审查了第八章,张培林同志审查了第六章的部分内容,张玫同志审查了第七章.他们都提出了许多宝贵意见,在此对这些同志表示衷心感谢.

李庆鸢、邓新元、张泊静同志校对了习题和答案,阎魁恒、陈福华、王建纬同志制作了全部插图,对于他们的大力协助也表示衷心感谢.

目 录

引言	1
第一章 微观粒子的二象性	3
§ 1.1 黑体的热辐射	3
1.1.1 物体的热辐射现象	3
1.1.2 普朗克黑体辐射公式	10
*1.1.3 基尔霍夫定律	16
§ 1.2 光电效应	20
1.2.1 光电效应的实验规律	20
1.2.2 爱因斯坦的光子假设	23
1.2.3 光子及其实验证明	25
1.2.4 光子的探测	28
§ 1.3 康普顿效应	32
§ 1.4 德布罗意假设与电子衍射	38
1.4.1 德布罗意假设	38
1.4.2 电子衍射实验	40
*1.4.3 德布罗意波的群速度	49
§ 1.5 几率波	51
§ 1.6 测不准关系	56
习题一	67
第二章 氢原子光谱及玻尔理论	75
§ 2.1 氢光谱的实验规律	76
§ 2.2 玻尔理论与氢原子能级	81
2.2.1 玻尔的基本假设	81

2.2.2 玻尔的氢原子理论	82
2.2.3 玻尔理论对氢原子光谱的解释	87
2.2.4 氢原子的连续光谱	90
2.2.5 氦离子的光谱	91
2.2.6 核运动的影响	93
§ 2.3 夫兰克—赫兹实验	98
§ 2.4 关于玻尔理论的讨论及量子力学对它的修正	103
2.4.1 索末菲的椭圆轨道	103
2.4.2 玻尔理论的历史作用	106
2.4.3 量子力学对玻尔理论的修正	108
§ 2.5 原子的激发	112
2.5.1 原子与实物粒子的碰撞激发	112
2.5.2 热激发原子的能量分布	113
2.5.3 光激发	115
习题二	116
第三章 单价原子	120
§ 3.1 碱金属原子的光谱	121
3.1.1 碱金属原子光谱的实验规律	121
3.1.2 选择定则	128
§ 3.2 角动量的空间量子化	130
3.2.1 原子的磁矩	130
3.2.2 角动量的空间量子化	132
3.2.3 原子体系中的守恒量	135
§ 3.3 电子的自旋	139
3.3.1 斯特恩—革拉赫实验	139
3.3.2 电子自旋	141
§ 3.4 角动量的合成及碱金属原子谱线的精细结构	146
3.4.1 碱金属原子谱线的精细结构	146

3.4.2 自旋—轨道耦合能	148
3.4.3 角动量的合成	150
3.4.4 碱金属原子能级的分裂	153
3.4.5 碱金属原子谱线的精细结构	158
§ 3.5 能级的简并度	160
*§ 3.6 氢原子光谱的精细结构	163
习题三	170
第四章 多价原子	175
§ 4.1 角动量合成的普遍规律和氦原子光谱	175
4.1.1 角动量合成的普遍规律	176
4.1.2 $L-S$ 耦合模型	177
4.1.3 氦原子光谱	180
4.1.4 $L-S$ 耦合模型遵守的选择定则	184
4.1.5 碱土族元素光谱	188
4.1.6 $j-j$ 耦合模型	189
§ 4.2 塞曼效应	192
4.2.1 塞曼效应的实验观察	192
4.2.2 原子的有效磁矩	195
4.2.3 原子能级在磁场中的分裂	197
4.2.4 帕邢—巴克效应	206
4.2.5 描写多价原子状态的量子数	209
§ 4.3 原子的电子壳层结构	212
4.3.1 元素的周期性	212
4.3.2 电子排列的壳层结构, 泡利原理	214
4.3.3 电子壳层的填充	216
4.3.4 对原子光谱的解释	219
*§ 4.4 同科电子的角动量合成	227
§ 4.5 伦琴光谱与内层电子的跃迁	235

4.5.1 伦琴光谱的获得	236
4.5.2 莫塞莱定律	238
4.5.3 线状光谱的产生	240
4.5.4 X 光的吸收曲线	243
4.5.5 对莫塞莱定律的解释	244
4.5.6 俄歇效应	247
习题四	249
第五章 分子光谱	252
§ 5.1 分子与分子光谱	252
5.1.1 分子的构成及其内部运动	252
5.1.2 分子的带状光谱	255
§ 5.2 分子的转动能级	259
§ 5.3 分子的振动能级	264
§ 5.4 分子的振转光谱	268
§ 5.5 分子中电子能级跃迁产生的光谱	274
5.5.1 分子中电子状态的描述	274
5.5.2 电子状态变化时的选择定则	278
5.5.3 电子态跃迁的带状光谱	280
*§ 5.6 普朗克常数与精细结构常数	286
5.6.1 普朗克常数的意义	286
5.6.2 物理量的自然单位	289
5.6.3 精细结构常数的意义	291
习题五	293
第六章 量子跃迁理论及应用	297
§ 6.1 自发辐射与受激辐射	297
*§ 6.2 光谱线的宽度	302
6.2.1 时间与频率(能量)的测不准关系	302
6.2.2 谱线的自然宽度	310

6.2.3	压强 (压力) 展宽	314
6.2.4	多普勒展宽	316
§ 6.3	激光	319
6.3.1	激光的特点	319
6.3.2	光的放大作用	321
6.3.3	激光振荡与激光器件	323
§ 6.4	喇曼效应	329
6.4.1	喇曼光谱的获得	329
6.4.2	喇曼光谱的解释	332
6.4.3	纯转动喇曼光谱	334
6.4.4	振转喇曼光谱	337
§ 6.5	核磁共振	341
6.5.1	核磁共振现象	341
6.5.2	核磁共振的应用	346
6.5.3	弛豫过程	349
6.5.4	电子自旋共振	352
*§ 6.6	穆斯堡尔效应	352
6.6.1	γ 射线对核的反冲	353
6.6.2	穆斯堡尔的发现	356
6.6.3	穆斯堡尔效应的意义	360
	习题六	367
第七章	原子核	371
§ 7.1	原子核的基本性质	371
7.1.1	原子核的组成	371
7.1.2	原子核的质量	372
7.1.3	原子核的结合能	374
§ 7.2	原子核的放射性	379
7.2.1	α 放射性	380

7.2.2	β 放射性	384
7.2.3	γ 放射性	390
7.2.4	放射性衰变规律	391
7.2.5	放射性射线的探测	393
§ 7.3	核反应及原子能的释放	398
7.3.1	核反应的能量	398
7.3.2	原子核的裂变和聚变	403
7.3.3	人工放射性元素和超铀元素	408
	习题七	410
第八章	基本粒子	415
§ 8.1	基本粒子的性质与分类	415
8.1.1	基本粒子的性质	415
8.1.2	高能反应中阈能的计算	422
8.1.3	基本粒子的分类	425
§ 8.2	基本粒子的探测	435
8.2.1	高能探测器	435
8.2.2	基本粒子寿命的测量	438
§ 8.3	基本粒子的相互作用及对称性	439
8.3.1	四种相互作用	439
8.3.2	描写基本粒子的量子数	442
8.3.3	举例	448
§ 8.4	对称性与守恒定律	450
8.4.1	客观世界的对称性	450
8.4.2	空间反演与宇称	452
8.4.3	τ 、 θ 之谜	456
8.4.4	宇称不守恒的发现	458
§ 8.5	共振态的发现与夸克(层子)模型	462
8.5.1	共振态	462

8.5.2 强子的分类	469
8.5.3 夸克 (层子) 模型	474
8.5.4 J/ψ 粒子的发现	477
8.5.5 重轻子	481
习题八	483
参考资料	485
习题答案	486
带 * 题提示	493
附录 I 电子在晶体点阵上的衍射	499
I.1 电子在一维点阵上的衍射	500
I.2 电子在二维点阵上的衍射	503
I.3 电子在三维点阵上的衍射	507
附录 II 托马斯进动	511
附录 III 能量转换因子	516
附录 IV 基本常数	518
附录 V 希腊字母	520

引 言

量子理论是本世纪初开始发展起来的，当时物理学受到几方面问题的挑战，例如热辐射问题、光电效应问题、原子的结构问题等，这些问题使经典物理遇到极大困难，促进了新理论的建立。

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及量子理论等。十九世纪末经典物理已趋于完善，尤其用它们解决了当时提出的若干重大课题之后，简直到了令人崇拜的地步！海王星的发现就是一个突出例子。早在十九世纪上半叶，人们就发现天王星的运动与万有引力定律、能量守恒、角动量守恒定律有矛盾。是牛顿力学不适用了，还是由于别的什么原因？1846年科学家勒威耶（Leverrier）和阿丹姆斯（Adams）各自提出，如果天王星外面某轨道上有一颗一定质量的行星存在，就能解释天王星的运动，并且他们预言这颗行星将在下一年的某月某日在某处出现。果然，第二年在他们预言的准确日期和位置人们观察到了一颗新行星，后来命名为海王星。这件事无疑被看作是牛顿力学的巨大成功，当时被誉为“不必向天空看一眼，就发现了这颗新行星”，“是在勒威耶笔尖下看到的，完全凭计算就确定了远在当时所知的太阳系之外的一个星体的位置和大小”后来又通过类似的方式发现了离太阳更远的冥王星。

麦克斯韦的电磁理论同样获得成功，例如它成功地解释了当时波动光学中的各种问题。

这些成就造成了一种错觉，当时甚至有人认为：整个物理学已

经没有什么主要的东西留下来给后代人发现了，人们只能在这里、那里做一些修补细节的工作。这当然是形而上学的错误观点，人类对自然的认识是永无止境的！事实很快回答了这个问题，刚跨入二十世纪，上述关于热辐射、光电效应、原子结构等几方面的问题就提了出来，打破了物理学中沉静的局面。

上述几个方面的问题不是孤立的，它们彼此是有联系的，都涉及到了原子、分子的运动。人们把这些运动称为微观运动，并把原子、分子以及电子、质子、中子等称为微观粒子。这些问题的出现标志着人类的科学实践已深入到了微观领域，经典物理学只是对宏观物体运动规律的总结与引申，因此无法解释这些问题。正是通过这些问题的研究，使人们逐步摆脱经典概念的束缚，建立起一门崭新的学科——量子论，可以说量子理论是一门反映微观运动客观规律的学说。