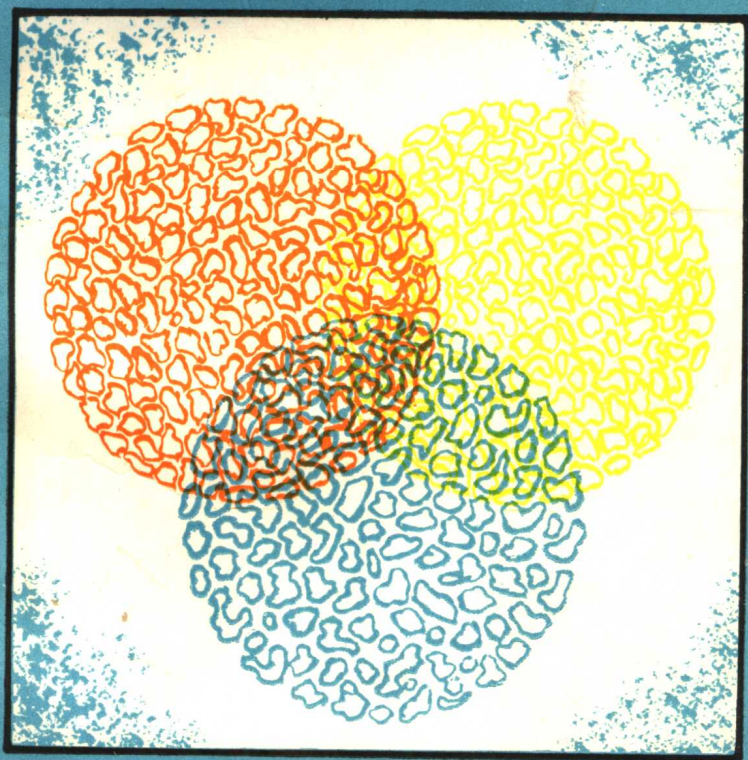


# 量子物理学

汤文及 译校



西北工业大学出版社

# 量子物理学

汤文及

译校

西北工业大学出版社

1991年12月 西安

## 【陕】新登字第009号

**【内容简介】** 本书在概述上世纪末，本世纪初出现的一系列经典物理所不能说明的实验事实的背景下，介绍量子理论的形成和发展过程以及以薛定谔方程为主的量子理论之表达形式和相应的解决问题的方法。本书还围绕着哥本哈根学派对量子理论的解释，述评了各不同学派的观点，并分述了量子物理在原子壳层构造、原子核、基本粒子物理和固体物理等方面的一些成就。

本书学术水平较高，论述严谨，深入浅出，不牵涉过于复杂的数学运算，知识全面而重点突出，既强调量子理论的系统性，又不忽视理论的典型应用。它是一本导论性教材，可作为物理专业学生学习高级量子力学的先修教材，又可为非物理专业的学生和工程技术人员提供必要的量子物理基本知识。

### 量子物理学

汤文及 译校

责任编辑 蔡增寿

责任校对 钱伟峰

西北工业大学出版社出版发行

(西安市友谊西路127号)

陕西省新华书店经销

西北工业大学出版社印刷厂印装

ISBN 7-5612-0396-9/O·52

开本 850×1168 毫米 1/32 4 插页 13.375 印张 320 千字

1991年12月第1版 1991年12月第1次印刷

印数：1-1000册 定价：7.06元

## 译者简介



汤文及 教授

汤文及，男，1908年10月生于湖南长沙。1935年7月毕业于南京国立中央大学物理系。1956年参加九三学社，1986年加入中国共产党。

1989年11月不幸在西安逝世。

历任四川大学副教授，西北工学院教授，西北工业大学物理教授。曾任陕西物理学会理事，西安能源学会理事和西安太阳能学会副理事长。1986年被瑞典皇家学会邀请作为诺贝尔物理奖提名人。

曾撰写了30多篇科学论文，如“静电加速器的原理和技术现状”，“离子束在静电场聚焦下最小截面积计算”，“离子注入技术在尖端科技领域中的应用”，“弧离子——一种基本粒子模型”，“粒子束武器”等等。

主要译文有：《高能激光器文集》（共收集英、日、俄文资料8篇译成中文）等。

晚年抱病坚持写作，还为西北工业大学建立应用物理专业四处奔走、呼吁，为创建该专业作出了贡献。

汤文及教授一生热爱祖国，追求真理，正直、善良、德高望重，毕生从事物理教育事业。教书育人，桃李满天下，可惜生前

未能看到该译文出版，现由于西北工业大学领导的支持，译者儿女为实现其遗愿的努力，译著即将面世，这无疑是对逝者一个极好的纪念。在此译者家属对西北工业大学领导，西北工业大学出版社，及西安交通大学赵福鑫教授等有关为此书出版作出努力的各界人士一并表示感谢。

译者儿女

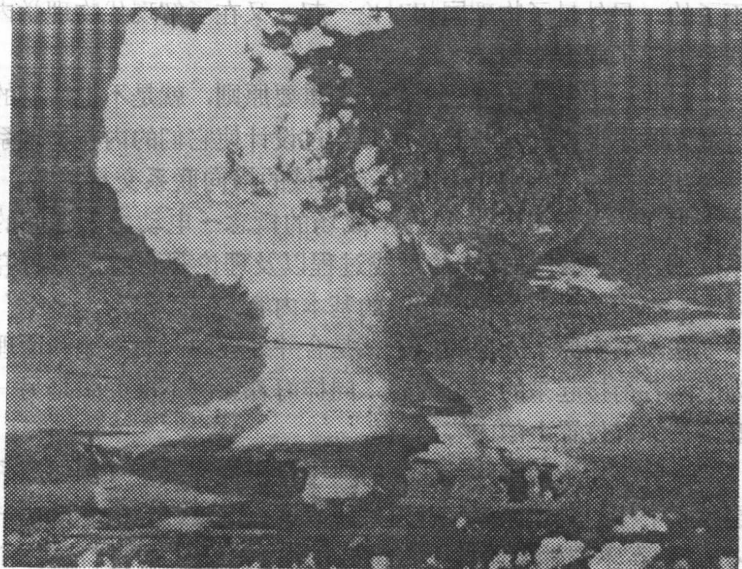
汤丽川 汤宛丁

汤天正 汤南凤

卢英瑾 汤娟林

汤筱琪

1991年12月



## 前 言

本书为大学二阶段课程提供了一种处理量子物理的基本现象和理论的教学体系。在教材内容的取舍上和教学方法的提炼上，采取了一条新的试探性的路线。它将有利于使这个已建立 50 多年而仍然认为特别艰深甚至感到神秘的量子物理，作为一个物理教学的中心内容成熟起来。这是和量子物理学在物理研究工作中和技术应用上日益显示出来的重要性非常相称的。原因是一些实际的物理学的和技术的问题，离开了量子物理的基本知识是解决

不了的。另外量子物理同相对论一起，又在了解现代物理学内在联系上起了媒介作用。

因此，本书编辑方法上的一条重要原则，就是不把所有的素材毫无联系地拼凑到一起，而是经过设计使它们的内在物理系统性突出起来，并且把它们同其它领域的横向联系交待清楚。[例如谐振子，统计物理→热力学或场的概念→电动力学之间的关系]。此外，物理学概念的形成过程以及理论观念的模型研究和讨论，都作为重要的物理教学的基本内容。

在本书中原子壳层和原子核是合并处理的，而把鲍利原理作为使两者衔接起来的中心内容。同样海森堡测不准关系是另一个安排在关键位置上的内容。

一些密切依赖于实验研究的典型量子物理效应（例如原子壳层和原子核的线性光谱，隧道效应，零点能量，导电性，化学键……）在不同抽象阶段上（微分过程上）提供的材料，往往促使人们从物理上作一种简单的数学考虑，这种情况下充分的说理，以及直观图象和图解，起着特别重要的作用。

然而，我们这种作法也只有在量子物理现象真正能够形象化地说明时，才去用它；反之，如从实验事实引出来的“二象性”问题，则是首先从量子物理的数学结构形式来解决的。

由于照顾历史发展和学习心理上的理由，本书只介绍了波动力学的一种代数表达形式。仅仅在处理谐振子问题时，才把一种更完美的不依赖于表象的量子理论（狄拉克）等价的数学形式，作为一个相应例子补充进来。

在本书中以基本形式展示出来的（一组）波动力学（薛定谔方程）并不是一种“无谓的游戏”，而是能够定量地解决一些实际物理问题的（例如借助于隧道效应处理 $\alpha$ -衰变，用线性势阱理论处理色心问题以及其它重要的固体物理问题）。这些实际问题将作为许多例题和习题环绕教学目标补充进去。

量子物理学曾引起深刻的、认识上的分歧，而且有时还夹杂对立着的意识形态上的争论；这通常是围绕着“客观-实在的现实性”的问题而进行的。本书没有用简单的方式来对待这些问题，而是详细地把对量子理论的解释的科学论点和思想立场提出来供大家思考讨论，并在物理教学中科学地反映出这一争论以便起到抛砖引玉的效果。这是我的愿望。

衷心感谢沙尔曼 (A.Scharmann) 教授对我工作的支持以及罔茨 (P.Ganz) 和赛伯特 (J.Scibert) 博士为开展固体物理教学而设计的新型验证实验。

维尔弗里德 库恩(Wilfried)

1976年3月于吉森



# 目 录

<b>第一章 原子物理中的量子现象</b> .....	1
1.1 原子观念的形成 .....	1
1.1.1 道尔顿定律与法拉第定律 .....	1
1.1.2 阿伏加德罗常数 .....	4
1.1.3 布朗运动 .....	6
1.2 气体放电的光谱线 .....	9
1.2.1 氢光谱的谱线系 .....	13
1.2.2 里兹组合原则 .....	15
1.3 伦琴射线(即 X-射线) .....	19
1.3.1 伦琴射线的早期研究 .....	19
1.3.2 伦琴射线是一种电磁射线的证明 .....	24
1.3.3 布喇格反射 .....	26
1.3.4 从韧致辐射谱测定普朗克常数 .....	31
1.3.5 特征伦琴射线 .....	33
1.4 原子壳层的谱项图 .....	35
1.5 原子内的能级 .....	38
1.5.1 夫南克—赫兹实验 .....	39
1.5.2 共振吸收 .....	42
1.5.3 夫南克—赫兹实验的意义 .....	43
1.5.4 习题 .....	45
<b>第二章 核物理中的量子现象</b> .....	46

2.1	放射性辐射 .....	46
2.1.1	从事放射线工作的准则 .....	48
2.1.2	辐射量的单位、射线防护规则 .....	48
2.1.3	放射线的最早实验 .....	50
2.1.4	$\alpha$ - $\beta$ -和 $\gamma$ -射线 .....	51
2.2	原子的质量与电荷的分布 .....	53
2.2.1	卢瑟福的原子模型 .....	54
2.2.2	卢瑟福的散射实验和原子核的发现 .....	55
2.3	原子核的结构及其系列 .....	64
2.4	放射线及其检验方法 .....	67
2.5	放射线的性质 .....	72
2.5.1	$\alpha$ -衰变的分立的射线能谱 .....	72
2.5.2	核衰变定律 .....	75
2.5.3	$\gamma$ 衰变的分立谱线 .....	79
2.5.4	习题 .....	81
<b>第三章 原子的早期半经典描述 .....</b>		<b>82</b>
3.1	玻尔原子模型 .....	82
3.1.1	玻尔假定 .....	82
3.1.2	氢光谱的意义 .....	84
3.1.3	伦琴射线谱的初步解释 .....	86
3.1.4	对应原理 .....	88
3.1.5	玻尔模型的局限性 .....	89
3.2	原子核的液滴模型 .....	89
3.2.1	结合能公式 .....	90
3.2.2	对于质量公式的解释和评论 .....	92
3.2.3	习题 .....	94

<b>第四章 光与物质的模型的建立</b> .....	95
4.1 光的射线模型 .....	97
4.2 光的波动模型 .....	99
4.3 光的粒子模型 .....	101
4.3.1 光电效应 .....	102
4.3.2 康普顿效应 .....	108
4.3.3 康普顿效应的相对论理论 .....	115
4.3.4 光的粒子模型进一步的实验事实 .....	119
4.3.5 “黑体”射线谱的强度分布 .....	121
4.3.6 小结 .....	123
4.4 物质的粒子模型 .....	123
4.4.1 电子的粒子性 .....	124
4.4.2 质子 .....	128
4.4.3 中子 .....	129
4.5 物质的波动模型 .....	131
4.5.1 电子的衍射 .....	131
4.5.2 中子的衍射 .....	137
4.5.3 习题 .....	138
4.6 什么是实际的电子 .....	138
4.6.1 用经典粒子作双缝实验 .....	139
4.6.2 波的双缝实验 .....	140
4.6.3 电子的双缝实验 .....	142
4.6.4 光的双缝实验 .....	144
4.6.5 模型与实际 .....	145
<b>第五章 量子理论</b> .....	147
5.1 薛定谔方程 .....	148

5.1.1	一维与时间无关的薛定谔方程 .....	148
5.1.2	波函数 $\psi$ 的统计意义 .....	152
5.1.3	量子物理中的几率概念 .....	153
5.1.4	经典物理的几率描述 .....	154
5.1.5	$\psi$ 函数的归一化 .....	155
5.1.6	与时间相关的薛定谔方程 .....	156
5.2	一维薛定谔方程的应用 .....	158
5.2.1	无限深的势阱 .....	158
5.2.2	有限深度的一维势阱 .....	164
5.2.3	习题 .....	175
5.2.4	三维势阱 .....	176
5.2.5	隧道效应 .....	177
5.2.6	隧道效应的经典模拟实验 .....	181
5.2.7	$\alpha$ -衰变理论 .....	181
5.2.8	习题 .....	192
5.2.9	谐振子 .....	192
5.2.10	习题 .....	197
5.3	海森堡测不准关系 .....	199
5.3.1	由德布罗意波导出测不准关系 .....	199
5.3.2	测不准关系的应用 .....	206
5.3.3	本征值和期望值 .....	210
5.4	氢原子 .....	211
5.4.1	三维势的量子数 .....	212
5.4.2	基态 .....	215
5.4.3	激发态 .....	220
5.4.4	氢原子概念的进一步发展 .....	222
5.4.5	习题 .....	225

<b>第六章 量子理论的解释</b> .....	226
6.1 问题的提出 .....	226
6.2 微观物理中的测量过程 .....	227
6.3 哥本哈根解释 .....	231
6.3.1 观测者的作用 .....	232
6.3.2 互补原理 .....	234
6.3.3 波函数的约缩 .....	236
6.3.4 因果性——非决定性论 .....	237
6.4 围绕哥本哈根解释的讨论 .....	239
6.4.1 实在论者的批评 .....	239
6.4.2 唯物论者的批评 .....	245
6.4.3 总结 .....	251
<b>第七章 二粒子系统与鲍利原理</b> .....	253
7.1 基本粒子的不可分辨性 .....	254
7.2 玻塞费米和玻尔兹曼统计 .....	258
7.3 氦原子 .....	259
7.4 电子的自旋 .....	263
7.5 电子的磁性 .....	267
7.6 钠的 D 线 .....	270
<b>第八章 多粒子系统的壳层结构</b> .....	272
8.1 原子外壳分层结构 .....	272
8.1.1 电子壳层的构造 .....	272
8.1.2 价电子和化学键 .....	280
8.1.3 周期系的结构 .....	284
8.1.4 超重元素的壳层结构 .....	286
8.2 原子核的壳层结构 .....	287

8.2.1	强相互作用 .....	287
8.2.2	自然界四种相互作用的一般讨论 .....	291
8.2.3	核势 .....	293
8.2.4	魔数 .....	295
8.2.5	超重核的存在 .....	298
8.2.6	习题 .....	299
<b>第九章 核过程及其技术应用 .....</b>		<b>301</b>
9.1	核的衰变过程 .....	301
9.1.1	$\alpha$ -衰变 .....	301
9.1.2	$\beta$ -衰变 .....	304
9.1.3	$\gamma$ -衰变 .....	313
9.1.4	核裂变 .....	314
9.2	衰变系列 .....	316
9.3	核反应 .....	318
9.4	利用核裂变获得能量 .....	322
9.5	核聚变能量 .....	329
9.5.1	习题 .....	332
<b>第十章 基本粒子物理 .....</b>		<b>333</b>
10.1	反粒子 .....	335
10.2	基本粒子物理学中的量子数 .....	338
10.3	基本粒子理论 .....	344
<b>第十一章 固体物理 .....</b>		<b>348</b>
11.1	固体的结构 .....	349
11.2	固体的能带模型 .....	352
11.2.1	固体内电子的可能的能态 .....	352

11.2.2	电子在能带上的填充·····	364
11.2.3	带模型中的导体和非导体·····	366
11.3	金属的导电性能·····	367
11.3.1	自由电子的浓度和漂移速度·····	367
11.3.2	金属导电的经典电子气模型·····	369
11.3.3	金属中传导电子的量子力学描述:“费米电子气”·····	373
11.3.4	“费米气模型”的应用·····	378
11.4	能带模型在半导体和绝缘体上的应用·····	380
11.4.1	光的吸收和固体的颜色·····	382
11.4.2	固体的光导电性·····	386
11.4.3	半导体的导电性与温度的关系·····	387
11.5	固体的晶格缺陷·····	390
11.5.1	F-中心:势阱中的电子·····	391
11.5.2	发光现象·····	394
11.5.3	半导体的缺陷·····	399
附录	·····	405
附图	·····	405
原素周期系图表	·····	408
重要常数	·····	409
物理关系和物理定律	·····	410

# 第一章 原子物理中的量子现象

## 1.1 原子观念的形成

如今的每个人都有一些原子观念。这个观念差不多每天都在广播或报刊上的一些名词中出现，如原子反应堆、原子弹、原子能等等。我们每个人在生活中也能感到这个观念还在发展，并且相信以后还会出现一些新的东西。为了对科学的原子观念，作一次总结性的阐明，我们在此对确切的、科学的原子观念的发展，作一简短的导言。

在周期表（见附图 2）中对各元素和相应的原子，作了最集中而简明的描述。此表在理论计算上能扩展到包含 172 个元素，表上全都列上了。即从自然元素（到铀为止）和若干人造元素（从镎到 106 号元素）以及迄今尚未为人所知的元素（从 107 号开始）。次序是按各原子的相对质量的大小来排列的（更正确地说是按核电荷排列的）。

周期表排列的第二个原则具有化学性质内容。凡化学性质相类似的元素，总排在同一行（其理由将在第八章再详细说明）。各元素之间的质量比，称为相对质量，也称为“原子量”。这是一个无量纲数，也载在周期表上。以后还会看到原子也能够以带电的离子面貌出现。

### 1.1.1 道尔顿定律与法拉第定律

发展原子概念真正作出重要贡献的是道尔顿（1766—1844）和法拉第（1791—1867）。前者指出元素质量关系，后者第一次



给出元素的电荷特性。

道尔顿定律如下：

1. 质量守恒定律：

参与化学过程各种物质的总质量不变。

2. 定比定律：

参与一化学过程的各元素，只能按一定的不变的重量比例，互相结合。

3. 倍比定律：

如两种元素能形成多种化合物时，则其中一种元素与一定重量的另一种元素形成的几种化合物中的该元素各重量之间，成一简单的整数比。

这些定律有重要意义，所以，化学中经常用到它们，每一个化学反应方程，第一个分子式都体现这些定律。其次，我们还可以从中得到原子价的观念。某一元素的原子价就是能同这种元素的一个原子相结合的氢原子的个数。

法拉第定律是：

1. 在电解中电极上析出的物质的质量与通过溶液的总电量成正比。

2. 在不同电解槽中通过同样多的电量，则析出（电解出）各不同物质的质量与各该物质的原子量被原子价所除的商成比例。

从这两个定律知道，每一给定化合物在溶液中存在的原子亦即离子，带有完全一定的电荷。

法拉第又确定，每通过 96 500C 电荷时，析出的一价元素的质量等于以克为单位的原子量数。因为原子量是一个无量纲数，我们应称之为本征的相对原子质量，精确的定义是：