

北京大学物理学院基础物理课程讲义

原 子 物 理 学

刘 玉 鑫

北京大学物理学院

2020年2月修订稿

Liu's Lectures On AP at PKU
Please do not distribute outside

Contents

1 由经典物理到量子物理的过渡	1
1.1 热辐射的经典物理理论遇到的困难与普朗克光的量子假说	1
1.1.1 热辐射及基尔霍夫辐射定律	1
1.1.2 绝对黑体的辐射规律	3
1.1.3 紫外灾难的解决—光量子假说	6
1.2 光电效应与爱因斯坦光量子理论	9
1.2.1 光电效应的实验事实	9
1.2.2 经典物理遇到的困难	11
1.2.3 困难的解决—爱因斯坦光子理论	12
1.3 康普顿效应	16
1.3.1 康普顿散射与康普顿效应	16
1.3.2 康普顿效应的解释	17
1.3.3 康普顿效应的意义	21
1.4 经典物理在光的本质研究中遇到的困难	21
1.4.1 原子结构的核式模型	22
1.4.2 原子光谱—光具有粒子性的另一实验事实	25
1.4.3 光的本质—波粒二象性	30
1.4.4 经典物理的困难	30
1.5 关于光的粒子性的机制的旧量子理论	31
1.5.1 玻尔关于氢原子结构的理论	31
1.5.2 玻尔理论的成功与局限	38

2 量子力学初步	45
2.1 物质波的概念及其波函数描述	45
2.1.1 微观粒子的物质波的概念	45
2.1.2 物质波的描述 — 波函数	52
2.1.3 波函数的统计诠释	52
2.1.4 统计诠释及其它物理条件对波函数的要求	53
2.2 物理量与物理量算符	57
2.2.1 物理量的值的不确定性	57
2.2.2 物理量的平均值及其计算规则	62
2.2.3 物理量的算符表达及其本征值和本征态	66
2.2.4 物理量算符的性质及运算	70
2.3 量子态与态叠加原理	79
2.3.1 量子态及其表象	79
2.3.2 态叠加原理	80
2.4 可测量完全集及其共同本征函数	83
2.4.1 对不同物理量同时测量的不确定度	83
2.4.2 不同物理量同时有确定值的条件	85
2.4.3 一些物理量的共同本征函数	86
2.4.4 可测量完全集及其共同本征函数的完备性	88
2.5 量子态和物理量随时间的演化	90
2.5.1 量子态随时间的演化及其确定方法	90
2.5.2 定态Schrödinger方程	92
2.5.3 连续性方程与概率守恒	94
2.5.4 物理量随时间的演化及守恒量	95
2.5.5 绘景	98
2.6 一维定态问题举例	98
2.6.1 一维无限深方势阱	98
2.6.2 一维线性谐振子	101
2.6.3 一维方势垒及其隧穿	107
2.7 微扰计算方法	111

2.7.1	非简并定态微扰计算方法	112
2.7.2	简并定态微扰计算方法	115
2.7.3	含时微扰与量子跃迁	116
3	氢原子和类氢离子的结构与性质	127
3.1	有心力场中的粒子	127
3.1.1	有心力场中运动的粒子的可测量量完全集	127
3.1.2	径向本征方程与能量本征值	128
3.2	氢原子的能级和能量本征函数	130
3.2.1	径向方程的质心运动与相对运动的分离	130
3.2.2	氢原子的径向方程与能量本征值	131
3.3	氢原子和类氢离子的结构与性质	134
3.3.1	氢原子和类氢离子的能级特点及简并度	134
3.3.2	氢原子的波函数及概率密度分布	135
3.3.3	类氢离子的性质	142
4	多电子原子的结构	147
4.1	微观粒子具有自旋自由度	147
4.1.1	实验基础	147
4.1.2	电子具有内禀自由度—自旋	149
4.2	单电子的自旋态的描述	152
4.2.1	自旋态的描述	152
4.2.2	自旋算符与泡利算符	153
4.3	两电子的自旋的叠加及其波函数	155
4.3.1	两电子自旋叠加的概念和代数关系	155
4.3.2	两电子的总自旋及其波函数	156
4.4	全同粒子及其交换对称性	160
4.4.1	全同粒子体系的概念和基本特征	160
4.4.2	全同粒子体系波函数的交换对称性	161
4.4.3	仅包含两全同粒子的体系的波函数与泡利不相容原理	162

4.4.4	全同多粒子体系性质研究方法简述	167
4.5	多电子原子结构的研究方法初步	168
4.5.1	一般讨论	168
4.5.2	哈特里-福克自洽场方法	169
4.5.3	密度泛函方法	170
5	原子能级的精细结构与元素周期表	177
5.1	精细结构的概念与分类	177
5.2	电子的自旋与轨道角动量之间有相互作用	177
5.2.1	自旋-轨道相互作用的概念	177
5.2.2	自旋-轨道相互作用的表述形式	178
5.2.3	考虑自旋-轨道相互作用下原子的哈密顿量及其本征函数	179
5.3	氢原子和类氢离子的能级的精细结构	181
5.4	碱金属原子能级的精细结构	185
5.5	多电子原子能级的精细结构	187
5.5.1	哈密顿量及其求解	187
5.5.2	LS 耦合制式	187
5.5.3	JJ 耦合制式	190
5.6	原子能级的超精细结构与兰姆移动	191
5.6.1	原子能级的超精细结构	191
5.6.2	原子能级的同位素移动	197
5.6.3	氢原子能级的兰姆移动	198
5.7	原子的壳层结构与周期表	200
5.7.1	单电子能级的壳层结构与电子填充	200
5.7.2	多电子原子中电子的填充	202
5.7.3	元素周期表	205
6	原子状态的改变与外电磁场中的原子	213
6.1	原子状态的改变	213
6.1.1	概述	213

6.1.2	基本概念和规律	214
6.1.3	原子光谱	222
6.1.4	内层电子跃迁与X射线谱	232
6.1.5	激光及其产生原理	240
6.2	磁场中的原子	242
6.2.1	较强磁场中的原子 — 正常塞曼效应	244
6.2.2	弱磁场中的原子 — 反常塞曼效应	249
6.3	电场中的原子 — 斯塔克效应	257
6.3.1	相互作用势与哈密顿量	257
6.3.2	能级分裂和光谱分裂	258
6.4	磁共振	260
6.4.1	拉莫尔旋进	260
6.4.2	磁共振的理论描述	262
6.4.3	顺磁共振	263
6.4.4	核磁共振	264
6.5	量子相位	267
6.5.1	Aharonov-Bohm 效应	267
6.5.2	Aharonov-Casher 效应	270
6.5.3	He-McKellar-Wilkens-Wei-Han-Wei 效应	271
6.6	冷原子囚禁与玻色-爱因斯坦凝聚	274
7	分子光谱与分子结构初步	283
7.1	分子能级和分子光谱	283
7.1.1	概述	283
7.1.2	分子内部运动模式及其能标间的比较	284
7.1.3	分子的转动能级和转动光谱	286
7.1.4	分子的振动能级、振动光谱及振动转动光谱	289
7.1.5	拉曼光谱	294
7.2	分子结构描述方法概论	297
7.2.1	分子的哈密顿量与本征方程	297

7.2.2	玻恩-奥本海默近似	298
7.2.3	“分子轨道”与自洽场方法	300
7.3	分子键与共价键理论初步	301
7.3.1	分子键概述	301
7.3.2	共价键的描述方法	304
8	亚原子物理初步	321
8.1	原子核的组分、运动模式及一些特征量	321
8.1.1	原子核的组分及其描述	321
8.1.2	原子核的结合能与液滴模型	325
8.1.3	原子核的集体运动	329
8.2	核力简介	338
8.2.1	核力及其基本特征	338
8.2.2	核力研究的理论方法	341
8.3	原子核的衰变	342
8.3.1	原子核的衰变及其规律的一般描述	342
8.3.2	γ 衰变	344
8.3.3	α 衰变	345
8.3.4	β 衰变	350
8.3.5	其它模式的衰变	354
8.3.6	稳定谷	361
8.4	原子核结构模型	362
8.4.1	壳模型 (Shell Model)	362
8.4.2	集体模型	372
8.4.3	代数模型	375
8.5	核反应及其研究方法	390
8.5.1	核反应的分类与遵循的基本规律	390
8.5.2	一般描述方案	393
8.5.3	光学势、玻恩近似、分波分析、等研究方法概述	398
8.6	粒子家族及其基本规律	400

CONTENTS

IX

8.6.1	微观粒子家族	400
8.6.2	强子的组分粒子及强子的夸克模型	401
8.6.3	强相互作用的基本性质	406
8.6.4	基本相互作用的规范对称性	414
8.7	现代核物理的整体框架	415
8.7.1	整体框架概述	415
8.7.2	同位旋相关的核物理	416
8.7.3	角动量相关的核物理	416
8.7.4	能量相关的核物理	417
8.7.5	奇异数相关的核物理及学科交叉	419

Liu's Lectures On AP at PKU
Please do not distribute outside

*Liu's Lectures On AP at PKU
Please do not distribute outside*