

近代原子物理学

(下册)

量子理论及其应用

[法] B. 凯格纳克 J. -C. 裴贝—裴罗拉 著



科学出版社

Σ 和

τ 时间恒量(寿命,弛豫时间)

ϕ 角,特别是球坐标中的经度

Φ { 磁通
角波函数

χ { 角
磁化率

ψ { 角
总波函数

ω { 转动的角速度
正弦函数的角频率

Ω { 立体角
例外地,转动的角速度

序

本书上册《近代原子物理学——基本原理》通过描述涉及原子基本性质(能量量子化,波粒二象性,原子的行星模型以及原子的磁矩和角动量)的一些实验,讨论了基本的经典问题。上册着重阐述原子物理对于理论物理的产生和发展的巨大贡献,但是它的目的是为了使没有学过量子力学的读者易于理解;因而它的语言基本上是经典的。这样我们就无法介绍那些不利用量子理论就不易理解的原子物理内容(或者至少是它们的结论),为此,需要下册。

本书将出现两个主题。第一个主题构成了第一章到第六章的基础,是用量子力学的方法,对原子结构作出合乎逻辑发展的阐述。相应地假定读者已经学过量子力学,至少是初等量子力学。然而,前四章没有利用量子理论的正规内容,所以只要理解量子力学的一般概念就足够了。我们力图避免写纯理论的书,而且为了尽可能保持与真实物理世界的紧密联系,我们竭力提供了大量的实验数据。为了使各种水平的读者能利用这本书,我们为不同的要求作了准备,尤其在第五章中,略去其中几节,并不会影响对整体的理解。

本书的第二个主题是第七章的内容。原子系统的研究,对于物理概念的提出和发展一直是很重要的,而且原子物理是非常有助于实验物理学家与理论物理学家相互促进的一个领域。这种相互合作在本世纪早期特别显著,至今仍然是有价值的。“兰姆位移”(见 151 页)的发现开辟了量子电动力学的领域,量子电动力学本身现在已是了解得极好和最精确的

物理学理论。目前正在研究量子电动力学的很多基本的和重要的问题：有关电子和 μ 子之间的关系问题；强子改正值的计算问题；电动力学中可能的对称性破坏问题。此外，所谓“奇异粒子”（ μ 介子原子， π 介子原子或 K 介子原子）的研究，将对原子核的结构提供丰富的资料。我们不想对这些问题作详尽无遗的陈述，因为这需要一系列书籍，这里只是用几个例子来说明。我们的目的只不过是使读者对原子物理当前的研究有个透彻的理解。

在编写本书过程中，我们力图使学生学会如何去处理实验结果，并且给他们一个量级的概念，这对于判别近似计算是否合理是必不可少的，要是不采用近似方法，物理学中能计算的问题就太少了。这就使我们不能令 $\hbar = c = 1$ （理论物理学家是如此做的），这样，我们不得不面对使人恼火的单位问题。由于法国学生几年来已习惯用有理化 MKS 单位，我们不想打乱这一惯例，因此我们采用了有理化公式。然而，在原子物理中，大多数出版物和重要著作，甚至最新的著作，是采用非有理化高斯单位制的，因此学生应该学会从一种单位制转换到另一种单位制。为此，我们已经把系数 κ 引进了我们的公式， κ 是由关系式

$$\kappa = \epsilon_0 \mu_0 c^2$$

来定义的。

(1) 在 MKS 制中， $\kappa = 1$ ，这样，在所有公式中可以简单地不管系数 κ ，于是，这些公式变成了标准的有理化公式，而恒量的数值为

$$4\pi\epsilon_0 = \frac{1}{9 \times 10^9}; \quad \frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7}.$$

(2) 在高斯制中，同时采用静电 CGS 制的电学单位和电磁 CGS 制的磁学单位。因此，系数由

$$4\pi\epsilon_0 = 1, \quad \frac{\mu_0}{4\pi} = 1 \quad \text{和} \quad \kappa = c$$

来定义。

附录 1 列出了一组电磁公式,指明考虑到 κ 之后,如何来修正经典公式。我们已经把这些公式作为我们原子物理中所有计算的出发点。

B. 凯格纳克

J.-C. 裴贝-裴罗拉

英 译 本 序

凯格纳克和裴贝-裴罗拉著的《近代原子物理学》的英文版,已尽可能忠实地保持了原作的精神实质和文风。但是,也作了某些变动。

(1) 在书中凡是感到说英语的学生不熟悉法文术语,我们已优先采用英文的习惯术语。例如,超高频跃迁已改为微波跃迁。

(2) 法文版分为两卷,是连续编章的;附录都放在第二卷末尾。英文版决定分二册出版,尽可能彼此独立。为此,每册都加上了不同的副标题——上册“基本原理”;下册“量子理论及其应用”。在这两册中,章节编号是独立的,并用小数点记号分每章小节。除非另有说明,指其它章节的编号总是指本书。现在每册均有附录,其中有一些在两册中都出现。

(3) 在同作者商量后,对某些节作了进一步阐述,以避免可能的误解。另外,为了努力保证这本书跟上时代,已把过去三年中的一些重要发展补充到有关的课题中去了。除了改正和术语改变外,所有改动均安排在英译者注中。

(4) 本书采用 SI 单位(国际单位,即有理化 MKS 单位),虽然一些有关公式中仍保留了系数 κ (见法文版序)。因而不 管某些光谱学家如何反对这种改变,例如,从埃的单位到米的派生单位,从高斯到特斯拉,本书中数值几乎都用 SI 单位制。

(5) 重要的名字和日期只是为了历史的重要性而给出的,因此象法文版那样,通常略去了确切的参考文献。法文版中所提到的教科书如果没有英译本,就用英文书代替。

(下略)

英译者
于 1974 年 7 月

符 号 表

1. 拉丁字母表

- a { 加速度
椭圆的半长轴, 或其它长度
- A { 磁矢势
正弦函数的振幅
磁矩耦合常数
自发发射几率
- $\mathcal{A}$ { 原子质量数
原子质量(在 CGS 制中近似等于 A , 或在 MKS 制中近似等于 $A/1000$.)
- b { 碰撞问题中的瞄准参量
椭圆的半短轴, 或其它长度
- B { 磁感应矢量, 通常称为磁场
(磁场强度 $H = (1/\mu_0\mu_r)B$ 很少用到.)
吸收和感生发射几率系数(爱因斯坦记号)
正弦函数的振幅
- $\mathcal{B}$ 磁场矢量
- c 光速
- C { 力的库仑定律 ($W(r) = C/r$) 中的恒量
磁化率的居里恒量
电容
一根丝的扭转恒量
- d 微分
- d 量子数 $l = 2$ (一个电子的总轨道角动量)的记号

- D { 电感应矢量
几率密度
距离
量子数 $L = 2$ (一个原子的总轨道角动量) 的记号
- $\mathcal{D}$ 一束粒子在单位横截面内的强度 ($N = \mathcal{D}iS$)
- e 自然对数的底 $e = 2.7183$
- e 元正电荷 $e = 1.6 \times 10^{-19}$ 库仑
- E { 电场矢量
原子态总能的代数值
- $\mathcal{E}$ 和一个波的电场相联系的复函数
- f { 函数
力矢量
振荡强度
量子数 $l = 3$ (一个电子的轨道角动量) 的记号
- F { 一个力系的和矢量
量子数 $L = 3$ (一个原子的轨道角动量) 的记号
- g { 朗德因子
量子数 $l = 4$ (一个电子的轨道角动量) 的记号
- G { 统计权重或简并度
量子数 $L = 4$ (一个原子的轨道角动量) 的记号
- h 普朗克恒量 ($\hbar = h/2\pi$)
- H 哈密顿算符
- $\mathcal{H}$ 哈密顿函数
- i -1 的平方根, 虚数的底
- i { 指标数
入射角
- I { 电流的量值
转动惯量
核自旋量子数和相应的矢量
- j { 电流密度矢量
指标数
角动量的量子数和相应的矢量

- J 一个原子的总角动量量子数和相应的矢量
- k { 玻耳兹曼常数
波矢量
整数
- K { 接触电势差
吸收系数
主量子数 $n = 1$ 的记号
- l { 长度
轨道角动量量子数和相应的矢量
- L { 发光率
一个原子的总轨道角动量量子数和相应的矢量
主量子数 $n = 2$ 的记号
- $\mathcal{L}$ 拉格朗日函数
- m { 质量, 特别是电子质量
磁量子数
- M { 分子质量
质量, 特别是原子核的质量
磁化强度矢量
主量子数 $n = 3$ 的记号
- $\mathcal{M}$ 磁矩矢量
- n { 单位体积内的粒子数
主量子数
- N { 整数(无量纲)
单位法线矢量
主量子数 $n = 4$ 的记号
- $\mathcal{N}$ 阿佛伽德罗数
- O 主量子数 $n = 5$ 的记号
- p { 动量或冲量矢量
电偶极矩矢量
指标数
能级上的粒子数(能级的布居)
量子数 $l = 1$ (一个电子的轨道角动量)的记号

- P { 功率
电介质的极化矢量
量子数 $L = 1$ (一个原子的总角动量) 的记号
主量子数 $n = 6$ 的记号
- $\mathcal{P}$ 广义冲量矢量
- q 代数电荷 (特别是电子的电荷 $q = -e$)
- Q { 电荷
一个共振腔或一个共振电路的品质因子
约化四极矩
- Q 四维张量的分量
- r 径矢量, 两点间的距离
- R { 两点间的距离
电阻
关于原子光谱的黎德堡恒量
关于理想气体的气体恒量
- $\mathcal{R}$ 径向波函数
- s { 自旋量子数和相应的矢量
屏蔽系数
量子数 $l = 0$ (一个原子的轨道角动量) 的记号
- S { 面积
一个原子的总自旋量子数和相应的矢量
量子数 $L = 0$ (一个原子的总轨道角动量) 的记号
- t 时间
- T { 绝对温度
周期
光谱项
- $\mathcal{T}$ 功
- u { 能量密度
单位矢量
转动坐标系中磁化强度 M 的横向分量
- U { 内能
静电电势

- v { 速度矢量
转动坐标系中磁化强度 M 的横向分量
- V { 静电电势或电动势
速度矢量(偶而这样表示)
- $\mathcal{V}$ 体积
- w { 小的能量
压强
几率
- W 一般的能量,特别是势能 $W(r)$
- x { 坐标
- y 坐标
- Y { 坐标
氢的角波函数(球谐函数)
- z 坐标
- Z { 坐标
元素的原子序数
统计配分函数

2. 希腊字母

- α { 精细结构恒量 ($\alpha = e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$)
角
方向余弦
一种粒子的名称
- β { 玻尔磁子
角
方向余弦
一类粒子的名称 (β^- 和 β^+ 射线)
- γ { 迴磁比
方向余弦
一个区域的电磁谱名称
- Γ 力矩或一个力系的合力矩
- δ 增量,微分

△ 拉普拉斯算符

Δ { 谱线宽度

微扰计算中加在能量上的修正

不依赖于单位的恒量, ϵ_0 (在 CGS 制中 ϵ_0 用 $1/4\pi$ 代替)

ε { 介电常数 ϵ_r ,

圆锥曲线的偏心率

任一非常小的量

η 效率, 或其它无量纲的因子

θ 角, 特别是球坐标中的纬度

Θ { 角波函数

德拜温度

κ 不依赖于单位的恒量:

$$\epsilon_0 \mu_0 c^2 = \kappa^2 \begin{cases} \text{在 MKSA 制中 } \kappa = 1 \\ \text{在高斯单位制中 } \kappa = c \end{cases}$$

λ 波长

Λ 康普顿波长 ($\Lambda = h/mc$)

不依赖于单位的恒量, μ_0 (在 CGS 制中 μ_0 用 4π 代替)

μ { 磁导率

约化质量

{ 压强

{ 几率

ν 频率

ξ 坐标

π { 3.1416.....

波的偏振记号(平行于磁场方向的偏振)

Π 积

{ 密度

ρ { 电荷密度

径矢量的特殊值

{ 角动量矢量

σ { 截面

波的偏振记号(圆偏振或垂直于磁场方向的偏振)

目 录

序.....	v
英译本序.....	ix
符号表	x
第一章 在有心势中的单个无自旋电子——用量子理论处 理.....	1
1.1 引言	1
1.2 库仑场中的情况。量子数和能量	2
1.3 类氢原子中电子的位置几率	10
1.4 与玻尔-索末菲模型的比较.....	15
1.5 非库仑有心势—— l 简并性的解除	18
第二章 在有心势中的独立电子近似。电子组态.....	26
2.1 复杂原子中的各种相互作用	26
2.2 N 个独立电子系统在有心势中的能级。组态	29
2.3 泡里原理和组态的简并性	33
2.4 元素的周期分类法	37
第三章 角动量和能级的计算.....	45
3.1 角动量合成	45
3.2 自旋-轨道相互作用.....	49
3.3 多电子原子中能级的计算原理	54
3.4 角动量的确定以及一个组态的不同能级的计算	62
3.5 总结	67
第四章 具有一个或两个电子的体系的光谱学.....	68
4.1 选择定则	69
4.2 具有一个外围电子的原子,并考虑电子的自旋.....	71
4.3 具有两个电子的原子	76

4.4	氢原子的能级: 谱线的精细结构	88
4.5	X 射线谱	97
第五章	原子的磁性. 塞曼效应和帕邢-巴克效应.....	102
5.1	电磁场中一个带电粒子的哈密顿量	103
5.2	恒定均匀磁场中的哈密顿算符	107
5.3	在 L - S 耦合下弱磁场中的塞曼效应	110
5.4	强场中的帕邢-巴克效应. 中等场的情况	119
5.5	具有一个或两个电子的原子的塞曼效应和帕邢-巴克 效应	125
第六章	原子核和原子物理学.....	133
6.1	原子核: 磁矩和角动量	134
6.2	能级的磁超精细结构	141
6.3	原子核和电子之间的磁相互作用: 超精细结构常数的 计算	145
6.4	电子和原子核之间静电相互作用所产生的修正	149
6.5	谱线的超精细结构	153
6.6	具有核自旋的原子的磁性. 塞曼与巴克-哥德斯密脱效 应	157
6.7	中等场范围中的能级图. 有效磁矩	162
第七章	原子物理中的实验方法.....	167
7.1	引言	167
7.2	光学光谱术	171
7.3	射频光谱术	184
7.4	寿命和振子强度	205
7.5	电子的碰撞和原子的碰撞	213
7.6	中子和电子的电偶极矩	225
7.7	μ 介子素, 介原子和电子偶素	230
附录		240
附录 1	电磁学公式.....	240
附录 2	经典辐射理论的复习.....	242

附录 3 多极矩	254
附录 4 非相对论弹性碰撞	270
附录 5 矢量和标量算符的表示. 维格纳-爱卡特定理	273
参考文献	280

第一章 在有心势中的单个无自旋电子

——用量子理论处理

1.1 引言

通过上册的学习可以看出,利用简单的模型,可以解释原子物理中的很多内容,其所用的分析方法与经典力学的很类似.然而,当仔细研究时,就需要作出一些很不自然的假设,这时很难保证经典理论与实验完全一致.

相反地,量子力学的方法对于原子物理是特别合适的.它的逐步进展——非相对论性波动力学、狄拉克相对论性力学、量子场论——使人们能够了解并精确地描述很多现象;进而,象在第四章中将要看到的,由于量子力学的发展而产生了电子自旋的概念.然而,应当立即指出,量子力学也只能对氢原子进行严格的处理,而且甚至这也不是很容易的.假若没有各种近似方法的帮助,要研究较为复杂的系统是不可能的.本章将研究如何描写一个没有自旋的电子在有心势中的行为.这种研究包括上册第六章中所描述的氢原子以及具有单个电子的类氢原子的情况.但是,读者应该努力在本章中寻找更为广泛的课题:以前所作的若干断言在这里应当变得更清晰了.关于一个电子在有心势中的许多结果,将是学习多电子原子的基础.

用量子力学研究类氢原子的一个电子的运动,在量子力学书中详细论述.为了保证本书必要的连贯性,我们将复习一下重点,并着重于结果及其物理意义.我们采用了本丛书

内一本量子力学¹⁾中所用的符号, 本书还从中吸收了许多内容. 读者如果经常参考那本书, 会感到很方便.

1.2 库仑场中的情况. 量子数和能量

1.2.1 薛定谔方程

现在讨论单个电子的问题, 这个电子具有电荷 $-e$, 它在原子核的库仑静电场中作轨道运行. 如果原子核是荷正电 e 的一个质子, 所研究的就是氢原子问题. 如果原子核携带 $2e$, $3e, \dots$ 的电荷, 所考虑的系统将是被电离了的原子, 称为类氢原子. 为了普遍起见, 我们将取核电荷等于 Ze , Z 是原子序数.

电子在核的库仑势中的势能是

$$W(r) = \frac{C}{r} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r},$$

引入电子的约化质量 μ (见上册第六章), 于是问题中的哈密顿量为

$$H = -\frac{\hbar^2}{2\mu} \Delta + W(r) = -\frac{\hbar^2}{2\mu} \Delta + \frac{C}{r}.$$

这时, 薛定谔方程可以写成

$$\Delta\phi + \frac{2\mu}{\hbar^2} \left(E - \frac{C}{r} \right) \phi = 0,$$

而在球极坐标中的拉普拉斯表达式为

$$\begin{aligned} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) \\ + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \phi^2} + \frac{2\mu}{\hbar^2} \left(E - \frac{C}{r} \right) \phi = 0. \end{aligned} \quad (1.1)$$

1) Y. Ayant 和 E. Belorizky 的《量子力学教程》. 这本书没有译成英文. 读者可查阅 P. T. Matthews 的《量子力学导论》和 A. Messiah 的《量子力学》以代替那本书. ——英译者