

近代原子物理学 (上册)

基本原理

[法] B. 凯格纳克 J. -C. 裴贝—裴罗拉 著



科学出版社

近代原子物理学

(上册)

基本原理

〔法〕B. 凯格纳克 J.-C. 裴贝-裴罗拉 著

张恽慈 俞雪珍 译

留润洲 校

科学出版社

1980

内 容 简 介

本书主要阐述近代原子物理学的基本原理。作者首先依据许多重要实验结果建立量子力学原理,进而论述原子物理学的基本定律及其应用。

全书分成两册。上册介绍基本原理,下册介绍量子理论及其应用。上册内容分为三部分:波和光子;行星模型和主量子数;角动量和磁矩。本书论述和计算比较详细,适合初学者。

本书是一本基础理论书籍,可供高等院校理论物理和原子物理专业师生及有关专业科技人员参考。

B. Cagnac J.-C. Pebay-Peyroula

MODERN ATOMIC PHYSICS

—*Fundamental Principles* (I)

William Clowes & Sons Limited

近代原子物理学

(上册)

基 本 原 理

〔法〕B. 凯格纳克 J.-C. 裴贝-裴罗拉 著

张悻慈 俞雪珍 译

留润洲 校

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1980年12月第一版 开本:787×1092 1/32

1980年12月第一次印刷 印张:12 1/2

印数:0001—7,600 字数:277,000

统一书号:13031·1392

本社书号:1925·13—3

定价: 1.95 元

序

原子物理的发展导致了量子理论的诞生和发展,而且至今仍和它紧密地联系在一起;甚至可以说,没有量子力学,原子物理就不能存在。一门量子力学课程如果强调数学结果的实验方面,就等于是一门好的原子物理课程。然而,经验证明,从理论计算过渡到实验描述时,常常不可避免地会带来术语上的混乱,学生们往往很难适应这种情况。因此为了便于学生吸收新的观念,似乎应该把整个课程分成两个不同部分。这两部分包含:(a)量子力学原理的实验验证和这些原理应用到原子结构时的推论;(b)叙述量子力学基本原理后,就几乎可以完全按逻辑和推理进行量子力学本身的表述。本书上册的目的就是完成第一部分任务。第二个任务则由下册“量子论及其应用”来承担。

我们进行探讨的方法是集中于描述实验以及将它们与理论结果相比较。其目的是:(a)通过描述那些论证了经典理论的缺陷,并提供了理论必须解释的无异议结果的关键性实验,来建立量子力学基本原理的实验基础。(b)提出支配原子体系内部结构的基本定律,由于它们现在有如此广泛的应用,了解这些是必需的。(c)概括研究目前在物理实验室中进行的实验工作,进而了解它的目的。

在讨论量子力学原理的实验基础时,我们认为应该避免单纯的历史重复。这种方式只是遵循本世纪开始的历史途径,来为我们自己证明唯一的出路是发明量子力学。量子力学现在已有如此坚固的基础,而且已被如此广泛的实验所支持,以

至于更多的探讨是不必要的，而且历史上的道路是曲折不平的，也不是最简单、最直接的。在多产时期，在不同领域同时进行工作，使某些思想以很复杂的推导形式突然出现。

然而，一定数量的细致而广泛的实验证据，对于理解量子力学主要观念的意义以及帮助接受这些观念是必不可少的。这些正是本书力图要包含的内容。我们没有忘记仍然具有基本重要性的一些老实验，但我们加上了许多其他更新的实验，并且不管它们年代次序，只要它们支持相同的重要观念，就把它们集中在书中的同一部分，甚至是同一章中，这似乎是合理的。

当考虑特定实验时，不同的观念常会部分重叠，这是事实。因此，我们不得不削弱某些观念而突出另一些观念。我们着重选择一般的概念而不是各别特殊的现象，并且为了解释某些现象需要利用几个一般的概念时，我们常常不得不从几个不同方面来讨论同一现象。例如，光学共振是包含原子-光子碰撞的现象，它的解释涉及能量守恒(第一章)、动量守恒原理(第二章)以及跃迁几率和截面的概念(第三章)。又例如，磁共振的解释中需要迴磁比(第九章)、空间量子化(第十章)以及与圆偏振有关的角动量(第十一章)等等。

我们的叙述是按照既考虑循序渐进，又考虑可以部分阅读本书这一指导思想进行的。所以，在上册中集中了一些简单的概念，这些概念不用量子力学的正规数学就能理解。上册的目的是描述实验，并依据最直接的实验结果来发展量子力学思想。这一部分可以在阐述量子力学之前阅读。某些偏重理论研究的读者，可能反对上册过多地利用了经典物理语言，但是不应忘记，为了迅速而方便地描述物理过程，记住经典的术语是必要的。而实验物理学家应当提高自己不断地把量子语言变成经典语言的能力。此外，量子理论中的测量基础，恰

• v •

恰是依据于测量仪器的经典性质。全书都注意了与量子力学的联系。正是这一点,使我们加重了与角动量有关的几章。它们对于更好地理解角动量理论在量子力学中的重要性是有帮助的。

此外,在下册中集中了一些概念,有些甚至是很老的概念,这些概念只有用量子力学的计算或结果才能满意地理解。对于已经学过量子力学的人,阅读本册是最有利的。在这种设想下,我们改变了写作步骤和风格。然而,下册前四章没有用量子力学的形式体系,只需要熟习量子力学的一般概念。实际上只有在下册中,才算完成了关于原子结构的描述。最后一章简单地介绍了一些当前正在考虑的实验问题。

在写作本书时我们做了一些折衷,主要目标是尽可能使读者对有关原子物理问题获得最精密和最准确的评述。正是这一目的决定了我们对课题的选择。课题范围显然要比一般学生在一年内所能接受的要广,在这一年内,他还要进修量子力学和核物理,或许还要加上例如场论或电子学。在叙述上做到某些章彼此之间有相对的独立性,以便读者能够安排自己的课程,作出相应的选择。每章中有些段落用小号字体排印,这些内容对于了解本章内容并不是必需的,初读时也可略去。

本课程的另一目的,是向读者表明他自己应该如何去得出实验结果,并且给他一个量级的概念;量级的概念对于判别近似计算是否合理是必不可少的。要是不用近似方法,物理学上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),我们不得不面对使人恼火的单位问题。因为法国学生几年来已习惯用有理化 MKS 单位,我们不愿打乱这一惯例,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,也还采用非有理化高斯单位制,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 引进我们的公式， κ 是由关系式

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

来定义的。

(a) 在 MKS 制中 $\kappa = 1$ ，这样，在所有公式中可以简单地不管系数 κ 。于是这些公式变成标准的有理化公式，而常量的数值是

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

(b) 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

$$4\pi\epsilon = 1; \quad \frac{\mu_0}{4\pi} = 1 \quad \text{及} \quad \kappa = c$$

来定义。

附录 1 列出了一组电磁公式，表明考虑了系数 κ 后，经典公式如何得到修正的。我们已经把这些修正的公式作为我们原子物理中所有计算的出发点(见中译本 358 页)

在课程开始之前，我们应该感谢在巴黎和格勒诺布尔的实验室中的所有成员以及研究人员。他们帮助我们准备了原子物理的这个新讲法。另外，我们必须感谢卡斯勒教授和布鲁塞教授在教学中和在日常实验室工作中对我们的鼓励。

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的法文术语,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。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 ($N = \mathcal{D}tS$)
- 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
- $\mathcal{E}$ 和一个波的电场结合的复函数
- 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
- 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
$\mathcal{L}$		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 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 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
Δ		拉普拉斯算符
Δ	{	谱线宽度 微扰计算中用在能量上的精确度
ϵ	{	不依赖于单位的恒量, ϵ_0 (在 CGS 制中 ϵ_0 用 $1/4\pi$ 代替) 介电常数 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
不依赖于单位的恒量:
- κ $\epsilon_0 \mu_0 c^2 = \kappa$ { 在 MKSA 制中 $\kappa = 1$
在高斯单位制中 $\kappa = c$
- λ 波长
- Λ 康普顿波长 ($\Lambda = h/mc$)
- μ { 不依赖于单位的恒量, μ_0 (在 CGS 制中 μ_0 用 4π 代替)
磁导率
约化质量
- ν 频率
- ξ 坐标
- π { 3.1416
波的偏振记号
- Π 积
- ρ { 密度
电荷密度
径矢量的特殊值
- σ { 角动量矢量
截面
波的偏振记号(圆偏振或垂直于磁场方向的偏振)
- 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 正强函数的角频率
Ω	{	立体角 例外地,转动的角速度

目 录

序.....	iv
英译本序.....	viii
符号表.....	ix
引言.....	1

第一部分 波 和 光 子

第一章 能量的量子化.....	5
1.1 普朗克定律的回顾	5
1.2 光电效应	7
1.3 光谱	17
1.4 原子蒸汽的电子激发	30
1.5 能量单位	42
第二章 辐射动量.....	47
2.1 经典的处理和辐射压强	47
2.2 光子的动量	58
2.3 光子的弹性碰撞——康普顿效应	61
2.4 光子的非弹性碰撞	70
2.5 各种类型的碰撞过程的复习	78
第三章 辐射跃迁几率.....	82
3.1 光子的吸收	82
3.2 光子的自发发射	91
3.3 感生发射和爱因斯坦的辐射理论	100
第四章 波粒二象性.....	108
4.1 经典场的振幅和光子之间的关系	108