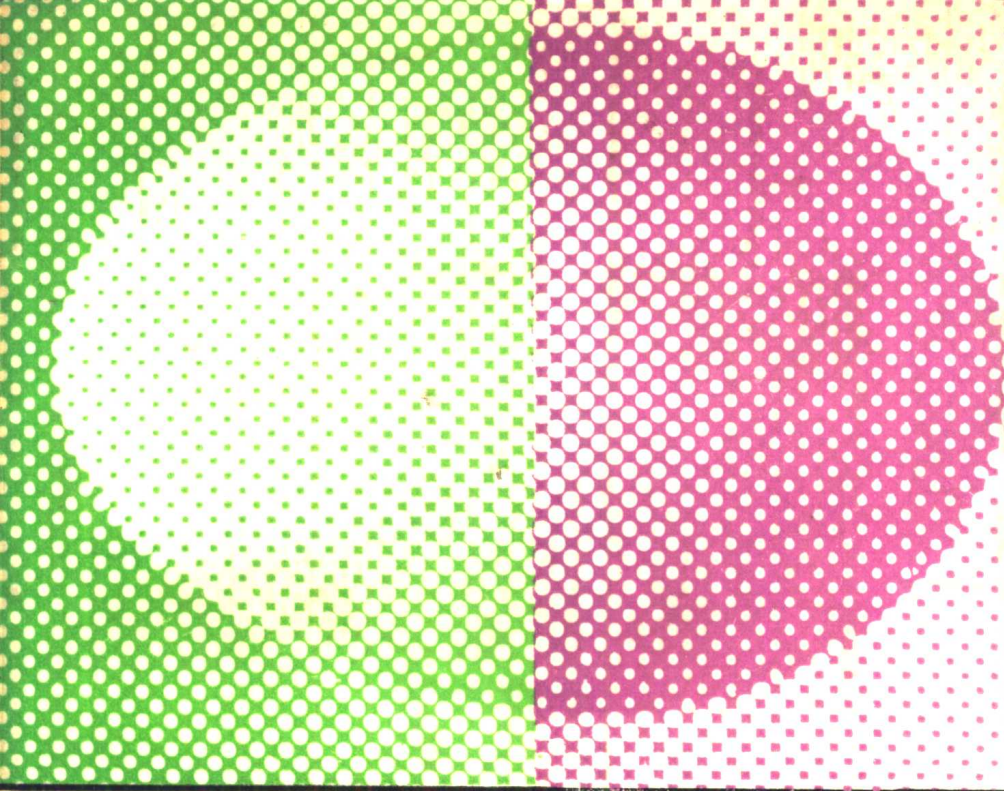




原子物理学和量子物理学

H. 哈肯 H. C. 沃尔夫 著

科学出版社

原子物理学和量子物理学

H 哈肯 H. C. 沃尔夫 著

刘岐元 译

科学出版社

1993

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书详细介绍了原子物理学和量子物理学的一些实验事实和基本理论方法,还介绍了一些现代应用,如化学键量子理论、核磁共振法在现代物理、化学、生物研究和医学诊断中的重要作用,里德伯原子的研究等。

本书自成系统,叙述简练,不仅可供大学物理系师生参考,亦可供化学、电气工程等有关专业师生参考。

H. Haken H. C. Wolf

ATOMIC AND QUANTUM PHYSICS

Springer-Verlag 1984

原子物理学和量子物理学

H. 哈肯, H. C. 沃尔夫 著

刘岐元 译

责任编辑:张邦固

科学出版社出版

北京景福城街16号

邮政编码:100717

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

*

1993年4月第 一 版 开本:787×1092 1/32

1993年4月第一次印刷 印张:19 7/8

印数:1—1 550 字数:430 000

ISBN 7-03-003243-8/O · 586

定价:18.50 元

原子物理学的基本常数[国际单位制 (SI)]

真空的磁导率	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{VsA}^{-1}\text{m}^{-1} = 1.256637 \cdot 10^{-6} \text{VsA}^{-1}\text{m}^{-1}$
真空的电容率	$\epsilon_0 = (\mu_0 c^2)^{-1} = 8.854187 \cdot 10^{-12} \text{AsV}^{-1}\text{m}^{-1}$
光在真空中的速度	$c = 2.99792458 \cdot 10^8 \text{ms}^{-1}$
玻耳兹曼常量	$k = 1.380662 \cdot 10^{-23} \text{JK}^{-1}$
法拉第常量	$F = 9.648455 \cdot 10^4 \text{C/mol}$
基本电荷	$e = 1.6021892 \cdot 10^{-19} \text{C}$
电子的静质量	$m_e = 9.109534 \cdot 10^{-31} \text{kg}$
电子的荷质比	$e/m_e = 1.7588047 \cdot 10^{11} \text{C/kg}$
质子的静质量	$m_p = 1.6726485 \cdot 10^{-27} \text{kg}$
普朗克常量	$h = 6.626176 \cdot 10^{-34} \text{Js}$ $\hbar = h/2\pi = 1.0545887 \cdot 10^{-34} \text{Js}$
里德伯常量	$R_\infty = 1.097373177 \cdot 10^7 \text{m}^{-1}$
玻尔半径	$a_0 = 0.52917706 \cdot 10^{-10} \text{m}$
玻尔磁子	$\mu_B = 9.274078 \cdot 10^{-24} \text{Am}^2$
核磁子	$\mu_N = 5.050824 \cdot 10^{-27} \text{Am}^2$
电子的康普顿波长	$\lambda_C = 2.4263089 \cdot 10^{-12} \text{m}$
精细结构常数	$\alpha = 7.2973506 \cdot 10^{-3}$
阿伏伽德罗数	$N_A = 6.022045 \cdot 10^{23} \text{mol}^{-1}$

最重要的常用符号表

所定义的符号的公式编号列于括号内, 方括号内的编号是指本书的节号。希腊符号列于表末。

A	矢势
A	振幅或常数
A	质量数(22)或面积
a	间隔因子或精细结构常数(12.28)和超精细分裂(20.10)
a₀	氢原子在基态时的玻尔半径(8.8)
B	磁感应
b[†]b	谐振子的产生算符和湮没算符
b	常数, 磁撞参数
C	常数
c	光速, 级数展开系数
c.c.	复共轭
D	偶极矩
d	常数
dV	无限小体积元
E	电场强度
E	能量, 总能量, 能量本征值
E_{动能}	动能
E_{势能}	势能
E_总	总能量

- e 质子电荷
- $-e$ 电子电荷
- e 指数函数
- F 电场强度(14.1)
- F, F 包括核角动量的原子的总角动量和相应的量子数(20.6)
- F 磁感应强度的振幅
- f 弹簧常数
- g 朗德 g 因数(12.10, 16, 21, 13.18, 20.13)
- $\mathcal{H}$ 哈密顿函数, 哈密顿算符
- H_n 厄米多项式
- h 普朗克常量
- $\hbar = h/2\pi$
- I, l 核角动量和相应的量子数(20.1)
- I 积分(16.13)或强度的缩写
- i 虚部 ($i = \sqrt{-1}$)
- J, J 电子壳层的总角动量和相应的量子数(17.5)
- j, j 电子的总角动量和相应的量子数[12.7]
- $\hat{j}$ 总角动量算符
- k 玻耳兹曼常量, 力常量
- k 波矢量
- L, L 总轨道角动量和相应的量子数(17.3)
- L_n 拉盖尔多项式
- l, l 电子的轨道角动量和相应的量子数
- $\hat{l}$ 角动量算符
- m 质量
- m 磁量子数

m_l	角动量的磁量子数
m_s	自旋的磁量子数
m_j	总角动量的磁量子数
m_0	静质量,尤指电子的静质量
N, n	粒子数,粒子数密度
N	归一化因子
n	主量子数或质子数或整数
P	光谱辐射通量密度(5.2)或概率
P_l^0	勒让德多项式
P_l^m	($m \neq 0$) 连带勒让德函数
$p, \bar{p}$	动量,动量的期望值
Q, q	电荷
$R(r)$	氢波函数的径向部分
r	位置坐标(三维矢量)
r	距离
S	合成自旋
s	轨道角动量 $L = 0$ 的算符
S, S	电子自旋和相应的量子数(12.15)
$\hat{S}$	自旋算符 $= (\hat{S}_x, \hat{S}_y, \hat{S}_z)$
T	绝对温度
T_1	纵向弛豫时间
T_2	横向弛豫时间
t	时间
u	光谱能量密度(5.2),原子质量单位[2.2]
V	体积,势能,电压
$\bar{V}$	势能的期望值
v	速度,粒子速度

- x 粒子坐标(一维)
 $\bar{x}$ 位置的期望值
 $Y_{l,m}(\theta, \phi)$ 球谐函数(10.10, 48—50)
 Z 核电荷
 α 精细结构常数[8.10]或吸收系数(2.22)
 β 常数
 Γ 衰变常数
 γ 衰变常数或线宽度回磁比(12.12)
 ∇^2 拉普拉斯算符 $= \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$
 ΔE 能量不确定量
 Δk 波数不确定量
 Δp 动量不确定量
 Δt 时间不确定量(=有限测量时间)
 ΔV 有限体积元
 $\Delta \omega$ 角频率不确定量
 Δx 位置不确定量
 $\delta(x)$ 狄拉克 δ 函数(见数学附录)
 $\delta_{\mu,\nu}$ 克罗内克 δ 符号: 当 $\mu = \nu$ 时, $\delta_{\mu,\nu} = 1$, 当 $\mu \neq \nu$ 时, $\delta_{\mu,\nu} = 0$
 ϵ 无量纲能量(9.83)
 $\epsilon^{(n)}$ 能量对微扰理论的贡献
 ϵ_0 真空的电容率
 θ 角坐标(10.2)
 κ 在(10.54)中定义的符号
 λ 波长(例外: [15.2.1, 2]中展开参数)
 μ, μ 磁矩(12.1)
 μ 约化质量(8.15)

μ_B	玻尔磁子(12.8)
μ_N	核磁子(20.3)
ν	频率[8.1]
$\bar{\nu}$	波数
ξ	无量纲坐标(9.83)
Q	电荷密度,态密度,质量密度,或无量纲距离
σ	散射系数,相互作用截面(2.16)
τ	转矩(12.2)
Φ	相
ϕ	相角,角坐标
$\phi(x)$	粒子的波函数
$\phi\uparrow, \phi\downarrow, \phi$	自旋波函数
ψ	波函数
Ψ	几个电子的波函数
$\hat{O}$	广义量子力学算符
Ω	频率[14.4, 14.5, 15.3]
ω	角频率 $2\pi\nu$, 或本征值[9.3.6]
$\triangle$	平均“相应”

第二版前言

对本书第一版极好的评价和非常积极的响应鼓励我们准备这个第二版。在这版中，我们已设法在可能之处作一些改进。我们从教授们和学生们的建议中，以及在本校教授原子物理学和量子物理学过程所取得的经验中获益匪浅。

根据广泛的要求，这版收入了一些习题的解并把这些解列于书末，还收入了如下一些重要的新节。

现在，本书收入了相对论克莱因-戈登方程和狄拉克方程的推导，因为它们（特别是后者）出现在原子物理学中，而在那儿，相对论效应又必须加以考虑。薛定谔方程的推导可使我们能以一种直接方式完成上述推广。

现代光谱学的高精密方法使原子物理学家能测出原子谱线的极其微小的但很重要的移位。其中一种非常重要的就是兰姆移位，对于这种移位，在新的一节中给出了详细的理论推导。为了把这个内容安排在一个合适的框架内，我们给出了在量子电动力学中使用的电磁场量子化的一些基本概念。此外，讨论这些似乎更进一步的理论所需要的所有概念和方法都已在前几章中介绍过。因此，读者很容易按照这些理论解释来理解。

关于光电子能谱学这一节已作了增订和修改。此外，通过详细处理三重态和单态之间的差别，使双电子问题显得更加清楚。最后，我们在第一版中介绍的关于核自旋共振的内容已作了重要增订，因为这种方法不仅在化学中，而且在医学

中,例如在核磁共振层析 X 射线摄影法(这在医学诊断中是一种重要的新工具)中正在取得广泛而非常重要的应用。这仅仅是原子物理学和量子物理学在现代科学与技术中广泛而且往往出乎预料的应用的一个例子。

不言而喻,我们不仅订正了一些印刷上的错误,而且还设法收入每一领域的最新的发展。该英文第二版相当于几乎是同时出版的德文第三版。对于我们在准备第二版时给予帮助的 R. 赛范 (Seyfang), J.U. 冯许茨 (Von Schütz) 和 V. 韦伯鲁斯 (Weberruss), 我们表示感谢, 我们要再一次衷心地感谢施普林格出版社, 特别是对 H. 洛茨赫 (Lotsch) 博士和 C. D. 巴彻姆 (Bachem) 始终愉快的合作表示感谢。

H. 哈肯, H. C. 沃尔夫

1987 年 3 月于斯图加特

前 言

全面了解原子物理学和量子物理学，对于每一位物理系学生，以及对于诸如化学和电气工程等相邻学科的学生来说，显然是必需的。这些学生特别需要系统地了解原子物理学和量子物理学的实验和理论方面的知识。实际上，这个领域只能通过有独创性的实验与同样有独创性的大胆新思想的发展之间的直接相互影响才可能发展。

众所周知，对原子微观世界的研究引起了物理思想的革命。经典物理学的一些基本概念（例如关于可测性的概念）必须抛弃。原子物理学和量子物理学对于发展意义深远的新物理概念是吸引人的领域，它作为其他领域的基础也是非常重要的。例如，化学键的量子论为化学提供了一个基本概念。近代固体物理学，以及它在通信和计算机技术中的大量应用，都是建立在首先由原子物理学和量子物理学发展出来的基本概念基础上的。在许多其他重要技术的应用方面，我们只叙述激光——一种现在广泛使用的光源，它所产生的光物理性质完全不同于普通灯光的性质。

在本书中，我们试图为读者提供仍然吸引物理学家研究原子物理学和量子物理学这个领域的某种魅力。我们试图详细描述一些基本事实和基本理论的方法，把所有不必要的材料撇在一边。本书是由作者（实验物理学家和理论物理学家）多年来在斯图加特大学授课讲义基础上编写成的。这些讲演与他们的实验和理论内容相一致。

我们在本书中偶然涉及一些较困难的理论部分，以便使深入研究这一领域的学生获得自成系统的介绍。难度较大的章节用星号表示。在第一次阅读本书时，这些带星号的章节可先不读。我们还收进了一些对化学来说是很重要的章节，例如关于化学键的量子理论一章，它也可作为学习固体物理学的起点。另外我们还收进了有关自旋共振的章节。虽然我们主要讨论电子自旋，但类似的概念也可应用于核自旋。自旋共振方法在现代物理学、化学和生物学研究，以及医学诊断(核自旋图形学)中起重要的作用。书中已考虑到原子物理学的最新进展，例如，关于里德伯原子的研究，因此，我们详细描述了激光和非线性光谱学的基本特征。我们希望读者将会发现，正像听我们讲演的学生那样，原子物理学和量子物理学是具有吸引力的。

本书是德文第二版的英译本。对 W.D. 布鲁尔 (Brewer) 教授的卓越的翻译，并为改进本书而提出的极其宝贵的建议表示感谢。我们还要对评阅本书手稿的 J.V. 许茨 (Schütz) 博士和 R. 蔡勒 (Zeile) 先生表示感谢，我们要感谢为本书绘图和仔细校对的 S. 施米希 (Schmiech) 和 H. 奥诺 (Ohno) 博士以及 G. 豪伯斯 (Haubs) 先生。我们对 U. 丰克 (Funke) 夫人表示谢意，因为她为我们精心打印新章。最后，但并不是最不重要的，我们希望感谢施普林格出版社，特别是要感谢 H. 洛茨奇 (Lotsch) 和 G. M. 海斯 (Heyes) 的真诚合作。

H. 哈肯, H. C. 沃尔夫

于 1984 年 2 月斯图加特

目 录

原子物理学的基本常数[国际单位制(SI)]	x
最重要的常用符号表	xi
第二版前言	xvii
前言	xix
第一章 引言	1
1.1 经典物理学和量子力学	1
1.2 简短的历史回顾	1
第二章 原子的质量和大小	6
2.1 原子是什么?	6
2.2 质量的测定	6
2.3 测定阿伏伽德罗数的方法	8
2.3.1 电解	8
2.3.2 气体常量和玻耳兹曼常量	9
2.3.3 晶体中的 X 射线衍射	11
2.3.4 使用放射性衰变测定 N_A	12
2.4 原子大小的测定	13
2.4.1 气体动理论的应用	13
2.4.2 相互作用截面	14
2.4.3 相互作用截面的实验测定	17
2.4.4 由协体积测定原子的大小	19
2.4.5 由测定 X 射线在晶体上的衍射得出原子的大小	20
2.4.6 单个原子是否能看得见?	26

习题	31
第三章 同位素	33
3.1 元素的周期系	33
3.2 质谱学	35
3.2.1 抛物线法	35
3.2.2 改进的质谱仪	41
3.2.3 质谱测定法的结果	43
3.2.4 质谱仪的现代应用	44
3.2.5 同位素分离	45
习题	47
第四章 原子的核	49
4.1 电子穿过物质	49
4.2 α 粒子穿过物质 (卢瑟福散射)	52
4.2.1 α 粒子的一些性质	52
4.2.2 由箔引起 α 粒子的散射	53
4.2.3 卢瑟福散射公式的推导	55
4.2.4 实验结果	61
4.2.5 核半径是什么意思?	63
习题	64
第五章 光子	66
5.1 光的波动性	66
5.2 热辐射	69
5.2.1 黑体辐射的光谱分布	69
5.2.2 普朗克辐射公式	72
5.2.3 普朗克公式的爱因斯坦推导	74
5.3 光电效应	78
5.4 康普顿效应	82
5.4.1 实验	82

5.4.2 康普顿位移的推导	84
习题	87
第六章 电子	91
6.1 自由电子的产生	91
6.2 电子的大小	91
6.3 电子的电荷	92
6.4 电子的荷质比 e/m	94
6.5 电子的波动性	98
习题	104
第七章 物质波的一些基本性质	106
7.1 波包	106
7.2 概率统计解释	111
7.3 海森伯不确定关系	114
7.4 能量时间不确定关系	117
7.5 对束缚态不确定关系的一些结论	117
习题	121
第八章 氢原子的玻尔模型	122
8.1 光谱学的一些基本原理	122
8.2 氢原子的光谱	125
8.3 玻尔的假设	129
8.4 一些定量的结论	135
8.5 原子核的运动	136
8.6 类氢原子的光谱	139
8.7 μ 子原子	141
8.8 由碰撞激发的量子跃迁	144
8.9 玻尔模型的索末菲广延和第二量子数的实验 证明	149

8.10 由相对论性质量变化引起轨道简并的解除	151
8.11 玻尔-索末菲理论的局限性, 对应原理	152
8.12 里德伯原子	153
习题	156
第九章 量子论的数学框架	159
9.1 箱中的粒子	159
9.2 薛定谔方程	163
9.3 量子论的概念基础	167
9.3.1 观测结果、测量值和算符	167
9.3.2 动量的测量和动量的概率	167
9.3.3 平均值和期望值	169
9.3.4 算符和期望值	174
9.3.5 求出波函数的方程	176
9.3.6 同时可观测量和对易关系	178
9.4 量子力学的振子	182
习题	189
第十章 氢原子的量子力学	194
10.1 在中心力场中运动	194
10.2 角动量本征函数	197
10.3 中心力场中的径向波函数	204
10.4 氢的径向波函数	206
习题	214
第十一章 碱金属原子光谱中轨道简并的解除	217
11.1 壳层结构	217
11.2 屏蔽	220
11.3 能级图	222