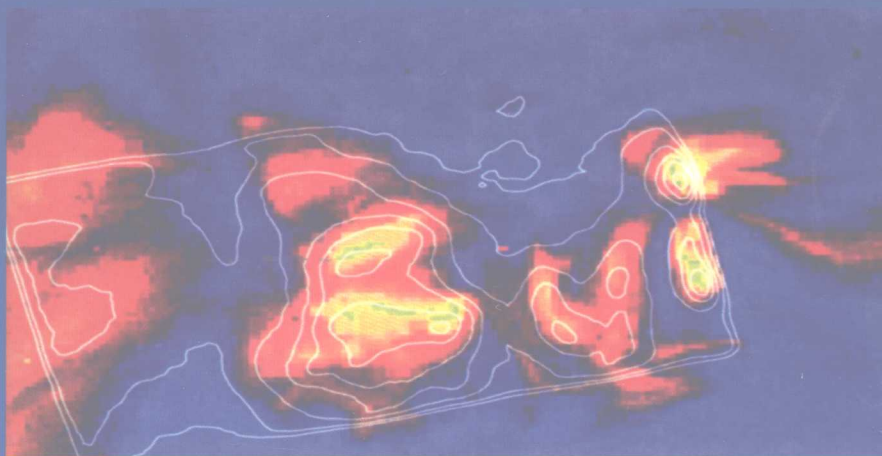


高荷电离子 物理学导论

Introduction to the Physics of Highly Charged Ions



H·F·拜尔 V·P·谢弗尔克 著
孙景文 译 方正知 校



国防工业出版社

National Defense Industry Press

本书由总装备部装备科技译著出版基金资助出版

高荷电离子物理学导论

Introduction to the Physics of Highly Charged Ions

H·F·拜尔 V·P·谢弗尔克 著

孙景文 译 方正知 校

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2007-069 号

图书在版编目(CIP)数据

高荷电离子物理学导论 / (英)拜尔, (英)谢弗尔克著;
孙景文译. —北京:国防工业出版社, 2008. 10

书名原文: Introduction to the Physics of Highly Charged Ions
ISBN 978-7-118-05837-6

I. 高... II. ①拜... ②谢... ③孙... III. 等离
子体物理学—研究 IV. 053

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 098698 号

Introduction to the Physics of Highly Charged Ions

H. F. Beyer

V. P. Shevelko

Published by Institute of Physics Publishing, Wholly owned by The Institute of Physics, London

本书中文简体版由 Taylor & Francis Group 授权国防工业出版社独家出版发
行。版权所有,侵权必究。

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 12 1/2 字数 330 千字

2008 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

译 序

目前,美、俄、日、英、法、德等国在激光核聚变和重离子驱动的惯性聚变研究过程中涉及大量的高温等离子体物理问题,其中高荷电离子物理学在近一二十年间为研究惯性约束聚变(ICF)、Z 箍缩(Z-Pinch)装置、重离子驱动的核聚变与核物理学、束—箔光谱学、离子与表面相互作用、电子束离子源和离子阱、X 射线天文学和天体物理学提供一种强有力的诊断工具。

本书全面、系统地介绍了高荷电离子物理学,内容包括实验室高温等离子体与天体物理等离子体中高荷电离子状态下出现的主要的 X 射线辐射和基本的原子过程。作者强调对高荷电离子物理学的物理理解,避免多余的数学推导,使本书更便于从事原子物理与等离子体物理、天体物理、激光物理与光谱学等领域的科技工作者的理解。

作者是国际上著名的高荷电离子物理学专家。本书对该领域的新近实验与理论结果和物理图像做了详尽深刻的评论,介绍了各种离子源及其辐射、辐射光谱学,详细分析了离子源的基本的碰撞与辐射过程、韧致辐射特性、同步回旋加速器辐射、离子加速器、离子冷却环、托卡马克装置、电子回旋共振离子源、电子束离子源与电子束离子阱、原子结构与原子理论、狄拉克方程、磁效应与超精细结构、QED 效应与兰姆位移、单电子系统与多电子系统、类 H 与类 He 离子的跃迁几率、在类 H 离子中的塞曼效应与斯塔克效应、谱线形状的量子理论、原子碰撞、等离子体中的碰撞与光子过程、局部热动平衡与非平衡等离子体、光子发射与吸收、狄拉克激

发与电离、三体复合、双电子复合、离子与离子碰撞、电子俘获、重离子碰撞、在高电荷态离子之间的碰撞、电离和由重离子驱动的惯性聚变、原子的多电子过程和反冲离子动量光谱学。

本书的读者对象为原子物理与等离子体物理、天体物理、激光物理与光谱学领域的大学毕业生与研究人员。

高电荷态粒子在实验室高温等离子体中出现的许多辐射与碰撞过程中起着一种重要作用。高电荷离子的辐射谱包含着等离子体宏观参数的重要信息,如电子和离子的温度与密度、电荷状态的分布、X 射线辐射的极化并且为研究实验室高温等离子体源(如 ICF、Z-Pinch Plasmas)与天体物理等离子体源提供了重要的诊断方法。应用范围包括激光聚变、武器物理实验室模拟实验诊断技术、Z 箍缩诊断技术、等离子体物理与原子物理、光谱学、离子—表面相互作用、激光物理与光谱学、天体物理等。

译校者

写于杭州和北京

2006 年 2 月

前 言

高荷电离子或高度离化原子的物理学是现代原子物理学中一种十分重要的活跃领域。它为我们提供了原子结构、短波辐射以及多次电离系统的电磁相互作用的基本信息和理解。在过去的 10 年至 20 年间,高荷电离子物理学已经成为应用十分广泛的研究工具,为研究 X 射线天文学和天体物理学、X 射线激光和大规模集成电路光刻术、重离子驱动的核聚变和核物理学、束—箔光谱学和离子与表面相互作用的纯物理及应用物理都提供了极大的帮助。

可以说,三大事件促进了该物理分支的发展:1895 年由 W·C·伦琴(Röntgen)发现了 X 射线辐射;20 世纪 20 年代和 30 年代由 I. S. Bowen、R. A. Millikan 和 B. Edlén 完成的高荷电离子的第一次分光测量;1947 年由 W. E. Lamb 与 R. C. Retherford 发现的兰姆位移。这些都促进了现代量子电动力学的发展。与此同时,人们也必须注意到,在高荷电离子的高功率实验室源的发展过程中所获得的进展,诸如电子束离子源(EBIS)、电子束离子阱(EBIT)和加速器,在实验人员的控制下,使得离子的最高离化态达到完全裸核的铀离子态成为实际可能。

本书综合阐述了高荷电离子的现代原子物理学,它旨在为该专业方面的大学毕业生、研究生以及该领域的专家提供引导读物,以使他们在研究中找到基础理论与实际应用的有机配合。本书的内容没有争取完整性或通用性,而是试图囊括了所有重要的基本概念。读者应当在电动力学方面具有一定的基础,并在原子物理和量子力学方面具备一定的基本知识。

为了强调类似课题的多方面展望,在一些章节中会有某些重叠和重复。我们也在尝试寻找一种新的描述方法,能在所涉及课题的基本概括与精确分析之间作一种折中。这会与我们自己研究中的通用表述风格有所差异。希望读者如同作者撰写时那样喜爱这本书。

向那些帮助我们的许多同事表示谢意,本书从他们的原著中选取了诸多的技术资料,并且感谢他们很有价值的建议。特别感谢 A. Müller,他从本书的初期计划尚不完善到考虑成熟之时起就一直伴随着我们。我们很荣幸地感谢 I. L. Beigman、V. L. Bychkov、J. Kluge、D. Liesen、R. Neumann、V. M. Shabaev、I. I. Sobelman、H. Tawara 和 A. M. Urnov 的大力协助,尤其要感谢英国皇家物理学会出版社的 Jim Reville,在写作手稿过程中的多次延迟期间他所给予的耐心合作。

H. F. Beyer

V. P. Shevelko

写于 达姆斯塔特和莫斯科

2002 年 7 月

基本常数表

基本常数

$$c = 299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\hbar = 1.054571596(82) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$\hbar c = 197.3269602(77) \text{ MeV} \cdot \text{fm}$$

$$e = 1.602176462(63) \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$m_e = 0.510998902(21) \text{ MeV}/c^2$$

$$m_p = 938.271998(38) \text{ MeV}/c^2$$

$$u = 931.494013(37) \text{ MeV}/c^2$$

$$\alpha = e^2/\hbar c = 1/137.03599976(50)$$

$$r_e = e^2/m_e c^2 = 2.817940285(31) \times 10^{-15} \text{ m}$$

$$a_0 = \hbar^2/m_e e^2 = 0.5291772083(19) \times 10^{-10} \text{ m}$$

$$R_y = m_e e^4/2\hbar^2 = 13.60569172(53) \text{ eV}$$

$$k_B = 8.617342(15) \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\mu_B = e\hbar/2m_e = 5.778381749(43) \times 10^{-5} \text{ eV T}^{-1}$$

说明

真空中光速

普朗克常数除以 2π

转换常数

基本电荷

电子质量

质子质量

统一原子质量单位
(^{12}C 原子质量/12)

精细结构常数

经典电子半径

玻尔半径

里德伯能量

玻耳兹曼常数

玻尔磁子

注:常数是由 P. J. Mohr 和 B. N. Taylor 基于“科学技术数据委员会(CODATA)推荐的基本物理常数:1998”从 CODATA 建议作为国际使用的一套常数中提取的,见 Rev. Mod. Phys., 2000, 72:351

表 符 号 表

符号	说明
α	狄喇克矩阵
β	相对论性因子, $\beta = v / c_0$
β	偶极极化率
β	$= v / c_0$
$\beta(s)$	狄喇克矩阵
$\beta(s)$	β 函数
γ	相对论性因子, $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$
γ	电磁化率
Γ	能级宽度
Γ_a	俄歇宽度
Γ_r	辐射宽度
ϵ	光子极化矢量
k	多重性
k	辐射速率系数
λ	波长
λ_D	德拜长度
μ	衰减系数
μ	约化质量
μ_N	磁矩
ρ	核电荷密度
ρ	结合半径

符号	说明
	材料密度
σ	截面
$\langle \sigma v \rangle$	速率系数
τ	寿命
χ	磁化率
ψ	波函数
ω	角频率
ω_p	等离子体频率
A	原子质量数
A	跃迁几率
b	碰撞参数
B	磁通量密度
B	磁电感矢量
D	偶极矩
E	电场强度
E	能量
$E_{i,k}$	能级 i 和 k 的电子结合能
E_{rel}	束缚电子的相对论性能量
E_{cm}	质心系中的粒子能量
E_k	电多极跃迁
f_{ik}	$i \rightarrow k$ 跃迁的振子强度
F	力
g	统计权重
	朗德因数
	冈特 (Gaunt) 因子
I	核自旋量子数
	通量密度

符号	说明
	谱线强度
I_{ne}	结合能
I_q	电离电位
j	单电子总角动量
	电子电流密度
J	总角动量
k	波数
k	光子动量
ℓ	单电子轨道角动量
L	总轨道角动量
m	单电子磁量子数
m_e	电子质量
m_i	离子质量
M	核质量
Mk	磁多极跃迁
n	主量子数
n_e	电子密度
n_i	离子密度
n_q	q 次离化离子密度
N	原子的电子数
P	电子动量
P	宇称性
	辐射功率
$P_{n\ell}(r)$	径向波函数
$P(\theta)$	偏振度
q	离子电荷态
Q	核四极矩

符号	说明
	光子能量
R	核半径
	核间距
s	单电子自旋
S	系统总自旋
	定向矢量
S	萨哈因子
	光学饱和参量
S_d	双受激态 d 共振强度
T	温度
u	光谱能量密度
	定标(约化)电子能量
U	电势
v	速度
W	概率
	每秒碰撞事件数
W_ϕ	功函数
X^{q+}	q 次离化原子
Z	核电荷
Z_p	入射离子电荷
Z_T	靶核电荷

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 总论	1
1.2 原子质量、电荷与尺寸	2
1.3 自然界中的离子	4
1.3.1 地球	5
1.3.2 太阳	10
1.3.3 宇宙 X 射线源	12
1.4 实验室中的离子	14
1.4.1 等离子体离子源	15
1.4.2 重离子加速器	17
1.4.3 储存环和离子阱	18
1.5 单原子的显像	19
1.5.1 扫描隧道显微镜	19
1.5.2 磁阱中的单离子	21
参考文献	22
第 2 章 辐射	24
2.1 光与辐射	24
2.2 电磁波谱	25
2.3 辐射分布	31
2.4 衍射与干涉	35
2.4.1 衍射	35

2.4.2	干涉	36
2.4.3	单缝衍射	37
2.4.4	杨氏双缝实验	38
2.4.5	海森伯测不准原理	39
2.4.6	菲涅耳透镜和波带片	41
2.4.7	布喇格反射、衍射光栅	43
2.4.8	衍射受限的设备和针孔相机	44
2.4.9	粒子波	46
2.4.10	扫描电子显微镜	48
2.5	多普勒效应	49
	参考文献	60
第3章	光谱学	62
3.1	光谱线	62
3.2	辐射的量子性质	65
3.3	光电效应	68
3.4	康普顿散射	71
3.5	穆斯堡尔谱学	75
3.6	谱线分析	79
3.7	原子的内层概念	83
	参考文献	92
第4章	光与离子源	94
4.1	基本的物理考虑	94
4.1.1	基本的碰撞与辐射过程	94
4.1.2	粒子的统计性与集体行为	96
4.2	韧致辐射	107
4.2.1	加速电荷的辐射	107
4.2.2	轴向加速度	110

4.2.3	韧致辐射的空间分布	111
4.2.4	韧致辐射的谱分布	114
4.2.5	碰撞	115
4.3	同步辐射	121
4.3.1	辐射功率的角分布	122
4.3.2	同步加速器辐射的光谱分布	126
4.3.3	插入设备	129
4.4	离子加速器	132
4.4.1	总论	132
4.4.2	带电粒子的加速	133
4.4.3	加速机制	134
4.4.4	聚焦机制	142
4.4.5	射频四极加速器	147
4.4.6	高荷电重离子	149
4.5	离子冷却环	151
4.5.1	基本特征	151
4.5.2	电子冷却	155
4.5.3	随机冷却	160
4.5.4	激光冷却	161
4.6	托卡马克	164
4.6.1	热核聚变	164
4.6.2	聚变反应条件	165
4.6.3	托卡马克总体结构	166
4.7	电子回旋共振离子源	169
4.7.1	基本工作原理	169
4.7.2	磁场组态	171
4.7.3	共振加热	172
4.7.4	电子源	174
4.7.5	高荷电态的增强	174

4.8	电子束离子源和电子束离子阱	177
4.8.1	基本工作原理	177
4.8.2	逐步电离	179
4.8.3	离子加热与冷却	180
	参考文献	183
第5章	原子结构	186
5.1	光谱线的分类	186
5.2	耦合方式	192
5.3	选择定则	197
5.4	跃迁几率与振子强度	200
5.5	寿命	211
5.6	自电离态与俄歇衰变	214
5.7	单电子系统	218
5.8	狄喇克方程:相对论效应与精细结构	221
5.8.1	自旋—轨道相互作用	225
5.8.2	核精细尺寸校正	227
5.9	磁效应与超精细结构	229
5.10	量子电动力学效应和兰姆位移	231
5.11	多电子系统	237
5.12	跃迁能量与X射线谱	242
5.13	外场	247
5.13.1	极化率	248
5.13.2	电场与斯塔克效应	251
5.13.3	氢原子中的线性斯塔克效应	255
5.13.4	类H离子中的斯塔克效应	258
5.13.5	磁场与塞曼效应	260
5.13.6	类H离子中的塞曼效应	264
5.14	谱线线形的量子理论	266

5.14.1	谱线的自然增宽	266
5.14.2	多普勒增宽	269
5.15	吸收边(限)	270
5.16	X射线辐射的极化	275
	参考文献	279

第6章 原子碰撞 283

6.1	在等离子体中的碰撞与光电过程	283
6.2	局部热动平衡	287
6.3	非平衡等离子体:电晕极限	289
6.4	细致平衡原理	291
6.5	光子发射与吸收	293
6.6	电子碰撞过程中的激发与退激发	296
6.6.1	直接激发	296
6.6.2	共振激发	301
6.7	电离与三体复合	305
6.7.1	单电离过程	305
6.7.2	直接电离	306
6.7.3	激发—自电离与分支比系数	309
6.7.4	经过自由电子俘获的共振电离	311
6.7.5	相对论性效应与量子电动力学效应	313
6.7.6	逆过程:三体复合	315
6.8	双电子复合	319
6.8.1	过程的分类	320
6.8.2	双电子伴线	321
6.8.3	双电子复合截面与速率	322
6.8.4	双电子复合实验	325
6.8.5	辐射复合	327
6.8.6	辐射复合实验	328