



《中国工程物理研究院科技丛书》第058号

等离子体中辐射输运和 辐射流体力学

Radiation Transport and Radiation Hydrodynamics in Plasmas

彭惠民 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

《中国工程物理研究院科技丛书》第 058 号

等离子体中辐射输运和辐射流体力学

Radiation Transport and Radiation Hydrodynamics in Plasmas

彭惠民 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

等离子体中辐射输运和辐射流体力学 / 彭惠民编著.
北京: 国防工业出版社, 2008. 8
(中国工程物理研究院科技丛书)
ISBN 978 - 7 - 118 - 05783 - 6

I. 等... II. 彭... III. ①等离子体-辐射②辐射-流体力学 IV. 0536 035

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 081249 号

※

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 787 × 1092 1/16 印张 21 字数 450 千字

2008 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 55.00 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

序

20 世纪初叶,以量子论和相对论的建立为代表的物理学的革命性进展,开拓了诸多新的研究领域。例如,在天体物理领域,形成了关于太阳及一般恒星能量产生的现代理论,即高温、高密度和高压下的轻核聚变过程的理论。后来,核武器试验的成功,创造了在地球上人为造就热核聚变,产生高温、高压、高密等离子体的物理环境。激光问世后,高功率激光与物质相互作用的研究不断深化,激光驱动的惯性约束核聚变成了一个重要的研究领域,而等离子体 X 射线激光的研究不仅获得了成功,而且开始得到应用。同时,19 世纪已奠定基础的电磁学的发展及其与核物理的结合,催生了 Z 箍缩惯性约束核聚变的研究。这些研究领域不仅有着重要的应用价值,而且也进一步拓宽和丰富了物理学的内涵。

上述的这些研究领域,都涉及高温、等离子体物理学。其中,辐射输运和辐射流体力学是需要认真研究的重要内容。《等离子体中辐射输运和辐射流体力学》一书正是为培养这一领域的研究生和青年科技工作者而编著的。书中首先给出了辐射的经典理论、量子理论、辐射与物质相互作用等基本知识,进一步阐述了辐射输运方程、辐射流体力学方程及其各种近似解法,着力讨论了热等离子体中的原子物理性质和原子结构及反应参数。对实际应用中具有重要意义的几个问题进行了较深入的讨论,特别是超短、超强激光与等离子体和团簇相互作用,辐射磁流体力学及其在毛细管放电和 Z 箍缩物理中的应用等。

本书作者和同事们长期从事辐射输运、辐射流体力学及辐射磁流体力学的研究工作,具有丰富的实际工作经验。本书不仅对基础知识进行了系统的整理,也凝结着他们多年科研实践的心得和成果。相信本书的出版会十分有益于本领域的科研工作和人才培养。

杜祥琬

二〇〇六年九月

前 言

20 世纪 80 年代初,一批年轻的新大学毕业生参加工作。为了使他们尽快地了解所从事领域的情况,开设了一些相关专业课程。当时作者讲授了“辐射输运和辐射流体力学”,并编写了相关的讲义。后来不少新、老同事反映这本讲义对工作很有帮助,希望能写成本专业或专业基础书。由于工作比较忙,一直拖到现在才写成。和讲义相比,本书加强了基础理论部分,充实了近些年国内外在相关领域的新进展。

等离子体中的辐射输运和辐射流体力学是进行天体物理、热核聚变、X 射线激光、高强度激光等离子体相互作用和 Z 箍缩放电等领域研究的基础。本书的内容是尽可能地覆盖有关部分,提供深入到有关领域所需要的理论基础。本书各章原则上自成体系,读者可以根据需要选择所需章节。各章后面附有主要参考文献,给出本书取材的主要出处,可供深入了解有关内容。

本书大体上可分为 4 个部分。第 1 部分是有关辐射和辐射物质相互作用的基本概念,内容主要在第 1 章,介绍基本概念,包括辐射的基本性质,给出描述辐射特性的宏观量,简介辐射与物质相互作用的基本过程以及热力学平衡等;给出辐射场的量子化,辐射与物质相互作用的半经典理论。

第 2 部分是关于辐射输运方程及其各种近似解法,内容包含第 2~6 章:第 2 章是辐射输运方程的建立过程和相关的定解条件。通常输运一词用于粒子输运过程,而迁移一词指能量迁移过程,本书统一采用输运一词。辐射输运方程包括光子输运和它所带的能量输运过程。最简单也是最常用的近似是扩散近似,这是输运方程的最低阶角近似。如果辐射强度几乎是各向同性的,则扩散近似是辐射输运方程的比较精确的描述。各向同性程度越差,扩散近似的精度也越差。辐射输运方程的限流扩散描述,广泛应用于天体物理和等离子体物理领域的辐射流体力学计算。经过多年的发展,已经成为有效的数值模拟手段。随着高速计算机和计算方法的发展,球谐函数法—— P_N 近似和离散坐标法—— S_N 近似广泛应用于计算粒子输运过程。粒子输运问题本身在很大程度上受概率规律支配,用 Monte Carlo (MC) 方法求解可以归结为简单的跟踪问题。就是模拟每个粒子(中子、光子等)的历史,从它产生到生命结束,利用支配粒子运动的概率与物理规律来决定它每一步的行踪。在跟踪了大量的粒子后,将所获得的信息进行统计处理,即可得到有关问题的近似解。目前 MC 方法已经成为校验许多复杂物理问题数值计算的依据。天体物理等离子体和实验室等离子体中发射的谱线是研究发射离子周围的等离子体状态的极其有用的诊断工具。谱线宽度是一个对发射的离子周围微观场非常敏感的参数,它能够提供其他诊断工具不能提供的等离子体的温度和密度信息。因此本书用一定的篇幅讨论了谱线展宽和谱线输运问题。

第 3 部分涉及等离子体中相对论性效应和热等离子体中的原子物理性质,包括辐射

输运方程的洛伦兹变换,非相对论和相对论极限下的 Fokker - Planck 方程,热等离子体中原子物理性质和等离子体中粒子数布居问题。这里热等离子体中的原子物理性质及相关的原子结构参数和反应参数是研究辐射输运和辐射流体力学的最基本的参数,因此本书以较大的篇幅比较详细地讨论相关的内容。

第4部分是应用,包含最后几章。超短、超强激光脉冲的出现开辟了研究超强辐射场-物质相互作用物理的新的可能性。在强场环境下的物理现象常常定性上与我们熟悉的微扰领域不同,它现在是原子物理领域一个独立的研究课题。超短脉冲强激光与等离子体相互作用和超短脉冲强激光与团簇相互作用以及它们的可能应用于激光热核聚变、强X射线源和X射线激光等方面是近些年大家非常关心的问题。作者和作者的同事们多年从事的研究工作领域涉及到辐射流体力学和辐射磁流体力学的不同层次,本书有关章节包含很多同事的工作成果和国外同行的理论文章,具有实用价值。

李敬宏研究员校阅了本书全文,王书暖研究员和董晨钟教授审校了全文,提出了许多宝贵的修改意见。郑无敌副研究员和作者共同工作多年,对许多章节内容提出宝贵意见。作者向资助本书出版的国防科技图书出版基金评审委员会、中国工程物理研究院科技丛书编审委员会和本书编写过程中给予各种帮助的人们表示衷心谢意。

彭惠民

2007. 10. 24

目 录

第 1 章 辐射和辐射物质相互作用的基本概念	1
1.1 辐射的基本性质	1
1.1.1 辐射的基本性质	1
1.1.2 描述辐射场特性的宏观量	3
1.1.3 辐射场与物质的相互作用简介	6
1.1.4 热力学平衡分布	9
1.1.5 热力学平衡下分布函数	11
1.1.6 局域热力学平衡	15
1.1.7 弛豫过程	16
1.2 辐射场的量子化	16
1.2.1 自由电磁场的量子化	17
1.2.2 量子力学谐振子	19
1.2.3 场的量子化	20
1.2.4 电场和磁场分量之间的对易关系	21
1.3 辐射与物质相互作用的半经典理论	22
1.3.1 吸收和诱导发射	22
1.3.2 自发辐射	27
参考文献	32
第 2 章 辐射输运方程	34
2.1 粒子输运基础	34
2.1.1 基本方程	34
2.1.2 积分微分输运方程	36
2.1.3 定解条件	38
2.2 辐射输运方程	38
2.2.1 辐射输运方程	38
2.2.2 辐射输运方程的定解条件	40
2.3 积分形式的输运方程	41
2.4 各种坐标系中的辐射输运方程	44
2.4.1 无限大平几何系统	44
2.4.2 球对称	44
2.4.3 圆柱对称	45

2.4.4 一般表达式	45
参考文献	47
第3章 辐射输运方程的扩散近似描述	48
3.1 扩散近似	48
3.1.1 P_1 近似	48
3.1.2 P_1 近似的边界条件	50
3.1.3 经典扩散(Eddington)近似	52
3.1.4 扩散近似的适用条件	54
3.2 平衡扩散理论	55
3.2.1 平衡扩散近似	55
3.2.2 Rosseland 平均自由程	57
3.3 限流扩散理论	59
3.3.1 限流微分方程	59
3.3.2 一定条件下限流扩散方程的解析解	62
3.3.3 限流扩散理论系	63
3.3.4 限流扩散方程的定解条件	69
3.4 多群方法	74
3.4.1 单群	74
3.4.2 多群	75
3.4.3 Rosseland 和 Planck 平均	76
3.5 辐射输运计算中的多带方法	77
3.5.1 引言	77
3.5.2 最简单情况下多带方程	78
3.5.3 多带参数	79
参考文献	81
第4章 球谐函数法——P_N 近似和离散坐标法——S_N 近似	82
4.1 球谐函数法—— P_N 近似	82
4.1.1 平面系统的基本方程和定解条件	82
4.1.2 球几何中的基本方程和定解条件	86
4.1.3 一般几何中的基本方程和定解条件	87
4.1.4 一般几何中有关辐射宏观物理量的表达式	89
4.2 简化的 P_2 近似简介	91
4.2.1 SP_2 方程的推导	92
4.2.2 SP_2 的基本性质	94
4.3 离散坐标法和离散 S_N 近似	94
4.3.1 用离散坐标法求解输运方程的步骤	95
4.3.2 平几何下离散纵坐标法	96

4.3.3 球几何下离散坐标法	100
4.3.4 一般几何中的离散坐标法	101
4.3.5 射线效应	101
参考文献	102
第5章 辐射输运的 MC 方法	104
5.1 MC 方法的基本原理	104
5.1.1 基础知识	104
5.1.2 积分计算	107
5.2 辐射输运的随机模拟	111
5.2.1 辐射输运作为随机过程	111
5.2.2 源的特征	111
5.2.3 路径追踪	112
5.2.4 碰撞事件的模拟	113
5.2.5 随机游走和积分方程	115
参考文献	116
第6章 谱线辐射输运近似处理	118
6.1 谱线展宽	118
6.1.1 谱线构形	118
6.1.2 自然展宽	119
6.1.3 Doppler 展宽	120
6.1.4 Voigt 分布	121
6.1.5 电子碰撞展宽	121
6.1.6 准定态 Stark 展宽	122
6.2 产生发射线和吸收线的条件	123
6.3 处理线辐射输运的近似方法——逃逸概率法	124
6.3.1 基本近似	124
6.3.2 一维平板几何下逃逸概率的公式	126
6.3.3 柱对称等离子体中逃逸概率近似计算	127
参考文献	132
第7章 辐射输运方程的洛伦兹变换	133
7.1 洛伦兹变换	133
7.1.1 洛伦兹变换	133
7.1.2 洛伦兹变换的性质	133
7.2 辐射输运方程的洛伦兹变换	138
7.2.1 辐射输运方程的洛伦兹变换	138
7.2.2 扩散近似下的洛伦兹变换辐射输运方程	139
参考文献	142

第 8 章 光子的 Fokker - Planck 方程	143
8.1 康普顿散射关系式	143
8.1.1 康普顿散射	143
8.1.2 微分碰撞截面	144
8.1.3 康普顿碰撞和散射的积分截面	144
8.2 跃迁概率的表达式	145
8.3 光子的 Fokker - Planck 方程	148
8.3.1 非相对论极限下的 Fokker - Planck 方程	148
8.3.2 相对论极限下的 Fokker - Planck 方程	150
8.3.3 Fokker - Planck 方程的几个性质	152
参考文献	152
第 9 章 热等离子体中原子物理性质	153
9.1 等离子体中的原子(离子)能级	153
9.1.1 类氢近似下复杂原子的能级	153
9.1.2 More 模型	157
9.1.3 原子的能级漂移和连续谱下降	158
9.1.4 角动量耦合和辐射跃迁的选择定则	159
9.2 原子跃迁概率	160
9.2.1 振子强度和爱因斯坦系数	160
9.2.2 氢原子和类氢离子振子强度	162
9.2.3 简易偶极矩阵元方法	163
9.3 原子的电子碰撞激发和退激发	164
9.3.1 电子碰撞激发速率系数	165
9.3.2 多电子碰撞激发	167
9.4 电子碰撞电离和三体复合	168
9.5 光电离和辐射复合	171
9.5.1 光电离	171
9.5.2 辐射复合	173
9.6 Auger 自电离和双电子复合	173
9.6.1 Auger 自电离	173
9.6.2 细致平衡和辐射稳定	175
9.6.3 双电子复合速率系数	176
9.7 热等离子体的辐射谱	178
9.7.1 连续谱	178
9.7.2 孤立线谱	179
9.7.3 伴线	181
9.7.4 不能分辨的跃迁族	182

参考文献	183
第 10 章 等离子体中粒子数布居	186
10.1 等离子体中各种定态模型	187
10.1.1 局域热力学平衡	187
10.1.2 冕区平衡	190
10.1.3 碰撞辐射平衡	191
10.2 细致组态模型下粒子数布居速率方程	193
10.2.1 细致组态模型	193
10.2.2 粒子数布居速率方程	194
10.3 平均原子模型下的速率方程	196
10.3.1 平均原子模型	196
10.3.2 AA 下原子轨道布居速率方程	197
参考文献	202
第 11 章 超强辐射场与物质的相互作用	203
11.1 强场中的原子	203
11.1.1 微扰理论适用的极限	203
11.1.2 多光子电离	205
11.1.3 隧穿电离	208
11.1.4 原子场强	211
11.2 超短脉冲强激光与等离子体相互作用	211
11.2.1 靶的电离	211
11.2.2 高密度等离子体中激光的吸收	212
11.2.3 超短脉冲强激光与低密度等离子体相互作用	213
11.3 超短脉冲强激光与团簇相互作用	214
11.3.1 团簇的形成和分类	214
11.3.2 关于气体喷射团簇	215
11.3.3 短脉冲强激光与团簇相互作用	215
11.3.4 团簇的库仑爆炸模型	218
11.3.5 团簇内电子-离子热化	222
11.4 原子团簇 X 射线源和团簇 X 射线激光	222
11.4.1 原子团簇 X 射线源	222
11.4.2 原子团簇 X 射线激光	223
11.5 原子团簇核聚变	226
11.5.1 离子加热	226
11.5.2 DD 核聚变	228
11.5.3 异核团簇库仑爆炸产生的核聚变	228
参考文献	229

第 12 章 辐射流体力学方程	232
12.1 粒子动力学理论	233
12.1.1 洛伦兹变换	233
12.1.2 流体力学量	233
12.1.3 辐射场的影响	236
12.2 欧拉表象的辐射流体力学方程	238
12.2.1 欧拉表象中相对论辐射流体力学方程	238
12.2.2 非相对论情况	240
12.2.3 修正的欧拉方程	240
12.2.4 非相对论下修正的欧拉方程	242
12.3 拉格朗日表象中辐射流体力学方程	243
12.3.1 拉格朗日表象	243
12.3.2 拉格朗日坐标下的相对论的动量和能量方程	245
12.3.3 非相对论极限下拉格朗日流体力学	247
12.3.4 两种坐标法的比较	248
12.4 一维非定常辐射流体力学方程组	248
12.4.1 一维非定常非平衡辐射流体力学方程组 ($T_i = T_e$)	249
12.4.2 一维非定常非平衡辐射流体力学方程组 ($T_i \neq T_e$)	251
12.4.3 一维非定常平衡辐射流体力学方程	253
12.5 二维非定常辐射流体力学方程组	253
12.5.1 二维柱坐标三温非定常辐射流体力学基本方程组	254
12.5.2 定解条件	255
12.5.3 二维非平衡非定常辐射流体力学方程组	256
参考文献	256
第 13 章 理想磁流体力学简介及运用	257
13.1 理想磁流体力学	257
13.1.1 理想磁流体力学方程	257
13.1.2 双流(体)方程	259
13.1.3 渐进近似和单流(体)方程	261
13.1.4 理想 MHD 极限	262
13.2 Z 箍缩物理	266
13.2.1 等离子体平衡	267
13.2.2 θ 箍缩和 Z 箍缩原理	268
13.2.3 辐射 Z 箍缩的平衡	271
13.2.4 等离子体的(不)稳定性	272
13.2.5 Z 箍缩中的不稳定性	274
参考文献	275

第 14 章 辐射磁流体力学方程	276
14.1 毛细管放电的一维磁流体力学模型	276
14.1.1 物理模型	276
14.1.2 一维柱对称辐射磁流体力学方程	277
14.1.3 充气毛细管中的等离子体状态的演变	283
14.1.4 抽真空的管道内毛细管放电	288
14.1.5 毛细管波导的模拟	289
14.2 Z 箍缩的二维辐射 MHD 模型	294
14.2.1 两维三温 MHD 基本方程	294
14.2.2 等离子体状态和反应系数	298
14.2.3 定解条件	301
14.2.4 二维非平衡辐射多群扩散 MHD 模型	302
参考文献	303

Contents

Chapter 1 Basic concepts of radiation and the interaction of radiation and matter	1
1.1 Basic properties of radiation	1
1.1.1 Basic properties of radiation	1
1.1.2 The macroscopic physical quantities for description of radiation properties	3
1.1.3 Introduction to the interaction of radiation and matter	6
1.1.4 Thermodynamic equilibrium	9
1.1.5 Distribution functions in thermal equilibrium	11
1.1.6 Local thermodynamic equilibrium	15
1.1.7 The relaxation processes	16
1.2 Quantization of the radiation	16
1.2.1 Quantization of the free electromagnetic field	17
1.2.2 Quantum – mechanical harmonic oscillator	19
1.2.3 Quantization of radiation field	20
1.2.4 Commutation relations between electric and magnetic field components	21
1.3 Semi – classical theory for the interaction of radiation and matter	22
1.3.1 Absorption and induced emission	22
1.3.2 Spontaneous emission	27
References	32
Chapter 2 Radiative transport equation	34
2.1 The fundamentals of particle transport	34
2.1.1 Basic equations	34
2.1.2 The integro – differential transport equation	36
2.1.3 Initial and boundary conditions	38
2.2 Radiative transport equation	38
2.2.1 Radiative transport equation	38
2.2.2 The initial and boundary conditions	40
2.3 The radiative transport equation in integral form	41
2.4 The photon transport equation in various coordinate systems	44
2.4.1 Plane geometry	44

2. 4. 2	Spherical geometry with spherical symmetry	44
2. 4. 3	Cylindrical geometry with cylindrical symmetry	45
2. 4. 4	General geometry	45
References		47
Chapter 3	Diffusion theory of radiation transport	48
3. 1	Diffusion theory	48
3. 1. 1	P_1 approximation	48
3. 1. 2	The boundary conditions of P_1 equation	50
3. 1. 3	Classical diffusion (Eddington) theory	52
3. 1. 4	The applicable conditions of diffusion theory	54
3. 2	Equilibrium diffusion theory	55
3. 2. 1	Equilibrium diffusion approximation	55
3. 2. 2	Rosseland mean free path	57
3. 3	Flux – limited diffusion theory	59
3. 3. 1	Flux – limited differential equation	59
3. 3. 2	Analytic solution of flux – limited diffusion equation under certain conditions	62
3. 3. 3	The series of flux – limited diffusion theory	63
3. 3. 4	Initial and boundary conditions for flux – limited diffusion equation	69
3. 4	Multigroup method	74
3. 4. 1	One – group approximation	74
3. 4. 2	Multi – group approximation	75
3. 4. 3	Rosseland and Planck means	76
3. 5	The multiband method in radiative transport calculations	77
3. 5. 1	Introduction	77
3. 5. 2	The equations of multiband method in the simplest cases	78
3. 5. 3	The parameters of multiband method	79
References		81
Chapter 4	Spherical harmonic — P_N approximation and Discrete ordinate — S_N approximation	82
4. 1	Spherical harmonic method — P_N approximation	82
4. 1. 1	The basic equations and initial and boundary conditions in 1 – D plane system	82
4. 1. 2	The basic equations and initial and boundary conditions in spherical geometry	86
4. 1. 3	The basic equations and initial and boundary conditions in normal geometry	87
4. 1. 4	The physical quantities for radiation in normal geometry	89
4. 2	Brief introduction to simplified P_2 approximation	91

4. 2. 1	The derivation of SP_2 equations	92
4. 2. 2	The basic characteristics of SP_2 approximation	94
4. 3	Discrete ordinate method and discrete S_N approximation	94
4. 3. 1	The steps of solving transport equation by discrete ordinate method	95
4. 3. 2	Discrete ordinate method in plane geometry	96
4. 3. 3	Discrete ordinate method in spherical geometry	100
4. 3. 4	Discrete ordinate method in normal geometry	101
4. 3. 5	The ray effect	101
	References	102
Chapter 5	MC method of radiation transport	104
5. 1	Basic principle of MC method	104
5. 1. 1	Basic knowledge	104
5. 1. 2	Evaluation of integrals	107
5. 2	Random simulation of radiation transport	111
5. 2. 1	Radiation transport as a random process	111
5. 2. 2	The characters of sources	111
5. 2. 3	Path tracking	112
5. 2. 4	The simulation of impact events	113
5. 2. 5	Random walks and integral equation	115
	References	116
Chapter 6	The approximate calculation of spectral line radiation	118
6. 1	Line broadening	118
6. 1. 1	The profile of spectral line	118
6. 1. 2	Natural line broadening	119
6. 1. 3	Doppler broadening	120
6. 1. 4	Voigt distribution of spectral lines	121
6. 1. 5	Electron collisional broadening	121
6. 1. 6	Quasi - static Stark broadening	122
6. 2	The conditions of spectral line radiation emission and absorption	123
6. 3	The approximate method for spectral line radiation transfer —— Escape probability method	124
6. 3. 1	Basic approximations	124
6. 3. 2	Approximate calculation for escape probability in plasmas in plane - parallel geometry	126
6. 3. 3	Approximate calculation for escape probability in 1 - D cylindrically expanding plasmas	127
	References	132
Chapter 7	The Lorentz transformation of the radiative transfer equation	133

7.1	Lorentz transformation	133
7.1.1	Lorentz transformation	133
7.1.2	The characters of Lorentz transformation	133
7.2	The Lorentz transformation of radiative transfer equation	138
7.2.1	The Lorentz transformation of radiative transfer equation	138
7.2.2	The Lorentz transformation of radiative transfer equation in the approximation of diffusion	139
	References	142
Chapter 8	The Fokker – Planck equation of photons	143
8.1	The formulas of the Compton scattering	143
8.1.1	Compton scattering	143
8.1.2	Impacting differential cross – section	144
8.1.3	Integrated cross – section of the Compton impact and scattering	144
8.2	The formula of transition probabilities	145
8.3	The Fokker – Planck equation of photons	148
8.3.1	The non – relativistic Fokker – Planck equation	148
8.3.2	The relativistic Fokker – Planck equation	150
8.3.3	Some properties of the Fokker – Planck equation	152
	References	152
Chapter 9	Atomic properties in hot plasmas	153
9.1	Energy levels of atoms(ions) in plasmas	153
9.1.1	Energy levels of complex atom in hydrogenlike approximation	153
9.1.2	More's model	157
9.1.3	Atomic level shift and continuum lowering	158
9.1.4	Selection rules of angular momentum coupling and radiative transitions	159
9.2	Atomic transition probabilities	160
9.2.1	Oscillator strength and Einstein coefficient	160
9.2.2	Oscillator strength of hydrogen and hydrogen – like ions	162
9.2.3	Simple algorithm for dipole matrix element	163
9.3	Electron impact excitation and deexcitation	164
9.3.1	Rate coefficient of electron impact excitation	165
9.3.2	Multielectron impact excitation	167
9.4	Electron impact ionization and three – body recombination	168
9.5	Photoionization and radiative recombination	171
9.5.1	Photoionization	171
9.5.2	Radiative recombination	173
9.6	Auger autoionization and dielectronic recombination	173
9.6.1	Auger autoionization	173