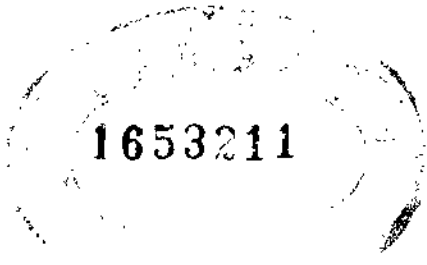


《中国工程物理研究院科技丛书》第008号

# 高温辐射物理与量子辐射理论

李世昌 著



1653211

国防工业出版社

(京)新登字106号

### 内 容 简 介

本书系统地介绍高温等离子体中辐射与物质相互作用理论。全书由两部分组成：前一部分中除着重讨论局域热动平衡条件下的统计理论、辐射输运理论及有关辐射参数的具体计算方法外，还详细介绍了非局域热动平衡条件下的物理理论、辐射输运理论及相应的各种原子过程；后一部分采用非扰变量子电动力学方法介绍了辐射与物质相互作用的微观理论基础，并讨论了各种微观截面的具体计算方法。

本书可供高温等离子体物理、热核聚变、强 $\times$ 光激光、辐射流体力学、原子物理、统计物理及天体物理等专业的高年级大学生、研究生及从事上述有关研究工作的科研人员参考。

### 高温辐射物理与量子辐射理论

李仕昌 著

责任编辑 蒋 倩

\*

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)

新华书店经售

北京昌平长城印刷厂印装

\*

850 $\times$ 1168毫米 32开本 印张6 $\frac{1}{2}$  160千字

1992年10月第一版 1992年10月第一次印刷 印数：0 001~1 500册

ISBN 7-118-01006-5·O·79 定价：6.75元

JY1/35/08

## 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分，又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展，加强社会主义物质文明和精神文明建设，培养优秀科技人才，确保国防科技优秀图书的出版，国防科工委于1988年初决定每年拨出专款，设立国防科技图书出版基金，成立评审委员会、扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是：

1. 学术水平高，内容有创见，在学科上居领先地位的基础科学理论图书；在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖，内容具体、实用，对国防科技发展具有较大推动作用的专著；密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作，负责掌握出版基金的使用方向，评审受理的图书选题，决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书，由国防工业出版社择优出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就，积累和传播科技知识的使命。在改革

开放的新形势下，国防科工委率先设立出版基金，扶持出版科技图书，这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版，随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物，是对出版工作的一项改革。因而，评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进，这样，才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授，以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来，为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗！

**国防科技图书出版基金**

**评审委员会**

**国防科技图书出版基金  
第一届评审委员会组成人员**

**主任委员：**冯汝明

**副主任委员：**金朱德 太史瑞

**委 员：**尤子平 柴英贤 刘琯德  
(按姓氏笔画排列)

何庆芝 柯国伟 张汝果

范学虹 金 兰 柯有安

侯 迁 高景德 莫梧生

曾 绎

**秘 书 长：**刘琯德

## 《中国工程物理研究院科技丛书》出版说明

中国工程物理研究院建院 30 年来，坚持理论研究、科学实验和工程设计密切结合的科研方向，完成了国家下达的各项国防科研任务。通过完成任务，在许多专业学科领域里，不论在基础理论方面，还是在实验测试技术和工程应用技术方面，都有重要发展和创新，积累了丰富的知识和经验，造就了一大批优秀科技人材。

为了扩大科技交流与合作，促进我院事业的继承与发展，系统地总结我院 30 年来在各个专业领域里集体积累起来的经验，吸收国内外最新科技成果，形成一套系列科技丛书，无疑是一件十分有意义的事情。

这套丛书将部分地反映中国工程物理研究院科研工作的成果，内容涉及本院过去开设过的二十几个主要学科。现在和今后开设的新学科，也将编著出书，续入本丛书中。

这套丛书将在今后几年里陆续编辑出版。我院早些年零散编著出版的专业书籍，经编委会审定后，也纳入本丛书系列。

谨以此套丛书献给 30 年来为我国国防现代化而献身的人们！

《中国工程物理研究院科技丛书》编审委员会

1989年1月25日

# 《中国工程物理研究院科技丛书》

## 编审委员会

**主任** 俞大光

**副主任** 章冠人

**委员** (以姓氏笔画为序)

丁厚本	于洞庭	水鸿寿	方乃相	王铁铮
刘庆兆	汤绍源	华欣生	吴宏志	杨成龙
张永昌	张寿齐	金行星	周正朝	罗诚荃
赵维晋	姚景华	姚礼屏	贺仁辅	高天祐
徐锡申	徐清之	董海山	谢铭勋	曾启铭
赖祖武				

## 本丛书编辑部

**负责人** 吴衍斌

**本册编辑** 吴衍斌

# 《中国工程物理研究院科技丛书》

## 已出版书目

- |     |               |           |         |          |
|-----|---------------|-----------|---------|----------|
| 001 | 高能炸药及相关物性能    | 董海山 周芬芬主编 | 科学出版社   | 1989年10月 |
| 002 | 光学高速摄影测试技术    | 谭显祥编著     | 科学出版社   | 1990年2月  |
| 003 | 凝聚炸药起爆动力学     | 章冠人等著     | 国防工业出版社 | 1991年11月 |
| 004 | 线性代数方程组的迭代解法  | 胡家贛编著     | 科学出版社   | 1991年12月 |
| 005 | 映象与混沌         | 陈式刚编著     | 国防工业出版社 | 1992年4月  |
| 006 | 再入遥测技术(上册)    | 谢铭勋编著     | 国防工业出版社 | 1992年6月  |
| 007 | 再入遥测技术(下册)    | 谢铭勋编著     | 国防工业出版社 | 1992年6月  |
| 008 | 高温辐射物理与量子辐射理论 | 李世昌著      | 国防工业出版社 | 1992年8月  |



## 序

作者曾就热稠密等离子体内的辐射过程及原子过程在研究所内进行过系统讲座，随后又将有关内容编写成讲义，并对研究生进行过讲授。此书是在原有材料基础上经过补充、修改整理而成的。

在编写过程中作者得到郑绍唐研究员的鼓励、督促和支持，航天部 207 所王福恒研究员和中国科学院力学研究所朱如曾研究员都指出了原书稿中不足之处及改进意见。为此作者对以上三位同志表示衷心的感谢。此外，作者还要感谢徐锡申研究员，书中某些内容就是在他领导下进行研究而完成的，在整个编写过程中作者曾就一些问题与他进行过仔细讨论，这对本书的完成起了促进作用，完稿后徐锡申同志审阅了全部书稿。

高温辐射过程是很复杂的，如果早期的研究工作主要是阐明天体辐射的种种现象，那么近几十年来人们投入了很多的人力与物力来研究地上实验室中各种复杂的辐射现象与原子过程，从而促进了核聚变、航天技术、X 光激光技术以及近代原子物理与天体物理的蓬勃发展。显然，本书中作者仅能就有关的某些内容，而且是比较基础的内容进行介绍，希望这些内容能对一些读者有所帮助，不妥之处敬请指正。

李世昌 1991年12月

北京应用物理与计算数学研究所

## 前 言

随着科学技术的发展，高温状态下物质的辐射特性的研究日益引起人们的重视。从本世纪初直到40年代末，主要是天文学家们对此问题有兴趣，这是因为当他们探讨星球大气层的结构和星球内部结构等问题时，必然要对高温状态下的辐射传播方式有所了解。他们的研究成果至今都是很有意义的。随后，由于核武器研究工作的开展，人们把此项研究工作大大地向前推进了一步。近几十年来，又由于高温等离子体物理、受控热核反应、激光物理、近代天体物理，航天技术等学科的理论研究及科学实验的进展，使得高温辐射物理具有更为广泛的研究内容。

高温辐射物理所涉及的内容很广，有关的文献很多，但尚未有一本标准教程。本书只是结合作者本人在这方面进行的某些研究工作，教学工作并针对日常科研工作中的需要，较为系统地将一些最基本的内容作一介绍，着重提供一些具体计算高温物质辐射参数的方法。这也许对一些同志有所帮助。

书中对辐射运输的宏观理论及其具体应用不作过多的讨论，现已有不少专著对有关问题作了论述。有兴趣的读者可参阅文献〔1〕~〔11〕。但是为了使本书具有一定的系统性及叙述上的方便，有必要对一些基本内容加以概要介绍。此外还需说明，虽然温度的概念是与热动平衡概念紧密地联系在一起，但本书是从更广泛的意义上理解“高温”一词，它泛指系统具有高能量密度，特别是辐射场具有高能量密度，这样就把没有统一温度概念的非热动平衡系统也包括在研究范围之内。

本书分为两大部分，第一部分主要介绍平衡态及非平衡态的辐射运输理论、高温物质的统计理论、一些微观过程的简介及各种有关参数的计算方法；第二部分着重阐述量子辐射理论。在不

少介绍辐射输运理论的书籍中，较多的是采取罗列方式或定性描述方式来介绍辐射与物质相互作用的微观过程，另一方面，虽然已有不少有关的量子辐射理论专著，其中对有关的过程有严格的论述，但往往过于理论化。因此，本书第二部分中除了从理论上对有关微观过程进行一般讨论外，还对这些过程的具体计算进行较为详细的介绍。

# 目 录

## 前言

<b>第一部分 高温辐射物理</b> .....	<b>1</b>
<b>第一章 局域热动平衡辐射输运理论</b> .....	<b>1</b>
1.1 描述辐射场的物理量 .....	1
1.2 辐射系数和吸收系数 .....	3
1.3 辐射输运方程 .....	4
1.4 局域热动平衡近似 .....	6
1.5 局域热动平衡近似的辐射输运方程 .....	8
1.6 输运方程的形式解 .....	10
1.7 Rosseland 平均自由程及辐射热传导律 .....	11
1.8 Planck 平均自由程 .....	14
1.9 恒星光球层的辐射输运问题 .....	15
<b>第二章 高温物质的统计性质</b> .....	<b>24</b>
2.1 高温电离物质的两种描述方法 .....	24
2.2 Boltzmann 激发公式和 Saha 方程 .....	26
2.3 混合物质的 Saha 方程 .....	29
2.4 Saha 方程的求解 .....	30
2.5 平均占据数 $z_i$ 的计算 .....	33
2.6 $\alpha$ 的确定 .....	36
2.7 束缚电子相互作用能 $V_{ij}$ .....	43
2.8 束缚电子的能级 .....	48
2.9 原子的统计模型 .....	55
2.10 Thomas-Fermi 方程的数值求解 .....	58
<b>第三章 辐射与物质的相互作用的基本过程</b> .....	<b>60</b>
3.1 光电吸收和复合辐射 .....	60
3.2 逆韧辐射吸收和韧致辐射 .....	63
3.3 谱线吸收和谱线辐射 .....	65
<b>第四章 非热动平衡辐射输运理论</b> .....	<b>74</b>

4.1	非热动平衡态的光子扩散方程	74
4.2	非热动平衡系统的光子熵密度方程	77
4.3	广义光子平均自由程	79
4.4	考虑电子散射效应的光子输运方程	81
4.5	平均占据概率 $P_n$ 的动理学方程	87
4.6	自由电子能量平衡方程	97
<b>第二部分 量子辐射理论及其应用</b>		102
<b>第五章 量子辐射基本理论</b>		102
5.1	Maxwell 方程组与规范变换	102
5.2	自由辐射场	107
5.3	辐射场的量子化	112
5.4	辐射与物质的相互作用	114
5.5	相互作用绘景	118
5.6	微扰论与跃迁概率	119
5.7	光子态密度	123
5.8	矩阵元 $\langle f   H_{int}   i \rangle$ 显示表达式	124
5.9	束缚-束缚跃迁 谱线辐射概率	127
5.10	束缚-束缚跃迁 谱线吸收概率	130
5.11	束缚-自由跃迁 光电吸收截面	131
5.12	自由-束缚跃迁 复合辐射截面	134
5.13	自由-自由跃迁 韧致辐射截面	136
5.14	自由-自由跃迁 逆韧致吸收截面	138
<b>第六章 量子辐射理论的应用</b>		140
6.1	谱线总自发辐射概率和总吸收概率 非相对论性理论	146
6.2	多板辐射效应	146
6.3	谱线跃迁径向积分的计算	148
6.4	Einstein 系数 谱线振子强度	154
6.5	谱线跃迁概率 相对论性理论	156
6.6	K 壳层光电吸收截面 平面波近似	162
6.7	类氢近似光电吸收截面 光电过程的 Gaunt 因子	168
6.8	韧致辐射截面	176
6.9	逆韧致吸收截面 韧致过程的平均 Gaunt 因子 $\overline{g_{ff}}$	179
6.10	谱线的自然宽度与谱线截面	182
<b>参考文献</b>		187

# 第一部分 高温辐射物理

高温辐射物理主要从宏观上研究热稠密等离子体内辐射的产生, 吸收以及辐射的传播规律。下面四章中着重介绍热动平衡条件下和非热动平衡条件下热物质的统计性质; 辐射的辐射系数、吸收系数及各种辐射平均自由程的计算方法; 辐射输运方程及其一些近似求解方法。讨论中涉及的与辐射及电子碰撞有关的微观截面和原子结构理论等只作一般介绍。其中有些内容在本书第二部分中将作详细讨论。

## 第一章 局域热动平衡辐射输运理论

本章主要讨论辐射输运问题。人们对此问题的研究已有相当长的历史, 这是因为研究辐射在高温物质中的传播是认识星球内部过程及解释各种观察到的天体现象所必不可少的。早期天文学家对此不但进行了大量的实际观察, 而且进行了深入的理论研究, 他们的研究成果已被广泛地应用到很多科研领域。近几十年来, 随着高温等离子体物理、激光物理、受控核聚变物理和国防科研工作的不断进展, 辐射输运的研究已被大大地向前发展了。下面我们从辐射场中几个常用的宏观物理量出发, 建立辐射输运方程, 然后讨论各种近似求解方程的方法。

### 1.1 描述辐射场的物理量

辐射场是由光子组成的, 光子的速度为  $c$ , 不同的光子具有不同的频率  $\nu$  和波长  $\lambda$ ,  $\lambda = \frac{c}{\nu}$ , 光子的能量为  $h\nu$ ,  $h$  为 Planck 常量。光子的动量为  $p$ ,  $p = \frac{h\nu}{c} \Omega$ , 这里  $\Omega$  为光子的传播

方向。

在研究高温辐射现象时，经常采用以下几个描述辐射场的宏观物理量：

光子的谱分布函数  $f_\nu(\mathbf{r}, \Omega, t)$  在空间  $\mathbf{r}$  处， $t$  时刻，一个光量子态上沿  $\Omega$  方向传播的频率为  $\nu$  的光子数，此量为无量纲的量。由于  $2\nu^2/c^3$  是单位体积、单位频率区间、单位立体角中的  $\nu$  光子的量子态数（已对光子极化方向求和），那么  $2\nu^2 f_\nu/c^3$  就是单位体积、单位频率区间、单位立体角中沿  $\Omega$  方向传播的  $\nu$  光子数。有的文献中把后者定义为光子的谱分布函数，它的量纲是：〔体积·频率·立体角<sup>-1</sup>〕。

谱辐射强度  $I_\nu(\mathbf{r}, \Omega, t)$  在  $t$  时刻单位时间内沿  $\Omega$  方向的单位立体角中通过垂直于该  $\Omega$  方向的空间  $\mathbf{r}$  处的单位面积、单位频率区间的  $\nu$  光子能量。显然

$$I_\nu(\mathbf{r}, \Omega, t) = \frac{2}{c^2} h\nu^3 f_\nu(\mathbf{r}, \Omega, t) \quad (1.1.1)$$

$I_\nu$  的量纲是：〔能量·(面积·频率·时间·立体角)<sup>-1</sup>〕。

光子的谱能量密度  $\epsilon_\nu(\mathbf{r}, t)$  在  $t$  时刻空间  $\mathbf{r}$  处的单位体积中、单位频率区间的  $\nu$  光子能量。

$$\epsilon_\nu(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{c} \int_{\Omega} I_\nu(\mathbf{r}, \Omega, t) d\Omega \quad (1.1.2)$$

$\epsilon_\nu(\mathbf{r}, t)$  的量纲是：〔能量·(体积·频率)<sup>-1</sup>〕。如果  $I_\nu$  是各向同性的，则：

$$\epsilon_\nu(\mathbf{r}, t) = \frac{8}{c^3} \pi h\nu^3 f_\nu(\mathbf{r}, t) \quad (1.1.3)$$

这里  $f_\nu(\mathbf{r}, t)$  与光子传播方向无关。

光子的谱辐射能流矢量  $\mathbf{F}_\nu(\mathbf{r}, t)$  此量的定义如下：

$$\mathbf{F}_\nu(\mathbf{r}, t) = \int_{\Omega} \Omega I_\nu(\mathbf{r}, \Omega, t) d\Omega \quad (1.1.4)$$

显然，如将此矢量投影到某一特定方向  $\mathbf{n}$ ，那么  $\mathbf{F}$  在  $\mathbf{n}$  方向的分量值代表在  $t$  时刻、单位时间内通过垂直于  $\mathbf{n}$  方向的空间  $\mathbf{r}$

处的单位面积、单位频率区间的  $\nu$  光子的能量。  $F_\nu$  的量纲是：〔能量 · (面积 · 时间 · 频率)<sup>-1</sup>〕。

以上各物理量都是微分量，我们还可以定义以下各积分量。

总光子数密度  $N_\nu(\mathbf{r}, t)$  在  $t$  时刻空间  $\mathbf{r}$  处的单位体积中的总光子数为：

$$N_\nu(\mathbf{r}, t) = \int_0^\infty \int_\Omega f_\nu(\mathbf{r}, \Omega, t) \frac{2\nu^2}{c^3} d\nu d\Omega \quad (1.1.5)$$

总辐射强度  $I(\mathbf{r}, \Omega, t)$  在  $t$  时刻的单位时间内沿  $\Omega$  方向的单位立体角中通过垂直于该方向的空间  $\mathbf{r}$  的单位面积的光子能量。

$$I(\mathbf{r}, \Omega, t) = \int_0^\infty I_\nu(\mathbf{r}, \Omega, t) d\nu \quad (1.1.6)$$

总辐射能量密度  $\varepsilon(\mathbf{r}, t)$  在  $t$  时刻空间  $\mathbf{r}$  处的单位体积中的总辐射能量。  $\varepsilon(\mathbf{r}, t)$  的量纲是：〔能量 · (体积)<sup>-1</sup>〕。

$$\varepsilon(\mathbf{r}, t) = \int_0^\infty \varepsilon_\nu(\mathbf{r}, t) d\nu \quad (1.1.7)$$

总辐射能流矢量  $F(\mathbf{r}, t)$  它定义如下：

$$F(\mathbf{r}, t) = \int_0^\infty F_\nu(\mathbf{r}, t) d\nu \quad (1.1.8)$$

显然，  $F \cdot \mathbf{n}$  代表在  $t$  时刻的单位时间内通过垂直于  $\mathbf{n}$  方向的空间  $\mathbf{r}$  处的单位面积的总辐射能量。它的量纲是：〔能量 · (面积 · 时间)<sup>-1</sup>〕。

## 1.2 辐射系数和吸收系数

当光与物质相互作用时会引起一系列的量子微观过程，例如光电吸收和复合辐射；谱线吸收与谱线辐射；逆韧辐吸收<sup>⊙</sup>和韧致辐射等过程。为了研究辐射在介质中的传播规律，我们必需对这

⊙ 逆韧辐吸收其英文原文为 inverse bremsstrahlung，中文有各种译法：例如逆韧致辐射或韧致辐射逆过程。本书中为了使辐射与吸收主逆过程一一对应，特译成逆韧辐吸收。



些过程有所认识，本节中暂不对它们进行详尽的微观讨论，这里仅引入两个宏观物理量来描述，即自发辐射系数（或称自发发射系数） $j_v(\mathbf{r}, \Omega, t)$  和吸收系数  $\mu_v(\mathbf{r}, \Omega, t)$ 。

**自发辐射系数**  $j_v$  在  $t$  时刻的单位时间内，在空间  $\mathbf{r}$  处的单位体积中，沿  $\Omega$  方向的单位立体角中物质自发辐射出的单位频率区间的  $\nu$  光子能量。此系数的量纲是：〔能量·(体积·时间·频率·立体角)<sup>-1</sup>〕。

由量子理论可知，辐射过程由自发辐射和诱发辐射两部分组成，而诱发辐射项是自发辐射项乘以  $f_v$ 。所以，如令  $j_v^{tot}$  为总辐射系数，那么：

$$j_v^{tot} = j_v(1 + f_v) \quad (1.2.1)$$

或

$$j_v^{tot} = j_v \left( 1 + \frac{c^2}{2h\nu^3} I_v \right) \quad (1.2.2)$$

**吸收系数**  $\mu_v(\mathbf{r}, \Omega, t)$  令  $\mu_v(\mathbf{r}, \Omega, t) I_v(\mathbf{r}, \Omega, t)$  为在辐射强度为  $I_v$  的辐射场作用下， $t$  时刻的单位时间内，空间  $\mathbf{r}$  处的单位体积中，沿  $\Omega$  方向的单位立体角中被物质吸收掉的单位频率区间的  $\nu$  光子能量。其中  $\mu_v(\mathbf{r}, \Omega, t)$  称为吸收系数，显然，它的量纲是：〔(长度)<sup>-1</sup>〕。

这里，我们仅定义了两个宏观参数，在第三章中将概要地讨论它们的具体表达式，至于它们的详尽理论基础将在第二部分中阐述。

### 1.3 辐射输运方程

根据前面两节中所讨论的概念，很容易建立光子的 Boltzmann 方程，即辐射输运方程：

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I_v}{\partial t} + \Omega \cdot \nabla I_v = j_v \left( 1 + \frac{c^2}{2h\nu^3} I_v \right) - \mu_v I_v \quad (1.3.1)$$

（为书写方便起见，省略了各物理量中的变量  $\mathbf{r}$ ,  $\Omega$  和  $t$ ）。