

等离子体物理 原理

马腾才 胡希伟
陈银华 编著



中国科学技术大学出版社

等离子体物理原理

马腾才 胡希伟 陈银华 编著

中国科学技术大学出版社

1988年·合肥

内 容 简 介

本书深入浅出而又系统地介绍了等离子体物理的基本概念、基本性质及相应的描述方法。第一章力图让读者对等离子体物理有一个完整统一的物理图像。以后的各章分别介绍了等离子体的单粒子轨道模型；冷等离子体波动理论；弹性碰撞理论，非弹性碰撞过程及输运方程组；磁流体理论；辐射现象及不稳定现象。最后简述了等离子体的一些应用领域。本书还附有较完全、便于查用的一些数学和物理附录。

本书可作为大学物理系高年级学生及工科院校研究生的教科书，对等离子体物理有兴趣的教师和研究人员的入门参考书，从事高温和低温等离子体研究人员的工具书。

等 离 子 体 物 理 原 理

马腾才 胡希伟 陈佩华 编著

责任编辑 黄 德 封面设计 王瑞棠

中国科学技术大学出版社出版

(安徽省合肥市金寨路96号)

皖西报社印刷厂印刷

安徽省新华书店发行 各地新华书店经售

开本：850×1168/32 印张：14.25 字数：364千

1988年8月第1版 1988年8月第1次印刷

印数：1—3000册

ISBN 7-312-00084-8/O·37

书号：13474·89 定价：3.45元

序 言

等离子体是由大量带电粒子组成的体系。它和气体、液体、固体组成了物质同一层次上的四个基本形态。

等离子体物理自本世纪五十年代以来，在受控核聚变研究和空间技术发展的推动下，有了长足的进步，现在已经成为物理学中一支独立的学科，和凝聚态物理、原子和分子物理、光学和光电子学、声学、理论物理、高能物理等并列为现代物理学的主要组成部份。

等离子体物理研究的对象从极高温的脉冲星、恒星等离子体层到低温下固体中的电子气，从极稀薄的恒星际、行星际空间等离子体到白矮星、激光聚变中的极密等离子态，从目前已有广泛工业用途的各种气体放电等离子体到可望成为人类未来主要能源的核聚变等离子体；其研究面之广，各具体对象的形态变异之大，所采用的实验手段和理论方法之多是其它物理学科所少见的。正因为这样，等离子体物理从其它物理学科（包括流体力学）汲取了大量的实验手段和理论方法，并加以改造和发展，从而形成了既有本身特色又和其它学科有密切联系的等离子体实验技术和理论。

在科学技术发达的国家，许多大学都设有等离子体物理课程，并培养了数以千计的博士和相当博士学位的高级人才。在我国，直到不久前，等离子体物理人才还主要集中在少数研究所中，并且偏重于核聚变高温等离子体的研究。这就大大限制了对等离子体物理人才的需求，因而绝大多数大学物理系都没有开设等离子体物理课程，多数物理系毕业生对等离子体缺乏起码了解。近年来，随着低温等离子体技术和工艺在材料加工及表面改性、薄膜制备、化工冶金……等方面愈来愈多的应用，以及一些原来从事高温等离子体物理研究的人材转入高校，不少工科院校和大学物理系都开始讲授或准备讲授等离子体物理课程，以开展各种应用研究。这对等离子体物理在我国的发展，无疑是有力的推动。

正是在上述情况下，中国等离子体研究会（一个以高校为主要成员的民间学术组织）委托有多年等离子体教学经验的中国科技大学近代物理系等离子体专业和大连理工大学等离子体实验室联合编写这本讲述等离子体基本原理的教科书。本书对象是物理系高年级学生和工科研究生，在其它领域工作的教师和科研人员也可以把本书当成一本入门读物。

本书需要的物理基础是普通物理和部份电动力学、统计物理及量子力学的基本知识。所用的数学工具限制在高等数学（微积分及常系数微分方程）的范围内。

由于等离子体的行为和相应的描述方法种类多、跳跃大，而一般教科书中又都是分章讲述，缺乏总体上的联系，因此学生在学习之后往往只见树木不见森林，甚至有不知等离子体究竟为何物的感觉。为此，本书在第一章中除了讲述等离子体的定义及基本的时间、空间特征物理量外，还试图从统一的观点来讨论等离子体可能出现的主要行为及适于描述这些行为的不同理论方法。并且扼要说明在描述实际物理问题时这些方法的分工和配合。最后以比较严格的数学推导，说明了不同理论描述方法间的内在联系。

从第二章开始，分别介绍了几种典型的等离子体理论方法及相应的典型等离子体行为。主要有单粒子轨道理论，碰撞（弹性及非弹性）理论，磁流体力学，波动现象，辐射理论及不稳定性理论。在等离子体理论中占重要地位的动力学（伏拉索夫）理论和近年来被广泛应用的计算机模拟方法，因需要较多的数学基础和一定的计算机条件，在本书中没有列入，但在第一章中给予简单的介绍。本书中第八章概略地介绍了一些等离子体的应用领域，但由于时间、篇幅的限制和作者们工作领域的限制，不可能很全面地反映出等离子体物理广泛应用的实际状况。读者可以通过本章中所列出的参考书和参考文献深入到所关心的具体领域。最后本书附有习题和五个数学及物理附录，希望对本书读者在学习和今后工作中有所帮助。

本书作者的分工如下：胡希伟（中国科技大学），序言、第一、第三、第七章及附录；陈银华（中国科技大学），第二、五章及习题；马腾才（大连理工大学），第四、六、八章。

本书经中国科学院等离子体所霍裕平教授审稿。作者感谢他提出的包括更改书名在内的有益意见。

中国科技大学项志遒教授最早提议编写此书，等离子体研究会各成员

普遍赞同，中国科技大学近代物理系等离子体专业为此书出版提供了财政上的支持，在此一并表示深切的谢意。

欢迎本书读者和等离子体物理界的同行指出错误，提出意见，以促进我国等离子体物理事业的蓬勃发展。

作者 1988. 5 1

目 录

| | |
|------------------------|--------|
| 序言 | (i) |
| 第一章 等离子体的基本概念和描述方法 | (1) |
| § 1.1 定义和基本性质 | (1) |
| 一、定义 | (1) |
| 二、基本的空间和时间尺度 | (3) |
| 三、电荷准中性条件 | (9) |
| 四、对外加电磁场的响应及自身的电磁辐射现象 | (11) |
| 五、碰撞过程的时间、空间特征尺度 | (13) |
| 六、等离子体分类 | (15) |
| § 1.2 基本的描述方法 | (20) |
| 一、概述 | (20) |
| 二、单粒子轨道描述 | (28) |
| 三、磁流体方程和双流体系方程 | (29) |
| 四、输运方程组 | (32) |
| 五、伏拉索夫方程 | (35) |
| 六、粒子模拟 | (38) |
| § 1.3 各种描述法的推导 | (45) |
| 一、动力学方程组 | (45) |
| 二、双流体系方程组 | (60) |
| 三、磁流体方程组 | (70) |
| 第二章 带电粒子在电磁场中的运动 | (77) |
| § 1.1 引言 | (77) |
| § 1.2 带电粒子在均匀恒定电磁场中的运动 | (78) |
| 一、带电粒子在均匀恒定磁场中的运动 | (78) |
| 二、电漂移 | (81) |

| | |
|-------------------------------------|----------------|
| 三、重力漂移..... | (83) |
| § 2.3 带电粒子在变化磁场中的运动..... | (84) |
| 一、漂移近似..... | (84) |
| 二、梯度漂移..... | (85) |
| 三、曲率漂移..... | (88) |
| 四、粒子在随时间缓变磁场中的漂移..... | (90) |
| § 2.4 带电粒子在均匀恒定磁场和变化电场中的运 动..... | (91) |
| 一、非均匀电场..... | (91) |
| 二、随时间缓变的电场..... | (95) |
| § 2.5 衰渐不变量及其简单应用..... | (97) |
| 一、磁矩 μ 的不变性——磁镜效应..... | (97) |
| 二、纵向不变量 J_z ——费米加速..... | (104) |
| 三、磁通不变量..... | (108) |
| § 2.6 带电粒子在高频场中的运动..... | (109) |
| § 2.7 带电粒子在环形磁场中的运动..... | (112) |
| 一、带电粒子在简单圆环形磁场中的运动..... | (112) |
| 二、磁力线的转动变换..... | (113) |
| 三、通行粒子..... | (116) |
| 四、捕获粒子..... | (120) |
| 第三章 等离子体中的碰撞及输运..... | (123) |
| § 3.1 输运方程组..... | (123) |
| 一、连续性方程..... | (123) |
| 二、运动方程..... | (126) |
| 三、能量平衡方程..... | (128) |
| 四、关于输运方程的深入讨论..... | (129) |
| 1. 输运定律和输运系数..... | (129) |
| 2. 反常输运..... | (131) |
| 3. 辐射..... | (133) |

| | |
|-----------------------|-------|
| § 3.2 弹性碰撞和输运系数..... | (134) |
| 一、带电粒子间弹性碰撞的处理方法..... | (134) |
| 1. 两体碰撞的一般描述..... | (134) |
| 2. 多体碰撞的处理..... | (140) |
| 3. 自扩散和集体输运..... | (143) |
| 4. 磁场的影响..... | (145) |
| 二、碰撞频率..... | (146) |
| 1. 两体碰撞..... | (146) |
| 2. 试探粒子情况..... | (153) |
| 3. 集体碰撞情况..... | (164) |
| 4. 存在多种重离子情况..... | (169) |
| 5. 电子和中性原子的弹性碰撞..... | (170) |
| 三、输运系数..... | (172) |
| 1. 无规行走法..... | (173) |
| 2. 输运方程法..... | (177) |
| 3. 关于输运系数的深入讨论..... | (183) |
| § 3.3 非弹性碰撞过程简介..... | (196) |
| 一、概述..... | (196) |
| 1. 基本的非弹性碰撞过程..... | (196) |
| 2. 粒子产生(消失)速率方程..... | (198) |
| 3. 电离平衡模型..... | (200) |
| 二、原子的激发和解激发..... | (208) |
| 三、电离过程..... | (210) |
| 1. 直接电离..... | (210) |
| 2. 多重电离和逐步剥离..... | (212) |
| 3. 光电离..... | (213) |
| 4. 低温等离子体中的电离过程..... | (214) |
| 5. 负离子产生过程..... | (218) |
| 四、复合过程..... | (219) |

| | |
|-----------------------|-------|
| 1. 三体碰撞复合 | (220) |
| 2. 辐射复合 | (221) |
| 3. 碰撞—辐射复合 | (222) |
| 4. 双电子复合 | (223) |
| 5. 正负离子碰撞复合 | (225) |
| 五、离子的电荷交换过程 | (225) |
| 1. 共振电荷交换 | (226) |
| 2. 非共振的电荷交换 | (227) |
| 第四章 磁流体力学 | (231) |
| § 4.1 磁流体模型 | (231) |
| § 4.2 磁流体力学方程 | (232) |
| § 4.3 磁场的压强和应力 | (237) |
| § 4.4 等离子体内磁场的冻结与扩散 | (239) |
| § 4.5 双成份的磁流体力学 | (243) |
| § 4.6 广义欧姆定律与等离子体电导率 | (247) |
| § 4.7 等离子体的平衡与扩散 | (250) |
| § 4.8 弱电离等离子体的双极扩散 | (253) |
| 第五章 等离子体中的波动现象 | (257) |
| § 5.1 引言 | (257) |
| § 5.2 有关波动的几个基本概念 | (259) |
| 一、波的表示法——相速度 | (259) |
| 二、群速度 | (260) |
| 三、波的偏振 | (262) |
| § 5.3 非磁化等离子体中的静电波 | (263) |
| 一、朗缪尔振荡 | (263) |
| 二、朗缪尔波 | (265) |
| 三、离子声波和离子静电波 | (268) |
| § 5.4 非磁化等离子体中的电磁波 | (273) |
| § 5.5 垂直于磁场的静电波 | (276) |

| | |
|----------------------------------|--------------|
| 一、高混杂静电振荡和高混杂波 | (276) |
| 二、低混杂振荡和低混杂波 | (278) |
| 三、垂直于磁场的静电离子回旋波 | (280) |
| § 5.6 垂直于磁场的高频电磁波 | (282) |
| 一、寻常波 | (282) |
| 二、非寻常波 | (283) |
| 三、截止与共振 | (284) |
| § 5.7 平行于磁场的高频电磁波 | (286) |
| 一、左旋圆偏振波和右旋圆偏振波 | (286) |
| 二、哨音波 | (289) |
| 三、法拉第旋转 | (291) |
| § 5.8 磁流体力学波 | (293) |
| 一、阿尔芬波 | (293) |
| 二、磁声波 | (296) |
| § 5.9 漂移波 | (299) |
| 第六章 等离子体不稳定性 | (301) |
| § 6.1 几种典型的理想 MHD 不稳定性 | (303) |
| 一、槽型不稳定性 | (303) |
| 二、螺旋不稳定性 | (312) |
| § 6.2 线性撕裂模不稳定性 | (319) |
| 一、撕裂模不稳定性的物理机制 | (319) |
| 二、撕裂模不稳定性的增长率 | (323) |
| § 6.3 色散关系与增长率 | (328) |
| § 6.4 粒子束不稳定性 | (331) |
| § 6.5 离子声不稳定性 | (340) |
| § 6.6 漂移不稳定性 | (343) |
| § 6.7 电离不稳定性 | (349) |
| 一、产生不稳定的机制 | (350) |
| 二、影响 Z_+ 和 Z_- 的几种主要过程及其特征时间 | (351) |

| | |
|---|-------|
| 第七章 等离子体中的辐射现象 | (359) |
| § 7.1 概述..... | (359) |
| § 7.2 自生辐射过程简介..... | (361) |
| 一、线辐射..... | (361) |
| 二、复合辐射..... | (361) |
| 三、韧致辐射..... | (362) |
| 四、回旋辐射..... | (362) |
| § 7.3 自生辐射的功率公式..... | (364) |
| 第八章 等离子体物理的应用 | (368) |
| § 8.1 受控热核聚变新能源..... | (368) |
| § 8.2 受控热核反应的能量平衡..... | (370) |
| § 8.3 高温等离子体的约束和加热方法..... | (374) |
| 一、磁约束系统..... | (375) |
| 二、惯性约束——激光核聚变..... | (379) |
| § 8.4 磁流体发电和等离子体加速器..... | (381) |
| § 8.5 等离子体化学及其应用..... | (384) |
| 一、热等离子体在制造超细粉末中的应用..... | (386) |
| 二、ECR微波等离子体及其在材料表面改性中的 应用..... | (387) |
| § 8.6 日地空间等离子体..... | (389) |
| 一、太阳风..... | (389) |
| 二、磁爆和极光..... | (393) |
| 习 题 | (396) |
| 附录一 矢量和张量运算 | (418) |
| 附录二 SI制和高斯制下的物理单位、量纲及相互转 换 | (423) |
| 附录三 十进单位词冠表 | (434) |
| 附录四 电磁波谱 | (434) |
| 附录五 等离子体常用参数 | (435) |

第一章 等离子体的基本概念 和描述方法

§ 1.1 定义和基本性质

一 定 义

等离子体是和固体、液体、气体同一层次物质存在形式。它是由大量带电粒子组成的有宏观空间尺度和时间尺度的体系。

在地球环境中，自然界等离子体只存在于远离地球表面的电离层及其以上空间中、或者寿命很短的闪电中，因而人类对它们的认识开始得很晚，至今不过一百年。但在整个宇宙中，目前我们已经知道的物质绝大部分（如各种星体及星体间的物质）都以等离子体形式存在着。

等离子体和固、液、气三态组成上最明显的不同之处在于后者都是由中性的分子或原子组成的，而前者则由（原子、分子电离后的）电子和离子组成，这些带电粒子可以在空间相当自由地运动和相互作用。虽然有时电子和离子可以相碰而复合成中性原子，但同时也存在着中性原子因碰撞或其它原因而电离成电子、离子的过程。因此，可以在宏观尺度的时间和空间范围里存在着数量大体不变的大量电子和各种离子。正是因为如此，等离子体的许多性质才明显地和固体、液体、气体不同，有着自己特有的行为和运动规律。在这个意义上，往往称等离子体是物质（在这个层次上）的第四态。

在物质三态中，和等离子体性质最相近的是气体，它们都是由大量可以自由运动的粒子组成的。只不过在气体中，粒子是中性的；而在等离子体中粒子是带负电的电子和带正电的离子。因

此可以通过把气体中原子电离的方法来得到等离子体。人们在实验室中最早研究的等离子体正是通过气体放电得到的。

由于在电离过程的同时还存在着电子和离子复合成原子的过程，为了在宏观上维持一个有一定密度的电子、离子体系，就要求其中电子有足够大的动能，以使它能超过电子在离子静电势场中的平均势能，从而不被离子俘获。这样，可以引进一个无量纲的参数

$$\frac{\text{电子平均动能}}{\text{电子平均位能}} = \frac{KE}{PE}$$

其中 $KE = \frac{1}{2} m_e \overline{v^2}$ 是电子平均动能， v 是电子速度。在热力学平衡状态下，平均动能可以用温度 T 来表示

$$KE = \frac{1}{2} m_e \overline{v^2} = kT.$$

其中 k 是玻尔兹曼常数， T 是电子温度， PE 是电子的平均位能，可以表示成

$$PE \approx \frac{q_e^2}{l}$$

其中 l 是电子和其它带电粒子间的平均距离，可以近似地用电子密度 n_e 表示成 $l = (1/n_e)^{1/3}$ 。于是

$$\frac{KE}{PE} \approx \frac{kT}{n_e^{1/3} e^2}$$

当这个比值大大超过 1 时，体系是典型的等离子体；当 $KE/PE \ll 1$ 时，体系是中性粒子组成的气体。这个比值还可以和等离子体的特征尺度相联系，我们将在下面仔细讨论。

这里，我们要为本书采用的单位制作一些说明。本书基本上采取 SI 单位制，但有些例外，例如我们将采用电子伏特 (eV) 作为温度的单位。

$$1\text{eV} = 11600\text{K}$$

由于电子伏特实际上是能量的单位，因此在本书中所有用 kT 表示的粒子动能都简写成 T 。在需要进行数值计算时

$$1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$$

其次在第三章中讨论带电粒子的弹性和非弹性碰撞截面时，我们用 cm^2 为单位而不是 m^2 为单位，其中的公式以高斯制为单位。采取这二个例外的原因是由于实验上测量的方便和量子力学表达的简单，几乎所有等离子体所用的实验数据都是以上述单位给出的。

关于法定的 SI 单位制和高斯制的关系及其相互转化，请见附录二。

二、基本的空间和时间尺度

等离子体除了由带不同符号电荷的粒子组成外，还必须是一个宏观的体系。这里所说的宏观是指在空间尺度和时间的延续长度上都是宏观的。

首先来看空间的特征尺度。从带电粒子系中的任何一个带电粒子出发，如果把坐标系原点放在这个粒子上，则由于它的静电位场，在它的附近一定会出现异种电荷粒子的聚集和同种电荷粒子的排空现象，结果在它周围会出现一个净带异种电荷的球状“电荷云”。在远离中心粒子的云外来看，电荷云的包围削弱了中心粒子的有效电荷，从而也就削弱了它对远处带电粒子的库仑力。这种现象物理上称为静电屏蔽。经过屏蔽后的中心粒子的电势就不再是库仑势而是屏蔽库仑势。

对处于热力学平衡态下的带电粒子系，屏蔽库仑势可以从泊松方程得出。由 $E = -\nabla\varphi(r)$ ， $\varphi(r)$ 是待求的电势，在空间任意一点的 $\varphi(r)$ 满足泊松方程

$$\nabla^2\varphi(r) = -\frac{1}{\epsilon_0}\rho_e(r)$$

其中 $\rho_e(r)$ 是所研究带电粒子（位于 $r=0$ 处）附近 r 处的空间电

荷, ϵ_0 是真空介电常数 ($\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \times 10^9$ 法拉/米)。由于中心粒

子的静电势场, $\rho_e(r)$ 由正、负空间电荷之差决定

$$\rho_e(r) = n_i(r)Z_i e - n_e(r)e$$

其中 e 是单位电量, $n_i(r)$, $n_e(r)$ 分别是 r 处正负带电粒子的数密度, Z_i 是正电荷离子的电荷数。当空间中不存在中心 ($r=0$) 粒子时, 位场为零, 电子和离子应该是均匀分布的 (否则就会有一个空间电荷, 产生的电场将会消除正、负粒子分布上的不均匀), 故

$$n_{e,0}(r) = n_{e,0} = n_0$$

$$n_{i,0}(r) = n_{i,0} = n_0$$

所以 $\rho_{e,0} = 0$ 。但有了中心粒子的静电势 $\varphi(r)$ 后 $n_i(r)$, $n_e(r)$ 就不再均匀分布了, 它们的分布在热平衡状态下, 服从势场中的玻尔兹曼分布

$$n_a(r) = n_{a,0} \exp[-V_a(r)/T_a] \quad a = e, i$$

其中 $V_a(r)$ 是粒子 a 在势场中的势能, T_a 是温度 (以能量为单位, 因此略去了玻尔兹曼常数)。对电子来说 $V_e(r) = -e\varphi(r)$, 对离子, $V_i(r) = Z_i e\varphi(r)$ 。于是

$$\rho_e = e[Z_i n_{i,0} \exp(-Z_i e\varphi/T_i) - n_{e,0} \exp(e\varphi/T_e)]$$

对等离子体来说, 平均动能远大于平均位能, 故一般总有 $e\varphi \ll T$, 所以可以把 $e\varphi/T$ 当成小量对玻尔兹曼因子作泰勒展开

$$\exp[e\varphi/T_e] \approx 1 + \frac{e\varphi}{T_e}$$

$$\exp[-Z_i e\varphi/T_i] \approx 1 - \frac{Z_i e\varphi}{T_i}$$

代入泊松方程得

$$\nabla^2 \varphi(r) = \frac{e^2}{\epsilon_0} \left(\frac{n_{e,0}}{T_e} + \frac{n_{i,0} Z_i^2}{T_i} \right) \varphi(r)$$

为了简单, 令

$$\lambda_{D_e}^2 = \frac{\epsilon_0 T_e}{n_{e0} e^2}$$

$$\lambda_{D_i}^2 = \frac{\epsilon_0 T_i}{n_{i0} Z_i^2 e^2} \quad (1.1-1)$$

及

$$\lambda_D^2 = [\lambda_{D_e}^2 + \lambda_{D_i}^2]^{-1}$$

λ_{D_e} 、 λ_{D_i} 及 λ_D 都是有长度量纲的量, 分别称为电子德拜长度、离子德拜长度和总德拜长度, 它们是等离子体的一个基本参数。

在三维空间, 利用库仑作用的球对称性, 可以在球坐标中把泊松方程写成

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d}{dr} \right) \varphi(r) = \frac{\varphi(r)}{\lambda_D^2}$$

其满足无穷远边界条件 $\varphi(r = \infty) = 0$ 的解为

$$\varphi(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r} \exp(-r/\lambda_D) \quad (1.1-2)$$

这就是屏蔽库仑势。

图 1.1 给出了屏蔽库仑势 (1.1-2) 和普通库仑势的曲线。可以看出, 屏蔽库仑势随 r 增长迅速下降, 其有效的作用力程大致可以用德拜半径来表示。在距离中心带电粒子半径为 $r < \lambda_D$ 的德拜球内, 库仑作用虽被电荷云削弱, 但仍然存在。这时一个位于德拜球内的其它带电粒子还能明显地感受到中心

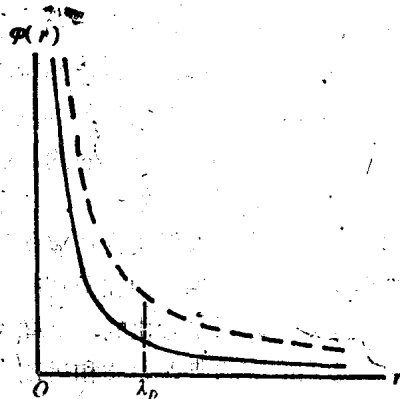


图 1.1 屏蔽库仑势——和库仑势——

粒子势场的作用, 从而较显著地改变本身的运动方向(即动量),