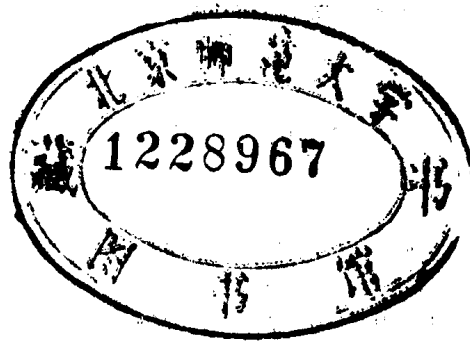


低温等离子体物理基础

金佑民 樊友三 编著

191135/24



清华大学出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了低温等离子体物理学的基础理论，并介绍它们在科技领域与工业部门中的应用。

全书共分十一章，前两章的内容是低温等离子体的概述及其基本性质。第三章到第八章对低温等离子体作微观和宏观两方面的理论描述。第九章到第十一章是等离子体产生和诊断、电弧等离子体和高频等离子体物理以及等离子体的技术应用。大部分章节附有习题。

本书可供从事高温热物理、高温气体动力学、磁流体发电、热离子能量转换、等离子体技术、气体放电等学科领域的科研人员、工程技术人员参考，也可作为有关专业的大学生、教师、研究生的教学参考书。

低温等离子体物理基础

金佑民 樊友三 编著

清华大学出版社 出版

北京 清华园

北京景山学校印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

开本：787×1092 1/16 印张：17 字数：435千字

1983年 月第1版 1983年 月第1次印刷

印数：7000

统一书号：15235·111

定价：2.10元

前 言

本书是根据作者在清华大学为研究生、进修生讲授‘等离子体物理’和在中国科学院电工研究所讲授‘低温等离子体物理与磁流体力学’的教材改写而成的。全书完稿后，中国科学院力学研究所研究员、中国科技大学教授吴承康给予多方面的指导，并对全书作了认真的审阅。本书可作为有关专业的高年级大学生、研究生学习等离子体物理与技术方面相应课程的教学参考书。

低温等离子体（温度为2000—50000 K）物理是一门新兴的学科。近年来，发展迅速，已广泛渗透到能源、材料、冶金、机械、化工、电子、宇航等学科领域或工业部门，并对它们的发展起着一定的推动作用。这些学科领域及工业部门中广大从事低温等离子体方面工作的科技人员，希望能对低温等离子体的基本规律有较深入的了解，希望能有一本系统介绍低温等离子体基础理论的自学用书。编写过程中，注意到这些要求，为此，本书也可作为有关科技人员的自学用书。

本书对低温等离子体的基本规律、粒子碰撞理论及存在电磁场时稠密低温等离子体的流动理论进行了深入的分析。既有宏观描述又有微观描述。重点放在论述基本物理概念和研究方法两个方面，对某些基本应用着重作了讨论。全书共分十一章，大部分章节后面附有习题，读者可运用基本概念进行思考，并练习计算各参数的数量关系。

本书所涉及的物理和力学领域，发展得非常迅速，文献资料极为丰富，我们编著时，力求内容系统充实、深入浅出。书中采用国际单位制（SI制）作为基本单位制，鉴于已往有关等离子体物理学方面的文献和书籍，所用单位制并不统一，有不少采用高斯制，因此，本书附录中给出了两种单位制的变换关系，并在有关章节讨论了单位制的问题。

在编写本书的过程中，曾请陕西机械学院物理教研室有关同志对部分初稿进行审阅，并提出了许多宝贵意见。沈阳机电学院物理教研室有关同志为本书的习题作了大量工作。在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有缺点或错误，敬请读者批评指正。

作 者

1981年12月于清华园

目 录

第一章 绪论

- § 1-1 等离子体概述..... (1)
- § 1-2 等离子体分类..... (2)
- § 1-3 等离子体的基本理论描述..... (3)
- § 1-4 量与单位制..... (5)

第二章 等离子体的基本性质

- § 2-1 电中性和德拜屏蔽..... (8)
- § 2-2 等离子体振荡和频率..... (12)
- § 2-3 等离子体鞘层..... (14)
- § 2-4 经典等离子体..... (17)
- § 2-5 扩散和双极扩散..... (17)
- § 2-6 磁压缩效应和磁压..... (19)
- § 2-7 等离子体的波..... (20)

第三章 带电粒子轨道理论

- § 3-1 带电粒子的运动方程..... (22)
- § 3-2 粒子的漂移运动..... (26)
 - 一、漂移速度..... (26)
 - 二、电场引起的漂移—电漂移..... (26)
 - 三、非均匀磁场引起的漂移—梯度漂移和离心漂移..... (28)
 - 四、磁场随时间缓变引起的漂移..... (31)
 - 五、非电磁力引起的漂移..... (32)
- § 3-3 磁矩守恒与磁镜场..... (33)
 - 一、磁矩守恒..... (33)
 - 二、磁镜场..... (36)

第四章 等离子体热力学

- § 4-1 等离子体热力学平衡态与非平衡态..... (40)
 - 一、等离子体热力学状态的描述..... (40)
 - 二、等离子体温度..... (42)
 - 三、弛豫时间..... (47)
 - 四、完全热力学平衡 (CTE) 与局部热力学平衡 (LTE) (48)
 - 五、非平衡等离子体 (NON-LTE)..... (49)
- § 4-2 等离子体状态方程..... (51)
 - 一、引言..... (51)
 - 二、弱电离经典等离子体状态方程..... (51)

三、部分电离经典等离子体状态方程	(55)
四、量子等离子体状态方程	(57)
§ 4-3 等离子体的热力学函数	(58)
一、配分函数和内配分函数	(58)
二、等离子体的热力学函数	(61)
§ 4-4 等离子体化学热力学基础	(65)
一、化学平衡和质量作用定律	(65)
二、解离平衡和电离平衡	(67)
三、沙哈方程	(70)
§ 4-5 平衡等离子体的成份计算	(73)
第五章 磁流体动力学	
§ 5-1 麦克斯韦方程组	(74)
§ 5-2 与磁流体动力学有关的基本概念	(76)
一、磁流体动力学 (MHD) 规范	(76)
二、霍尔效应和离子滑移	(78)
三、磁场向等离子体的扩散	(79)
四、运动等离子体中磁力线的冻结	(80)
§ 5-3 等离子体宏观方程	(81)
一、坐标系与对流导数	(81)
二、连续方程	(83)
三、动量方程	(86)
四、能量方程	(95)
§ 5-4 广义欧姆定律	(97)
第六章 碰撞动力学	
§ 6-1 等离子体粒子的元过程	(100)
§ 6-2 碰撞截面	(102)
一、碰撞截面概念	(102)
二、微分散射截面	(103)
三、动量交换截面	(104)
§ 6-3 碰撞频率和平均自由程	(106)
一、碰撞频率 ν 的推导	(106)
二、平均自由程	(107)
§ 6-4 带电粒子间的碰撞	(108)
§ 6-5 弹性散射的经典理论	(111)
一、经典理论的适用范围	(111)
二、一般理论	(112)
§ 6-6 库仑场中的散射	(116)
§ 6-7 小角度散射	(118)
第七章 等离子体辐射	

§ 7-1 等离子体辐射的产生	(121)
一、带电粒子加速运动时的电磁辐射	(121)
二、振动偶极子辐射	(125)
三、谱线的展宽机制	(126)
§ 7-2 等离子体辐射的不同机制	(127)
一、激发辐射(束缚-束缚, b-b跃迁)	(127)
二、复合辐射(自由-束缚, f-b跃迁)	(127)
三、韧致辐射(自由-自由, f-f跃迁)	(127)
四、回旋辐射	(129)
五、切伦柯夫辐射	(130)
六、等离子体的黑体辐射	(131)
§ 7-3 等离子体中辐射的能量传递	(132)
一、辐射能量传递方程	(132)
二、辐射能量传递方程的解	(134)
三、由爱因斯坦关系导出克希霍夫定律	(135)

第八章 等离子体动力论和输运性质

§ 8-1 分布函数	(138)
§ 8-2 动力论方程	(140)
§ 8-3 玻尔兹曼方程和福克-普朗克方程	(143)
§ 8-4 等离子体输运过程的宏观规律	(144)
一、不可逆过程唯象热力学的基本概念	(145)
二、昂塞格关系表示输运过程	(147)
§ 8-5 输运性质的定义	(148)
一、输运系数	(148)
二、流向量和速度矩流	(149)
§ 8-6 输运过程的初级理论	(152)
一、基本关系	(152)
二、等离子体的扩散	(154)
三、等离子体的导热	(155)
四、等离子体的导电	(156)
§ 8-7 输运过程的数学理论	(160)
一、引言	(160)
二、简化分布函数和简化碰撞函数	(160)
三、从玻尔兹曼方程求扩散系数	(162)
四、从玻尔兹曼方程求迁移率	(163)
五、从玻尔兹曼方程求导热系数	(165)
六、从玻尔兹曼方程求电导率	(166)
七、稳定均匀磁场($\vec{B} = \text{常数} \neq 0$)时弱电离等离子体输运性质	(166)

第九章 等离子体的产生和诊断

§ 9-1 等离子体技术的发展	(171)
一、引言	(171)
二、电弧放电和电弧等离子炬发展	(172)
三、高频放电和高频等离子炬发展	(172)
§ 9-2 等离子体产生的原理——电离机制	(173)
一、等离子体粒子的微观基本过程	(173)
二、各种电离的原理	(175)
§ 9-3 低温等离子体产生的主要方法	(184)
一、焦耳加热方法之一——电弧等离子炬	(184)
二、焦耳加热方法之一——高频等离子炬	(185)
三、燃烧等离子体产生的方法	(185)
§ 9-4 等离子体诊断的技术	(186)
一、光谱法	(187)
二、探针法	(188)
三、动态热偶法	(190)
四、微波和激光诊断法	(191)

第十章 等离子炬的物理

§ 10-1 电弧放电物理基础	(193)
一、电弧等离子体的基本性质	(193)
二、电弧等离子炬中基本流动过程	(194)
三、斯蒂倍克最小值原理	(195)
§ 10-2 电弧等离子体理论	(200)
一、电弧等离子体方程	(200)
二、爱伦勃斯-海勒方程	(202)
三、通道模型	(203)
四、常物性电弧模型	(204)
§ 10-3 高频感应放电物理基础	(209)
一、高频等离子体的基本性质	(209)
二、高频感应等离子炬中的气动过程	(211)
三、高频感应等离子炬的能量平衡	(213)
§ 10-4 高频等离子体理论	(215)
一、高频等离子体方程	(215)
二、金属圆柱体模型	(217)
三、高频感应放电一维近似	(218)
四、线性化解爱伦勃斯-海勒方程	(219)
五、通道模型	(223)
六、二区域模型	(225)
七、数值解法	(226)
八、高频感应放电的二维分析	(227)

§ 10-5 高频感应放电稳定性分析.....	(229)
第十一章 等离子体的应用	
§ 11-1 等离子体热过程的应用.....	(232)
§ 11-2 等离子体化学过程的应用.....	(234)
一、化冶方面的应用.....	(234)
二、半导体方面的应用.....	(236)
§ 11-3 磁流体力学过程的应用.....	(238)
一、磁流体发电.....	(238)
二、等离子体推进.....	(243)
三、磁流体润滑.....	(244)
§ 11-4 热离子的应用.....	(245)
习题	(246)
部分习题答案	(253)
附录 I	(254)
附录 II	(257)
附录 III	(257)
参考文献	(259)

第一章 绪 论

低温等离子体物理研究温度范围为2000~5000K的热等离子体的性质和运动。低温等离子体物理与高温等离子体物理有不同的地方,它较少涉及‘等离子体中的波动现象’、‘磁流体力学不稳定性’等问题,但是,却需要着重讨论各种放电的原理、弧柱的性质、等离子体射流的理论等方面。由于本书主要讨论稠密的和受碰撞支配的等离子体,因此要运用微观理论中的碰撞理论,而宏观理论中的等离子体热力学和磁流体力学当然需作详细的论述。另外,为了设计和研究等离子炬的需要,对等离子炬中的物理过程和气体动力学过程作了简明的叙述。输运性质计算更是低温等离子体研究的一个重要课题,因此也有专门章节论述。

目前,在科学研究和工程技术中,低温等离子体领域的研究内容包括电弧等离子体技术、高频等离子体技术、磁流体发电、等离子体加速、大气层中的超高速飞行、热离子能量转换、电子束和离子束技术,气体激光技术,等等。它们涉及许多学科领域——物理学、流体力学和气体动力学、热物理、化学、电磁学、材料科学,等等。无论从事上述哪一方面的低温等离子体技术和研究,都有必要对低温等离子体本身和等离子炬有一个基本的了解。

为此,我们从这一章开始系统地论述与低温等离子体有关的各种规律和理论处理方法。

§ 1-1 等离子体概述

我国古代,人们认为周围世界是由金、木、水、火、土五种‘元素’组成的,谓之‘五行’学说。在西方,当时则把周围世界看作是四种物质组成,即土、空气、火和水。可见,各种状态的物质具有不同的特性,人们自古已有初步认识。而现代人往往用物质的三种状态(固态、液态、气态)的不同特点来划分物质。近百年来,等离子体态才被看作物质的第四种状态。等离子体态不同于其它物质状态,它突出的一点是由带电粒子组成的电离状态。从整个宇宙的范畴来看,我们是生活在地球周围近乎非电离的大气层中,而这种非电离大气层又处在行星间空间等离子体的包围之中。

Plasma这个词是1928年朗缪尔(Langmuir)最早采用的^[90],我国曾译为‘等离子区’,现在译为‘等离子体’,也有译为‘电浆’的,希腊文为πλάσμα,指‘mold 模塑’和‘fabricate 可捏’的意思,英文这个词也指血浆。实际上,更早应该追溯到1879年不列颠协会的威廉·克鲁克斯(William Crookes),他在作气体导电实验时确认放电管中存在物质的第四态。^[91]

每块物质(物体)与外界不断交换能量(供给或吸取能量)以改变其聚集状态。根据物质的原子论,物质的原子、分子或分子团相互以不同的力或键力相结合,构成不同的聚集态。固体是以粒子间结合力强的键构成晶格的,而当其粒子的平均动能大于粒子在晶格中的结合能时,则晶格解体,固体转变为液体。液体的粒子间由结合力较弱的键联系,如果外界进一步供给能量,使这个较弱的键破坏,则液体转变为粒子间没有作用键的气体。如果再对气体供给足够的能量,气体就电离成电子和离子,而成为等离子体。实际上,只要部分粒子电离,并不需要整个物体每个粒子都电离才呈现等离子体特征,例如部分电离的气体就有显著的导

电性质，从更广泛的意义上讲，有些固体、液体也呈现等离子体特征。固态金属中晶格上正离子和运动的自由电子构成固态等离子体，半导体中电子和空穴也构成固态等离子体。电解质溶液（如食盐水溶液）内部有数目相等的运动着的正钠离子和负氯离子，也能导电，所以这种溶液也应属于等离子体范畴。

为此，可以下一个广义的定义：凡包含足够多的电荷数目近于相等的正、负带电粒子的物质聚集状态，称为等离子体。为了更精确地定义等离子体，第二章中我们将采用数学形式。

§ 1-2 等离子体分类

等离子体分类可有多种方法。按等离子体的产生划分，一般分为自然等离子体和实验室等离子体（指人工产生的等离子体）。自然等离子体广泛存在于宇宙中，几乎有 99.9% 以上的物质是以等离子体状态存在的，如恒星星系、星云，又如地球附近的闪电、极光、电离层，范·阿伦(Van Allen)带等。

然而地球上自然等离子体比较少，其主要原因是地球‘寒冷’，温度低。我们知道，热平衡时，气体的电离度 α （表示中性气体原子或分子中有百分之几电离成带电粒子）可由沙哈(Saha)方程确定，空气在室温下，如温度 T 于 300K 左右时，电离度 $\alpha \approx 10^{-122} [7]$ ，可见，室温下电离度是很低的。一般温度下地球上空气电离度都不大，而在天体上，温度高达上百万度，在那里物质都处于等离子体状态了。

实验室等离子体诸如日光灯中放电、霓虹灯中放电，高速飞行器尾迹、火箭发动机喷管中燃气，等离子炬中的电弧，气体激光、激波管中电离气体，受控核聚变时产生的高温等离子体，原子弹或氢弹爆炸时产生的高温等离子体，某些化学反应（燃烧）产生的燃气等离子体、紫外线和 X 射线辐射电离产生的等离子体等等，它们都属于人工产生的等离子体。

等离子体按气体电离的程度分类，可分成下列三种：

(i) 完全电离气体：几乎所有分子（或原子）都电离成电子和离子。

(ii) 部分电离气体：部分分子（或原子）电离成电子和离子，其它为中性分子（或原子）。

实际上 1% 的电离度就可使电导率接近完全电离时的电导率。

(iii) 弱电离气体：只有少量分子（或原子）电离。

另外，等离子体还可按温度来分类，见表 1-1 所示，应该指出，不同原子在不同的温度下才能达到相同的电离度，例如铯 Cs 蒸汽在 1500K 时电离度已相当大，而氩 Ar 气要达到与铯差不多大小的电离度，则要求约 6000K 的高温。在平衡条件下，温度在 20000K 以上，几乎所有的气体均高度电离。当气体处于非平衡状态时，特别是在低压稀薄气体中放电时，在很低的气体温度下就可以有显著的电离度。

综上所述，当物质处于不同温度范围或粒子处于不同能量范围时，呈现出不同的聚集态，见图 1-1 所示，可见等离子体是物质能量较高的聚集状态，从能量低的聚集态转化为

表 1-1 等离子体分类

等 离 子 体	热 等 离 子 体	低 温 等 离 子 体	稠密、高压（一般压力在 1 大气压以上），温度一般在 2000—20000 K，常常指电弧等离子体、高频等离子体、燃烧等离子体。
		高 温 等 离 子 体	一般指 10^6 — 10^8 K 那样受控核聚变所要求的高温。
体	冷 等 离 子 体	指电子温度高，气体温度低的稀薄低压的等离子体。	

能量较高的聚集态需要从外界供给能量，从固体转变为液体或液体转变为气体平均需要 $10^{-2}eV$ /粒子，而从气体转变为等离子体需要 $1-30eV$ /粒子。所以聚集态与粒子的平均动能有关，

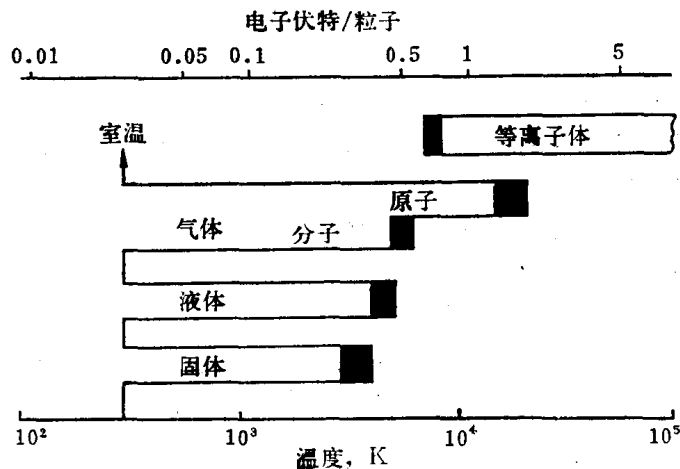


图 1-1 物质的高温特性

可以用一个简单的准则来描写：

$$U_n < W_{n+1} < U_{n+1}$$

式中 U_n, U_{n+1} 是能量范围， W_{n+1} 表示物质处于第 $n+1$ 种聚集态的能量。物质处于等离子体状态时，粒子的平均能量为：

$$1 < W_4 < 2 \times 10^6 \text{ eV}$$

推广到更高能量状态—物质第五态，有如下关系：

$$1 < W_5 < 500 \text{ MeV}$$

自由核和电子组成的气体，则定义为物质第六态，有如下关系：

$$\frac{1}{2} < W_6 < 10 \text{ GeV}$$

§ 1-3 等离子体的基本理论描述

目前，研究等离子体的理论一般分为三个方面。首先是天体物理学方面，以自然等离子体为研究对象，如太阳物理研究太阳中的等离子体过程、日地空间的磁爆、太阳风、磁层等，尚有研究更遥远的银河星系各种星云、星际空间中受恒星的辐射而电离的气体等，这些方面有大量的理论问题需要解决，特别是等离子体波动问题和等离子体辐射问题。

第二是受控核聚变方面，研究温度高达 10^8K 数量级的高温等离子体（这时气体是完全电离的，象氢、氦这样一些简单的气体已完全失去了它们的全部电子，而成裸核），以探索人类能源利用的归宿。这方面的研究提出了许多理论问题和实际问题，至少有如下几类：

(i) 等离子体约束问题：使等离子体加热到核聚变所需的温度 ($>10^8\text{K}$)，并希望有足够长时间约束住等离子体。简单来说，要使两个较轻的原子核聚变成一个较重的原子核，以释放出巨大的能量。

(ii) 等离子体辐射损失问题：杂质的电荷数 Z 愈大，则辐射带走的能量也愈大，以致不易

使等离子体达到较高的温度。

(iii) 等离子体不稳定性问题：主要从宏观方面讨论等离子体在电磁场作用下的宏观平衡等问题。

第三方面是一般工程中应用的低温等离子体（温度范围为2000—50000K），如电弧等离子体（应用于焊接、切割、制造超细粉、直接炼钢、宇航等），高频感应等离子体（应用于等离子体化冶、等离子体化学、炼钛、制备纯净材料、制备超导材料等），燃烧等离子体（用作磁流体发电的工质等）。大多数工程应用的等离子体，不少是属于部分电离气体，即它们是由电子、离子和中性分子（或原子）组成的，这类‘部分电离气体’的理论，正是我们阐述的重点所在。描述部分电离气体的各种理论体系，如图1—2所示，从图上可以清楚地了解各种理论的地位和联系。对图1—2说明如下：顶部中间方框中列出物理学的两个基本领域

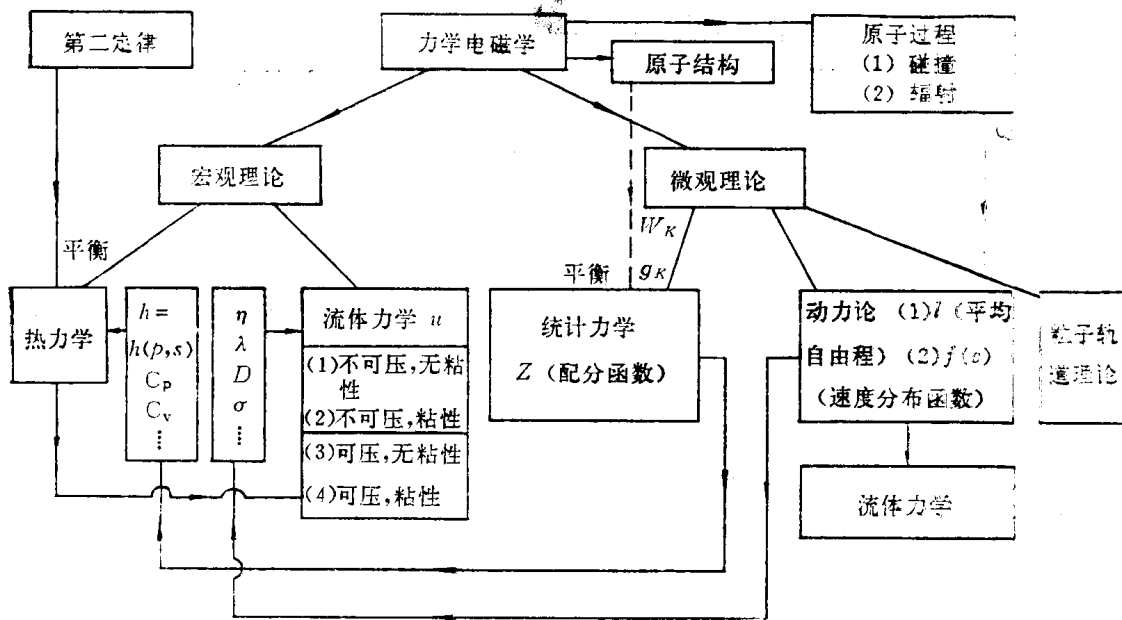


图 1-2 部分电离气体理论的分类

——力学（牛顿力学或量子力学）与电磁学。这两门学科既有连续介质理论的宏观处理方法又有微观处理方法。微观理论认为连续介质（这里指流体）是由原子（或分子）组成，这些粒子之间的相互作用受物理规律支配，流体方程只不过是对大量粒子特性作统计处理后导出的。宏观理论则忽略物质的具体结构，把物理规律直接应用于流体而导出流体力学方程。这里所用的物理规律指的是质量守恒、动量守恒和能量守恒。

研究平衡静止流体的宏观理论称为热力学理论。热力学理论中的一个基本公理，即热力学第二定律，它是不能从质量、动量和能量守恒三个物理定律导出的。热力学理论中还有状态方程、比热关系等。而研究运动流体的宏观理论称为流体力学理论，它必须引用计算或实验提供的输运系数（粘性系数 η 、导热系数 λ 、扩散系数 D 、电导率 σ ）的资料。

统计力学研究的体系与热力学相同，但是它是从微观角度去研究的，统计力学中基本的物理量是配分函数 Z ，由配分函数又可导出一系列热力学函数。计算配分函数时又得引用粒子的能级 W_k 和统计权重（简并度） g_k 。

动力论是从微观角度来讨论流体运动的，一般讲可应用于非平衡态的流体运动。它的初级理论是基于平均自由程的概念，它的数学理论则是基于粒子的速度分布函数，而分布函数的计算要引用碰撞截面，碰撞截面又是由实验或原子过程理论得到的。从图可见，带电粒子轨道理论是微观理论的又一独立分支。

总之，属于等离子体物理学领域的等离子体基本理论中，特别是研究等离子体性质和动力过程的等离子体动力学方面，是一个极为重要的研究领域。常用的理论方法有宏观和微观两种，宏观的描述方法，即热力学的、流体力学的方法，如磁流体动力学，常称MHD(Magneto-Hydro-Dynamic)方法，把等离子体当作一种导电的宏观流体来处理，并研究这种导电流体在电磁场中的运动。而微观的描述方法，即动力论的、统计的方法，属于这类方法的理论基本上有两种：一种为粒子轨道理论，研究单个带电粒子在电磁场中的行为，可以说这种理论是对等离子体的初步的、近似的描写，适用于忽略粒子间相互作用的稀薄等离子体。另一种是动力论的方法，一般来说，动力论是非平衡态的统计理论，它是从微观的观点，用统计的方法来考察等离子体中大量微观粒子的运动，以确定宏观不可逆过程进行的方向和速率，从而把宏观理论（如磁流体动力学，不可逆过程热力学）中所具有的输运系数（如粘性系数 η 、导热系数 λ 、扩散系数 D 以及等离子体极为重要的电导率 σ ）与微观物理量联系起来。

应该指出，虽然等离子体的基本理论包括宏观描述和微观描述，但目前的实际趋势是把微观和宏观的理论愈来愈密切地结合起来。

§ 1-4 量与单位制

‘量’与‘单位制’两种术语有不同的含义，量是物理量的简称，它可用来定量地描述某物理系统的性质或状态。如球的质量是球的一种物理量，而表示质量又可采用不同的单位制（用克、公斤、磅均可），气体的温度是气体的一种热力学量，而表示温度这个量可采用不同的单位制（如用 $^{\circ}\text{C}$ 、 K 等）。

本书所采用的单位制是国际单位制（缩写SI，来源于法文“Système International d’Unités”）。国际单位制（与MKS单位制有所不同）是1971年第14届国际计量大会推荐的，在工程上应用比较合适。由于历史的原因，高斯单位制应用也非常广泛，许多物理文献资料都是用它来表述的，对于既接触工程又接触物理学科的研究工作者而言，重要的是要熟悉高斯制单位和国际制单位的变换关系。

在设计等离子炬或MHD装置时，都面临着选择单位制的问题。经典力学中基本量是质量 M 、长度 L 、时间 t ，等离子体物理中涉及电磁现象，所以引入电荷 q ，又涉及热现象，所以还要引入一个温度 T 。电磁理论中物理量单位制之间的联系通常要引入光速 C ，而库仑定律中出现真空介电常数 ϵ_0 ，安培定律中出现导磁率 μ_0 ，电动力学可以证明，真空中电磁波动方程的解中包含的光速 C 可以表示为：

$$C = \frac{C_1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (1-1)$$

式中 C_1 是变换因子，它的值取决于所选择的单位制。通常利用库仑定律定义介电常数 ϵ_0 ，由库仑定律确定真空中两点电荷 q_1 和 q_2 之间的静电力：

$$\vec{F} = \frac{q_1 q_2 \vec{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3} = C_2 \frac{q_1 q_2 \vec{r}}{r^2} \quad (1-2)$$

式中 \vec{F} 为 q_1 与 q_2 间的作用力, 单位为 N

q 为电荷, 单位为 C

r 为距离, 单位为 m

则常数 ϵ_0 为:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \times 10^9} \quad \text{C}^2 \cdot \text{S}^2 / \text{kg} \cdot \text{m}^3 \quad (1-3)$$

通常利用安培定律定义导磁率 μ_0 , 但 μ_0 不是从安培定律直接测量, 而利用下式计算:

$$\mu_0 = \frac{1}{C^2 \epsilon_0} = 4\pi \times 10^{-7} \quad \text{kg} \cdot \text{m} / \text{C}^2 \quad (1-4)$$

式中 ϵ_0 可由式(1-3)计算, 光速 C 可精确测量, 在 SI 制中已选 $C_1 = 1$, 下面简单阐明几种常用单位制的区别:

(i) 国际单位制(SI 制): 这种单位制中除长度(m)、质量(kg)、时间(s)外, 电学量的单位可选用电流(A)等, 其它电磁量可从以上四个基本单位导出。等离子体物理中, 温度单位一般采用绝对温度 K。

(ii) 高斯单位制: 高斯单位制中各种常数选为 $\epsilon_0 = 1$, $\mu_0 = 1$, $C_1 = c$ 。这样 ϵ_0 和 μ_0 在所有方程中消失, 于是静电项用静电单位, 磁量用磁单位, 表1-2给出了不同单位的常数值。

表 1-2 不 同 单 位 的 常 数

单 位 制	C	μ_0	ϵ_0	C_1
SI	3×10^8 m/s	$4\pi \times 10^{-7}$ H/m	$\frac{10^7}{4\pi\text{C}^2}$ F/m	1
高 斯	3×10^{10} cm/s	1	1	3×10^{10} cm/s
有 理	3×10^{10} cm/s	1	1	3×10^{10} cm/s

(iii) 有理制: 所谓有理单位制首先由亥维赛(Heaviside)和洛伦兹(Lorentz)建议, 由于 π 是数学上的无理数, 电磁学基本方程中带有 π 时即为无理化方程, 如果去掉 π 即为有理化方程。上面已列写出光速关系式(1-1)和库仑定律(1-2), 而麦克斯韦(Maxwell)方程应为:

$$C_3 \nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (1-5)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = C_4 \rho_e \quad (1-6)$$

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{B} = C_5 \vec{J} + C_6 \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1-7)$$

无论是 SI 制或 CGS 制, 如果上式中 $C_5 = 1$, 方程中没有 π 出现, 方程很简洁, 相当于有理化情形, 如果 $C_5 = 4\pi$, 则为无理化情形。有理化情形中单位选取时库仑常数 $C_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, 其

中 ϵ_0 选为 $\epsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi\text{C}^2} \text{ s}^2 / \text{m}^2$, 表 1-3 中列出 SI 制、高斯制和有理 CGS 制, 从表可见在高斯制

表 1-3 有 理 单 位 和 无 理 单 位

	SI	高 斯	CGS
c_1	1	3×10^{10} cm/s	3×10^{10} cm/s
c_2	$\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$	1	1
c_3	1	c	c
c_4	$\frac{1}{\epsilon_0}$	4π	1
c_5	1	$4\pi, \frac{4\pi}{c}$	1
c_6	1	$1, \frac{1}{c}$	$\frac{1}{c}$

中库仑常数 $C_2 = 1$ ，库仑定律形式简洁了，但麦克斯韦方程中 $C_3 = 4\pi$ ，即 π 未消失，所以未
有理化。关于国际制 SI 和高斯制的变换关系可参看附录 II。

第二章 等离子体的基本性质

等离子体是带电粒子的集合体，本章先讨论它的集合体的特点——集体特点。为此引入与等离子体电性质有关的两个相互联系的基本概念，即德拜 (Debye) 屏蔽和等离子体频率。此外，无规运动着的大量带电粒子呈现的集体特点会影响任意两个带电粒子间的碰撞。本章讨论的屏蔽概念还适用于讨论固壁附近的所谓鞘层区域，而鞘层的概念在低温等离子体物理中十分重要，分析等离子炬中放电与固壁的相互作用时、研讨等离子体传热以及探针理论时都离不开鞘层分析。

应该指出，在工程应用范围内，大部分问题采用经典方法来讨论等离子体就可以了，不必采用繁复得多的量子力学方法，但固态等离子体由于其温度低、密度高，应该用量子力学方法去处理。为此我们专门阐述经典条件。

在本章的最后几节，还要阐述几种重要的参数和特性，作为以后章节中所需的预备知识。

§ 2-1 电中性和德拜屏蔽

大多数气体分子由两个或两个以上原子组成。典型的是氢分子模型，结构很简单，用紫外辐射、X 射线辐射、放电、加热等办法就能使气体电离。电离是指中性气体的原子（或分子）分离成自由电子和离子，这样的气体又称作电离气体。氢原子电离后使电子和质子分离，如图 2-1 所示，成为游离状态，等离子体实际上是分离后的自由电子和离子的混合物（如果是部分电离，还应包括中性粒子）。显然，还存在着电离的逆过程——复合，例如离

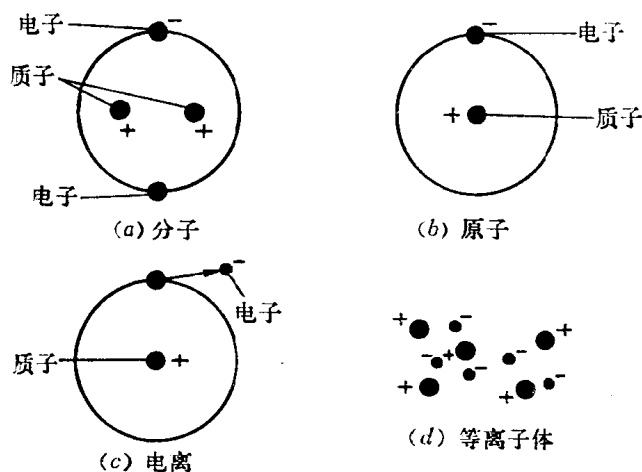


图 2-1 氢分子和原子电离成等离子体

子和电子复合成正常的原子或分子。当单位时间内复合的分子数与电离的分子数相等时，则等离子体的粒子数目达动平衡状态。

正因为等离子体是含有足够多的电荷数目近于相等的电子、离子的集合体，即 $n_e \approx n_i \approx n$ ， n 称为等离子体密度， n_e 为电子密度， n_i 为离子密度，因此，宏观上等离子体是几乎保持