



普通高等教育“十五”国家级规划教材

等离子体物理学

■ 李 定 陈银华 马锦秀 杨维纭 编著

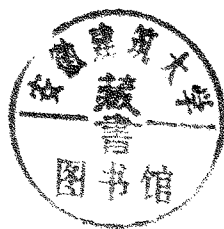


高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

普通高等教育“十五”国家级规划教材

等离子体物理学

李 定 陈银华 马锦秀 杨维纮 编著



高等教育出版社

内容简介

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材。由于等离子体在温度和密度等宏观参量上跨度非常之大,在空间和时间尺度上存在多个不同量级的标长,因此本书主要强调等离子体物理学在物理图像和数学处理上与众不同的特点。全书共分九章,包括导论、单粒子运动、磁流体力学、波动现象、平衡与稳定性、碰撞与输运、动理学理论、非线性效应和等离子体应用;一方面试图较系统地介绍等离子体物理学的基本内容及研究进展,另一方面试图较清楚地论述等离子体微观现象和宏观现象之间、快过程和慢过程之间的分野和联系。

本书适合于等离子体物理学及其相关学科的高年级大学生、研究生及科研工作者使用。

图书在版编目(CIP)数据

等离子体物理学/李定等编著. —北京:高等教育出版社,2006.5

ISBN 7-04-019478-3

I. 等... II. 李... III. 等离子体物理学 - 高等学校 - 教材 IV. O53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 037618 号

策划编辑 庞永江 责任编辑 张海雁 封面设计 王凌波 责任绘图 尹文军
版式设计 马静如 责任校对 胡晓琪 责任印制 尤 静

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	北京铭成印刷有限公司		http://www.landaco.com.cn
		畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×960 1/16	版 次	2006 年 5 月第 1 版
印 张	15.25	印 次	2006 年 5 月第 1 次印刷
字 数	280 000	定 价	24.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 19478-00

前言

1977年冬,笔者欣逢“文革”结束之后恢复高考,于次年初被中国科学技术大学录取在近代物理系等离子体物理专业,可是当时并不知晓“等离子体”为何物。当时国内只有中国科学技术大学一所高校设置了等离子体物理本科专业,可谓凤毛麟角。然而,20多年过去了,这种状况并未得到根本上的改变,等离子体物理似乎还是鲜为人知的学科,甚至很多学物理的大学生对等离子体物理也知之甚少。学科兴亡,匹夫有责,因此我们几位等离子体物理专业做理论研究的教员萌发了以有限之学识编写这本教材的愿望。

物质的三态(固态、液态和气态)人们早已司空见惯,可是被称之为物质第四态的等离子体,尽管占宇宙中可见物质的99%,却因为离我们稍远而往往被忽视。实际上,认识等离子体的运动规律是人类认识自然界,认识地球空间环境,进而冲出地球,走向太空的必要条件。等离子体物理的研究为人类实现受控热核聚变,最终解决能源问题带来希望,为人类开辟国防和高技术应用的新领域带来契机。

由于等离子体物理研究领域广泛,学科交叉广众,应用前景广阔,国外等离子体物理已经发展成为仅次于凝聚态物理的重要分支学科,从国家重大需求来看我国等离子体物理学科的发展空间还很大。在受控热核聚变研究方面,我国通过大科学工程和“863”高技术计划已经形成了较大规模的磁约束聚变和惯性约束聚变研究基地,中国还即将参加国际热核实验反应堆(ITER)计划,并酝酿实施中国自己的点火工程。在空间资源开发和利用方面,随着“神舟”系列载人飞船的发射、“双星”计划以及绕月工程等项目的实施,中国的空间探索活动日趋频繁。显而易见,加速等离子体物理基本问题的研究,加快等离子体物理人才培养,已经成为我国的当务之急。

等离子体由大量带电粒子及中性粒子所组成,其最大的特点是宏观上呈现准中性且具有集体效应。约束等离子体类似于构建和谐集体。离子和电子阴阳相济,粒子之间息息相关,构成一个整体上呈中性的集合体,尽管一旦有小扰动,就有可能产生波或不稳定性,但只要施之以电磁场,就有可能抑制或利用波和不稳定性,使得等离子体整体行为良好。

本书试图包括尽可能多的等离子体物理基本概念,采用尽可能少的数学推导,利用尽可能简单的磁场位形,争取使得内容有更大的广泛性而不局限于等离

子体物理的某些研究领域。介绍了等离子体物理中常用的三种描述方法——单粒子方法、流体方法和动理学方法,通过一些例证阐述了如何利用这三种途径来解决等离子体物理中的基本问题。一方面试图较系统地介绍等离子体物理学的基本内容及研究进展,另一方面试图较清楚地论述等离子体微观现象和宏观现象之间、快过程和慢过程之间的分野和联系。由于等离子体在温度和密度等宏观参量上跨度非常之大,在空间和时间尺度上存在多个不同量级的标长,本书强调了等离子体物理学在物理图像和数学处理上与众不同的特点。

全书分成9章,第一章、第五章以及第九章第一节由本人撰写,第二章、第七章以及第九章第二节由马锦秀撰写,第三章、第四章以及第九章第四节由杨维纮撰写,第六章、第八章以及第九章第三节由陈银华撰写。最后由本人在格式上对全书进行统稿。全书采用标准的国际单位制(SI),为方便起见有时在公式中温度的单位采用电子伏特(eV)。本书适合于等离子体物理、空间物理及其相关学科的高年级大学生、研究生及科研工作者使用。

李 定

2005年12月于中国科学技术大学

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581896/58581879

传 真：(010) 82086060

E - mail: dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)58581118

目 录

第一章 导论	1
§ 1.1 等离子体——物质第四态	1
1.1.1 什么是等离子体	1
1.1.2 如何研究等离子体	3
§ 1.2 描述等离子体的基本参量	4
1.2.1 等离子体独立参量	4
1.2.2 等离子体的几个特征参量	6
§ 1.3 德拜屏蔽效应	7
1.3.1 德拜长度	7
1.3.2 德拜势	9
1.3.3 德拜半径的物理意义	10
§ 1.4 等离子体的集体振荡	10
1.4.1 等离子体振荡	10
1.4.2 等离子体电子振荡频率	11
1.4.3 振荡频率的物理意义	12
第二章 单粒子轨道运动	14
§ 2.1 引言	14
§ 2.2 带电粒子在均匀恒定电磁场中的运动	15
2.2.1 在均匀磁场中的运动——拉莫尔回旋	15
2.2.2 在均匀磁场和电场中的电漂移运动	17
2.2.3 在任意常数力场和重力场中的漂移运动	18
§ 2.3 带电粒子在非均匀恒定电磁场中的运动	19
2.3.1 回旋中心漂移近似	19
2.3.2 带电粒子的梯度漂移	20
2.3.3 带电粒子的曲率漂移	22
2.3.4 有限拉莫尔半径效应	23
2.3.5 回旋中心沿磁场的运动	23
2.3.6 非均匀电场引起的电漂移	25
§ 2.4 带电粒子在随时间缓慢变化的均匀电磁场中的运动	27

2.4.1 带电粒子在缓慢变化的磁场中的运动	27
2.4.2 带电粒子在缓慢变化的电场中的极化漂移	28
§ 2.5 缓慢运动不变量	29
2.5.1 磁矩的不变性和磁镜效应	30
2.5.2 纵向不变量	31
2.5.3 磁通不变量	34
§ 2.6 带电粒子在高频电磁波中的运动	34
2.6.1 在弱电磁波中的颤抖运动	35
2.6.2 电子在强激光场中的相对论运动	35
2.6.3 初始条件的影响	39
2.6.4 电子加速问题	39
§ 2.7 弱非均匀恒定电磁场中回旋中心漂移运动的一般理论	40
第三章 磁流体力学	45
§ 3.1 流体力学	46
3.1.1 描写流体运动的两种方法——拉格朗日方法和欧拉方法	48
3.1.2 应力张量	52
3.1.3 基本方程	54
§ 3.2 磁流体力学方程组	57
3.2.1 电磁场方程	57
3.2.2 考虑电磁力的流体力学方程	58
3.2.3 状态方程	59
3.2.4 双成分的磁流体力学 广义欧姆定律	60
§ 3.3 磁压力与磁张力	64
§ 3.4 磁扩散与磁冻结	65
3.4.1 磁感应方程	65
3.4.2 磁扩散效应	66
3.4.3 磁冻结效应	68
§ 3.5 均匀定常磁场中的流体漂移	70
3.5.1 抗磁性漂移	70
3.5.2 玻耳兹曼关系	73
3.5.3 等离子体近似	74
§ 3.6 磁流体力学波	74
3.6.1 阿尔芬波	77
3.6.2 磁声波	77
3.6.3 阿尔芬波和磁声波的直观物理图像	79

第四章 等离子体中的波动现象	81
§ 4.1 引言	81
§ 4.2 等离子体双流体方程组	83
§ 4.3 有关波动的几个基本概念	84
4.3.1 波的表示法	84
4.3.2 群速度	86
4.3.3 波的偏振	87
4.3.4 射线轨迹方程(几何光学近似)	87
§ 4.4 非磁化等离子体中的波	90
4.4.1 朗缪尔波	90
4.4.2 离子声波	94
4.4.3 电磁波	97
§ 4.5 磁化等离子体中的静电波	99
4.5.1 高混杂静电振荡和高混杂波	100
4.5.2 静电离子波	101
§ 4.6 磁化等离子体中的高频电磁波	103
4.6.1 垂直于磁场传播的高频电磁波	104
4.6.2 平行于磁场传播的高频电磁波	107
第五章 等离子体的平衡与稳定性	111
§ 5.1 引言	111
§ 5.2 磁流体力学平衡	113
5.2.1 基本方程	113
5.2.2 磁面和磁通	114
5.2.3 一维 Grad - Shafranov 平衡方程	116
§ 5.3 双流不稳定性	118
§ 5.4 能量原理	120
§ 5.5 直线箍缩等离子体柱的不稳定性	123
5.5.1 $m \neq 0$ 内交换模	124
5.5.2 $m = 0$ 内交换模	127
§ 5.6 瑞利 - 泰勒不稳定性	129
5.6.1 重力瑞利 - 泰勒不稳定性	129
5.6.2 磁场对瑞利 - 泰勒不稳定性的影响	131
§ 5.7 撕裂模不稳定性	132
5.7.1 电阻 MHD 方程组和物理模型	133
5.7.2 边界层方法和方程组的解	136

第六章 等离子体中的碰撞与输运	140
§ 6.1 等离子体中的二体碰撞	140
6.1.1 二体碰撞	140
6.1.2 二体碰撞过程中粒子动量和动能的传递	141
6.1.3 偏转角的表达式	143
6.1.4 散射截面	145
§ 6.2 等离子体中的库仑碰撞、库仑对数	147
6.2.1 等离子体中的库仑碰撞	147
6.2.2 库仑对数	148
6.2.3 电阻率	149
§ 6.3 输运过程的经验定律	150
6.3.1 扩散过程	151
6.3.2 热传导过程	152
6.3.3 粘滞过程	152
§ 6.4 无磁场弱电离等离子体中的输运过程	153
6.4.1 迁移率与扩散系数	153
6.4.2 双极扩散	154
§ 6.5 均匀恒定磁场中弱电离等离子体的输运过程	156
§ 6.6 无磁场强电离等离子体中的输运过程	159
§ 6.7 强电离等离子体中横越磁场的输运过程	160
第七章 动理学理论简介	163
§ 7.1 弗拉索夫方程	163
7.1.1 粒子分布函数	163
7.1.2 弗拉索夫方程	166
§ 7.2 电子等离子体波及其朗道阻尼	168
7.2.1 电子等离子体波的动理学描述	168
7.2.2 弗拉索夫方法	170
7.2.3 朗道阻尼	170
§ 7.3 朗道阻尼的物理意义	173
7.3.1 朗道阻尼的物理图像	173
7.3.2 非捕获粒子的动能	175
7.3.3 初始条件的影响	177
§ 7.4 非磁化等离子体中静电波色散关系的一般形式	178
§ 7.5 等离子体色散函数	179
§ 7.6 离子声波及其朗道阻尼	181

第八章 等离子体中的非线性效应	183
§ 8.1 引言	183
§ 8.2 等离子体鞘层	184
8.2.1 等离子体鞘层	184
8.2.2 玻姆鞘层和玻姆判据	185
8.2.3 察尔德鞘层	187
§ 8.3 离子声孤立子	188
8.3.1 自然界中的孤立波	188
8.3.2 非线性离子声波的 KdV 方程	189
8.3.3 KdV 方程的孤立子解	190
§ 8.4 静电漂移波涡旋	192
8.4.1 自然界中的涡旋结构	192
8.4.2 Hasegawa - Mima 方程	193
8.4.3 静电漂移波涡旋	194
§ 8.5 有质动力	196
§ 8.6 等离子体中的参量过程	198
8.6.1 参量过程	198
8.6.2 等离子体中的参量激发过程	198
第九章 等离子体应用	202
§ 9.1 磁约束聚变	202
§ 9.2 惯性约束聚变	206
§ 9.3 空间等离子体	212
9.3.1 太阳分层结构	212
9.3.2 太阳风	213
9.3.3 磁层	216
9.3.4 磁尾	218
9.3.5 地球辐射带和电离层	219
§ 9.4 低温等离子体	222
9.4.1 气体放电	223
9.4.2 低温等离子体在国防和高技术中的应用	228
参考书目	231

导 论

§ 1.1 等离子体——物质第四态

1.1.1 什么是等离子体

大家早已熟知物质的固体、液体和气体三态. 将固体加热到熔点时, 粒子的平均动能超过晶格的结合能, 固体会变成液体; 将液体加热到沸点时, 粒子的动能会超过粒子之间的结合能, 液体会变成气体. 如果把气体进一步加热, 气体则会部分电离或完全电离, 即原子的外层电子会摆脱原子核的束缚成为自由电子, 而失去外层电子的原子变成带电的离子. 当带电粒子的比例超过一定程度时, 电离气体凸现出明显的电磁性质, 而其中正离子和负离子(电子)的数目相等, 因此被称之为等离子体(plasma), 又被称之为物质的第四态.

“plasma”一词最早在生物学名词原生质(proto plasma)中出现. 1839年, 捷克生物学家浦基尼(Purkynie)最先将“原生质”的名词引入科学词汇. 它表示一种在其内部散布许多粒子的胶状物质, 是组成细胞体的一部分, 也称为“血浆”. 1929年, 朗缪尔(Langmuir)和托克斯(Tonks)在研究气体放电时首次将“plasma”一词用于物理学领域, 用来表征所观察到的放电物质, 该词来源为古希腊语 $\pi\lambda\alpha\sigma\mu\alpha$, 即为可塑物质或浆状物质之意, 我国大陆学者将之翻译成“等离子体”, 而台湾学者翻译成“电浆”.

1. 等离子体的自然存在

根据印度天体物理学家沙哈(Saha)的计算, 宇宙中99%的可见物质都处于等离子体状态. 从炽热的恒星、灿烂的气态星云、浩瀚的星际间物质, 到多变的电离层和高速的太阳风, 都是等离子体的天下. 地球上的生物生活在另外的1%中, 人们最早见到的等离子体是火焰、闪电和极光. 但当今人类接触到越来越多的等离子体, 如荧光灯和霓虹灯里炫目的电弧、等离子体显示屏中彩色的放电、

聚变装置中燃烧的等离子体等,尽管它们大多是由人工产生的。

固、液、气三态仅仅存在于低温高密度的参数区域,而等离子体存在的参数空间非常宽广。从星际空间的稀薄等离子体到太阳核心的致密等离子体,粒子数密度 n 从 10^3 m^{-3} 到 10^{33} m^{-3} ,跨越了 30 个量级(采用国际单位制);从火焰的低温等离子体到聚变实验的高温等离子体,温度 T 从 10^{-1} eV 到 10^6 eV 跨越了 7 个量级(采用电子伏特为单位)。详情参见图 1.1。

等离子体——物质第四态

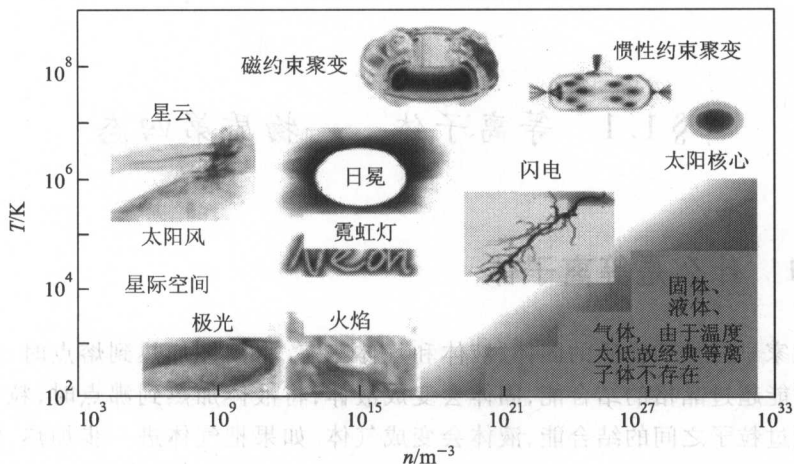


图 1.1 等离子体存在的参量空间

在地球上自然存在的等离子体之所以很少见,是因为在常温下气体的电离度非常低。所谓电离度,就是气体中被电离的粒子数目与中性粒子数目之比。在气体处于热力学平衡时,电离度 α 由沙哈方程确定:

$$\alpha = \frac{n_i}{n_i + n_n} \approx \frac{n_i}{n_n} = 2.4 \times 10^{21} \frac{T^{3/2}}{n_n} e^{-U_i/kT} \quad (1.1.1)$$

式中, n_i 和 n_n 分别为带电粒子数密度和中性粒子数密度, T 为温度, k 为玻耳兹曼常量 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), U_i 为对应气体的电离能(最外层电子逸出所需的能量)。

以氮气为例,在常温下,取 $T = 300 \text{ K}$, $n_n = 3 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$, $U_i = 14.5 \text{ eV}$,可以求得 $n_i/n_n \approx 10^{-122}$ 。由此可知,在常温下,气体电离度非常低,还不具有等离子体的性质。

2. 等离子体的基本概念

等离子体是由电子、离子等带电粒子以及中性粒子(原子、分子、微粒等)组成的,宏观上呈现准中性(quasineutrality),且具有集体效应的混合气体。

所谓准中性是指在等离子体中的正负离子数目基本相等,系统在宏观上呈现中性,但在小尺度上则呈现出电磁性,其意义将在 §1.4 中加以阐述。

而集体效应则突出地反映了等离子体与中性气体的区别。中性气体中粒子的相互作用是粒子间频繁的碰撞,两个粒子只有在碰撞的瞬间才有相互作用,除此之外没有相互作用。而等离子体中带电粒子之间的相互作用是长程库仑力作用,体系内的多个带电粒子均同时且持续地参与作用,任何带电粒子的运动状态均受到其他带电粒子(包括近处和远处)的影响。另外,带电粒子的运动可以形成局部的电荷集中,从而产生电场,带电粒子的运动也可以产生电流,从而产生磁场,这些电磁场又会影响其他带电粒子的运动。因此等离子体呈现出集体效应。

按照这个一般的定义,许多物质都可归入等离子体的范畴,例如,电解质溶液,它含有相等的正负离子,可称之为电解质等离子体;金属,由自由电子和固定不动的带正电的晶格组成,称之为固体等离子体。由电子和空穴组成的半导体,也属于固体等离子体。本课程不研究电解质等离子体和固体等离子体。

等离子体物理学的目的是描述等离子体中的基本过程,其研究内容包括等离子体的粒子运动和流体运动、等离子体的波动和加热、等离子体的平衡和稳定性、等离子体的约束和输运等等。与等离子体宽广的参数空间相对应,等离子体物理学有宽广的研究领域和广阔的应用前景。与其他学科越来越深入的交叉,不仅促进了等离子体物理学自身的迅速发展,而且已发展成为以其为核心的等离子体科学。这也是为什么要研究等离子体物理的动因。例如其主要的研究和应用领域有:高温等离子体物理与受控热核聚变、空间和天体等离子体物理、低温等离子体物理及其应用等。等离子体物理应用的具体情况将在第九章中予以介绍。

1.1.2 如何研究等离子体

如前所述,等离子体的参数空间非常宽广,而且等离子体的性质比普通流体更加复杂,如何研究等离子体确实是对科学家的一种挑战。值得庆幸的是,等离子体的基本描述方法可以适用于参数范围很大的等离子体。而且,在绝大多数情况下,等离子体是一个经典的、非相对论的体系,不需要考虑量子效应和相对论效应。

等离子体是带电粒子与电磁场相耦合的多粒子体系。通常,研究等离子体的方法有粒子描述、动理学描述和磁流体力学描述三种。

1. 粒子描述

带电粒子为等离子体的基本单元,通过考察带电粒子在电磁场中的运动和相互作用来描述等离子体的行为。采用牛顿(Newton)方程

$$\frac{m_{\alpha} d \mathbf{v}_{\alpha}}{dt} = q_{\alpha} (\mathbf{E}_{\alpha} + \mathbf{v}_{\alpha} \times \mathbf{B}_{\alpha}) \quad (\alpha = 1, 2, \dots, N) \quad (1.1.2)$$

及初始条件来计算,其中的电磁场既包括外加的电磁场,也包括由带电粒子运动产生的电磁场.如果能够计算出每个带电粒子产生的电荷和电流,则可以用麦克斯韦(Maxwell)方程组求出带电粒子的自生电磁场.这种方法原则上可以处理多粒子相互作用体系的运动,尽管要处理众多的自由度是十分困难的事情.随着高性能计算机和粒子模拟技术的发展,这种方法正变得日益重要起来.

2. 动理学描述

为了减少自由度,采用粒子分布函数来描述.而粒子分布函数可以由玻耳兹曼(Boltzmann)方程求出:

$$\frac{\partial f_{\alpha}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla f_{\alpha} + \frac{q_{\alpha}}{m_{\alpha}} (\mathbf{E}_{\alpha} + \mathbf{v}_{\alpha} \times \mathbf{B}_{\alpha}) \cdot \nabla f_{\alpha} = \sum_{\beta} C_{\alpha\beta}(f_{\alpha}, f_{\beta}) \quad (1.1.3)$$

将带电粒子的相互作用归结为近距离和远距离两种.将远距离相互作用归结为一等效外场.引入自洽场,即由等离子体运动产生的反过来又影响等离子体运动的电磁场.将近距离相互作用以方程(1.1.3)式右边的碰撞项来表示.针对不同的研究对象或研究内容,可以对碰撞项作不同的假设,形成各种有用的简化模型.

3. 磁流体力学描述

当运动的特征长度远大于带电粒子的平均自由程(比如说,离子回旋半径),特征时间远大于带电粒子的平均碰撞时间(比如说,离子回旋周期)时,等离子体可以看成磁流体.此时可以用密度、速度和温度来描述等离子体的运动,而这些宏观参量可以从动理学方程的各阶矩方程来求得.

如果离子流体和电子流体的运动需要单独刻画,则要采用双流体描述,如果不需要区别离子流体和电子流体的运动,则通常采用单流体描述.

§ 1.2 描述等离子体的基本参量

1.2.1 等离子体独立参量

描述等离子体系统的独立参量有两个,一个是等离子体的粒子数密度 n , 一个是等离子体温度 T .

1. 粒子数密度 n

等离子体的粒子数密度 n 满足等离子体的准中性条件,即

$$n_e = \sum Z_\alpha n_\alpha \quad (1.2.1)$$

其中 n_e 为等离子体中电子数密度, n_α 是 α 类离子的数密度, Z 是 α 类离子带的基本电荷数. 值得指出的是等离子体自身具有恢复和保持电中性的能力, 也就是说, 如果等离子体在某一局域由于某种原因偏离了电中性, 它将通过自身的相互作用, 很快恢复电中性, 这是等离子体的重要性质.

2. 温度 T

等离子体温度 T 只有在等离子体达到热力学平衡 (哪怕是局域平衡) 时才有意义. 处于热力学平衡的等离子体, 其速度服从麦克斯韦分布:

$$f(v) = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT} \right) \quad (1.2.2)$$

由上述平衡分布可以求得粒子的平衡动能:

$$E_k = \frac{\int \frac{1}{2}mv^2 f(v) dv}{\int f(v) dv} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT = \frac{3}{2}mv_*^2. \quad (1.2.3)$$

其中 $v_* = (kT/m)^{1/2}$ 为粒子的热速度, 一般情况下, 可以用 kT 近似地表示粒子动能, 即 $E_k \sim kT$.

3. 电子温度 T_e 和离子温度 T_i

大家知道一个多粒子系统是通过粒子间碰撞实现粒子间的能量和动量的交换, 最后达到平衡. 由于电子与离子质量相差悬殊, 同种粒子之间达到平衡要比异种粒子之间达到平衡快得多, 所以, 电子和离子在自身达到而整体还未达到平衡之前, 它们各自以自己的温度来表征. 对于实验室及空间等离子体, 通常电子温度 T_e 与离子温度 T_i 是不相等的, 只有电子与离子最终达到平衡时, 才有统一的温度.

4. 垂直温度 $T_\perp$ 与平行温度 $T_\parallel$

当等离子体处于磁场之中时, 磁场的存在将影响等离子体的性质. 众所周知, 磁场对于粒子平行于磁场方向的运动没有作用, 而对于垂直于磁场方向的运动起着一种束缚作用. 因此, 等离子体在磁场中呈现出各向异性, 粒子系统的平行速度 $v_\parallel$ 分布和垂直速度 $v_\perp$ 分布可能不一样, 相应的就有所谓的平行温度 $T_\parallel$ 和垂直温度 $T_\perp$. 粒子的分布函数写为

$$f(v) = \left(\frac{m}{2k\pi T_\parallel} \right)^{1/2} \left(\frac{m}{2k\pi T_\perp} \right) \exp \left(-\frac{mv_\parallel^2}{2kT_\parallel} - \frac{mv_\perp^2}{2kT_\perp} \right) \quad (1.2.4)$$

粒子的平行动能和垂直动能分别为

$$E_{\parallel k} = \frac{1}{2}mv_\parallel^2 = \frac{kT_\parallel}{2}, E_{\perp k} = \frac{1}{2}mv_\perp^2 = kT_\perp \quad (1.2.5)$$

5. 温度的单位

对于温度,一般采用热力学温度,以 K 为单位,但是在等离子体物理学中常常采用能量作为温度的单位,它用 kT (能量的量纲) 作为温度的量值. 因此温度的单位还有电子伏特、尔格等,而用得最多的是电子伏特,一个电子伏特相当于热力学温度的度数为

$$T = \frac{1 \text{ eV}}{k} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}} = 11\,600 \text{ K} \quad (1.2.6)$$

作为量级的估计,有时采用 $1 \text{ eV} \sim 10^4 \text{ K}$.

1.2.2 等离子体的几个特征参量

1. 粒子平均间距 d

设等离子体粒子数密度为 n , 即表示在单位体积内有 n 个粒子. 设想把此单位体积分成 n 个边长为 d 的立方块, 平均来说每个立方块中占据一个粒子. 由此, 我们可以写出粒子的平均间距, 由 $d^3 n = 1$ 可得

$$d = n^{-1/3} \quad (1.2.7)$$

2. 朗道长度 λ_L

朗道 (Landau) 长度表示等离子体中一个 α 类粒子与一个 β 类粒子在碰撞时所能接近的最小距离. 显然, 在这个距离上粒子的特征动能 kT 等于相互作用势能

$$E_p = \frac{Z_\alpha Z_\beta e^2}{4\pi\epsilon_0 \lambda_L} \quad (1.2.8)$$

这一点, 我们可以作这样的直观理解, 一个 α 粒子以相对速度由无穷远朝一个 β 粒子运动, 到达离这个 β 类粒子 λ_L 远处的时候, 全部动能转化为势能:

$$\lambda_L = \frac{Z_\alpha Z_\beta e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot kT} = 1.67 \times 10^{-5} Z_\alpha Z_\beta T^{-1} \quad (\lambda_L, T \text{ 分别以 m 和 K 为单位}) \quad (1.2.9)$$

由朗道长度可以粗略估计出库仑近碰撞 (一次碰撞发生 90° 偏转) 的截面:

$$\delta_{\alpha\beta} \approx \pi \lambda_L^2 \quad (1.2.10)$$

朗道长度与粒子平均间距之比为

$$\alpha = \frac{\lambda_L}{d} \approx 1.67 \times 10^{-5} n^{1/3} T^{-1} \quad (n \text{ 的单位为 } m^{-3}) \quad (1.2.11)$$

对于高温低密度等离子体, 有 $\alpha \ll 1$. 由普通物理学可知, 粒子碰撞的平均自由程为 $\lambda = 1/n\delta$, 其中 δ 为粒子间碰撞截面. 则对于库仑近碰撞, 我们有

$$\lambda = \frac{1}{n\delta_{\alpha\beta}} = \frac{1}{n\pi\lambda_L^2} \propto n^{-1} T^2 \quad (1.2.12)$$