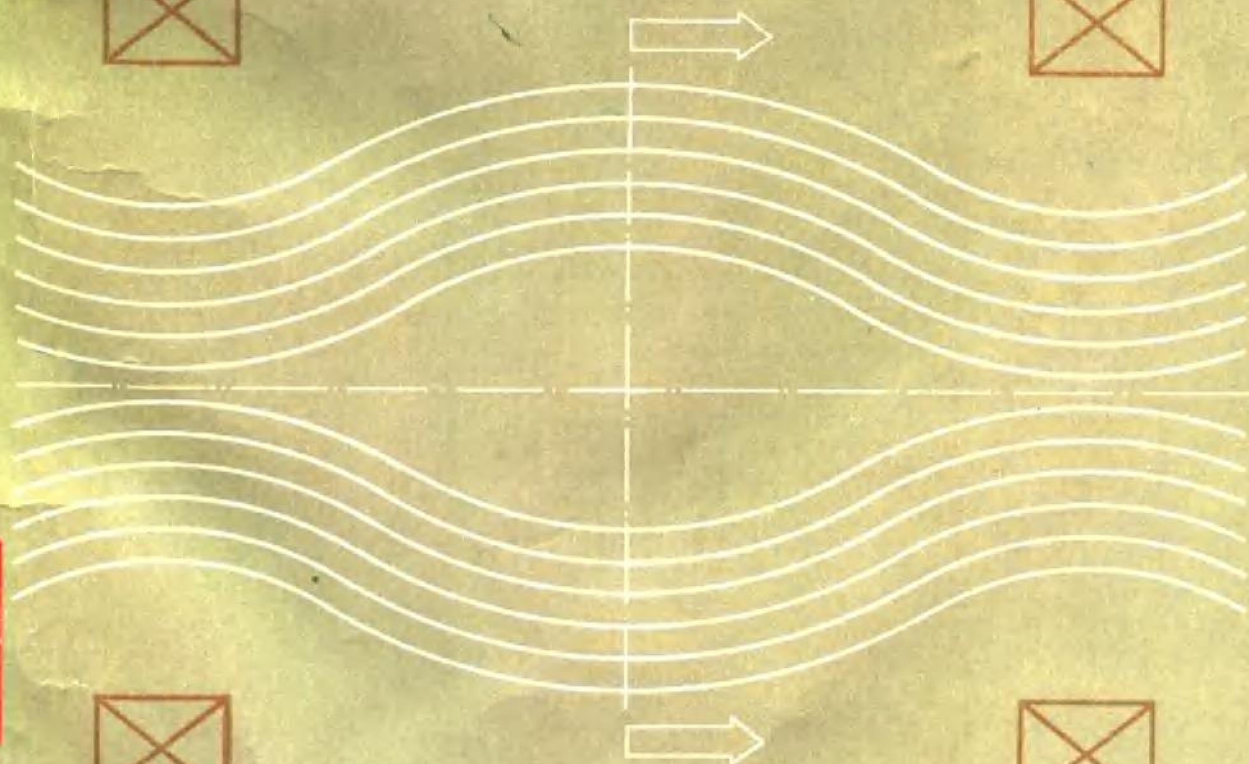


等离子体物理学原理

〔美〕 N. A. 克 拉 尔 著
A. W. 特里维尔皮斯

DENGLIZITI
WULIXUE
YUANLI

原子能出版社



等离子体物理学原理

〔美〕 N. A. 克拉尔 著
A. W. 特里维尔皮斯

郭书印 黄 林 邱孝明 译

丁厚昌 李长和 校
张光明 张瑞坤

原子能出版社

内 容 简 介

本书是物理学和天文学等方面的重要参考书。作者从宏观角度和微观角度阐明了等离子体的基本性质，而重点是微观理论，其中包括线性和非线性理论。书中还介绍了一些有关受控核聚变反应的实验装置和诊断方法。

本书可供从事磁流体力学、等离子体物理学、受控核聚变、空间物理学以及气体放电等方面的科研和教学工作者参考，可供有关研究生和高年级大学生学习、参考。

Nicholas A. Krall
Alvin W. Trivelpiece
PRINCIPLES OF PLASMA PHYSICS
McGRAW-HILL BOOK COMPANY
1973

等离子体物理学原理

[美] N.A. 克拉尔 著
A.W. 特里维尔皮斯

郭书印 黄林 邱孝明 译

李厚昌 李长和 校
张光明 张瑞坤

原子能出版社出版
(北京2108信箱)
八九九二〇部队印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/16·印张27 1/4·字数550千字

1983年12月第一版·1983年12月第一次印刷

印数1—3600·统一书号: 15175·492

定价: 3.30元

译者序

等离子体物理学是建立在许多经典物理学基础上的一门新兴的科学。二十多年来，它发展很快，在受控核聚变研究、空间研究、天文学、地球物理等各个领域里都有广泛地应用。在这些领域的科研工作者和教学工作者，对这门学科都有必要掌握一定的知识。

本书作者是美国马里兰大学克拉尔(N. A. Krall)和特里维尔皮斯(A. W. Trivelpiece)。克拉尔是等离子体物理学方面的理论工作者，特里维尔皮斯是这方面的实验工作者。他们发表的文章不少，在理论和实验方面都有不少贡献。本书内容丰富、阐述详尽、图文并茂；本书内容以基本概念和基础理论为主，侧重微观理论，兼及实验和诊断。本书适合以上各学科的研究者、教师、研究生及高年级学生选读。

译者逐译此书，限于水平，难免错误，欢迎读者指正。本书第一至三章、十章、十一章及第九章的12—15节由郭书印翻译，第四至六章由黄林翻译，第七至八章及第九章的1—11节由邱孝明翻译。

目 录

序 言

第一章 等离子体物理学导论	(3)
第一部分 等离子体概念和术语	(4)
1.1 平衡和亚平衡	(4)
1.2 德拜长度	(4)
1.3 等离子体参数	(5)
1.4 分布函数	(5)
1.5 温度和分布函数的矩	(6)
1.6 磁压强	(6)
1.7 粒子轨道	(7)
1.8 等离子体频率	(8)
1.9 等离子体中的波	(8)
1.10 朗道阻尼	(10)
1.11 等离子体的稳定性和受控热核聚变	(10)
1.12 激波和孤立波	(12)
1.13 碰撞	(13)
1.14 扩散和博姆扩散	(14)
1.15 等离子体辐射	(16)
第二部分 等离子体的产生	(18)
1.16 低气压冷阴极放电	(18)
1.17 热离子电弧放电	(19)
1.18 等离子体喷枪	(20)
1.19 碱金属蒸气等离子体——Q装置	(21)
1.20 射频产生等离子体	(22)
1.21 稠密等离子体聚焦	(24)
1.22 太阳等离子体	(25)
1.23 激光产生等离子体	(26)
第三部分 等离子体性质的测量	(26)
1.24 等离子体电流和电压的测量	(27)
1.25 等离子体探针	(29)
1.26 诊断等离子体性质的其它方法	(31)
参考文献	(33)
第二章 等离子体的平衡态热力学和统计力学	(35)
2.1 等离子体参数	(36)
2.2 吉布斯分布和相关函数	(36)
2.3 平衡态等离子体中的双粒子相关	(38)

2.4	等离子体自由能	(41)
2.5	等离子体的状态方程	(42)
2.6	等离子体的流体模型	(43)
2.7	理想等离子体	(43)
2.8	等离子体中试验粒子的电势	(44)
2.9	等离子体流体模型的其它例子	(46)
2.10	等离子体的库仑能量	(48)
2.11	讨论	(50)
	参考文献	(50)
第三章	等离子体的宏观性质	(51)
3.1	分布函数和刘维方程	(51)
3.2	等离子体的宏观变量	(54)
3.3	等离子体宏观方程; 流体方程	(55)
3.4	等离子体的双流体理论	(58)
3.5	等离子体的单流体理论: 磁流体力学	(59)
3.6	在单流体理论中常用的近似	(61)
3.7	简化的单流体方程和MHD方程	(63)
3.8	利用单流体模型和MHD模型描述的等离子体的性质	(65)
3.9	用单流体方程和等离子体的MHD理论描述的等离子体的动力学性质	(70)
3.10	双绝热理论	(79)
3.11	动力收缩	(83)
	参考文献	(86)
第四章	流体等离子体中的波	(87)
4.1	无外场($E_0=B_0=0$) 流体等离子体的介电常数	(87)
4.2	等离子体振荡	(89)
4.3	一维漂移等离子体中的等离子体振荡	(91)
4.4	温等离子体中的空间电荷波	(96)
4.5	冷等离子体中的平面波	(98)
4.6	测量等离子体性质的微波透射法	(101)
4.7	等离子体柱的共振	(103)
4.8	有界等离子体中的空间电荷波	(110)
4.9	磁化冷等离子体($E_0=0, B_0=B_0\hat{z}$) 的介电常数	(115)
4.10	在磁化的冷等离子体($E_0=0, B_0=B_0\hat{z}$) 中平行于磁场传播的波	(118)
4.11	在磁化的冷等离子体($E_0=0, B_0=B_0\hat{z}$) 中垂直于磁场传播的波	(126)
4.12	典型等离子体中波的频率	(128)
4.13	有限磁场中的有界冷等离子体的空间电荷波	(129)
4.14	非均匀等离子体中的低频漂移波	(132)
	参考文献	(137)
第五章	流体等离子体的稳定性	(138)
第一部分	等离子体的稳定性问题	(138)
5.1	平衡问题	(139)
5.2	等离子体不稳定性分类	(140)

5.3 分析稳定性的方法	(141)
5.4 稳定性区域	(141)
第二部分 无约束等离子体稳定性的宏观流体方程	(142)
5.5 空间电荷波的双束流不稳定性	(142)
5.6 阿尔文波的水龙管不稳定性	(145)
第三部分 磁约束等离子体稳定性的宏观流体方程	(146)
5.7 重力作用下磁约束流体等离子体的稳定性	(146)
5.8 磁约束流体等离子体稳定性的热力学理论; 互换不稳定性	(148)
5.9 磁约束等离子体的流体动力学稳定性的宏观方程	(152)
5.10 重力作用下磁约束流体等离子体的稳定性: 简正模分析	(156)
5.11 能量原理	(159)
5.12 等离子体-磁场交界面为一平面的系统的稳定性: 能量原理分析	(163)
5.13 自约束等离子体 (只有 B_θ) 的稳定性: 能量原理分析	(165)
5.14 磁力线“打结”的稳定作用	(166)
5.15 开端等离子体约束实验	(169)
5.16 封闭等离子体的约束实验	(173)
5.17 等离子体的其它约束实验	(176)
参考文献	(178)
第六章 等离子体中的输运现象	(179)
6.1 两体库仑碰撞	(180)
6.2 带电粒子受多次库仑碰撞的偏转	(181)
6.3 完全电离等离子体中的福克-普朗克输运理论	(184)
6.4 完全电离等离子体中的弛豫时间	(188)
6.5 完全电离等离子体的输运性质	(191)
6.6 弱电离等离子体的玻耳兹曼输运方程和洛伦兹模型	(194)
6.7 修正的玻耳兹曼方程	(197)
6.8 弱电离等离子体中的输运系数	(198)
6.9 双极扩散	(201)
6.10 均匀稳恒磁场中的弱电离等离子体的输运性质	(205)
6.11 弱电离等离子体横越磁场的双极扩散	(209)
6.12 MHD发电机	(211)
参考文献	(216)
第七章 等离子体的动力学方程	(217)
7.1 多体系统的微观方程	(217)
7.2 多体系统的统计方程	(218)
7.3 库仑等离子体的统计方程	(221)
7.4 统计方程链的封闭	(222)
7.5 零级动力学方程——伏拉索夫方程	(223)
7.6 一级动力学方程	(224)
7.7 伏拉索夫方程的性质	(224)
7.8 精确到 g 级的动力学方程的性质	(229)
参考文献	(229)

第八章 等离子体波的伏拉索夫理论	(231)
8.1 伏拉索夫方程	(231)
8.2 线性化的伏拉索夫方程	(231)
8.3 对于无外场等离子体平衡的静电扰动, 线性化伏拉索夫方程的解	(233)
8.4 $\phi_s(t)$ 的时间渐近解	(236)
8.5 等离子体中静电波的简单推导	(239)
8.6 朗缪尔波、离子声波和朗道阻尼的伏拉索夫理论 ($E_0=B_0=0$)	(241)
8.7 等离子体波的扰动分布函数	(246)
8.8 在一般等离子体平衡态的情况下波的色散关系	(248)
8.9 无外场等离子体平衡态 [$E_0=B_0=0, f_0=f_0(v^2)$] 中小振幅波(静电波和电磁波)的伏拉索夫理论	(250)
8.10 均匀磁化等离子体 [$B_0=B_0\hat{z}, E_0=0, f_{s0}=f_{s0}(v_\perp^2, v_\parallel)$] 中小振幅波的伏拉索夫理论	(253)
8.11 磁化冷等离子体中波的伏拉索夫理论	(256)
8.12 磁化热等离子体 ($E_0=0, B_0=B_0\hat{z}$) 中垂直于平衡磁场传播的波——电磁波和伯恩斯坦模	(257)
8.13 磁化热等离子体 ($E_0=0, B_0=B_0\hat{z}$) 中平行于平衡磁场传播的波——静电波和电磁波	(260)
8.14 磁化热等离子体 ($E_0=0, B_0=B_0\hat{z}$) 中与平衡磁场成任意角传播的电磁波	(263)
8.15 非均匀磁化热等离子体 [$E_0=0, B_0=B_0(x)\hat{z}, n_0=n_0(x)$] 中的波	(263)
8.16 非均匀磁化等离子体中的低频静电波	(270)
8.17 非线性的静电波 (BGK 波)	(273)
8.18 流体波与伏拉索夫波的比较	(276)
8.19 类波伏拉索夫态的总结	(278)
参考文献	(279)
第九章 等离子体稳定性的伏拉索夫理论	(280)
9.1 引言	(280)
9.2 单调下降分布函数的稳定性; 牛可柏-伽德勒定理	(282)
9.3 多峰分布的稳定性-双流不稳定性	(284)
9.4 温等离子体中多峰分布的稳定性——尾峰不稳定性	(289)
9.5 双流不稳定性的机理	(292)
9.6 尼奎斯特(Nyquist) 方法和稳定性的彭洛斯(Penrose)判据	(293)
9.7 离子声不稳定性	(300)
9.8 双流不稳定性理论的应用	(302)
9.9 各向异性等离子体中的不稳定性	(303)
9.10 电磁收缩不稳定性	(304)
9.11 收缩不稳定性的讨论	(312)
9.12 各向异性磁化等离子体的稳定性	(312)
9.13 损失锥不稳定性	(314)
9.14 其它不稳定性机理	(319)
9.15 不稳定等离子体中场的水平和增长速率的热力学限制	(320)
参考文献	(323)
第十章 等离子体波和不稳定性的非线性伏拉索夫理论	(325)
10.1 等离子体非线性理论的必要性	(325)

10.2	等离子体分布变化的准线性方程	(326)
10.3	准线性理论中粒子、动量和能量守恒	(328)
10.4	准线性理论的朗道阻尼	(330)
10.5	准线性理论中的尾峰不稳定性	(334)
10.6	双流不稳定性的准线性理论	(337)
10.7	在单个等离子体波中电子的捕获	(339)
10.8	等离子体波的回声	(342)
10.9	非线性波-粒子相互作用 (弱湍流)	(349)
	参考文献	(353)
第十一章 等离子体中的起伏、关联和辐射		(354)
11.1	运动的试验粒子的屏蔽	(354)
11.2	等离子体中的电场起伏	(359)
11.3	非麦克斯韦分布等离子体中的电场起伏	(363)
11.4	对试验粒子的阻力; 静电波的辐射	(364)
11.5	电磁起伏和辐射	(367)
11.6	等离子体密度起伏辐射的非相干散射	(368)
11.7	等离子体辐射; 柯克霍夫定律	(377)
11.8	等离子体发出的黑体辐射及其内部的黑体辐射	(378)
11.9	磁场中等离子体的回旋 (同步加速) 辐射	(379)
11.10	等离子体辐射的试验源理论	(381)
11.11	包括碰撞弛豫的等离子体动力学方程	(384)
	参考文献	(389)
	附录 I 单粒子运动	(390)
	附录 II 矢量和张量性质的摘要、某些积分定理和曲线坐标系	(407)
	附录 III 单位制、换算因子及常用符号	(417)
	附录 IV 研究生补充读物选目	(426)

序 言

这本教科书是为了给马里兰大学物理学和天文学研究生提供等离子体物理学的广博基础而写的。它可用于两学期的课程，通常用于研究生学习的第二年，这时他们已学完了例行的研究生课程，如经典力学、统计力学、电磁学以及数学方法。本书是等离子体物理学这个领域内的一本基础性入门书，作者假定读者不具备这方面的基础。虽然我们打算让它用作研究生的课本，但是适当地挑选其中的材料，它也可以用作高年级大学生的课程。

本书的基本安排是：从多体系统的严格统计描述开始，然后得出等离子体态的各种简化描述。我们首先阐述最简单的描述（称为流体理论或宏观理论），并用这种描述来探索包括平衡、波和不稳定性在内的广泛的等离子体现象和问题。宏观理论加上等离子体中的输运现象（第六章）组成第一学期的课程内容。

其次，本书引入简化程度较低的描述，即基于速度空间与位形空间中的连续分布函数的伏拉索夫(Vlasov)理论或微观理论。应用这种理论，除了研究波与等离子体分布的非线性相互作用外，又研究了等离子体平衡、波和不稳定性等问题。等离子体态的“伏拉索夫-麦克斯韦”描述可以预言那些与速度空间分布函数的细节有关的现象，例如朗道阻尼、速度空间的不稳定性、速度空间的扩散等等。我们把这些等离子体性质的伏拉索夫结果与前面几章中较简单的流体处理的结果作了比较。

相关性、涨落现象和辐射是依赖于不连续性的现象，不包括在上述两种简化描述中。试验粒子方法可用来计算这些量。等离子体的更进一步的不连续性质是从严格的统计方程的更高级简化描述得到的，这种描述导致福克(Fokker)-普朗克(Planck)方程或巴列斯库(Balescu)-林纳德(Lenard)方程以及等离子体输运系数的计算。

单个带电粒子在静态和随时间变化的电场和磁场中的轨道理论包括在附录中。这样安排是与我们的下述目的一致：我们力图使这本书完整，但也不打算用扩大正文篇幅的办法去论述那些在许多容易得到的参考文献中有过充分论述的简单论题。

本书的一个特点是有一章内容为广泛的引论，其目的在于消除“术语差距”，我们发现它们是初次接触等离子体物理学的学生的主要障碍。我们的大多数学生具备足够的数学和经典物理学方面的基础知识，但是与等离子体物理学有关的许多概念和术语还是他们所不熟悉的，这就产生了人为的困难。

引论一章可作为等离子体物理学的概念与术语方面的一个短期课程（三至四讲）。这样，对于想要得到此领域定性知识的任何人，这一章都是有用的。另一个特点是专门论述等离子体平衡统计力学的一章。这章的目的是要使学生对等离子体物理学和等离子体态有个正确的看法，即等离子体物理学处理的是一种多体问题。等离子体态代表的是一种统计系统的态。这章计算了平衡等离子体的热力学性质，并为本书的其余部分搭个架子，那些部分将处理许多等离子体不处于热力学平衡态的实际情形。

关于参考文献，我们主要挑选了一些对学生特别有价值的书和评述性文章。我们认为，真正掌握这门物理学是首要的，至于这个领域的历史状况则是次要的。

用数字计算机模拟等离子体方面的最新进展使人们对等离子体中发生的过程有了相当深入的了解。本书引入一些模拟结果，借以充实或扩充某个特殊的解析结果，或更好地了解等

离子体的性质。

每章中都有许多习题，其难度从通过常规代数处理导致熟知的结果直到解答复杂的问题，后者将帮助对研究等离子体物理学有兴趣的学生在这个形式多样而又引人入胜的领域中得到好感。

因为高斯-厘米-克-秒单位在等离子体物理学的研究文献中广泛使用，所以本书自始至终使用这种单位制。附录Ⅲ中对于电阻率、电容、电场强度等物理量列出从高斯-厘米-克-秒单位到标准的实用单位的换算表，以及最常用的符号表（例如等离子体频率、回旋频率等等）。

象本书这样内容广泛的写作计划自然包括了许多人的贡献。

我们感谢在等离子体物理学界与我们一起工作和学习过这门学科的朋友和同事。我们感谢在写作本书时在马里兰选读等离子体物理学课程的学生们。他们在改进这门课程和本书方面所给予的真诚帮助和提出的建议对我们是非常有价值的。我们尤其要感谢诺斯罗普 (Ted Northrop)、蒂德曼 (Derk Tidman) 和考夫曼 (Allan Kaufman)，他们最先建议和指点我们怎样改进和讲授研究生的等离子体物理课程。我们从他们以前讲授等离子体物理的经验中获益非浅。我们感激马里兰的同事，特别是格里姆 (Hans Grien)、戴维森 (Ron Davidson) 和皮恰瑟克 (Bob Pechacek)。我们感谢系主任拉斯特 (Howard Laster)，是他让我们集中精力讲授并改进等离子体物理课，在此基础上，这本书得以写成。我们感激戴维森、德席尔瓦 (Alan DeSilva)、哈马萨基 (Seishi Hamasaki)、海伊 (John Hey)、琼斯 (Walt Jones)、卡佩塔纳科斯 (Chris Kapetanacos)、克莱因 (Hank Klein)、利沃 (Paulett Liewer)、施瓦茨 (Marvin Schwartz)、斯佩洛 (Don Spero)、蒂德曼和查耳斯-卡波尼 (Maria Zales-Caponi)，他们仔细地阅读了本书手稿的一章或几章。我们特别感谢弗格 (Mary Ann Ferg) 夫人和罗德里格日 (Clara Rodriguez) 夫人在打印各种手稿方面的出色工作。感谢霍纳蒂 (Barbara Hornady) 夫人为本书准备了两分索引。

我们感谢我们的夫人，特里·克拉尔 (Terry Krall) 和谢利·特里维尔皮斯 (Shirley Trivelpiece)，在我们执行这项写作计划时表现出来的支持。

克拉尔 (Nicholas A. Krall)

特里维尔皮斯 (Alvin W. Trivelpiece)

第一章 等离子体物理学导论

等离子体物理学所研究的对象是由大量带电粒子集合而成的、密度又是足够低的系统。由于带电粒子数目很大，所以长程库仑力是确定其统计性质的一个重要因素；又由于密度足够低，所以一个邻近粒子所产生的力远小于许多远距离粒子所施的长程库仑力。等离子体物理学所研究的是低密度的电离气体。“等离子体”(Plasma)一词是1929年汤克斯(Tonks)和朗缪尔(Longmuir)¹⁾在研究气体放电中的振荡时，首先用来描述带电粒子集合体的。然而，等离子体态的最特殊的性质，即长程库仑力使带电粒子表现出一种集体的性质，早已为人们所知，并且在1906年瑞利(Lord Rayleigh)²⁾分析原子的汤姆逊模型中的电子振荡时，大概首次描述了这种性质。

为了描述气体放电中所产生的电离介质，1879年克鲁克斯(W. Crookes)³⁾提出了“物质第四态”这个名词，人们经常用它来描述等离子体状态。物质第四态这个术语是根据下述观点提出的：固态加热时经相变为新态，通常就是液体；如果加热液体则经相变为气体；在气体中加入更多的能量，就可以使一些原子电离，在高于100000K的温度下大部分物质处于电离状态，物质的这种电离状态称为**第四态**。假如有一种机理能使气体电离，而且气体的密度又足够低，以致复合较慢，那么等离子体状态也能在低于100000K的温度下存在。

统观宇宙，虽然99.9%的物质都处于等离子体状态，但是在地球上却很少有天然等离子体，因为地球及其附近大气的低温度和高密度阻碍了等离子体的存在。这就意味着要研究等离子体的性质，必须用实验方法来产生它们。但在上层的大气(电离层)中，存在着由稀薄大气的光致电离产生的等离子体。在离地球更远的地方，等离子体在接近真空的空间被地磁场所俘获。等离子体从太阳流向地球(太阳风)，并充满星际空间的许多区域，从而形成一种被用以观察更外层空间的介质。

等离子体物理学一般包括大家熟知的经典力学、电磁学以及非相对论统计力学。等离子体物理学的复杂性，在于等离子体的许多性质是由长程库仑力相互作用引起的，因此包含许多粒子同时相互作用的集体性质。

在最简单的形式中，等离子体是由质子和电子组成的，其密度充分地低，以致两体相互作用(短程作用)可以忽略。多体理论或多体问题就是研究这种介质的性质。当质子和电子共同处于平衡状态时，平衡状态的性质可以利用适当的吉布斯(Gibbs)统计系综的平衡态统计力学来描述。但是，人们感兴趣的绝大部分等离子体性质发生在非平衡状态中。

1952年美国为了发展受控热核聚变反应堆，制定了一个称为雪伍德方案⁴⁾的神密计划，因而从那时起再次出现了对等离子体物理学的兴趣。在差不多相同的时候，英国、法国和苏联也开始了类似的计划。从那时起，这些计划得到了充分的加强，现在许多国家在此领域里

1) L. Tonks and I. Langmuir, Oscillations in ionized Gases, *Phys. Rev.*, **33**:195 (1929).

2) Lord Rayleigh, *Phil. Mag.*, **11**:117(1906).

3) W. Crookes, *Phil. Trans.*, **1**:135(1879).

4) A. S. Bishop, "Project Sherwood", Addison-Wesley, Reading, Mass., 1958.

都有重点研究计划。虽然发展受控热核反应堆是等离子体物理中一个比较有前途的实际应用,但是这仅仅是等离子体物理学起作用的许多领域之一。等离子体物理在近代物理学的发展中起了较重要的作用,而且在研究天文物理、原子物理、化学、生命科学、分子物理、磁流体发电和大气物理等领域里的许多问题时,等离子体物理学也是重要的。

等离子体物理学有它自己的术语和一系列的概念。本章主要目的是对等离子体物理学作初步的评述,对这个领域里常见的基本概念提供一个大概图象,并说明在讨论等离子体状态时反复使用的大量术语,同时我们亦回顾了一下实验室里产生等离子体的一些装置和诊断等离子体性质的各种方法。

第一部分 等离子体概念和术语

1.1 平衡和亚平衡

在等离子体物理学中,常常是不严格地用“平衡”一词来描述准稳态的条件,这种条件仅维持到体系中粒子之间发生相互碰撞为止。对等离子体的研究经常是通过探讨处在这样的**亚平衡态**附近的小扰动来进行的。

热力学平衡是指电子和离子都可用具有同一温度参数的麦克斯韦分布来描述。在这种情况下,介质与周围环境处于平衡态,而且以同样的速率辐射和吸收能量。放出的辐射谱是属于**黑体辐射**。

在等离子体物理学中,在人们感兴趣的许多理论和实验情况下,离子和电子既不在同一温度,又不和周围环境处于热力学平衡。亚平衡一词就是用来描述最终将为双体碰撞所改变的那种状态。

1.2 德拜长度

一个电荷为 q 的孤立粒子,其静电势为

$$\phi = \frac{q}{r}. \quad (1.2.1)$$

在等离子体中,一些电子被吸引到离子的附近,将离子的静电场与等离子体的其余部分屏蔽开来。类似地,一个静止的电子会排斥其它电子而吸引离子,这种效应改变了带电粒子附近的静电势。等离子体中一个静止电荷的静电势为

$$\phi = \frac{q}{r} e^{-r/\lambda_D}, \quad (1.2.2)$$

其中 λ_D 是德拜长度,最初的定义见德拜(Debye)-赫克尔(Hückel)的电解质理论。对于电子-质子等离子体

$$\lambda_D = \left(\frac{\kappa T}{8\pi n e^2} \right)^{1/2} = 4.9 \left(\frac{T}{n} \right)^{1/2} \text{ (厘米)}, \quad (1.2.3)$$

其中 n = 电子(或离子)的密度,厘米⁻³; T = 温度, K; κ = 玻尔兹曼常数($= 1.38 \times 10^{-16}$ 尔格/K)。

德拜长度在等离子体中是一个试验电荷的作用范围的量度。一般来说,德拜长度取决于试验

1) 原文无单位。——译注

电荷相对于等离子体的速率。

1.3 等离子体参数

等离子体参数 g 表示等离子体中一个德拜球内的粒子数的倒数，定义为

$$g = \frac{1}{n\lambda_D^3}. \quad (1.3.1)$$

为了使德拜屏蔽出现和使等离子体的描述具有统计的意义，一个德拜球内的粒子数必须足够多，即 $g \ll 1$ 。而 $g \ll 1$ 这样一个假设称为**等离子体近似**。等离子体参数也是粒子之间平均势能与等离子体平均动能之比的一个量度。理想气体对应于粒子之间的零势能。在许多情况下，等离子体参数是一个小量，并且等离子体可以当作带电粒子组成的一种理想气体，即一种可以具有电荷密度和电场，而两个离散粒子之间无相互作用的气体。

要保证 $n\lambda_D^3$ 有大的值，等离子体密度必须较低，因为

$$g = \frac{1}{n\lambda_D^3} \propto \frac{n^{1/2}}{T^{3/2}}.$$

由于碰撞频率随密度 n 的下降而减小，又随温度 T 的增加而下降，所以条件 $g \rightarrow 0$ 对应于碰撞频率降低的情况。

习题 1.3.1 试证明，如果平均动能与粒子之间的平均势能之比远大于 1，即如果

$$\frac{\langle KE \rangle}{\langle PE \rangle} \gg 1,$$

那么每个德拜球内的粒子数 $n\lambda_D^3$ 也必然远大于 1。

等离子体参数 g 是与等离子体有关的较重要的无量纲参数之一，而且可以将它理解为等离子体的集体效应超过单个粒子行为的一种量度。将精确的多体方程按参数 g 的幂展开，所得到的方程可以用来描述等离子体状态。

等离子体统计力学和中性气体统计力学之间的明显差别，在于当等离子体中有许多粒子同时相互作用时，用作展开的参数 g 是个小量，因为 λ_D^3 实质上是相互作用区域的体积；对于中性气体来说，原子半径 R 是相互作用区域的一个量度，而 $nR^3 (\ll 1)$ 是用作展开的参数。虽然存在许多相互作用的粒子，但等离子体的性质仍然接近于理想气体；其理由正如在问题 1.3.1 中所表示的那样，单个粒子之间的相互作用是极弱的。

1.4 分布函数

对于等离子体的最详细地描述，就是给出等离子体中每个粒子的位置和速度与时间的函数关系。就真实的等离子体而言，除了近代计算机“实验”外，这种描述是不可能的。在计算机“实验”中可以利用数字计算机跟踪大量离子和电子的位置和速度。因此，人们习惯于利用分布函数 f 来描述等离子体。分布函数表示在六维的速度-坐标空间里单位体积中的粒子数。根据玻耳兹曼的 H 定理¹⁾我们知道，在双体碰撞的作用下，理想气体弛豫到麦克斯韦速度分布

1) S. Chapman and T. G. Cowling, "The Mathematical Theory of Non-uniform Gases," Cambridge, London, 1952.

$$\bar{n}f(v) = \bar{n} \left(\frac{m}{2\pi\kappa T} \right)^{3/2} e^{-mv^2/2\kappa T}, \quad (1.4.1)$$

其中 $\bar{n} = N/V$, N 是系统中所包含的某种粒子 (例如离子或电子) 的数目, V 是系统的体积。虽然实验室等离子体永远不可能严格地达到麦克斯韦分布, 但可以非常接近于这种分布, 而且在许多理论处理中都假设等离子体可以用麦克斯韦分布来描述, 这点是很有用的。

因为在比离子-电子弛豫时间 (一次双体碰撞过程) 小的时间标度内, 离子和电子的行为多少有些不同, 通常需要定义每类电荷 α 各自的分布函数, 因此

$$\bar{n}_\alpha f_\alpha(\mathbf{x}, \mathbf{v}) d\mathbf{x} d\mathbf{v} = \text{在 } \mathbf{x}, \mathbf{v} \text{ 附近体积元 } d\mathbf{x} d\mathbf{v} \text{ 内 } \alpha \text{ 类粒子总数,}$$

归一化后, 得

$$\int \bar{n}_\alpha f_\alpha d\mathbf{x} d\mathbf{v} = N_\alpha = \text{体系内 } \alpha \text{ 类粒子总数。}$$

1.5 温度和分布函数的矩

在麦克斯韦分布中, 决定分布函数的参数 T 是等离子体的温度,

$$\frac{3}{2} n \kappa T = \frac{1}{2} \int \bar{n} m v^2 f d\mathbf{v}. \quad (1.5.1)$$

甚至当实验等离子体不能为麦克斯韦分布所精确描述时, 习惯上也要把实验所得到的分布函数与麦克斯韦分布联系起来, 办法是将该系统看作温度为 T 的等离子体, T 按(1.5.1)式定义; 当然, 这个麦克斯韦分布应与实验数据符合得最好。如果分布函数与麦克斯韦分布无关, 那么仅仅规定温度, 系统是不能得到较好的描述的。一种完整的描述必须规定分布函数本身或规定分布函数所有的矩:

$$n_\alpha = \bar{n}_\alpha \int f_\alpha d\mathbf{v}, \quad \text{密度,} \quad (1.5.2)$$

$$\mathbf{V}_\alpha = \left(\int \mathbf{v} f_\alpha d\mathbf{v} / \int f_\alpha d\mathbf{v} \right), \quad \text{平均速度,} \quad (1.5.3)$$

$$\mathbf{P}_\alpha = \frac{n_\alpha m_\alpha \int (\mathbf{v} - \mathbf{V}_\alpha)(\mathbf{v} - \mathbf{V}_\alpha) f_\alpha d\mathbf{v}}{\int f_\alpha d\mathbf{v}}, \quad \text{压强张量.} \quad (1.5.4)$$

.....

这些矩和系统的宏观参数, 如密度、平均速度、压强等有关。注意, 对于各向同性的静止系统, 压强张量退化为一个标量:

$$\mathbf{P}_\alpha = \begin{bmatrix} p & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & p \end{bmatrix},$$

其中, $p = n_\alpha \kappa T_\alpha$ 。

1.6 磁 压 强

等离子体经常处于磁场内或为磁场所包围。在静磁场中的某一点, 在切于通量面的表面上有横向压强 $B^2/8\pi$ 达因/厘米²。等离子体的特性是抗磁的, 因此会排斥突然加到它边界上

的磁场。这意味着在磁场和等离子体之间的边界面上，磁压强 $B^2/8\pi$ 可以与等离子体的动力压强 $p=n_k T$ 相平衡。如果 $B^2/8\pi > p$ ，那么等离子体可以被压缩到较高密度和较高温度的状态。

在等离子体和磁场同时存在的情形中，一个常用的参数是等离子体压强与磁压强的定域比值，称为等离子体 β 值，即

$$\beta = \frac{n_i k T + n_e k T}{B^2/8\pi}, \quad (1.6.1)$$

不要把这里的 β 和表示相对论效应的 $\beta=v/c$ 相混淆。在平衡状态下，等离子体和磁场之间的平面界面上的压强平衡要求

$$\nabla \left(n_k T + \frac{B^2}{8\pi} \right) = 0. \quad (1.6.2)$$

习题1.6.1 在磁场强度为 100,000 高斯的大气中，磁压强有多大？如果 $\beta=1.0\%$ ，那么要约束住密度为 $n=10^{12}$ 厘米⁻³、动力学温度为 100 千电子伏的等离子体，需要多大的磁场强度？

1.7 粒子轨道

正如前面所提到的那样，人们感兴趣的大部分等离子体性质是由集体效应产生的。但是，研究单个带电粒子在磁场、电场和重力场中的运动可以得到等离子体的某些性质，这些场可能随时间变化，并且可能是不均匀的。在无碰撞的情况下，在均匀磁场中带电粒子沿螺旋轨道运动。带电粒子在垂直于磁场的方向上以回旋频率 $\omega_c = eB/mc$ 绕磁力线旋转，并且旋转半径为 $a_L = v_\perp / \omega_c$ 。这个半径称为**拉摩¹⁾半径**或**回旋半径**。粒子沿磁力线的运动不受阻碍。回旋频率的单位为每秒弧度，例如对于电子

$$\omega_c = \frac{eB}{mc} = 1.76 \times 10^7 B \text{ (高斯) 弧度/秒} . \quad (1.7.1)$$

习题1.7.1 一个电荷为 q 、质量为 m 的粒子从静止开始运动，求它在交叉的电场和磁场中的轨道。然后把运动轨道用回旋运动和漂移运动表出，并证明漂移速度为 $V_{DE} = cE/B$ 。另外试证明粒子动能的一半在漂移运动中，另一半在轨道运动中。

回旋运动是带电粒子在垂直于磁场方向的基本运动。但是，当把其它场包括进去时，就会偏离回旋运动。例如，当稳定的电场和磁场同时作用于一个带电粒子时，就会出现 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 漂移。这时，除回旋运动外，两个场的联合作用还导致垂直于电场和磁场的漂移运动，漂移速度为

$$\mathbf{V} = c \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}, \quad (1.7.2)$$

这种漂移运动与粒子的质量和电荷都无关，并且迭加在回旋运动的上面，回旋运动常比漂移运动迅速得多。把**导向中心²⁾**的轨道确定后，就能很好地描述粒子的运动了，这个导向中心

1) 为了和平常的术语一致，这个旋转半径应该称为回旋半径，但在大部分有关等离子体物理学的文献中都称为拉摩半径。

2) 对于带电粒子运动，导向中心的概念是阿尔文(H. Alfvén)在 1940 年引入的。他在磁暴和极光理论中用到了导向中心运动的概念。他的工作和有关概念已收集在他的“宏观电动力学”(Oxford, New York, 1950)一书里。由于他在等离子体物理学中的开创性工作，1970 年他获得了物理学诺贝尔奖。

定义为粒子的圆形轨道的中心。因此， V_{DE} 称为导向中心的漂移速度。

如果作用于粒子上的不是电场而是重力场，那么漂移速度就是

$$V_{DG} = \frac{mc}{q} \frac{\mathbf{g} \times \mathbf{B}}{B^2}. \quad (1.7.3)$$

在等离子体物理学中，另一重要的漂移运动是磁场梯度漂移，这是当磁场不均匀时发生的。此梯度漂移也迭加在粒子的回旋运动上。对于弱梯度 $\left(\nabla B/B < \frac{1}{a_L}\right)$ 情况，导向中心的漂移速度（同时垂直于 $\mathbf{B}$ 和 ∇B ）为

$$V_{D,grad} = \frac{\omega_{\perp} c}{q B^2} \nabla_{\perp} B, \quad (1.7.4)$$

其中 $\omega_{\perp} \left(= \frac{1}{2} m v_{\perp}^2\right)$ 是垂直于磁场 $\mathbf{B}$ 的动能。关于粒子轨道理论的细节见附录 I，其中讨论了曲率漂移和其它漂移。

1.8 等 离 子 体 频 率

由于等离子体中粒子之间有长程作用力，在某些情况下，等离子体的性质和耦合振子构成的系统相类似。等离子体状态的一个基本的特征振子频率是等离子体频率 ω_p ，可定义为

$$\omega_p = 2\pi f_p = \left(\frac{4\pi n e^2}{m}\right)^{1/2} \text{ 弧度/秒},$$

对于电子

$$f_p \approx 10^4 \sqrt{n} \text{ 赫兹}, \quad (1.8.1)$$

其中 n 是每立方厘米内的粒子数， m 是电子的质量。即使 ω_p 的单位是每秒弧度，习惯上仍称 ω_p 为等离子体频率。

等离子体频率常被用来确定等离子体中电子密度。同时，它也是一个电子或离子以热速度穿越德拜长度的距离所需时间的量度。

在双成分等离子体中，如果一群电子稍微偏离它们的平衡位置 $\mathbf{x}_0$ ，那么这群电子就会受到一种使它们返回到原来位置 $\mathbf{x}_0$ 的恢复力的作用。当达到平衡位置时，它们将获得和初始位移的势能相等的动能，并将继续通过平衡位置 $\mathbf{x}_0$ 向前运动，直到全部动能重新转变为势能为止。这种简单的周期性简谐运动的频率就是等离子体频率 ω_p 。这种现象称为 **等离子体振荡**。

1.9 等 离 子 体 中 的 波

具有与等离子体相同数目自由度的由耦合振子所构成的系统，有着大量的可能的振荡形式，波状扰动，即电场 $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t)]$ 将在等离子体中传播。频率 ω 和波数 k 之间的关系满足从等离子体方程得到的色散关系。有关传播波的色散特性 $\omega(k)$ 的知识，无疑是了解等离子体状态所必须的。波的相速度是 $v_p = \omega/k$ ，群速度是 $v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k}$ 。