



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中外物理学精品书系

前沿系列 · 37

等离子体物理基础

王晓钢 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中外物理学精品书系

前沿系列 · 37

等离子体物理基础

王晓钢 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

等离子体物理基础/王晓钢编著. —北京: 北京
大学出版社, 2014. 12
(中外物理学精品书系)
ISBN 978-7-301-25139-3

I. 等… II. ①王… III. ②等离子体物理学 IV.
①053

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 272072 号

书 名: 等离子体物理基础

著作责任者: 王晓钢 编著

责任编辑: 王华

标准书号: ISBN 978-7-301-25139-3/O · 1023

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn>

新浪微博: @北京大学出版社

电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62765014
出版部 62754962

印 刷 者: 北京中科印刷有限公司

经 销 者: 新华书店

730 毫米 × 980 毫米 16 开本 15 印张 286 千字

2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

“中外物理学精品书系” 编委会

主任：王恩哥

副主任：夏建白

编委：（按姓氏笔画排序，标*号者为执行编委）

王力军	王孝群	王 牧	王鼎盛	石 兢
田光善	冯世平	邢定钰	朱邦芬	朱 星
向 涛	刘 川*	许宁生	许京军	张 酣*
张富春	陈志坚*	林海青	欧阳钟灿	周月梅*
郑春开*	赵光达	聂玉昕	徐仁新*	郭 卫*
资 剑	龚旗煌	崔 田	阎守胜	谢心澄
解士杰	解思深	潘建伟		

秘 书：陈小红

序 言

物理学是研究物质、能量以及它们之间相互作用的科学。她不仅是化学、生命、材料、信息、能源和环境等相关学科的基础，同时还是许多新兴学科和交叉学科的前沿。在科技发展日新月异和国际竞争日趋激烈的今天，物理学不仅囿于基础科学和技术应用研究的范畴，而且在社会发展与人类进步的历史进程中发挥着越来越关键的作用。

我们欣喜地看到，改革开放三十多年来，随着中国政治、经济、教育、文化等领域各项事业的持续稳定发展，我国物理学取得了跨越式的进步，做出了很多为世界瞩目的研究成果。今日的中国物理正在经历一个历史上少有的黄金时代。

在我国物理学科快速发展的背景下，近年来物理学相关书籍也呈现百花开放的良好态势，在知识传承、学术交流、人才培养等方面发挥着无可替代的作用。从另一方面看，尽管国内各出版社相继推出了一些质量很高的物理教材和图书，但系统总结物理学各门类知识和发展，深入浅出地介绍其与现代科学技术之间的渊源，并针对不同层次的读者提供有价值的教材和研究参考，仍是我国科学传播与出版界面临的一个极富挑战性的课题。

为有力推动我国物理学研究、加快相关学科的建设与发展，特别是展现近年来中国物理学者的研究水平和成果，北京大学出版社在国家出版基金的支持下推出了“中外物理学精品书系”，试图对以上难题进行大胆的尝试和探索。该书系编委会集结了数十位来自内地和香港顶尖高校及科研院所的知名专家学者。他们都是目前该领域十分活跃的专家，确保了整套丛书的权威性和前瞻性。

这套书系内容丰富，涵盖面广，可读性强，其中既有对我国传统物理学发展的梳理和总结，也有对正在蓬勃发展的物理学前沿的全面展示；既引进和介绍了世界物理学研究的发展动态，也面向国际主流领域传播中国物理的优秀专著。可以说，“中外物理学精品书系”力图完整呈现近现代世界和中国物理科学发展的全貌，是一部目前国内为数不多的兼具学术价值和阅读乐趣的经典物

理丛书。

“中外物理学精品书系”另一个突出特点是，在把西方物理的精华要义“请进来”的同时，也将我国近现代物理的优秀成果“送出去”。物理学科在世界范围内的重要性不言而喻，引进和翻译世界物理的经典著作和前沿动态，可以满足当前国内物理教学和科研工作的迫切需求。另一方面，改革开放几十年来，我国的物理学研究取得了长足发展，一大批具有较高学术价值的著作相继问世。这套丛书首次将一些中国物理学者的优秀论著以英文版的形式直接推向国际相关研究的主流领域，使世界对中国物理学的过去和现状有更多的深入了解，不仅充分展示出中国物理学研究和积累的“硬实力”，也向世界主动传播我国科技文化领域不断创新的“软实力”，对全面提升中国科学、教育和文化领域的国际形象起到重要的促进作用。

值得一提的是，“中外物理学精品书系”还对中国近现代物理学科的经典著作进行了全面收录。20世纪以来，中国物理界诞生了很多经典作品，但当时大都分散出版，如今很多代表性的作品已经淹没在浩瀚的图书海洋中，读者们对这些论著也都是“只闻其声，未见其真”。该书系的编者们在这方面下了很大工夫，对中国物理学科不同时期、不同分支的经典著作进行了系统的整理和收录。这项工作具有非常重要的学术意义和社会价值，不仅可以很好地保护和传承我国物理学的经典文献，充分发挥其应有的传世育人的作用，更能使广大物理学人和青年学子亲身体会我国物理学研究的发展脉络和优良传统，真正领悟到老一辈科学家严谨求实、追求卓越、博大精深的治学之美。

温家宝总理在2006年中国科学技术大会上指出，“加强基础研究是提升国家创新能力、积累智力资本的重要途径，是我国跻身世界科技强国的必要条件”。中国的发展在于创新，而基础研究正是一切创新的根本和源泉。我相信，这套“中外物理学精品书系”的出版，不仅可以使所有热爱和研究物理学的人们从中获取思维的启迪、智力的挑战和阅读的乐趣，也将进一步推动其他相关基础科学更好更快地发展，为我国今后的科技创新和社会进步做出应有的贡献。

“中外物理学精品书系”编委会 主任
中国科学院院士，北京大学教授

王恩哥

2010年5月于燕园

内 容 简 介

在本书的第一部分，主要介绍等离子体的流体理论，主要包括：双流模型、电子磁流体模型、霍尔磁流体模型，以及理想磁流体模型，等离子体中波的磁流体及双流理论，磁约束等离子体的平衡与稳定性问题等；第二部分介绍等离子体的动理学描述，主要包括带电粒子的动力学，等离子体统计描述、伏拉索夫方程、朗道阻尼等，以及等离子体中静电波与电磁波的伏拉索夫理论；最后讨论等离子体物理的非线性理论基础。

引 言

等离子体科学技术是很多国家大科学工程及高技术产业的基础知识和重要手段，特别是在未来能源、空间开发和高新技术等方面有着重要的应用。

等离子体物理是聚变能源研究的基础领域，空间等离子体研究是空间科学的前沿，等离子体推进技术是新一代卫星平台的主要动力支撑，材料的等离子体处理与加工是先进材料和电脑芯片生产的不可缺少的手段，在各种特殊条件下等离子体与电磁波的相互作用研究在国防、通信、纳米光学等领域都有着重要的应用，是“等离子体材料”科学开始崭露头角的重要方面。

进入 21 世纪，中国的科学研究和技术进步随着国家的富强，正在经历一个飞速的发展。等离子体科学技术就显得格外重要。相比发达国家，中国的等离子体科学技术的科学研究和人才培养都处于一种落后的状态。正因为如此，这是一个年轻人大有可为的广阔天地。

等离子体是包含有大量非束缚态带电粒子的物质状态，通常人们称之为与物质的固态、液态、气态并列的物质的第四态，但是这个提法是值得探讨的。

首先，其他的几种物质的状态是可以在科学上严格定义的，而等离子体则没有这样的严格定义。我们知道，物质的状态可以由其“状态方程” $p = p(n, T)$ 来描述。这里 p 、 n 、 T 分别是该物质的压强、粒子(分子或原子)数密度、温度。这个状态方程可以一般地写作

$$p = p(n, T) = nT[1 + g(T)]。$$

我们这里取适当的温度单位以略去玻尔兹曼 (Boltzmann) 常数 k_B (下同)。对于理想气体 (perfect gas), $g(T) = 0$, 状态方程为 $p = p(n, T) = nT$ 。如果 $g(T) \ll 1$, 但是不等于零, 我们得到的是非理想气体 (imperfect gas)。如果 $g(T) \sim O(1)$, 我们得到的是液体。如果继续升高压强 (或者降低温度) 使得 $g(T) \gg 1$, 达到了液态—固态相变的临界点, 我们会得到 (各向同性) 的固体。当然, 到了固体的状态之后, 压强就被各向异性的应力张量所取代, 而对等离子体这种“物质状态”来说, 其状态方程中 $g(T)$ 可以从零一直变化到几百甚至更高 (如等离子体晶体的状态方程)。早年的等离子体物理研究的对象基本上是“电离气体” (ionized gases); 而近年来发展的“强耦合等离子体” (strongly coupled plasmas) 研究, 却主要以呈液态, 甚至固态——如等离子体晶体 (plasma crystals)——的等离子体性质为对象。且真正的固体如金属, 其很多重要的物

理性质也可以用等离子体的图像来描述，比如金属的等离子体频率等。即使就同一等离子体系统而言，也同样可以经历气态、液态、固态这样不同的状态，如 20 世纪 90 年代以来被大量研究的所谓“复杂等离子体”(complex plasmas)。此外，“等离子体”这一中文物理名词是基于“准电中性”(quasineutrality)提出来的。但是近年来的等离子体物理研究对象又有所谓“非中性等离子体”(nonneutral plasmas)，甚至“单分量等离子体”(one component plasmas, OcPs)即只有一种电荷成分的“等离子体”。

子曰：“名不正，则言不顺；言不顺，则事不成”。不得不承认，到目前为止，我们对“等离子体”(或者说 plasmas)这类物质还没有一个科学意义上的比较严格的定义(“名不正”)。这无疑反映了这门学科的不成熟——描述等离子体的理论，目前还处在发展的阶段，显得杂乱无章(“言不顺”)。物理学理论的特点，应该是简单、明了、完整。比如一个最小作用量原理就可以涵盖物理学的基础；一个各态历经假设，就可以搭起平衡态统计力学的架构。而等离子体物理理论缺少这样一个高屋建瓴的框架，所以等离子体物理的理论研究，应该首先从给“等离子体”这个被研究对象一个比较好的定义出发。

现代等离子体科学技术的发展使得等离子体物理研究的领域不断扩展，“等离子体”的定义应该涵盖这些新领域。基于这样的出发点，我们可以将“等离子体”定义为：包含足够数量的非束缚态电荷的多粒子体系。不说“带电粒子组成的”，以涵盖“弱电离等离子体”；不具体说明电荷的种类或者“准中性”，以涵盖“单分量”以及“复杂”等离子体；“足够数量”，以保证“等离子体条件”的成立。(当然更一般地应该用“基本相互作用荷”代替“电荷”以包括“夸克-胶子等离子体”，不过我们这门课程不讨论这种等离子体。)

可以看出，等离子体主要有两条性质：带电性与多体性。前者的主要特征是长程相互作用，后者的主要特征是多自由度。两者的结合，导致等离子体中运动模式的集体效应和多时空尺度的性质。研究这样的体系的方法，一种是连续介质的图像——将其作为“连续电磁介质”来研究；一种是统计力学的图像——将其作为“电磁环境下的多带电粒子体系”来研究。本书就是从这两个方面来讲述等离子体物理的理论。

书中的第一部分(第 1~5 章)，我们介绍等离子体的流体描述；紧接着我们介绍等离子体的动理学描述(第 6~8 章)，然后我们讨论非均匀等离子体中的波的性质(第 9 章)；而书的最后部分是(第 10~14 章)等离子体非线性描述导论。

目 录

等离子体的流体描述

第 1 章 等离子体的流体理论模型	(3)
1.1 等离子体的双流模型	(3)
1.2 理想磁流体(ideal MHD)方程组	(11)
1.3 位力定理与变分原理	(15)
附录	(18)
第 2 章 理想磁流体平衡	(21)
2.1 磁场位形与磁面	(21)
2.2 Z -箍缩, θ -箍缩	(27)
2.3 一维平衡, 螺旋箍缩	(31)
2.4 Grad - Shafranov 方程	(33)
第 3 章 理想磁流体稳定性	(38)
3.1 能量原理	(38)
3.2 扭曲模与交换模	(46)
3.3 直柱托卡马克的一维稳定性	(53)
第 4 章 磁流体波	(61)
4.1 线性磁流体波方程	(61)
4.2 非磁化等离子体中的磁流体波	(63)
4.3 磁化等离子体中的磁流体波	(64)
4.4 空间等离子体中的磁流体波	(68)
附录	(70)
第 5 章 均匀等离子体中的波(双流模型)	(74)
5.1 双流模型	(74)

5.2	静电波简介	(75)
5.3	介电张量与色散关系	(81)
5.4	电磁波的偏振性质	(87)
5.5	电磁波概述	(92)
	附录	(100)

等离子体的动理学描述

第 6 章	带电粒子的动力学	(105)
6.1	均匀电磁场中带电粒子的导向中心运动	(106)
6.2	带电粒子运动的拉格朗日量	(106)
6.3	导向中心运动的正则动力学	(107)
第 7 章	等离子体的动理学描述	(109)
7.1	Vlasov 方程组	(109)
7.2	色散关系 等离子体色散函数	(111)
7.3	静电波与 Landau 阻尼	(113)
7.4	Landau 阻尼的物理图像	(118)
7.5	Landau 阻尼本征解	(121)
第 8 章	均匀等离子体中的波(动理学理论)	(126)
8.1	导向中心坐标系下静电波的色散关系	(126)
8.2	均匀磁化等离子体中的静电波	(133)
8.3	电磁波的动理学色散关系	(137)
8.4	平行磁场传播的电磁波	(140)
8.5	垂直磁场传播的电磁波 电磁与准电磁模	(144)
8.6	垂直磁场传播的电磁波 准静电模	(148)
	附录	(152)
第 9 章	非均匀等离子体中的波	(154)
9.1	多尺度分析	(154)
9.2	几何光学近似光线方程	(159)
9.3	截止与共振	(163)
9.4	线性模式转换	(169)

9.5 漂移波	(172)
---------------	---------

等离子体的非线性描述(导论)

第 10 章 带电粒子的非线性动力学	(181)
10.1 带电粒子在电磁场中的拉格朗日量	(181)
10.2 非均匀磁场中“导向中心”的运动	(182)
10.3 相空间“粒子捕获” 波 - 粒子共振	(184)
10.4 相空间“分界线”、不稳定性、混沌	(185)
第 11 章 波与粒子的相互作用	(188)
11.1 准线性近似	(188)
11.2 准线性理论的能量守恒	(191)
11.3 粒子分布的渐近“展平”	(192)
11.4 粒子对波的散射	(195)
第 12 章 非线性波	(199)
12.1 非线性波捕获: BGK 模	(199)
12.2 非线性波方程与孤立子解	(200)
12.3 调制不稳定性	(207)
第 13 章 Hasegawa - Mima 方程	(209)
13.1 Hasegawa - Mima 方程的推导	(209)
13.2 Hasegawa - Mima 方程的重要性质	(211)
13.3 Hasegawa - Mima 湍流谱	(212)
第 14 章 等离子体湍流理论简述	(215)
14.1 引言	(215)
14.2 弱湍流理论的准线性近似	(216)
14.3 非线性弱湍流理论简述	(222)

等离子体的流体描述

第 1 章 等离子体的流体理论模型

我们知道，自然界中的等离子体都是大量非束缚态带电粒子（常常也包括中性粒子成分）组成的多粒子系统。日地空间等离子体的特征密度大约在 1 cm^{-3} 或者更高一点的范围内，在用典型的空间尺度（比如地球半径）度量的体积内，大约有 10^{26} 个或更多的带电粒子；而实验室等离子体的特征密度大约在 $10^8 \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 的范围内，所以在典型的尺度（立方米）下可以有 $10^{14} \sim 10^{22}$ 个或更多的粒子。对于这样大量粒子组成的体系，即使是用最快的超级计算机追踪几十亿、上百亿个（ $10^9 \sim 10^{11}$ ）粒子的运动，也只是其中微不足道的一部分。因此，我们一般使用“连续”的模型来描述等离子体，即把等离子体或者作为在真实空间的连续介质，或者作为相空间连续“流动”的介质。前者就是所谓等离子体的流体描述，而后者则是等离子体的动理学描述。

当然，利用“巨粒子”模型（比如一个“巨粒子”代表 10^n 个粒子， $n \gg 1$ ），并做一定的近似（比如回旋动理学近似），我们可以对等离子体进行粒子模拟。即使如此，这种模拟也是“平均场”意义上的，即利用了 PIC (particle in cell) 方法。我们将这种处理方法放在专题课程中讲授，在本讲义里不详述。

1.1 等离子体的双流模型

等离子体是包含大量非束缚态带电粒子的多粒子体系，一般意义上的等离子体（即所谓 conventional plasmas）主要由带正电的离子和带负电的电子组成。由于这些带电粒子之间的长程库仑（Coulomb）相互作用，等离子体呈整体电中性，即总的正电荷与负电荷相等。因此，除特殊的非中性或者复杂等离子体（一般是强耦合的）之外，我们可以用带负电的电子流体和带正电的离子流体组成的“双流模型”（two-fluid model）来描述等离子体的宏观行为，即使是多种电荷成分组成的等离子体，如包括一般来说带负电的尘埃颗粒的复杂等离子体，或者有多种离子成分的等离子体，我们也可以很容易推广这种“双流模型”模型到所谓“多流体”模型（multi-fluid model）。

1.1.1 等离子体过程的时空尺度

研究物理问题时首要的出发点是对时空尺度的考虑，即：找到我们所研究

问题的特征时空尺度，确定在这个时空尺度范围内适用的理论模型。经典的宏观(大空间尺度)、低速(慢时间尺度)下的牛顿力学与相对论(快时间尺度)、量子力学(小空间尺度)的适用范围就是最典型例子。

在等离子体中存在着很多的运动模式，我们无法、也没有必要同时考虑所有这些运动模式。那么哪一种(或者几种)运动模式是主导的、起着决定作用的？要回答这个问题，就要进行时空尺度分析：我们关心的是，哪个时空尺度下的物理问题？在这个时空尺度下存在哪几种主要运动模式？所以，对于等离子体这样的存在大量运动模式的体系来说，时空尺度分析尤其重要。

等离子体的流体理论从本质上来说是一种与流体力学相类似的连续介质的理论，主要考虑的是宏观的大尺度问题：其特征长度 L_H (或写成 L_0) 一般可以看成是所研究的等离子体区域的大小，比如柱形等离子体的横截面的半径；或者等离子体宏观物理量(如密度、温度、场强等)发生显著变化的尺度，比如地球磁尾电流片的厚度等。如果等离子体的特征宏观物理量用 $f(x)$ 表示，则这个尺度可一般地表示为 $L_H \sim \int dx / df$ 。而特征时间尺度 τ_H (或者特征频率 $\omega_H \sim 1/\tau_H$) 则可以用一个特征信号穿越这一尺度的时间来表征，即特征尺度 L_H 与特征信号在等离子体这一介质中传播的速度 V_H 之比， $\tau_H = L_H / V_H$ 。在一般流体力学理论里，这个特征信号的传播速度显然是流体中的声速 $c_s = (\gamma p / \rho_m)^{1/2}$ ，这里 γ 是比热系数， p 是流体压强， ρ_m 是流体质量密度。但是在等离子体的流体理论中，如果我们主要关心离子的运动(或者等离子体流体元的运动)，那么信号传播的特征速度是离子声速(在非磁化等离子体中)或 Alfvén 速度(在磁化等离子体中)，对应的特征时间是离子运动的特征频率(如 Alfvén 频率、“离子等离子体频率”、离子回旋频率等)决定的时间尺度。而对于电子的响应来说，这一特征频率可以高到电子的等离子体频率或者回旋频率(取决于我们研究的具体问题)。

一般来说，等离子体的流体近似是由空间尺度的特性来表征：适用于带电粒子的回旋半径远远小于等离子体的特征空间尺度的物理问题(尽管在一些特殊的模型处理中，所研究的特征尺度可以接近甚至达到带电粒子的回旋半径)。

当然，如果所研究的等离子体可以看成是一个驱动(driven)系统，那么其特征时间尺度应该由驱动频率给出。

1.1.2 等离子体的“双流体”模型

基于流体力学的图像及其近似，或者直接从统计物理的速度空间分布函数及其满足的方程(如 Vlasov 方程)出发，我们可以得到等离子体的“双流体”方程组。