

“十三五” 国家重点出版物出版规划项目

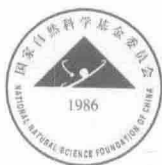
21世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书

等离子体 物理学基础

陈 耀 编著

Elementary Plasma Physics

科学出版社



国家自然科学基金
理论物理专款资助

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
21世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书

等离子体物理学基础

Elementary Plasma Physics

陈耀 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书结合太阳和空间物理学研究前沿和进展,用平实易懂的语言讲述等离子体物理基础知识,包括等离子体物理基本概念、给定外场中带电粒子的回旋运动和导心漂移、磁流体力学有关概念与过程、二元流体描述下的等离子体波动现象、等离子体不稳定性、等离子体动理论初步等。

本书主要结合太阳和空间物理学领域的研究需求而撰写,特别适合该领域的本科生、研究生与科研人员参考使用;此外,天文与天体物理学、实验室等离子体物理学等相关领域的人员也可从本书中获取所需要的等离子体物理基础知识,了解太阳和空间物理学有关研究课题和内容。

图书在版编目(CIP)数据

等离子体物理学基础/陈耀编著. —北京:科学出版社,2019.6

(21世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-061388-2

I. ①等… II. ①陈… III. ①等离子体物理学 IV. ①O53

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第104941号

责任编辑:周 涵 郭学雯/责任校对:杨 然

责任印制:吴兆东/封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年6月第一版 开本:720×1000 B5

2019年6月第一次印刷 印张:12 3/4

字数:258 000

定价:128.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《21世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书》

出版前言

物理学是研究物质及其运动规律的基础科学。其研究内容可以概括为两个方面：第一，在更高的能量标度和更小的时空尺度上，探索物质世界的深层次结构及其相互作用规律；第二，面对由大量个体组元构成的复杂体系，探索超越个体特性“演生”出来的有序和合作现象。这两个方面代表了两种基本的科学观——还原论 (reductionism) 和演生论 (emergence)。前者把物质性质归结为其微观组元间的相互作用，旨在建立从微观出发的终极统一理论，是一代又一代物理学家的科学梦想；后者强调多体系统的整体有序和合作效应，把不同层次“演生”出来的规律当成自然界的基本规律加以探索。它涉及从固体系统到生命软凝聚态等各种多体系统，直接联系关乎日常生活的实际应用。

现代物理学通常从理论和实验两个角度探索以上的重大科学问题。利用科学实验方法，通过对自然界的主动观测，辅以理论模型或哲学上思考，先提出初步的科学理论假设，然后借助进一步的实验对此进行判定性检验。最后，据此用严格的数学语言精确、定量表达一般的科学规律，并由此预言更多新的、可以被实验再检验的物理效应。当现有的理论无法解释一批新的实验发现时，物理学就要面临前所未有的挑战，有可能产生重大突破，诞生新理论。新的理论在解释已有实验结果的同时，还将给出更一般的理论预言，引发新的实验研究。物理学研究这些内禀特征，决定了理论物理学作为一门独立学科存在的必要性以及在当代自然科学中的核心地位。

理论物理学立足于科学实验和观察，借助数学工具、逻辑推理和观念思辨，研究物质的时空存在形式及其相互作用规律，从中概括和归纳出具有普遍意义的基本理论。由此不仅可以描述和解释自然界已知的各种物理现象，而且还能够预言此前未知的物理效应。需要指出，理论物理学通过当代数学语言和思想框架，使得物理定律得到更为准确的描述。沿循这个规律，作为理论物理学最基础的部分，20世纪初诞生的相对论和量子力学今天业已成为当代自然科学的两大支柱，奠定了理论物理学在现代科学中的核心地位。统计物理学基于概率统计和随机性的思想处理多粒子体系的运动，是二者的必要补充。量子规范场论从对称性的角度描述微观粒子的基本相互作用，为自然界四种基本相互作用的统一提供坚实的基础。

关于理论物理的重要作用和学科发展趋势，我们分六点简述。

1. 理论物理研究纵深且广泛，其理论立足于全部实验的总和之上。由于物质结构是分层次的，每个层次上都有自己的基本规律，不同层次上的规律又是互相联系的。物质层次结构及其运动规律的基础性、多样性和复杂性不仅为理论物理学提供了丰富的研究对象，而且对理论物理学家提出巨大的智力挑战，激发出人类探索自然的强大动力。因此，理论物理这种高度概括的综合性研究，具有显著的多学科交叉与知识原创的特点。在理论物理中，有的学科（诸如粒子物理、凝聚态物理等）与实验研究关系十分密切，但还有一些更加基础的领域（如统计物理、引力理论和量子基础理论），它们一时并不直接涉及实验。虽然物理学本身是一门实验科学，但物理理论是立足于长时间全部实验总和之上，而不是只针对个别实验。虽然理论正确与否必须落实到实验检验上，但在物理学发展过程中，有的阶段性理论研究和纯理论探索性研究，开始不必过分强调具体的实验检验。其实，产生重大科学突破甚至科学革命的广义相对论、规范场论和玻色-爱因斯坦凝聚就是这方面的典型例证，它们从纯理论出发，实验验证却等待了几十年，甚至近百年。近百年前爱因斯坦广义相对论预言了一种以光速传播的时空波动——引力波。直到 2016 年 2 月，美国科学家才宣布人类首次直接探测到引力波。引力波的预言是理论物理发展的里程碑，它的观察发现将开创一个崭新的引力波天文学研究领域，更深刻地揭示宇宙奥秘。

2. 面对当代实验科学日趋复杂的技术挑战和巨大经费需求，理论物理对物理学的引领作用必不可少。第二次世界大战后，基于大型加速器的粒子物理学开创了大科学工程的新时代，也使得物理学发展面临经费需求的巨大挑战。因此，伴随着实验和理论对物理学发展发挥的作用有了明显的差异变化，理论物理高屋建瓴的指导作用日趋重要。在高能物理领域，轻子和夸克只能有三代是纯理论的结果，顶夸克和最近在大型强子对撞机（LHC）发现的 Higgs 粒子首先来自理论预言。当今高能物理实验基本上都是在理论指导下设计进行的，没有理论上的动机和指导，高能物理实验如同大海捞针，无从下手。可以说，每一个大型粒子对撞机和其他大型实验装置，都与一个具体理论密切相关。天体宇宙学的观测更是如此。天文观测只会给出一些初步的宇宙信息，但其物理解释必依赖于具体的理论模型。宇宙的演化只有一次，其初态和末态迄今都是未知的。宇宙学的研究不能像通常的物理实验那样，不可能为获得其演化的信息任意调整其初末态。因此，仅仅基于观测，不可能构造完全合理的宇宙模型。要对宇宙的演化有真正的了解，建立自洽的宇宙学模型和理论，就必须立足于粒子物理和广义相对论等物理理论。

3. 理论物理学本质上是一门交叉综合科学。大家知道，量子力学作为 20 世纪的奠基性科学理论之一，是人们理解微观世界运动规律的现代物理基础。它的建立，带来了以激光、半导体和核能为代表的新技术革命，深刻地影响了人类的物质、精神生活，已成为社会经济发展的原动力之一。然而，量子力学基础却存在诸

多的争议，哥本哈根学派对量子力学的“标准”诠释遭遇诸多挑战。不过这些学术争论不仅促进了量子理论自身发展，而且促使量子力学走向交叉科学领域，使得量子物理从观测解释阶段进入自主调控的新时代，从此量子世界从自在之物变成为我之物。近二十年来，理论物理学在综合交叉方面的重要进展是量子物理与信息计算科学的交叉，由此形成了以量子计算、量子通信和量子精密测量为主体的量子信息科学。它充分利用量子力学基本原理，基于独特的量子相干进行计算、编码、信息传输和精密测量，探索突破芯片极限、保证信息安全的新概念和新思路。统计物理学为理论物理研究开拓了跨度更大的交叉综合领域，如生物物理和软凝聚态物理。统计物理的思想和方法不断地被应用到各种新的领域，对其基本理论和自身发展提出了更高的要求。由于软物质是在自然界中存在的最广泛的复杂凝聚态物质，它处于固体和理想流体之间，与人们的日常生活及工业技术密切相关。例如，水是一种软凝聚态物质，其研究涉及的基础科学问题关乎人类社会今天面对的水资源危机。

4. 理论物理学在具体系统应用中实现创新发展，并在基本层次上回馈自身。从量子力学和统计物理对固体系统的具体应用开始，近半个世纪以来凝聚态物理学已发展成当代物理学最大的一个分支。它不仅是材料、信息和能源科学的基础，也与化学和生物等学科交叉与融合，而其中发现的新现象、新效应，都有可能导致凝聚态物理一个新的学科方向或领域的诞生，为理论物理研究展现了更加广阔的前景。一方面，凝聚态物理自身理论发展异常迅猛和广泛，描述半导体和金属的能带论和费米液体理论为电子学、计算机和信息等学科的发展奠定了理论基础；另一方面，从凝聚态理论研究提炼出来的普适的概念和方法，对包括高能物理在内的其他物理学科的发展也起到了重要的推动作用。BCS 超导理论中的自发对称破缺概念，被应用到描述电弱相互作用统一的 Yang-Mills 规范场论，导致了中间玻色子质量演生的 Higgs 机制，这是理论物理学发展的又一个重要里程碑。近二十年来，在凝聚态物理领域，有大量新型低维材料的合成和发现，有特殊功能的量子器件的设计和实现，有高温超导和拓扑绝缘体等大量新奇量子现象的展示。这些现象不能在以单体近似为前提的费米液体理论框架下得到解释，新的理论框架建立已迫在眉睫，如果成功将使凝聚态物理的基础及应用研究跨上一个新的历史台阶，也将理论物理的引领作用发挥到极致。

5. 理论物理的一个重要发展趋势是理论模型与强大的现代计算手段相结合。面对纷繁复杂的物质世界（如强关联物质和复杂系统），简单可解析求解的理论物理模型不足以涵盖复杂物质结构的全部特征，如非微扰和高度非线性。现代计算机的发明和快速发展提供了解决这些复杂问题的强大工具。辅以面向对象的科学计算方法（如第一原理计算、蒙特卡罗方法和精确对角化技术），复杂理论模型的近似求解将达到极高的精度，可以逐渐逼近真实的物质运动规律。因此，在解析手段无

法胜任解决复杂问题任务时,理论物理必须通过数值分析和模拟的办法,使得理论预言进一步量化和精密化。这方面的研究导致了计算物理这一重要学科分支的形成,成为连接物理实验和理论模型必不可少的纽带。

6. 理论物理学将在国防安全等国家重大需求上发挥更多作用。大家知道,无论决胜第二次世界大战、冷战时代的战略平衡,还是中国国家战略地位提升,理论物理学在满足国家重大战略需求方面发挥了不可替代的作用。爱因斯坦、奥本海默、费米、彭桓武、于敏、周光召等理论物理学家也因此彪炳史册。与战略武器发展息息相关,第二次世界大战后开启了物理学大科学工程的新时代,基于大型加速器的重大科学发现反过来为理论物理学提供广阔的用武之地,如标准模型的建立。国防安全方面等国家重大需求往往会提出自由探索不易提出的基础科学问题,在对理论物理提出新挑战的同时,也为理论物理研究提供了源头创新的平台。因此,理论物理也要针对国民经济发展和国防安全方面等国家重大需求,凝练和发掘自己能够发挥关键作用的科学问题,在实践应用和理论原始创新方面取得重大突破。

为了全方位支持我国理论物理事业长足发展,1993年国家自然科学基金委员会设立“理论物理专款”,并成立学术领导小组(首届组长是我国著名理论物理学家彭桓武先生)。多年来,这个学术领导小组凝聚了我国理论物理学家集体智慧,不断探索符合理论物理特点和发展规律的资助模式,培养理论物理优秀创新人才做出杰出的研究成果,对国民经济和科技战略决策提供指导和咨询。为了更全面地支持我国的理论物理事业,“理论物理专款”持续资助我们编辑出版这套《21世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书》,目的是要系统全面介绍现代理论物理及其交叉领域的基本内容及其学科前沿发展,以及中国理论物理学家科学贡献和所取得的主要进展。希望这套丛书能帮助大学生、研究生、博士后、青年教师和研究人员全面了解理论物理学研究进展,培养对物理学研究的兴趣,迅速进入理论物理前沿研究领域,同时吸引更多的年轻人献身理论物理学事业,为我国的科学研究在国际上占有一席之地作出自己的贡献。

孙昌璞

中国科学院院士,发展中国家科学院院士

国家自然科学基金委员会“理论物理专款”学术领导小组组长

自序 十年磨一剑

话说这本《等离子体物理学基础》，从 2007 年我调入山东大学（威海）起，便算开始着手准备了。

那是 2007 年的 2 月份，寒假来临之际，举家来到了威海——美丽的滨海小城。

起初的日子却并没有太多“看云卷云舒，观潮起潮落”的闲情，因为要同时申请两项国家基金。调入新单位，如果能实现“开门红”，对以后工作的顺利开展会非常有益。同时，还承接了本科生“等离子体物理学导论”课程的讲授工作。我之前虽于中国科学技术大学（简称中科大）任教近三年，但未曾教过此类基础课程。所以，在威海初始的日子有一点兴奋又有很多紧张。加上专业伊始、安家置业等各项杂事，隐约记得嘴边起泡、焦灼有加。而这一剑却已然开始打磨了。

一开始，自然是钝铁一块，起初的几届学生便成了“试验品”。最开始两三年，我照常规用 PPT 讲，参考的教材也换来换去。后来几年，改用手写投影仪与 PPT 混用等，主要的参考教材或讲义也一直没有固定下来。

这是因为各版本等离子体物理教材风格均不同，与作者专业有关，亦各有侧重。我遂逐步起意，觉得应该整理一本与自己专业关系更加贴近、自己和学生用着也能顺手的讲义。所以，近几年，多是对着课程纲要，在触写屏上手写投影进行讲授，对课程内容也日臻熟悉。当然，期间设想各种方式来增加课堂互动等，此处自不必表。

说实话，我本人作为一名高校教师，每年用于给本科生讲课的时间虚算仅为三个月，到后面几年，备课所用时间越来越少，便越想把这一把讲义的剑打磨成形，这便成了近三年的任务和压在心中的石头。这项任务只能安排于每年的 3 月至 6 月间我备课讲课的间隙完成，边讲边改，方知组织讲义所需知识之渊博、脑力精力之充沛和字句斟酌之苛刻。对我的导师已七十有余仍勤耕《电磁学—电动力学》教材，致力于将二者打通并逐个公式亲自校对的做法更添敬意。

如今，这把剑终已成形，于 2016 年 10 月几近完稿。对于是否出版，当时并不是我的首要考虑。记得还是联系了几家出版社，要么只要差不多“交钱”即可出版，要么嫌将来发行量会过低而不甚感冒。再看看有关的学科评估要求，侧重于那些列入“十三五”规划的教材书籍。当时遂打定主意，在网上公开 PDF 文件，一方面接受大家的批评和建议，另一方面算是一种广而告之式的发布。同时，为阅读方便，我还自行组织印刷了一批，然后寄送给可能需要的同行和学生，供参考使用。

至今，陆续收到不少修改建议。当然，更重要的恐怕还是我又讲了两遍课。几乎每节课都会有新的收获，从而加入新的改动，看起来“此改绵绵无绝期”。于是乎，目前大家手中的这个版本，与之前“面市”的那一版相比，光从页码上来看，刨除之前书后所附的科普报告就足足增加了近 70 页（注：当前版本已经移除了那些很有意思的科普报告，主要是为了节省纸张和费用。对这些报告感兴趣的读者可以到作者科学网博客上阅览）。其间，又偶有朋友咨询如何获取本书，我遂起意要将之正式出版。

这便要感谢科学出版社的编辑周涵。不知道她在哪里看到了 2016 年版的那本，并主动联系到我，还协助将本书编入《21 世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书》，由此解决了部分出版费用。这便有了现在这本正式出版的讲义。如同许多类似书籍的作者都会说的，受作者学识所限，本书疏漏之处在所难免，还请朋友们不吝赐教。

陈 耀

于威海

2016 年 6 月 20 日初稿、2018 年 9 月 26 日略改

等离子体 (plasma, 台湾地区同行译为电浆), 顾名思义, 是由等量的电荷 (正负离子) 构成的体系, 可以含有部分中性粒子。等量指的是正负离子 (负离子一般为电子) 所携带的电荷总量大小相等。这样, 这个体系整体上便呈现电中性。

等离子体有时被称为与固体、液体、气体三态并行的第四态。那么, 有什么特殊的性质能让其担此殊荣呢?

对于一个物态的性质, 起决定作用的是物态中的基本粒子单元是什么, 是如何组合的, 即组元间的相互作用力的性质如何。对于固体, 由原子、分子构成, 组元之间以分子键、原子键等作用形式被约束于固定位置, 仅可以在小范围内振荡 (热运动)。加热固体, 温度升高时, 组元振动能量增加, 破坏了将它们固定于固定位置的作用力, 成为可以相对自由流动、变形的液体。在分子间作用力的约束下, 液体仍具有相对固定的体积, 其组元也无法随意逃逸。当进一步加热液体, 使粒子做热运动的能量大大超越将之限定于相对固定空间中的相互作用能量时, 液体变为气体, 其单元粒子可以自由地在空间中运动, 并尽量充满所能占据的空间。

这三种物态中, 组元之间的相互作用都是中性成分之间的作用, 如固液体中相邻分子-原子的作用、气体分子的碰撞作用等。若能继续使气体的温度升高, 则组元的平均运动动能相应增加, 高到一定程度时, 例如, 接近或达到分子或原子的电离势时, 在碰撞过程中就有可能将电子打出, 发生电离。温度越高, 这种电离的机会越多。当然, 复合过程也在同时发生。在一定温度和密度下, 电离与复合可以达到平衡, 体系中便会存在一定数量的离子和电子。它们之间的作用力就不再是中性成分间的作用力了, 而是电荷与电荷间的库仑相互作用力。如果电荷与中性成分共存, 则就看哪种作用力对体系性质起到控制作用。如果随着温度的升高, 电离度的增加, 电的作用占了上风, 则可以认为体系由气体演变到了等离子体状态。

以上是关于等离子体由来的简单描述。可见, 在等离子体中, 基本组元是电子、离子, 组元间的作用力是电荷作用力, 这与固液气三态截然不同。库仑作用是

长程、多体的相互作用。一个电荷可以同时与周围许多电荷发生作用。这一组元和组元间作用形式的变化是等离子体得以担当起新物态这一“荣耀”的原因。中科大的刘万东教授曾如此拟人化比喻等离子体的性质(摘自刘万东《等离子体物理导论》, 2002):

“我经常将等离子体人性化, 她的许多表现酷似于我们人类, 常常不需要牵强的联想, 就可以用我们日常的经验, 甚至是我们内心的感受来理解她的行为。等离子体中的两性, 相互独立又相互扶持, 平和时若即若离, 逃逸时则携手并肩。等离子体中的相互作用, 长则绵绵, 短则眈眈, 远可及周天之外, 近可抵唇齿之间。等离子体的集体行为, 自由与束缚兼得, 温和与暴虐并存。等离子体的自洽禀性, 可以欺之以妩媚, 不可催之以强蛮, 若以力, 人人奋愤可兵, 以弱, 则诺诺列队而从。如此以陈, 等离子体的每一个秉性都值得我们用诗一般的语言来渲染。电子离子, 以其简洁的库仑作用, 本不堪言, 然一成群体, 即如此绚丽, 何况人乎?”

对于上述描述, 我深以为然。还有一种说法, 将等离子体比作一种“博爱”的体系。“博爱”正是对电荷间的多体相互作用的写照。如言, 任一电荷均可与周围许多电荷作用。简单而言, 等离子体本来只是由带负电的电子(或其他负离子)和带正电的离子构成, 如此而已。然而, 它们彼此间“博爱”的情怀使得等离子体中出现丰富多彩、花样百出的现象。可以讲, 等离子体, 对于“博爱”, 是认真的。

试想, 从处于静平衡状态的电子、离子构成的等离子体中取走一个电子, 会有何反应? 这一电子, 在取走之前与周围诸多电荷正发生作用而处于胶着状态。这意味着, “牵一发而动全身”, 将会立刻造成对附近区域中所有电荷的影响。而影响到这些电荷, 又会影响到与它们“胶着”的那些电荷, 从而将扰动传播出去。所以, 对于一点的扰动, 等离子体总是表现出一种“集体”响应的行为。

即便不将电子取走, 而只是挪动一个位置, 电子的那些“铁粉”们也总是要一哄而上, 亦步亦趋。这实际上是通过长程、多体的库仑力来实现的。当一个或一些电子被挪动到新的位置, 便会产生电荷分离电场, 以力的作用吸引原处的异性电荷、排开现有位置的同性电荷。在力作用下, 粒子开始加速运动, 当到达新平衡位置时, 电场就消掉了, 然而速度却到了最大, 故只好“过冲”了, 又产生电场, 又回头。如此往返, 乐此不疲。这实际上便是等离子体振荡的由来。

我们已经看到, 等离子体中, 每个电荷都有自己的“胶着”或影响范围, 这实际上是反映了它们电场的影响区域。在等离子体中, 某电荷的电场并不能延伸到远处, 因为总是被一些异号电荷围着, 它们的电场叠加抵消了该电荷电场, 使之被局限在一个圈(其实是球)内, 圈(球)内的都是朋友。除了“朋友圈”之外, 这个球还有一个很认真的名字: 德拜球。它的半径叫德拜半径, 是等离子体物理中的一个基本的尺度。

圈的存在,让粒子丧失了个性。每一次动作,都不再是个体行为,而是“拖泥带水”“拖家带口”“叮叮当当”,有一大串跟随者。这就快讲到点子上了:这是集体行为啊!

等离子体最重要的一个性质,就是“集体行为”(collective behavior)。很明显,集体行为源自“博爱”,这印证了之前的一句话,对于“博爱”,等离子体是认真的,总是不遗余力地表现出来。等离子体的多体作用过程,由扰动源开始,由近及远向外传播,在力的作用下有回复有过冲,这就形成了一个总是处于振荡状态的系统。这些传播的振荡就是波(wave)。周围可有声音响起?那就是由现实生活中最为常见的一种波所引起的(注:声波)。此外,日光、无线电广播和手机通信等都与波(注:这些属于电磁波范畴)的激发和传播密不可分。

波是等离子体集体行为最为直观的表现。

在气体中传播的波,就是声波,是由压力梯度产生的,由高压区向低压区传播,对应的回复力便是压强梯度力。相对于气体,等离子体中的力有了更多种类。

等离子体中除了正负电荷,具有同等重要地位的就是电磁场。

这一点都不奇怪!电荷产生电场,电荷运动是电流,电流产生磁场;电场力作用于电荷,影响电荷运动,驱动电流;磁场又施力于电流。所以,等离子体中除了压差造成的压强梯度力外,还有电场力、磁场力。三力联合,加上电子、离子不同的电量和质量,便会驱动出不同性质的振荡行为,对应于不同的波动形式。后面,我们还会讨论等离子体的波动问题。

由上面文字可见,要想从理论上描述清楚等离子体的行为,必须要将粒子的运动方程($F = ma$)与电磁场 Maxwell 方程组联立求解,方能决定系统的演化(指各物理量随着时间和空间的变化)。

为简单起见,最容易解决的一个近似处理就是固定电磁场不变,研究一个粒子在其中的运动行为。这只需要求解一套粒子的运动方程,可以考虑各种电磁场不均匀分布,乃至随时间缓慢变化的情况,详见第 2 章内容(第 1 章内容就是前面叙述的等离子体定义和各种最为基本的概念与过程)。当然,基于这一近似,已经不能算是研究等离子体了。但由此提炼出的粒子漂移、回旋中心、磁镜与磁矩等概念对于理解和研究更复杂情形下的等离子体运动行为是非常有用的。

也许,有人会想到可以联立求解 Maxwell 方程组和每个粒子的运动方程。这的确是极为简单(直接),但同时也是最为复杂的描述方法。在现实中,这一求解是无法实现的,因为粒子数实在是太多太多啦。实际工作中,确实有人用类似的思路进行求解,但使用了非常有限的粒子数量或者引入不合实际的物理参数等,再求解其运动方程。这一类方法统称为粒子模拟。

上面的说明,其实意味着等离子体学科的基石仍然是牛顿力学和电动力学,并没有跃出经典物理的框架。若要得到一个可解的理论,还要借助于统计力学或流体

力学的许多概念和手段。通常有两种处理方式。一是将等离子体视为流体，套用流体力学的方法框架。由于等离子体经常是磁化的，需要考虑电场和磁场的作用，因此在流体力学方程组中应加入电磁场作用力，并与 Maxwell 方程组联立求解。我们称之为磁流体力学 (magnetohydrodynamics, MHD)。将在第 3 章中集中讨论。

磁流体适用于描述可近似为“连续介质”的等离子体，需要粒子分布连续性、成团性较好，与热平衡的状态最好也不要偏离太远。对于特别稀薄、某些边界层或者尺度较小的区域，MHD 可能不再适用。此时，常使用动理论 (kinetic theory) 来理解等离子体的行为，对应于通常采用的第二种处理方式。MHD 所处理的是流体的密度、速度和温度等宏观参量，而动理论处理的是粒子的速度分布函数 (velocity distribution function, VDF) 这一微观参量。VDF 是统计力学的概念，表示在某空间点、某速度取值范围内找到粒子的概率。

对于流体的质点，我们知道，是宏观小微观大的。宏观上只是空间中的一点，但微观上却可包含非常多的粒子 (如百亿)。在这一空间点上，每个粒子都有自己的运动速度。为了描述它们的运动状态，就需要使用 VDF 的概念。这使得我们可以深入所谓的流体力学质点内部，细致研究粒子分布的微观行为。因此，VDF 是微观参量。流体在某一点的宏观参量都可以通过将相应物理量乘上该点的 VDF、乘上速度再对速度积分 (即加权平均) 后而得。这表明，微观和宏观是相通的。

可见，动理论更接近等离子体运动的物理底层，近似程度更低。但是，动理论并没能发展成独占鳌头的等离子体理论体系，而是仍处于与 MHD 并驾齐驱的状态。究其原因，不接地气是一个方面 (同学，你知道 VDF 是什么吗?)；另一方面，要完成稍长时间、稍大空间中的求解都是很费劲的。因为 VDF 对应于六维的相空间，除了三个空间坐标决定空间点外，还需要三个速度分量决定该点中粒子的运动速度。这样，尽管 MHD 粗线条地将等离子体多粒子体系处理成一股连续的流体，但仍获得了广泛的应用。MHD 特别适合描述那些时间变化慢、空间尺度大的物理过程。

对于各种形式的等离子体波动 (详见第 3 章后半部分、第 4 章)，主要的控制因素，简单而言，可分为两种。一种是电磁场相互感应引起的波动，真空中电磁波以光速传播 ($\omega = kc$)，进入等离子体之后，等离子体 (如电子) 响应电场的变化，促使电场更快回复，从而使电场以更快的频率发生变化——超光速 (注：指相速度) 电磁波。另一种控制因素就是运动方程中的力。粒子运动的周期行为 (即波) 直接由一忽正忽负的力控制，该力总是指向平衡位置，因而称为回复力。一般很多情况下，波动的一些性质可以从力的属性来判断。

例如，电场力，就对应于前面介绍的等离子体振荡：将部分电荷挪离平衡位置时得到的振荡形式 (静电振荡)；磁场力，所产生的周期运动首先是电子和离子的回旋运动。注意，只有传播的振荡模式才可以称为波。原地静电振荡或者回旋运动都

只是对应于一种周期行为，并不算是波。当进一步考虑热运动时，静电振荡就可以通过热运动传开来，这就成为波了。运动方程的每一个力项都可以对应于一种周期性的振荡或波动。实际中，多是两种或更多力项耦合在一起，共同作用于等离子体才催生不同形式的波动。例如，电场力和热压力、电场力和洛伦兹力再加压力等。对于不同的电荷（电子和离子），这些力又是不同的。因此，力的不同组合或者再加上电磁感应便产生了各种不同的等离子体波动现象。

研究波动，有一个关键武器，就是色散关系 (dispersion relation)。上面给出的 $\omega = kc$ 就是描述的以 c 为相速度 (ω/k) 和群速度 ($d\omega/dk$)，频率为 ω ，波数为 k 的电磁波的色散关系。波是扰动物理量周期性变化、可传播的振荡。色散关系可以给出多个解。每一支解，我们称为一个波模 (wave mode)。色散关系 (或其解) 就像一个“模子”一样，控制着波在时间变化上的周期 (频率) 和空间变化上的周期 (波长) 之间的关系。换言之， ω 与 k 可以取不同的数值，但对于固定的波模，二者是一一对应的，其关系严格由色散关系限定。因而，色散关系是表示波动的周期与空间周期之间依赖关系的表达式，是描述波的最为基本的关系式：给定波数 (或波矢)，便可根据色散关系求出波动频率。根据色散关系，还可以很容易地求出波的相速度和群速度。

在等离子体物理中，我们会频繁地提到一个名字：阿尔文 (Alfvén)。正是他创立了 MHD，发现了 Alfvén 波等，并由此获得了 1970 年诺贝尔物理学奖。Alfvén 波是如何产生的呢？

在 MHD 中，等离子体被视为单一流体，电子和离子合二为一，此时所研究问题的尺度远大于离子的回旋半径，电子和离子在回旋运动上的差别已经被彻底抹掉了，它们就像是串在线上的珠子，甩不掉的。磁场和等离子体就这样绑定在一起，这给出了著名的 MHD 磁冻结效应的基本图像 (第 3 章有更严格的表述，大体是当电导率无穷大时，任何流体回路中的磁通量都是恒定的；如果不恒定，就会感生出无穷大电流)。

磁流体所受到的电场力作为内力而相互抵消 (正负电荷受到的电场力大小相等、方向相反)，因而，除热压力外，磁流体主要是受到电流与磁场叉积得到的洛伦兹力 (或安培力) 的作用。这一力显然垂直于磁场，又可以分解成两项：一项为磁压力，与热压力类似，由高磁压区指向低磁压区 (与气体热压代表热能密度一样，磁压代表磁场能量密度。这两种压强可以相加，得到总压)，该力表达了磁场想要均匀分布降低梯度的意愿，只有磁场大小分布不均匀时才有该分量。另一项分量为磁张力，指向磁场弯曲的方向，或者说指向磁力线的曲率中心，只有磁力线弯曲时，才有这一分量，磁场变直时该力就没有了，这说明通常磁场是希望长得直一些，至少不要太弯曲。

磁冻结效应使得磁力线像一根管子一样，里面流动着磁流体，磁力线也因此带

上了质量；而磁张力的存在，使得管子具有了高度弹性，系统总是希望弹回到不受力的平衡位置。如果“拨动”一根磁流管，就会触发“回弹”模式，引起的波动就是 Alfvén 波了。所以，Alfvén 波就是磁力线的振荡，与串上珠子的弹性绳形似神似。

在 MHD 中，还有两种线性（即幅度比较小的）波动：快磁声波和慢磁声波，对应于热压与磁压梯度力合作产生的模式（磁张力也参与了）。当两力方向相同时，对应于更快的模式，反之则为慢模式。

除上述将等离子体简化为单一流体的 MHD 外，实际工作中还常采用一个更复杂的多元磁流体描述，以处理尺度接近或小于离子回旋半径时的情况。这时，电子和离子被处理成不同的流体，它们的运动因而也是分别考虑的。这样，二者运动产生的电荷分离——电场力就出现于方程中了，也包括所有因电荷而异的其他力。这使得力的种类和数量增加，耦合方式也多了不少，对应于第 4 章中不同的等离子体波动形式。

第 5 章涉及一些简单的不稳定性方面的讨论。不稳定性就是指在系统中加入小扰动后，由于所产生的力的方向与扰动方向相同，扰动幅度逐渐增大的特殊波动模式或物理过程。注意，不稳定性与通常波动的最大区别就是，波动中对应的力是起回复作用的，总是试图使扰动消除；而不稳定性中力的效果是扩大扰动——形成正反馈而使扰动幅度和相应回复力进一步增大直到系统崩溃（或非线性饱和）。也可以说，在某些情况下，不稳定性是幅度不断增长的波动过程，在这一理解下，可以采用与波动分析完全相同的方法，即色散关系分析来研究不稳定性的线性阶段，只要将色散关系中的频率处理成复数就可以了（详见第 5 章）。

可以看到，本书几乎每一章都对应于一种不同的理论描述方式，从单粒子—磁流体—双流体系—动理论，看起来没有哪个理论“一统天下”。这在客观上也增加了学习的难度。但实际上，上述安排是一种自然的由近似较多至近似较少的、逐步接近物理实际的一种叙述方式。不同的理论描述之间是相通的。

例如，动理论的基本方程——Vlasov 方程（或无碰撞 Boltzmann 方程，需与 Maxwell 方程组联立求解）源自对粒子行为的一种直观认识：不考虑碰撞的情况下，相空间中沿粒子运动轨迹粒子数守恒。相空间就是由粒子的空间位置矢量和速度矢量构成的六维坐标体系。相空间中的一点具有相同的速度和位置，该点上可以有许多个粒子，所有粒子受到的力等同（对于固定种类的粒子，力只依赖于粒子速度和空间位置），因而这些位于同一空间点的粒子以完全相同的加速度和速度运动，即所有粒子从一点平移至另一点。没有碰撞，也就没有粒子碰入碰出，因而，粒子数目是守恒的。如此得到一个全微分： $df/dt = 0$ ，化成偏微分，把加速度用电磁力代替，就是 Vlasov 方程了。可以证明，由这个方程可以推导出所有的 MHD 和双流体系—多流体方程组，详见第 6 章。如此安排，也是为给读者以信心，并体会表象背后的深层物理。

作者自 2007 年初由中科大调入山东大学(威海)以来,便开始给三年级本科生讲述“等离子体物理学导论”课程,至今差不多有 12 个年头(注:至 2018 年 10 月),期间参考了包括刘万东教授讲义在内的多个版本的教材,受益颇多。多年课堂教学所积累的素材和个人的理解,加在一起,成为此册。欲将之公开,以使从来没有直接接触过作者的学子或有关专业人员也能一起交流,或者对他们掌握某些概念有所裨益,这就算达到目的了。

诚然,受作者学识所限,认识不到之处、疏漏与谬误之处定然存在,还希望读者能宽容但不纵容,多提宝贵意见。

文稿历时多年才整理成册,期间得到山东大学(威海)空间科学与物理学院本科生和研究生助教的帮助,特别是王冰、李传洋、赵迪、宁昊、武昭、倪素兰等为本稿成文付出良多,孔祥良副研究员曾多次仔细审校书稿;此外,北京大学、国家空间科学中心、中国科学技术大学、南京大学、北京师范大学、武汉大学等单位同行也提出了许多宝贵的意见。在此致谢!特别是我的导师——胡友秋教授,以及田晖、宋红强、李会超、陈鹏飞、郭建鹏、李瑛、何建森、冯学尚、陆全明、郭孝城、刘勇、陶鑫、Mahboub、胡强、倪斌斌等,在此不一一列举!

最后,近年来,作者坚持将有深刻感触的科研论文撰写成科普形式的报告,贴于作者科学网博客(右侧二维码)之中,现推荐读者阅读。希望能让读者在学习之余,也能感受科研工作中的经验、成功与喜悦,或者有些轻松一刻也说不定。



山东大学(威海)空间天气物理与
探测研究中心二维码



作者科学网博客二维码

陈 耀

于威海

2016 年 2 月 29 日、2018 年 9 月 28 日略改

目 录

《21世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书》出版前言

自序 十年磨一剑

前言 课程大图景

第 1 章 等离子体基本性质与概念	1
1.1 等离子体的“电性”与集体行为	2
1.2 集体行为的几种表现与等离子体判据	3
1.2.1 等离子体振荡	3
1.2.2 德拜屏蔽	4
1.2.3 等离子体的准中性与响应时间	6
1.2.4 等离子体判据	7
1.3 库仑碰撞 (经典库仑相互作用)	8
1.4 等离子体中的辐射	10
1.5 数学描述方法	12
1.5.1 单粒子轨道理论	13
1.5.2 粒子模拟	13
1.5.3 磁流体力学	14
1.5.4 动理学描述	15
书面作业	16
思考与论述	16
第 2 章 单粒子轨道理论	18
2.1 均恒外场中的单粒子运动	18
2.1.1 均恒磁场中的粒子回旋运动	18
2.1.2 均恒电场引起的引导中心漂移运动: 电场漂移	21
2.1.3 重力场与任意外加力场中的导心漂移	23