



The Series of Advanced Physics of Peking University

北京大学物理学丛书

等离子体理论基础

胡希伟 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



053

13

The Series of Advanced Physics of Peking University

北京大学物理学丛书

等离子体理论基础

胡希伟 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

等离子体理论基础/胡希伟编著. —北京:北京大学出版社,
2006. 1

(北京大学物理学丛书)

ISBN 7-301-08921-X

I. 等… II. 胡… III. 等离子体物理学 IV. 053

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 029799 号

书 名: 等离子体理论基础

著作责任者: 胡希伟 编著

责任编辑: 顾卫宇

标准书号: ISBN 7-301-08921-X/O · 0644

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区中关村北京大学校内 100871

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752021

电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

印 刷 者: 北京宏伟双华印刷有限公司

经 销 者: 新华书店

850mm×1168mm 32 开本 24.375 印张 630 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 42.00 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,翻版必究

内 容 简 介

本书介绍了“经典理想等离子体”的两种主要理论描述方法:流体力学和动理学。共分四个部分,头两个部分属于三维坐标空间的流体描述,后两部分属于六维相空间(三维坐标空间加三维速度空间)的动理学描述。

第一部分“磁流体力学”主要介绍了“磁约束受控热核聚变”中磁化高温等离子体的平衡、线性波和不稳定性的理论,这时外加磁场对等离子体性质有最重要的影响。

第二部分“电磁流体应用专题”介绍了电场、磁场和电磁波场对等离子体性质都起重要作用的两个专题——“非中性等离子体激波”和“激光与等离子体相互作用”,后一个专题通过“激光热核聚变”和“强激光与高密、高温等离子体相互作用”中的一些典型研究课题,介绍了电磁波和等离子体相互作用的流体理论。

第三部分“弗拉索夫波动理论”介绍了热等离子体的无碰撞波动性质。这一部分重点描述了各种特征的线性波模式以及波-粒子、波-波共振相互作用;也介绍了一般参考书中少见的弗拉索夫初值亦即弹道模问题;还对各种静电模不稳定性及湍流过程作了简单介绍。

第四部分“碰撞和输运”介绍了带电粒子间库仑碰撞以及由此而引起的各种输运过程的理论方法和结果;还通过“射频波驱动电流”这一课题,介绍了同时考虑“波-粒子共振”和“粒子-粒子碰撞”相互作用的理论描述方法;最后还比较系统地介绍了等离子体中的BBGKY理论。

本书是为具有大学物理学本科基础,并对等离子体物理学有初步了解的读者学习等离子体理论而写的。

前 言

物理学是自然科学的基础,是探讨物质结构和运动基本规律的前沿学科.几十年来,在生产技术发展的要求和推动下,人们对物理现象和物理学规律的探索研究不断取得新的突破.物理学的各分支学科有着突飞猛进的发展,丰富了人们对物质世界物理运动基本规律的认识和掌握,促进了许多和物理学紧密相关的交叉学科和技术学科的进步.物理学的发展是许多新兴学科、交叉学科和新技术学科产生、成长和发展的基础和前导.

为适应现代化建设的需要,为推动国内物理学的研究、提高物理教学水平,我们决定推出《北京大学物理学丛书》,请在物理学前沿进行科学研究和教学工作的著名物理学家和教授对现代物理学各分支领域的前沿发展做系统、全面的介绍,为广大物理学工作者和物理系的学生进一步开展物理学各分支领域的探索研究和学习,开展与物理学紧密相关的交叉学科和技术学科的研究和学习提供研究参考书、教学参考书和教材.

本丛书分两个层次.第一个层次是物理系本科生的基础课教材,这一教材系列,将几十年来几代教师,特别是在北京大学教师的教学实践和教学经验积累的基础上,力求深入浅出、删繁就简,以适于全国大多数院校的物理系使用.它既吸收以往经典的物理教材的精华,尽可

能系统地、完整地、准确地讲解有关的物理学基本知识、基本概念、基本规律、基本方法；同时又注入科技发展的新观点和方法，介绍物理学的现代发展，使学生不仅能掌握物理学的基础知识，还能了解本学科的前沿课题和研究动向，提高学生的科学素质。第二个层次是研究生教材、研究生教学参考书和专题学术著作。这一系列将集中于一些发展迅速、已有开拓性进展、国际上活跃的学科方向和专题，介绍该学科方向的基本内容，力求充分反映该学科方向国内外前沿最新进展和研究成果。学术专著首先着眼于物理学的各分支学科，然后再扩展到与物理学紧密相关的交叉学科。

愿这套丛书的出版既能使国内著名物理学家和教授有机会将他们的累累硕果奉献给广大读者，又能对物理的教学和科学研究起到促进和推动作用。

《北京大学物理学丛书》编辑委员会

1997年3月

前 言

等离子体是由处在非束缚态的带电粒子组成的多粒子体系。它和气体、液体、固体一起构成了自然界物质在同一层次上的四大基本形态。等离子体可以单独存在,也可以与其他的物质形态共存。如在晶体中的电子气,电解液中的正负离子团和未完全电离的放电气体。这时,等离子体一方面仍保持着自己的基本特性,另一方面又会与其他物质形态相互影响,演变出丰富多彩的性质。与其他三态所组成的混合物不同,等离子体和它们可以实现无界面的融合,从而与它们有细致到粒子对粒子的更紧密的相互作用。

人类对等离子体的实验研究是从气体放电开始的。相比起其他三态来说,要晚了许多。但从 20 世纪 50 年代开始,在受控热核聚变研究和空间技术发展的推动下,人们对等离子体的认识有了长足的进步。从 20 世纪 70 年代末起,等离子体物理学已经成长为现代物理学中的一支独立的二级学科。

等离子体属于多粒子体系,因此以往对中性多粒子体系发展出的各种描述方法对它也适用,只是要作相应的改造和发展。与中性粒子组成体系相比,等离子体最主要的不同是:它的带电粒子间存在着长程库仑作用。这使得等离子体除了具有中性多粒子系统的许多整体性质(这是由粒子间短程相互作用——如碰撞——而引发的)外,还具有由库仑作用的长程部分而产生的大量集体运动,也即自洽生成的电磁场,通常把它们称为各种各样的等离子体“波”。从这个意义来讲,等离子体是由大量带电粒子和各种波元(plasmons,类似在晶体中的各种元激发)组成的自洽体系。等离子

体的另一个特点是：它处在非束缚态的带电粒子极易受到各种内部自洽电磁场和外部所加电磁场的影响，从而作出很强的响应。这使得等离子体的介质电磁性质与其他三态显著不同，不能通过简单的电极化和磁化强度来描述。因此，在等离子体的各种描述方法中，一般都需要将其状态演化方程组和麦克斯韦方程组相耦合。在由等离子体与其他三态组成的混合物中，麦克斯韦方程组也将会通过带电粒子系与中性粒子系间的耦合而影响到中性粒子系的行为。

自然界和实验室的等离子体在密度上可以跨越近三十个数量级（从星际空间的 $<1\text{ cm}^{-3}$ 到白矮星中的 10^{30} cm^{-3} ），在温度上可以跨越近十个数量级（从金属中电子气的 10^{-3} eV 到脉冲星磁层中等离子体的 10^6 eV ），其中的电磁场在强度上也会跨越十几个量级（如磁场强度可从太阳风中的 10^{-5} Gs ^①到强激光产生的等离子体中的 10^8 Gs ，在中子星发生“星振”时所产生的电子云中磁场甚至可达 10^{15} Gs ）。这是其他三种物质形态所不曾遇到的。因此，描写等离子体的理论方法就必然是多元化的。在本书中介绍的是对所谓的“理想、经典等离子体”的理论描述方法。这时粒子的平均动能大于平均（库仑）势能，而粒子的运动服从牛顿力学规律。这类等离子体覆盖了目前研究的大多数实验室和空间等离子体。而且我们对这类等离子体的性质已经了解得比较清楚，对它的理论描述也比较成功。

在本书第一章的开始，就从繁至简地（正好与物理学史的时序相反）介绍了描述“理想经典等离子体”的各种理论方法。但本书给出的是其中最主要的两类描述法：流体力学和动理学。本书就是由著者前几年所写的“磁流体力学”和“等离子体动理学”两本讲义合并而成的。在成书时，还补写了本书第二部分“电磁流体力学”的一部分章节（“双流体方程组”，“激光与等离子体相互作用”，和“非中

① $1\text{ Gs}=10^{-4}\text{ T}$ 。

性等离子体激波”)。但是,原计划列入这部分的“非中性等离子体”和“气体放电等离子体”这次仍付阙如,颇令人遗憾。因此本书的描述对象主要是高温、完全电离的等离子体。读者是具有大学物理学本科基础、并对“等离子体物理”有初步了解的研究生和同等学历者。在下面附上了原讲义的两个序,一个跋,和一段对“plasma”这一英文词来历的介绍,希望对读者有所帮助。

作 者

2003 年 8 月于华中科技大学

原 序 一

(电磁流体力学)

等离子体的流体描述是等离子体两大基本描述方法之一,另一种就是所谓的动理学(kinetic)描述。这两门课构成了中国科学技术大学近代物理系等离子体专业研究生班的等离子体物理理论课程。原来的等离子体流体课程只有(单)磁流体力学,并以磁约束高温等离子体为主要的描述对象。近年来,随着非磁约束等离子体应用和研究的逐步发展,以及我专业研究领域的不断拓宽,此课程的内容也在不断充实,将非中性等离子体、低温等离子体及激光-等离子体相互作用的一些内容包含了进来。由于涉及了带电流体的描述,所以本课程的名称也相应改成“电磁流体力学”。本讲义只给出了这门课程第一部分——“磁流体力学”的内容。

本课程是为研究生开设的,要求读者有大学物理系本科的学历,并有“等离子体物理学”的基础。没有学过“等离子体物理学”的硕士生,在修读本课程时,必须同时选修本专业的大学生课程“等离子体物理导论”。

等离子体是由处在非束缚态的大量带电粒子组成的多粒子体系,和对其他多粒子体系的描述一样,对等离子体的理论描述也是通过对所研究的具体问题建立“物理模型”,并对此模型作定量(解析、数值或粒子模拟)的描述而完成的。因此要学好一门理论课程,首先要弄清所用数学公式的目的,也即需要读者在学习过程中建立清晰的物理图像:了解要解决的是什么问题,用的是什么物理模型,此模型的长处和短处,可以描述的和无法描述的等离子体性质……。物理模型或物理图像通常由几何模型、坐标系、所涉及的基本状态量及其初始值、一些有通用性质的“基本概念”,以及所用的基本方程组等构成。这些内容一般并不占很大篇幅,往往又很分散,甚至在课文中并没有被明显地指出,所以常被初学者忽略,这

就需要读者自己细心梳理、归纳。理论课程的另一个重要目的是使读者掌握一定的数学技巧,即定量地描述所讨论问题的能力。在本课程里,主要给出的是解析处理的方法和过程,而解析处理往往离不开各种“近似”方法。这就要求读者对各种近似方法的目的、适用条件和范围有清楚的了解,并会通过各种方式检验所用近似的合理性。最后,作者强烈地希望读者能在课本及参考资料的引导下,不厌其烦地、完整地推导书中的每一个结果,因为只有这样才能真正掌握其中的数学技巧。这对将来从事理论研究的读者来说是必不可少的,就是对从事实验研究的人来说也是有利而无害的。

在磁流体的描述中,所使用的许多方法和思路往往是其他物理理论的教科书中不常见的。例如,讨论二维磁流体平衡时所用的磁通坐标、平衡磁通所应满足的微分和积分方程,讨论磁流体稳定性时所用的变分方法,处理奇异微分方程的一些办法等。因此通过本课程的学习,可以使得这类数学技巧得到比较充分的训练。希望有的同学不要因为自己不是从事磁约束高温等离子体研究的就轻视了以上内容,“它山之石,可以攻玉”,各种数学处理方法往往有着比物理模型更广阔的应用范围。此外,虽然近十多年来非磁约束等离子体的研究有了长足的进步,但是磁约束等离子体的研究仍然处于等离子体研究的前沿,带动着等离子体物理学整个学科的发展。经受过磁约束等离子体研究训练的理论或实验工作者往往比较容易进入其他的等离子体研究领域,反之则要困难得多。所以,从学习和训练的角度来看,“磁流体力学”也是很好的入门课程,值得每个初学者下功夫去学好。

本课程是4个学分的课,即每周4学时、一学期80学时(包括复习、考试)。所以本讲义只选择了适宜于课堂讲授的一些内容,这些内容往往在数学处理上比较简单,而又可以给出鲜明的物理图像。一些和当前研究前沿有关的资料,已尽可能在文中合适的地方列出,供有兴趣的读者参考。

作者

1997年8月于中国科学技术大学

原 序 二

(等离子体动力学)

“等离子体动力学(kinetic theory)”是“等离子体电磁流体力学”的姐妹篇,它们一起构成了中国科学技术大学近代物理系等离子体专业研究生班的等离子体物理理论课程。一般在学了电磁流体力学之后开设,周学时4,总学时80。以往把kinetic theory译为动力学,结果和力学中的dynamic theory无法区分,而两者的处理对象和处理方法均有明显差别;这里采用的,是新版物理学名词给出的标准译名——动理学。

动理学方法和流体力学方法都是研究多粒子体系(气体、液体、固体和等离子体)物理性质的理论工具,但动理学方法和流体力学的三维坐标空间描述不同,它通常是在六维的坐标-速度空间来描述等离子体,而且还可以扩展到在 $6n(n=1,2,\dots)$ 维空间作描述。之所以需要用速度空间来描述,是因为有些多粒子体系的行为和它们粒子的速度状态有密切关系,因此仅仅在坐标空间作描述就不够了。多粒子体系中最常见的动理学问题是粒子间的相互作用对其速度状态,以至于空间状态的影响。当体系是由中性粒子组成时,粒子间只有接近到原子或分子的半径范围内时才会发生相互作用,而且是激烈的相互作用——在物理上通常用碰撞这种图像来描述它。因此碰撞及其引起的输运过程是动理学方法最早也是最主要的研究对象。但是如果组成体系的粒子是带电的电子和离子时(如等离子体体系),它们之间通过库仑力相互作用,而库仑力是长程的。即使考虑了多体造成的屏蔽影响,带电粒子间屏蔽库仑力的力程仍然远大于粒子间距。于是当带电粒子相互接近时,在发生激烈的、碰撞型的相互作用前,就经受了长时间、远距离的较弱相互作用——这类相互作用就不能用碰撞图像来描述,自然

这种长程相互作用所引起的物理现象也和输运大不相同,但它们仍然可以用动理学方法进行描述。这样等离子体的动理学理论也就比物质前三态(气、液、固)的要丰富得多。

为了描述的方便,往往把等离子体带电粒子间的相互作用以屏蔽库仑势中的德拜长度为界,在定性上分成两部分:粒子间距小于德拜长度的短程相互作用和粒子间距大于德拜长度的长程相互作用。对短程相互作用仍沿用中性粒子情况下的碰撞图像,但其定量描述要作一定的修改;而大量粒子参与的长程相互作用,则用自洽场(也称集体运动或波)的图像来描述。在许多等离子体中这两类物理过程的特征时间尺度和空间尺度往往相去甚远,因此可以分别加以研究。这样就形成了等离子体动理学理论的两大部分:碰撞和输运理论及自洽场的弗拉索夫理论。但对于某些等离子体现象,这两类相互作用无法在时间和空间尺度上加以区分,这时就需要把它们的影响一起加以考虑——这是一类比较复杂的动理学研究对象。在本课程的第一部分介绍了线性的弗拉索夫理论,在物理上所谓线性是指自洽场能量远小于粒子平均热能的情况。非线性的弗拉索夫理论不但定量描述起来很复杂,而且目前尚不成熟,只在第一部分的最后一章作了简单介绍。本课程的第二部分则介绍了碰撞和输运理论,并用其中的第十章(“电流驱动”)介绍了同时处理两种动理学效应的一个例子。

与流体描述相比,等离子体的动理学描述尤其是弗拉索夫线性理论的参考书非常多,内容也十分繁复。可以说,几乎所有的线性弗拉索夫本征值的色散方程都已被求出,剩下的工作就是根据研究对象从这些色散方程中找出合适的本征模(等离子体波),然后加以合理的解释。然而,这最后的一步却是最困难的一步,同时也是物理学家得以显示身手的地方。因此本教程试图以较少的篇幅介绍线性弗拉索夫问题可能提供的几种典型的解及其物理意义,详细给出若干常用的求解本征值问题的数学方法,以及一些具有代表性的、在研究工作中常遇到的稳定、阻尼及不稳定本征模的

性质。一些有意义、但数学处理过于繁重的本征值问题,本教程虽不予详细介绍,但也给出了参考文献。当然,这都是以本人有限的知识和经历来评价的,一定会有严重的疏漏之处。但根据以往的经验,在认真地学习了本教程后,读者应该具有足够的知识基础和自学能力,只要假以时日,就可以解决任何线性弗拉索夫问题。

对于等离子体中普遍存在、处理十分困难,而且有重要实际应用价值的湍动问题,本教程采取了有点实用主义的介绍方法。即回避了这些湍动的产生机制,而着眼于讨论以下的问题:对一个已经存在的湍动可能采取哪些数学方法去进行处理,然后又怎样从中得出有用的、反映湍动等离子体内部参量特性的定性和半定量的信息。这种介绍方式对大多数人来说可能效果更好。对等离子体湍动机制有兴趣的读者也可以在教材中找到入门的参考资料。

与物质的其他三态相比,等离子体还是一个十分年轻的研究领域,因此新的实验结果和理论方法还在不断涌现,希望教过和学过这本教材的同行们,能向作者指出其中错误、提出改进意见,使它能够跟上时代的步伐。

作 者

1999年3月1日于中国科学技术大学

原 跋

(电磁流体力学)

作为等离子体物理理论的研究和教学工作者,与物理学其他分支的理论工作者相比,总是缺乏成就感。这是因为,等离子体理论尽管做得十分辛苦,但结果总是和实验相差甚远;在最好的情况下也只能作到半定量(相差一个几倍的数值因子)的符合,一般能做到定性相符就算很成功了。而在动理学和电磁流体力学的两种描述中,后者和实验的相符程度又强于前者。

这种情况对于等离子体的实验工作者也一样存在,由于难以对等离子体内部物理状态做直接测量,也由于等离子体的相关物理量(自由度)远远多于其他多粒子体系(如固体、液体或气体);所以很难对它的状态做全面的测定,而能做的一些测量其精度又都不高,故等离子体的实验中往往用(医学中的)诊断而不是(其他物理分支中通用的)测量来命名其所得结果。另外,同一种类型的不同等离子体实验装置其结果往往不能完全重复,就是同一装置在相同的控制参数下得出的结果也不尽相同。因此,等离子体的实验研究也缺乏其他物理学分支的精确度。

这一切都使得人们在对等离子体性质的研究中付出的多而得到的少。但也正因为如此,从事等离子体物理研究的人们受到了更多的训练,比从事物理学其他分支研究的工作者,更善于在所得信息量不足和不准的情况下,尽可能精确地理解一个复杂体系的性质。而这种本领在 21 世纪的科学研究中却有可能是最具重要意义的。

人类对自然界和人类社会本身的认识过程,是一个从定性描述到定量描述的进步过程。近代科学研究,其实就是对研究对象作定量化描述。但是,在一定的历史阶段,适于定量描述的研究领域

往往只有一两个。在近代科学发展史上,最先被量化的学科是力学及数学本身,然后是物理学;这并不是人类的偏爱,而是因为它们的研究对象比其他学科要简单,从而更容易成为精确研究的样本。然而到 20 世纪末,人类用来了解自然的工具及知识储备都已经能够量化地描述更为复杂的学科。物理学作为领头学科的风光不再,新的重大科学发现愈来愈多地出现在生物、化学以及信息科学、环境科学的领域中。这些学科正从只能作定性或半定量描述的状态渐渐转入可以作定量描述的状态,因而得到愈来愈多的人力和物力投入。

但是,能对这些更加复杂的体系做定量描述,是得到了人类在数学、力学及物理学的研究中所积累的物质力量(包含各种先进的仪器、设备、计算能力)和知识(例如定量处理复杂体系的方法)的有力支持的。在物理学的各分支中,等离子体物理是最具可能来提供这种支持的学科。因为目前困惑等离子体物理研究的问题,也就是 21 世纪领头学科在量化描述时将会面临的问题。所以,当前在等离子体物理理论和实验中所积累的知识和经验就是一种宝贵的财富,可以被借鉴到广阔的科学研究领域中去。例如等离子体理论描述中广泛采用的“模型”法,就是在对复杂体系作定量描述时的一种有巨大潜力的研究方法。

在这样一种全新的观念下,我们对等离子体物理理论的学习一定会有全新的收获。

丁丑年处暑后二日秋虫啁啾之夜

名称“plasma(等离子体)”的由来^①

下面是一段对“plasma”这一英文词来历的介绍。其中文译名“等离子体”的本意是指这种物质形态中的正、负电荷大体相等,从而整体呈现准中性。但实际上,由大量非束缚带电粒子组成的、整体上呈正电性或负电性(如纯粹由正电子或电子组成)的多粒子体系也具有准中性体系相似的特性。本书所介绍的理论方法对描述这种“非中性等离子体”的行为也一样适用。因此“plasma”的上述中文译名就不但长了点,而且也不很贴切。目前家电业用“等离子电视”取代“等离子体电视”来作市场宣传,这个词虽不规范,但社会影响却不小。因此重新考虑一个合适的“plasma”中文译名已经刻不容缓。通过对“plasma”英文词源的了解,也许会对起个更加合适的中文译名有所启发。

等离子体(plasma)一词源于希腊语的 $\pi\lambda\alpha\sigma\mu\alpha$,若译成英语就是“to mold”,意味着像加工塑料制品那样将流体注入模具来实现成型。朗缪尔(Irving Langmuir, 1932年诺贝尔化学奖得主)注意到,辉光放电产生的电离气体也有这种成型特性,并于1928年把这种电离气体命名为“plasma”。他的合作者 Tonks 在他的一篇论文(Am. J. Phys., 35 (1967), 857 页)中,这样生动地讲述了这个名词的由来:

Langmuir came into my room in the General Electric Research Laboratory one day and said “Say, Tonks, I’m looking for a word. In these gas discharges we call the region in the immediate neighborhood of the wall or an electrode a sheath, and

① 摘自:〔日〕菅井秀郎,《等离子体电子工程学》,科学出版社,2002,北京,第4页。