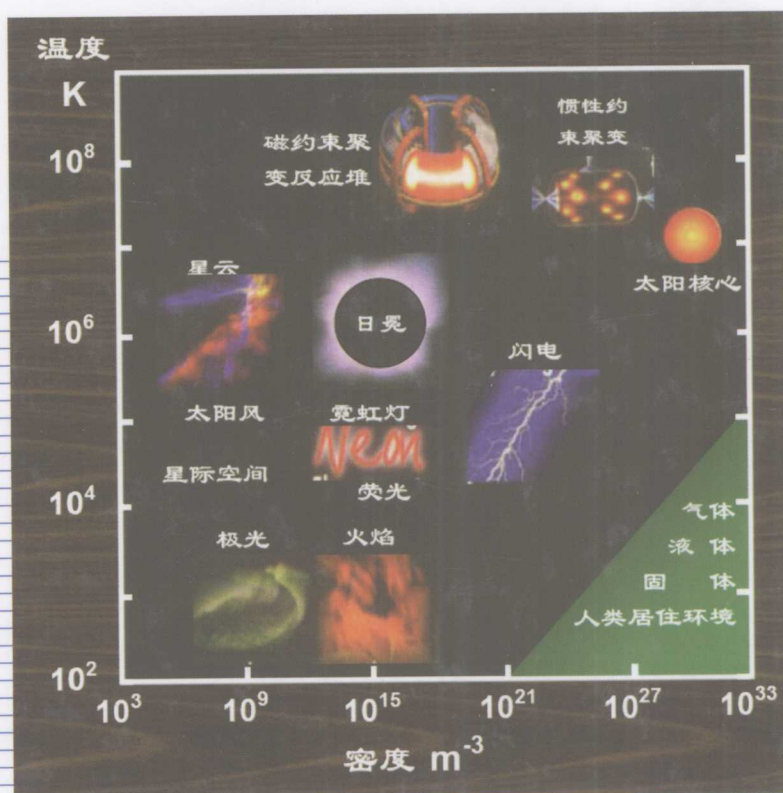


现代太阳物理丛书

等离子体动力学 及其在太阳物理中的应用

黄光力 编著



科学出版社

www.sciencepress.com

现代太阳物理丛书

等离子体动力学 及其在太阳物理中的应用

黄光力 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书将基本理论和天文应用相结合, 根据太阳物理深入发展的需求, 侧重介绍了等离子体动力学理论框架及其与磁流体力学基本方程的关系。系统推导了等离子体动力学的线性理论(包括色散关系和微观不稳定性)及其在太阳射电物理中的应用实例。并通过若干个例, 列举了非线性等离子体动力学理论的基本类型及其在太阳物理中的应用。最后对等离子体动力学所涉及的几个重要问题进行了专题讨论。为了便于研究生学习和掌握本书的内容, 各章均设置了一些习题。

本书可作为太阳物理, 特别是太阳射电物理的研究生和研究人员的入门书和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

等离子体动力学及其在太阳物理中的应用/黄光力编著. —北京: 科学出版社, 2009

(现代太阳物理丛书)

ISBN 978-7-03-024925-8

I. 等… II. 黄… III. 等离子体动力学-应用-太阳物理学-研究
IV. O53 P182

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009) 第 111855 号

责任编辑: 胡 凯 刘凤娟/责任校对: 陈玉凤

责任印制: 钱玉芬/封面设计: 黄华斌

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 8 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2009 年 8 月第一次印刷 印张: 11

印数: 1—2 000 字数: 207 000

定价: 48.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈双青〉)

《现代太阳物理丛书》序言

现在呈现给读者的,是由我国太阳物理学界同仁编著的系列学术专著——《现代太阳物理丛书》。它覆盖当代太阳物理研究的主要前沿领域,汇集了太阳物理学的主要观测发现和理论成就,反映了近年太阳物理研究的最新进展,包括我国学者的贡献。

太阳是一颗普通的恒星。在显示恒星分类的赫罗图,即光谱型和光度分布的散布图上,太阳位于主序星的中部,光谱型是 G2V。就恒星参数而言,太阳在组成宇宙的恒星大家庭中极其普通。正因为这样,研究太阳对认识恒星的形成、演化、内部结构和外层大气有典型的意义。另一方面,太阳是离地球最近的恒星,为我们提供了足够的亮度,使其成为一颗唯一可被高空间分辨、高时间分辨、高光谱分辨,并且有高灵敏度观测的恒星。众所周知,夫琅禾费太阳光谱研究和原子谱线塞曼分裂对黑子磁场的诊断,实际上标志了近代天体物理学的发端。太阳物理研究涉及粒子物理、量子辐射理论、等离子体物理、流体和磁流体力学、计算物理等基础物理学科。

太阳研究的唯一性还在于,它在自己的第三颗行星——地球上孕育了智慧的人类。太阳是决定人类生存的日地环境的母体。太阳至少 30 亿年来一直保持稳定的光度。同时,激烈的太阳活动及其周期变化,又影响和调制着人类生存的环境。在人类活动早已扩展到地球之外的今天,研究太阳活动又成为认识人类地球外的可居住性和预报日地环境中灾变事件的基本要求。众所周知,不息演化的太阳磁场在巨大的空间尺度产生不稳定性 and 灾变过程。太阳耀斑释放的磁能相当于几十亿次核爆炸的能量;而由磁场驱动的日冕物质抛射,每次将数十亿吨的磁化等离子体抛入日球空间。激烈的太阳活动引起地球磁场和电离层强烈的扰动,导致短波无线电通信中断、供电系统破坏、长距离输油管道过早损坏、空间飞行器发生故障、宇航人员健康受到伤害以及远距离导航失灵等破坏性事件。实时地监视和预报太阳活动事件及其对人类环境的影响,已经成为太阳物理工作者和日地物理工作者的一个最富有挑战性的任务。组织这套丛书的目的之一,是为研究空间环境,提供更好的观测和理论基础。

早在公元前 28 年,中国就有了目视太阳黑子的正式记录。曾经创造了灿烂文化的中华民族,为世界天文学的发展作出了重要的贡献。当 1987 年,由中国天文学家独立研究和创造性发展的中国太阳磁场望远镜投入工作,中国的现代太阳研究开始步入国际前沿领域。在中国改革开放的今天,随着综合国力的增加,“发展

空间天文，探索太阳奥妙”的新的任务，又历史地落在当代中国太阳物理学者的身上。这套丛书的撰写和出版，是中国太阳物理学家成熟的标志，也是中国太阳物理学家信心的象征。中国的太阳物理和日地物理工作者有能力抓住机遇，面临新世纪的挑战，为在科学技术领域再创辉煌作出自己的贡献。

艾国祥

1998年6月

自序

出版本书的动机之一是,本人在 2006 年 11 月份参加海峡两岸第七届空间物理研讨会时,国际知名等离子体物理学者、美国加州大学陈骝教授告知,为了解决人类能源短缺的问题,全球热核聚变领域正面临重大的发展机遇,包括中国和欧、美、日等多国合作的国际热核聚变实验反应堆 (ITER) 计划已于近期立项。我国教委为了配合该项目的研究,将大力推动各高校的等离子体物理基础教育。考虑到自己早年曾在热核聚变领域完成硕士论文,之后转入太阳物理领域工作二十余年,深切体会到等离子体物理在太阳物理研究中的重要性;近年来,作者在南京大学天文系开设了等离子体动力学的研究生课程,感到有必要结合自己的工作以及讲课中的体会和收获,为我国太阳物理研究人员和研究生编写一本关于等离子体动力学理论及其在太阳物理中的应用的参考书。

促使自己写作本书的另一原因是,在太阳物理现有的观测条件下,空间和地面望远镜的分辨能力还远远不能达到等离子体特征尺度即德拜长度的量级,因而太阳物理研究主要集中在宏观的磁流体力学的尺度,相应的理论研究大多不涉及微观带电粒子的基本物理过程,而是更加侧重于理论与大尺度观测现象的比较和解释。值得注意的是,近年来太阳物理的观测 (特别是空间卫星的观测) 得到高速的发展,很多太阳物理学者逐渐认识到,研究等离子体物理微观过程将成为太阳物理深入发展的必由之路。近年来,除了传统的磁流体力学数值模拟之外,对微观等离子体过程的粒子模拟和弗拉索夫模拟也已得到太阳物理学者的广泛重视。必须指出,尽管磁流体力学的方程来源于等离子体物理的基本方程 (在本书中将对两者的关系作详细介绍),但是两者已经形成了各自独立的理论体系,并具有完全不同的时空尺度和研究对象。对此,在等离子体物理学科中已有明确的界定*。在热核聚变等多数领域以等离子体动力学作为等离子体带电粒子分布函数的基本理论,从而区别于磁流体力学的理论范畴;等离子体物理通常是指等离子体动力学,在有些教科书中也包含了磁流体力学,本书内容仅限于等离子体动力学 (关于等离子体动力学还有另外两种常用的中文表述:等离子体动力论或等离子体动理论;与等离子体动力学和磁流体力学对应的英文名词分别是 plasma kinetic theory 和 magnetohydrodynamics)。

还有一点需要说明的是,等离子体动力学涉及的内容很多;本书的主要目的是把基本概念、基本方程的来龙去脉以及在线性近似下求解等离子体色散关系、波和

* 蔡诗东,等. 物理学词典 —— 等离子体物理学分册, 1984.

不稳定性等最基础性的内容讲清楚。另外,考虑到太阳物理的实际情况,其观测信息主要来源于电磁波段的辐射;因而不可能像实验室或空间卫星那样对等离子体参数进行实地的和重复的测量;也就是说,在太阳物理现有的观测条件下,还不可能像实验室那样对等离子体基本物理过程进行直接的和主动的测量。因此在本书中,对一些和太阳物理目前的研究关系不太紧密的内容(如输运理论等)仅作较简单的介绍。等离子体动力学还有一项很重要的内容,就是非线性理论,而等离子体本身就是一个复杂的非线性系统。但考虑到非线性等离子体物理还有很多尚未解决的问题,相对于线性理论而言,至今尚未形成完整的理论体系,另外考虑到本书篇幅的限制和太阳物理对该理论的实际需求,本书将对非线性理论的一些基本类型进行一般性的介绍,然后给出若干个例加以说明。

关于书名中提及的等离子体动力学在太阳物理中的应用也是本书的一个重要的主题。从目前的实际情况来看,等离子体动力学理论在太阳物理中主要应用于辐射和粒子加速等方面的研究,相对于实验室和空间等离子体物理来说比较薄弱。本书一方面强调等离子体动力学是等离子体物理(包括磁流体力学)的基础,另一方面对等离子体动力学的线性和非线性理论的介绍均与太阳物理(特别是射电观测)有密切的联系。从而力图把理论、方法和应用在本书中融为一体,大力推动我国太阳物理学者和研究生深入了解和使用等离子体动力学这一理论工具。在以往的学习和工作中,本人积累了一些等离子体动力学的推导方法(包括求解等离子体色散方程、未扰轨道积分以及部分正式发表的论文),这与其他教科书的理论体系相比有所不同,它更为简捷也更易于被研究生和初学人员所掌握,这也是本书的一个特点。当然,本书也包含了作者个人对等离子体物理和太阳物理的一些理解和看法,希望和所有的读者进行探讨;有错误之处,也请各位同行不吝赐教。还要请读者注意的是:为了便于和参考书作比较,本书中物理量的量纲采用高斯和国际两种单位制,并在每一章的开始注明所用的量纲。另外,为了便于研究生掌握此书内容,在每一章后面给出了若干习题。

最后,我要衷心感谢国家天文台汪景琇研究员主持的国家 973 项目“日地空间灾害性天气的发生、发展和预报研究”(编号:2006CB806300)和子课题“空间灾害性天气的耀斑因素研究”(编号:2006CB806302)对本书在科学出版社出版的支持,并列为艾国祥院士主编的现代太阳物理丛书之一。本书的相关研究成果也得到了国家自然科学基金委员会的支持,包括作者近年来主持的重点项目“射电爆发频谱及其物理机制”(编号 19833050)、“日冕爆发的射电信号和等离子体过程”(编号 10333030)和面上项目“日冕磁场能量释放中的非线性等离子体过程的研究”(编号:10773032)等。

目 录

第 1 章 前言	1
参考文献	6
第 2 章 等离子体的定义	7
2.1 德拜长度和准中性条件	7
2.2 德拜球中的粒子数条件	8
2.3 中性粒子和带电粒子的碰撞频率	9
本章习题	10
参考文献	11
第 3 章 等离子体动力学的基本方程	12
3.1 引言	12
3.2 Klimontovich-Dupree 方程	12
3.3 无碰撞的弗拉索夫方程	14
3.4 玻尔兹曼方程 (短程碰撞)	17
3.5 福克尔 - 普朗克方程 (库仑碰撞)	19
本章习题	20
参考文献	20
第 4 章 磁流体力学方程的推导	21
4.1 动力学方程的矩方程	21
4.2 双 (多) 流体方程	22
4.2.1 连续性方程	22
4.2.2 运动方程	23
4.2.3 能量输运方程	24
4.2.4 双 (多) 流体方程组	25
4.2.5 碰撞项的性质	26
4.3 磁流体力学方程	27
4.3.1 磁流体的质量密度、平均速度、电荷密度和电流密度	27
4.3.2 磁流体连续性方程	28
4.3.3 磁流体运动方程	28
4.3.4 广义欧姆定律	29
4.3.5 磁流体力学方程	30

4.3.6 简化的磁流体力学方程	30
本章习题	32
参考文献	32
第 5 章 “冷”等离子体色散方程	33
5.1 双流体方程的线性化	34
5.2 推导色散关系所必需的三个张量	35
5.2.1 电导率张量	35
5.2.2 介电张量	37
5.2.3 色散张量	38
5.3 “冷”等离子体色散方程	39
5.3.1 一般形式	39
5.3.2 两个重要的特例	40
5.3.3 几种常见的“冷”等离子体波	42
5.4 “冷”等离子体色散曲线	47
5.4.1 几种典型的色散曲线	47
5.4.2 截止频率和共振频率	50
5.4.3 背景等离子体参数的影响	52
本章习题	54
参考文献	55
第 6 章 等离子体动力学色散方程	56
6.1 未扰轨道积分	56
6.1.1 弗拉索夫方程的线性解	57
6.1.2 未扰轨道的选择	58
6.2 电导率张量	60
6.2.1 电导率张量的一般形式	60
6.2.2 电导率张量的各个分量	61
6.2.3 电导率张量的复对称性	68
6.3 介电张量和色散张量	70
本章习题	71
参考文献	71
第 7 章 共振 (相干) 不稳定性	72
7.1 电子回旋脉泽不稳定性 —— 共振不稳定性	73
7.1.1 不稳定性增长率的近似表达式	74
7.1.2 介电张量的反 Hermitian 分量	75
7.1.3 “冷”等离子体色散张量的伴随张量	76

7.1.4	常用的非热带电粒子的分布函数	77
7.1.5	速度空间的共振条件	80
7.1.6	电子回旋脉泽不稳定性增长率	82
7.1.7	回旋共振吸收	83
7.1.8	理论计算的结果	84
7.1.9	和经典回旋同步辐射机制的关系	87
7.2	太阳毫秒级射电尖峰辐射的解释	90
7.2.1	一般特征	90
7.2.2	寿命	90
7.2.3	带宽	92
7.2.4	偏振	95
7.2.5	谐波结构	96
7.2.6	尖峰辐射的日冕高度	99
7.2.7	尖峰辐射的日面位置和源参数	100
	本章习题	104
	参考文献	104
第 8 章	反应 (非相干) 不稳定性	106
8.1	直接求解色散方程的方法	107
8.1.1	经典的 Buneman 不稳定性	107
8.1.2	双流不稳定性和朗缪尔波	108
8.1.3	修正后的双流不稳定性	109
8.1.4	温度和束流的变化对双流不稳定性的影响	110
8.2	在共振条件附近展开的方法	114
8.2.1	与电子回旋脉泽不稳定性比较	114
8.2.2	弱磁化近似下的增长率	114
8.2.3	增长率的计算和讨论	117
8.3	束流不稳定性增长率的解析表达式	122
8.4	理论和观测的比较	125
8.4.1	米波 III 型射电爆发的观测特征	125
8.4.2	III 型射电爆发的经典理论	126
8.4.3	用束流不稳定性直接放大电磁波解释 III 型射电爆发	131
	本章习题	136
	参考文献	136
第 9 章	非线性等离子体物理	138
9.1	例一: 有质动力和非线性朗道阻尼	139

9.1.1 线性朗道阻尼	139
9.1.2 非线性朗道阻尼和有质动力	141
9.2 例二: 电磁孤波理论	142
9.2.1 线性色散方程的弱磁化近似	143
9.2.2 非线性项的导出	144
9.2.3 非线性波动方程和孤波解	145
9.2.4 和太阳观测的比较	146
9.3 例三: 损失锥分布的形成	148
9.3.1 基本方程和边界条件	148
9.3.2 各向同性注入的粒子源	150
9.3.3 任意角度注入的粒子源	151
9.3.4 捕获粒子的注入深度	152
9.3.5 初始投射角对太阳硬 X 射线和微波足点发射的不对称性的影响	153
本章习题	156
参考文献	156
第 10 章 若干问题的讨论	158
10.1 等离子体动力学和磁流体力学的关系	158
10.2 速度和位置的不同层次	159
10.3 速度空间的共振和相干辐射	159
10.4 准线性理论和等离子体动力学的关系	160
10.5 线性和非线性的关系	162
10.6 解析和数值方法的关系	162
本章习题	163
参考文献	163
后记	164

第 1 章 前 言

众所周知,当组成物质的各种成分具有一定的电离度,或者说当物质中包含一定数量的处于自由状态的带电粒子,并满足某些必要的物理条件时,带电粒子的集体行为,即由这些带电粒子和环境参数共同决定的各种静电或电磁波动模式,将决定该物质的最基本的属性。我们可以把处于上述状态的物质称为等离子体,或者是除固态、液态和气态之外的物质的第四态。关于等离子体必须满足的物理条件和等离子体带电粒子的集体行为,包括各种特征波动及其不稳定性的性质,将在本书中作系统的介绍。应该强调的是,等离子体不仅包含组成物质的带电(中性)粒子,而且包含其特征波动;也就是说,等离子体是由各种带电(中性)粒子及其波动组成的复杂的非线性系统。

等离子体物理学是一门十分年轻的学科,大约起始于 20 世纪中期。其发展动力之一是,人类能源的短缺和由此产生的对新型能源的迫切需求,从而导致热核聚变等离子体物理学科的迅速发展。该学科发展的另一原动力来自于,人类对太空特别是对太阳系和近地空间的探索,并逐渐形成了空间等离子体物理这样一个新兴的领域。在天文学科中,以太阳为代表的恒星外层大气处于高温等离子体状态,因此等离子体物理在太阳以及类太阳恒星、中子星、脉冲星乃至行星、彗星等各种天体的研究中起重要的作用。还有一部分和人类生活非常密切的等离子体领域是所谓低温等离子体物理,其中包括了固态和尘埃等离子体,也是目前等离子体物理的重要组成部分。下面将分别就热核聚变、空间和低温等离子体等领域研究作扼要的介绍,而对与本书密切相关的太阳等离子体物理的研究,则将作比较详细的评述。

根据地球上的已经探明的矿床储量和人类现有的能源消耗速率的上限,可以得到以下令人思考的系列数字^[1]:现有的石油和煤矿资源仅可供人类使用一百年左右,即便是高效的裂变核能原料——铀矿也仅可供人类使用两到三百年。目前可以期待的新能源之一是可控热核聚变所蕴含的巨大能量,根据海水中含有的核聚变所需的氘的总量估计,足可供人类使用几百甚至几千万年。关于可控热核聚变的主要装置——托克马克的研究起始于前苏联,其基本思路是使强磁场约束的高温高密等离子体达到热核聚变所需要的(点火)条件。在可控热核聚变的实验研究开展的同时,相应的理论研究在近几十年中得到了长足的发展。目前磁约束聚变的实验已进展到一个关键阶段,即能否从热核聚变的实验中获取净余的能量,或者说使输出能量大于输入能量,这就是前言中介绍的 ITER 计划的主要科学目标。由于

可控热核聚变的实验需要投入巨资,而且是为了全人类的利益和时间极为紧迫的一项事业,所以必须采用国际合作的方式,对于有关的实验结果(包括相应的理论成果),在国际上是完全公开的。实际上,可控热核聚变还有一些其他可能的途径,例如,激光聚变、惯性约束聚变等;尽管约束方式不同,最终都必须满足与磁约束聚变类似的点火条件,但和实际的应用目标仍相距甚远,这里就不一一细述了。

上述可控热核聚变(包括低温等离子体实验)的研究内容可以统称为实验室等离子体物理,和通常的物理实验一样,所有的实验参数都是可以控制的,并可对其进行实时实地的测量,或者按照核聚变领域的习惯,称之为等离子体参数的诊断,这是用以决定等离子体实验结果及其理论解释的一个重要环节。由于实验空间有限,而诊断装置本身的体积也不可能做到无限小,由此可决定等离子体参数诊断的空间分辨率,而各种高精度的时间定标可在实验中实现很高的时间分辨率。实验室等离子体研究的另一特点(不同于天文研究)是实验的可重复性,无论是对可控核聚变本身的规律,还是对等离子体物理的基本过程,在实验和理论方面均可进行系统和循序渐进的研究,所取得的结果对等离子体物理的进展是至关重要的。除此之外,国内外的实验室也开展了有关太阳和空间等离子体基本过程的模拟实验,在一定程度上可以克服太阳和空间等离子体间接观测的不确定性和不可重复性以及只能进行被动实验的局限性。

从与人类活动息息相关的气象、通信,到近年来引起广泛关注的空间天气学及其对航天航空的影响,乃至能源、国防等战略需要,人类对地外空间的探索已成为世界各国重点关注的目标,并纷纷投入巨大的人力物力。空间探索的首要目标显然是以日地空间为核心的太阳系和行星际空间;由太阳风和行星际磁场、行星自身的磁场和电离层,及其相互作用形成复杂的边界层成为空间等离子体物理研究的主要对象^[2]。就空间观测(实验)的条件而言,大体介于天文和实验室之间。一方面,空间卫星可对当地等离子体参数进行直接和实时实地的测量,而且测量精度已接近或达到等离子体特征尺度即德拜长度的量级,从而可以直接获得等离子体基本过程(如带电粒子的能量分布)等信息,这一特点明显优于天文观测的条件。另一方面,我们仍然不能像实验室那样,对空间等离子体参数和物理过程进行重复和主动的测量;此外,除了少数(如 Clusters 卫星组合以及我国的双星计划)能实现日地空间的多点坐标测量之外,在大部分情况下,单个卫星只能沿卫星运行轨道测量卫星附近的等离子体参数及其时变过程,因此,仍无法直接确认空间等离子体结构的真实存在,并区别于某种原因导致的时间变化。

一般来说,空间等离子体的实验和理论研究的深入和系统程度可能要好于天文(包括太阳物理)。当然,上述讨论并不是说太阳等离子体物理研究的水平就低于实验室和空间等离子体物理。实际上,太阳或者其他天体等离子体的特征尺度、边界条件、物理参数乃至需要解决的问题和实验室及空间等离子体有很大的区别;此

外,实验室及空间等离子体研究有明显的应用目标,理论研究常常会受到解决实际问题的需求或约束;相对而言,太阳或其他天体等离子体研究具有更大的自由度,即使对同一现象而言也可以存在完全不同的理论模型和争论,这样更有可利于激发新的物理思想。总之,热核聚变、空间和天体等离子体物理这三个领域的研究还是可以互相裨益和互相补充的;特别是对等离子体基本过程的研究而言,三个领域的研究人员也应该相互关注不同领域的进展情况。

关于低温等离子体物理,主要包括辉光放电、固态等离子体以及近年来兴起的尘埃等离子体物理。其研究内容和目的更加接近于应用科学的范畴,就其研究的系统性和一般性而言,可能会弱于此前讨论的热核聚变和空间等离子体物理,甚至太阳(天体)等离子体的情形。尽管如此,辉光放电仍然是早期乃至目前研究等离子体基本物理过程的实验手段之一。另外,尘埃等离子体的研究预期对行星际和星际尘埃的性质可能具有重要的意义,在这里就不一一细述了。感兴趣者可参考有关的书籍^[3]。尽管高温和低温等离子体的参数、研究目标和对象有很大区别,但其基本概念(如等离子体的定义)、基本规律和处理问题的基本方法仍然是一致的。

下面以太阳等离子体物理为例,着重介绍天体等离子体物理的研究现状。如本书序言所述,由于目前太阳的观测条件局限于大尺度的唯象的研究,理论上主要适用于磁流体力学的范围,然而实际上任何宏观或唯象理论必然包含而且最终归结于某些基本物理过程的研究,一个重要的例子是磁场重联(即磁场拓扑结构的重组)。众所周知,太阳活动的能量来自于太阳大气中的磁场,即由磁场的能量转化为太阳大气中的等离子体的热能和动能,从而激发耀斑和日冕物质抛射等太阳活动现象。磁场重联在上述能量转化过程中发挥关键的作用,尽管目前太阳观测的分辨能力尚未达到磁场重联的尺度,但在磁流体力学的范围已经对磁场重联过程进行了相当深入的研究^[4]。现可确认磁场重联导致等离子体温度的升高(加热)和整体的运动,也可产生带电粒子加速所需要的电场、激波和各种等离子体波动。问题是最终确定带电粒子行为的理论(无论是加速或加热)已超出磁流体力学所能解决问题的范围;或者说,必须采用等离子体动力学的方法才能彻底解决这些问题。另外,磁能转换的关键在于等离子体的耗散机制。为了提高磁场重联速率或磁能转换的效率,通常需要引入反常电阻的概念(由等离子体波动模式决定的等效电阻),这也是一个典型的等离子体集体行为,亦已超出磁流体力学的研究范围,必须采用等离子体动力学才能解决。在以往的磁流体力学的框架里,大多是给定一个假设的反常电阻的大小和位置,然而无法自洽的证明(或者从观测提供)其存在的依据,这也是现有磁场重联理论中隐含的缺陷(近期已开始有关磁场重联的粒子模拟和弗拉索夫模拟)。

由此可见,对太阳物理而言,等离子体动力论的研究目标是在太阳大气的物理条件下,确定各种等离子体集体波动的模式(即导出线性或非线性波动的色散方

程) 以及这些模式的线性或非线性不稳定性的演化规律。在此基础上, 进一步研究太阳等离子体中的磁场重联, 及其产生的辐射、加速 (热) 等基本物理过程。下面分别介绍等离子体波和不稳定性、辐射、加速 (热) 等和太阳物理直接相关的理论问题的研究现状, 从而了解等离子体动力学是如何应用于太阳物理, 及其在太阳物理研究中的重要性。

等离子体波和不稳定性不仅是太阳等离子体也是其他等离子体物理研究的基础, 因而成为本书要系统介绍的内容。这里所指的波和不稳定性并不包括大尺度磁流体力学波和不稳定性 (如扭曲模等)。等离子体物理学以统计力学和电动力学为基础, 用大量粒子的分布函数所满足的方程 (例如, 无碰撞的弗拉索夫方程、或带电粒子库仑碰撞的福克尔-普朗克方程、或带电粒子和中性粒子碰撞的玻尔兹曼方程), 来描述这些粒子在六维相空间 (位置和速度) 的统计规律, 同时, 由这些粒子的分布所决定的电磁场受到麦克斯韦方程组的制约, 反过来又会作用于这些带电粒子并影响其统计分布的规律。因此, 等离子体物理原则上是要联立求解统计力学和电动力学的基本方程, 其数学和物理上的复杂程度达到经典物理之最。研究等离子体波和不稳定性通常是从基本方程出发, 对系统的平衡态加入小扰动并逐级展开; 如果仅保留最低阶的扰动量, 则可使系统线性化, 从非零解存在的必要条件导出色散方程, 进而得到等离子体波和不稳定性的线性解, 这一方面的理论是比较成熟的, 但仍有发展的余地。另一方面, 如果在微扰处理中保留较高阶的扰动量, 将会导致一系列复杂的非线性的波-粒子和波-波相互作用, 例如, 有质动力^[5]、孤波^[6]、有限维的分叉和混沌^[7]、无限维的湍流^[8]等, 到目前为止, 与线性理论相比, 非线性理论尚无成熟的体系。本书将系统介绍等离子体波和不稳定性的线性理论, 并介绍非线性处理的基本类型和处理方法的个例。

天文学观测基于各种天体产生的全波段的电磁辐射, 并从这些辐射的观测性质出发, 反演各种天体的基本属性。因此, 天体辐射理论是天文学研究的最重要的基础理论。关于单个或一群互相独立的自由带电粒子的辐射, 在电动力学的课程中已有介绍, 例如, 回旋辐射、韧致辐射、切连科夫辐射等^[9]。对处于束缚状态的带电粒子所产生的跃迁辐射, 则需要量子力学的理论来解决。在天体等离子体中, 无论上述何种辐射机制产生的电磁波, 都必须满足相应的等离子体色散方程, 即受到所谓等离子体集体行为的规律的制约。更为重要的是, 某些等离子体集体行为会导致全新的辐射过程的产生。例如, 在等离子体频率附近的朗缪尔振荡或朗缪尔波, 可能会通过复杂的物理过程转化为电磁辐射, 在射频范围形成全新的等离子体辐射机制^[10], 这是目前解释太阳射电爆发的重要机制之一。又如, 带电粒子的自由能不仅产生自发的辐射, 还有可能激发某些等离子体不稳定性, 进而放大包括电磁波在内的某些等离子体波动; 比较熟知的一个例子是电子回旋脉泽不稳定性^[11], 作为一种波-粒子共振的等离子体集体行为, 其放大的电磁波具有窄频带和快速增长

的特性,并被称之为受激或相干的集体辐射。上述机制是经典电动力学和量子力学所无法预期的。除此之外,一些低频的等离子体电磁或静电波(如阿尔文波、哨声波、低混杂波等),虽然不能传出日冕而被我们直接观测,却有可能通过等离子体密度或磁场的调制^[12]、或非线性波-波相互作用的调制^[13]、或非线性电磁孤子^[14]等过程,产生电磁波振幅的准周期变化。

粒子加速(热)机制是太阳物理乃至整个天体物理领域的一个重要的理论问题^[15],加速和加热往往是同时发生且不可分割的两个物理过程。在太阳磁场能量的释放中,高能粒子占有相当的能量份额,同时也是导致全波段电磁辐射增强的主要原因之一。问题在于,一方面,我们目前还无法直接探测太阳表层大气中的带电粒子,只能从太阳辐射与相关机制进行反演;同时也无法对加速(热)带电粒子的驱动源(如电场、激波,和可能对粒子加速和加热有贡献的等离子体波动)进行直接测量;由此导致了研究加速(热)机制的不确定性。另一方面,在处理等离子体波和不稳定性的微扰方法中,通常假定只有很小一部分带电粒子的自由能转化成为等离子体波和不稳定性的能量,或者说带电粒子的分布函数仅受到一个小的扰动,所有的物理量都是对平衡态附近的一个很小的偏离。即使在考虑非线性效应而保留高阶微扰量时,上述假定仍然有效,从而无法预期带电粒子分布函数演化的完整信息。因此,微扰方法主要适用于处理等离子体波和不稳定性,在处理粒子加速(热)这一类问题时,则必须采用不同的方法,即把带电粒子分布函数所满足的方程(例如,无碰撞的弗拉索夫方程、或带电粒子和中性粒子碰撞的玻尔兹曼方程以及带电粒子之间碰撞的福克尔-普朗克方程)和等离子体波所满足的麦克斯韦方程组联立求解。因此,粒子加速(热)是等离子体动力学最为复杂的问题之一,既要解决带电粒子分布函数长时间演化所不可避免的非线性效应,又要自洽地考虑在此过程中出现的各种等离子体波和不稳定性,及其对带电粒子加速(热)和反常电阻的贡献。

一般来说,对这些复杂问题只能采用数值求解的方法,而数值求解除了要解决计算方法的困难,还要受到计算时间和计算机能力的限制。目前一种有效的方法,即所谓粒子模拟的方法,在一定程度上可以克服上述困难。假设大量粒子的统计行为可以用这些粒子的牛顿力学方程来描述,即可求解有限个带电粒子满足的运动方程即牛顿力学方程,同时这些带电粒子的分布和运动所决定的电荷和电流又反过来作用于这些带电粒子,通过这样的循环反复计算得到或逼近和等离子体动力学相等价的结果。粒子模拟的方法经过数十年的积累,已经形成解决不同问题的比较成熟的方法体系,甚至比直接求解等离子体动力学方程来得更加简洁可行。当然,粒子模拟也有本身的局限,例如,带电粒子的数量(包括计算的时间和空间步长)仍受到计算能力的限制。人们通常会采用“准粒子”的概念,即一个准粒子代表若干数量的真实粒子,然而这样也会导致粒子模拟和真实物理系统之间的差异。

有关粒子模拟的具体方法可以参考有关的书籍^[16]。

参 考 文 献

- [1] 宫本健郎. 热核聚变等离子体物理学 [M]. 金尚宪. 译. 北京: 科学出版社, 1981.
- [2] 涂传诒, 等. 日地空间物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [3] 金佑民, 樊友三. 低温等离子体物理学基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1983.
- [4] 王水, 李罗权. 磁场重联 [M]. 合肥: 安徽教育出版社, 1999.
- [5] 哈瑟加瓦. 等离子体不稳定性及非线性效应 [M]. 王水. 译. 北京: 科学出版社, 1981.
- [6] 王德焯, 吴德金, 黄光力. 非线性科学丛书: 空间等离子体中的孤波 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2000.
- [7] Anastasios A T. Chaos-from theory to application[M]. New York: Plenum Press, 1992.
- [8] 李晓卿. 湍动等离子体物理 [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1987.
- [9] 尤俊汉. 天体物理中的辐射机制 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [10] Ginzburg V L, Zheleznyakov V V. On the possible mechanisms of sporadic solar radio emission (Radiation in an isotropic plasma)[J]. Sov Astron, 1958, 2: 653-666.
- [11] 吴京生, 陆全康. 电子回旋激射不稳定性: 一种射电机制 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1991.
- [12] Roberts B, Edwin P M, Benz A O. Fast pulsations in the solar corona[J]. Nature, 1983, 305: 688-690.
- [13] Wang D Y, Li D Y. Nonlinear parametric instability and millisecond solar radio spikes[J]. Solar Physics, 1994, 135: 393-401.
- [14] Huang G L. A intrinsic relation between envelope soliton and plasma instability[J]. J Plasma Physics, 2000, 64: 249-254.
- [15] Aschwanden M. Particle acceleration and kinematics in solar flares[J]. Space Science Review, 2002, 101: 1-227.
- [16] 邵福球. 等离子体粒子模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.