

● 非线性科学丛书 ●

空间等离子体中的孤波

王德焄 吴德金 黄光力 编著

上海科技教育出版社

本书出版由上海市新闻出版局
学术著作出版基金资助

非线性科学丛书

空间等离子体中的孤波

王德炷 吴德金 黄光力 编著
刘寄星 审阅

上海科技教育出版社

内 容 提 要

本书是非线性科学丛书中的一种,介绍空间和天体等离子体中的孤波,着重介绍空间等离子体中出现的离子声波、动力学阿尔文波、磁声波等的 KdV 型孤波;朗缪尔波、低混杂波、哨声波等的包络形孤子,以及阿尔文涡旋结构的最新研究进展。本书可供理工科大学教师、高年级学生、研究生、博士后阅读,也可供自然科学和工程技术领域中的研究人员参考。

本书由刘寄星审阅。

图书在版编目(CIP)数据

空间等离子体中的孤波/王德熇 吴德金 黄光力编著.

—上海:上海科技教育出版社,2000.12

(非线性科学丛书/郝柏林主编)

ISBN 7-5428-2405-8

I. 空… II. ①王…②吴…③黄… III. 等离子体-孤立波-研究 IV.0534

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第48415号

非线性科学丛书

空间等离子体中的孤波

王德熇 吴德金 黄光力 编著

刘寄星 审阅

上海科技教育出版社出版发行

(上海冠生园路 393 号 邮政编码 200233)

各地新华书店经销 商务印书馆上海印刷厂印刷

开本 850 × 1168 1/32 印张 6.75 字数 172 000

2000 年 12 月第 1 版 2000 年 12 月第 1 次印刷

印数 1—2 000

ISBN 7-5428-2405-8/O·274 定价:(精装本) 16.50 元

Advanced Series in Nonlinear Sciences

Solitary Waves in Space Plasma

Wang Deyu Wu Dejin Huang Guangli

Purple Mountain Observatory,
Academia Sinica,
Nanjing 210008, China

Shanghai Scientific and Technological Education
Publishing House, SHANGHAI, 2000

非线性科学丛书编辑委员会

主 编：郝柏林

副主编：郑伟谋 吴智仁

编 委：(按姓氏笔画为序)

丁 鄂 江	文 志 英	朱 照 宣
刘 式 达	刘 寄 星	孙 义 燧
杨 清 建	李 邦 河	张 洪 钧
张 景 中	陈 式 刚	周 作 领
赵 凯 华	胡 岗	顾 雁
倪 皖 荪	徐 京 华	郭 柏 灵
陶 瑞 宝	谢 惠 民	蒲 富 恪
霍 裕 平	魏 荣 爵	

出版说明

现代自然科学和技术的发展,正在改变着传统的学科划分和科学研究的方法。“数、理、化、天、地、生”这些曾经以纵向发展为主的基础学科,与日新月异的新技术相结合,使用数值、解析和图形并举的计算机方法,推出了横跨多种学科门类的新兴领域。这种发展的一个重要特征,可以概括为“非”字当头,即出现了以“非”字起首而命名的一系列新方向和新领域。其中,非线性科学占有极其重要的位置。这决非人们“想入非非”,而是反映了人类对自然界认识过程的螺旋式上升。

曾几何时,非线性还被人们当作个性极强,无从逾越的难题。每一个具体问题似乎都要求发明特殊的算法,运用新颖的技巧。诚然,力学和数学早就知道一批可以精确求解的非线性方程,物理学也曾经严格地解决过少数非平庸的模型。不过,这些都曾是稀如凤毛麟角的“手工艺”珍品,人们还没有悟出它们的普遍启示,也没有看到它们之间的内在联系。

20世纪60年代中期,事情从非线性现象的两个极端同时发生变化。一方面,描述浅水波运动的一个偏微分方程的数值计算,揭示了方程的解具有出奇的稳定和保守性质。这启发人们找到了求解一大类非线性偏微分方程的普遍途径,即所谓“反散射”方法。反散射方法大为扩展了哈密顿力学中原有的可积性概念,反映了这类方程内秉的对称和保守性质。到了80年代,反散射方法推广到量子问题,发现了可积问题与统计物理中严格可解模型的联系。

60年代初期还证明了关于弱不可积保守系统普遍性质的KAM定理。于是,非线性问题的可积的极端便清楚勾划出来,成为一个广泛的研究领域。虽然这里的大多数进展还只限于时空维数较低的系统,但它对非线性科学发展的促进作用是不可估量的。

另一方面,在“不可积”的极端,对KAM定理条件的“反面文章”,揭示了保守力学系统中随机性运动的普遍性,而在耗散系统中则发现了一批奇怪吸引子和混沌运动的实例。这些研究迅速地融成一片,一些早年被认为是病态的特例也在新的观点下重新认识。原来不含有任何外来随机因素的完全确定论的数学模型或物理系统,其长时间行为可能对初值的细微变化十分敏感,同投掷骰子一样地随机和不可预测。然而,混沌不是无序,它可能包含着丰富的内部结构。

同时,由于计算科学特别是图形技术的长足进步,人们得以理解和模拟出许多过去无从下手研究的复杂现象。从随机与结构共存的湍流图象,到自然界中各种图样花纹的选择与生长,以及生物形态的发生过程,都开始展现出其内在的规律。如果说,混沌现象主要是非线性系统的时间演化行为,则这些复杂系统要研究的是非线性地耦合到一起的大量单元或子系统的空间组织或时空过程。标度变换下的不变性、分形几何学和重正化群技术在这里起着重要作用。

在由上述种种方面汇成的非线性科学洪流中,许多非线性数学中早已成熟的概念和方法开始向其他学科扩散,同时也提出了新的深刻的数学问题。物理学中关于对称和守恒,对称破缺,相变和重正化群的思想,也在日益增多的新领域中找到应用。“非线性”一词曾经是数学中用以区别于“线性”问题的术语,非线性科学正在成为跨学科的研究前沿。各门传统学科中都有自己的非线性篇章,非线性科学却不是这些篇章的总和。非线性科学揭示各种非线性现象的共性,发展处理它们的普适方法。

这样迅猛发展的跨学科领域,很难设想用少数专著加以概括,

何况学科发展的不少方面还未成熟到足以总结成书的地步。于是,有了动员在前沿工作的教学和研究人員,以集体力量撰写一套“非线性科学丛书”的想法。在上海科技教育出版社的大力支持下,这一计划得以付诸实现。

这套“非线性科学丛书”不是高级科普,也不是大块专著。它将致力于反映非线性科学各个方面的基本内容和最新进展,帮助大学高年级学生、研究生、博士后人員和青年教师迅速进入这一跨学科的新领域,同时为传统自然科学和工程技术领域中的研究和教学人員更新知识提供自学教材。非线性科学的全貌将由整套丛书刻划,每册努力讲清一个主题,一个侧面,而不求面面俱到,以免失之过泛。在写作风格上,作者们将努力深入浅出,图文并茂,文献丰富;力求有实质内容,无空洞议论,以真刀真枪脚踏实地武装读者。从读者方面,自然要求具备理工科大学本科的数学基础,和读书时自己主动思索与推导的习惯。

“非线性科学丛书”的成功,取决于读者和作者的支持。我们衷心欢迎批评和建议。

郝柏林

1992年4月30日于北京中关村

前 言

扎布斯基 (N. J. Zabusky) 和克鲁斯卡 (M. D. Kruskal) 在 1965 年研究 KdV 方程的数值解时发现:两个孤波在相碰以后,各孤波均能保持其波形不变. 这是一种粒子的特性. 从此以后,孤波作为非线性现象的一个重要的研究领域,已经有了巨大的发展,并且迅速地扩展到流体物理、等离子体、光学、凝聚态物理以及其他科学研究领域. 20 世纪 80 年代开始,探空火箭和空间卫星探测技术的不断提高,为研究空间等离子体中的孤波提供了越来越丰富的观测资料,推动着这一研究领域不断向纵深发展. 对空间等离子体中的孤波的研究,对于深入理解日地空间、磁层各部分之间的波和粒子的能量传输过程,各种不稳定性现象,以及非线性过程等,有着十分重要的意义. 今后,随着人类空间探测活动的进一步开展和探测技术的提高,空间等离子体的孤波这一研究领域的研究内容,将会更加充实和发展.

本书介绍孤波理论在空间等离子体方面的应用. 我们将尽可能从物理概念上,从孤波理论模型与空间探测资料的结合上,讨论这一方面的研究及其进展. 至于孤波和孤子的一些严格的数学理论,则不在本书介绍的范围之内,对此有兴趣的读者可以参阅非线性科学丛书中有名的专著.

本书的第 1 章先扼要介绍空间等离子体中出现的线性波,再讲述从线性波动如何过渡到非线性波动的,并讨论了本书中最常出现的 KdV 方程和非线性薛定谔方程的一些基本性质,这些基本性质在第 2 章和第 3 章具体问题的应用中将会出现. 这些内容是为原来对等离子体中线性波过程和孤波一般理论问题不熟悉的读者准备的. 如果读者已经熟知这些理论,可以直接从第 2 章开

始阅读.

第2章介绍非线性离子声波、动力学阿尔文波和磁声波形成的 KdV 方程与 KdV-柏格斯 (J. M. Burgers) 方程, 卡多姆采夫 (B. B. Kadomtsev) 和佩特维亚什维利 (V. I. Petviashvili) 方程, 以及这些方程所描述的孤波结构; 并用这些方程来解释磁层极尖区的微观电双层, 无碰撞激波的振荡结构和低频波的电磁尖峰与密度孤波等空间观测现象.

第3章介绍在准光学近似下, 高频朗缪尔波、哨声波、低混杂波以及离子-离子混杂波在空间等离子体中受到低频波的调制而形成的非线性薛定谔方程以及萨哈诺夫 (V. E. Zakharov) 方程. 这些方程可以描述包络形孤子现象. 这种包络形孤子与密度腔子结构已在空间卫星与探空火箭的观测中多次被观测到. 利用这些包络形孤子的理论, 还可以对地球极尖区离子的加速、太阳 III 型射电爆机制和一些精细结构现象提供一种可能的解释.

第4章介绍在空间等离子体中出现的涡旋结构现象. 我们讨论了由长谷川 (A. Hasegawa) 和三间 (K. Mima) 方程描述的静电模涡旋. 卡多姆采夫-玻哥采 (Kadomtsev and Pogutse) 方程描绘的阿尔文涡旋. 对由于密度梯度和粒子漂移运动引起的动力学阿尔文涡旋, 我们着重讨论了偶极涡旋模型, 并用此解释了空间卫星所观测到压缩形孤波与稀疏形孤波(即腔子)可以同时存在的现象.

在附录中, 我们分别介绍了在研究空间等离子体孤波现象中常用到的几个数学和物理上的近似处理方法, 即递减微扰方法、高频波在等离子体中的传播方程和由高频波传播时引起的有质动力. 另外, 还介绍了 Freja 卫星的运行和空间探测器设置的情况.

对空间等离子体中的孤波的研究, 尤其是理论和空间观测相结合的研究, 国内外 20 世纪 80 年代以后才逐步开展, 研究成果还大多散见于各杂志, 这方面的专著目前不多见; 而空间等离子体本身又涵盖着从地球电离层到星系间广袤的宇宙空间. 限于作者的专业知识面, 有不少重要的空间等离子体中孤波的研究成果(例如

地球电离层中的孤波)未能在本书中多作介绍.

本书的 § 5, § 11, § 12, § 13 由吴德金撰写, § 10 和附录 D 由黄光力撰写,其余部分由王德焯撰写.

在本书写作过程中,宋礼庭、李中元教授提供了他们在空间等离子体的孤波领域中有关的研究论文.倪皖荪教授对本书的写作内容进行了有益的讨论,刘寄星研究员仔细审阅了本书的初稿,提出不少宝贵的建议.他们对本书的顺利完成所给予的帮助和支持,在此一并致谢.

王德焯 吴德金 黄光力

2000 年 5 月于紫金山天文台

Abstract

This book is one of the advanced series in nonlinear science. The main results of the theoretical studies, as well as observation from satellites and on earth, on the solitary waves in space plasma are introduced. Some latest research progress on the KdV solitary waves of the ion-acoustic wave, kinetic Alfvén wave and magnetosonic wave; the envelope soliton of Langmuir wave, lower hybrid wave and whistler wave; as well as the Alfvén vortex phenomena in space plasma are also introduced. Readership includes graduate students, postdoctoral fellows and professionals in physical and engineering sciences.

目 录

非线性科学丛书出版说明

前言

第 1 章	引 论	1
§ 1	冷等离子体中的线性波	2
§ 1.1	冷等离子体近似下的色散方程	3
§ 1.2	低频波的色散关系	5
§ 1.3	高频波的色散关系	6
§ 2	有弱色散的 KdV 方程	8
§ 2.1	从线性波到非线性波	8
§ 2.2	KdV 方程的孤波解	11
§ 2.3	KdV 方程的一些基本性质	13
§ 3	非线性薛定谔方程	15
§ 3.1	波包的非线性色散关系	15
§ 3.2	非线性薛定谔方程的定态解	17
第 2 章	可由 KdV 方程描述的空间等离子体孤波	21
§ 4	离子声孤波	21
§ 4.1	离子声波模型及其孤波解	22
§ 4.2	非线性离子声波的 KdV 方程	26
§ 4.3	非线性离子声波的二维 KdV 方程	27
§ 4.4	磁化等离子体中的离子声孤波	29
§ 4.5	束流-等离子体体系中的离子声孤波和电子声孤波	33
§ 4.6	微观电双层	38
§ 5	动力学阿尔文孤波	45

§ 5.1	动力学阿尔文波的色散关系	45
§ 5.2	动力学阿尔文孤波 I : $\alpha \gg 1$ 的情形	50
§ 5.3	动力学阿尔文孤波 II : $\alpha \ll 1$ 的情形	54
§ 5.4	动力学阿尔文孤波 III : $\alpha \approx 1$ 的情形	58
§ 5.5	离子声速度分支上的动力学阿尔文孤波	61
§ 6	磁声波孤波	64
§ 6.1	低 β 磁声波的线性色散关系	64
§ 6.2	斜向传播的磁声波孤波	66
§ 6.3	准平行传播的阿尔文波和磁声波孤波	71
§ 7	弱色散等离子体中的激波	75
§ 7.1	KdV-柏格斯方程	75
§ 7.2	弱色散介质中层流的孤波与激波	78
第 3 章	包络形孤波——调制不稳定性	85
§ 8	朗缪尔波的调制不稳定性	85
§ 8.1	萨哈诺夫方程	85
§ 8.2	萨哈诺夫方程的孤波解	90
§ 8.3	朗缪尔腔子的坍缩	92
§ 8.4	朗缪尔包络形孤波和坍缩的观测	94
§ 9	沿磁场传播高频波的调制不稳定性	97
§ 9.1	几何光学近似下非线性波的传播方程	97
§ 9.2	调制不稳定性判据	99
§ 9.3	哨声波和离子回旋波的调制不稳定性	101
§ 9.4	太阳射电辐射中的调制不稳定性	108
§ 10	低混杂波的调制不稳定性	109
§ 10.1	低混杂波包络形孤波理论	109
§ 10.2	低混杂波孤波的坍缩	114
§ 10.3	低混杂波包络形孤波的空间观测	117
§ 10.4	密度空穴的观测和讨论	121
§ 10.5	离子-离子混杂波的调制不稳定性	124

第 4 章 空间等离子体中的阿尔文涡旋	129
§ 11 空间等离子体中的静电涡旋和阿尔文涡旋	129
§ 11.1 涡旋结构简介	129
§ 11.2 旋转流体和磁化等离子体中的粒子运动	132
§ 11.3 静电涡旋和长谷川-三间方程	133
§ 11.4 阿尔文涡旋和卡多姆采夫-波哥采方程	136
§ 12 动力学阿尔文涡旋	137
§ 12.1 动力学阿尔文涡旋的物理模型	137
§ 12.2 动力学阿尔文涡旋的定态方程	142
§ 12.3 动力学阿尔文涡旋的偶极涡旋结构	145
§ 13 空间等离子体中涡旋结构的卫星观测及其理论解释	150
§ 13.1 强电场脉冲事件和偶极密度孤波	150
§ 13.2 非线性动力学阿尔文波模	156
§ 13.3 强电场脉冲事件的等离子体偶极涡旋模型	158
展望	162
附录A 递减微扰方法	163
附录B 高频波在等离子体中的传播方程	165
附录C 有质动力	169
附录D Freja 卫星简介	174
参考文献	177
本书使用符号说明	191
外国科学家中译名表	193

CONTENTS

Preface

Introduction

Chapter 1. Introduction 1

§ 1 Linear Waves in a Cold Plasma 2

§ 1.1 Dispersion Equation of Waves in a Cold Plasma 3

§ 1.2 Dispersion Relation for Low Frequency Waves ... 5

§ 1.3 Dispersion Relation for High Frequency Waves .. 6

§ 2 KdV Equation with a Weak Dispersion 8

§ 2.1 From Linear Waves to Nonlinear Waves 8

§ 2.2 The Solitary Wave Solution of KdV Equation .. 11

§ 2.3 Some Basic Properties of KdV Equation 13

§ 3 Nonlinear Schrödinger Equation (NLS Equation) 15

§ 3.1 Nonlinear Dispersion Relation of a Wave Packet 15

§ 3.2 The Stationary Solution of NLS Equation 17

Chapter 2. Solitary Waves Described by KdV Equation 21

§ 4 Ion-acoustic Solitary Wave 21

§ 4.1 The Model of Ion-acoustic Wave and its Solitary Wave Solution 22

§ 4.2 KdV Equation of Nonlinear Ion-acoustic Wave 26

§ 4.3 Two Dimensional KdV Equation of Nonlinear

Ion-acoustic Wave	27
§ 4.4 Ion-acoustic Solitary Wave in Magnetized Plasma	29
§ 4.5 Ion-acoustic and Electron-acoustic Solitary Waves in a Beam-plasma System	33
§ 4.6 Micro-double Layer	38
§ 5 Kinetic Alfvén Solitary Wave	45
§ 5.1 Linear Dispersion Relation of Kinetic Alfvén Wave	45
§ 5.2 Kinetic Alfvén Solitary Wave I: in Case of $\alpha \gg 1$	50
§ 5.3 Kinetic Alfvén Solitary Wave II: in Case of $\alpha \ll 1$	54
§ 5.4 Kinetic Alfvén Solitary Wave III: in Case of $\alpha \approx 1$	58
§ 5.5 Kinetic Alfvén Solitary Wave in the Branch of Ion-acoustic Velocity	61
§ 6 Magnetosonic Solitary Wave	64
§ 6.1 Linear Dispersion Relation of Low β Magne- tosonic Wave	64
§ 6.2 Magnetosonic Solitary Wave in the Oblique Propagation	66
§ 6.3 Alfvén and Magnetosonic Solitary in the Quasiparallel Propagation	71
§ 7 Shock Wave in the Weak Dispersion Plasmas	75
§ 7.1 KdV-Burgers Equation	75
§ 7.2 Solitary Wave and Shock Wave of Laminar Flow in a Weak Dispersion Plasmas	78
Chapter 3. Envelope Solitary Waves	85