

等离子体的一些非线性问题研究*

贺凯芬

(北京师范大学低能核物理所, 北京市辐射中心 北京 100875)

摘 要 利用从等离子体的实际问题引出的一些模型, 研究了孤子、禁带孤波等相干结构, 探索了非线性波动系统中的分岔、向混沌与湍流转变的现象、机制和控制问题.

关键词 非线性时空系统 孤立子 禁带孤波 分岔 混沌和湍流 控制混沌

分类号 O534

1 引言

以获取核聚变能源为目标的手段大多涉及到等离子体系统. 众所周知, 等离子体系统的主要特征是, 带电粒子通过长程电磁力发生集体相互作用, 这使得等离子体中发生的现象极为复杂. 一般来说, 等离子体是高度非平衡的, 可能发生众多的不稳定性, 当这些不稳定性的振幅足够大时, 非线性效应将不能忽略, 因而等离子体又是一个非线性现象异常丰富的体系. 非线性效应对能量传输、粒子输运等都起着非常重要的作用, 成为研究磁约束与惯性约束核聚变等离子体的重要课题.

2 孤立子和禁带孤立波等相干结构

非线性引起的一大类问题是相干结构的出现, 例如孤立子、孤立波、涡旋、纽结子、呼吸子等. 以孤立子为例, 物理上它的出现是色散效应与非线性效应平衡的结果. 色散使不同波数的分波以不同的相速度运动, 非线性则使波形发生畸变, 这两个作用竞争有可能使系统出现稳定的相干结构, 它是一个以不变的速度和形状运动的稳定波包. 孤子的一个典型例子是激光束在等离子体中传播时的丝化现象, 这时高频电场的能量被聚集在很细的丝内, 其振幅的包络形成孤子形状, 同时高频电场的压强使得背景等离子体的密

度出现凹陷, 即腔子. 光束的丝化破坏了激光核聚变所要求辐照光场的高度对称性, 是该项研究面临的一个重要问题. 另一个例子是电子束聚变等研究中涉及到的强电子束在等离子体中传播出现的丝化问题, 当局部电流中性化被破坏时, 洛伦兹力使束粒子自聚焦在很细的丝中, 同时背景等离子体粒子被排开. 本课题组建立了一组描写强电子束在等离子体中传播的非线性方程, 由此导出了电子束和背景等离子体密度扰动分别满足的 KdV 方程, 找到了束密度扰动的孤子解和背景等离子体密度的腔子解, 从理论上解释了电子束丝化的现象^[1].

近年来关于非线性相干结构的一个饶有兴趣的课题是所谓的‘禁带孤子’. 这个问题首先是在研究有周期结构的介质(如超晶格)中提出来的, 在这样的介质中波谱存在通带和禁带, 频率处于禁带中的线性波不能透过介质. 但当考虑非线性作用时, 波将有可能穿过介质, 其振幅分布具有孤子形状. 关于禁带孤子的研究迅速推广到非线性波动系统, 例如有作者讨论了耦合的 KdV 方程, 在忽略非线性项时, 耦合引起相速度谱中出现禁带, 而计入非线性项时, 禁带中允许包络孤波解. 非线性波动系统出现类似周期结构材料中的禁带孤子现象有其内在的物理原因. 在很多情形下非线性波方程允许时间和空间呈周期变化的定态波解(孤立波), 如果在跟随这个

* 国家自然科学基金和国家教委博士点基金资助课题, 课题编号 19375008 19675006 和 9302707.

波的坐标系中观察, 这个定态波动就象一个不动的势阱(事实上, 等离子体物理中的许多波方程描写的都是电荷密度波, 这就形成电位阱). 进入系统的扰动波将会被这个势阱所散射, 引起类似波在周期介质中传播的现象. 按照这个思路, 笔者最近讨论了一个显示双稳态的等离子体非线性漂移波系统, 发现定态波作为载波可以‘俘获’类似孤立子的相干结构, 它是扰动波的色散与自身非线性平衡的结果. 不同于普通孤立波的是, 这里扰动波的色散除线性色散外还包括了它在载波势阱上的散射引起的色散. 类孤子相干结构与载波作为一个整体也构成了原方程的一个定态波解. 这样, 在同样的参数下可以出现多个稳态波动解. 与双稳态相联系的多稳态在一些等离子体放电装置中早有观察, 我们的理论模型显示了类似的现象和其内在机制. 与此相关的一个有趣现象是: 载定态波上的类孤子结构的作用是降低载波的势阱深度, 载定态波与它俘获的类孤子解合成的新定态波的振幅要比载波振幅小得多, 换言之, 它的势阱要浅得多. 这是一个在物理上可能很有意义的现象.

3 非线性时空系统中的分岔、混沌和向湍流转变的现象及物理起因

非线性效应的另一个重要作用是引起湍流运动, 湍流对等离子体系统的性质产生很大影响. 例如, 由于激光辐照不均匀性触发的瑞利-泰勒不稳定性会引起流体力学湍流, 在辐照界面上湍流造成冷等离子体与热等离子体的混合等, 这些现象都严重影响激光内爆的流体力学过程, 使得实际问题远比最初理想化的计算结果复杂. 另如, 在磁化等离子体中低频漂移波湍流可以引起粒子和能量的反常扩散, 这种集体输运与带电粒子的二体碰撞完全不同, 而且它可以超过碰撞输运许多量级. 类似这样非线性造成的等离子体孤子、涡旋及湍流等都是既有实际意义, 又有基础研究价值的课题. 特别是近年来国际上关

于非线性系统中的分岔、混沌研究迅速发展, 等离子体非线性问题研究很自然地汇入这一洪流. 一些作者利用从等离子体的实际问题中引出的模型方程进行了大量的数值模拟和理论分析, 以求搞清楚相干的定态波结构怎样和为什么通过分岔等过程而解体, 乃至最终发展成湍流运动的. 与其它的非线性研究模型比较, 等离子体等一些从实际问题出发探索非线性普遍规律的模型的特点是关注更为实际的时空系统. 即使早期的低维系统模型, 也都是描写模-模耦合的方程, 如三波模型, 它是二次非线性的时空问题在波数空间的最低截断. 更进一步的工作则直接讨论偏微分系统的分岔和向混沌与湍流的转变.

在讨论低频漂移波湍流问题时我们发展了一个理论模型^[2], 考虑了包括漂移波和离子声波耦合的三波相互作用, 由此计算的湍流的饱和水平与理论预计一致, 克服了原有模型湍流水平发散的问题. 利用这个模型深入探讨了运动的分岔行为, 证实了该系统遵循所谓的 Ruelle-Takens 途径向混沌转变, 即第三个独立频率出现失稳时, 运动直接向混沌转变. 为了认识湍流起因问题, 三波近似是不够的, 必须讨论与时间和空间都有关的系统. 为此, 在一维非线性漂移波方程的基础上建立了一个理论模型, 在大量数值模拟基础上发现了从定态波向湍流转变过程中的许多有趣的现象^[3,4]. 其中特别值得提出的是, 发现混沌和湍流行为的发生与系统的定态波解出现双稳滞后现象密切相关. 数值模拟显示, 随驱动波相速度和强度的变化, ‘波能’可以出现一簇簇的双稳曲线, 而在参数空间每一簇双稳曲线都引人注目地连着一个混沌湍流区. 此外, 还发展了一种方法探讨定态波的失稳机制, 并提出在非线性条件下‘负能’和‘正能’模式的一种表述, 由此发现某些分岔现象与模式‘能量状态’的转变密切相关. 例如, 当某个共振模式由‘负能’跃变到‘正能’时, 将出现双稳滞后分岔^[5~7]. 参数空间中一系列共振模式能态转变的临界位置与

数值模拟得到的一组组滞后分岔线符合得很好. 最近的研究表明, 在双稳滞后曲线的负斜率分枝上, 定态波是鞍形不稳定的. 如果前一节提到的禁带孤子失稳到混沌吸引子, 并且这个吸引子与该鞍点的不稳定方向碰撞, 运动将发生激变, 从一个时间混沌空间有规态突变为时间空间都混沌的湍动态.

4 时空系统中混沌运动的控制

混沌运动的控制是近几年国际上一个受到广泛关注的热点课题, 它改变了过去普遍被接受的观点: 既然混沌运动是不可预测的, 因而也就是不可控制的. 1990 年首先提出了一种控制混沌的 OGY 方法, 它将嵌在混沌吸引子中不稳定周期轨道稳定化. 在这以后, 纷纷提出了各种不同的控制混沌方法, 包括反馈和非反馈的控制方法等, 后者中的一个例子是利用噪声来实现运动的有规化, 或用混沌信号控制系统的运动, 即同步混沌. 这方面的尝试不仅有理论的, 也有实验的. 例如在一些等离子体实验中, 人们成功地抑制了不稳定性或降低了湍流水平. 本课题组以等离子体非线性漂移波方程为模型, 采用反馈控制方法在理论上首次实现了时空系统中的混沌运动的控制^[8,9]. 在这个模型下, 不仅可以控制那些在时间行为上表现为混沌而空间上表现为有规的运动, 而且有一类时间和空

间上都表现为混沌的运动也有可能被控制到定态运动.

参 考 文 献

- 1 贺凯芬. 电子束丝化扰动的孤立波解. 物理学报, 1983, 32:954~959
- 2 Biskamp D, He Kaifen. Three-drift-wave Interaction at Finite Parallel Wave Length; Bifurcation and Transition to Turbulence. Phys Fluids, 1985, 28:2172~2180
- 3 He Kaifen, Salat A. Hysteresis in the Nonlinear Driven Drift and KdV Equations. Phys Lett A, 1988 132:175~178
- 4 He Kaifen, Salat A. Hysteresis and Onset of Chaos in periodically Driven Nonlinear Drift Waves. Plasma Phys and Contr Fusion, 1989, 31:123~141
- 5 He Kaifen, Hu Gang. Reversal of Phase Velocity of a Negative-energy Mode and Bistability in Adriven-damped Drift Wave System. Phys Lett A, 1992, 169:341~348
- 6 He Kaifen, Hu Gang. Reconnection of Complex Eigenvalues of Resonance Modes and Onset of the Hopf Bifurcation. Phys Lett A, 1994, 190:38~48
- 7 He Kaifen. Transition of Negative-energy Modes to Positive-energy Modes and Bistability of Wave Packets. Phys Lett A, 1995, 202:369~375
- 8 Hu Gang, He Kaifen. Controlling Chaotic Systems Described by Partial Differential equations. Phys Rev Lett, 1993, 71:3794~3797
- 9 He Kaifen, Hu Gang. Feedback control of Chaotic Motions and Unstable Wave Packets in a Space-time-dependent System. Phys Rev E, 1996, 53:2271~2282

Some Aspects of Nonlinear Problems in Plasma Systems

HE Kefen

(Institute of Low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University,
Beijing Radiation Center, Beijing 100875)

Abstract With models deduced from plasma systems, some phenomena in nonlinear wave systems are studied, such as solitons, gap solitary waves, bifurcations and transition to turbulence. The mechanism of bifurcations and control of chaos are also explored.

Key Words nonlinear space-time dependent system soliton gap solitary wave bifurcation chaos and turbulence controlling chaos