

文章编号: 1007-4627(2005)04-0334-03

等离子体湍流理论研究的最新进展*

邱孝明¹, 彭晓东¹, 李继全¹, 王晓钢²

(1 核工业西南物理研究院, 四川 成都 610041;

2 大连理工大学高科技研究院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 评述和分析了磁约束核聚变理论研究、数值模拟和实验研究等方面最近几年共同关心的一个重要问题——寻找托卡马克等离子体湍流中的带状剪切流(zonal flows)。简要介绍了作者最近对电阻性-重力模湍流中的带状剪切流的研究结果。

关键词: 核聚变; 托卡马克; 等离子体湍流; 湍流输运; 带状剪切流

中图分类号: O533 **文献标识码:** A

Zonal flows (ZF) 这个被称为湍流中的大尺度带状剪切流(近乎层流)早已在与等离子体同为连续介质的大气湍流和海洋湍流的实验和数值模拟中观察到, 然而在磁约束等离子体湍流中却一直没有观察到。照说, 等离子体既是连续介质又是电介质, 何况还有约束磁场的介入, 磁约束等离子体的不稳定模式应比普通流体更多, 像托卡马克等离子体最危险的新经典撕裂模(NTM)不稳定性及其引起的湍流输运(TT)则是别的连续介质都没有的。说它最危险, 是因为 NTM 不稳定性的非线性发展有可能导致托卡马克等离子体的大破裂(disruption), 不仅使放电突然中断, 而且在发生等离子体大破裂时偏滤器靶板上的热负载会很高, 由于时间很短, 热量来不及传导, 会使靶板材料蒸发, 甚至有可能烧毁整个托卡马克聚变堆的包层。所以, 尽管在实现核聚变的一个最重要参数“三乘积”上目前托卡马克等离子体领先激光等离子体和 Z 箍缩等离子体 2—3 个数量级, 但托卡马克的前景仍然受到后两者的挑战。所以弄清托卡马克 NTM 不稳定性的非线性发展及其后果就成了当前托卡马克等离子体理论研究、数值模拟和实验研究的中心课题。从物理上看, 等离子体湍流中也不应该没有 ZF; 以无界(确切说, 足够大的)等离子体为例, 只要这种系统有自由能, 那么某种不稳定性及其湍流便会通过波-粒

子相互作用发展起来, 而波-波相互作用使湍流能量在 k 空间转移, 最终湍流能谱在高 k 区便是著名的 Kolmogorov 谱; 低 k (大尺度)区便是 ZF 的雏形(说“雏形”, 是因为无界等离子体没有 TT 损失)。那么为什么没有观察到 ZF 呢? 可能有两个原因: (1)磁约束等离子体中的耗散渠道比普通流体的多, 例如电阻耗散、磁剪切、好曲率和反常电阻耗散等是普通流体中没有的, 所以即使有湍流, 也可能很难充分地发展起来(即湍流在较低水平就饱和了)。但 20 世纪 90 年代中期, 实验上观察到磁约束等离子体中的阵发现象(intermittency)这个只有充分发展起来了的湍流才有的特征, 所以这个原因便被排除了; (2)粒子和能量横越约束磁场的 TT 损失(见图 1), 不但使约束降低, 湍流也不能继续发展。促使磁约束核聚变界的人相信磁约束等离子体湍流中一定有 ZF 并孜孜不倦地去寻找它, 是由于发现了 H 模(高约束运行模式)。

20 世纪 80—90 年代, 首先在实验上发现: 当磁约束等离子体中有一层剪切的规则流动时, 等离子体的约束性能便有显著的改善^[1]。这一发现后来被许多装置上的实验^[2-4]、理论研究^[5-8]和数值模拟(这方面的文献 20 世纪 90 年代中后期很多)所再次证实, 形成了磁约束核聚变界长达 15 年的所谓“H 模物理”的研究高潮, 我们在这方面也贡献了一

收稿日期: 2005 - 08 - 22

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10075014, 40390150)

作者简介: 邱孝明(1938—), 男(汉族), 湖北黄冈人, 研究员, 博士生导师, 从事核聚变与等离子体物理理论研究;

E-mail: xmqiu@swip.ac.cn

个简单的解析理论^[7]。H 模的过程相当复杂，一些物理机制至今也还不能说都弄清楚了，但它的物理图像却比较清楚，这从我们的“双流竞争”模型^[7]可以看出：边缘的规则流动宛如一道“壁垒”（见图 1）；扰动（不稳定性）这种不规则的流动要使等离子体柱偏离原来的平衡位置并使其碰上限制器或真空室因而放电中断，只有这种不规则的流动充分地扰乱边缘的规则流动才有可能，为此要消耗扰动的能量，即所有扰动量的振幅下降，因而 TT 损失减小，系统进入高约束运行模式。

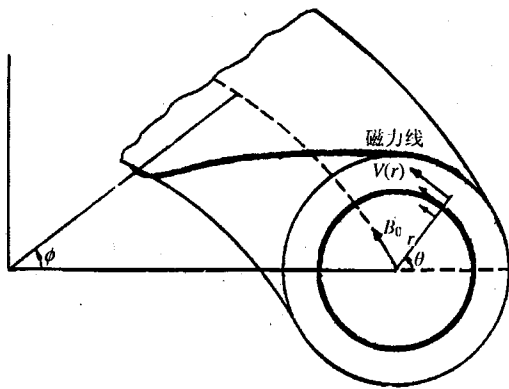


图 1 托卡马克磁场位形及等离子体边缘的规则流动 $V(r)$

从上面第二段的分析已经看到，实现托卡马克 H 模运行的前提是系统里要有一层剪切的规则流，过去的 15 年找到了不少产生剪切流的办法，但归纳起来也就是两类：外加的和自发的 $E \times B_0$ 流（这里 E 是电场， B_0 是主约束磁场）。前者用于实验研究 H 模物理可以，但不是未来托卡马克聚变堆可以接受的办法，因为它要靠外加的电场（例如我们的“双流竞争”模型中的电场就是靠外加偏压电极产生的）；后者是湍流本身自发产生的电场。这就促使人们去想：若以 NTM 不稳定性及其引起的 TT 损失为例，如果有办法控制这种不可避免要产生的 NTM 湍流的发展，使其中出现 ZF，那等于说人们可以不付出额外的代价就用该湍流自身的 ZF 去降低甚至克服它对托卡马克等离子体约束的破坏。所以在 20 世纪 90 年代后期，一部分原来做 H 模物理研究的人开始了在托卡马克一些典型的湍流（按做工作的时间先后顺序，它们是离子温度梯度模湍流、漂移波湍流、电子温度梯度模湍流、电阻-重力模湍流）中寻找 ZF 的理论研究^[9-12]。目前关于介绍 ZF 的数值模拟工作很多（文献^[9]和^[11]不过是两

篇影响较大的数值模拟工作），专题讨论会也开了好几次（邱孝明研究员曾被邀请参加了 1998 和 1999 年的两次会议）。然而所有这些工作都等待实验的检验，现在已有了两个实验结果^[13, 14]。目前有关介绍 ZF 的文献虽说很多，却还没有磁约束核聚变界最关心的 NTM 湍流的 ZF 的文献。这主要是由于 NTM 问题太复杂了，因为它引发的磁岛增长有可能破坏托卡马克磁场位形的拓扑结构（见图 1），而离子温度梯度模湍流、漂移波湍流、电子温度梯度模湍流和电阻-重力模湍流都是在磁场拓扑结构完好的情况下演变，即使美国目前拥有对 ZF 进行大规模并行模拟的计算机条件和一批出色的数值模拟专家（仅华人界里就有好几位，而且都很年轻），恐怕也一时难观察到 NTM 湍流的 ZF。幸而，欧盟磁约束核聚变界的研究者摸索出一种专门的实验技术可以控制 NTM 的发展^[15]，结果在加了 20 MW 的中性粒子束注入（NBI）和离子回旋频率范围（ICRF）的辅助加热功率之后，观察到托卡马克等离子体获得加热的同时约束也得到显著的改善（也就是说，既未发生大破裂，TT 损失也较小）。这项实验成果的重要意义不仅在于它间接地证明了 NTM 湍流的 ZF 存在，更重要的是它让人们相信托卡马克最难的一个物理问题——NTM 不稳定性及其引起的 TT 损失，即使理论和实验上都还没有把它完全搞清楚，也不妨碍托卡马克走向聚变能的应用（正像彭桓武院士 20 多年前风趣地说过的“没有一架飞机失事的原因是因为大气湍流的物理机制没搞清楚”）。欧盟磁约束核聚变界的研究人员给这项实验技术一个专门的名称：“NBI + ICRF technique”。说详细一点，就是 NBI 功率的爬升（ramp）技术和 ICRF 的天线调相技术，再配以托卡马克主磁场的值和等离子体电流值的变化。总之，20 MW 的辅助加热功率不能一下子都加上去，否则不但达不到所希望的加热效果，还会发生大破裂和较大的 TT 损失；而较小的 TT 损失不但是不可避免的（因为托卡马克等离子体是有限大的系统），也是为让湍流充分发展起来以产生 ZF，因而可以阻止更大的 TT 损失所必需的。这正好印证了一句哲学名言：“欲取之，必先予之”，欲取湍流中的 ZF 用之，必先予湍流以充分发展起来的机会，这个过程自然免不了有 TT 损失。或者再多说一句：留下湍流中大尺度的 ZF，因为它有用；让小尺度的 TT

损失掉。

更一般地说,如果 20 世纪 90 年代以前非线性科学研究最重要的进展是认识到“从有组织到混沌流的转变”是许多非线性系统的共性(虽然其中的一些物理机制还没有完全弄清楚),那么从 20 世纪 90 年代开始,人们把注意力集中到这个转变的“逆”转变(即从湍流到高度组织化的运动)上,其中湍流自组织过程产生的 ZF 便是当前等离子体物理学界关注的焦点,而且前面介绍的控制 NTM 发展的实验^[15]已向人们提供了人为控制湍流自组织过程的成功例子。有趣的是,当初大气湍流和海洋湍流的 ZF 促进了磁约束核聚变界对 ZF 的研究;今天磁约束核聚变界对 ZF 的研究方兴未艾时,大气和海洋

的研究者们也在考虑借用磁约束核聚变界的某些物理思想为自己所用——一个新的分支学科“MHD drag reduction”应运而生^[16]。我们对其中的一个问题也贡献了一个简单的解析理论^[17]。

最后,简要介绍作者最近对电阻性-重力模(又称电阻性交换模)湍流中 ZF 的研究结果^[12]。前面提到的离子温度梯度模湍流、漂移波湍流和电子温度梯度模湍流都是托卡马克芯部的主要湍流,电阻性交换模则是托卡马克边缘的一种主要的湍流运动模式。所以研究它的 ZF 有助于理解为什么托卡马克在边缘局部模(ELM)的运行模式下约束性能好。我们的研究表明,这是因为有 ZF 存在时电阻性交换模湍流引起的 TT 损失比没有 ZF 时小很多。

参 考 文 献:

- [1] Wagner F, *et al.* Phys Rev Lett, 1982, **49**: 1 408.
 [2] Taylor R J, *et al.* Phys Rev Lett, 1989, **63**: 2 365.
 [3] Groebner R J, *et al.* Phys Rev Lett, 1990, **64**: 3 015.
 [4] Ida K, *et al.* Phys Rev Lett, 1990, **65**: 1 364.
 [5] Itoh S I, Itoh K. Phys Rev Lett, 1988, **60**: 22 796.
 [6] Shaing K C, *et al.* Phys Rev Lett, 1989, **63**: 2 369.
 [7] Qiu Xiaoming, *et al.* Chin Phys Lett, 1992, **9**: 527.
 [8] Burrell K H. Science, 1998, **281**: 1 816.
 [9] Lin Z, *et al.* Science, 1998, **281**: 1 835.
 [10] Smolyakov A I, *et al.* Phys Rev Lett, 2000, **84**: 491.
 [11] Hallatschek K, *et al.* Phys Rev Lett, 2001, **86**: 1 223.
 [12] Peng Xiaodong, Qiu Xiaoming. Zonal Flow Generation and Evolution in Resistive-g Mode Turbulence. Preprint in Southwestern Institute of Physics, 2005.
 [13] Shats M G, *et al.* Phys Rev Lett, 2002, **88**: 045001.
 [14] Jakubowski M, *et al.* Phys Rev Lett, 2002, **89**: 265003.
 [15] Sauter O, *et al.* Phys Rev Lett, 2002, **88**: 105001.
 [16] Tsinober A B. MHD drag reduction. Progress in Astronautics and Aeronautics. In: Bushnell D M, Heiner L N. 1989, 132; Meng J C S. Magnetohydrodynamics, 1994, **30**: 401.
 [17] Qiu Xiaoming, *et al.* Role of On-board Discharge-induced Magnetic Pressure in Supersonic Shock Wave Mitigation and Elimination. Preprint in Southwestern Institute of Physics, 2005.

Recent Advance in Plasma Turbulence Theory Research*

QIU Xiao-ming¹, PENG Xiao-dong¹, LI Ji-quan¹, WANG Xiao-gang²

(1 Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China;

2 College of Advanced Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Progress of the research on the zonal flows in tokamak plasma turbulence is surveyed, especially it is reviewed that the zonal flows observed in the experiments and numerical simulations on atmosphere turbulence and ocean turbulence and the discovery of H-mode in tokamak experiments how lead the researchers in magnetic confinement fusion community to find out the existence of the zonal flow in tokamak plasma turbulence and subsequently give the experimental verification of its existence. Finally, the results of our research on zonal flow generation and evolution in resistive-g mode turbulence are presented in brief.

Key words: nuclear fusion; tokamak; plasma turbulence; turbulent transport; zonal flow

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10075014, 40390150)