磁约束核聚变等离子体输运与约束研究

汇报人：钟武律

核工业西南物理研究院

个人简介

❑ 基本情况

核工业西南物理研究院特聘研究员，博士，从事磁约束核聚变等离子体物理与诊断研究。中国环流器二号A物理实验协调人，聚变科学所青年学术交流委员会委员，中国聚变工程实验堆CFETR集成设计项目总体专家组学术秘书。

❑ 承担省部级及以上科研项目7项，人才类项目：

- 2016年，入选中国科协“青年人才托举工程”项目
- 2018年，入选四川省首批“天府万人计划”天府科技菁英项目
- 2018年，入选中核集团首批“青年英才”计划菁英项目
- 2019年，获国家优秀青年基金项目

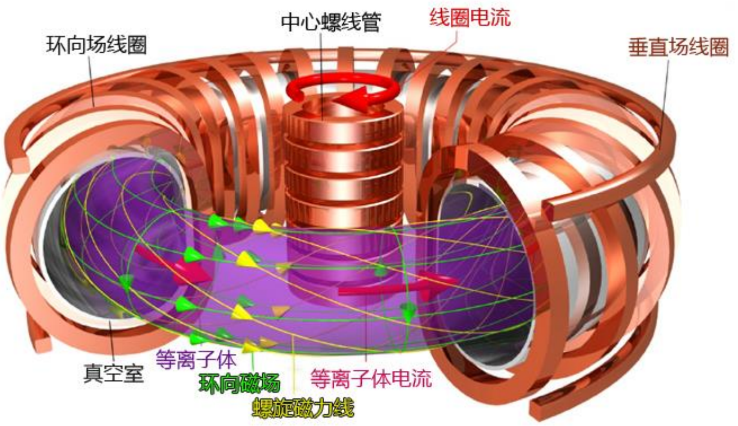
❑ 主要获奖情况

- 2016年，“蔡诗东”全国等离子体物理奖
- 2016年，国防科技进步二等奖（2/10）
- 2017年，四川省青年科技奖
- 2018年，亚太等离子体物理杰出青年科学家奖
- 2018年，国防科技进步一等奖（4/10）

研究背景

核聚变能是理想的未来能源

聚变点火条件：$nT\tau > 5\times10^{21} m^{-3}\cdot keV\cdot s$



磁约束聚变物理研究背景：

- ➔提高：密度n⇧，温度T⇧，约束τ⇧；
- ➔等离子体输运是反常的，不利于nTτ的提高；
- ➔控制输运，实现高参数稳态约束。

聚变物理的根本是**输运与约束**

国际共识的关键物理问题：

- ➔ 反常输运是由什么决定?
- ➔ 约束提高的障碍是什么?
- ➔ 不稳定性如何主动控制?

平台 + 诊断

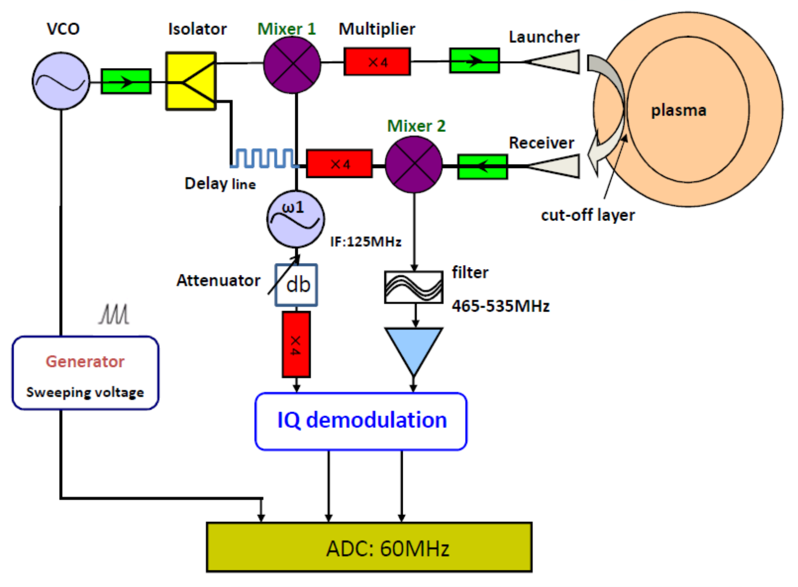
实验 理论

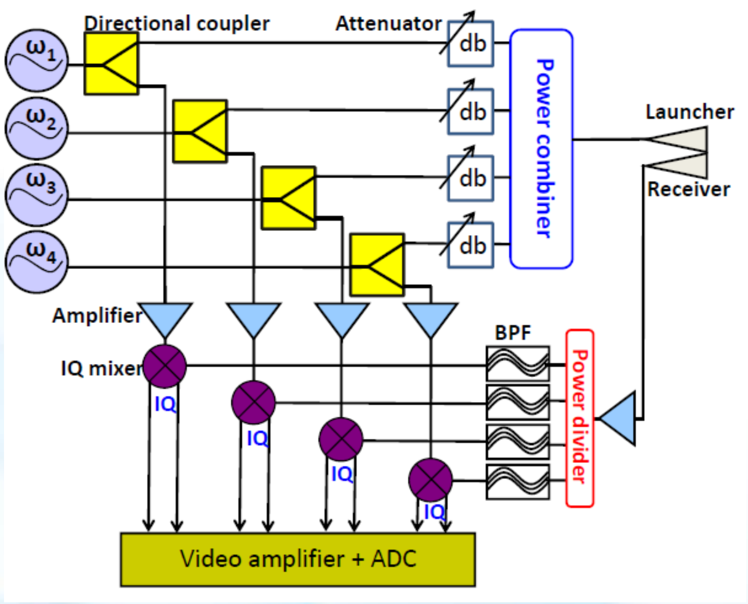
发展先进的诊断系统

发展了调频连续波微波反射计诊断系统，并提出了处理微波反射计时延的新方法

发展多道微波多普勒反射系统，首次实现湍流三维测量

W.L. Zhong, *et al., Journal of Instrumentation* **10**,P10014 (2015)
W.L. Zhong , *et al., Nuclear Fusion* **55**, 113005 (2015)





W.L. Zhong, et al., *Review of Scientific Instruments* **82**, 103508 (2011)
W.L. Zhong , et al., *Review of Scientific Instruments* **85**, 013507 (2014)

➔ **为物理研究提供了重要数据**

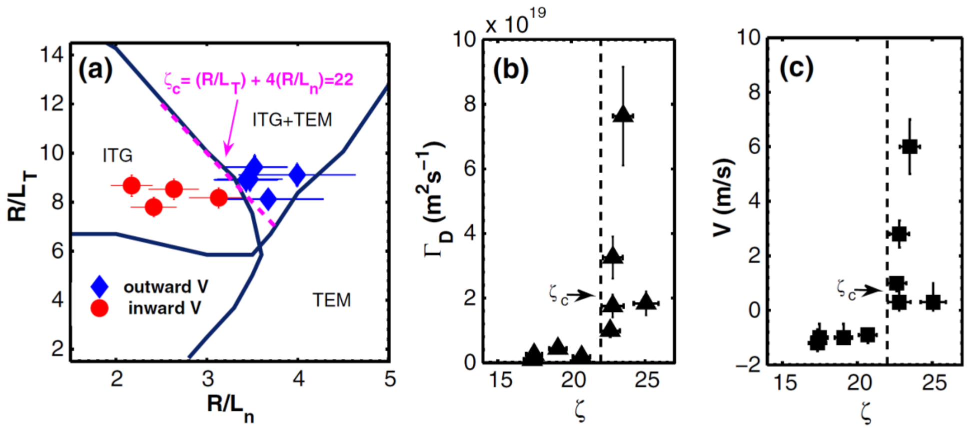
- ❑ 2015年欧洲物理学会诊断会议最佳海报奖
- ❑ 2016年国防科技进步二等奖（2/10）

核西物院 SWIP 中核集团 CNNC

反常输运实验和理论模拟研究

首次发现了等离子体湍流模式转换与粒子对流速度反转的关系

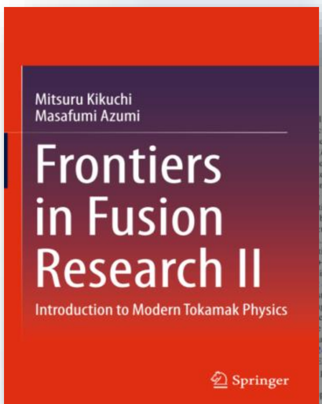
法国Tore-Supra托卡马克上开展实验研究



实验与理论模拟直接对比

W.L.Zhong *et al.*, *Physical Review Letters* **111**, 265001 (2013)

- 12th Asia Pacific Physics Conference, Chiba, Japan, July12-19, 2013, **Oral**
- 中国物理学会2016秋季学术会议，9.1-9.4, 2016年，北京，**邀请报告**



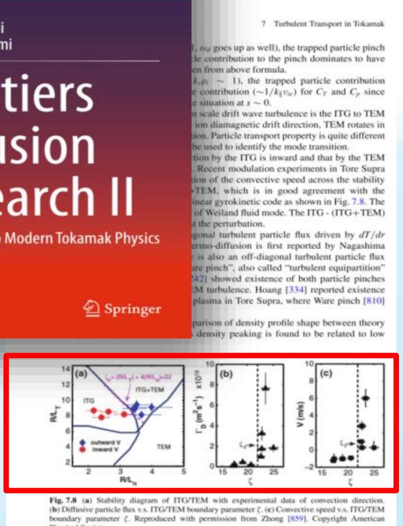
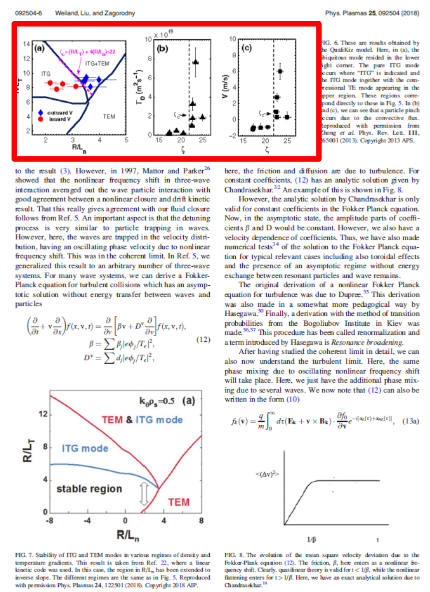

7 Turbulent Transport in Tokamak

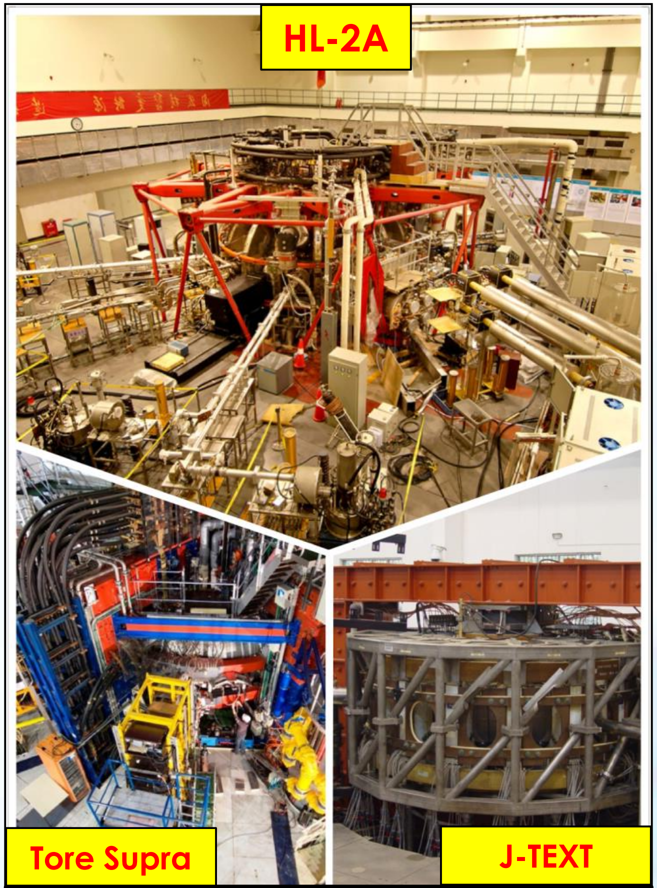
Fig. 7.8 (a) Stability diagram of ITG/TEM with experimental data of convection direction. (b) Diffusive particle flux v.s. ITG/TEM boundary parameter ζ. (c) Convective speed v.s. ITG/TEM boundary parameter ζ. Reproduced with permission from Zhong [859]. Copyright American Physical Society

国际著名磁约束聚变专家、IAEA 聚变能大会前主席、NF前编主席，亚太物理学会协会等离子体物理分会主席**M. Kikuchi** 教授的专著再版

著名等离子体湍流输运模型Weiland模型的提出者，瑞典查尔姆斯理工大学**Jan Weiland**教授的综述文章再版

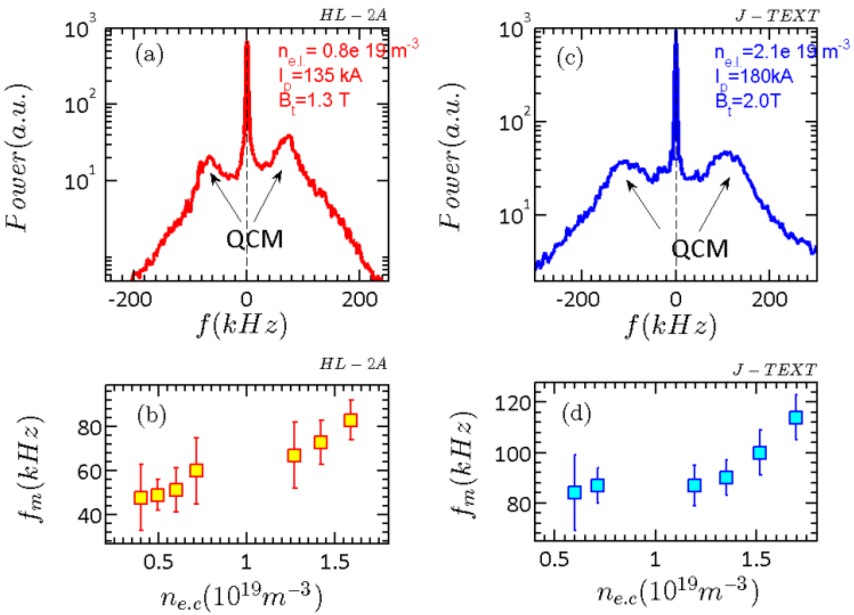

092504-6 Weiland, Liu, and Zagorodny Phys. Plasmas 25, 092504 (2018)

直接测量湍流模式转换



HL-2A: R=1.65m, a=0.40m
Tore Supra: R=2.40m, a=0.72m
J-TEXT: R=1.05m, a=0.27m

不同装置上证明湍流普适性



W.L.Zhong *et al., Physics of Plasmas* (***Letter***) **23**, 060702 (2016)
入选编辑特别推荐文章

结合国内外3个托卡马克，结合理论模拟，系统地研究了TEM-ITG湍流转换，证实了其对等离子体约束与输运的影响.

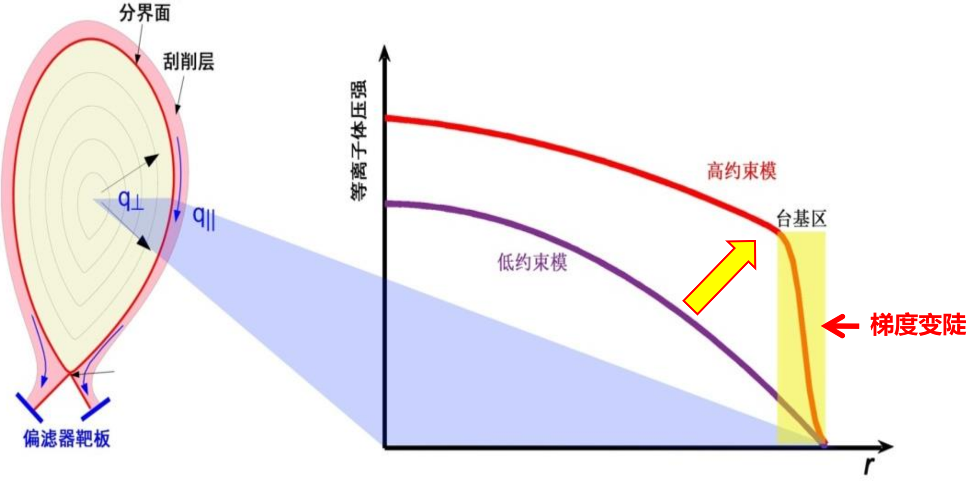
高约束模（H模）物理

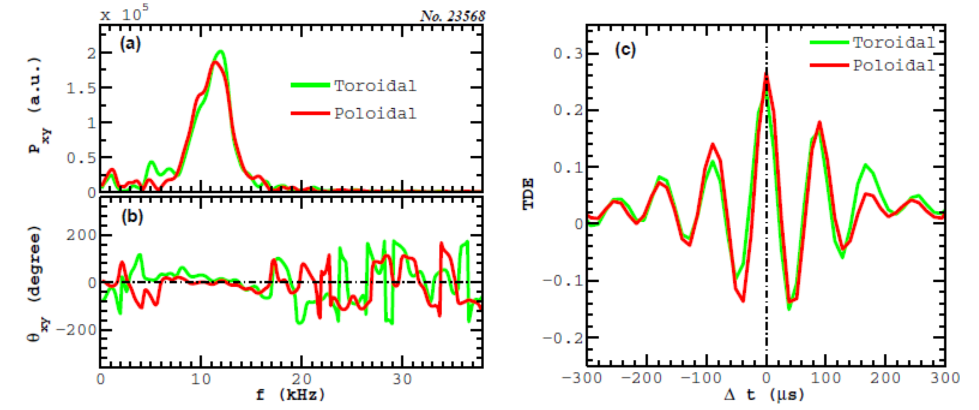
★ 理解了湍流驱动反常输运 ➔提高约束

提高约束的核心

抑制湍流➔降低反常输运➔提高压强

- ➔ H模是国际热核聚变实验堆（ITER）的基本运行模式
- ➔高温高密度利于提高聚变反应效率
- ➔边缘剪切流，带状流起到关键作用





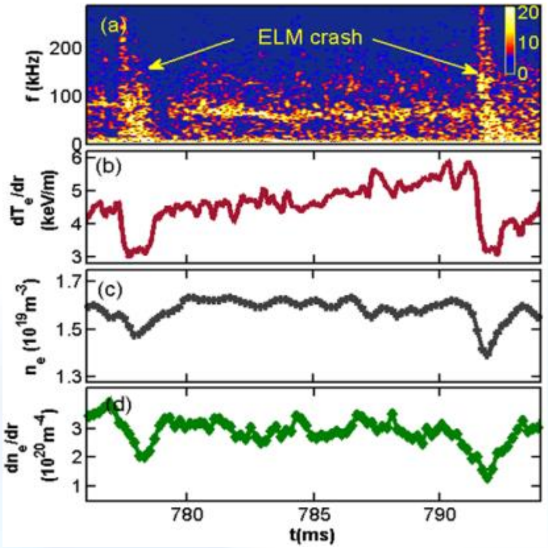
关键物理问题：

- ➔ 剪切流如何抑制湍流？
- ➔ 台基区湍流行为，如何影响输运？
- ➔ 如何主动控制台基动力学？

W.L. Zhong , *et al., Nuclear Fusion* **55**, 113005 (2015)
首次采用微波诊断对带状流进行三维测量

等离子体电磁不稳定性研究

台基区不稳定性模



证实了准相干模对台基的饱和起到限制作用

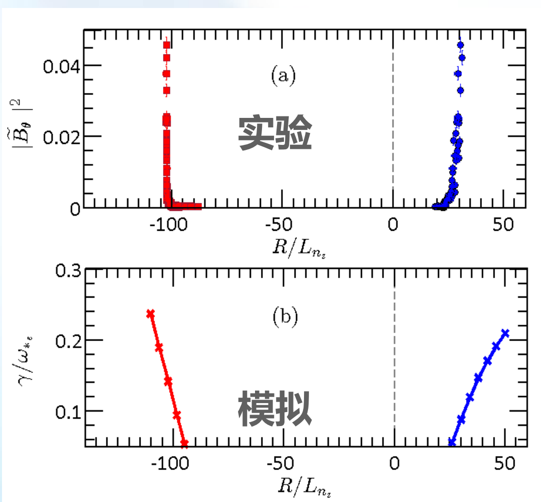
➔结合多种诊断，测量了其三维结构

➔发现其对台基饱和起到限制作用

➔ BOUT++模拟与实验结果一致

W.L.Zhong *et al., Plasma Physics and Controlled Fusion*, **58**, 065001 (2016)
(入选2016年度PPCF“高亮” 文章)

- ❑ 第43届欧洲物理学会等离子体物理大会，邀请报告
- ❑ 第十八届全国等离子体科学技术会议，**大会特邀报告**



- ❑ **首次发现激发电磁湍流的杂质密度梯度双阈值**
- ❑ **实验和模拟定量一致，理解了杂质湍流驱动机制**
- ❑ **可为主动控制台基动力学实现对聚变堆第一壁材料的保护提供参考**

W.L. Zhong *et al., Physical Review Letters* **117,** 045001(2016)

W.L. Zhong, 1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Kanazawa, Japan,2018 **Plenary talk.**

工作展望

瞄准聚变堆燃烧等离子体

- 理解高约束模下的等离子体输运，为**台基结构优化和控制**提供物理基础
- 在近堆芯等离子体中，理解等离子体**电磁湍流**对输运和约束的影响机制
- 主动控制台基动力学，**控制高热负荷**并减弱等离子体与壁相互作用

研究重点

- 电磁湍流的实验研究，推动理论模拟的发展和完善
- 外部杂质注入驱动台基不稳定性，实验和理论模拟
- 独创的掺杂超声分子束注入控制台基和靶板热负荷

实现稳态高约束聚变等离子体

感谢单位、导师和合作者！

感谢各位评委！

感谢大家聆听！

每一次进步都离不开身边良师益友给予的支持、鼓励和帮助。