

安徽省科学技术奖提名项目公示内容

(自然科学奖, 2025 年度)

一、项目名称

磁约束聚变等离子体高约束稳态运行模式形成机理研究

二、提名者及提名意见

提名者: 中国科学院合肥物质科学研究院

提名意见: (600 字以内)

托卡马克外部加热功率超过临界阈值后, 等离子体边界湍流会被显著抑制, 形成边界输运垒并进入高约束模式, 使得同等加热条件下等离子体温度、密度和能量约束时间得到大幅度地提升, 高约束且稳态运行的模式可以提高聚变堆的经济性, 是聚变能开发的重要物理基础, 但国际上对高约束稳态运行模式形成机理并不完全清楚。该项目攻克了其中的核心科学问题, 在我国托卡马克装置上率先获得了带状流在等离子体中存在的实验证据, 证实了湍流驱动的带状流在触发高约束模式过程中的重要作用; 发现带状流破坏了边界湍流的空间对称性, 揭示了湍流抑制的关键机理。构建了带状流抑制湍流触发高约束模式的理论模型, 揭示了约束模式转换的内在动力学过程, 阐明了功率阈值的成因; 发现影响高约束模式可进性关键因素, 发展了高约束模式稳定维持的方法。发现高约束模式下输运垒的动理学致稳效应, 发展出一种适合稳态运行的高约束模式, 并验证了其未来稳态聚变堆条件的兼容性。上述工作系统地揭示了磁约束聚变等离子体高约束稳态运行模式的关键机理, 6 篇代表性论文中 3 篇发表于国际顶级物理期刊《Physical Review Letters》, 2 篇为《Nuclear Fusion》期刊亮点文章, 成果获得国际磁约束聚变界高度评价。项目第一完成人获中科院杰出科技成就奖、亚太等离子体物理杰出青年科学家奖, 当选安徽省磁约束聚变学科带头人。经研究, 本单位同意提名该项目作为 2025 年安徽省自然科学奖候选项目。

三、项目简介

托卡马克外部加热功率超过临界阈值后, 等离子体边界湍流会被显著抑制, 形成边界输运垒并进入高约束模式, 使得同等加热条件下等离子体温度、密度和能量约束时间得到大幅度地提升, 高约束稳态运行模式已成为聚变能开发的重要物理基础。学界普遍认为带状流在高约束模式形成过程中扮演了重要角色, 但对带状流如何产生和如何抑制湍流输运、以及如何维持稳态高性能运行等并不完全

清楚，成为磁约束聚变最重要的科学挑战之一。该项目持续攻关上述核心科学问题，系统地揭示了磁约束聚变等离子体高约束稳态运行模式的形成机理：

一 在我国托卡马克装置上率先获得了带状流在等离子体中存在的实验证据，证实了湍流驱动的带状流在触发高约束模式过程中的重要作用；发现和揭示了带状流破坏边界湍流空间对称性抑制湍流输运的关键机理。

采用长距离相关测量大尺度湍流结构的方法，在我国托卡马克装置上率先获得了带状流在等离子体中存在的实验证据。证实了湍流与带状流之间通过雷诺应力的能量传递，触发高约束模式形成；首次实验探测到边界湍流径向波数谱倾斜，将湍流能量散射到高波数小尺度耗散空间，从而使湍流得到抑制。

二、构建了带状流抑制湍流触发高约束模式形成的理论模型，揭示了约束模式转换的内在动力学过程，阐明了功率阈值的成因；发现影响高约束模式可进性的关键因素，发展了高约束模式稳定维持的方法。

构建了一维径向空间的约束模式转换理论模型，发现带状流的扰动分量动态触发了高约束模式，而平均分量最终将等离子体锁定在高约束模式，基于该动力学模型复现了实验中的功率阈值定标律；发现影响高约束模式可进性的关键因素，通过降低边界中性粒子对带状流阻尼实现高约束模式的稳定维持。

三. 发现高约束模式下输运垒的动理学致稳效应，发展出一种适合稳态运行的高约束模式，并验证了其未来稳态聚变堆条件的兼容性。

发现高约束模式下输运垒的动力学致稳效应及其产生的物理条件，发展出适用于未来聚变堆的高约束稳态运行模式，并验证了它与未来稳态聚变堆参数条件的兼容性，成为中国聚变工程试验堆 CFETR 的候选运行模式。

项目 6 篇代表性论文中包含了国际顶级物理期刊《Physical Review Letters》论文 3 篇，磁约束聚变领域权威期刊《Nuclear Fusion》论文 2 篇；项目 6 篇代表性论文他引 165 次；代表性论文 1 被 9 篇 PRL 论文引用，代表性论文 3、5 入选《Nuclear Fusion》期刊的亮点文章（“Highlight”）。项目工作被权威专家评述为：带状流识别的开创性工作（“pioneering work”），首次测量到带状流的极向对称性（“first measured”），湍流抑制机理首次得到验证（“first tested”）。对约束模式转换研究作出重要贡献（“stand out as significant contributions”）。为未来聚变堆稳态运行提供了坚实的物理基础（“solid physics basis”）。项目第一完成人获中科院杰出科技成就奖、亚太等离子体物理杰出青年科学家奖等。

四、代表性论文专著目录

序号	论文（专著）名称/刊名/作者	年卷页码 (xx 年 x 卷 x 页)	发表时间年月日	通讯作者（含共同）	第一作者（含共同）	国内作者	论文署名单位是否包含国外单位
1	Direct measurement of poloidal long-wavelength E x B flows in the HT-7 tokamak/Physical Review Letters/G.S. Xu, B.N. Wan, M. Song and J. Li	2003/91/1 25001	2003-09-16	G.S. Xu	G.S. Xu	徐国盛，万宝年，宋梅，李建刚	否
2	Low-to-High Confinement Transition Mediated by Turbulence Radial Wave Number Spectral Shift in a Fusion Plasma/Physical Review Letters/G.S. Xu, B.N. Wan, H.Q. Wang, H.Y. Guo, V. Naulin, J.J. Rasmussen, A.H. Nielsen, X.Q. Wu, N. Yan. L. Chen, L. M. Shao, R. Chen, L. Wang, and W. Zhang	2016/116/095002	2016-03-01	G.S. Xu	G.S. Xu	徐国盛，万宝年，汪惠乾，伍兴权，颜宁，陈良，邵林明，陈冉，王亮，张炜	是
3	One-dimensional modelling of limit-cycle oscillation and H-mode power scaling /Nuclear Fusion/Xingquan Wu, Guosheng Xu, Baonian Wan, Jens Juul Rasmussen, Volker Naulin and Anders Henry Nielsen	2015/55/0 53029	2015-04-22	Xingquan Wu, Guosheng Xu	Xingquan Wu	伍兴权，徐国盛，万宝年	是

4	Understanding L-H transition in tokamak fusion plasmas/Plasma Science & Technology. / Guosheng XU (徐国盛) and Xingquan WU (伍兴权)	2017/19/033001	2017-02-21	Xingquan WU	Guosheng XU	徐国盛，伍兴权	否
5	Study on the L-H transition power threshold with RF heating and lithium-wall coating on EAST/Nuclear Fusion/L. Chen, G.S. Xu, A.H. Nielsen, W. Gao, Y.M. Duan, H.Q. Liu, L. Wang, M.H. Li, M. Wang, X.J. Zhang, . Chen, H.Q.Wang, Z. Sun, S.Y. Ding, N.Yan, .C. Liu, L.M. Shao, W. Zhang, .H. Hu, J. Li, L. Zhang, B.N. Wan and the EAST Team	2016/56/056013	2016-04-19	L. Chen	G.S. Xu	陈良，徐国盛，高伟，段艳敏，刘海庆，王亮，李妙辉，王茂，张新军，陈冉，汪惠乾，孙震，丁斯烨，颜宁，刘少承，邵林	是

6	Promising High-Confinement Regime for Steady-State Fusion/Physical Review Letters/G.S. Xu, Q. Q. Yang, N. Yan, Y. F. Wang, X. Q. Xu, H. Y. Guo, R. Maingi, L. Wang, J. P. Qian, X. Z. Gong, V. S. Chan, T. Zhang, Q. Zang, Y. Y. Li, L. Zhang, G. H. Hu, and B. N. Wan	2019/122/255001	2019-06-26	G.S. Xu, B.N. Wan	G.S. Xu	徐国盛, 杨清泉, 颜宁, 王一丰, 王亮, 钱金平, 龚先祖, 张涛, 臧庆,	是
---	--	-----------------	------------	-------------------	---------	--	---

五、主要完成人（按完成人顺序排列）

徐国盛, 万宝年, 伍兴权, 杨清泉, 陈良

六、主要完成单位（按完成单位顺序排列）

中国科学院合肥物质科学研究院

七、论证专家

姓名	工作单位	职称	专业领域
孙有文	中国科学院合肥物质科学研究院	研究员	等离子体物理
臧庆	中国科学院合肥物质科学研究院	研究员	等离子体物理
张新军	中国科学院合肥物质科学研究院	研究员	等离子体物理
黄娟	中国科学院合肥物质科学研究院	研究员	等离子体物理
韩效锋	中国科学院合肥物质科学研究院	研究员	等离子体物理