通行高能量粒子激发托卡马克等离子体中低频鱼骨模

虞立敏1，王丰2，傅国勇3 ，于利明4 ，张先梅1

1华东理工大学，上海 200237

1大连理工大学，大连 116024

1浙江大学，杭州 310027

1中核集团核工业西南物理研究院，成都 610225

Email: [yulimin@ecust.edu.cn](mailto:yulimin@ecust.edu.cn)

摘 要：托卡马克装置中垂直或切向中性束注入产生的高能量粒子能强烈激发环向模数为n=1，极向模数m=1的内扭曲模[1,2]。垂直中性束注入产生的捕获高能量粒子可激发频率为捕获粒子的进动频率的能量粒子模[3]和频率为热离子反磁漂移频率的“带隙”模[4]。而实验观测表明切向注入产生的通行高能量粒子既能激发低频模也能激发高频模[2]。高频模是一支频率为高能量粒子的环向通行频率的能量粒子模[5,6]。而低频分支过去理论认为一支频率为热离子反磁漂移频率的“带隙”模[7]。本工作发现低频模也可以为能量粒子模，其频率为ω = ωφ − ωθ，其中ωφ为通行粒子的环向通行频率，ωθ为极向通行频率。通行高能量粒子有限轨道宽度效应是导致低频能量粒子模被激发的物理原因。磁剪切在这种不稳定性中占重要作用，存在一个临界磁剪切。而本底等离子体比压对其影响小。该理论应用于实验，可以解释HL-2A装置中观测的低频鱼骨模[8]。

关键词：低频鱼骨模,通行高能量粒子，有限轨道宽度效应，能量粒子模，托卡马克等离子体

参考文献

[1] K. McGuire, *et al.*, Study of High-Beta Magnetohydrodynamic Modes and Fast-Ion Losses in PDX, *Phys. Rev. Lett.* 1983, 50(12), 891

[2] W. W. Heidbrink, *et al*., Tangential Neutral-Beam-Driven Instabilities in the Princeton Beta Experiment,

*Phys. Rev. Lett.* 1986, 57(7), 835

[3] Liu Chen, *et al*., Excitation of internal kink modes by trapped energetic beam ions, *Phys. Rev. Lett.* 1984, 52(13),1122

### [4] B. Coppi, F. Porcelli, Theoretical model of fishbone oscillations in magnetically confined plasmas, *Phys. Rev. Lett.* 1986, 57(18), 2272

[5] Shaojie Wang, Destabilization of Internal Kink Modes at High Frequency by Energetic Circulating Ions, *Phys. Rev. Lett.* 2001, 86(23), 5286

[6] Feng Wang, *et al.*, High Frequency Fishbone Driven by Passing Energetic Ions in Tokamak Plasmas, *Nucl. Fusion* 2017, 57(5), 056013

[7] R. Betti, J. P. Freidberg, Destabilization of the Internal Kink by Energetic Circulating Ions, *Phys. Rev. Lett.* 1993, 70(22), 3428

[8] Liming Yu, *et al*, Transition and Interaction of Low-Frequency Magnetohydrodynamic Modes during Neutral Beam Injection Heating on HL-2A, *J. Phys. Soc. Jpn*. 2017, 86(2), 024501

基金项目：国家自然科学基金项目（NO. 11505022, 11675053, 11875131 and 11875024）,国家磁约束核聚变能发展研究专项 （NO. 2015GB110005）,国家重点研发计划（NO. 2017YFE0301202）.