Энергичные частицы в плазме токамака

Лебедев С.В., Аскинази Л.Г., Белокуров А.А., Гин Д.Б., Жубр Н.А., Корнев В.А., Тукачинский А.С., Шевелев А.Е.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, sergei.lebedev@mail.ioffe.ru

Физика энергичных частиц в плазме токамака является предметом интенсивных исследований в научных центрах по термоядерной тематике. Повышенный интерес к этой области физики горячей плазмы обусловлен приближающимся запуском первого экспериментального реактора ИТЭР, в котором должна быть продемонстрирована самоподдерживающаяся реакция DT синтеза, критическим образом зависящая от продолжительного удержания высокоэнергичных альфа-частиц (3,5 МэВ) [1].

Хорошо изучено «классическое» (столкновительное) торможение энергичных ионов (ЭИ), обеспечивающее нагрев фоновой плазмы. Исследованы потери ЭИ, обусловленные «гофрировкой» магнитного поля [2, 3], МГД неустойчивостями, вызывающими аномальный перенос ЭИ: “fishbone” [4], баллонные моды [5], высокочастотные альфвеновские моды (TAE) [6]. Обнаружены потери ЭИ, обусловленные турбулентностью плазмы [7].

В ряде работ предсказывалось возбуждение мод альфвеновского типа (АМ) убегающими электронами [8, 9]. Такое моды были обнаружены в работах по ЭЦ и НГ нагреву плазмы [10, 11]. Возникновение АМ в отсутствие дополнительного нагрева до недавнего времени представлялось невозможным, поэтому последовательная теория этого явления отсутствует. Наблюдения АМ в режиме омического нагрева редки и противоречивы [12, 13]. Одним из возможных объяснений является модель развития АМ при наличии тиринг-неустойчивости, обусловливающей появление магнитного шира вблизи сепаратрисы магнитного острова [14].

В докладе представлены результаты исследования АМ, наблюденных при омическом нагреве плазмы в токамаке ТУМАН-3М [15] и анализ физики их возбуждения. Колебания обнаружены с помощью магнитных зондов, размещенных внутри вакуумной камеры, и имеют частоты в диапазоне 0,8 – 1,8 МГц. В разрядах с различными рабочими газами (H, D, He) установлено, что частота колебаний пропорциональна альфвеновской скорости. Это позволило идентифицировать колебания как альфвеновские моды. Во многих случаях вспышки АМ совпадают с моментами срывов пилообразных колебаний. Возбуждение АМ в режиме омического нагрева в отсутствие ЭИ может быть понято в рамках модели магнитных возмущений, возникающих в ходе магнитного перезамыкания.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 16-12-10285) и ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Литература

1. “ITER Physics Basis”, Nucl. Fusion, 39(1999), 2137.
2. Yushmanov P.N., in Rev. Plasma Phys., V.16(1990), Consult. Bur., New York, 117.
3. Scott S.D. et al, Nucl. Fusion, 25(1985), 359.
4. McGuire K. et al, Phys. Rev. Lett., 50(1983), 891.
5. Tsai S.T., Chen L., Phys. Fluids B, 5(1993), 3284.
6. Heidbrink W.W., Sadler G.J., Nucl. Fusion, 34(1994), 535.
7. Heidbrink W.W. et al, Phys. Rev. Lett., 103(2009), 175001.
8. Furth H.P., Phys. Fluids 8(1965) 2020.
9. Zonca F.et al, Nucl. Fusion, 47(2007), 1588.
10. Valovich M. et al, Nucl. Fusion 40(2000), 1569.
11. Snipes J.A. et al, Nucl. Fusion 48(2008) 072001.
12. Chang Z. et al, Nucl. Fusion, 35(1995), 1469.
13. McClements K.G. et al, Nucl. Fusion, 42(2002) 115.
14. Buratti P. et al, Nucl. Fusion, 45(2005), 1446.
15. Askinazi L.G. et al Nucl. Fusion 55 (2015) 104013.