Изотопный эффект в турбулентном переносе в токамаке (наблюдения и глобальное гирокинетическое моделирование)

Е.З. Гусаков1, А.Д. Гурченко1, П. Нискала2

1Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия  
2Aalto University, Helsinki, Finland

Взаимодействие между геодезической акустической модой (ГАМ) колебаний тороидальной плазмы и дрейфовой турбулентностью привлекало пристальное внимание исследователей аномального транспорта энергии и частиц в последнее десятилетие. ГАМы, возбуждаемые в плазме благодаря трёх-волновому взаимодействию дрейфовых волн, в свою очередь могут влиять на турбулентные флуктуации и аномальный транспорт. Зависимость уровня возбуждения ГАМ от изотопного состава плазмы [1, 2] может быть ответственна за изотопный эффект в аномальном переносе энергии и частиц в токамаке [3], физический механизм которого до сих пор не ясен.

В настоящем докладе представляются результаты сравнительного исследования изотопного эффекта в много-масштабном турбулентном переносе, выполненного как экспериментально с помощью локальных диагностик турбулентности в сходных водородных и дейтериевых омических разрядах токамака ФТ-2, так и теоретически с помощью глобального гирокинетического (ГК) моделирования этих разрядов [4]. С помощью обоих подходов показано, что в дейтерии, в градиентной зоне разряда, амплитуда, длина волны и корреляционная длина ГАМ существенно больше, чем в водороде, что приводит к большей модуляции уровня турбулентности. Кроме того, в дейтериевых разрядах экспериментально обнаружены свидетельства в пользу лучшего удержания частиц и большей корреляционной длины турбулентности со стороны слабого магнитного поля. Модуляция потоков частиц и энергии на частоте ГАМ, обнаруженная с помощью ГК моделирования [5], оказалась также большей в дейтерии. При этом средний расчётный уровень флуктуаций плотности и электрического поля в водородных и дейтериевых разрядах оказался близким, но тем не менее средние ГК потоки частиц и энергии в ионном канале демонстрировали выраженный изотопный эффект при всех радиусах. Изотопный эффект обнаружен также и при расчёте МГД потока частиц, что указывает на то, что относительная фаза колебаний плотности и полоидального электрического поля в дейтерии ближе к π/2, чем в водороде.

Можно надеяться, что полученные экспериментальные и расчётные результаты объясняют изотопный эффект в переносе в экспериментах на токамаках DIII-D, TCV и T-10, где ГАМ наблюдается в широкой области по радиусам. В случае локализации ГАМ на периферии разряда (JET, Globus-M) обсуждаемый механизм также может приводить к росту глобального времени удержания энергии и частиц в дейтериевых разрядах в сравнении с водородными. Полученные результаты демонстрируют продуктивность сравнительного изучения аномального переноса в токамаке с помощью локальных диагностик и глобального ГК моделирования сходных водородных и дейтериевых разрядов.

Работа частично поддержана грантом РФФИ 15-02-03766.

Литература

1. Y. Xu et al., 2013 Phys. Rev. Lett. **110** 265005.
2. A.D. Gurchenko, et al., 25th IAEA Fusion Energy Conference (2014) IAEA-CN-221/EX/11-2Ra.
3. U. Stroth, 1998 Plasma Phys. Control. Fusion **40** 9.
4. S. Leerink et al. 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 165001
5. A.D. Gurchenko *et al* 2015 *EPL* **110** 55001