

ФИЗИКА ОТКРЫТЫХ ЛОВУШЕК

(проектирование современного термоядерного эксперимента)

А.Д.Беклемишев,
ИЯФ СО РАН, НГУ

Лекция 2

- Модификация равновесия при большом β ;
- Гидродинамические неустойчивости плазмы;
- Дрейфовые и кинетические неустойчивости;
- Пассивные и активные способы стабилизации плазмы;
- Эффективные способы нагрева плазмы;
- Поперечные потери (частиц, энергии, момента импульса).

Равновесие при большом β

Уравнения параксиального равновесия

$$B^2/8\pi + P_{\perp} = B_0^2/8\pi$$

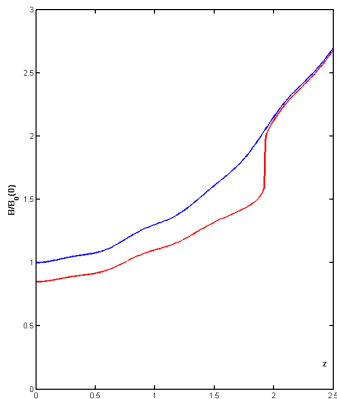
выглядят достаточно просто, но не всегда применимы.

Свойство: при большом β продольные градиенты поля усиливаются, так что может нарушиться условие параксиальности.

Эффективное пробочное отношение

$$R_{\text{eff}} = B_{\text{max}}/B_{\text{min}} = \sqrt{\frac{B_{0\text{max}}^2 - 8\pi P}{B_{0\text{min}}^2 - 8\pi P}}$$

$$R_{\text{eff}} = R_0 \sqrt{\frac{1 - \beta_{\text{min}}}{1 - \beta_{\text{max}}}}$$



Пример кинетического расчёта равновесного поля для ГДЛ.

Неустойчивости равновесия

Гидродинамические неустойчивости

Теоретически - самые быстрые и грубые, существуют в плотной (газодинамической) плазме. В открытых ловушках - электростатические желобковые моды, при большом β - баллонные.

Дрейфовые

“Косые” волны, с наклоном к силовым линиям, зависят от граничных условий вдоль ловушки.

Кинетические (микронеустойчивости)

Причиной является неравновесность функции распределения в фазовом пространстве. При этом могут раскачиваться и крупномасштабные моды, которые при иных условиях устойчивы или даже не существуют.

Методы стабилизации

Формирование устойчивого профиля магнитного поля

На МГД-моды больше ничего не действует. “Палки Иоффе”, непараксиальные ячейки, расширители и каспы большого давления. Баллонные моды и концевые стабилизаторы.

Формирование функции распределения (группы частиц), способствующей устойчивости

Иногда дорого стоит.

Специфические граничные условия вокруг плазмы, внешние воздействия.

Массивные кожухи для создания “вмороженности” потока, торцевая стабилизация, воздействие импульсом атомарных пучков в ГДЛ.

Обратные связи

Действуют только на малое число мод дискретного спектра. Нужны сенсоры и актуаторы.

Методы удержания

Надеяться на авось

Даже при развитии неустойчивости состояние плазмы может остаться приемлемым.

Воздействовать на процесс развития неустойчивости

Сложно, но можно. “Вихревое удержание”.

Искать лучшие режимы в много-параметрическом пространстве равновесий

Очень долго и нудно. Путь токамаков. “Скейлинги”.

Методы нагрева

Атомарная инжекция

Сложная и дорогая технология, но создаётся полезная для термояда группа частиц. Если инжектировать сильно надтепловые атомы, захваченные частицы “съедают” β . Пучковый термояд эффективен при $Q < 1$.

ЭЦР

Дорого, греются электроны, а не ионы.

ИЦР

Перспективно, но пока работает только при низкой плотности, $n \sim 10^{12}$.

Электронный пучок

Высокая пороговая мощность для эффективного взаимодействия.

Поперечные потери

Классические или неоклассические

На кулоновских столкновениях. В итоге всё стекает в расширитель вдоль поля.

Аномальные (конвективные)

При наличии МГД-неустойчивостей

Аномальные (диффузия и пинч)

Перенос в фазовом пространстве может иметь отражение в реальных потоках тепла и частиц. Плазма может собираться кучкой, если это ей выгодно (напр., быстрые ионы в ГДЛ при вихревом удержании).

Излучение из плазмы, перезарядка

Доля таких потерь мала при хороших вакуумных условиях.