

1. Название работы: Сценарии турбулентного нагрева плазмы мощным электронным пучком
2. Состав исполнителей: И.В.Тимофеев, А.В.Терехов, К.В.Лотов, А.С.Аракчеев
3. И.В.Тимофеев, timofeev@ngs.ru
4. Научное содержание работы

4.1 Постановка задачи: Коллективное взаимодействие электронного пучка с плазмой является одним из самых распространенных и наиболее фундаментальных явлений в физике плазмы. Несмотря на полувековую историю исследований в этой области, различные аспекты задачи продолжает активно изучаться как применительно к космическим явлениям, так и применительно к схеме быстрого поджига в инерциальном термоядерном синтезе. В данной работе основное внимание уделено изучению тех режимов коллективной релаксации пучка, которые интересны с точки зрения нагрева лабораторной плазмы до высоких температур. Мотивацией для таких исследований является недавний прогресс, достигнутый в экспериментах по нагреву плазмы в открытых ловушках (ИЯФ СО РАН).

Несмотря на обилие теоретических моделей, описывающих различные режимы пучково-плазменного взаимодействия, задача предсказания с их помощью результатов реальных экспериментов все еще далека от решения. Дело в том, что максимально приближенная к эксперименту постановка задачи зачастую требует отказа от привычных для теории идеализаций, таких как слабое или сильное магнитное поле, гидродинамический или кинетический характер пучковой неустойчивости, приближение случайных фаз возбуждаемых в плазме турбулентных пульсаций. Кроме того, при длительной инжекции пучка эволюция пучково-плазменной системы может проходить через целую последовательность стадий, определяемых совершенно различными нелинейными процессами. В связи с этим становится актуальным создание численных моделей, которые бы позволили с единых позиций изучить всю картину проходимых пучком этапов релаксации и помогли бы определить адекватность существующих теоретических представлений о механизмах насыщения пучковых неустойчивостей.

Существующие теоретические сценарии слабой и сильной турбулентности основываются на представлении о линейном характере возбуждения резонансных с пучком колебаний, которое позволяет отождествлять скорость накачки энергии в турбулентность с линейным инкрементом пучковой неустойчивости. Очевидно, что при достаточно большой энергии резонансных волн это представление перестает быть верным, и динамика пучка оказывается нелинейной. Для изучения вопроса о том, какое влияние оказывают пучковые нелинейности на процесс раскачки неустойчивости в условиях развитой турбулентности, необходимо численное моделирование, которое, с одной стороны, будет способно на больших временах отслеживать эволюцию возбуждаемой пучком турбулентности, а с другой, позволит обеспечить достаточно подробное описание кинетических эффектов, связанных с захватом пучка. Такому моделированию, ставшему возможным только недавно благодаря появлению адекватных задаче вычислительных ресурсов, и посвящена данная работа.

Таким образом, целью работы является изучение основных физических явлений, происходящих в пучково-плазменной системе в процессе достаточно длительной инъекции пучка, когда в плазме не только устанавливается квазистационарное турбулентное состояние, но и когда это состояние успевает значительно измениться за счет эволюции макроскопических параметров плазмы. Это предполагает

- изучение линейной стадии неустойчивости электронного пучка в замагниченной плазме в рамках точной кинетической теории,
- исследование сценария установления и нелинейной эволюции возбуждаемой пучком турбулентности, а также
- создание теоретических и численных моделей, способных описывать релаксацию мощных электронных пучков в плазме на масштабах реальных экспериментов.

4.2 Современное состояние проблемы: В последнее время задача коллективного взаимодействия пучка с плазмой активно изучается либо применительно к космической плазме и ионосферным экспериментам, либо применительно к схемам быстрого поджига в инерциальном термоядерном синтезе. Для первой задачи характерны малые плотности плазмы и очень слабые неустойчивости, в связи с чем продолжают исследоваться квазилинейные механизмы релаксации пучка [Yu. Tyshetskiy et al., *Phys. Plasmas*, 15, 092110 (2008)], а также проходящие без участия ионов нелинейные процессы, связанные с захватом пучка и формированием наблюдаемых в космической плазме локализованных волновых пакетов [T. Umeda, *Phys. Plasmas*, 13, 092304 (2006)]. Для схемы быстрого поджига, наоборот, характерны такие режимы релаксации пучка, которые сопровождаются развитием сильной неустойчивости. Плотность возникающего в этой задаче релятивистского пучка составляет значительную долю от плотности плазмы, а его ток скомпенсирован обратным током плазменных электронов. Благодаря тому, что неустойчивость этой системы развивается в отсутствие магнитного поля, важную роль играет возбуждение косых волн или даже развитие поперечной филаментационно-вейбелевской неустойчивости [A. Bret et al., *Phys. Rev. Lett.*, 94, 115002 (2005)], нелинейная стадия которой также является объектом активных исследований [A. Karmakar et al., *Phys. Plasmas*, 15, 120702 (2008)]. Все упомянутые явления, однако, изучаются с помощью двумерных или даже трехмерных кодов только на весьма коротких промежутках времени, когда можно пренебречь относительно медленным движением ионов, и в отсутствие постоянной накачки возбуждаемых в плазме колебаний. В рамках данной работы мы планируем провести численное моделирование долговременной эволюции непрерывно накачиваемых квазистационарных турбулентных состояний в системе плазма-пучок. Данные исследования позволят впервые провести сравнение результатов моделирования с реальными экспериментами по турбулентному нагреву плазмы.

4.3 Ожидаемые результаты по окончании периода работы: Планируется провести количественное сравнение одномерных гибридных расчетов с экспериментами на открытых ловушках, исследовать влияние регулярной неоднородности плотности плазмы на эффективность релаксации пучка, идентифицировать наиболее неустойчивые колебания в двумерном случае (2D PIC), исследовать роль эффектов захвата в условиях возбуждения косых волн, определить сце-

нарий установления турбулентности в системе плазма-пучок, провести сравнение численных и экспериментальных турбулентных спектров.

4.4 Основные результаты, полученные к настоящему времени

- Впервые получены решения дисперсионного уравнения для системы горячей электронный пучок – холодная замагниченная плазма в рамках точной кинетической теории. Исследованы эффекты совместного влияния магнитного поля и углового разброса пучка на подавление неустойчивостей косых волн.
- Разработана двумерная численная PIC модель для изучения механизмов коллективного взаимодействия мощных электронных пучков с плазмой, а также одномерная гибридная модель с упрощенным описанием плазмы, способная моделировать реальные эксперименты по инъекции электронных пучков в плазму.
- Исследован последовательный сценарий одномерной эволюции пучково-плазменной системы в условиях длительной инъекции пучка. Установлено, что переход от динамической стадии к состоянию развитой турбулентности связан с развитием коротковолновой модуляционной неустойчивости. Показано, что с ростом электронной температуры турбулентность переходит в режим с постоянной мощностью накачки, уровень насыщения которой не зависит от детальной структуры турбулентности и определяется исключительно пучковыми нелинейностями.

4.5 Эффект от использования кластера: Без использования вычислительных ресурсов кластера решение поставленных задач было бы невозможно.

4.6 Иллюстрации:

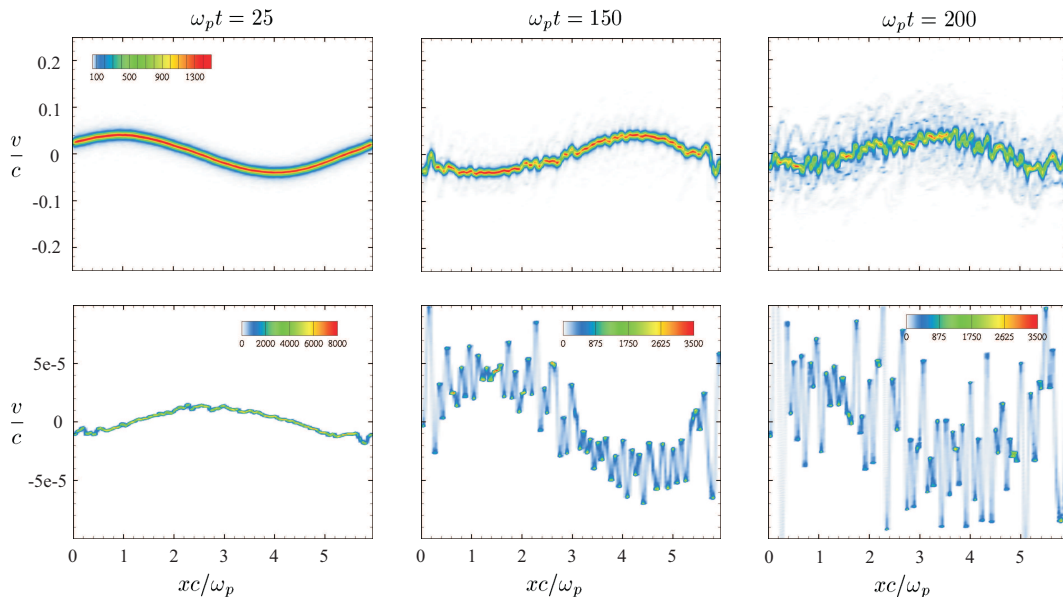


Рис. 1: Эволюция электронной (сверху) и ионной (снизу) функций распределения плазмы при развитии коротковолновой модуляционной неустойчивости в режиме с надтепловой накачкой. На заключительной стадии наблюдается опрокидывание коротковолновых колебаний.

5. Перечень публикаций, содержащих результаты работы:

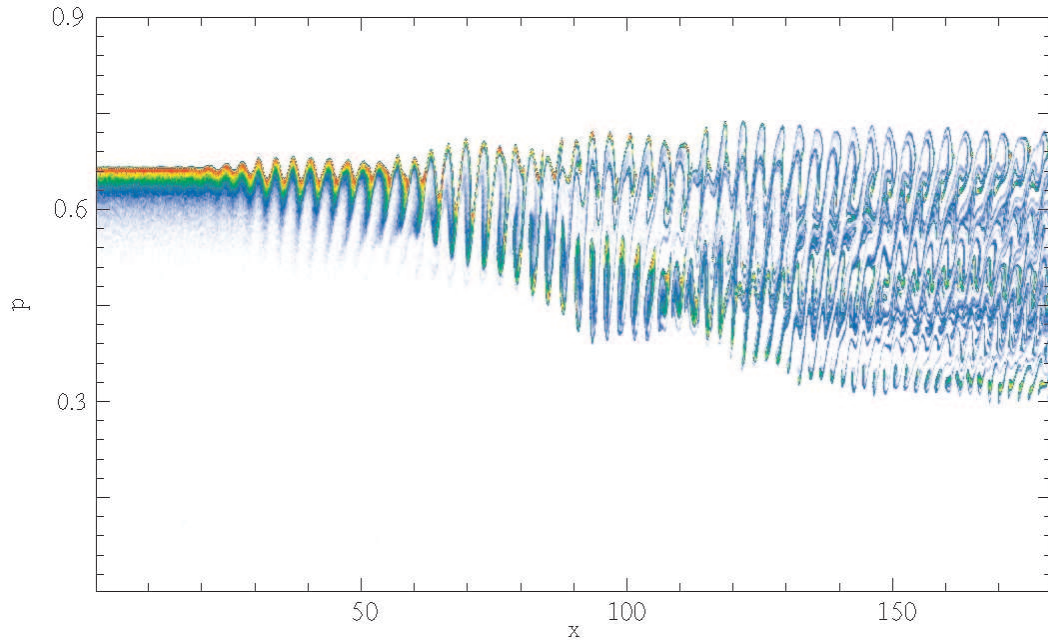


Рис. 2: Фазовая плоскость пучка при инъекции в плазменное полупространство (импульс измеряется в единицах $m_e c$, а расстояние от места инъекции в c/ω_p). Показан момент времени после установления развитой турбулентности. Наблюдается режим, когда нелинейные процессы в плазме не способны разрушить корреляционные эффекты, связанные с захватом пучка. Отчетливо видны локализованные по импульсу зоны захвата (их число различно на разных расстояниях от места инъекции).

- (a) *I. V. Timofeev, K. V. Lotov, and A. V. Terekhov.* Direct computation of the growth rate for the instability of a warm relativistic electron beam in a cold magnetized plasma. // Phys. Plasmas, 2009, v. 16, p. 063101.
- (b) *А. В. Терехов, И. В. Тимофеев, К. В. Лотов.* Двумерная численная модель плазмы для изучения процессов пучково-плазменного взаимодействия. // Вестник НГУ, серия "Физика 2010, т. 5, № 2, с. 85–97.
- (c) *I. V. Timofeev, A. V. Terekhov.* Simulations of turbulent plasma heating by powerful electron beams. // Phys. Plasmas, 2010, v. 17, p. 083111.