

- Генрих Екатерина Александровна
- Тема работы: Создание трехмерной модели пучково-плазменного взаимодействия на основе метода частиц-в-ячейках.
- Состав коллектива: Генрих Екатерина Александровна, Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, к.ф.-м.н., mesyats@gmail.com
- Работа проводилась в рамках проекта РФФИ №16-11-10028. Руководитель проекта Вшивков Виталий Андреевич. Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. Название (тема) работы: Высокопроизводительное моделирование турбулентных режимов генерации высокочастотного электромагнитного излучения в системе плазма-релятивистский пучок.
- Научное содержание работы:

1. Постановка задачи.

В рамках проекта на основе авторской модификации метода частиц в ячейках будет создана трехмерная численная модель инжекции релятивистского пучка в плазму, основанная на кинетическом приближении, и осуществлено моделирование этого процесса. Электронный пучок, входящий в плазму вдоль магнитного поля через одну границу и покидая её через другую, обеспечивает непрерывную накачку плазменных колебаний. Такая постановка требует рассмотрения достаточно протяженной области плазмы, внутри которой происходит захват пучка полем возбуждаемой волны. Будет исследована зависимость мощности и поляризации электромагнитного излучения от профилей плотности пучка и плазмы случае при взаимодействии электронного пучка с плазмой. Будут получены оценки зависимости мощности и поляризации электромагнитного излучения от амплитуды и периода модуляций плотности плазмы в трёхмерном случае при заданном профиле плотности. Будет получена оценка мощности излучения в системе с двумя встречными пучками.

2. Современное состояние проблемы (на момент начала работы).

В настоящее время интерес к проблеме коллективного взаимодействия электронных потоков с плазмой наблюдается как в связи с астрофизическими задачами и схемой быстрого поджига в инерциальном термоядерном синтезе, так и в связи с проблемой турбулентного нагрева плазмы в открытых ловушках. Характерные для космической плазмы малые плотности и слабые неустойчивости позволяют использовать квазилинейное приближение для изучения механизмов релаксации пучков и формирования локализованных волновых пакетов в астрофизике [T. Umeda, Phys. Plasmas, 13, 092304 (2006), Yu. Tyshetskiy et al., Phys. Plasmas, 15, 092110 (2008)]. В условиях лабораторных экспериментов режимы релаксации пучка сопровождаются развитием сильных неустойчивостей, нелинейные стадии которых изучаются с помощью численного моделирования, но, во-первых, только для коротких промежутков времени, когда можно пренебречь относительно медленным движением ионов и, во-вторых, в отсутствие постоянной накачки возбуждаемых колебаний [X.Kong et al. Phys. Plasmas 16, 032107 (2009); A.Bret et al. Phys. Plasmas 17, 120501 (2010)]. В рамках проекта планируется провести численное моделирование неустойчивых режимов релятивистских электронных пучков в установках УТС с учетом динамики ионов и для больших моментов времени. Для условий лабораторных экспериментов с долговременной эволюцией непрерывно накачиваемых квазистационарных турбулентных состояний в системе плазма-пучок данные исследования будут проведены впервые и будут соответствовать передовому мировому уровню. Ключевым элементом в исследованиях по открытым ловушкам является использование электронных пучков для турбулентного подавления электронной теплопроводности, представляющей собой основной канал потерь энергии из ловушки [Arzannikov A.V., Burdakov A.V. et. al. Experimental and theoretical investigations of high power sub-millimeter wave emission at two-stream instability of high-current REB // Abstracts 9th Internat. Conf. on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, Tsukuba, Japan, - 2012]. Электромагнитное излучение вблизи плазменной частоты определяет эффективность

возбуждения плазменной турбулентности, что делает актуальным исследование новых схем генерации электромагнитных волн. На основе численного моделирования в рамках данного проекта будет впервые изучена одна из схем со встречными косыми пучками, что даст возможность предварительных рекомендаций для будущих экспериментов по повышению эффективности нагрева плазмы и эффективности генерации электромагнитного излучения в системе плазма-пучок.

3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.

Для решения поставленной задачи используется метод частиц в ячейках со схемой FDTD для решения уравнений полей на сдвинутых по пространству сетках. Используемые PIC-модели, основанные на методе частиц, наиболее полно описывают физику рассматриваемых явлений, но для своей реализации требуют больших вычислительных ресурсов, особенно в трехмерной постановке. Для распараллеливания метода частиц в ячейках выбран метод простой лагранжевой декомпозиции. Вычисления электромагнитных полей на эйлеровом этапе каждый процессор производит на всей области, а вычисление новых координат частиц на лагранжевом этапе каждый процессор выполняет для своей группы частиц.

4. Полученные результаты.

В рамках работы по гранту создан комплекс программ 3D-PIC для моделирования процессов взаимодействия электронных пучков с плазмой в трехмерной постановке. Проведенное компьютерное моделирование взаимодействия с плазмой двух встречных пучков с параметрами, близкими к условию лабораторного эксперимента, показало усиление электромагнитного излучения вблизи второй гармоники плазменной частоты, что хорошо согласуется с теорией. Проведены расчеты с инжекцией электронного пучка в плазму с модулированной плотностью. Исследована зависимость мощности электромагнитного излучения от формы профиля пучка и плазмы и величины амплитуды модуляции профиля плотности плазмы при взаимодействии одного инжектируемого электронного пучка с модулированной плазмой.

5. Иллюстрации, визуализация результатов.

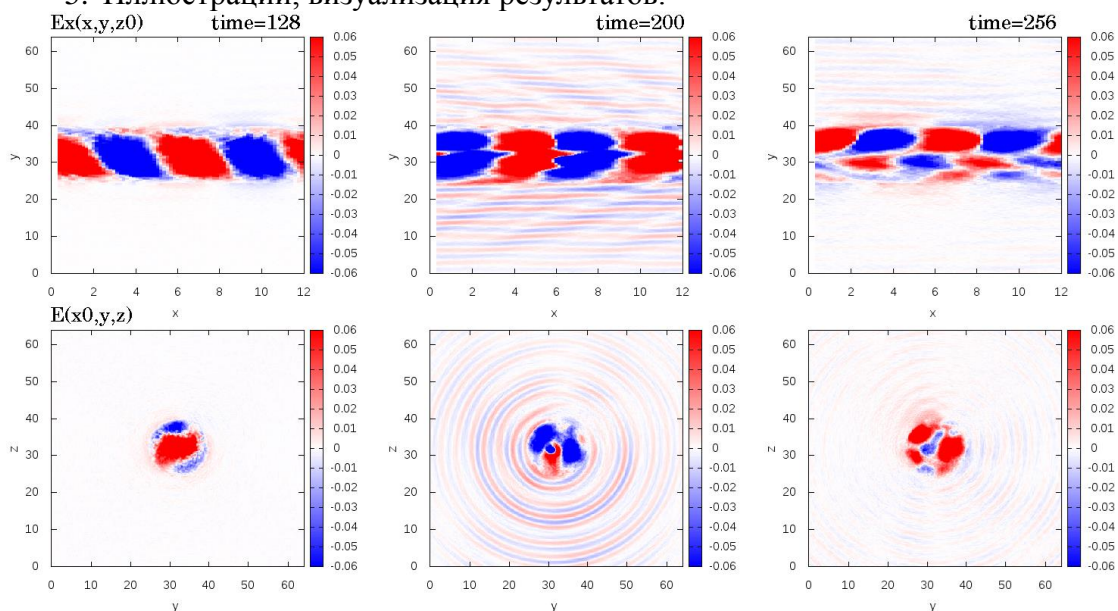


Рис.1. Электрическое поле E_x двух встречных электронных пучков круглого сечения. Верхний ряд – срез xz , нижний – yz .

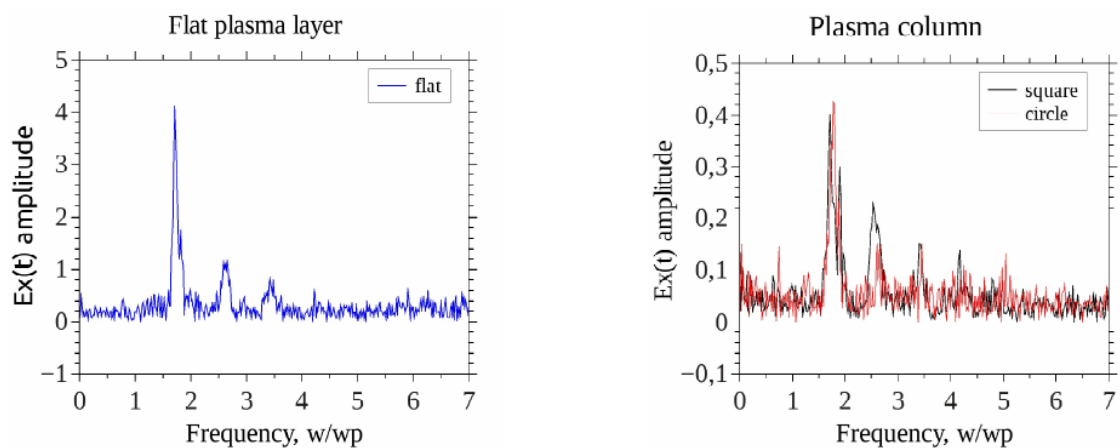


Рис.2. Амплитуда фурье-гармоник x-компоненты электрического поля в точке у границы для случая плоского пучка и пучков квадратного и круглого сечения. Видно, что основное излучение происходит около второй гармоники.

- Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Использование кластера НГУ в данной работе позволило провести серию расчетов по взаимодействию двух встречных пучков в трехмерной постановке. Без использования суперкомпьютеров такие расчеты (при требуемых параметрах) невозможны. В среднем один расчет на кластере НГУ занимал от 4 до 7 суток в зависимости от параметров.

- Перечень публикаций, содержащих результаты работы (если есть).

E. A. Genrikh, E.A. Berendeev, V. A. Vshivkov. 3D-PIC model of the Electromagnetic Radiation Generation by the Counter-Streaming Electron Beams. AIP Conference Proceedings 2025, 110001 (2018) (WoS, Scopus) (SJR 2018 – 0.18)