

Отчёт ИВЦ НГУ

Берендеев Е.А.

Тема работы

Численное моделирование неустойчивых режимов взаимодействия релятивистских электронных пучков с плазмой

Состав коллектива (с указанием места учёбы/работы, учёных степеней и званий).

Берендеев Е.А., к.ф.-м.н., ИВМиМГ СО РАН

Ефимова А.А., ИВМиМГ СО РАН

Генрих Е.А., к.ф.-м.н., ИВМиМГ СО РАН

Работа выполнялась в рамках грантов РФФИ № 16-11-10028 Высокопроизводительное моделирование турбулентных режимов генерации высокочастотного электромагнитного излучения в системе плазма - релятивистский электронный пучок (рук. Вшивков В.А.) и РФФИ № 16-31-00304 мол_а Численное моделирование неустойчивых режимов взаимодействия релятивистских электронных пучков с плазмой (рук. Ефимова А.А.)

Научное содержание работы:

Постановка задачи.

Работа направлена на создание физико-математических и численных моделей высокого уровня для решения задачи формирования в плазме квазистационарного турбулентного спектра и идентификации нелинейных процессов, ответственных за генерацию покидающих плазму электромагнитных волн, и на изучение возможности более эффективной генерации терагерцового излучения в системе со встречными электронными пучками. Многочисленные турбулентные процессы отвечают не только за перекачку волновой энергии по спектру из области накачки в область затухания на плазменных электронах, но и за генерацию электромагнитного излучения, способного покинуть плазму. Численное моделирование позволяет понять механизмы генерации электромагнитных волн в турбулентной плазме с пучковой накачкой и интерпретировать данные радиометрической диагностики плазмы в открытой ловушке ГОЛ-3. Численные расчёты позволяют уточнить существующую теоретическую модель спектра сильной турбулентности, используемую для объяснения уровня электромагнитной эмиссии плазмы вблизи второй гармоники плазменной частоты. В течении отчётного периода создана двумерная численная модель с кинетическим описанием плазмы на основе метода частиц-в-ячейках. Также была изучена возможность увеличения коэффициента преобразования энергии пучка в энергию электромагнитных волн. Поскольку частота излучения в изучаемой схеме привязана к гармоникам плазменной частоты, привлекательной особенностью такого способа генерации излучения является возможность перестройки его частоты за счёт простого изменения плотности плазмы. Была проведена работа по поиску оптимальных режимов раскачки косых неустойчивостей релятивистскими электронными пучками, а с помощью созданных численных моделей исследована нелинейная эволюция рассматриваемой системы. Рассматриваемые задачи очень ресурсоемки, поэтому для расчетов необходимо использовать суперЭВМ.

Современное состояние проблемы.

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 данного 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. Термоядерные исследования в открытых ловушках в последнее время демонстрировали значительный прогресс, который стимулировал разработку новой концепции термоядерного реактора и способствовал началу работ по созданию новой установки околореакторного класса газодинамической многопробочной ловушки (Burdakov A.V., Avrorov A.P., Arzannikov A.V. Experiments on GOL-3 multiple-mirror trap for fusion program // Proceedings of 24rd IAEA Fusion Energy Conference, San Diego, USA, - 2012, EX/P3-29). Ключевым элементом этой концепции является использование электронных пучков для турбулентного подавления электронной теплопроводности, представляющей собой основной канал потерь энергии из ловушки. Показателем эффективности возбуждения плазменной турбулентности электронным пучком является электромагнитное излучение плазмы вблизи гармоник плазменной частоты. В последние годы такая диагностика была разработана и использована для регистрации излучения, генерируемого в пучково-плазменных экспериментах на установке ГОЛ-3. [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]. В связи с тем, что мощность излучения в первых экспериментах составляла около 1% от мощности пучковой накачки, возник вопрос, возможна ли такая же по эффективности генерация мощного излучения в более плотной плазме, соответствующей терагерцовому диапазону частот. Проведенные оценки показали, что в месте наиболее эффективного взаимодействия пучка с плазмой, где удельная мощность накачки турбулентности имеющимися на ГОЛ-3 пучками может достигать 100 МВт/см³, эффективность конверсии в излучение по прежнему остается на уровне 1%. Все это делает актуальным исследование новых схем генерации электромагнитных волн с целью увеличения эффективности и уменьшения спектральной ширины излучения.

Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.

Для описания неустойчивых режимов взаимодействия релятивистского электронного пучка с плазмой была построена 2D3V численная модель. В этой модели используется кинетическое описание плазмы и электронного пучка, позволяющее с единых позиций изучить динамику исследуемых процессов. Система основных уравнений состоит из кинетического уравнения Власова и системы уравнений Максвелла. Для решения кинетического уравнения Власова был использован метод частиц в ячейках, который в настоящее время является наиболее эффективным методом решения таких задач. В рамках проекта было проведено исследование свойств и различных характеристик метода частиц в ячейках, в частности сходимости метода на задаче отражения частиц от фронта ударной волны. Результатом этой работы стали параметры модели, обеспечивающие высокую точность результатов при моделировании взаимодействия электронного пучка с плазмой. Уравнения Максвелла решались конечно-разностными методами (схема Лэнгдона-Лазински). Компоненты всех величин вычислялись на сдвинутых друг относительно друга на полшага по времени и по пространству сетках, а все производные в уравнениях были

определены через центральные разности, что обеспечивает при использовании этой схемы второй порядок точности по времени и по пространству. Для вычисления токов использована схема (Вилласенор, Бунеман), позволяющая автоматически удовлетворить разностному уравнению неразрывности и, следовательно, точно выполнить разностный закон Гаусса.

Новизна используемой модели заключается в том, что при решении задачи инжекции пучка в плазму созданы новые граничные условия, наиболее полно отвечающие условиям лабораторных экспериментов. Задача рассматривалась в следующей постановке.

В расчётной области, имеющей форму прямоугольника, находится плазма, ограниченная с двух сторон вакуумом. С двух других сторон ($X=0$ и $X=L_x$, где L_x - размер расчётной области) на границах плазмы поставлены специальные условия, позволяющие имитировать открытые границы, т.е. позволяющие частицам свободно входить и выходить из области. Основная идея реализации этих условий заключается в обеспечении непрерывности функции распределения частиц у границы. Также через границы происходит инжекция электронных пучков ($X=0$ для одного пучка и $X=0, X=L_x$ – для двух пучков).

Для учёта мощности уходящего генерируемого электромагнитного излучения разработан новый поглощающий приграничный слой, обеспечивающий низкий коэффициент отражения (менее 1%) и позволяющий разделить уходящие электромагнитные волны на компоненты.

Для распараллеливания метода частиц в ячейках был выбран метод эйлерово-лагранжевой декомпозиции. Наиболее простая декомпозиция представляет собой разделение области на полосы (в соответствующей системе координат) и равномерное разделение частиц каждой полосы между процессорами. Такой подход позволил эффективно задействовать более 100 процессорных ядер.

Полученные результаты.

В ходе выполнения работы была построена кинетическая 2D3V модель, позволяющая описать взаимодействие с плазмой как одного электронного пучка, так и двух встречных пучков. Модель построена на основе приближенной к реальным экспериментам открытой постановки с непрерывным вводом пучков через границы. Определены параметры сходимости решения от шага пространственной сетки и числа модельных частиц на задаче отражения частиц от фронта ударной волны (см. Рис. 1-3).

Была разработана методика ввода пучков через границу. Созданы специальные открытые граничные условия для частиц, обеспечивающие корректное перемещение плазмы и пучков через границы и позволяющие сохранить квазинейтральность системы при непрерывной инжекции пучков. Разработаны поглощающие граничные условия для электромагнитных полей, позволяющие добиться малого отражения эм-волн (менее 1%), Поглощение выполняется адаптивно, в зависимости от расстояния электромагнитной волны до границы. Учёт поглощённой таким способом энергии излучения позволяет оценить, какая часть энергии пучка уходит на разогрев плазмы, а какая на генерацию излучения, и вычислить распределение мощности излучения по границам области. Разработан набор диагностик электромагнитного излучения, позволяющий оценить поляризацию и мощность излучаемых электромагнитных волн, а также рассчитать баланс входящей и выходящей энергии системы.

Для обеспечения высокой точности результатов создан алгоритм параллельных вычислений, основанный на сбалансированном распределении частиц по вычислительным узлам и позволяющий проводить расчёты динамики порядка 10^{10} модельных частиц. Проведены расчёты взаимодействия с невозмущённой плазмой одного электронного пучка. Показано, что наиболее эффективное излучение можно получить на плазменной частоте в режиме антенной генерации за счёт самосогласованных модуляций плотности плазмы. Эффективность такого излучения составляет 1-2% (см. рис. 4, ба).

Также рассмотрен случай инъекции в плазму двух встречных пучков разной ширины. Показано, что можно получить эффективное излучение на двойной плазменной частоте за счёт механизма лобового столкновения пучков. Эффективность излучения в этом случае составляет около 3%. (Рис. 5, 6б).

Иллюстрации, визуализация

Для исследования влияния числа частиц в ячейке на решение мы рассматриваем задачу распада разрыва плотности ионов в полностью кинетической постановке. В этом случае начальный профиль плотности имеет форму ступеньки. Плотность плазмы в начальный

момент времени задается формулой:
$$n(x, 0) = \begin{cases} n_1, & 0 \leq x \leq x_0, \\ n_2, & x_0 \leq x \leq L, \end{cases}$$
 где x_0 - положение разрыва, а L - размер области

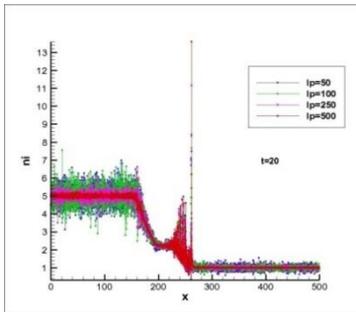


Рисунок 1. Исследование влияния числа частиц на решение (lp), $t=20$

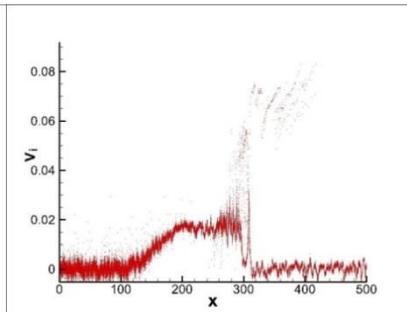


Рисунок 2. Фазовая плоскость, $lp=10$, $t=74$

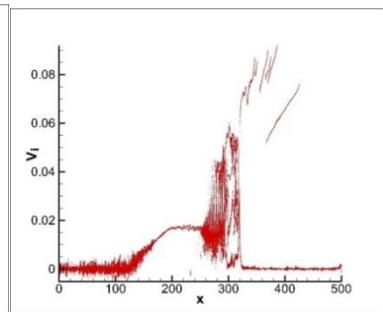


Рисунок 3. Фазовая плоскость, $lp=10$, $t=74$

Из рисунков видно, что необходимо брать не менее 250 частиц в ячейке.

Проведены расчёты по генерации электромагнитного излучения при инъекции в плазму одного электронного пучка.

Параметры расчёта:

Плотность плазмы $n_0=10^{-14}$ см⁻³, температура плазмы $T_p=40$ эВ

Плотность пучка $n_0=2*10^{-12}$ см⁻³,

Скорость пучка $v_b=0,9$ с (с- скорость света), температура пучка $T_b=300$ эВ.

Величина продольного магнитного поля, удерживающего плазму $B_x=0,6 \Omega / \omega_p$ Гаусс, где

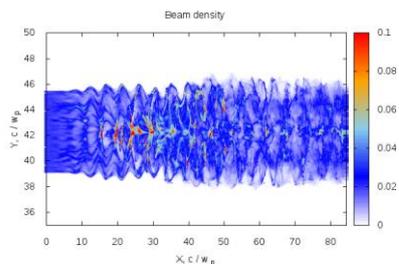
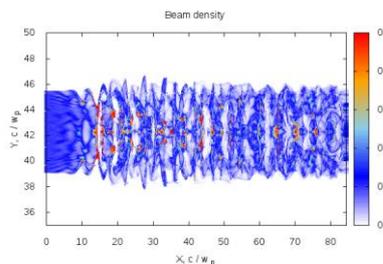
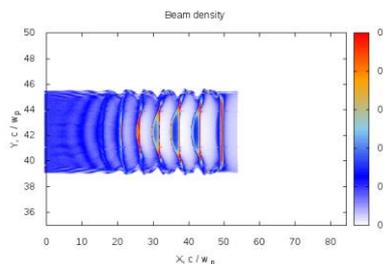
Ω - ларморовская частота, ω_p - плазменная частота.

На рисунке 4. представлены изолинии плотности пучка и x-компоненты электрического поля в различные моменты времени

Момент времени $T=60$

$T=150$

$T=300$



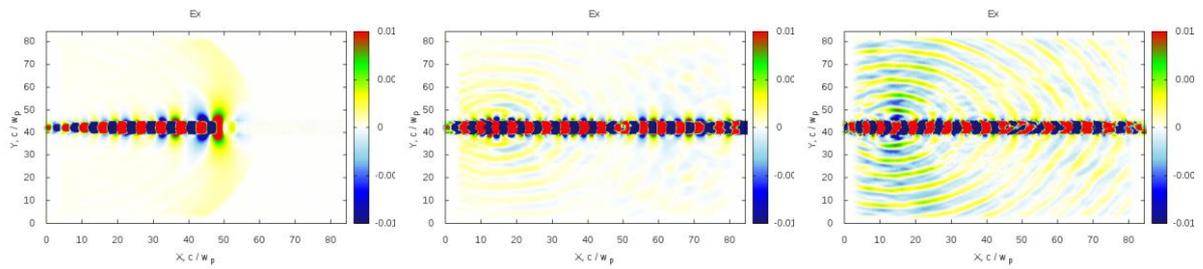


Рисунок 4. изолинии плотности пучка и x-компоненты электрического поля в различные моменты времени (заданы в $1/w_p$)

Из рисунка видно, что со временем генерируется достаточно мощное электромагнитное излучение.

Проведены расчёты по генерации электромагнитного излучения при инжекции в плазму встречных электронных пучков различной ширины.

Параметры расчёта:

Плотность плазмы $n_0=10^{-14}$ см⁻³, температура плазмы $T_p=120$ эВ

Плотность пучка $n_0=2*10^{-11}$ см⁻³,

Скорость пучка $v_b=0,9$ с (с- скорость света), температура пучка $T_b=1200$ эВ.

Величина продольного магнитного поля, удерживающего плазму $B_x=0,3 \Omega/\omega_p$ Гаусс, где

Ω - ларморовская частота, ω_p - плазменная частота.

На рисунке 5 представлены изолинии плотности пучка и x-компоненты электрического поля в различные моменты времени

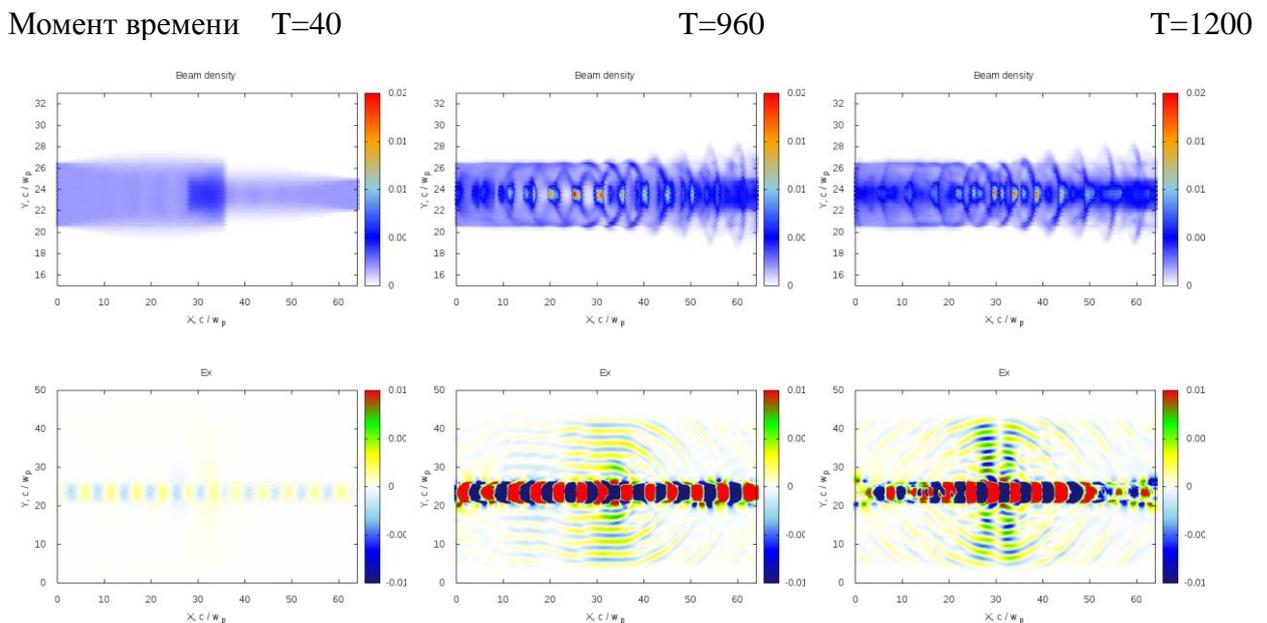


Рисунок 5. изолинии плотности пучка и x-компоненты электрического поля в различные моменты времени (заданы в $1/w_p$)

Из рисунка видно, что в данном случае излучение существенно мощнее.

На рисунке 6 представлена временная зависимость эффективности излучения (то есть отношение $Prad/P_{beam}$, где $Prad$ – мощность генерируемого излучения, P_{beam} – мощность входящего пучка) для случая одного и двух пучков

а)

б)

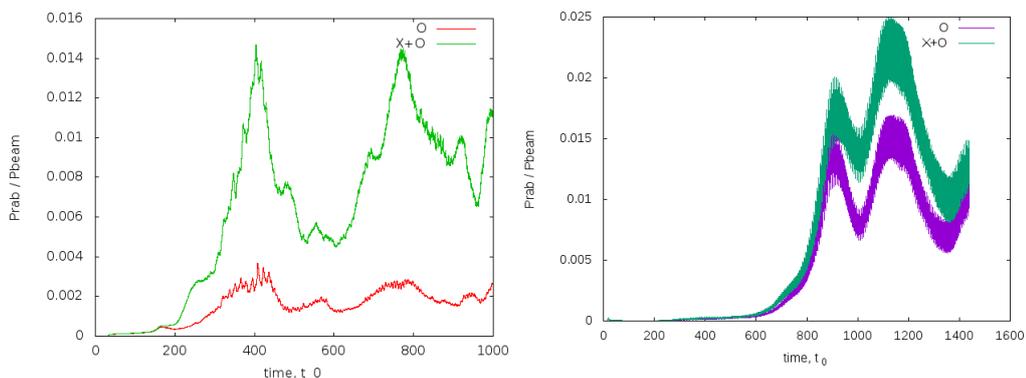


Рисунок 6. Эффективность излучения (P_{rad}/P_{beam} , где P_{rad} – мощность генерируемого излучения, P_{beam} – мощность входящих пучков) в зависимости от времени (задано в $1/w_p$): а) инжектируется один пучок; б) инжектируются два пучка

Из рисунка видно, что мощность излучения при инжекции двух пучков почти в два раза выше.

Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Для решение поставленной задачи необходима большая вычислительная мощность, поскольку требуется рассчитывать траектории миллиардов модельных частиц. В рамках выполнения проекта активно использовался кластер НГУ. Основные расчёты были проведены именно на нём.

Перечень публикаций, содержащих результаты работы (если есть). Указать импакт-фактор журнала (Thomson Reuters, РИНЦ,...).

1. Dudnikova G., Berendeev E., Efimova A. Numerical models of the electrostatic shock waves // Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Series: Numerical Analysis. 2016. Vol. 18. P. 9-16.
2. E.A. Berendeev, G. I. Dudnikova, and A.A. Efimova. PIC-simulation of the electron beam interaction with modulated density plasma // AIP Conference Proceedings, 2017, Vol. 1895(1), P. 120002 (1-6).
3. Berendeev E., Dudnikova, G., Efimova, A., Vshivkov, V. Computer simulation of plasma dynamics in open plasma trap // Lecture Notes in Computer Science 2017, vol. 10187 (In book: Numerical Analysis and Its Applications). P.227-234.

Ваши впечатления от работы вычислительной системы и деятельности ИВЦ НГУ, а также Ваши предложения по их совершенствованию.

Использование ресурсов ИВЦ НГУ является необходимым, т. к. решаются задачи большой вычислительной сложности. По работе с пользователями ИВЦ НГУ выгодно отличается от других суперкомпьютерных центров.