

Отчёт по использованию ресурсов информационно-вычислительного центра НГУ

Анненков Владимир Вадимович

annenkov.phys@gmail.com

1 мая 2018 г.

1. Тема работы

Генерация мощного электромагнитного излучения в пучково-плазменных системах

2. Состав коллектива

- 1 Анненков Владимир Вадимович, аспирант 3 года ИЯФ СО РАН (очная форма обучения), ассистент ФФ НГУ
- 2 Тимофеев Игорь Валериевич, к. ф.-м. н., с.н.с. ИЯФ СО РАН
- 3 Волчок Евгения Павловна, магистрант 2 года НГУ
- 4 Худяков Вадим Константинович, студент 4 курса НГУ

3. Гранты

Работа поддержана грантами РФФИ:

- №14-02-00294, "Возбуждение ленгмюровских волн узким релятивистским пучком заряженных частиц", руководитель: К.В. Лотов, 02.2014–12.2016;
- №15-32-20432, "Генерация электромагнитного излучения в турбулентной плазме с электронным пучком", руководитель: И.В. Тимофеев, 04.2015–01.2017;
- №18-32-00107, "Генерация узкополосных терагерцевых импульсов рекордной энергии в плазме со встречными электронными пучками", руководитель: В.В. Анненков, 04.2018–04.2020;

И грантом РФФИ №14-50-00080, "Развитие исследовательского и технологического потенциала ИЯФ СО РАН в области физики ускорителей, физики элементарных частиц и управляемого термоядерного синтеза для науки и общества", 2014–2018

4. Научное содержание работы

Работа направлена на изучение механизмов генерации электромагнитного излучения в плазме под действием пучков электронов или коротких лазерных импульсов. Первоначально исследования были связаны с теоретическим объяснением режимов повышенной электромагнитной эмиссии, обнаруженных при инжекции длинного и тонкого пучка электронов в замагниченную плазму на установке ГОЛ-3 (ИЯФ СО РАН). На основе полученных результатов удалось обнаружить новый механизм генерации мощного узкополосного ТГц излучения в плазме под действием встречных плазменных волн.

4.1 Современное состояние проблемы

В последние 20 лет наблюдается экспоненциальный рост числа публикаций связанных с применением терагерцового излучения в различных областях науки и техники. Причиной такого повышенного интереса исследователей является как новая фундаментальная физика, связанная с управлением различными коллективными возбуждениями в твёрдом теле, так и многочисленные приложения в химии, биологии, медицине и сфере безопасности. Однако до сих пор в литературе терагерцовый диапазон частот (0.3-10 ТГц) принято называть "ТГц провалом" поскольку ни приборы вакуумной электроники (гиротроны, клистроны, лампы обратной волны и т.д.), хорошо зарекомендовавшие себя в СВЧ области, ни лазерные методы генерации излучения, работающие на инфракрасных и оптических частотах, не могут эффективно применяться в этом спектральном диапазоне. Множество современных приложений требуют создания мощных источников ТГц излучения, обеспечивающих возможность перестройки как центральной частоты, так и ширины спектральной линии.

В настоящее время самые интенсивные узкополосные (1%) импульсы излучения с частотой 3-30 ТГц, длительностью 1-3 пс, мощностью 5 ГВт и рекордной энергией 1 мДж генерируются на лазере на свободных электронах FELIX в Нидерландах. Однако достижение подобных параметров в более компактных и не столь дорогих схемах является предметом большого количества исследований. Предполагается, что предварительная модуляция электронных пучков в однопроходном ЛСЭ позволит достичь импульсов излучения с энергией в несколько десятков мкДж и шириной линии в несколько процентов с частотами 0.5-5 ТГц. В области частот до 1 ТГц ведутся разработки гиротронов с импульсными магнитными полями. Лазерное сообщество предлагает использовать принципы нелинейной конверсии энергии лазерных импульсов в ТГц излучение. Многообещающей нелинейной средой для генерации ТГц излучения является плазма, которая способна поддерживать осцилляции электрических полей с амплитудой до десятков ГВ/см. Возможна конверсия плазменных волн в ЭМ излучения при наличии внешнего магнитного поля или неоднородной плазмы.

4.2 Используемые алгоритмы

Моделирование динамики плазмы осуществлялось с использованием собственного вычислительного кода методом частиц-в-ячейках. Для решения уравнений Максвелла, описывающих эволюцию электромагнитных полей, применялся метод конечных разностей во временной области. Для описания динамики частиц – схема Бориса, для декомпозиции токов – схема Езиркепова. Алгоритм был реализован на языке CUDA и допускает использование произвольного числа графических сопроцессоров Nvidia, но в данный момент обладает плохой масштабируемостью по числу вычислительных узлов.

4.3 Полученные результаты

Для объяснения повышения уровня ЭМ миссии с уменьшением поперечного размера пучка в экспериментах на установке ГОЛ-3 была предложена модель пучково-плазменной антенны.

4.3.1 Механизм пучково-плазменной антенны

При прохождении электронного пучка через плазму развивается двух потоковая неустойчивость. Если у плазмы имеется продольная модуляция плотности, то у наиболее неустойчивой плазменной волны появляется сверхсветовой сателлит, способный на глубине скин-слоя резонансно взаимодействовать с вакуумными ЭМ волнами. Генерируемое в таком процессе излучение сосредоточено вблизи плазменной частоты. Поскольку в тонкой системе снимается запрет на образование ЭМ волны при лобовом слиянии потенциальных плазменных колебаний, взаимодействие доминирующей пучковой моды со своим сателлитом может приводить ещё и к излучению вблизи удвоенной плазменной частоты.

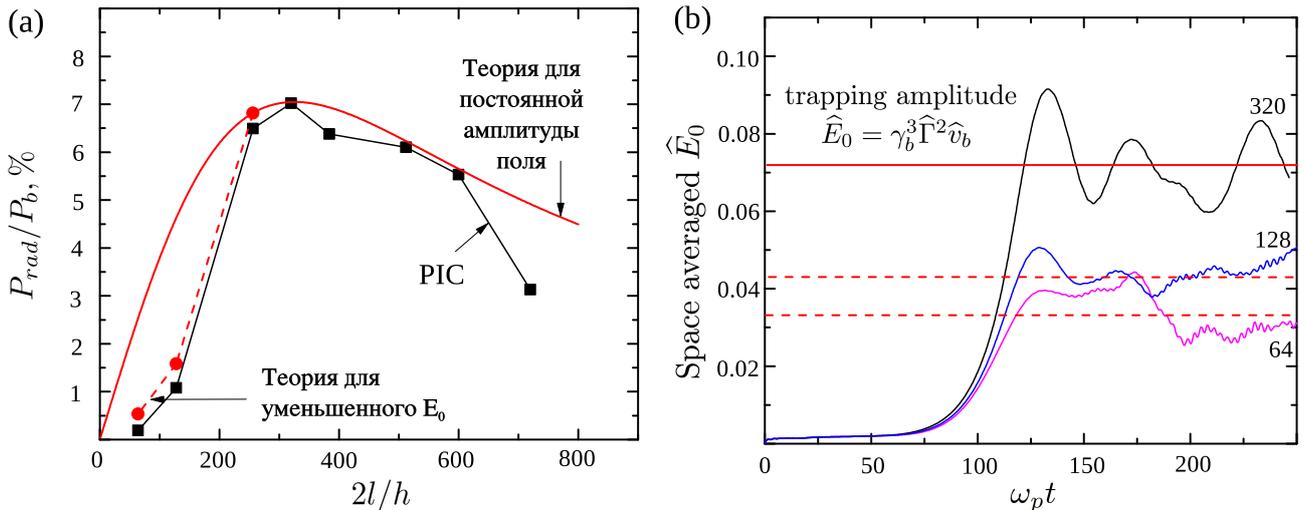


Рисунок 1: (а) Эффективность генерации ЭМ излучения в зависимости от толщины плазмы. Теория и моделирование. (б) Зависимость амплитуды поля \widehat{E}_0 , усреднённой по плазменному объёму, в случае однородного профиля плотности плазмы различной толщины.

Результаты PIC-моделирования показали, что максимум эффективности генерации из-

лучения наблюдается при равенстве полуширины плазмы глубине скин-слоя, что находится в соответствие с теоретическими представлениями (Рис. 1а).

Для объяснения расхождения результатов моделирования и теории потребовались дополнительные вычисления для случая плазмы без модуляции плотности. С их помощью было обнаружено, что в области малых толщин амплитуда плазменных колебаний достигает величин меньших, чем следует из теории (Рис. 1б). При использовании амплитуды реально наблюдаемых полей в плазме, теоретические предсказания хорошо согласуются с численным экспериментом. Из тех же расчётов следовало, что в области большой ширины плазмы нарушается предположение об одномерном характере плазменной волны, т.е. амплитуда поля успевает сменить знак на ширине плазмы.

4.3.2 Модель инжекции электронного пучка в плазму

Особенностью пучково-плазменного взаимодействия на установке ГОЛ-3 является большая длительность инжекции электронных пучков в замагниченную плазму (микросекунды). Модель бесконечной плазмы, в которой на частицы и поля вдоль направления движения пучка накладываются периодические граничные условия имеет ряд недостатков. В такой постановке пучок имеет фиксированный запас энергии, поэтому способен накачивать плазменные колебания только в течение ограниченного промежутка времени, предшествующего стадии его захвата наиболее неустойчивыми резонансными волнами. Последующая нелинейная эволюция квазистационарных волн ВГК-типа проходит в нереалистичных условиях отсутствия пучковой накачки.

В реальной задаче с непрерывной инжекцией свежего пучка через плазменную границу нелинейная стадия пучково-плазменного взаимодействия существенно отличается от описанного сценария. Ввиду того, что развитие пучковой неустойчивости в этой задаче требует гораздо больших продольных размеров плазмы, численные эксперименты с инжекцией нерелятивистского пучка до сих пор ограничивались либо 1D Vlasov, либо 2D particle-in-cell (PIC) моделированием. При этом случай релятивистского пучка малой плотности даже в PIC модели удалось исследовать только в одномерном случае.

Исследование излучения из плазмы естественным образом накладывает требование как минимум двумерной по пространству модели, что приводит к значительному повышению вычислительной трудоёмкости. В рамках данной работы был разработан уникальный 2D3V PIC-код, реализующий непрерывную инжекцию релятивистского электронного пучка в горячую замагниченную плазму.

С помощью нового кода:

Исследован механизм генерации ЭМ излучения на ω_p поперёк плазмы

Мощность излучения достигла 6% от мощности пучка.

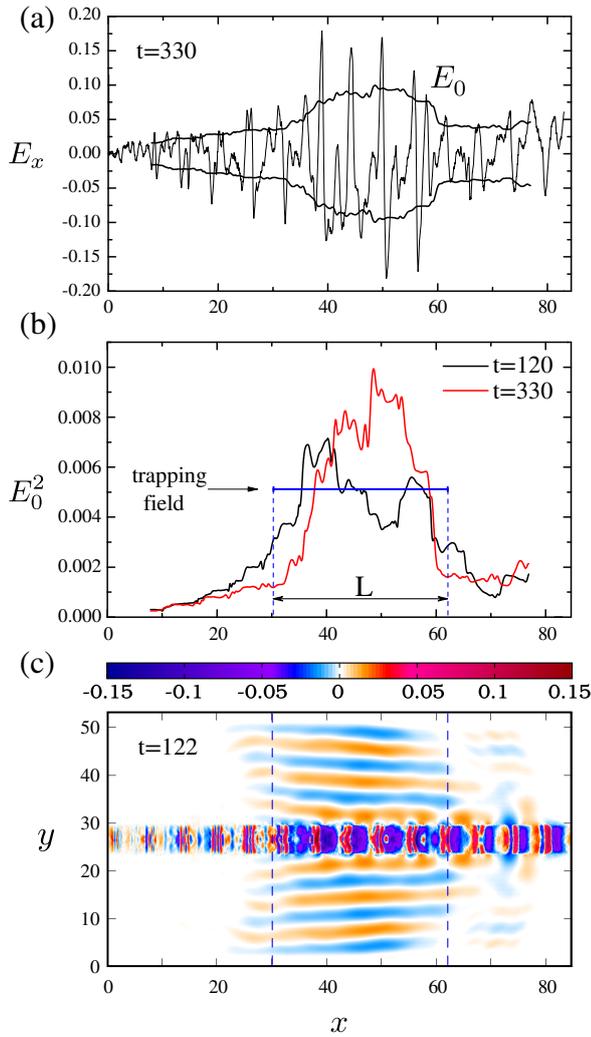


Рисунок 2: (а) Усреднённая по пространству амплитуда пучковой волны E_0 и поля E_x в центре плазмы. (б) Профиль резонансной энергии волны E_0^2 в разные моменты времени. (с) Карта электрического поля E_x .

Подтверждена возможность генерации ЭМ излучение вблизи $2\omega_p$ за счёт нелинейного процесса слияния волн

Результаты моделирования представлены на рисунке 4. Эффективность генерации ЭМ излучения составила около 0.3%.

Проведено моделирование инъекции релятивистского электронного пучка в изначально однородную плазму

Помимо случая продольной модуляции плазмы было проведено рассмотрение инъекции релятивистского электронного пучка в плазму с однородной плотностью (см. рис. 7). В результате данного моделирования обнаружена определяющая роль механизма пучково-плазменной антенны в генерации ЭМ излучения в тонкой плазме с релятивистским электронным пучком. Эффективность генерации составила приблизительно 1%.

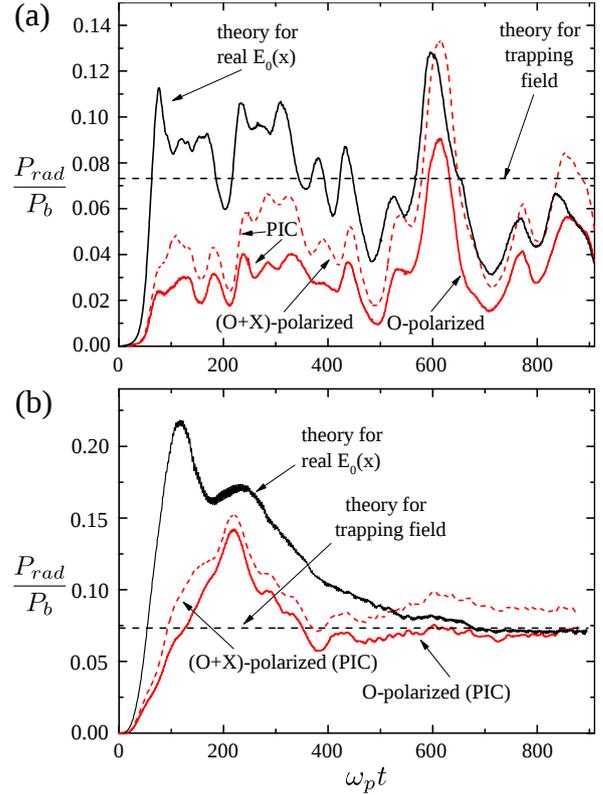


Рисунок 3: Эффективность генерации электромагнитных колебаний. Теория и моделирование. (а) – случай реального пучка. (б) – случай "жёсткого" пучка, который не меняется под действием полей в плазме, но сам создаёт одномерную плазменную волну с амплитудой $\hat{E}_0 \simeq \gamma_b^3 \hat{\Gamma}^2 \hat{v}_b$

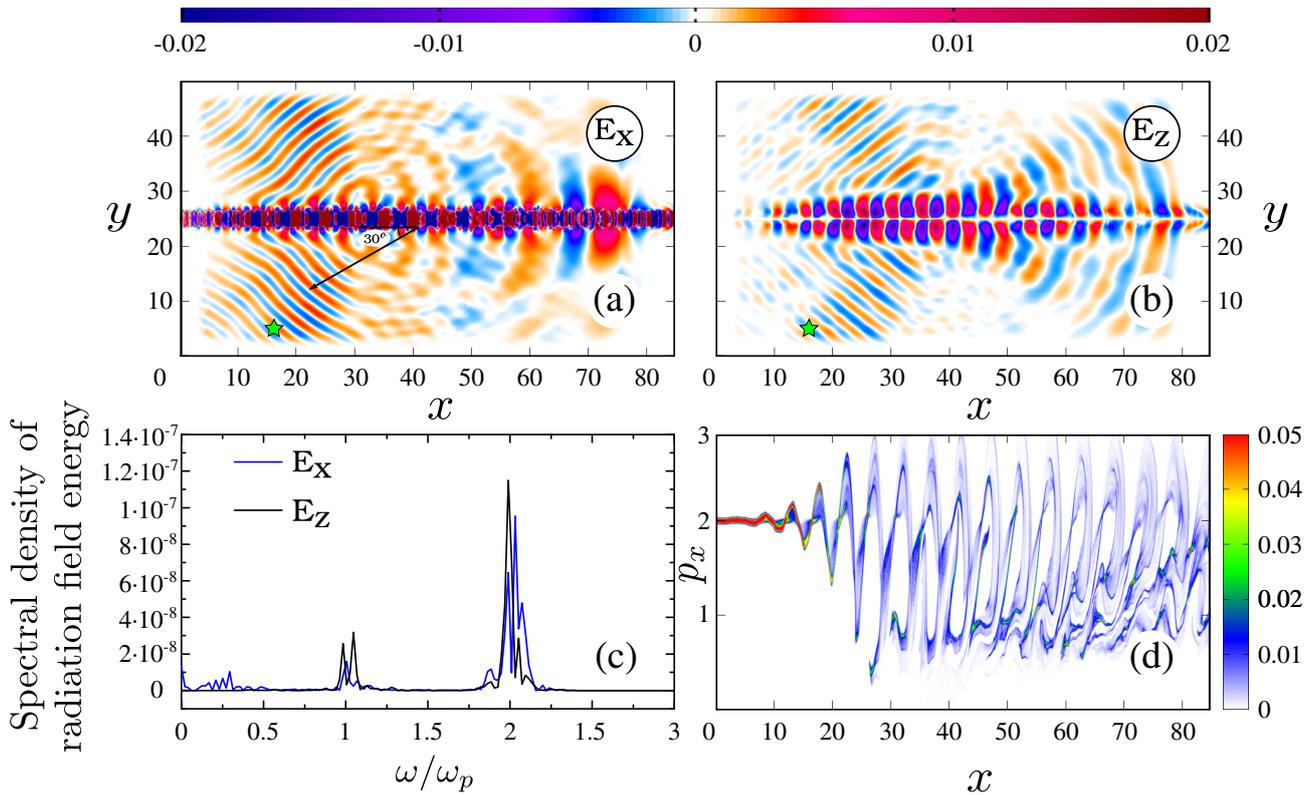


Рисунок 4: Генерация ЭМ излучения вблизи удвоенной плазменной частоты. (a) и (b) – карты электрических полей E_x и E_z . (c) – частотный спектр E_x и E_z измеренный в точке, лежащей около поглощающего слоя (зелёная звезда). (d) – фазовое пространство (x, p_x) электронов пучка.

4.4 Генерация излучения встречными плазменными волнами

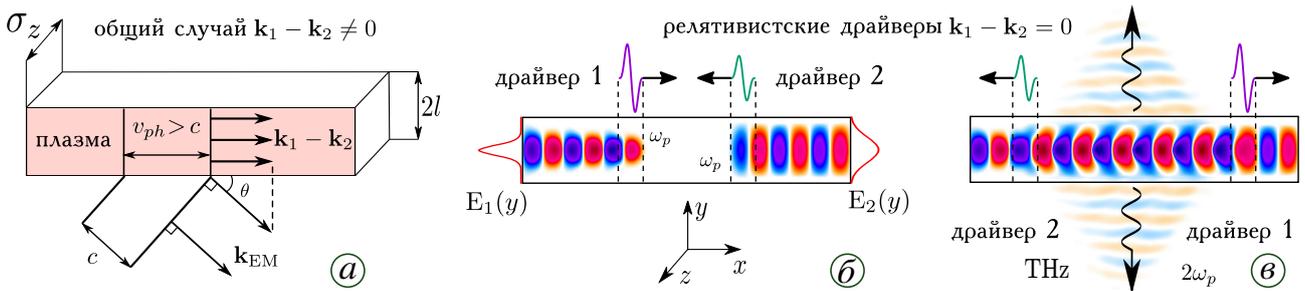


Рисунок 5: Механизм излучения

Рассмотрим плазменный столб. Некий драйвер (пучок частиц или лазерный импульс) раскачивает плазменную волну, бегущую со скоростью драйвера. Сама по себе такие колебания неспособны генерировать вакуумное электромагнитное излучение. Но если в плазме имеется встречный первому драйвер, то слияние порождаемых ими плазменных волн будет иметь сверхсветовую фазовую скорость и, следовательно, сможет стать источником электромагнитных волн. В общем случае, когда драйверы имеют разную скорость, разность волновых чисел не равна нулю и генерируемое излучение направлено под углом

к плазменному столбу (рисунок 5а). В практически интересном случае релятивистских драйверов, которые имеют наибольший энергозапас, волновые числа в точности сокращаются и излучение направлено строго поперёк плазмы (рисунок 5 б и в).

PIC моделирование

Для моделирования реальных лазеров необходима такая вычислительная сетка, которая бы хорошо разрешала их частоту. Это приводит к существенному возрастанию числа необходимых вычислительных ресурсов. Однако рассматриваемый нами процесс происходит на достаточно малом пространственном масштабе, на котором лазерные импульсы существенно не искажаются от взаимодействия с плазмой, поэтому мы моделировали не сами электромагнитные поля лазеров, а их пондеромоторную силу.

Равномерный слой плазмы с плотностью $1,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ инжектируются два лазерных импульса слева и справа. Чем более мощное излучение мы хотим получить, тем более высокую амплитуду плазменных волн нам необходимо использовать. Однако чем выше амплитуда плазменных волн, тем существеннее нелинейное затухание. Нами был выбран пограничный режим $a_0 = 0.7$, когда достигается достаточно высокая амплитуды плазменных осцилляций, однако она всё ещё хорошо совпадает с предсказаниями в рамках линейной теории. На рисунке 8 показаны результаты для такого режима. В этом случае интенсивность излучения падает гораздо быстрее. Это связано с диссипацией энергии запасённой в излучающих гармониках плазменных колебаний. Помимо потерь на излучение (7%) энергия также переходит в неизлучающие гармоники $(2\omega_p, \pm 2k)$ и $(0, \pm 2k)$. Поэтому в дальнейших оценках мы будем предполагать $a_0 = 0.7$ и время излучения только $100\omega_p^{-1}$, хотя на самом деле излучение длится гораздо дольше и выходит на теоретический уровень через большее время.

Показательно, что с помощью достаточно слабого 10 ТВт лазера, имеющегося, например, в институте лазерной физики СО РАН, можно превзойти рекорды такого лазера на свободных электронах как NovoFEL в ИЯФ СО РАН (рисунок 6)

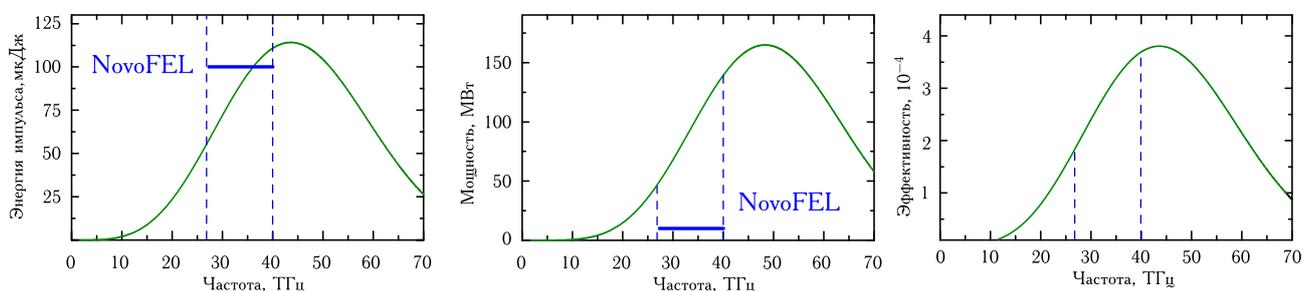


Рисунок 6: NovoFEL (синяя линия), 10 ТВт лазер (зелёная линия).

5. Публикации

Полученные с использованием ИВЦ результаты представлены в виде следующих публикаций:

- [1] Timofeev I. V., Annenkov V. V., Arzhannikov A. V. Regimes of enhanced electromagnetic emission in beam-plasma interactions // *Physics of Plasmas*. — 2015. — nov. — Vol. 22, no. 11. — P. 113109. — URL: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4935890>. — Impact Factor: 2.115.
- [2] Annenkov V. V., Volchok E. P., Timofeev I. V. Generation of high-power electromagnetic radiation by a beam-driven plasma antenna // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. — 2016. — apr. — Vol. 58, no. 4. — P. 045009. — URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0741-3335/58/4/045009>. — Impact Factor: 2.392.
- [3] Annenkov V. V., Timofeev I. V., Volchok E. P. Simulations of electromagnetic emissions produced in a thin plasma by a continuously injected electron beam // *Physics of Plasmas*. — 2016. — may. — Vol. 23, no. 5. — P. 053101. — URL: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pop/23/5/10.1063/1.4948425>. — Impact Factor: 2.115.
- [4] Timofeev I. V., Annenkov V. V., Volchok E. P. Generation of high-field narrowband terahertz radiation by counterpropagating plasma wakefields // *Physics of Plasmas*. — 2017. — oct. — Vol. 24, no. 10. — P. 103106. — URL: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4993100>. — Impact Factor: 2.115.

6. Продолжение работы

Недостаток схемы с использованием лазеров состоит в низкой эффективности (порядка 1%) раскачки ими плазменной волны. Гораздо большей эффективности возбуждения плазменной волны можно добиться используя длинные электронные пучки. Полученная в первых расчётах высокая эффективность (7%) генерации излучения свидетельствует о перспективности данной схемы, но требуется обширный поиск оптимальных параметров для существующих ускорителей. В первую очередь мы будем ориентироваться на линейный индукционный ускоритель электронов ЛИУ-2 (ИЯФ СО РАН). С помощью численного моделирования будут подобраны оптимальные поперечные размеры пучков и исследована возможность их фокусировки в предварительно созданной плазме. Также возможна генерация излучения электронными пучками с изначально одинаковым размером.

Для пучков малой плотности поперечная электромагнитная волна может возникать в результате трёхволнового процесса слияния косых пучковых мод плазменных колебаний. Но до недавнего времени не существовало способа определения наиболее подходящих для генерации излучения параметров плазмы и пучка, поскольку это требовало решения дисперсионного уравнения горячей замагниченной плазмы с релятивистским пучком в рамках точной кинетической теории. Согласно недавним работам в этой области созданный нами ранее алгоритм для решения этой задачи до сих пор остаётся единственным в своём роде.

Работоспособность такой схемы для случая встречных релятивистских пучков в идеализированном случае бесконечной плазмы при специально подобранных параметрах системы была подтверждена нами ранее. Далее планируется продемонстрировать эффективность этой схемы с помощью полномасштабных PIC расчётов непрерывной инжекции встречных пучков в плазму и найти режимы, при которых генерация мощного ТГц излучения становится доступной для современных экспериментов с килоамперными релятивистскими электронными пучками.

Существующий код для решения дисперсионного уравнения будет существенно доработан в сторону универсальности и удобства использования. Для этой цели уже разработан эффективный параллельный алгоритм нахождения численных интегралов произвольной кратности от произвольной комплексной функции и реализован с использованием CUDA, MPI, OpenMP и POSIX threads.

Также планируется значительная модернизация PIC кода: перенесение его на сопроцессоры Intel Xeon Phi и на обычные ядра ЦПУ, улучшение масштабируемости, создание полностью трёхмерного варианта кода.

7. Впечатления и рекомендации

За всё время работы мне, так или иначе, довелось сталкиваться с несколькими суперкомпьютерами: ИВЦ НГУ, ССКЦ, Ломоносов-1 (МГУ), Матросов (ЦКП ИСКЦ), СКЦ «Политехнический» (Санкт-Петербург). Среди них всех ИВЦ НГУ выгодно выделяется очень хорошей документацией, причём не только по непосредственно работе на кластере, но и по написанию параллельных программ с помощью всех необходимых библиотек. По сути, сайта ИВЦ достаточно для быстрого и лёгкого обучения основам и параллельного программирования, и работы на суперкомпьютерном кластере (чего нельзя сказать о сайтах других российских суперкомпьютеров).

Недостатком ИВЦ является малое количество вычислительных ресурсов (к тому же довольно устаревших). Несколько лет назад, начиная работу над нашим новым PIC кодом, я выбрал в качестве целевой архитектуры графические сопроцессоры, поскольку работа на узлах с классическими CPU была в большей степени "симулятором очереди" из-за их большой загруженности. К тому же расчёт даже на одном имеющемся на кластере GPU был сопоставим по скорости с расчётом на ста обычных ядрах CPU. Постепенно нам нужны всё более масштабные и точные расчёты, что требует всё большего объёма вычислительных ресурсов. На данный момент, например на шести GPU один расчёт длится десять дней и более, а постоянно требуется проведение нескольких (до десяти) расчётов одновременно. Полномасштабные трёхмерные расчёты на кластере ИВЦ в нынешней его конфигурации не представляется возможными.

На сегодняшний день на кластере установлены GPU NVIDIA Tesla M2090 (2012 год, 512 ядер с частотой 1.3 ГГц, из них 256 работают с двойной точностью). Однако на немного более современной игровой видеокарте Titan X (2015 год, серия 900, 3072 ядра с частотой

той 1 ГГц, их них только 96 работают с двойной точностью) скорость вычислений нашей программы (с двойной точностью) в полтора раза выше. Очевидно это связано с большей скоростью доступа к памяти (336 ГБ/сек у Titan X против 177 ГБ/сек у M2090). У современной профессиональной карты Tesla V100 (2017 год) 5120 ядер (2560 работают с double) с частотой около 1.4 ГГц и 900 ГБ/сек для работы с памятью (в итоге 7 TFlops для двойной точности). Они, конечно, относительно дорогие (в районе 6500\$), но есть их более дешёвый (слегка урезанный по параметрам) аналог – Titan V с розничной ценой 3000\$. Было бы замечательно заменить имеющиеся графические сопроцессоры на что-нибудь более новое.

Очевидно, что такое обновление требует существенных капиталовложений. Может быть имеет смысл попробовать скооперироваться с крупными институтами Академгородка (ИЯФ?) с целью масштабного обновления аппаратной части кластера.

В целом впечатление от работы на кластере ИВЦ НГУ положительное. Имеются проблемы с аппаратной частью: мало ресурсов, периодический перегрев узлов и т.п. Очень надеюсь, что в обозримом будущем будут найдены средства на модернизацию, поскольку из всех кластеров, с которыми я имел дело, работа с ИВЦ НГУ наиболее приятна.

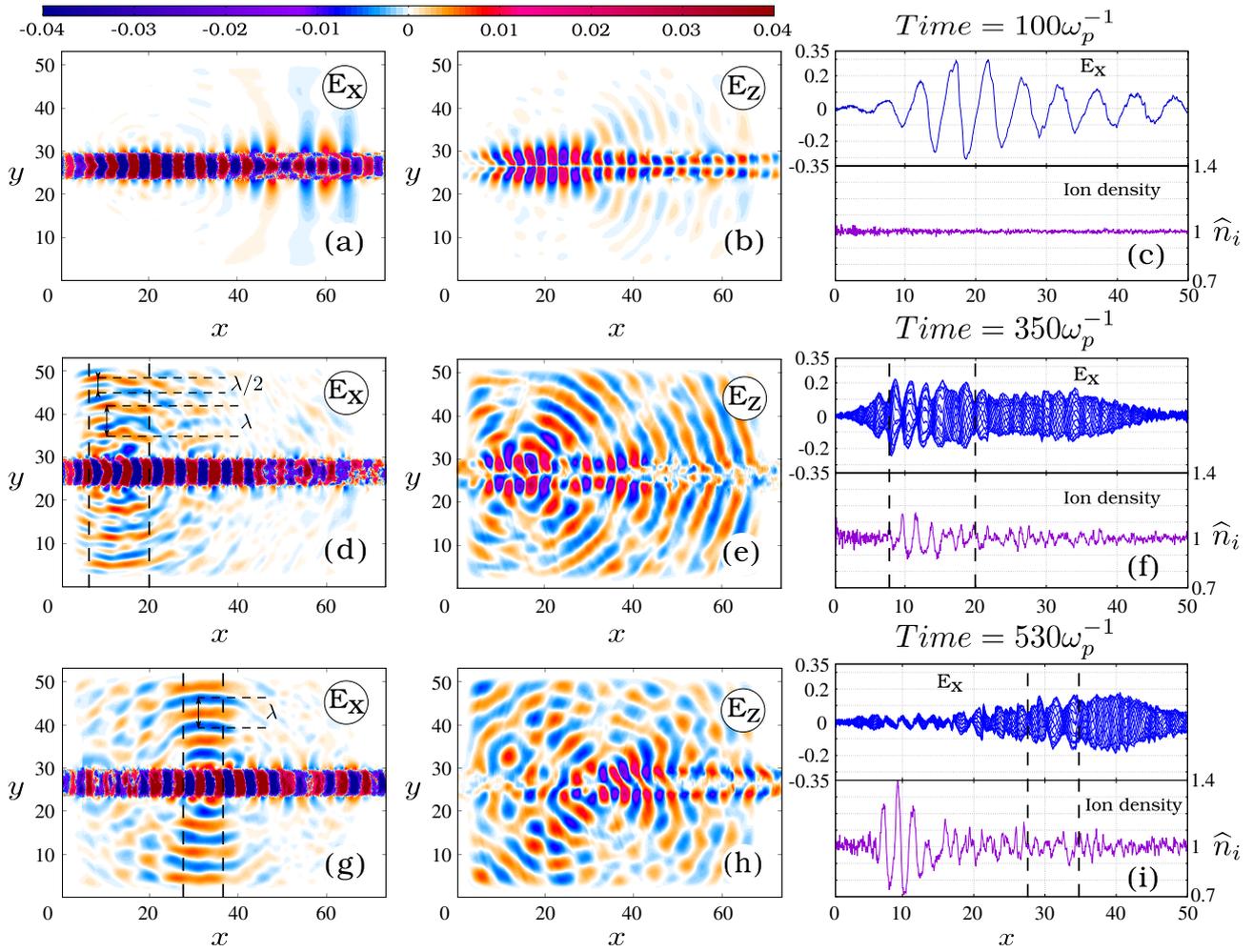


Рисунок 7: Инжекция пучка в однородную плазму (a), (d), (g) – карты электрического поля E_x в различные моменты времени. (b), (e), (h) – карты электрического поля E_z . (c), (f), (i) – электрическое поле E_x в центре плазменного столба и усреднённая по толщине плазмы плотность ионов. (множественные линии E_x на (f) и (i) соответствуют разным фазам одного колебания).

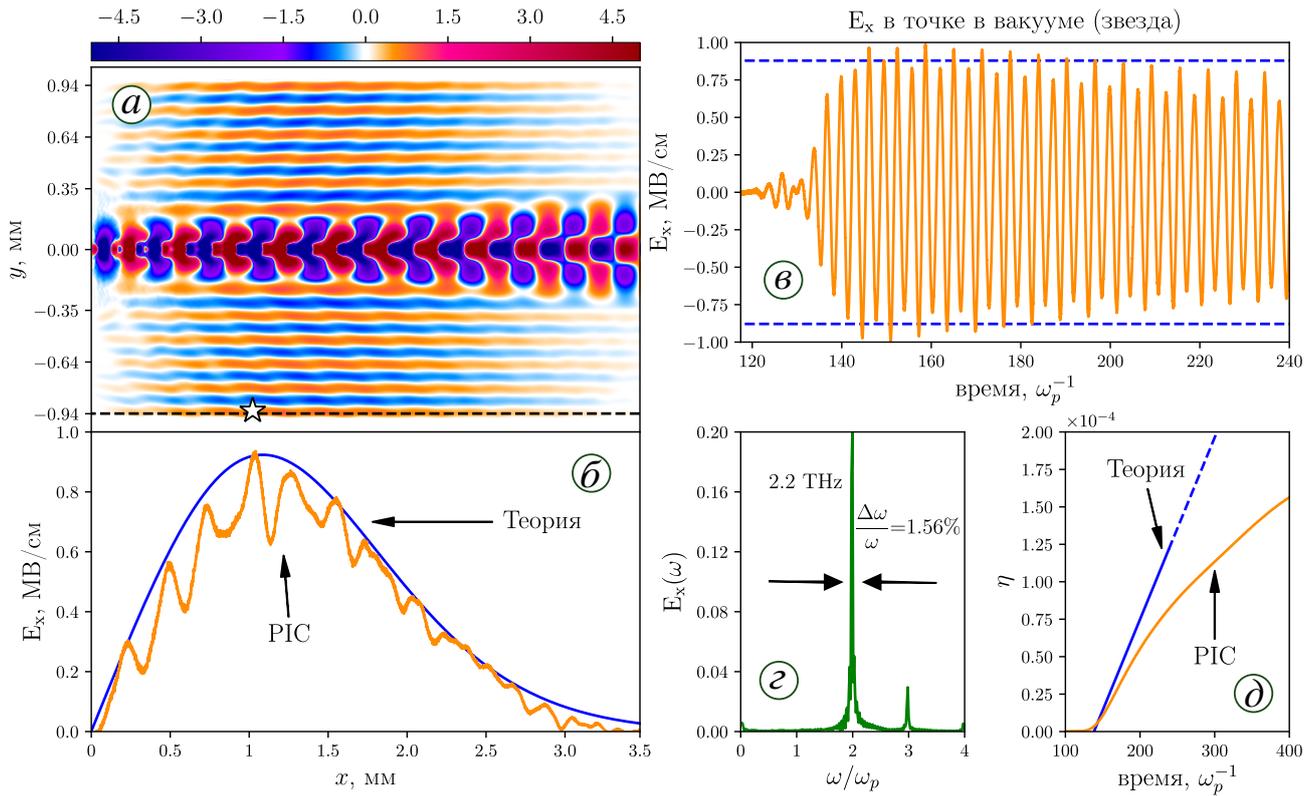


Рисунок 8: Режим $a_0 = 0.7$ (а) Карта продольного электрического поля $E_x(x, y)$ в момент $\omega_p \cdot t = 177,5$, в который лазерные импульсы уже покинули область моделирования и вся плазма генерирует электромагнитные волны. (б) Продольный профиль электрического поля, измеренный вдоль черной пунктирной линии. (в) Временная эволюция поля E_x в точке, обозначенной белой звездой (пунктирные линии показывают теоретически предсказанную амплитуду). (г) Частотный спектр излучения. (д) Общая энергия излучения, поглощенная в поглощающих слоях и нормированная на полную энергию лазера как функция времени.