

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет ФИЗИЧЕСКИЙ

Кафедра ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ

Направление подготовки 03.04.02 ФИЗИКА

Образовательная программа МАГИСТРАТУРА

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Минакова Владимира Алексеевича
(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРАНСФОРМАЦИИ КИЛЬВАТЕРНОГО
УСКОРИТЕЛЯ ИЗ-ЗА ДВИЖЕНИЯ ИОНОВ ПЛАЗМЫ

«К защите допущена»

Заведующий кафедрой
д.ф.-м.н., Зам. Директора
ИЯФ СО РАН по научной работе
Иванов А.А./.....

(Фамилия, И., О.)/(подпись, МП)

«....».....20...г

Научный руководитель
д.ф.-м.н., доцент
г.н.с. ИЯФ СО РАН
Лотов К.В./.....

(Фамилия, И., О.)/(подпись, МП)

«....».....20...г

Дата защиты «....».....20...г

Новосибирск, 2016 год

Оглавление

1	Введение	2
2	Эксперимент AWAKE	6
3	Ход работы и результаты	8
4	Заключение	15
	Литература	16

1: Введение

Исследования в области физики высоких энергий могут дать ответы на многие вопросы, связанные с составом Вселенной. Для того, чтобы получать новые результаты и открывать новые частицы, требуется увеличивать энергию сталкиваемых пучков. Увеличения энергии пучка можно добиться, или увеличив ускоряющее поле в ускорителе, или увеличив его размеры. При использовании высокочастотных (ВЧ) резонаторов трудно добиться заметного увеличения поля по сравнению с ныне достигнутыми значениями масштаба 100 ГВ/м. Дело в том, что увеличение поля может привести к вырыванию электронов из стенки структуры, таким образом разрушая её. Увеличение размеров ускорителя тоже затруднительно, для получения частиц с энергией несколько ТэВ необходим линейный ускоритель длиной несколько десятков километров. Создание такой машины, как и использование, обошлось бы очень дорого. Если для получения протонов с энергии порядка 1 ТэВ можно использовать циклические ускорители, то разогнать электроны до таких энергий так не получится. Мощность синхротронного излучения обратно пропорциональна четвертой степени массы, а значит, электроны перестанут ускоряться при гораздо меньших энергиях. Способность плазмы выдерживать поля в $10^2 - 10^3$ раз большие, чем традиционные ВЧ структуры обуславливает интерес к плазменному кильватерному ускорению.

Плазменное ускорение заключается в передаче энергии от одного пучка другому через плазменную волну. Обычно в плазменную ячейку последовательно запускается два пучка. Первый из них имеет большую энергию и называется драйвер. Это может быть пучок заряженных частиц или лазерный импульс. Лазерный пучок расталкивает электроны плазмы посредством пондеромоторной силы, заряженный же пучок —

за счет объемного заряда. Ионы плазмы тяжелее и обычно считаются неподвижными. Потрясенные электроны начинают колебаться вокруг положений равновесия, создавая волну. В поле этой волны ускоряется второй пучок, называемый витнессом.

Для возбуждения кильватерной волны важным условием является нарастание или убывание плотности драйвера на длине, меньшей или порядка плазменной длины волны. Так как ускоряющее поле ограничено полем опрокидывания, равным $E_0 = \sqrt{4\pi n_e c^2 m_e}$ [1], где n_e — плотность электронов плазмы, c — скорость света, m_e — масса электрона, то для его увеличения приходится повышать плотность плазмы, что приводит к уменьшению плазменной длины волны, равной $\lambda_p = 2\pi c/\omega_p = \sqrt{\pi m_e c^2/n_e e^2}$, где ω_p — плазменная частота. Это, в свою очередь, ужесточает требования к пучку. В плазменном ускорении используется плазма с плотностью $n_0 \approx 10^{14}$ см⁻³ и выше. Соответствующая длина волны составляет 3 мм и меньше. Для продолжительного ускорения необходимо, чтобы фазовая скорость волны, равная скорости драйвера, была близка к скорости света. Этого легко достичь для электронных и лазерных драйверов. Протонный пучок должен иметь для этого гораздо большую энергию, чем электронный сгусток, движущийся с такой же скоростью. В связи со всем вышесказанным, плюсом электронного и лазерного драйверов перед протонным является простота получения. Также в некоторых случаях использование лазерного импульса в качестве драйвера позволяет не запускать в плазму второй пучок. Электроны могут быть захвачены прямиком из плазмы.

Пучки протонов в современных ускорителях имеют длину порядка 10 сантиметров, что в сотни раз превосходит плазменную длину волны, то есть их плотность нарастает недостаточно быстро. Чтобы сделать такие пучки применимыми для кильватерного ускорения необходимо, или сжать такой пучок в продольном направлении до субмиллиметровых размеров, или же обрезать их. Это не представляется возможным с использованием современных технологий. Если запустить в плазму протонный пучок, имеющий резкий передний фронт, то плазма нарежет его на последовательность микросгустков, каждый из которых имеет нужную длину. Это происходит благодаря самомодуляционной неустой-

оказаться довольно большим. Эта работа посвящена изучению влияния движения ионов плазмы на коэффициент трансформации плазменного кильватерного ускорителя. В данной работе все вычисления проведены с помощью квазистатического осесимметричного 2d3v кода LCODE, разработанного в Институте Ядерной Физики им. Г.И. Будкера СО РАН К.В. Лотовым и А.П. Соседкиным [3, 6].

2: Эксперимент AWAKE

AWAKE является единственным экспериментом по протонному кильватерному ускорению [7, 8]. Одноименная коллаборация готовит запуск первой его фазы в конце 2016 года в ЦЕРНе. Первый этап эксперимента не предполагает ускорения частиц. Он призван подтвердить развитие самомодуляции протонного пучка в плазме. Получать ускоренные электроны планируется только на последующих этапах. Параметры эксперимента указаны в таблице 2.1.

В роли драйвера будет выступать протонный пучок с синхротрона SPS. Энергия частиц в пучке 400 ГэВ. Ток в пучке нарастает плавно. Такой пучок при простом запуске в плазму не самомодулируется. Для создания резкого переднего фронта в плазменную ячейку вместе с протонным пучком запускают лазерный импульс. Пучки синхрони-

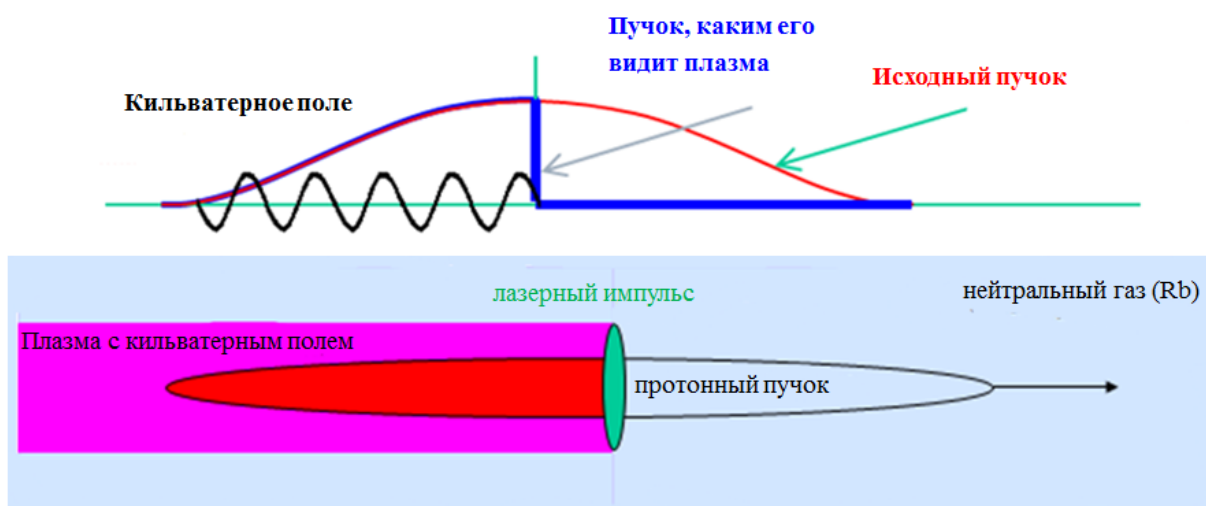


Рис. 2.1: Схема синхронизации пучков

зированны таким образом, что лазерный импульс летит примерно в середине протонного сгустка [Рис. 2.1]. До прилета лазерного импульса в плазменной ячейке находятся только пары рубидия. Лазерный импульс ионизует плазму, вырывая своим полем электроны из атомов. Таким

образом, первая половина протонного пучка проходит через газ, не взаимодействуя с ним. Вторая же летит через плазму, для которой пучок теперь имеет резкий передний фронт. Эта часть пучка самомодулируется, и полученные микросгустки возбуждают кильватерную волну. Длина плазменной ячейки 10 метров. Самомодуляция завершается при прохождении пучком примерно 4 метров. На последующих 6 метрах предполагается ускорение электронного пучка.

Таблица 2.1: Исходные параметры эксперимента AWAKE и обозначения.

Параметр, обозначение	Величина
Плотность плазмы, n_0	$7 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$
Атомная масса ионов плазмы, M_i	85.5
Число частиц в целом пучке, N_b	3×10^{11}
Длина пучка, σ_{zb}	12 см
Радиус пучка, σ_{rb}	0.02 см
Энергоразброс пучка, δW_b	0.35%
Угловой разброс пучка, $\delta\alpha_b = \epsilon_b/\sigma_{rb}$	4.5×10^{-5}

3: Ход работы и результаты

Обычно при построении аналитических моделей или выполнении численного моделирования в области плазменного ускорения считают, что ионы плазмы остаются неподвижными из-за их большой массы. Учет их движения обычно приводит к уменьшению максимально достижимого поля или увеличению времени достижения этого поля [9].

Во время выполнения численных расчетов для коллаборации AWAKE был обнаружен интересный эффект. В одном из рассчитанных вариантов, в котором длина пучка была в несколько раз меньше, чем в реальном эксперименте, был обнаружен рост ускоряющего поля в области, находящейся позади хвоста пучка [Рис. 3.1]. Длина пучка σ_z в этом вычис-

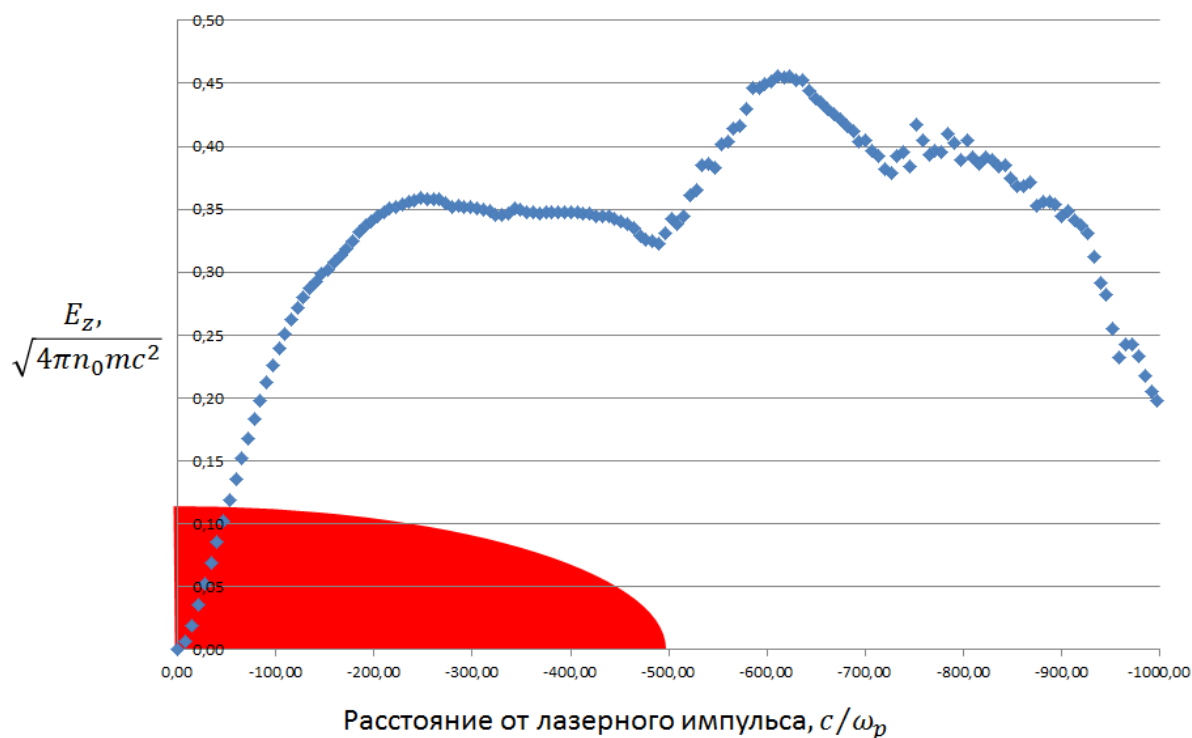


Рис. 3.1: Зависимость амплитуды ускоряющего поля от продольной координаты в моделировании со сжатым пучком. Красным показана примерная форма пучка

лении составляет 200 плазменных единиц c/ω_p . Рост поля в области от 500 до 1000 c/ω_p нельзя объяснить вкладом микросгустков, на которые разделился пучок. Этот рост очень интересен, ведь если витнесс в такой системе расположить в области большого поля, то ускоряться частицы будут в большем поле, чем замедляется драйвер. То есть, это повышает коэффициент трансформации.

Возникло предположение, что увеличение поля обусловлено движением ионов плазмы. Оно подтвердилось после сравнения результатов моделирования оригинального эксперимента, полученных с использованием различных моделей ионов [Рис. 3.2]. В одном варианте зарядовая плотность ионов считалась постоянной, то есть ионы были неподвижны. Во втором ионы плазмы были подвижны и моделировались макрочастицами. Дальнейшее исследование варианта с подвижными ионами обна-

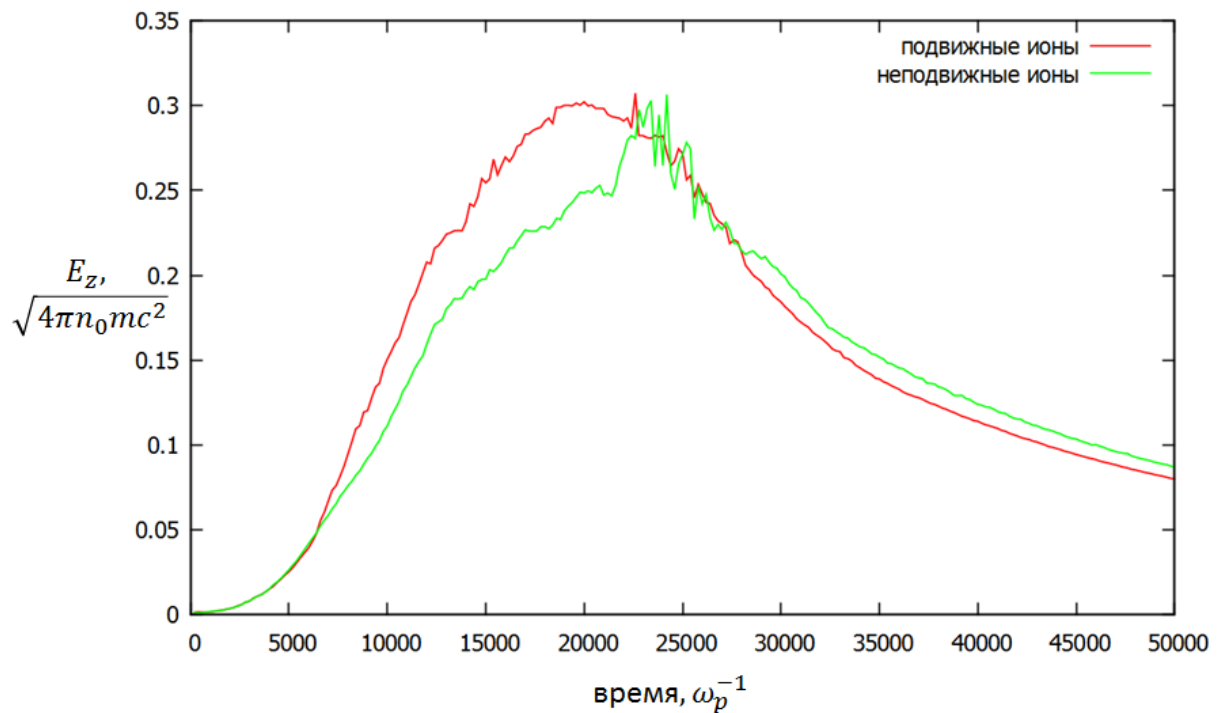


Рис. 3.2: Амплитуда ускоряющего поля для различных моделей ионов ружило, что незадолго до роста поля в приосевой области образуется канал, в котором ионная плотность ниже, чем в прилегающих областях. Возникло предположение, что волна как бы "падает" в этот канал. Волна продолжает распространяться в меньшей области, что увеличивает плотность энергии в ней, а вместе с этим и амплитуду волны.

Очень удобной величиной для отслеживания этого эффекта является

плотность потока энергии. В сопутствующем окне она состоит из плотности потока в лабораторной системе отсчета и переноса энергии из-за движения окна:

$$\vec{S} = -\vec{e}_z \frac{E^2 + B^2 - B_0^2}{2} + [\vec{E} \times \vec{B}] + \sum (\gamma - 1)(\vec{v} - \vec{e}_z) \quad (3.1)$$

Это — безразмерная формула, в которой электрические и магнитные поля обезразмерены на $E_0 = mc\omega_p/e$, а скорость — на скорость света. Плотность же потока обезразмерена на $n_0 mc^3$. По плотности потока можно судить о том, в какой области распространяется волна, а значит, и определить, удалось ли получить сужение области распространения волны.

Для проверки возможности управления эффектом увеличения поля было проведено несколько серий вычислений. Эти вычисления не подразумевали воссоздание численной версии реально существующего эксперимента. Всего было проведено 3 серии. В каждой из них протонный пучок, достаточно короткий, чтобы возбудить кильватерную волну, запускался в плазму, имеющую изначально неоднородный поперечный профиль.

В первой серии поперечная плотность плазмы отличалась от однородной наличием V-образного канала. Вычисления в серии отличались друг от друга глубиной и шириной канала, а также взаимным расположением канала и пучка. Уменьшение плотности в центре канала варьировалось от 10% до 90% от плотности однородной плазмы. Ширина канала менялась, начиная от долей ширины пучка и заканчивая десятью его радиусами. В большинстве вычислений пучок располагался в середине канала. Такое взаимное расположение пучка и канала совпадало с тем, что имело место быть в вычислениях для AWAKE. В нескольких вычислениях пучок был сдвинут из середины канала. Он располагался или на градиенте плотности (для широкого канала), или на краю канала, если он был узким.

Вторая серия отличалась от первой тем, что плотность плазмы в канале была не ниже, а выше плотности плазмы. То есть, вместо V-образного канала имелся Λ -образный гребень. В остальном серии были

идентичны, и каждое вычисление из одной имело аналогичное из другой.

Третья же серия представляла из себя один расчет с гауссовским поперечным профилем плотности плазмы.

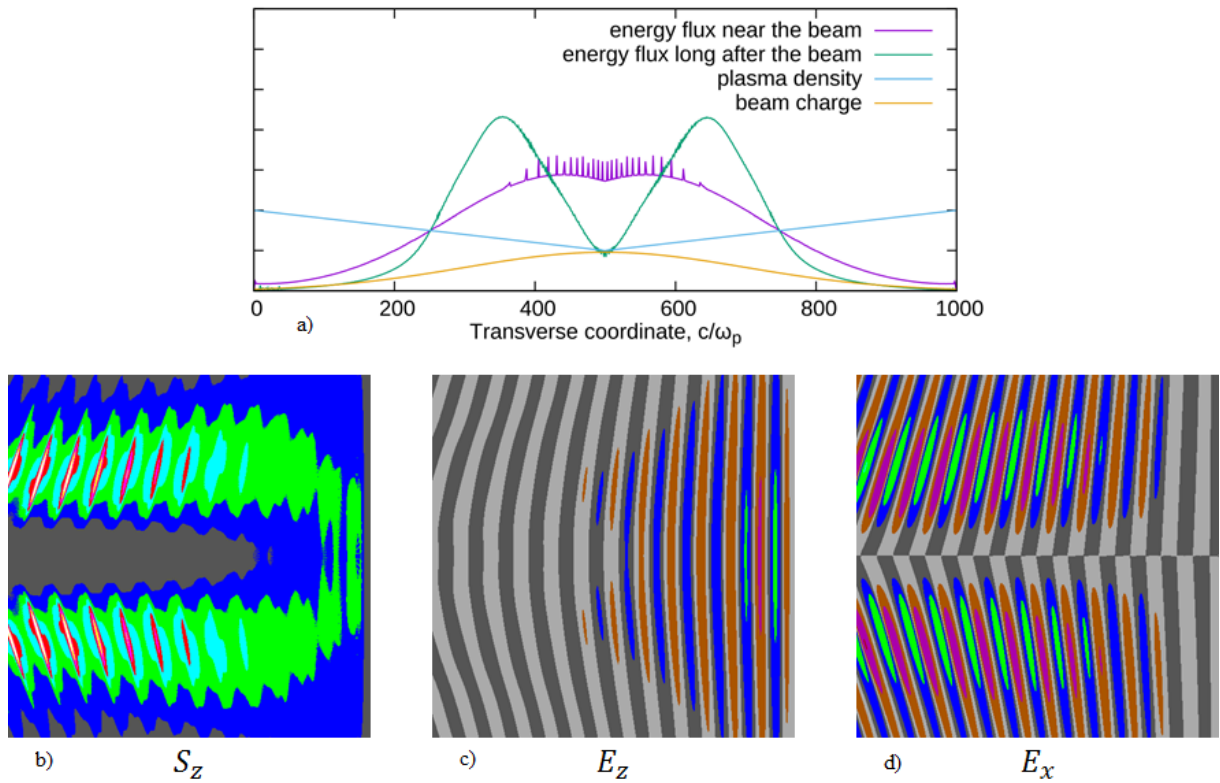


Рис. 3.3: Результаты одного из вычислений с V-образным каналом. а) графики плотности плазмы, плотности пучка и z компоненты плотности потока энергии сразу за пучком и на расстоянии $200 c/\omega_p$ от него. Цветные карты: б) z компонента плотности потока энергии, с) продольная компонента электрического поля, д) поперечная компонента электрического поля

Несмотря на сильное варьирование параметров внутри серий все вычисления показали качественно схожие результаты [Рис. 3.3,3.4]. Ни в одном из них не обнаружилось увеличения продольной компоненты поля в связи с уменьшением области распространения волны. Зато был обнаружен другой эффект. На рисунках с примерами видно, что поток энергии, а значит и волна, уходят с экстремума плотности плазмы на градиенты. Там колебания быстро переходят из продольных в поперечные, после чего затухают. Это происходит как в максимумах плотности, так и в её минимумах.

Чтобы увидеть этот эффект в более чистом виде, было проведено еще несколько расчетов. Плотность плазмы в них была поперечно модулирована синусом с амплитудой, равной половине начальной плот-

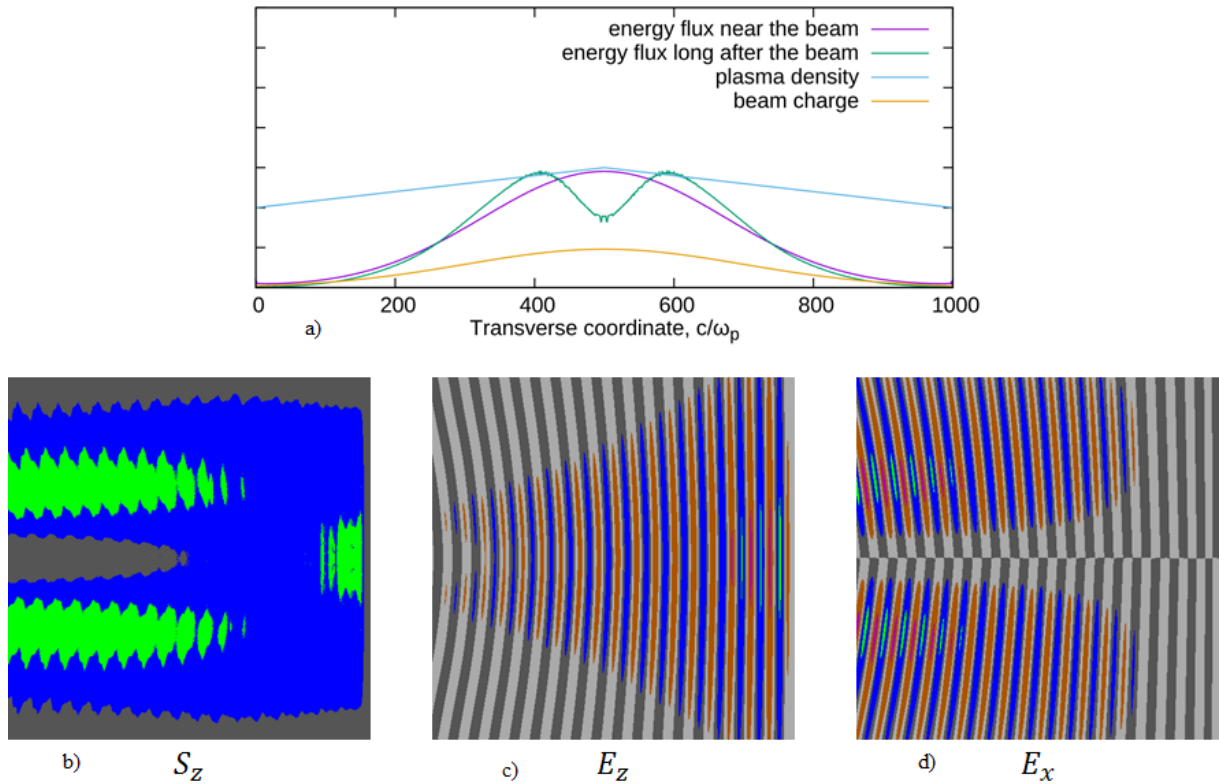


Рис. 3.4: Результаты одного из вычислений с Λ -образным каналом. а) графики плотности плазмы, плотности пучка и z компоненты плотности потока энергии сразу за пучком и на расстоянии $200 c/\omega_p$ от него. Цветные карты: б) z компонента плотности потока энергии, с) продольная компонента электрического поля, д) поперечная компонента электрического поля

ности. В этих расчетах волна возбуждена не пучком. Вместо этого всем электронам плазмы изначально придается продольный импульс, равный $5 \times 10^{-5} m/s$. Таким образом, колебания возбуждаются в гораздо большей поперечной области, что упрощает их исследование.

Создать модулированный профиль плазмы, описанный выше, труднее, чем профили из предыдущих серий. Это обусловлено тем, что для получения тех профилей имелся встроенный в код конструктор. Однако его возможности ограничены небольшим набором форм, не включающим в себя необходимую. Для создания более сложных профилей необходимо создать файл с информацией о всех частицах плазмы или модифицировать тот, что создается кодом для однородной плазмы. Есть два пути для модификации файла частиц. Более сложный состоит в том, чтобы добавить частицы в те области, где плотность должна превысить начальную и убрать оттуда, где она должна быть меньше. Более простой и надежный состоит в том, чтобы изменить

массу макрочастиц в нужную сторону. Он и был выбран. В связи с этим далее будут рассмотрены два несколько различающихся варианта.

Как говорилось выше, все электроны плазмы получили продольный импульс для возбуждения волны. Различие двух вариантов состоит в том, что в одном из них этот импульс равен у всех макрочастиц, представляющих электроны. Из-за того, что они имеют разную массу для создания профиля плотности, разные электроны имеют разную скорость. В другом счете полученные электронами импульсы были

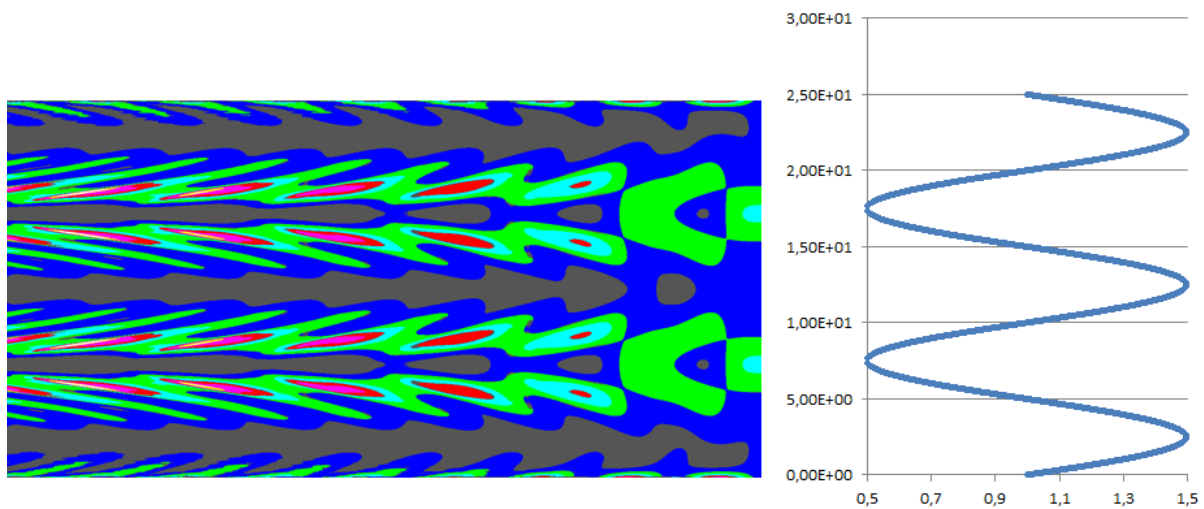


Рис. 3.5: z компонента плотности потока энергии для счета с равным импульсом макрочастиц, справа приведен поперечный профиль плазмы

пропорциональны массе. В первом вычислении хорошо видно, как поток энергии уходит из областей минимумов плотности, собираясь на градиенте [Рис. 3.5]. Второе, наоборот, хорошо иллюстрирует покидание потоком максимумов плотности [Рис. 3.6].

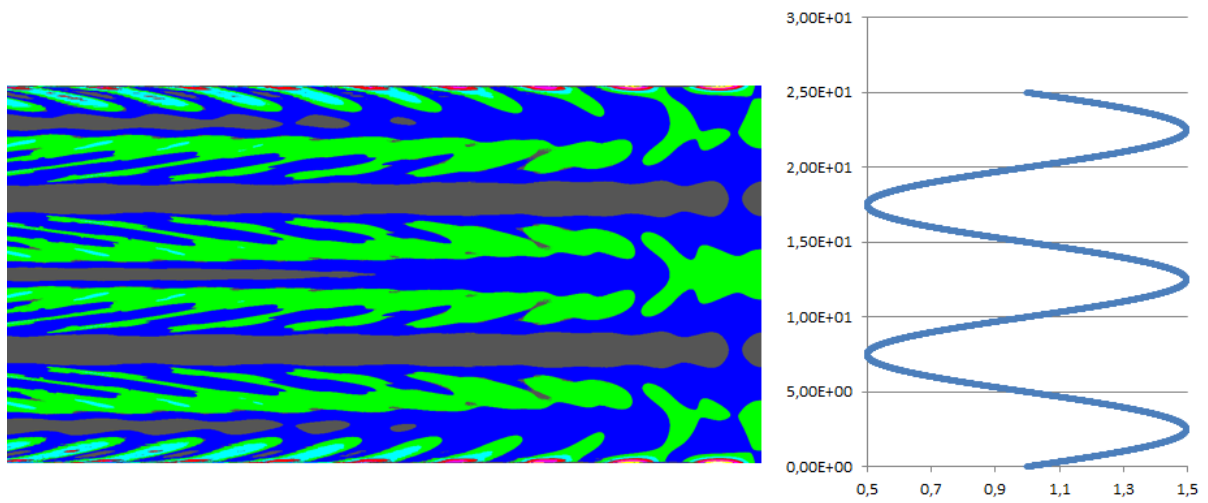


Рис. 3.6: z компонента плотности потока энергии для счета с равным скоростями макрочастиц, справа приведен поперечный профиль плазмы

4: Заключение

Проведенное исследование обнаружило эффект перераспределения энергии кильватерной волны в плазме с поперечно-неоднородной плотностью ионов. Этот эффект может быть важен для интерпретации результатов эксперимента AWAKE. В некоторых конфигурациях благодаря самопроизвольному движению ионов эффект может дать увеличение ускоряющего поля на 20–30%, что соответствует увеличению коэффициента трансформации в такой системе. Однако в искусственно созданных конфигурациях пока был получен только эффект смещения волны с экстремума плотности плазмы на её градиенты, где волна переходила из продольной в поперечную, после чего быстро затухала.

Литература

- [1] A.I. Akhiezer, R.V. Polovin, Theory of Wave Motion of an Electron Plasma, Journal of Experimental and Theoretical Physics, Vol. 3, No. 5, p. 696 (1956)
- [2] R.D. Ruth, A.W. Chao, P.L. Morton, P.B. Wilson, A plasma wake field accelerator, Particle Accelerators, Vol 17, pp. 171-189 (1985)
- [3] T. Katsouleas, Physical mechanisms in the plasma wake-field accelerator, Physical review A, Volume 33, Number 3 (1986)
- [4] K. V. Lotov, Efficient operating mode of the plasma wakefield accelerator, PHYSICS OF PLASMAS 12, 053105 (2005)
- [5] K.V. Lotov, A. Sosedkin, E. Mesyats, SIMULATION OF SELF-MODULATING PARTICLE BEAMS IN PLASMA WAKEFIELD ACCELERATORS, In: Proceedings of IPAC2013, p. 1238, (2013)
- [6] K.V. Lotov, Fine wakefield structure in the blowout regime of plasma wakefield accelerators, Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams 6 061301(2003)
- [7] A. Caldwell, et al., Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2015.12.050i>
- [8] E. Gschwendtner, et al., AWAKE, The Advanced Proton Driven Plasma Wakefield Acceleration Experiment at CERN, arXiv:1512.05498 [physics.acc-ph]
- [9] J. Vieira, R.A. Fonseca, W.B. Mori, L.O. Silva, Ion Motion in Self-Modulated Plasma Wakefield Accelerators, PHYSICAL REVIEW LETTERS 109, 145005 (2012)