

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный
исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В.
Гапонова-Грехова Российской академии наук»



На правах рукописи

Кузнецов Алексей Александрович

**Квазилинейная динамика вейбелевской турбулентности
магнитного поля в анизотропной бесстолкновительной
плазме с различными функциями распределения частиц**

Специальность XX.XX.XX —
«Физика плазмы»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
Доктор физико-математических наук, академик РАН
Кочаровский Владимир Владиленович

Нижний Новгород — 2026

Оглавление

Введение

Актуальность темы

Работа посвящена фундаментальной проблеме филаментации электрических токов и развития квазимагнитостатической турбулентности в плазме с анизотропными распределениями частиц по скоростям. Неизбежная для такой плазмы апериодическая неустойчивость вейбелевского типа приводит к формированию случайного мелкомасштабного магнитного поля. Это поле существенно изменяет кинетические свойства и динамику плазмы, даже если турбулентность является слабой, т.е. не содержит сильно нелинейных локализованных структур. Согласно имеющимся наблюдениям и экспериментам, подобные анизотропные распределения частиц и обусловленная ими магнитная турбулентность характерны для многих переходных процессов в космической и лабораторной плазме и реализуются, например, при расширении неравновесной плазмы в фоновую.

В настоящее время доминирующим подходом в исследовании этой, так называемой вейбелевской, турбулентности является численное описание с помощью метода частиц в ячейках. Расчеты с его использованием требуют больших вычислительных затрат и обычно сопровождаются высоким уровнем шумов. В то же время, как правило, они подтверждают тот факт, что вейбелевская турбулентность является слабой, а значит, может быть рассмотрена в квазилинейном приближении. В таком приближении эволюция усредненной по пространству компоненты функции распределения частиц по скоростям определяется интегральным нелинейным действием всех мод (пространственных гармоник) вейбелевской турбулентности. В свою очередь, их комплексные частоты задаются текущей формой этого распределения, т.е. динамика мод формально является линейной. Подобный квазилинейный подход является общим в теории волновой турбулентности и хорошо известен для высокочастотных волн – электромагнитных, плазменных, магнитогидродинамических. В контексте апериодической (вейбелевской) турбулентности, где фактически волн нет, существующая квазилинейная теория эволюции вейбелевской турбулентности разработана лишь в одномерной (1D2V) геометрии, причем для весьма ограниченной области параметров и без должного описания временной эволюции [Pokhotelov2011]. Полуаналитическое решение системы квазилинейных

уравнений в 1D3V геометрии [Ruyer2015] с опорой на эмпирические данные численного моделирования также применимо лишь для небольшой области параметров плазмы. В то же время существует ряд задач, в каждой из которых анализ квазимагнитостатической турбулентности с использованием квазилинейного описания может существенно прояснить особенности её эволюции.

Одной из подобных фундаментальных задач является анализ формирования квазистационарных магнитных полей в анизотропной бесстолкновительной или слабостолкновительной плазме и согласованной с ними плазменной турбулентности. В частности, открытыми остаются вопросы об условиях генерации и пространственной структуре быстро эволюционирующего сильного магнитного поля и его корреляции с локальной анизотропией распределения электронов по скоростям, механизме их взаимосвязи, а также зависимости между макроскопическими кинетическими параметрами плазмы и параметрами формирующихся квазимагнитостатических полей. Подобные задачи особенно важны для современной физики лазерной плазмы и связанной с ней лабораторной астрофизикой, где при абляции различных мишеней используются мощные фемтосекундные импульсы, позволяющие разогревать только электроны, но не ионы.

Вопросы формирования и эволюции квазистационарных магнитных полей в анизотропной плазме в присутствии внешнего магнитного поля особенно малоизучены: существующие результаты основываются на физически недостаточных двумерных (2D3V) расчетах [Camporeale2008; Hellinger2014; Lazar2023; Lopez2020] методом частиц в ячейках. В то же время задача их изучения крайне актуальна как для астрофизических проблем, например, касающихся физики областей формирования солнечного (звездного) ветра и магнитосфер звезд и планет, так и для проблем физики лабораторной плазмы, например, лазерной, получаемой при абляции мишени или струи газа фемтосекундными импульсами.

До сих пор слабо освещена проблема нелинейного взаимодействия волновой ленгмюровской и квазимагнитостатической турбулентности в бесстолкновительной плазме с распределениями частиц «плазма - пучок», важная для анализа таких явлений, как формирование бесстолкновительных ударных волн и структур в аккреционных дисках и колонках, взаимопроникновения соседних облаков и потоков частиц звёздного ветра, развитие корональных выбросов массы и солнечных вспышек, нагрев плазмы и изменение её кинетических свойств

при инъекции пучков высокоэнергичных частиц и др. [Marcowith2016; Aschwanden2005; Medvedev2006; Nishikawa2009; Kato2007]. Имеющиеся выборочные работы в этом направлении исследований основаны преимущественно на расчетах методом частиц в ячейках, зачастую ограничиваются гидродинамическим режимом той или иной неустойчивости и по существу не касаются, а тем более не детализируют взаимное влияние ленгмюровской и вейбелевской турбулентности; ср., например, [Kong2009; Ruyer2015; Bret2010; Lazar2023] (при наличии внешнего магнитного поля см. также работы [Lazar2023; Lopez2020]). Так, в обзоре [Bret2010], являющемся, по-видимому, наиболее полным для интересующей нас задачи в отсутствие внешнего магнитного поля, обсуждаются условия насыщения и возможные нелинейные локализованные структуры в турбулентности каждого типа, но не изучается влияние изменения функции распределения частиц под действием турбулентности одного типа на развитие другой, хотя и упоминается возможность их последовательного развития.

Совершенно не изученными являются нелинейные свойства вейбелевской неустойчивости и формируемой ей квазимагнитостатической турбулентности, возникающих в плазме с немаксвелловскими распределениями частиц по скоростям. Вместе с тем неравновесной плазме, частицы которой испытали стохастическое ускорение под действием того или иного широкополосного электромагнитного излучения, например в звездном ветре или различных ударных волнах свойственны распределения с надтепловым высокоэнергетическим «хвостом», который может быть удобно описан каппа-распределениями.

Цели и задачи работы

Общей целью диссертационной работы является построение приближенной теории магнитной турбулентности на основе квазилинейного подхода, разработка оригинальной компьютерной программы для ее расчета и создание ясной физической картины эволюции пространственного спектра этой турбулентности в однородной плазме при различных начальных распределениях частиц, в том числе с учетом внешнего магнитного поля или электростатической турбулентности. Задачами являются следующие

1. Аналитическая разработка альтернативного описания магнитной турбулентности при помощи приближенных квазилинейных уравнений для широкого ансамбля мод слабостолкновительной магнитоактивной плазмы с произвольным начальным распределением частиц по скоростям

- и возможностью учета однородной в пространстве инжекции частиц с анизотропным распределением по скоростям.
2. Построение оригинальной численной программы для эффективного решения квазилинейных уравнений в пространственно двумерных задачах при учете всех трех компонент скорости частиц, их столкновений, а также магнитного поля.
 3. Сопоставление полученных таким образом результатов с результатами проведенных в рамках проекта расчетов методом частиц в ячейках и анализ сходств и отличий в них, прежде всего, по отношению к динамике среднеквадратичного магнитного поля, характерного волнового числа турбулентности и параметра анизотропии плазмы, в том числе при наличии внешнего магнитного поля, инжекции частиц и их столкновений.
 4. Выяснение влияния внешнего магнитного поля, пучковой неустойчивости плазмы (прежде всего в отношении ленгмюровских волн) на
 - а) величину среднего квадрата насыщающего неустойчивость магнитного поля,
 - б) долговременную нелинейную эволюцию среднеквадратичного магнитного поля,
 - в) автомодельные свойства пространственного спектра турбулентности,
 - г) законы роста/спадания его гармоник и их нелинейного (резонансного) взаимодействия,
 - д) форму усредненной самосогласованной функции распределения частиц по скоростям,
 - е) параметр её анизотропии, в том числе как функцию начальной величины анизотропии.
 5. Демонстрация возможности согласованного квазилинейного описания апериодической вейбелевской и волновой ленгмюровской турбулентности и изучение их взаимного влияния в плазме с пучковыми распределениями частиц по скоростям.
 6. Нахождение пределов применимости развитой квазилинейной теории магнитной турбулентности в бесстолкновительной анизотропной магнитоактивной плазме.

7. Изучение зависимости среднего квадрата насыщающего магнитного поля и автомодельных эволюционных свойств вейбелевской турбулентности от вида функции распределения частиц и величины её начальной анизотропии, а также от внешнего магнитного поля.

Методы исследования

Основным методом исследования является численное решение самосогласованных уравнений Власова–Максвелла с граничными и начальными условиями, отвечающими поставленным физическим задачам. Численное моделирование осуществлялось при помощи оригинального кода, разработанного на основе квазилинейного подхода к уравнениям Власова–Максвелла, а также методом частиц в ячейках при помощи кода EPOCH [Arber2015]. Сравнительный анализ полученных решений проводился с использованием метода дисперсионных уравнений, параметрического представления функций, усреднения по углу и других методов современной теоретической физики.

Научная новизна

В диссертационной работе развит оригинальный квазилинейный численный подход к описанию эволюции квазимагнитостатической турбулентности и соответствующей деформации функции распределения частиц, использующий приближение слабо нелинейной турбулентности, т.е. слабого взаимодействия ее пространственных мод (гармоник). Этот подход и развитые с его помощью представления о квазимагнитостатической турбулентности являются универсальными, т.е. применимы к различным исходным функциям распределения частиц по скоростям, включая не только бимаксвелловские, но и бикаппа-, комбинированные пучковые, не осесимметричные и другие распределения, представляющие интерес в различных ситуациях в плазме, включая наличие внешнего магнитного поля.

Посредством совместного анализа результатов квазилинейного моделирования и стандартного для подобных задач метода частиц в ячейках выявлена область применимости квазилинейного подхода, а значит, доминирования интегрального нелинейного взаимодействия между модами, а также получены многочисленные зависимости между характеристиками квазимагнитостатической турбулентности в различных задачах.

Теоретическая и практическая значимость

Научная значимость работы состоит, во-первых, в расширении квазилинейной теории с известного случая волновой (высокочастотной) неустойчивости

на нетривиальный случай не волновой, а по существу аperiodической неустойчивости и, во-вторых, в применении этой теории к задачам физики магнитной турбулентности в лазерной плазме, получаемой абляцией мишеней фемтосекундными оптическими импульсами, и в астрофизической плазме, формируемой во вспышках на звездах поздних спектральных классов и в идущем от них звездном ветре.

Основные положения, выносимые на защиту

1. В начальной постановке одномерной и аксиально симметричной двумерной задач для бимаксвелловской плазмы при достаточно слабом внешнем магнитном поле квазилинейные явления являются определяющими на весьма длительной стадии нелинейного развития турбулентности.
2. При внешнем магнитном поле, существенно деформирующем область линейной неустойчивости относительно случая незамагниченной плазмы ключевую роль в спектральной динамике наравне с квазилинейным взаимодействием играют трехволновое и четырехволновое взаимодействие между модами, посредством которого диапазон наиболее энергонесущих мод смещается в длинноволновую область волновых чисел, устойчивую относительно линейных возмущений.
3. Вейбелевская турбулентность магнитного поля может значительно деформировать резонансную с ленгмюровскими волнами область распределения частиц по скоростям, существенно влияя тем самым на формирование и особенно затухание ленгмюровской турбулентности. Ленгмюровская турбулентность электрического поля, в свою очередь, способна существенно изотропизовать распределение частиц по скоростям, а следовательно, изменить инкременты, характер эволюции и уровень насыщения гармоник вейбелевской турбулентности.
4. Для небольших по сравнению с единицей параметров анизотропии величина насыщающего поля существенно зависит от параметра каппа продакт-бикаппа распределения частиц, т. е. от его энергетического профиля.

Достоверность результатов

Проведенные исследования опираются на известные физические модели, широко используемые при изучении квазистационарных процессов в слабо-столкновительной плазме и основанные на уравнениях Власова–Максвелла,

а также на ряде общетеоретических методов, имеющих строгое математическое обоснование: теорию возмущений, спектральные разложения, метод усреднения по большим интервалам и другие. Полученные аналитические оценки и результаты численного моделирования согласованы с экспериментальными данными и теоретическими результатами других научных групп.

Публикации и апробация результатов

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях и научных школах:

- International Conference «Frontiers of Nonlinear Physics» (Н. Новгород, 2024 г.)
- XVIII–XXII научные школы «Нелинейные волны» (Н. Новгород, 2018–2024 г.)
- «Всероссийская астрономическая конференция- 2024» (Нижний Архыз, 2024 г.)
- International Conferences «Shilnikov Workshop» (Н. Новгород, 2023 г.), – международная конференция
- «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2023» (Москва, 2023 г.)
- конференции «Физика плазмы в Солнечной системе» (Москва, 2022–2026 г.),
- COSPAR 2022, 44th Scientific Assembly (Афины, Греция, 2022 г.),
- XXXI International Astronomical Union General Assembly (Пусан, Республика Корея, 2022 г.)
- 37th European Conference on Laser Interaction with Matter (Лиссабон, Португалия, 2024 г.)

Личный вклад автора

Все основные теоретические результаты, изложенные в диссертации, получены лично автором либо при его непосредственном участии. Численные программы для эффективного решения квазилинейных уравнений были разработаны лично автором. Постановка начальных задач для численного моделирования осуществлялась автором при консультативной поддержке со стороны научного руководителя. Расчеты методом частиц в ячейках проводились совместно с Гарасёвым М.А. Количественная обработка и теоретический анализ результатов расчетов осуществлены автором при консультативной поддержке со стороны научного руководителя.

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет ??? страниц, включая ?? рисунка. Список литературы содержит ??? наименований.

Глава 1. Эволюция одномерной вейбелевской турбулентности

1.1 Введение

Среди неустойчивостей анизотропной плазмы апериодическая неустойчивость вейбелевского типа [Weibel1959; Zhou2022; Fried1959; Kalman1968; Morse1971; Kocharovsky2016; Lazar2006; Stockem2009; SchaeferRolffs2006] обладает одним из наибольших инкрементов и вместе с тем не сопровождается сильными резонансными нелинейными эффектами, поскольку ограничивается формированием квазимагнитостатических филаментов тока и не приводит к непосредственному возбуждению каких-либо волн. Но несмотря на то что в линейном приближении вейбелевская неустойчивость изучена достаточно подробно, особенно для бимаксвелловского распределения частиц [Weibel1959; Fried1959; Vagin2014], существующая полностью аналитическая квазилинейная теория эволюции вейбелевской турбулентности разработана лишь в одномерной (1D2V) геометрии, причем для весьма ограниченной области параметров и без должного описания временной эволюции [Pokhotelov2011]. Вдобавок, открытым остается вопрос о применимости используемых в этой теории приближений, а следовательно, корректности полученных результатов. Полуаналитическое решение системы квазилинейных уравнений в 1D3V геометрии [Ruyer2015] с опорой на эмпирические данные численного моделирования также применимо лишь для небольшой области параметров плазмы.

В этой главе последовательно выведена оригинальная квазилинейная система уравнений и с ее помощью описана эволюция спектра возникающей турбулентности в простейшей постановке одномерной задачи на основе оригинального численного кода. В развиваемом численном квазилинейном подходе функция распределения частиц и электрическое и магнитное поля представлены в виде сумм пространственных мод (гармоник), удовлетворяющих самосогласованным квазилинейным уравнениям, в которых все нелинейные явления обусловлены совместным действием мод на форму средней по пространству функции распределения частиц по скоростям. Последняя определяет текущие значения инкрементов (декрементов) и, возможно, действительных ча-

стот всех рассматриваемых мод, в остальном эволюционирующих независимо. В результате, в отличие от метода частиц в ячейках, кардинально снижается уровень шумов и удается получать спектры вейбелевской турбулентности в гораздо более высоком качестве и в недоступных ранее областях параметров, правда, ценой потери некоторых слабых нелинейных эффектов при использовании сравнимых или даже больших вычислительных ресурсов.

Для определенности в конкретных расчетах ниже будем выбирать начальную функцию распределения частиц по скоростям бимаксвелловской, считая температуру частиц наибольшей вдоль оси y , называемой осью анизотропии. Для простоты будем предполагать плазму и все поля в ней однородными вдоль этой оси и оси z , т.е. решать систему уравнений Максвелла – Власова [Baumjohann2012] в одном (по координате x) измерении, а следовательно, полагать нулевыми проекции волновых векторов мод \vec{k} на ось анизотропии: $k_y = 0$ и на направление вдоль магнитного поля: $k_z = 0$. При этом в каждой моде электрическое поле \vec{E} направлено вдоль оси анизотропии, а магнитное \vec{B} ортогонально ей и волновому вектору \vec{k} (ТЕМ-моды).

Главная цель представленной главы состоит в обосновании квазилинейного приближения и изучении в одномерном приближении нелинейных явлений квазилинейного типа, доминирующих в процессе развития вейбелевской турбулентности. Насколько нам известно, последовательный квазилинейный анализ ее эволюции до сих пор никем не проводился ни для какой анизотропии начальной функции распределения частиц по скоростям (ср., например, [Ruyer2015; Pokhotelov2011; Davidson1972]). Более того, другими авторами не проводилось даже достаточно длительное моделирование динамики спектра вейбелевских мод в простейшей постановке задачи об одномерной (1D2V) турбулентности, которой посвящена данная глава. Вместе с тем, некоторые выявленные нами особенности эволюции спектра и динамики отдельных мод аналогичны численно найденным ранее в других постановках задачи о вейбелевской турбулентности.

Последовательное обоснование и схема решения квазилинейных уравнений поясняется в разделе ?? на примере одномерной задачи для дискретных мод с коллинеарными волновыми векторами, имеющими только компоненты k_x . Результаты численного исследования особенностей динамики соответствующей одномерной квазилинейной вейбелевской турбулентности и их сравнение с результатами имеющейся аналитической теории даны в разделе ?? .

1.2 Адиабатическая динамика мод и схема их связи в условиях слабого четырехволнового взаимодействия

Для бесстолкновительной плазмы, в которой на рассматриваемых временах эволюции вейбелевской турбулентности можно пренебречь движением тяжелых ионов, самосогласованные уравнения Максвелла – Власова для электрического $\vec{E} = (0, E_y, 0)$ и магнитного $\vec{B} = (B_x, 0, B_z)$ полей и функции распределения электронов $f(v_x, v_y, v_z, x, z, t)$ имеют вид

$$\nabla \times \vec{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j}, \quad (1.1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial f}{\partial \vec{r}} + \frac{e}{m_e} \left(\vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{v}, \vec{B}] \right) \frac{\partial f}{\partial \vec{v}} = 0, \quad (1.3)$$

где c — скорость света в вакууме, e и m_e — заряд и масса электрона, $\vec{j} = e \iiint_{-\infty}^{+\infty} \vec{v} f(v_x, v_y, v_z, x, z, t) dv_x dv_y dv_z$ — плотность тока, $N = \iiint_{-\infty}^{+\infty} f(v_x, v_y, v_z, x, z, t) dv_x dv_y dv_z$ — концентрация электронов. Здесь и ниже речь идет о так называемых ТЕМ-возмущениях, в которых взаимно ортогональны друг к другу волновой вектор и магнитное и электрическое поля, причем последнее параллельно оси анизотропии плазмы. При этом выше учтено, что для двумерной задачи радиус-вектор является двухкомпонентным, $\vec{r} = (x, 0, z)$, а вектор скорости — трехкомпонентным, $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$ (в одномерной задаче отсутствуют зависимости от координаты z и скорости v_z , но сохраняются зависимости от двух других компонент v_x, v_y).

Положим, что в начальный момент времени нормированная функция распределения по скоростям $c^3 f/N$ имеет бимаксвелловский вид:

$$\Psi(\beta) = \frac{1}{\pi^{3/2} \beta_{\perp 0}^2 \beta_{\parallel 0}} \exp \left(-\frac{\beta_x^2 + \beta_z^2}{\beta_{\perp 0}^2} - \frac{\beta_y^2}{\beta_{\parallel 0}^2} \right). \quad (1.4)$$

Здесь $\beta_{x,y,z} = v_{x,y,z}/c$, т.е. $\beta = \vec{v}/c$, и в дальнейшем используется параметр анизотропии $A_0 = \beta_{\parallel 0}^2 / \beta_{\perp 0}^2 - 1$, определяемый отношением большей тепловой скорости к меньшей.

Квазилинейный подход к описанию ТЕМ-вейбелевской неустойчивости основан на разложении по пространственным модам (гармоникам) решения

уравнений Максвелла – Власова [Baumjohann2012] с шумоподобным начальным возмущением магнитного поля, обладающим примерно равномерным спектром в области неустойчивых волновых чисел мод. Особенно эффективным подобное разложение является тогда, когда ключевую роль играет интегральное нелинейное взаимодействие мод посредством их совместного изменения средней по пространству функции распределения частиц по скоростям. Для вейбелевской турбулентности это оправдано ввиду слабой нелинейности кинетического уравнения Власова в рассматриваемых условиях отсутствия квазимонохроматических электромагнитных волн и их резонансного взаимодействия.

В частности, как показали тестовые расчеты, для любой отдельной гармоники магнитного (и соответствующего электрического) поля $B_1(t, x) = \text{Re}[B_1(t) \exp(-ikx)]$ с волновым вектором \vec{k} , для определенности направленным вдоль орта \vec{x}_0 , можно не учитывать кратные гармоники ℓk с целым $\ell > 1$ и необходимо учесть только три гармоники поправок к функции распределения, $\delta f_\ell(t, x) = \text{Re}[f_\ell(t) \exp(-i\ell kx)]$, со значениями $\ell = 0, 1, 2$. При этом возбуждение чётной гармоники $\ell = 2$ магнитного поля фактически невозможно благодаря ограничениям симметрии в одномерной задаче. Здесь и ниже $\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0$ — единичные орты декартовой системы координат.

Наличие большого числа однотипных не сфазированных мод, достаточно плотно заполняющих значимую область волновых векторов, гарантирует гладкость формы и плавность изменения функции распределения, исключая артефакты когерентной интерференции и отрицательные значения функции распределения электронов всюду, кроме, возможно, несущественной, содержащей крайне мало частиц, области их скоростей, очень больших по сравнению с тепловыми скоростями. При этом по существу реализуется адиабатическая динамика каждой моды, непрерывно подстраивающейся к изменяющейся функции распределения частиц. Корректность такого рода теории возмущений, а фактически — соблюдение иерархии малости амплитуд последующих гармоник по сравнению с предыдущими (как гармоник функции распределения, $|\delta f_\ell| \gg |\delta f_{\ell+1}|$, так и аналогичных гармоник магнитного или электрического полей) проверены нами в случаях задания одной или двух производящих мод.

Так, в случае единственной производящей моды нелинейно связываются все кратные гармоники функции распределения ℓk с $\ell = 0, 1, 2, 3, \dots$ и нечетные гармоники ТЕМ-поля ℓk с $\ell = 1, 3, \dots$ (в силу отсутствия токов на четных

гармониках из-за свойств четности функции распределения), но учет высших гармоник, начиная с $\ell = 3$, почти не изменяет результат. Удостовериться в этом позволяет следующая система связанных уравнений для кратных (комплексных) гармоник-возмущений функции распределения, отвечающая теории возмущений до $\ell = 4$:

$$\vec{B} = \text{Re} [B_1(t) \exp(-ikx) + B_3(t) \exp(-3ikx)] \vec{z}_0, \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial f_0}{\partial t} + \hat{\phi}(\Omega_1, f_1^*) + \hat{\phi}^*(\Omega_1^*, f_1) + \hat{\phi}(\Omega_3, f_3^*) + \hat{\phi}^*(\Omega_3^*, f_3) = 0, \quad (1.6)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} + ikv_x f_1 + 2\hat{\phi}(\Omega_1, f_0) + \hat{\phi}^*(\Omega_1^*, f_2) + \hat{\phi}(\Omega_3, f_2^*) = 0, \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial t} + 2ikv_x f_2 + \hat{\phi}(\Omega_1, f_1) + \hat{\phi}^*(\Omega_1^*, f_3) + \hat{\phi}(\Omega_3, f_1^*) = 0, \quad (1.8)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial t} + 3ikv_x f_3 + 2\hat{\phi}(\Omega_3, f_0) + \hat{\phi}^*(\Omega_1^*, f_4) + \hat{\phi}(\Omega_1, f_2) = 0, \quad (1.9)$$

$$\frac{\partial f_4}{\partial t} + 4ikv_x f_4 + \hat{\phi}(\Omega_1, f_3) + \hat{\phi}(\Omega_3, f_1) = 0, \quad (1.10)$$

где опущены очевидные осцилляторные уравнения для первой и третьей гармоник магнитного поля (??), получающиеся из уравнений (??), (??) и в силу их линейности включающие только соответствующие первую и третью гармоники функции распределения. Для сокращения записи здесь введён оператор

$$\hat{\phi}(\Omega_n, f(\vec{v})) = \frac{i}{2nk} \cdot \frac{\partial \Omega_n}{\partial t} \frac{\partial f(\vec{v})}{\partial v_y} - \frac{1}{2} \Omega_n \left(v_x \frac{\partial f(\vec{v})}{\partial v_y} - v_y \frac{\partial f(\vec{v})}{\partial v_x} \right) \quad (1.11)$$

и комплексная гирочастота $\Omega_n = eB_n/(m_e c)$. Схема данной системы представлена на рис. ?? . Она обладает следующими свойствами:

1. Нелинейные слагаемые в нечетных гармониках ФР пропорциональны $\hat{\phi}(\Omega_1, \hat{\phi}(\Omega_1, f_1))$, а также $\hat{\phi}(\Omega_1, \hat{\phi}(\Omega_3, f_1))$ и $\hat{\phi}(\Omega_1, \hat{\phi}(\Omega_1, f_3))$. Нечетные гармоники магнитного поля взаимосвязаны через четные гармоники ФР.
2. Нелинейные слагаемые, определяющие насыщение экспоненциального роста первой гармоники, включают возмущения функции распределения на второй и нулевой гармонике.
3. Отсутствует ненулевое стационарное решение для нулевой гармоники f_0 .

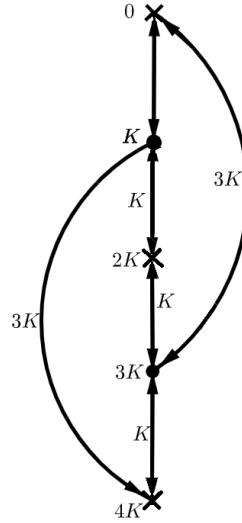


Рисунок 1.1 — Схема связи четырех гармоник функции распределения частиц в самосогласованной системе уравнений (??)–(??) для одной производящей моды. Узел на схеме отвечает уравнению на соответствующую гармонику. Если поле некоторой гармоники тождественно равно нулю, то соответствующий узел изображен в виде крестика, а если нет — в виде точки. Входящая в узел стрелка отвечает слагаемому в уравнении для гармоники, соответствующей этому узлу. В таком слагаемом присутствует гармоника поля, соответствующая гармонике, указанной на стрелке, и гармоника функции распределения частиц, указанная на узле, из которого стрелка исходит.

В том числе и в наиболее опасном случае высокой начальной анизотропии, при которой величина линейного инкремента наиболее неустойчивой вейбелевской моды γ_{max} не слишком мала и сопоставима с произведением волнового числа K_{opt} , для которого он достигается, на начальную поперечную тепловую скорость $\beta_{\perp 0}$, проверено, что в численное решение полученной системы уравнений для параметра анизотропии A и основной гармоники (моды) магнитного поля $B_1(t)$, непосредственно создаваемой первой гармоникой функции распределения $f_1(t)$, практически не отличается от численного решения значительно упрощенной системы, в которой эволюция данной гармоники $B_1(t)$ (и $f_1(t)$) определяется лишь согласованной динамикой нулевой и второй гармоник функции распределения $f_{0,2}(t)$, но не третьей (и высшими) гармониками магнитного поля и функции распределения (рис. ??). Этот результат реализуется вследствие слабости нелинейной генерации утроенной и последующих кратных мод $B_3(t) \ll B_1(t)$ (рис. ??). Ниже будет показано, что нарушение именно этого, по существу иерархического условия слабости нелинейной генерации крат-

ных мод, например, в присутствии достаточно сильного постоянного однородного магнитного поля, приводит к неприменимости развиваемого квазилинейного подхода.

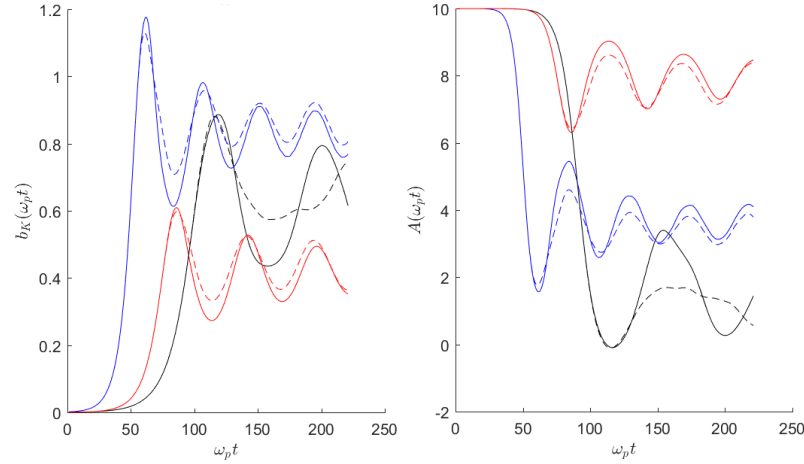


Рисунок 1.2 — Эволюция основной гармоники магнитного поля и показателя анизотропии с учетом утроенной и учетверенной гармоник (пунктир) и без них (сплошная) при $A = 10$, $\beta_{\perp} = 0.1$

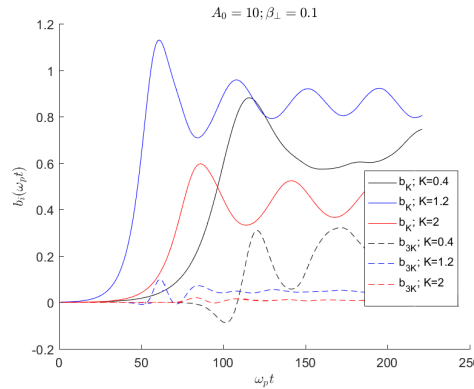


Рисунок 1.3 — Эволюция основной и утроенной гармоник в самосогласованной системе уравнений (??)–(??) для разных волновых чисел при $A = 10$, $\beta_{\perp} = 0.1$

В общем случае многомодовой динамики вейбелевской неустойчивости неизбежно возникают перекрестные гармоники вида $k_i \pm k_j$, $2k_i \pm k_j$ и т.д. Схема взаимосвязи подобных перекрестных гармоник в случае наличия двух производящих вейбелевских мод дана на рис. ??.

Подобно иллюстрации корректности пренебрежения кратными гармониками высокого порядка в одномодовом режиме, показана слабость влияния генерации перекрестных гармоник в случае начального задания только двух сильных мод. С этой целью вновь в наиболее опасном случае высокой начальной анизотропии для различных пар мод проведено сравнение численных решений более общей системы, представленной на рис. ?? и содержащей гармоники

не выше второго порядка, включая суммарные и разностные, с численными решениями в квазилинейном подходе, в котором взаимодействие мод с различными не кратными волновыми числами осуществляется исключительно путем их совместной деформации однородной компоненты распределения частиц. Наблюдаемые отличия в динамике отдельных мод крайне локализованы во времени, отличия в эволюции интегральных величин, таких как среднеквадратичное магнитное поле и текущая анизотропия, ничтожны и не превышают 1% (рис. ??).

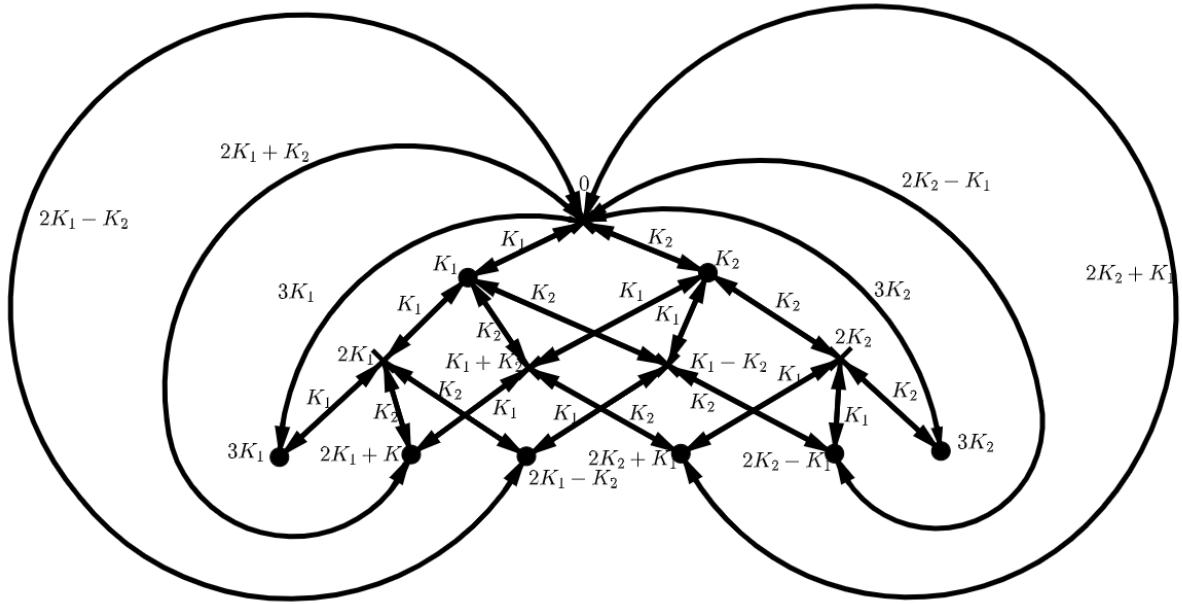


Рисунок 1.4 — Схема связи гармоник функции распределения в самосогласованной системе уравнений для двух производящих мод. Обозначения те же, что на рис. ??.

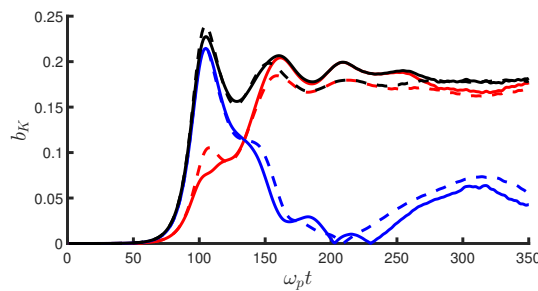


Рисунок 1.5 — Эволюция амплитуды магнитного поля двух взаимосвязанных мод с волновыми числами $k_1 = 0.8$ (красный цвет) и $k_2 = 1$ (синий цвет) в случае учета перекрестных гармоники вида $k_i \pm k_j$, $2k_i \pm k_j$ (сплошная) и в случае их отсутствия (пунктир). Черным цветом показана эволюция среднеквадратичного магнитного поля.

В дополнение к сказанному, проведена прямая проверка корректности квазилинейного подхода путем сравнения решения упрощенной системы уравнений (??)–(??), из которой исключены учетверенная и упятеренная гармония, с полностью нелинейным решением исходных уравнений (??)–(??) кодом ЕРОСН при начальном возбуждении одной сильной моды существенно выше уровня шумов. В результате получено, что описанные решения совпадают с точностью до нескольких процентов (рис. ??), а значит, существует значимый промежуток нелинейной эволюции вейбелевской турбулентности, в течение которого квазилинейное приближения является достаточным для ее описания.

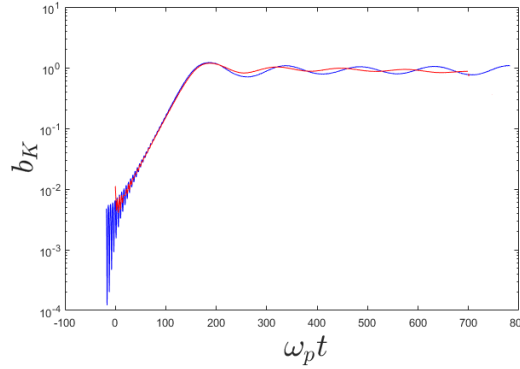


Рисунок 1.6 — Эволюция одной моды: сравнение хода амплитуды основной гармоники магнитного поля в квазилинейном расчете по уравнениям (??)–(??) (синий цвет) и в расчете методом частиц в ячейках с помощью кода ЕРОСН по уравнениям (??)–(??) (красный цвет) при $A_0 = 10$, $K = 1.2$.

Таким образом, в отсутствие учета кратных гармоник вида nk_i , где $n \gg 3$ и перекрестных гармоник вида $k_i \pm k_j$, $2k_i \pm k_j$ имеем следующую квазилинейную систему уравнений для одномерной вейбелевской турбулентности (рис. ??) с большим числом m коллинеарных мод $\{k_1, k_2, \dots, k_m\}$, волновые векторы которых направлены поперек оси анизотропии, часто расположены и перекрывают всю существенную область неустойчивости:

$$\frac{\partial \psi_0}{\partial \tau} + \sum_{n=1}^m \left(\hat{\Phi}(b_{K_n}, \psi_{K_n}^*) + \hat{\Phi}^*(b_{K_n}^*, \psi_{K_n}) \right) = 0, \quad (1.12)$$

$$\frac{\partial \psi_{K_n}}{\partial \tau} + iK_n \beta_x \psi_{K_n} + 2\hat{\Phi}(b_{K_n}, \psi_0) + \hat{\Phi}^*(b_{K_n}^*, \psi_{2K_n}) = 0, \quad (1.13)$$

$$\frac{\partial \psi_{2K_n}}{\partial \tau} + 2iK_n \beta_x \psi_{2K_n} + \hat{\Phi}(b_{K_n}, \psi_{K_n}) = 0, \quad (1.14)$$

$$\ddot{b}_{K_n} + K_n^2 b_{K_n} = \frac{iK_n}{\beta_{||0}} \iint_{-\infty}^{\infty} \beta_y \psi_{K_n}(\tau, \beta_x, \beta_y) d\beta_x d\beta_y. \quad (1.15)$$

Согласно ей, магнитное поле имеет вид суммы мод по целочисленному индексу n : $B(t, x) = \text{Re} \sum_{n=1}^m B_{k_n}(t) \exp(-ik_n x)$. Аналогичный вид имеет каждая из двух кратных гармоник-возмущений функции распределения частиц по скоростям, т. е. компонент $\delta f_1(t, x)$ и $\delta f_2(t, x)$, разложенных на комплексные гармоники $f_{1k_n}(t)$ и $f_{2k_n}(t)$ соответственно; нулевая (действительная) гармоника $f_0(t) = \delta f_0(t)$ зависит только от вектора скорости и дает поправку к функции распределения, усредненную по оси x . Здесь и ниже используются время и волновое число, нормированные на плазменные частоту и масштаб,

$$\tau = \omega_p t, \quad K = \frac{kc}{\omega_p}; \quad \omega_p^2 = \frac{4\pi N e^2}{m_e}. \quad (1.16)$$

Комплексные амплитуды мод (гармоник) магнитного поля и функции распределения тоже нормированы:

$$b_{K_n} = \frac{B_{K_n}}{\sqrt{8\pi N T_{\parallel 0}}}, \quad T_{\parallel 0} = \frac{m_e c^2 \beta_{\parallel 0}^2}{2}, \quad \psi_{\ell, K_n} = \frac{c^2 f_{\ell, K_n}}{N}, \quad \ell = 0, 1, 2. \quad (1.17)$$

Для многомодовой задачи введен оператор

$$\hat{\Phi}(b_{K_n}, \psi(\beta)) = \frac{i}{2K_n} \frac{\partial b_{K_n}}{\partial \tau} \frac{\partial \psi(\beta)}{\partial \beta_y} - \frac{1}{2} b_{K_n} \left(\beta_x \frac{\partial \psi(\beta)}{\partial \beta_y} - \beta_y \frac{\partial \psi(\beta)}{\partial \beta_x} \right), \quad (1.18)$$

отличающийся нормировкой переменных и параметров от указанного ранее оператора (??) в одномодовой задаче. Квадратичные слагаемые в уравнениях обуславливают квазилинейное взаимодействие между не скоррелированными по фазам модами. Оно осуществляется посредством их коллективного, нелинейного воздействия на однородную компоненту функции распределения, приводящего к изменению ее формы, снижению анизотропии распределения, появлению ненулевых действительных частот мод и их декрементов, т.е. смене знака их инкрементов, и, как следствие, насыщению неустойчивости. Для применимости теории слабой турбулентности [Krall1973; Vedenov1962] в рассматриваемой задаче необходима как справедливость сформулированной теории возмущений, так и возможность на нелинейной стадии эволюции использовать для мод линейное дисперсионное уравнение, которое содержит текущую функцию распределения частиц по скоростям, усредненную по пространству и отличную от начальной.

Все системы квазилинейных интегро-дифференциальных уравнений (например, система (??)–(??) с оператором (??)) решались стандартным методом

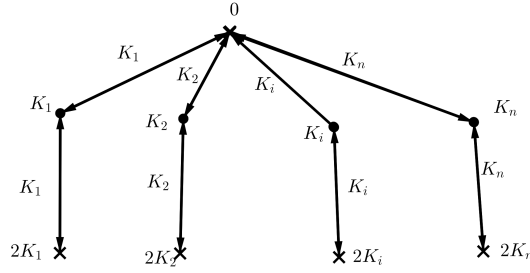


Рисунок 1.7 — Схема связи гармоник функции распределения в самосогласованной квазилинейной системе уравнений (??)–(??) для m производящих мод.

Обозначения те же, что на рис. ??.

Стёрмера – Верле (Leapfrog) [Birdsall2018]. Шаг по времени составлял малую величину $d\tau \sim 0.05\text{--}0.5$ в сравнении с наименьшим временным масштабом рассматриваемой безразмеренной системы уравнений, который определяется волновыми числами мод магнитного поля и тока ($\sim \pi/K$) и имеет порядок единицы. Расчетная сетка для нормированных скоростей β_x , β_y , β_z как переменных трех компонент (??)–(??) анизотропной функции распределения, разложенных по модам $\{K_1, K_2, \dots, K_m\}$, выбиралась анизотропной с соответствующими шагами $d\beta_x = d\beta_z \sim \beta_{\perp 0}/15$ и $d\beta_y \sim \beta_{\parallel 0}/15 = \beta_{\perp 0}\sqrt{1 + A_0}/15$. Количество мод m в типичных расчетах составляло несколько тысяч и выбиралось из условия независимости (с точностью до нескольких процентов) эволюции вычисляемого среднеквадратичного магнитного поля от дальнейшего увеличения числа m , что в одномерной задаче обычно имело место начиная с чисел ~ 30 . Во всех расчетах для определенности начальная поперечная тепловая скорость электронов полагалась равной $\beta_{\perp 0} = 0.1$.

1.3 Эволюция одномерной вейбелевской турбулентности в случае низкой начальной анизотропии

Одномерная эволюция большого числа сонаправленных вейбелевских мод, плотно покрывающих область неустойчивости, определяется представленной системой уравнений (??)–(??) с оператором (??) при задании величины начальной анизотропии бимаксвелловской плазмы A_0 , одной из тепловых скоростей, например $\beta_{\perp 0}$, и начального спектра мод функции распределения и электромагнитного поля. Ключевым параметром нелинейного развития ди-

намического спектра турбулентности является начальная анизотропия A_0 , задающая, в частности, линейный спектр неустойчивых вейбелевских мод, т.е. их инкременты. При $A_0 \ll 1$ максимальный инкремент (в единицах ω_p) равен $\gamma_{\max} \approx 2\beta_{\perp 0}(A_0/3)^{3/2}$ и достигается для оптимального волнового числа $k_{\text{opt}} \approx (A_0/3)^{1/2}$, при $A_0 \gg 1$ имеем $\gamma_{\max} \approx \beta_{\perp 0} \left([(A_0 + 1)/2]^{1/2} - 1 \right)$ для $K_{\text{opt}} \approx \left([(A_0 + 1)/2]^{1/2} - 1 \right)^{1/2}$. Ниже отдельно обсуждаются случаи низкой ($A_0 = 0.25$) и высокой ($A_0 = 10$) начальной анизотропии. В обоих случаях получаются вполне сравнимые интегральные характеристики турбулентности, вычисляемые с использованием квазилинейных расчетов и моделирования методом частиц в ячейках при помощи кода ЕРОСН. Однако количественно результаты последнего, как правило, отличаются в полтора-два раза, поскольку в одномерной задаче он вносит сильные шумы в несвойственные ей компоненты полей и скоростей, заметно искажающие функцию распределения частиц, а следовательно, квазилинейную эволюцию спектра (другие нелинейные эффекты, в том числе, четырехволновые, для одномерной турбулентности не характерны).

Согласно [Nechaev2023], на основе энергетических инвариантов [Davidson1972] для рассматриваемой одномерной задачи может быть получено следующее приближенное аналитическое соотношение между текущими значениями нормированного среднеквадратичного магнитного поля b_{av} , характерного волнового числа $\langle K \rangle$ ¹ и параметра анизотропии плазмы A (отличного от введенного в [Nechaev2023]), если считать, что пространственный спектр вейбелевской турбулентности достаточно узок:

$$b_{av}^2 = \frac{A_0 - A}{1 + A_0} \cdot \frac{0.5\langle K \rangle^2}{A\langle K \rangle^2 + A + 3\langle K \rangle^2 + 2}, \quad (1.19)$$

$$\langle \dots \rangle = \frac{\int \dots b_k dk}{\int b_k dk}, \quad (1.20)$$

$$A = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \beta_y^2 \psi_0(\tau, \beta_x, \beta_y) d\beta_x d\beta_y}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \beta_x^2 \psi_0(\tau, \beta_x, \beta_y) d\beta_x d\beta_y} - 1. \quad (1.21)$$

Для представленных результатов моделирования одномерной турбулентности, согласованной со сложно меняющейся (не бимаксвелловской) функцией

¹Во многих случаях представленному соотношению немного лучше удовлетворяет волновое число $K_{\max}(t)$, отвечающее максимуму спектра турбулентности, а не указанное выше число $\langle K \rangle$, усредненное по спектру мод b_k , хотя эти числа довольно близки.

распределения частиц, это соотношение оказалось хорошо выполняющимся, обычно с точностью до нескольких процентов.

Результаты имеющейся аналитической квазилинейной теории [Pokhotelov2011] не описывающей эволюцию турбулентности в явном виде, трудно непосредственно сопоставить с приведенным выше соотношением и с прямым численным моделированием динамики спектра. Основные приближения этой теории [Pokhotelov2011] состоят в малости инкрементов, $\gamma_{K_n} \ll K_n \beta_{\perp 0}$, и в узости области изменения усредненной в пространстве функции распределения частиц по скоростям, $\delta \beta_x \ll \beta_{\perp 0}$. Первое требование призвано гарантировать применимость используемого дисперсионного уравнения, а второе фактически сводится к отсутствию учета диффузии частиц вдоль оси анизотропии, а значит, к нарушению закона сохранения энергии.

Однако проведенное косвенное сопоставление показывает, что качественно эта теория вполне совместима с получаемыми более точными численными результатами в области ее применимости. В то же время имеют место значительные количественные расхождения, обусловленные допущенными приближениями. Интересующее нас косвенное сопоставление удастся провести с использованием найденного в аналитической теории эволюционного параметра h , величина которого определяется адиабатической динамикой мод (??) и однозначно задает вид деформированной функции распределения (??). С помощью деформированной функции распределения и дисперсионного уравнения (??) [Kocharovsky2016] для каждой моды может быть получен текущий линейный инкремент, используемый в (??).

$$|\dot{b}_{K_n}| = \gamma_{K_n} |b_{K_n}|, \quad (1.22)$$

$$h = \sum_{K_n} \frac{|b_{K_n}|^2}{K_n^2}. \quad (1.23)$$

$$\Psi(\beta_x, \beta_y, h) = \frac{2^{1/4} \Gamma(3/4)}{\pi^{3/2} \beta_{\parallel}} \frac{|\beta_x|^{3/2}}{\beta_{\perp}^{5/2}} \exp\left(-\frac{\beta_y^2}{\beta_{\parallel}^2}\right) \int_0^{\infty} \frac{e^{-2\lambda^2 \frac{\beta_y^2}{\beta_{\perp}^4} \beta_{\parallel}^2 h} \lambda^{1/4} J_{-3/4}\left(\lambda \frac{\beta_x^2}{\beta_{\perp}^2}\right)}{(\lambda^2 + 1)^{-3/4}} d\lambda, \quad (1.24)$$

$$K^2 + \gamma_{K_n}^2 + \int_{-\infty}^{\infty} \int \Psi(\beta_x, \beta_y, h) \left(1 + \frac{\beta_y^2 (K^2 \beta_x^2 - \gamma_{K_n}^2)}{(\gamma_{K_n}^2 - K^2 \beta_x^2)^2}\right) d\beta_y d\beta_x. \quad (1.25)$$

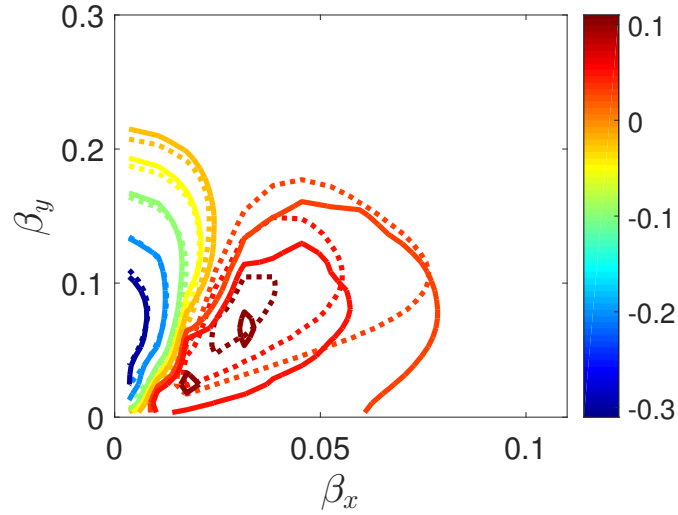


Рисунок 1.8 — Построенные на основе 1-мерного квазилинейного расчета (сплошная линия) и вычисленные на основе аналитической теории [Pokhotelov2011] (пунктир) для момента времени $\omega_p t = 9000$ линии уровня $-0.3, -0.2, -0.1, -0.05, -0.025, 0.025, 0.05$ и 0.1 поправки к однородной компоненте функции распределения (??), которая в начальный момент времени являлась бимаксвелловской с параметром анизотропии $A_0 = 0.25$.

Уравнения (??)-(??) формируют замкнутую систему, для которой получены численные решения. На рис. ?? показана характерная деформация функции распределения частиц, происшедшая спустя время $\omega_p t = 9000$ (т.е. примерно втрое позже начала заметного насыщения роста энергии турбулентного магнитного поля) и найденная как непосредственно из численного решения квазилинейной системы уравнений (??)-(??), так и косвенно из аналитической квазилинейной теории (??)-(??) с использованием указанного численного решения для вычисления эволюционного параметра h при малой начальной анизотропии $A_0 = 0.25$. Как видим, относительная деформация функции распределения составляет доли процента и действительно происходит в области скоростей, меньших тепловой скорости. В этой области угол движения электронов относительно оси анизотропии y в среднем заметно увеличивается, хотя качественное изменение траекторий с появлением баунс-осцилляций фактически происходит только для малой доли электронов со скоростями, лежащими вдоль оси анизотропии в небольшом конусе углов с раскрытием, сужающимся с уменьшением параметра анизотропии A_0 . В целом, в результате насыщения вейбелевской неустойчивости функция распределения по скоростям уплощается в своей центральной части, теряя там бимаксвелловскую форму и приобретая более сложный (в дальнейшем слабо меняющийся) анизотропный вид, причем

полный параметр анизотропии уменьшается очень мало, на величину порядка 1-2%, сначала осциллируя, а потом оставаясь почти постоянным.

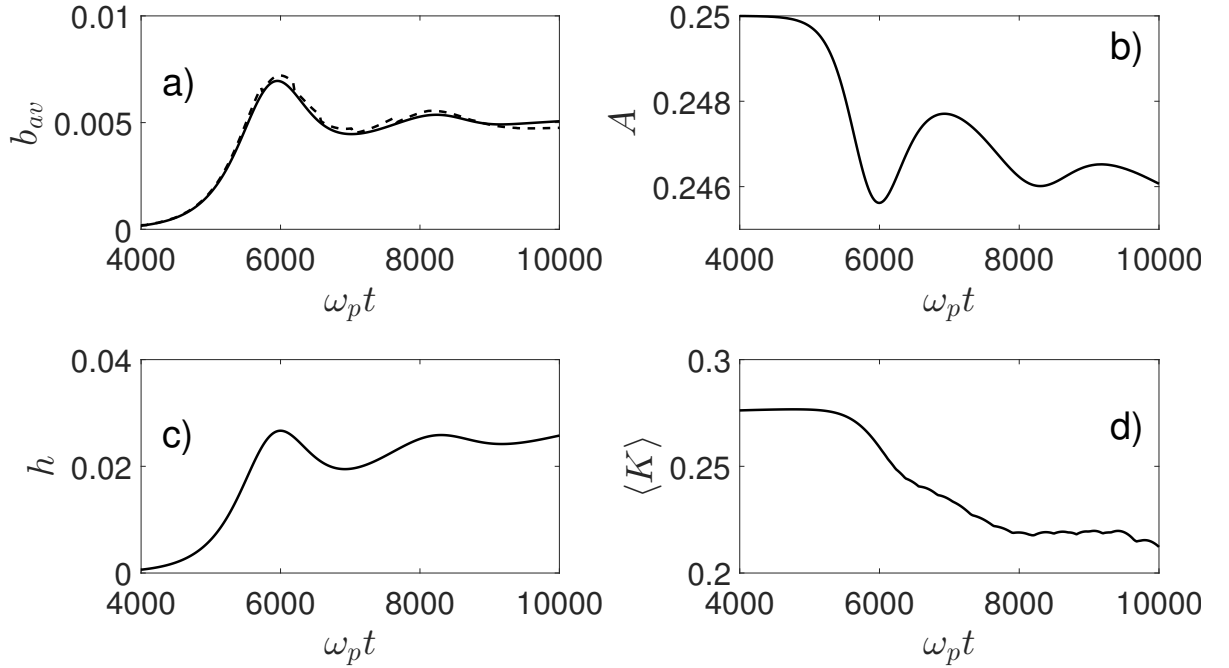


Рисунок 1.9 — Эволюция (а) среднеквадратичного магнитного поля b_{av} (сплошная линия) и оценки этой величины (??) (штрихи), (б) параметра анизотропии A , (с) эволюционного параметра h , (д) характерного, среднего волнового числа $\langle K \rangle$ согласно численному 1-мерному квазилинейному моделированию при $A_0 = 0.25$.

Несмотря на приближенный характер аналитической квазилинейной теории, ее отличия от более точного численного квазилинейного моделирования при сравнении величин среднеквадратичного магнитного поля b_{av} , эволюционного параметра h и характерного волнового числа $\langle K \rangle$ на нелинейной стадии ($\omega_p t > 3000$) не превышают 20%. Наибольшие расхождения наблюдаются в переходной области от быстрого экспоненциального роста к медленной квазилинейной эволюции. В отличие от ожидавшегося в аналитической теории плавно-монотонного изменения всех указанных величин, данный переход в численном квазилинейном моделировании, как и в расчетах методом частиц в ячейках, демонстрирует небольшие осцилляции этих величин (за исключением монотонного уменьшения характерного волнового числа примерно на четверть от исходного значения). Их средние значения после переходной стадии со временем меняются очень слабо, что отвечает формированию долгоживущих (самосогласованных) одномерных токовых структур (слоёв) в плазме. С квазилинейной точки зрения такое поведение объясняется сначала осцилляциями

доминирующих в спектре мод, которые (как и остальные моды, см. ниже) наряду с уменьшающимися инкрементами приобретают действительные частоты из-за сложного изменения функции распределения электронов, а затем установлением почти не меняющихся амплитуд этих мод. Последнее обусловлено тем обстоятельством, что их инкременты оказываются близки к нулю, причем в основном благодаря выполаживанию центральной части функции распределения, поскольку в целом ее анизотропия ослабляется незначительно. Вопрос о законах медленного роста других мод с очень малыми волновыми числами на гораздо более поздней стадии развития турбулентности пока мало изучен.

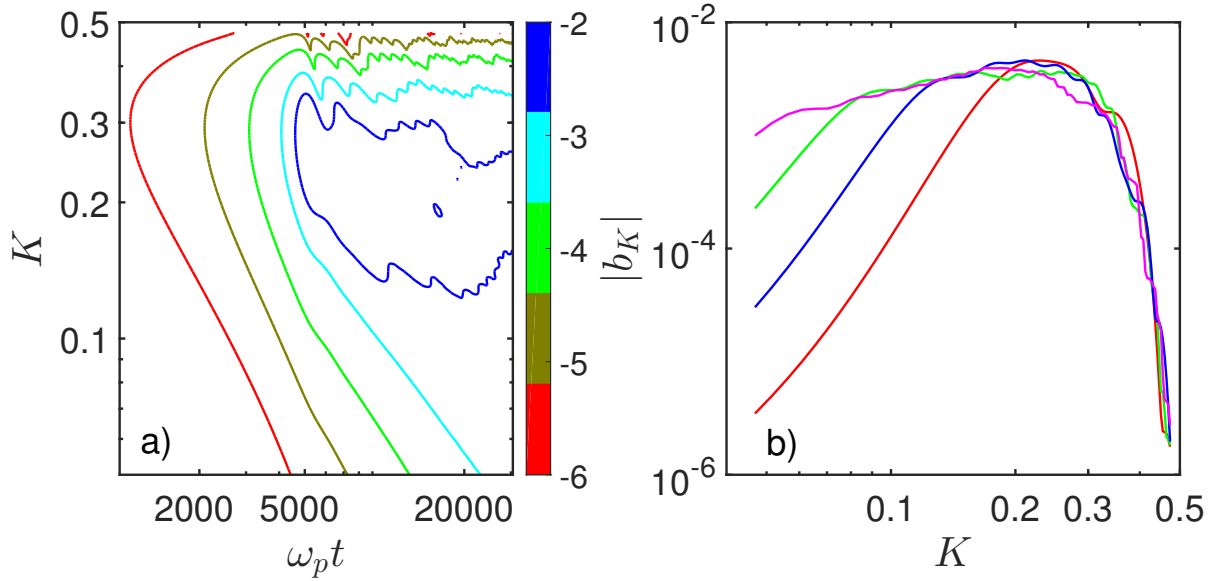


Рисунок 1.10 — Эволюция спектра турбулентности, найденная в 1-мерном квазилинейном расчете, в двойном логарифмическом масштабе: (а) линии уровня логарифма амплитуд мод магнитного поля $|b_K|$; (б) спектр $|b_K|$ магнитного поля в моменты времени $\omega_p t$, равные 6000 (красный цвет), 10000 (синий), 16000 (зеленый), 24000 (розовый). Начальная анизотропия $A_0 = 0.25$.

Типичные эволюция всего спектра и динамика отдельных мод на временах порядка десяти времен достижения насыщения наиболее неустойчивой моды с волновым числом $K_{opt} \approx 0.28$ показаны на рис. ?? и ??. Для определенности в квазилинейном моделировании в качестве начального использовался равномерный спектр мод с заданной малой амплитудой. Чем она ниже, тем сильнее в ходе первоначального экспоненциального роста спектр сужается около моды с волновым числом K_{opt} , приобретая колоколообразный вид функции Гаусса. Доминирующие моды с близкими волновыми числами, формирующиеся к моменту насыщения, вступают в квазилинейное взаимодействие и деформируют центральную часть функции распределения, ограничивая свой рост и рост

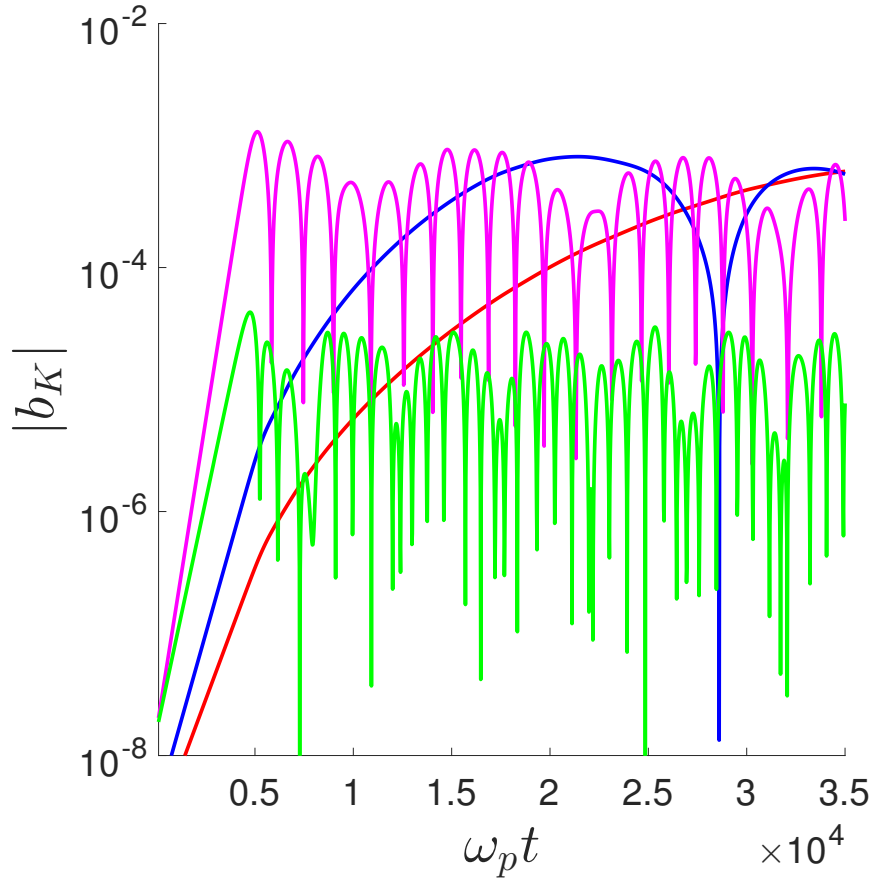


Рисунок 1.11 — Эволюция четырех типичных мод ($K = 0.08$ — красный цвет, $K = 0.11$ — синий, $K = 0.3$ — розовый, $K = 0.4$ — зелёный), взятых из спектра рис. ???. Оптимальное волновое число $K_{\text{opt}} \approx 0.28$.

коротковолновых мод, но позволяя расти более длинноволновым модам. Коротковолновое крыло спектра, которое лежит справа от моды с волновым числом K_{max} , обладающей наибольшей амплитудой магнитного поля, имеет довольно сложную форму, но в целом допускает крутую степенную аппроксимацию.

Значительная часть длинноволнового крыла спектра, которая примыкает к плато, образованному насытившими свой рост модами, на протяжении длительного промежутка нелинейной эволюции хорошо аппроксимируется степенной зависимостью с показателем, примерно равным 5 и мало меняющимся со временем; см. рис. ??b. Это обстоятельство дает основание для гипотезы о частичной автомодельности процесса. После насыщения неустойчивости среднее волновое число спектра $\langle K \rangle$ понемногу смещается в длинноволновую сторону. Одновременно с этим немного растет и дисперсия спектра $\sigma^2 = \langle K^2 \rangle - \langle K \rangle^2$ (см. (??)), которая снижалась на линейной стадии развития неустойчивости. Возможная связь указанной эволюции спектра с формированием или разруше-

нием долгоживущих токовых слоев в одномерной вейбелевской турбулентности еще не изучалась.

На рис. ?? представлена характерная эволюция амплитуд мод с учетом их квазипериодических осцилляций (которые замыкаются при сложении мод и не видны при визуализации спектра на рис. ??, где проведено усреднение по близким модам). Пока мода с наибольшим инкрементом не достигнет насыщения, остальные моды растут экспоненциально со своими (разными) инкрементами и не испытывают осцилляций. После этого момента времени моды вблизи оптимальной и более коротковолновые моды тоже практически сразу насыщаются и начинают довольно быстро колебаться, почти не меняя своей амплитуды, т.е. у них величина инкремента значительно ниже появившейся действительной частоты. Вместе с тем более длинноволновые моды с инкрементом значительно меньше максимального продолжают нарастать, правда, почти по степенному закону с различными показателями порядка 3–5, достигают амплитуды порядка максимальной амплитуды моды с оптимальным волновым числом $K_{opt} \approx 0.28$ и только после этого начинают медленно осциллировать с почти не уменьшающимся уровнем огибающей. Такая динамика мод согласована с указанной выше эволюцией их полного спектра, имеющей автомоделные черты.

Согласно даваемой аналитической теорией [Pokhotelov2011] оценке уровня насыщения эволюционного параметра h в зависимости от начального параметра анизотропии, нетрудно оценить средний квадрат нормированного насыщающего магнитного поля (см. (??)), если учесть, что в момент насыщения неустойчивости в спектре доминируют моды с волновыми числами вблизи оптимального K_{opt} , отвечающего наибольшему линейному инкременту:

$$b_{sat}^2 \approx 0.3 \frac{A_0^5}{(1 + A_0)^6}. \quad (1.26)$$

Полученная оценка соответствует значениям насыщающего магнитного поля, найденным в одномерной задаче в рамках осуществленных нами квазилинейных расчетов, и дает его резкое спадание по закону $\approx 0.3A_0^5$ при уменьшении начального параметра анизотропии (рис. ??а). Для начальных параметров анизотропии больше единицы данная аналитическая оценка не применима, а численное моделирование показывает, что средний квадрат нормированного насыщающего поля с ростом параметра анизотропии стремится к величине чуть меньшей 0.1 (рис. ??б). При этом, как будет ясно из следующего подраздела, эволюция спектра одномерной турбулентности существенно

изменяется. Кроме того, следует заметить, что в более реальном случае двумерной турбулентности, согласно рис. ??b и главе ??, не только меняется характер спектральной эволюции турбулентности, но и сама зависимость насыщающего магнитного поля от начального параметра анизотропии оказывается существенно другой, сильно отличающейся от (??) в сторону увеличения при малых A_0 и по-другому выходящей к максимальному значению при больших A_0 ; см., например, [Borodachev2010; Kuznetsov2022].

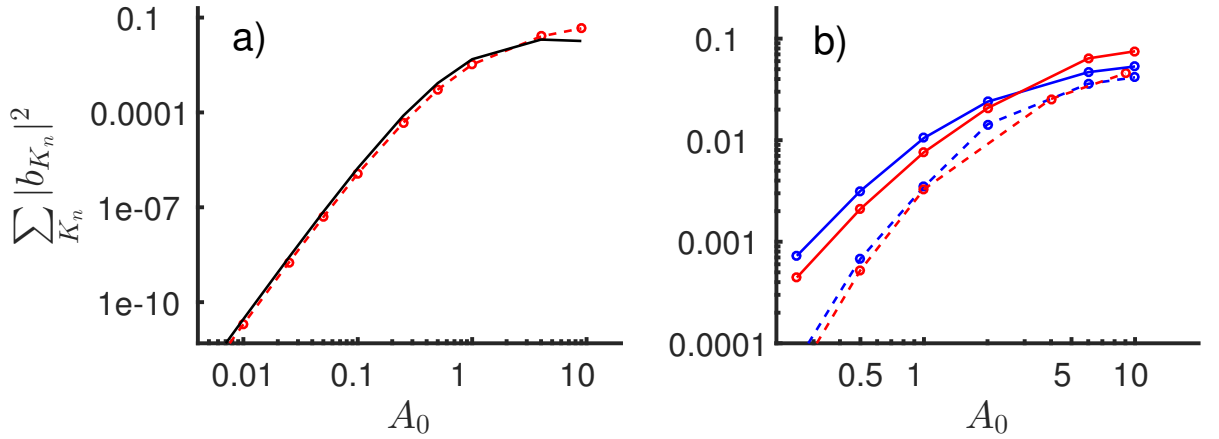


Рисунок 1.12 — Сравнение зависимостей среднего квадрата нормированного насыщающего магнитного поля b_{sat}^2 от начального параметра анизотропии A_0 (а) согласно оценке (??) (черный цвет) и численному квазилинейному моделированию по уравнениям (??)–(??) (красный цвет); (б) согласно этому же моделированию (красный цвет) и расчетам методом частиц в ячейках с помощью кода ЕРОСН (синий цвет) в одномерном (штрихи) и двумерном (сплошная) случаях.

1.4 Эволюция одномерной вейбелевской турбулентности в случае высокой начальной анизотропии

Если начальная анизотропия велика, $A_0 \gg 1$, то исходные инкременты мод тоже велики, турбулентность развивается быстро и сразу в более широком интервале волновых чисел (вблизи оптимальной величины K_{opt} и существенно левее нее). На стадии насыщения роста этих мод функция распределения частиц значительно деформируется (в два и более раз) во всей области скоростей порядка тепловых, а не только вблизи своего максимума, как при $A_0 \ll 1$.

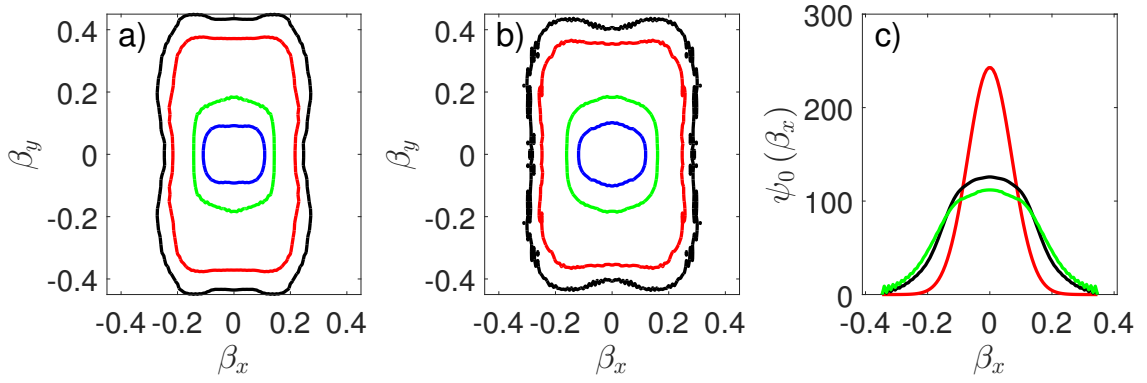


Рисунок 1.13 — (a) Линии уровня 0.05 (черный цвет), 0.1 (красный), 0.5 (зелёный) и 0.8 (синий), отсчитанные от максимального значения функции распределения в момент времени $\omega_p t = 80$; (b) то же в момент времени $\omega_p t = 440$; (c) распределение частиц по величине нормированной компоненты скорости β_x , ортогональной оси анизотропии, в моменты времени $\omega_p t$, равные 0 (красный цвет), 80 (черный) и 440 (зеленый). Приведены данные 1-мерного квазилинейного расчета при $A_0 = 10$.

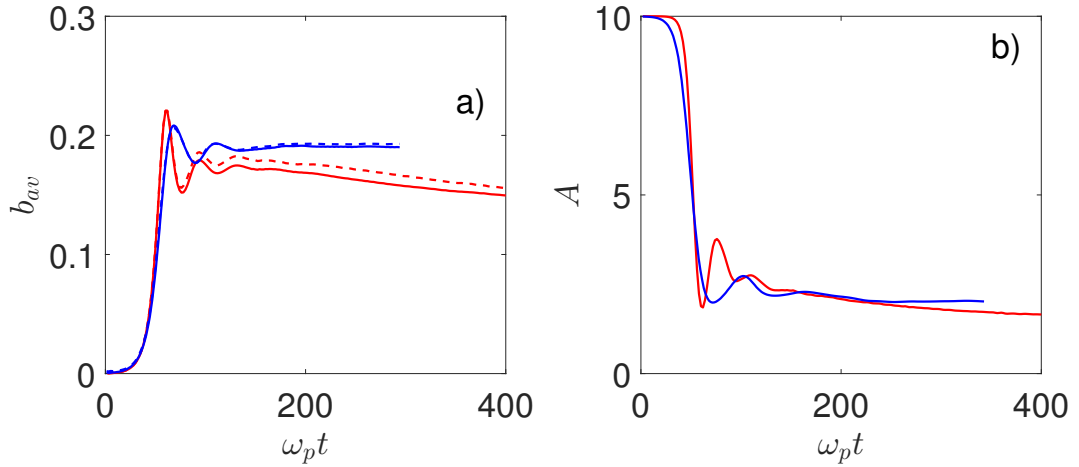


Рисунок 1.14 — Эволюция (a) среднеквадратичного магнитного поля b_{av} (сплошная линия) и оценки этой величины (??) (штрихи), а также (b) параметра анизотропии A согласно численному квазилинейному моделированию (красный цвет) и расчетам методом частиц в ячейках (синий цвет) в 1-мерной задаче при $A_0 = 10$.

Согласно расчетам, проведенным для определенности при $A_0 = 10$ (см. рис. ?? и ср. рис. ??), в данном процессе происходит быстрое увеличение поперечной к оси анизотропии скорости электронов, двигавшихся сначала преимущественно вдоль этой оси, так что центральная часть распределения в значительной мере переходит на периферию и его форма вместо овальной приобретает прямоугольный вид с характерным отношением сторон порядка

текущего значения параметра анизотропии A после этапа насыщения. Это значение в несколько раз меньше исходного A_0 , в рассмотренном примере - приблизительно в 5 раз, и в дальнейшем почти не уменьшается ($A \approx 2$, см. рис. ??). Практически не меняется и форма функции распределения частиц, остающаяся сильно отличной от бимаксвелловской, а также среднеквадратичная величина магнитного поля турбулентности. (Небольшие различия в слабом изменении среднеквадратичного поля b_{av} после достижения им максимума, обнаруживаемые, с одной стороны, квазилинейным расчетом и, с другой стороны, при помощи кода ЕРОСН, обусловлены, по-видимому, неучтенными нелинейными эффектами в первом и численными шумами, искажающими и тормозящими эволюцию спектра, во втором.)

Сравнивая эволюцию спектров турбулентности при высокой (рис. ??) и низкой (рис. ??) начальной анизотропии, заметим, что в первом случае затухание насытившихся, более коротковолновых мод оказывается значительно сильнее и автомоделный характер эволюции обоих крыльев спектра выражен более явно, чем во втором. Поэтому в случае высокой начальной анизотропии дисперсия спектра $\sigma^2 = \langle K^2 \rangle - \langle K \rangle^2$ заметно изменялась (уменьшалась) только на стадии экспоненциального роста мод, а после кратковременного уширения с началом нелинейной стадии уменьшается очень слабо, стремясь к постоянному значению, в отличие от случая низкой начальной анизотропии, когда эта дисперсия после первоначального уменьшения на линейной стадии медленно увеличивается за счет нелинейного (квазилинейного) роста длинноволнового крыла спектра. При этом среднее волновое число спектра $\langle K \rangle$ в первом случае со временем уменьшается примерно по степенному закону $t^{-1/2}$, тогда как во втором оно уменьшается весьма незначительно. Наконец, в первом случае, при $A_0 = 10$, близкий к степенному вид обоих крыльев спектра $|b_k|$ прослеживается гораздо более четко и практически сразу после насыщения роста среднеквадратичного поля, характеризуясь почти не меняющимися показателями около 10 и -13 в длинноволновой и коротковолновой частях соответственно, хотя эти показатели весьма чувствительны к начальному уровню амплитуд мод. Заметим, что во втором случае, при $A_0 = 0.25$, степенной вид принимает только длинноволновое крыло, причем с показателем примерно вдвое меньшим, т.е. около 5, и тоже чувствительным к начальному уровню амплитуд мод.

Для сформировавшейся сложно анизотропной функции распределения большинство мод приобретают действительную частоту больше или порядка

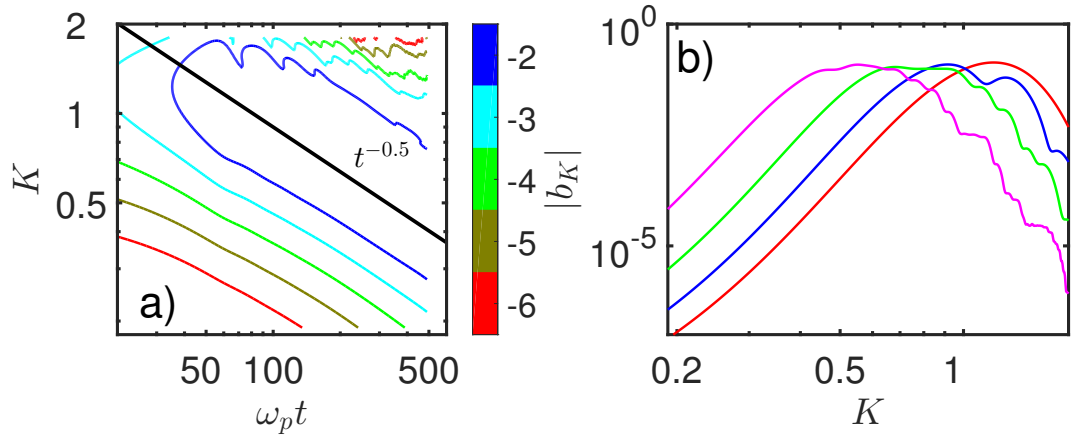


Рисунок 1.15 — Эволюция спектра турбулентности, найденная в 1-мерном квазилинейном расчете, в двойном логарифмическом масштабе: (а) линии уровня логарифма амплитуд мод магнитного поля $|b_K|$; (б) спектр $|b_K|$ магнитного поля в моменты времени $\omega_p t$, равные 60 (красный цвет), 100 (синий), 180 (зеленый) и 360 (розовый). Начальная анизотропия $A_0 = 10$.

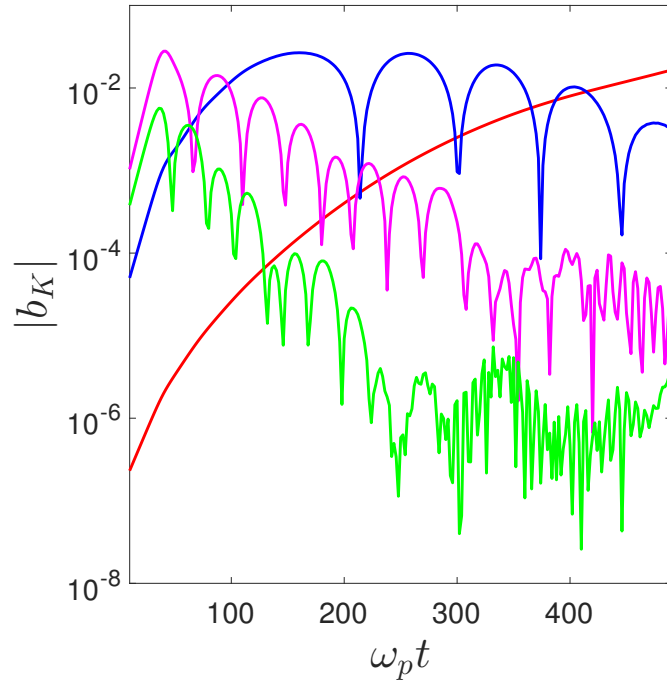


Рисунок 1.16 — Эволюция четырех типичных мод ($K = 0.4$ — красный цвет, $K = 0.7$ — синий, $K = 1.2$ — розовый, $K = 1.6$ — зелёный), взятых из спектра рис. ???. Оптимальное волновое число $K_{\text{opt}} \approx 1.2$.

величины инкремента (декремента), а следовательно, их амплитуды $|b_k|$ начинают осциллировать, что отмечалось в предыдущем подразделе при $A_0 = 0.25$. Теперь, при $A_0 = 10$, это показано на рис. ??, где частота осцилляций выше у более коротковолновых мод, причем для менее коротковолновых мод имеется промежуточная стадия примерно степенного роста (с различными показателя-

ми степени, опять, порядка 3-5, как и при $A_0 = 0.25$), начинающаяся почти сразу после момента насыщения моды с наибольшим исходным инкрементом и оптимальным волновым числом $K_{\text{opt}} \approx 1.2$ и заканчивающаяся моментом их собственного насыщения, после которого и возникают указанные осцилляции их амплитуд. Дальнейшее затухание огибающих этих осциллирующих амплитуд теперь выражено весьма сильно и является примерно экспоненциальным, а не степенным. Оно идет с разными декрементами в диапазоне 0.01-0.05 для различных мод, опускающихся вплоть до уровня численных шумов порядка 10^{-5} . Осцилляции не наблюдаются только для наиболее длинноволновых мод, дисперсия которых, по-видимому, определяется уплощенной частью функции распределения, а их действительные частоты могут быть даже меньше их инкрементов (декрементов).

Согласно проведенному сравнительному анализу расчетов в рамках квазилинейного подхода и расчетов методом частиц в ячейках для указанных и других значений параметра анизотропии A_0 , подобная динамика отдельных мод и спектра в целом в одномерной задаче обусловлена в основном чисто квазилинейными эффектами благодаря продолжающей самосогласованно изменяться функции распределения частиц. Тем не менее, из-за наличия уже упоминавшихся значительных численных шумов в использованном коде ЕРОСН, искажающих форму функции распределения и квазилинейную динамику мод, открытым остается вопрос о количественной оценке возможной, пусть малой, роли четырехволнового взаимодействия в нарастании все более длинноволновых и затухании ранее возбуждившихся коротковолновых мод, а следовательно, в формировании и поддержании степенной формы крыльев спектра одномерной вейбелевской турбулентности, особенно на поздних этапах ее затухания.

Глава 2. Развитие двумерной аксиально симметричной турбулентности

2.1 Введение

Изучение качественных особенностей эволюции вейбелевской турбулентности, квазилинейных и не только, не менее актуально и для более реалистичной двумерной (2D3V) задачи, которая рассматривается в настоящем разделе и для которой расчеты кодом ЕРОСН являются более точными, поскольку его численные шумы не так сильно искажают функцию распределения частиц и динамику мод, как в одномерной задаче. Для определенности анализ ограничен простейшим аксиально симметричным случаем, в котором ось анизотропии y исходного бимаксвелловского распределения электронов по скоростям (??) ортогональна расчетной плоскости xz . В этом случае ТЕМ-турбулентности, как будет ясно из дальнейшего, квазилинейные эффекты тоже доминируют и определяют основные свойства ее пространственного спектра. Последний для интересующих нас полей и токов представляется большим числом $s \cdot p$ неколлинеарных мод (гармоник) с волновыми векторами $\{(k_1; k_1), (k_1; k_2), \dots, (k_2; k_1), \dots, (k_s; k_p)\}$, компоненты которых состоят из s радиальных проекций $\vec{k}\vec{r}_0$ и p аксиальных проекций $\vec{k}\vec{\varphi}_0$. В таком представлении обе компоненты магнитного поля, которое ортогонально оси анизотропии, имеют вид суммы мод по целочисленному векторному индексу $\vec{n} = (n_r, n_\varphi)$:

$$B_{x,z}(t, x, z) = \text{Re} \sum_{n_r, n_\varphi=1}^{l,p} (B_{k_{\vec{n}}}(t))_{x,z} \exp(-i(k_{\vec{n}})_x x - i(k_{\vec{n}})_z z). \quad (2.1)$$

Аналогичен вид и единственной компоненты электрического поля $\vec{E} = (0, E_y, 0)$, направленного вдоль оси анизотропии функции распределения и ниже нормированного так же, как магнитное поле (??).

Для указанных мод полей и возмущений-гармоник функции распределения электронов по скоростям может быть получена следующая систему квазилинейных уравнений с новым более сложным оператором $\hat{\Theta}_1$ вместо оператора $\hat{\Phi}$ одномерной задачи (ср. (??)–(??), (??)):

$$\frac{\partial \psi_0}{\partial \tau} + \sum_{n=1}^m \operatorname{Re} \left[\hat{\Theta}_1 \left(e_{\vec{K}_{\vec{n}}}, \vec{b}_{\vec{K}_{\vec{n}}}, \psi_{K_n}^* \right) \right] = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \psi_{K_n}}{\partial \tau} + i (K_{\vec{n}})_x \beta_x \psi_{K_n} + i (K_{\vec{n}})_z \beta_z \psi_{K_n} + 2 \hat{\Theta}_1 \left(e_{\vec{K}_{\vec{n}}}, \vec{b}_{\vec{K}_{\vec{n}}}, \psi_0 \right) + \hat{\Theta}_1 \left(e_{\vec{K}_{\vec{n}}}^*, \vec{b}_{\vec{K}_{\vec{n}}}^*, \psi_{2K_n} \right) = 0 \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial \psi_{2K_n}}{\partial \tau} + 2i (K_{\vec{n}})_x \beta_x \psi_{2K_n} + 2i (K_{\vec{n}})_z \beta_z \psi_{2K_n} + \hat{\Theta}_1 \left(e_{\vec{K}_{\vec{n}}}, \vec{b}_{\vec{K}_{\vec{n}}}, \psi_{K_n} \right) = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial \left(b_{\vec{K}_{\vec{n}}} \right)_z}{\partial \tau} = -i (K_{\vec{n}})_x e_{\vec{K}_{\vec{n}}}, \quad \frac{\partial \left(b_{\vec{K}_{\vec{n}}} \right)_x}{\partial \tau} = i (K_{\vec{n}})_z e_{\vec{K}_{\vec{n}}} \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial e_{\vec{K}_{\vec{n}}}}{\partial \tau} = i \left(b_{\vec{K}_{\vec{n}}} \right)_x (K_{\vec{n}})_z - i \left(b_{\vec{K}_{\vec{n}}} \right)_z (K_{\vec{n}})_x + \beta_{\parallel 0}^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} \int \int \beta_y \psi_{\vec{K}_{\vec{n}}}(\tau, \beta_x, \beta_y, \beta_z) d\beta_x d\beta_y d\beta_z \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \hat{\Theta}_1 \left(e_{\vec{K}_{\vec{n}}}, \vec{b}_{\vec{K}_{\vec{n}}}, \psi(\beta) \right) = & \frac{e_{\vec{K}_{\vec{n}}}}{2} \frac{\partial \psi(\beta)}{\partial \beta_y} - \frac{\left(b_{\vec{K}_{\vec{n}}} \right)_z}{2} \left(\beta_x \frac{\partial \psi(\beta)}{\partial \beta_y} - \beta_y \frac{\partial \psi(\beta)}{\partial \beta_x} \right) \\ & - \frac{\left(b_{\vec{K}_{\vec{n}}} \right)_x}{2} \left(\beta_z \frac{\partial \psi(\beta)}{\partial \beta_x} - \beta_x \frac{\partial \psi(\beta)}{\partial \beta_z} \right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

2.2 Сравнение с результатами моделирования методом частиц в ячейках. Выявление нелинейных эффектов четырехволнового взаимодействия на фоне квазилинейной динамики мод.

Численные. двумерно-неоднородные решения системы уравнений (??)-(??), получаемые численно на основе метода Стёрмера – Верле (Leapfrog) [Birdsall2018] (см. конец раздела 2) при одной и той же исходной поперечной тепловой скорости $\beta_{\perp 0} = 0.1$ и различной начальной анизотропии. Кроме того, опять проводилось сравнение с моделированием методом частиц в ячейках при помощи кода ЕРОСН, которое в целом оказалось согласованным

с квазилинейным моделированием системы (??)-(??) с точностью $\sim 10 - 30\%$. Соответствующие результаты приведены ниже при $A_0 = 0.25$ и $A_0 = 10$, как и в предыдущем разделе для одномерной задачи. Отметим, что и для двумерной задачи в предположении об аксиально симметричном и достаточно узком пространственном спектре вейбелевской турбулентности, согласно [Nechaev2023] и (??), нетрудно получить следующее приближенное аналитическое соотношение для эволюционирующих среднеквадратичного магнитного поля b_{av} , параметра анизотропии плазмы A (ср. (??)) и среднего радиального волнового числа (??) $\langle K \rangle$ (ср. начало раздела 3):

$$b_{av}^2 = \frac{A_0 - A}{1 + A_0} \cdot \frac{\langle K \rangle^2}{A \langle K \rangle^2 + A + 5 \langle K \rangle^2 + 3}, \quad (2.8)$$

$$A = \frac{2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \beta_y^2 \psi_0(\tau, \beta_x, \beta_y, \beta_z) d\beta_x d\beta_y d\beta_z}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (\beta_x^2 + \beta_z^2) \psi_0(\tau, \beta_x, \beta_y, \beta_z) d\beta_x d\beta_y d\beta_z} - 1. \quad (2.9)$$

Это соотношение для аксиально симметричной (в среднем) турбулентности по-прежнему очень хорошо, с точностью до нескольких процентов, выполнялось в квазилинейных расчетах (см., например, рис. ??а) и немного хуже, с точностью до 10-20%, в расчетах методом частиц в ячейках, где в условиях высокого уровня численных шумов спектр оказывался более широким. Отметим, что всюду ниже под спектром вейбелевской турбулентности в аксиально симметричной задаче подразумевается зависимость нормированных амплитуд мод магнитного поля (??) $|b_K|$ от нормированного радиального волнового числа (??) K , получаемая после усреднения по азимутальному углу.

Не повторяя общие положения, сформулированные в подразделах ?? и ??, сосредоточимся только на различиях в развитии турбулентности, обусловленных переходом от одномерной к двумерной задаче, т.е. расширением области волновых векторов неустойчивых мод и направлений их магнитных полей, а следовательно, усилением квазилинейного взаимодействия мод и деформации функции распределения электронов по скоростям.

При низкой начальной анизотропии, $A_0 = 0.25$, деформация функции распределения идет интенсивнее, дольше и по величине составляет уже не доли, а несколько процентов, захватывая более обширную область тепловых скоростей электронов, так что тангенс угла конуса, на котором согласно рис. ?? меняется знак приращения функции распределения, увеличивается от примерно $1/6$

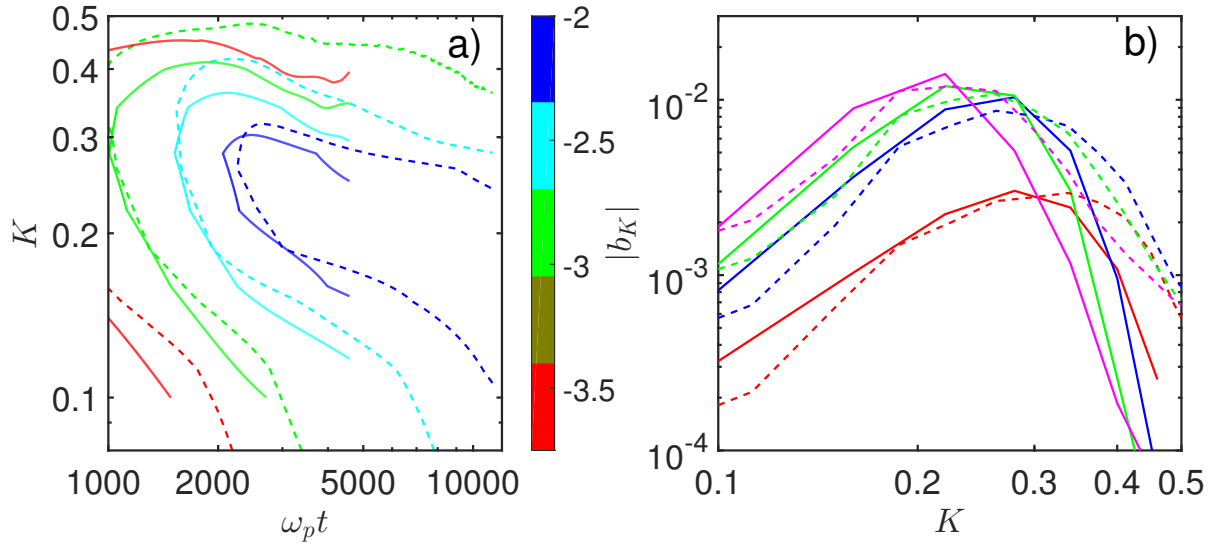


Рисунок 2.1 — Эволюция спектра турбулентности, найденная в аксиально симметричных расчетах методом частиц в ячейках (штрихи) и на основе квазилинейного подхода (сплошная линия), в двойном логарифмическом масштабе: (а) линии уровня логарифма амплитуд мод магнитного поля $|b_K|$; (б) спектр $|b_K|$ магнитного поля в моменты времени $\omega_p t$, равные 1500 (красный цвет), 2400 (синий), 3000 (зеленый) и 4500 (розовый). Начальная анизотропия $A_0 = 0.25$.

до почти $1/2$. При этом в баунс-осцилляциях участвует больше электронов, а функция распределения становится менее анизотропной и по форме ближе к бимаксвелловской, причем величина анизотропии с наступлением нелинейной стадии падает не осциллируя и не на 1-2% (как было показано на рис. ??b), а почти на 20%, продолжая снижаться в дальнейшем. Значительнее уменьшается, не осциллируя, и среднее волновое число $\langle K \rangle$ энергонесущих мод, а насыщающее среднеквадратичное магнитное поле b_{sat} оказывается сильнее приблизительно в 5 раз и тоже не осциллирует, хотя по-прежнему почти не снижается по величине на рассмотренных временах, в несколько раз превышающих время наступления насыщения. Данные результаты квазилинейного подхода согласуются с предшествующими численными исследованиям вейбелевской неустойчивости методом частиц в ячейках, например, [Borodachev2010; Borodachev2016_Radiofiz].

В рассмотренном типичном примере смещение спектра турбулентности в длинноволновую область, как показано на рис. ??, выражено более явно и сопровождается затуханием коротковолновых мод, а не только ростом длинноволновых, что имело место в одномерной задаче (ср. рис. ??, где время наступления насыщения почти вдвое больше, поскольку логарифмический уро-

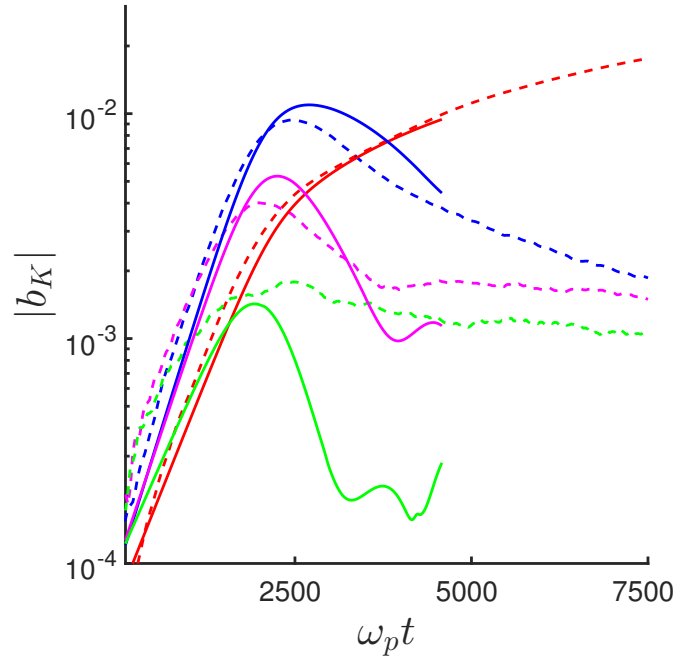


Рисунок 2.2 — Эволюция четырех типичных мод ($K = 0.16$ — красный цвет, $K = 0.28$ — синий, $K = 0.34$ — розовый, $K = 0.4$ — зелёный), взятых из спектра рис. ???. Оптимальное волновое число $K_{\text{opt}} \approx 0.28$.

вень начальных амплитуд мод был задан примерно вдвое ниже, чем на рис. ???). Такое поведение спектра обусловлено более эффективным квазилинейным, но не четырехволновым взаимодействием мод, что подтверждает аналогичный расчет методом частиц в ячейках, который учитывает оба механизма взаимодействия мод и которому на рисунке отвечают штриховые линии, хорошо совпадающие со сплошными. Благодаря менее анизотропной и более гладкой форме функции распределения, согласованной с двумерной турбулентностью, отдельные моды в ходе ее эволюции остаются по существу апериодическими, т. е. их инкременты (декременты) превышают по величине возможные значения действительных частот. Следовательно, в отличие от одномерной турбулентности, квазипериодические осцилляции амплитуд мод практически отсутствуют и их начальный рост с последующим затуханием определяется изменяющейся величиной инкремента, переходящего после насыщения в декремент; ср. рис. ?? и ??. При этом из-за изменения во времени инкремента (декремента) мод оказывается возможным не строго экспоненциальный, а скорее близкий к степенному как рост их амплитуд на промежуточном этапе эволюции до достижения максимальной величины (который начинается после насыщения наиболее быстро растущей моды с оптимальным волновым числом $K_{\text{opt}} \approx 0.28$), так и дальнейшее затухание. Со временем совместная динамика мод отра-

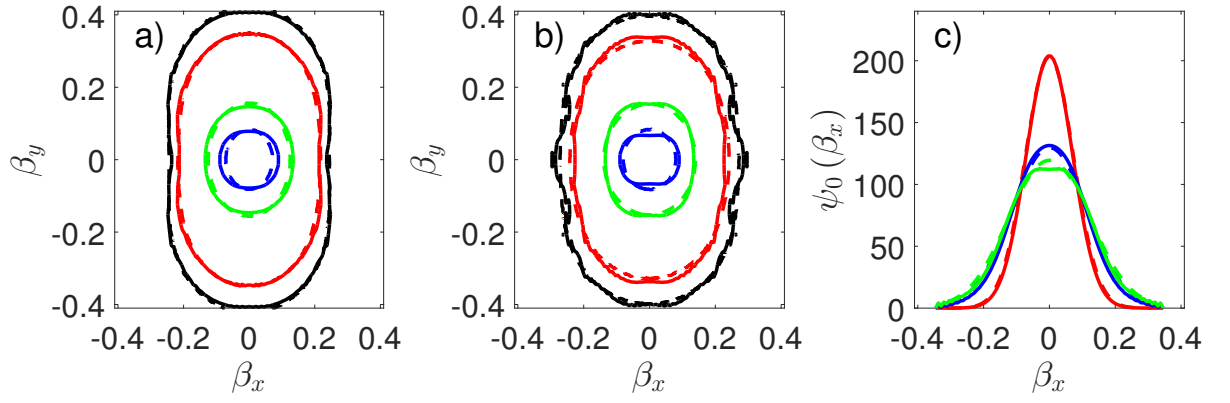


Рисунок 2.3 — (а) Линии уровня 0.05 (черный цвет), 0.1 (красный), 0.5 (зелёный) и 0.8 (синий), отсчитанные от максимального значения функции распределения в момент времени $\omega_p t = 83$; (б) то же в момент времени $\omega_p t = 170$; (с) распределение частиц по величине нормированной компоненты скорости β_x , ортогональной оси анизотропии, в моменты времени $\omega_p t$, равные 0 (красный цвет), 83 (синий) и 170 (зеленый). Приведены данные аксиально симметричных расчетов методом частиц в ячейках (штрихи) и в рамках квазилинейного подхода (сплошная) при $A_0 = 10$.

жаются в автомоделных чертах спектра турбулентности $|b_K|$, у которого в представленном примере длинноволновое и коротковолновое крылья неплохо аппроксимируются степенными зависимостями с показателями около 2 и -10 соответственно.

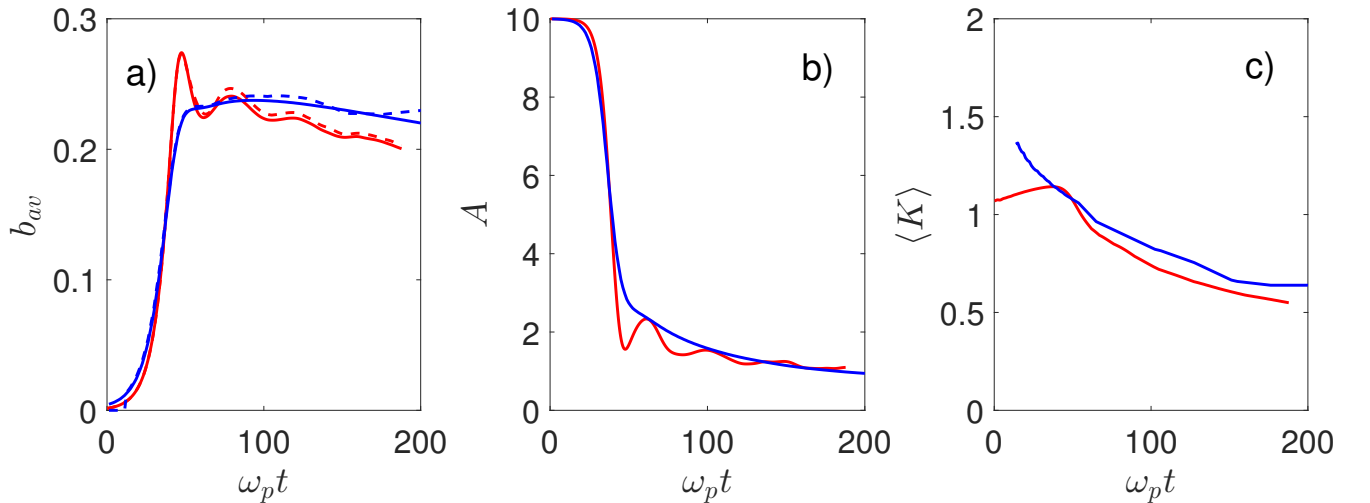


Рисунок 2.4 — Эволюция (а) среднеквадратичного магнитного поля b_{av} (сплошная линия) и оценки этой величины (??) (штрихи), а также (б) параметра анизотропии A и (с) характерного волнового числа $\langle K \rangle$ согласно численному квазилинейному моделированию (красный цвет) и расчетам методом частиц в ячейках (синий цвет) в аксиально симметричной задаче при $A_0 = 10$.

Остановимся теперь на ситуации с высокой начальной анизотропией, $A_0 = 10$, опять опираясь на во многом идентичные результаты расчетов с использованием квазилинейного подхода и метода частиц в ячейках. Как показывает сравнение рис. ?? и ??, не только качественное, но и количественное отличие деформаций функции распределения электронов по скоростям в одномерной и двумерной задачах не очень велико. Впрочем, в последней линии уровня этой функции являются более овальными, менее прямоугольными, что соответствует более сглаженной, менее анизотропной форме, хотя все равно значительно отличной от бимаксвелловской во всей области скоростей порядка тепловых. При этом падение параметра анизотропии A в процессе насыщения неустойчивости происходит немного плавнее, но и немного глубже, так что насыщающее магнитное поле b_{av} тоже оказывается немного выше и после резкого нарастания очень медленно затухает, слегка осциллируя в противофазе с анизотропией на величину порядка нескольких процентов; ср. рис. ?? и ??.

Согласно рис. ?? и ??, эволюция одномерного и двумерного спектра вейбелевской турбулентности в целом однотипна, а волновое число, отвечающее его максимуму (и почти совпадающее со средним значением $\langle K \rangle$), смещается в длинноволновую сторону примерно по одному и тому же степенному закону $t^{-1/2}$ (см. также рис. ??с; этот закон отмечался нами ранее [**Borodachev2016_Radiofiz**; **Nechaev2019_Radiophys**]). Важным, однако, представляется выявление следующих отличий в спектре двумерной турбулентности, вычисленном в квазилинейном подходе и с помощью кода ЕРОСН при высокой начальной анизотропии $A_0 = 10$. Именно, с началом стадии насыщения, $\omega_p t > 60$, в коротковолновой части спектра, $K > K_{opt}$, квазилинейный расчет демонстрирует осцилляторное поведение мод, тогда как оно отсутствует в аналогичном расчете методом частиц в ячейках, демонстрирующем резкое и существенное, по меньшей мере двукратное, расширение спектра в коротковолновую сторону. Этих отличий не было при низкой начальной анизотропии $A_0 = 0.25$, а также в одномерной турбулентности ни при какой начальной анизотропии. Указанное расширение спектра особенно наглядно видно на рис. ??b на больших временах $\omega_p t = 160$ и 280 , когда квазилинейный расчет (сплошные кривые) показывает сильное смещение крутого правого крыла спектра в длинноволновую сторону, а более точный расчет кодом ЕРОСН (штрихи) сохраняет правое крыло гораздо более коротковолновым и пологим. Отметим, кстати, что соответствующие степенные показатели -3.5 и 3 правого

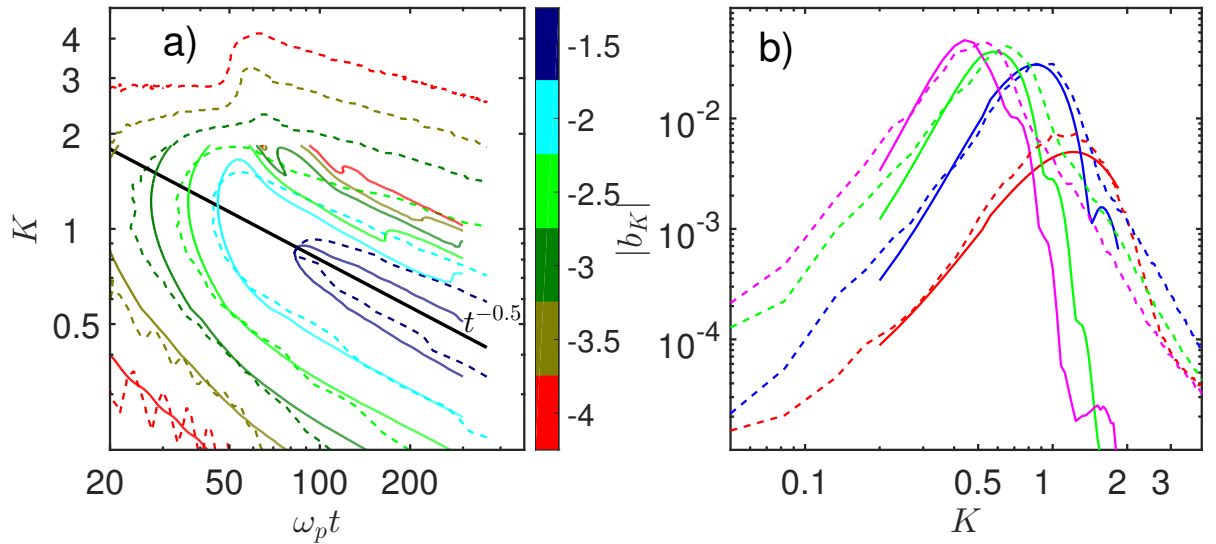


Рисунок 2.5 — Эволюция спектра турбулентности, найденная в аксиально симметричных расчетах методом частиц в ячейках (штрихи) и в рамках квазилинейного подхода (сплошная линия), в двойном логарифмическом масштабе: (а) линии уровня логарифма амплитуд мод магнитного поля $|b_K|$; (б) спектр $|b_K|$ магнитного поля в моменты времени $\omega_p t$, равные 40 (красный цвет), 80 (синий), 160 (зеленый) и 280 (розовый). Начальная анизотропия $A_0 = 10$.

и левого крыльев спектра двумерной турбулентности сильно отличаются от аналогичных показателей -10 и 2 спектра одномерной турбулентности при той же величине $A_0 = 10$, что отчасти связано с разным уровнем заданных начальных амплитуд мод.

Причина установленных отличий, скорее всего, заключается в четырехволновом взаимодействии мод, не учитываемым в квазилинейной системе уравнений (??)-(??). Последняя благодаря этому обстоятельству позволяет выявить в моделировании методом частиц в ячейках нелинейные эффекты, отличные от квазилинейных. Сравнение расчетов одной и той же задачи в рамках этих двух подходов полезно провести путем анализа динамики отдельных мод двумерной вейбелевской турбулентности с использованием рис. ???. Расчет кодом ЕРОСН (штрихи) показывает, что с наступлением насыщения турбулентности достаточно коротковолновые моды, вопреки квазилинейному приближению (сплошные линии), не следуют осцилляторной динамике и экспоненциальному затуханию с легко вычисляемыми показателями порядка 0.01 - 0.1 (что примерно вдвое больше, чем для аналогичной одномерной турбулентности; ср. рис. ??). Напротив, эти моды лишь частично, в небольшой мере отслеживают первую «квазилинейную» осцилляцию и довольно быст-

ро переходят к медленному примерно степенному затуханию с показателями в небольшом интервале значений от -1 до -1.3, по-видимому, испытывая эффективную подкачку за счет четырехволнового взаимодействия немного более длинноволновых мод, имеющих достаточно большие амплитуды и расположенных в центральной части текущего спектра.

Вместе с тем, значительно более длинноволновые моды находятся, вплоть до своего насыщения, на промежуточной стадии приблизительно степенного роста с показателями порядка 1 - 2 (что в два-три раза меньше, чем для аналогичной одномерной турбулентности). Подобная динамика этих мод может объясняться квазилинейным образом при надлежащей зависимости от времени их инкрементов, но может быть обусловлена, хотя бы частично, все той же нелинейной подкачкой при четырехволновом взаимодействии более мощных мод из центральной части спектра турбулентности. Не исключено также, что еще более длинноволновые моды, которые только выходят или не далеко отошли от уровня шумов на стадии насыщения турбулентности, могут быть сильно, даже сверхэкспоненциально, возбуждены нелинейным образом посредством четырехволнового взаимодействия с какими-либо более мощными модами, что в

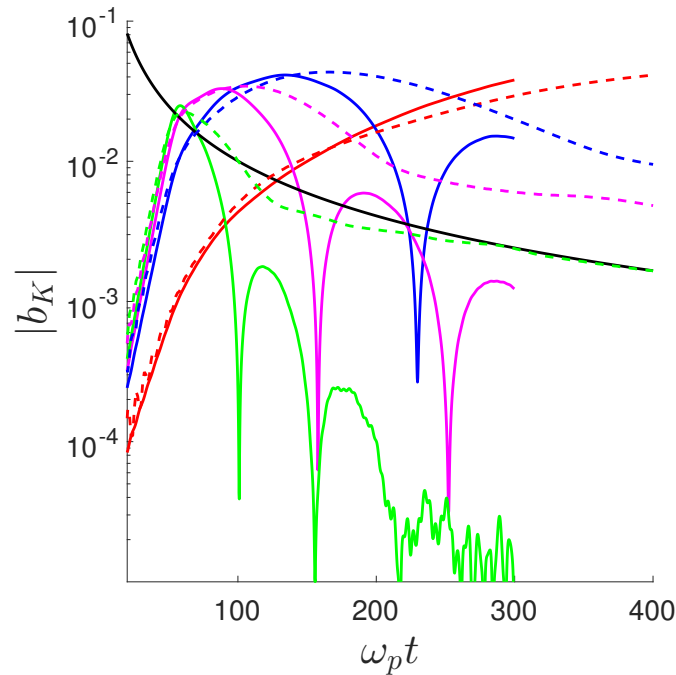


Рисунок 2.6 — Эволюция четырех типичных мод ($K = 0.36$ — красный цвет, $K = 0.68$ — синий, $K = 0.88$ — розовый, $K = 1.2$ — зелёный), взятых из спектра рис. ???. Оптимальное волновое число $K_{\text{opt}} \approx 1.2$. Черная линия соответствует степенной зависимости $t^{-4/3}$.

результате может влиять на форму длинноволнового крыла спектра турбулентности. Данный круг вопросов требует дальнейшего детального исследования.

Во избежание недоразумений следует отметить, что вплоть до насыщения роста среднеквадратичного магнитного поля отличия квазилинейных расчетов от расчетов методом частиц в ячейках являются весьма незначительными, даже в одномерной задаче. В итоге, квазилинейный подход позволяет корректно вычислять величину насыщающего магнитного поля вейбелевской турбулентности, что уже было продемонстрировано в конце подраздела 3.1 на рис. ???. Согласно ему, средний квадрат насыщающего поля двумерной турбулентности отличается от его значения для одномерной на десятки процентов при большом начальном параметре анизотропии, $A_0 \gtrsim 1$, и многократно при низком параметре, $A_0 \lesssim 1$, поскольку тогда численно найденный показатель его степенной зависимости от этого параметра оказывается близким к 2 вместо аналитически найденного показателя 5 для одномерной турбулентности (см. формулу (??)).

Таким образом, проведенные расчеты, в том числе и для других параметров анизотропии A_0 , показывают следующие существенные различия эволюции спектра вейбелевской турбулентности в одномерной и аксиально симметричной двумерной задачах при одинаковых начальных условиях.

Во-первых, более богатый двумерный спектр развитых мод обеспечивает более гладкую и сильную модификацию исходной функции распределения электронов по скоростям, а следовательно, более значительное уменьшение параметра анизотропии и увеличение магнитной энергии турбулентности. При этом последующий распад образовавшихся случайных самосогласованных токовых филаментов идет эффективнее, чем для турбулентности с одномерным спектром, где квазилинейные эффекты и четырехволновое взаимодействие мод искусственно ограничены, как и свободный разлет электронов из токовых слоев.

Во-вторых, в двумерном случае автомодельный характер эволюции спектра выражен более явно, а формирование его степенных крыльев и смещение его максимума в длинноволновую сторону происходят быстрее, возможно, благодаря не только квазилинейному, но и четырехволновому взаимодействию мод. При этом зависимость соответствующих параметров спектра от начальной анизотропии плазмы выражена слабее, чем в одномерном случае, где перестройка спектра заторможена.

В-третьих, динамика отдельных мод в двумерной задаче, естественно, оказывается более сложной и многообразной, хотя в общем случае и включает в

себя те же три основные стадии, что и в одномерной задаче: сначала экспоненциальное и потом примерно степенное нарастание, а после достижения максимума - тоже спадание степенного типа. При этом в одномерной турбулентности для многих мод не все эти стадии четко выражены, но значительно заметнее квазипериодические осцилляции амплитуд мод и даже ее интегральных характеристик, вызванные, как и в двумерной турбулентности, квазилинейной модификацией анизотропии функции распределения электронов и соответствующим изменением действительных частот и инкрементов (декрементов) мод.

Глава 3. Квазилинейное взаимодействие ленгмюровской и вейбелевской турбулентности в системе плазма-пучок

3.1 Введение

Для различных задач физики лабораторной и космической бесстолкновительной плазмы, включая солнечный ветер и магнитосферы звезд и планет, характерно наличие пучка энергичных заряженных частиц (электронов и/или ионов) в теплой плазме [**Gary1993; Treumann1997; Marsch2006**]. Даже если распределение частиц по скоростям в плазме и в пучке является изотропным максвелловским (в соответствующей системе отсчета), для совместной системы "плазма+пучок" распределение будет анизотропным. В результате, согласно дисперсионному анализу [**Mikhailovsky1971; Fried1959; Krall1973; Tzoufras2006; Bret2010**], могут одновременно развиваться различные кинетические неустойчивости, прежде всего резонансная квазиэлектростатическая двухпотоковая неустойчивость и апериодическая квазимагнитостатическая неустойчивость вейбелевского типа, известные также как пучковая и филаментационная соответственно.

Двухпотоковой неустойчивости подвержены продольные ленгмюровские (плазменные) волны, так что её развитие приводит к формированию коротковолновой ленгмюровской турбулентности электрического поля и плотности плазмы [**Vedenov1963; Zakharov1972; VedenovRyutov1975; Krall1973; Appert1976; Yi2010; Bakunin2017; Sun2022**]; при этом в общем распределении частиц образуется плато в области скоростей между теплой плазмой и пучком. Вследствие филаментационной неустойчивости возникает вейбелевская (магнитная) турбулентность, а именно, формируются более длинноволновые поперечные квазимагнитостатические поля и согласованные с ними токовые филаменты или слои [**Weibel1959; Zhou2022; Fried1959; Kalman1968; Morse1971; Kocharovsky2016; Lazar2006; Stockem2009; SchaeferRolffs2006**]; при этом уменьшается анизотропия общего распределения частиц по скоростям и его пучковая часть сглаживается.

Нас будет интересовать незамагниченная плазма, для которой двухпотоковая (пучкового типа) и филаментационная (вейбелевского типа)

неустойчивости по отдельности изучены достаточно подробно, особенно в линейном приближении; см., например, [Mikhailovsky1971; Fried1959; Tzoufras2006; Hao2008; Bret2010; Moya2022]. При этом для исследования долговременной нелинейной динамики турбулентности, возникающей в результате развития изолированных двухпоточковой или филаментационной неустойчивостей, применялись как полноценные расчеты методом частиц в ячейках [Kasaba2001; Dum1994; Yi2010; Ruyer2015; Dieckmann2009; Bret2010; Lazar2023; Nechaev2023; Kocharovsky2024; Garasev2022; Kuznetsov2025a], так и различные приближенные подходы, прежде всего квазилинейные [Vedenov1963; VedenovRyutov1975; Appert1976; Bakunin2017; Ziebell2008; Lemons1979; Davidson1972; Ruyer2015; Kuznetsov2022; Kuznetsov2023].

Однако до сих пор слабо освещена проблема нелинейного взаимодействия ленгмюровской и вейбелевской турбулентности, важная для анализа таких явлений, как формирование бесстолкновительных ударных волн и структур в аккреционных дисках и колонках, взаимопроникновения соседних облаков и потоков частиц звёздного ветра, развитие корональных выбросов массы и солнечных вспышек, нагрев плазмы и изменение её кинетических свойств при инжекции пучков высокоэнергичных частиц и др. [Marcowith2016; Treumann2015; Aschwanden2005; Medvedev2006; Nishikawa2009; Kato2007; Kuznetsov2025b]. Имеющиеся выборочные работы в этом направлении исследований основаны преимущественно на расчетах методом частиц в ячейках, зачастую ограничиваются гидродинамическим режимом той или иной неустойчивости и по существу не касаются, а тем более не детализируют взаимное влияние ленгмюровской и вейбелевской турбулентности; ср., например, [Kong2009; Ruyer2015; Bret2010; Lazar2023] (при наличии внешнего магнитного поля см. также работы [Lazar2023; Lopez2020]). Так, в обзоре [Bret2010], являющемся, по-видимому, наиболее полным для интересующей нас задачи в отсутствие внешнего магнитного поля, обсуждаются условия насыщения и возможные нелинейные локализованные структуры в турбулентности каждого типа, но не изучается влияние изменения функции распределения частиц под действием турбулентности одного типа на развитие другой, хотя и упоминается возможность их последовательного развития.

В настоящей работе предпринято детальное изучение одного из механизмов взаимного влияния указанных неустойчивостей для кинетического режима их нарастания, насыщения и последующей релаксации сформировавшейся слабой турбулентности. А именно, проанализировано, как каждое из турбулентных полей - в основном электрическое или магнитное для двухпотоковой или филаментационной неустойчивостей соответственно - изменяет общую среднюю по пространству функцию распределения частиц по скоростям и тем самым модифицирует ход сопутствующей неустойчивости. В подобном квазилинейном подходе [VedenovRyutov1975; Appert1976; Kuznetsov2022; Kuznetsov2023] каждая мода турбулентности эволюционирует локально во времени согласно её инкременту (декременту), вычисляемому в линейном приближении с использованием указанной мгновенной функции распределения частиц. При этом рассматриваются условия, в которых, как подтверждают тестовые расчеты методом частиц в ячейках, исключена определяющая роль других возможных механизмов нелинейного изменения спектра обеих типов турбулентности, например, появление множественных ленгмюровских солитонов с нескомпенсированным зарядом или z-пинчей тока и систематическое трех- или четырехволновое взаимодействие отдельных мод (пространственных гармоник).

С этой целью построена замкнутая квазилинейная система уравнений, разработан оригинальный численный код её решения и с его помощью рассчитана одновременная нелинейная динамика большого числа (многих тысяч) ленгмюровских и вейбелевских мод турбулентной плазмы в кинетическом приближении, когда допустимые инкременты γ и соответствующие волновые числа k всех мод удовлетворяют неравенству $\gamma \ll kv_T$, где v_T — тепловая скорость. В результате установлена роль квазилинейного взаимодействия мод в эволюции спектров ленгмюровской и вейбелевской турбулентности, а также найдена динамика среднеквадратичных электрического и магнитного полей в ней и указан неравномерный характер уменьшения анизотропии распределения частиц по скоростям и увеличения тепловой энергии плазмы (нагрев) в поперечном к пучку направлении.

Такой подход соответствует классическому квазилинейному описанию ленгмюровской турбулентности [VedenovRyutov1975; Appert1976] и развитию в работах [Kuznetsov2022; Kuznetsov2023] описанию турбулентности вейбелевского типа. Преимуществами подобного подхода перед моделированием

методом частиц в ячейках являются возможность свободно выбирать диапазон представляющих интерес волновых векторов мод и регулировать начальный уровень их амплитуд. Это позволяет не только по отдельности верифицировать квазилинейное описание филаментационных и двухпотоковых мод путем сравнения получающихся частных результатов с найденными ранее результатами расчетов методом частиц в ячейках, но и сравнить независимую динамику спектра тех и других мод с их совместной динамикой. Немаловажной является и меньшая требовательность квазилинейных расчетов к вычислительным ресурсам, загруженность которых в расчетах методом частиц в ячейках оказывается многократно выше, в частности, из-за необходимости использования большого числа частиц для корректного описания резонансных эффектов кинетической двухпотоковой неустойчивости [Lotov2015].

Для простоты представленные результаты ограничены решением начальной двумерной задачи для однородной незамагниченной нерелятивистской системы "плазма+пучок в которой фоновая плазма и пучок включают холодные ионы и имеют одинаковую тепловую скорость v_T (и температуру T) электронов, а направленная вдоль оси y скорость пучка v_s не сильно превышает тепловую скорость. В рассматриваемых условиях эффекты появления локализованного пространственного заряда и z-пинчевания токов плазмы отсутствуют [Tzoufras2006; Hao2008; Kocharovsky2024; Garasev2022]. Исследуется квазилинейная эволюция спектра двухпотоковых (ленгмюровских) мод, т.е. фактически электростатических возмущений с волновыми векторами, в основном сонаправленными с пучком, и спектра филаментационных (вейбелевских) мод, т.е. поперечных электромагнитных возмущений с почти ортогональными пучку волновыми векторами [Bret2004; Bret2010]. Эти два спектра мод хорошо разделены по направлению и величинам волновых векторов и для их описания используются две прямоугольные сетки волновых векторов, плотно покрывающие область неустойчивости (рис. ??).

Квазилинейная система уравнений, используемая для моделирования, представлена в разделе 2. В разделах 3 и 4 обсуждаются результаты численных расчетов для двух характерных наборов параметров плазмы и пучка, отвечающих качественно различной динамике спектров мод. В заключении подводятся итоги и обсуждаются возможные направления дальнейших исследований.

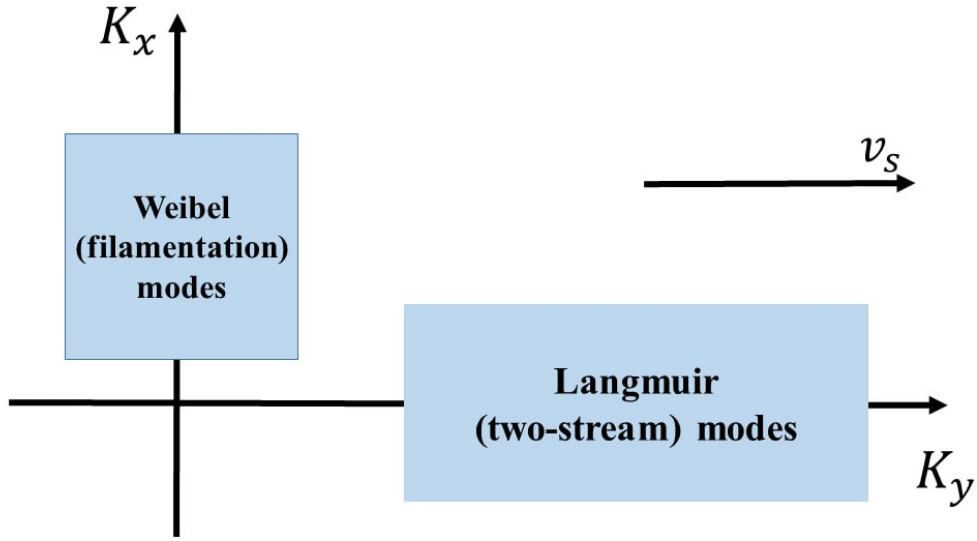


Рисунок 3.1 — Схема расчетной плоскости, включающая две прямоугольные сетки волновых векторов для генерируемых спектров филаментационных и двухпотоковых мод.

3.2 Квазилинейная система уравнений для совместной эволюции вейбелевской и ленгмюровской турбулентностей

Квазилинейный подход к описанию взаимного влияния ленгмюровской и вейбелевской турбулентностей основан на разложении по пространственным модам решения уравнений Максвелла – Власова [Baumjohann2012] с шумоподобным примерно равномерным по спектру начальным возмущением электромагнитного поля для мод филаментационной и двухпотоковой неустойчивостей. Такое разложение особенно эффективно тогда, когда ключевую роль играет интегральное нелинейное взаимодействие мод посредством их совместного изменения средней по пространству функции распределения частиц по скоростям. Последняя определяет текущие значения инкрементов (декрементов) и действительных частот всех рассматриваемых мод, в остальном эволюционирующих независимо. Подобное квазилинейное описание турбулентности оправдано в условиях случайности фаз мод и отсутствия захвата частиц электрическими или магнитными полями отдельных гармоник либо локали-

зованных в пространстве структур, что обычно справедливо в кинетическом режиме развития неустойчивости и дальнейшей нелинейной динамики слабой турбулентности [GaleevSagdeev1969; Bakunin2017; Kuznetsov2023]. Наличие большого числа однотипных не сфазированных мод, достаточно плотно заполняющих значимую область волновых векторов, гарантирует гладкость формы и плавность изменения функции распределения частиц по скоростям, исключая артефакты когерентной интерференции и отрицательные значения этой функции всюду, кроме, возможно, несущественной, содержащей крайне мало частиц, области их скоростей, очень больших по сравнению с тепловыми скоростями. При этом по существу реализуется адиабатическая динамика каждой моды, непрерывно подстраивающейся к изменяющейся функции распределения электронов.

В рассматриваемом двумерно-неоднородном случае для описания вейбелевской турбулентности используется сетка из часто расположенных и перекрывающих всю турбулентную область волновых векторов $m_W \cdot s_W$ неколлинеарных мод с хаотическими фазами и примерно одинаковыми исходными амплитудами при $t = 0$. Аналогичная сетка $m_L \cdot s_L$ неколлинеарных мод выбрана и для описания ленгмюровской турбулентности (рис. ??), где m_i и s_i — количество заданных дискретных значений соответствующих ортогональных проекций $\vec{K}\vec{x}_0$ и $\vec{K}\vec{y}_0$ волновых векторов. В этом представлении магнитное поле имеет вид суммы по целочисленному векторному индексу $\vec{n} = (n_x, n_y)$:

$$B_z(t, x, y) = \sum_{\vec{n} \in W} \text{Re}[B_{k_{\vec{n}}}(t) e^{-i\vec{k}_{\vec{n}} \cdot \vec{r}}] + \sum_{\vec{n} \in L} \text{Re}[B_{k_{\vec{n}}}(t) e^{-i\vec{k}_{\vec{n}} \cdot \vec{r}}], \quad (3.1)$$

Аналогичный вид имеют обе компоненты электрического поля E_x и E_y , а также возмущение функции распределения $\delta f(t, x, y)$. Получаемая из уравнений Власова-Максвелла квазилинейная система $4(m_W \cdot s_W + m_L \cdot s_L) + 1$ уравнений для усредненной в пространстве компоненты функции распределения электронов по скоростям ψ_0 , а также безразмерных комплексных амплитуд её возмущений $\psi_{K_{\vec{n}}}$ и возмущений магнитного $b_{K_{\vec{n}}}$ и двух компонент электрического $e_{xK_{\vec{n}}}$ и $e_{yK_{\vec{n}}}$ полей имеет следующий вид: ??

$$\frac{\partial \psi_0}{\partial \tau} + \text{Re} \left[\sum_{n_x, n_y=1}^{m_W, s_W} \hat{\Phi}(b_{K_{\vec{n}}}, \vec{e}_{K_{\vec{n}}}, \psi_{K_{\vec{n}}}^*) \right] + \text{Re} \left[\sum_{n_x, n_y=1}^{m_L, s_L} \hat{\Phi}(b_{K_{\vec{n}}}, \vec{e}_{K_{\vec{n}}}, \psi_{K_{\vec{n}}}^*) \right] = 0, \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial \psi_{K_{\vec{n}}}}{\partial \tau} + iK_{n_x} \beta_x \psi_{K_{\vec{n}}} + iK_{n_y} \beta_y \psi_{K_{\vec{n}}} + 2\hat{\Phi}(b_{K_{\vec{n}}}, \psi_0) = 0, \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial b_{K_{\vec{n}}}}{\partial \tau} = -ie_{yK_{\vec{n}}}K_{n_x} + ie_{xK_{\vec{n}}}K_{n_y}, \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial e_{xK_{\vec{n}}}}{\partial \tau} = ib_{K_{\vec{n}}}K_{n_y} - \beta_{\parallel}^{-1} \iint_{-\infty}^{+\infty} \beta_x \psi_{K_{\vec{n}}}(\tau, \beta_x, \beta_y) d\beta_x d\beta_y, \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial e_{yK_{\vec{n}}}}{\partial \tau} = -ib_{K_{\vec{n}}}K_{n_x} + \beta_{\parallel}^{-1} \iint_{-\infty}^{+\infty} \beta_y \psi_{K_{\vec{n}}}(\tau, \beta_x, \beta_y) d\beta_x d\beta_y. \quad (3.6)$$

Здесь использованы безразмерные время, волновое число, а также нормированные (комплексные) гармоники магнитного поля и функции распределения электронов по скоростям:

$$\tau = \omega_p t, \quad K = \frac{kc}{\omega_p}; \quad \omega_p^2 = \frac{4\pi N e^2}{m_e}, \quad b_{K_{\vec{n}}} = \frac{B_{K_{\vec{n}}}}{\sqrt{8\pi N T}}, \quad T = \frac{m_e c^2 \beta_T^2}{2}; \quad \psi_{K_{\vec{n}}} = \frac{c^2 f_{K_{\vec{n}}}}{N}. \quad (3.7)$$

Комплексные компоненты электрического поля $e_{xK_{\vec{n}}}$ и $e_{yK_{\vec{n}}}$ нормированы так же, как магнитное поле $b_{K_{\vec{n}}}$. В уравнениях (??)-(??) для сокращения записи введен оператор

$$\hat{\Phi}(b_{K_n}, e_{xK_{\vec{n}}}, e_{yK_{\vec{n}}}, \psi(\vec{\beta})) = \frac{e_{yK_{\vec{n}}}}{2} \frac{\partial \psi(\vec{\beta})}{\partial \beta_y} + \frac{e_{xK_{\vec{n}}}}{2} \frac{\partial \psi(\vec{\beta})}{\partial \beta_x} - \frac{b_{K_n}}{2} \left(\beta_x \frac{\partial \psi(\vec{\beta})}{\partial \beta_y} - \beta_y \frac{\partial \psi(\vec{\beta})}{\partial \beta_x} \right). \quad (3.8)$$

Представленная система интегро-дифференциальных уравнений (??)-(??) с оператором (??) решалась численно стандартным методом Стёрмера – Верле (Leapfrog) [Birdsall2018]. Параметр анизотропии A , равный отличию от единицы отношения полной энергии электронов в продольном W_{\parallel} и поперечном W_{\perp} к скорости пучка направлении, является ключевым для квазилинейного описания вейбелевской турбулентности [Weibel1959; Davidson1972; Lemons1979; Tzoufras2006; Kuznetsov2023]. Начальное значение параметра анизотропии A_0 для распределения электронов вида (??), определяется исходным отношением энергий их направленного и теплового движений:

$$A = \frac{W_{\parallel}}{W_{\perp}} - 1; \quad A(\tau = 0) = A_0 = \frac{n_s \beta_s^2 + n_b \beta_b^2}{(n_s + n_b) \beta_T^2 / 2}. \quad (3.9)$$

Шаг по времени $d\tau$ и шаг сетки, аппроксимирующей распределение электронов в пространстве скоростей, $d\beta$, выбирались хотя бы на порядок уступающими минимальному масштабу по времени и по скорости соответственно.

Количество как филаментационных, так и ленгмюровских пространственных мод $m_W \cdot s_W + m_L \cdot s_L$ в типичных расчетах составляло несколько тысяч и выбиралось из условия как независимости (с точностью до нескольких процентов) вычисляемых среднеквадратичного магнитного и электрического поля от дальнейшего увеличения числа мод, так и условия перекрытия резонансов [GaleevSagdeev1969; Bakunin2017] для энергонесущих ленгмюровских мод на протяжении всего изучаемого отрезка нелинейной эволюции. Для всех расчетов проверялась справедливость кинетического приближения, т.е. условие малой величины инкремента $\gamma \ll K\beta_T$, причем для определенности начальная тепловая скорость электронов полагалась равной $\beta_T = 0.1$.

3.3 Квазилинейный механизм подавления ленгмюровской турбулентности филаментационными модами

Несмотря на то что двухпотоковая неустойчивость вызвана относительно небольшим числом резонансных электронов, так как экспоненциальный рост квазиэлектростатических полей обусловлен наличием ограниченного участка немонотонности распределения электронов по скоростям, её инкремент для нерелятивистских пучков с направленной скоростью β_s существенно выше тепловой скорости β_T , как правило, значительно превосходит филаментационный [Bret2010]. Нарастание амплитуды ленгмюровских волн в ходе двухпотоковой неустойчивости происходит до тех пор, пока указанная немонотонность не сгладится и не сформируется так называемое квазилинейное плато. В результате часть энергии направленного движения электронов распределяется между генерируемыми полями и тепловой энергией электронов, так что их распределение в пространстве скоростей частично изотропизуется [GaleevSagdeev1969]. В одномерном приближении на этом квазилинейная динамика ленгмюровской турбулентности фактически останавливается. Однако в рассматриваемом двумерном случае плато продолжает деформироваться за счет затухания Ландау, прежде всего, не коллинеарных с пучком наклонных мод, так что спектр квазиэлектростатической турбулентности постепенно становится всё более коротковолновым, а следы пучка в пространстве скоростей размываются [Appert1976; Yi2010]. Таким образом, без учета магнитной

турбулентности в системе "плазма+пучок" происходит очень медленная, квазилинейная изотропизация распределения частиц и затухание электрического поля.

В отсутствие эффектов пространственного заряда, гарантированном принятым условием одинаковой температуры фона и пучка, филаментационной неустойчивости подвержено любое анизотропное распределение электронов вида (??) [Tzoufras2006]. Поэтому в типичных бесстолкновительных условиях филаментационная неустойчивость системы "плазма+пучок" неизбежна и продолжается даже после насыщения двухпотоковой. Тем не менее, вызванное ленгмюровской турбулентностью уменьшение параметра анизотропии распределения электронов ослабляет инкремент филаментационных мод и снижает уровень насыщения их роста. В свою очередь, развившаяся магнитная турбулентность, порождаемая филаментационными модами, как будет ясно из дальнейшего, может деформировать распределение электронов по скоростям в резонансной с ленгмюровскими волнами области, а следовательно, способна значительно повлиять на затухание Ландау последних.

Для демонстрации сказанного обратимся к результатам квазилинейного расчета эволюции системы с начальными параметрами $n_s = 0.055n_b$ и $\beta_s = 2.5\beta_T$, для которых согласно линейной теории [Mikhailovsky1971; Davidson1972] наибольшим инкрементом $\gamma_L \approx 0.017\omega_p$ обладает ленгмюровская продольная мода с волновым числом $K_y \approx 4.2$, а среди филаментационных наиболее неустойчива поперечная мода с волновым числом $K_x \approx 0.44$ и инкрементом $\gamma_F \approx 9 * 10^{-3}\omega_p$, примерно вдвое меньшим ленгмюровского. Для этих параметров начального распределения частиц сравнение поправок к нему для расчета, учитывающего исключительно двухпотоковые моды, и для расчета, описывающего совместную динамику ленгмюровской и вейбелевской турбулентности, показывает, что влияние филаментационных мод на распределение электронов намного значительнее, чем ленгмюровских, и что деформация распределения под этим влиянием происходит в том числе и в резонансной области для коллинеарных с пучком ленгмюровских мод, являющихся основными энергонесущими модами в данный момент времени (рис.??). Указанные на данном рисунке границы резонансной области $\beta_{y,min} = 1/K_{y,max}$ и $\beta_{y,max} = 1/K_{y,min}$ примерно оценены из условия черенковского резонанса, в котором для простоты частота ленгмюровских волн считается равной плазменной, а поперечная компонента волнового числа полагается равной нулю: $K_x = 0$.

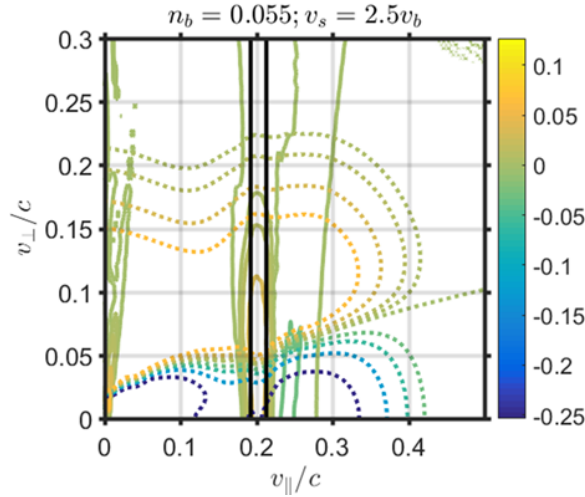


Рисунок 3.2 — Вычисленные для момента времени $\omega_p t = 5000$ линии уровня нормированной на максимум начального распределения поправки к пространственно однородной компоненте функции распределения электронов по скоростям (??), которая в начальный момент времени являлась максвелловской с пучком, в случае учета только двухпоточковых мод (сплошная) и в случае совместной эволюции ленгмюровской и вейбелевской турбулентности (пунктир). Параметры начального распределения (4): $n_s = 0.055n_b$, $\beta_s = 2.5\beta_T$, $\beta_T = 0.1$. Вертикальные черные линии выделяют область скоростей электронов, резонансно взаимодействующих с коллинеарными пучку ленгмюровскими модами, являющимися основными энергонесущими в данный момент времени.

В отсутствие филаментационных мод на интервалах времени, не более чем в 6 раз превышающих время насыщения двухпоточковой неустойчивости, среднеквадратичное электрическое поле ленгмюровских мод находится на примерно постоянном уровне. Включение филаментационных мод приводит к тому, что сразу после окончания экспоненциального роста этих мод с наибольшим инкрементом, означающего начало существенной анизотропной деформации общей функции распределения электронов по скоростям и переход к нелинейной стадии магнитной турбулентности, начинается довольно резкое затухание ленгмюровских волн (рис.??a). Декремент затухания каждой ленгмюровской моды определяется формой распределения электронов по скоростям только в резонансной для этой моды области. Поскольку с течением времени спектр ленгмюровских волн смещается в коротковолновую область (рис.??d), то скорость затухания среднеквадратичного электрического поля ленгмюровских мод зависит от промежутка времени между насыщением роста двухпоточковой и филаментационной неустойчивостей, а значит, от амплитуд начальных возму-

щений электрического и магнитного полей (иллюстрация дана на рис.??a). При этом среднеквадратичное индукционное электрическое поле филаментационных мод мало в сравнении с полем ленгмюровских мод на протяжении всей эволюции. Аналогично, малым является и среднеквадратичное магнитное поле ленгмюровских мод в сравнении с полем филаментационных.

Как уже сказано выше, вследствие квазилинейного взаимодействия между ленгмюровскими волнами характерное продольное волновое число их спектра $\langle K_{\parallel} \rangle$ увеличивается (рис.??d). В приводимом примере это увеличение останавливается на уровне около 20% примерно на временах, на порядок превышающих время насыщения ленгмюровской турбулентности, и почти не зависит от вейбелевской турбулентности. Однако благодаря её влиянию, а именно, квазилинейной деформации области плато в резонансной части пучкового распределения электронов по скоростям, продольная среднеквадратичная ширина ленгмюровского спектра $\langle \Delta K_{\parallel} \rangle$ сужается весьма значительно, примерно в 1.5 раза согласно рис.??с, вследствие появления довольно быстрого затухания наиболее коротковолновой части этого спектра. Поперечная среднеквадратичная ширина ленгмюровского спектра $\langle \Delta K_{\perp} \rangle$ меняется слабо, в пределах нескольких процентов.

Динамика вейбелевской турбулентности, реализующейся на значительно более длинноволновых гармониках, определяется нерезонансным взаимодействием "волна-частица-[GaleevSagdeev1969; Kuznetsov2023] и слабо чувствительна к форме распределения электронов по скоростям в области резонанса с ленгмюровскими волнами. Ключевым для квазилинейного описания этой турбулентности является интегральный параметр анизотропии A , равный отношению от единицы отношения полной энергии электронов в продольном W_{\parallel} и поперечном W_{\perp} к скорости пучка направлении (??). По мере развития турбулентности распределение электронов изотропизуется, что отражается в монотонном снижении параметра анизотропии (рис.??b).

В рассматриваемом случае ленгмюровская турбулентность оказывается несущественной для роста флуктуаций магнитного поля и снижение параметра анизотропии диктуется исключительно вейбелевской турбулентностью. На этапе её насыщения это снижение происходит весьма быстро и достигает примерно 30% от исходной величины $A_0 = 0.687$. В дальнейшем параметр анизотропии уменьшается значительно медленнее, а спектр вейбелевской турбулентности квазиавтоматически смещается в длинноволновую область. При

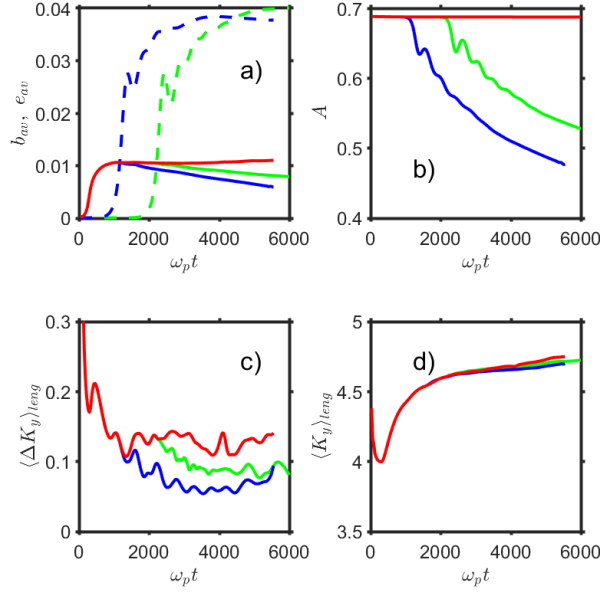


Рисунок 3.3 — Динамика (а) среднеквадратичного магнитного поля b_{av} филаментационных мод (штрихи) и электрического поля e_{av} двухпотоковых мод (сплошная), (б) параметра анизотропии A , (с) среднеквадратичной ширины спектра ленгмюровских волн вдоль направления пучка $\langle \Delta K_y \rangle$ и (д) их среднеквадратичного продольного волнового числа $\langle K_{\parallel} \rangle$ в случае эволюции исключительно двухпотоковых мод (красный цвет) и в случае совместной эволюции двухпотоковых мод и филаментационных мод при уровнях начальных амплитуд последних, отличающихся в 10^4 раз (синий и зеленый цвета). Параметры начального распределения (??): $n_s = 0.055n_b$, $\beta_s = 2.5\beta_T$, $\beta_T = 0.1$.

этом среднеквадратичное магнитное поле b_{av} непосредственно после окончания экспоненциального роста демонстрирует квазистепенной рост на небольшой промежуточной стадии, достигает максимума и далее испытывает медленное квазилинейное затухание (рис.??а) [Kuznetsov2023]. В течение всего этого времени магнитная энергия на порядок и более превышает энергию квазиэлектростатического поля.

Такое поведение спектра полностью соответствует полученным ранее результатам квазилинейного подхода к эволюции бимаксвелловского распределения электронов в пределе низкой начальной анизотропии, когда среднее волновое число спектра $\langle K \rangle$ уменьшается примерно по степенному закону [Kuznetsov2023; Borodachev2016_Radiofiz]. Подобная картина наблюдалась во всех проведенных квазилинейных расчетах для системы "плазма+пучок" с небольшим начальным параметром анизотропии ($A_0 \lesssim 1$) и

высоким уровнем достигаемой магнитной турбулентности по сравнению с ленгмюровской.

Тем не менее, характеризуя нагрев плазмы, который в данной задаче можно связать с ростом поперечной тепловой энергии электронов W_{\perp} , следует отметить, что он является неравномерным и происходит в три этапа: 1) диссипация квазиэлектростатических полей посредством затухания Ландау в промежутке времени между достижением насыщения ленгмюровской турбулентности и началом насыщения вейбелевской, 2) преимущественная диссипация квазимагнитостатических полей, особенно эффективная в ходе их насыщения, когда амплитуды мод велики и быстро изменяются, создавая наибольшие индукционные электрические поля, 3) более медленная диссипация обоих типов квазистатических полей на временах, значительно превышающих время насыщения магнитной турбулентности. Последний этап на рис.?? не показан, а первый этап выражен слабо из-за низкого уровня развившейся ленгмюровской турбулентности. Указанные этапы нагрева имеют место и в ситуации, представленной в следующем разделе, причем там уровень ленгмюровской турбулентности выше и поэтому на первом этапе нагрев значительнее.

3.4 Ослабление развития магнитной турбулентности ленгмюровскими модами

При меньших, чем в предыдущем разделе, значениях скорости пучка инкремент двухпоточковых мод ослабляется и они могут развиваться одновременно с филаментационными модами. Однако тогда последние по-прежнему значительно превышают по амплитуде и подавляют первые, тем более не чувствуя наличие очень слабой ленгмюровской турбулентности. Поэтому обратимся к анализу случая большего, чем в предыдущем разделе, значения скорости пучка, когда достижимы условия, в которых влияние ленгмюровской турбулентности на филаментационные моды существенно, а вклад той и другой турбулентности в изотропизацию распределения электронов по скоростям, т.е. в уменьшение параметра A , оказывается сопоставим.

Именно, примем для пучка примерно вдвое большую направленную скорость и на порядок меньшую концентрацию частиц $n_s = 0.005n_b$, $\beta_s = 4\beta_T$,

сохраняя небольшую начальную анизотропию $A_0 = 0.16$ и не слишком большой инкремент двухпоточковых мод, примерно лишь на порядок превосходящий инкремент филаментационных. Согласно (рис. ??), как и в предыдущем случае, двухпоточковая неустойчивость раньше достигает насыщения, так как инкремент наиболее неустойчивой моды с продольным волновым числом $K_y \approx 3.2$ суть $\gamma_L \approx 0.027\omega_p$, в то время как наиболее неустойчивая поперечная филаментационная мода с волновым числом $K_x \approx 0.226$ имеет инкремент $\gamma_W \approx 1.27 * 10^{-3}\omega_p$. В результате формирующаяся ленгмюровская турбулентность деформируют распределение электронов по скоростям в области между фоновой плазмой и пучком (рис. ??), так что квазилинейные инкременты филаментационных мод заметно понижаются, а уровень насыщения среднеквадратичного магнитного поля вейбелевской турбулентности уменьшается примерно вдвое (рис. ??а). Вместе с тем такие спектральные характеристики как среднее волновое число $\langle K \rangle$ и поперечная $\langle \Delta K_x \rangle$ и продольная $\langle \Delta K_y \rangle$ ширина вейбелевского спектра почти не подвержены влиянию ленгмюровской турбулентности и отличаются не более чем на 1-2% в расчетах с добавлением двухпоточковых мод и без них.

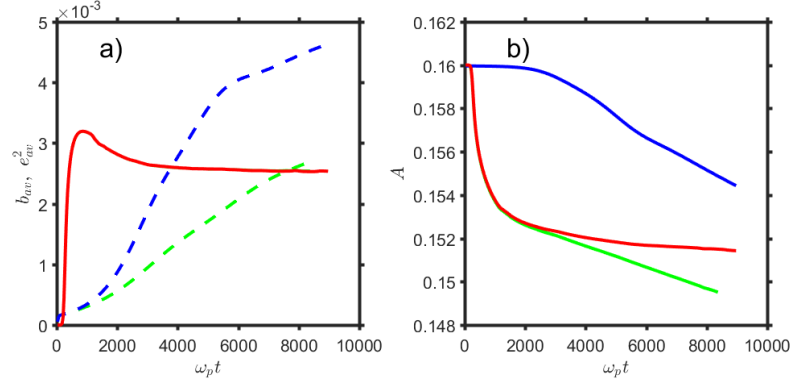


Рисунок 3.4 — Динамика (а) среднеквадратичного магнитного поля b_{av} филаментационных мод (штрихи) и среднего квадрата электрического поля e_{av}^2 двухпоточковых мод (сплошная), а также (б) параметра анизотропии A в случае эволюции исключительно двухпоточковых (красный цвет) либо филаментационных (синий цвет) мод и в случае их совместной эволюции (зеленый цвет). Параметры начального распределения (??): $n_s = 0.005n_b$, $\beta_s = 4\beta_T$, $\beta_T = 0.1$.

На рассматриваемом промежутке времени дополнительная изотропизация распределения электронов филаментационными модами происходит преимущественно за пределами резонансной с ленгмюровскими волнами области

скоростей (рис. ??) и фактически начинается только при переходе на стадию насыщения вейбелевской турбулентности при $\omega_p t > 5000$ (ср. красную и зеленую кривые для параметра анизотропии на рис. ??b). В результате в расчетах с добавлением филаментационных мод и без них динамика ленгмюровской турбулентности, а именно, её среднеквадратичного электрического поля, характерного волнового числа, поперечной и продольной ширины спектра не отличалась более чем на 10%. Сказанное не исключает необходимости учета филаментационных мод при анализе затухания ленгмюровских волн на больших временах, на которых, однако, квазилинейное описание может оказаться некорректным из-за нарушения условий его применимости, например, вследствие накопления эффектов нелинейного трёх- или четырёхволнового взаимодействия между отдельными модами.

По мере дальнейшего увеличения скорости пучка β_s уменьшение анизотропии A , а также подавление роста филаментационных мод за счет насыщения роста мод ленгмюровского типа становится более значительным. Так, для параметров начального распределения $n_s = 0.03n_b$, $\beta_s = 5\beta_T$, $\beta_T = 0.1$, при которых квазилинейная теория не применима, в расчетах методом частиц в ячейках при помощи кода EPOCH [Arber2015] турбулентное магнитное поле вейбелевских мод ослабевало примерно на порядок при учете ленгмюровской турбулентности.

3.5 Заключение

Представленные результаты демонстрируют возможные сценарии квазилинейного взаимодействия эволюционирующих спектров ленгмюровской и вейбелевской турбулентности в бесстолкновительной незамагниченной нерелятивистской плазме, включающей фоновую плазму и теплый пучок, в которых начальное распределение электронов является максвелловским с одной и той же температурой, а ионы предполагаются холодными и динамически пассивными. Реализующийся сценарий зависит от величины направленной скорости пучка и отношения концентрации его частиц к концентрации частиц фоновой плазмы.

Если эта скорость хотя бы в несколько раз превышает тепловую, то в типичных условиях даже при относительно небольшой концентрации пучка инкремент плазменных волн значительно превышает инкремент филаментационной

неустойчивости и поэтому ленгмюровская турбулентность коротковолновых квазиэлектростатических полей формируется намного раньше вейбелевской турбулентности более длинноволновых квазимагнитостатических токов. В этом случае, как показывают квазилинейные расчеты, ленгмюровская турбулентность, выполжаивающая функцию распределения электронов по скоростям в области между пучком и фоновой плазмой, может заметно уменьшить величину параметра анизотропии A общего распределения электронов по скоростям, а следовательно, замедлить экспоненциальный рост филаментационных мод, понизить уровень их насыщения в ходе дальнейшего развития неустойчивости и изменить эволюцию спектра. Однако ленгмюровская турбулентность не способна подавить развитие филаментационной турбулентности, хотя результирующая энергия её магнитного поля значительно, как правило многократно, уступает энергии квазиэлектростатического поля ленгмюровской турбулентности. Более того, темп затухания этой турбулентности существенно ускоряется, а расширение её спектра существенно ограничивается в результате квазилинейного воздействия развитой магнитной турбулентности.

Если же направленная скорость пучка не намного превышает тепловую скорость, примерно вдвое или менее, то при относительно небольшой концентрации пучка инкремент ленгмюровских мод оказывается меньше или порядка инкремента филаментационных, так что ленгмюровская турбулентность даже не успевает развиться до уровня собственного насыщения и довольно быстро подавляется нарастающей магнитной турбулентностью. Это происходит во многом благодаря квазилинейному эффекту деформации, сглаживания функции распределения электронов в той области скоростей, где имеет место их резонанс с ленгмюровскими волнами. Иными словами, филаментационная турбулентность квазилинейным образом подавляет ленгмюровскую.

Проведенный анализ квазилинейного взаимодействия ленгмюровской и вейбелевской турбулентности важен для выявления других механизмов взаимного влияния турбулентных спектров квазиэлектростатических и квазимагнитостатических флуктуаций в плазменно-пучковых системах. Так, в дополнение к исследованиям трехволнового и четырехволнового взаимодействия мод ленгмюровской [Kasaba2001; Ziebell2008] и вейбелевской [Garasev2021; Kuznetsov2025] турбулентности по отдельности, интерес представляет комбинационное взаимодействие филаментационных и двухпоточковых мод. В частности, оно может оказаться существенным для процесса

аномального рассеяния резонансных с ленгмюровской волной электронов на флуктуациях магнитного поля [Fleishman2013; Medvedev2017]. При больших уровнях насыщения той или иной турбулентности, когда она уже не является достаточно слабой, многообещающим является анализ конкуренции квазилинейного взаимодействия двух типов турбулентности с их нелинейным взаимодействием за счет влияния квазиэлектро- и квазимагнитостатических полей на динамику имеющихся локализованных образований, а именно, влияния флуктуаций электрического поля на токовые z-пинчи и влияние флуктуаций магнитного поля на ленгмюровские солитоны. Кроме того, особый интерес вызывает роль аномальных столкновений, обусловленных рассеянием электронов на турбулентности в бесстолкновительной плазме и тоже являющихся нелинейным механизмом изменения инкрементов ленгмюровских и филаментационных мод, а следовательно, механизмом взаимного влияния спектров той и другой турбулентности.

Наконец, существенным фактором развития и взаимовлияния указанных турбулентных спектров являются обычно имеющееся различие температур фона и пучка и возможное наличие релятивистских частиц в них, игнорировавшиеся в настоящей работе. Так, различие температур фона и пучка допускает пространственное разделение заряда, надлежащий учет которого снижает инкремент филаментационных мод и уровень насыщения магнитной турбулентности [Tzoufras2006; Hao2008]. Для широкого класса релятивистских распределений частиц по скоростям наиболее неустойчивы наклонные моды, у которых угол между волновым вектором и пучком существенно отличен и от 0, и от 90 градусов [Bret2004; Bret2010]. Эти и другие факторы могут повлиять на квазилинейное взаимодействие различных типов турбулентности и заслуживают дальнейшего исследования. В астрофизических задачах учет тех или иных нелинейных факторов, дополняющих разработанное квазилинейное описание совместного развития ленгмюровской и вейбелевской турбулентности, определяется свойствами неравновесной магнитоактивной плазмы конкретных космических объектов и выходит за рамки настоящей работы.

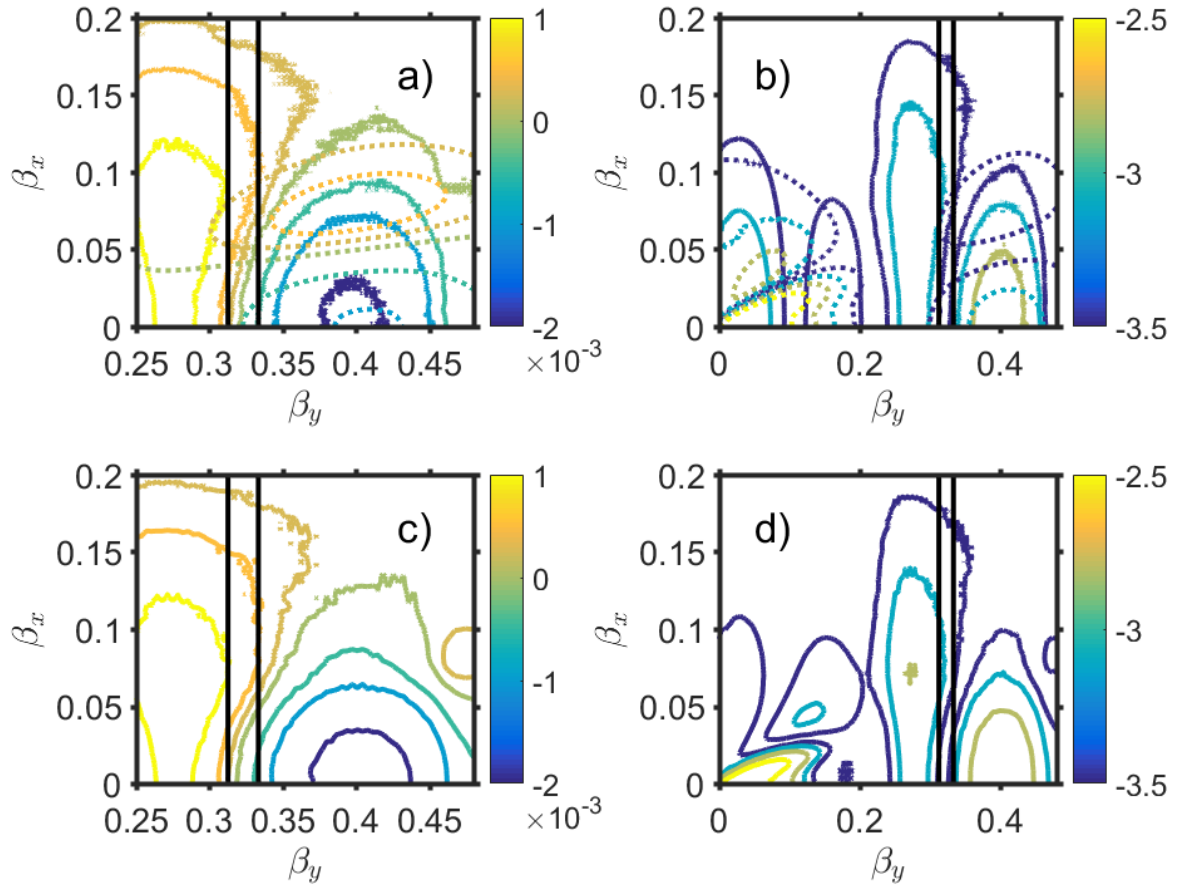


Рисунок 3.5 — (а) Вычисленные для момента времени $\omega_p t = 8100$ линии уровня нормированной на максимум начального распределения поправки к однородной компоненте функции распределения электронов по скоростям ($??$), которая в начальный момент времени являлась максвелловской с пучком, в случае учета только двухпотоковых (сплошная) или только филаментационных (пунктир) мод. Параметры начального распределения ($??$): $n_s = 0.005n_b$, $\beta_s = 4\beta_T$, $\beta_T = 0.1$. Вертикальные черные линии отражают оценку резонансной области для коллинеарных с пучком основных энергонесущих в данный момент времени ленгмюровских мод. (б) То же для десятичного логарифма поправки к однородной компоненте функции распределения. (с)-(д) соответствуют графикам (а)-(б) в случае совместного учета двухпотоковых и филаментационных мод.

Глава 4. Эволюция шланговой турбулентности магнитоактивной анизотропной плазмы

Ранее было показано, что нелинейной эволюции подобной турбулентности в присутствии внешнего магнитного поля свойственно более медленное и не степенное увеличение характерного масштаба с одновременным уменьшением угла θ_{opt} между наиболее энергонесущей модой и осью анизотропии [Camporeale2008; Hellinger2014]. В настоящей работе проведено детальное исследование влияния внешнего магнитного поля и начальной анизотропии распределения частиц в бесстолкновительной бимаксвелловской плазме на: (а) величину насыщающего неустойчивость среднеквадратичного магнитного поля, (б) долговременную нелинейную эволюцию среднеквадратичного магнитного поля и его характерного масштаба, (с) автомодельные свойства пространственного спектра турбулентности, (d) законы роста/спадания его гармоник и нелинейное (резонансное) взаимодействие между ними, (е) форму усредненной по пространству самосогласованной функции распределения частиц по скоростям и параметр её анизотропии.

Анализ основан прежде всего на результатах трехмерного (3D3V) моделирования методом частиц в ячейках при помощи кода EPOCH [Arber2015], тогда как ранее опубликованные результаты основывались на двумерных (2D3V) расчетах [Camporeale2008; Hellinger2014; Lazar2023; Lopez2020]. Причины недостаточности двумерных вычислений и отличия в их результатах от трехмерного моделирования будут подробно прокомментированы в разделе ???. Там же будут оценены пределы применимости квазилинейного подхода, развитого в предыдущих главах, путем сравнения его следствий со следствиями двумерного (2D3V) и полноценного трехмерного (3D3V) моделирования.

В разделе ??? изложены постановка задачи и используемые обозначения. Краткий обзор основных результатов линейной теории апериодической неустойчивости в присутствии внешнего магнитного поля и без него приведен в разделе ???. В разделе ??? проанализировано изменение эволюции распределения частиц по скоростям, среднеквадратичного магнитного поля, его спектра в целом и отдельных гармоник в частности с увеличением величины внешнего магнитного поля от малого до почти подавляющего неустойчивость для представительного диапазона величин начальной анизотропии распределения частиц по скоростям.

Основное внимание уделяется описанию процессов нелинейного, в частности, трех- и четырехволнового взаимодействия между модами. В заключительном разделе суммируются общие свойства эволюции квазимагнитостатической турбулентности, генерируемой шланговой неустойчивостью во внешнем магнитном поле

Для определенности полагается, что в начальный момент времени нормированная функция распределения электронов по скоростям $\Psi = c^3 f / N_0$ имеет бимаксвелловскую форму, вытянутую вдоль оси z , т.е. вдоль внешнего магнитного поля:

$$\Psi(\vec{\beta}) = \frac{1}{\pi^{3/2} \beta_{\perp 0}^2 \beta_{\parallel 0}} \exp \left(-\frac{\beta_x^2 + \beta_y^2}{\beta_{\perp 0}^2} - \frac{\beta_z^2}{\beta_{\parallel 0}^2} \right). \quad (4.1)$$

Здесь $\beta_{x,y,z} = v_{x,y,z}/c$, т.е. $\vec{\beta} = \vec{v}/c$. Ниже используется начальное значение параметра анизотропии $A_0 = \beta_{\parallel 0}^2 / \beta_{\perp 0}^2 - 1 > 0$, определяемое различием исходных тепловых скоростей вдоль и поперек внешнего магнитного поля. Рассматриваемая задача, хотя и является трехмерной, обладает аксиальной симметрией. Поскольку полноценные трехмерные расчеты требуют больших вычислительных затрат, целесообразно выяснить, какие параметры турбулентности и на каких временах могут быть определены из двумерных расчетов. С этой целью в работе проведено сравнение результатов расчетов в трехмерной (3D3V) и двух вариантах двумерной (2D3V) геометриях. Во всех случаях проводится динамический учет всех трех компонент скорости частиц \vec{v} и зависящих от них полей. Ограничением в двумерных расчетах являются лишь исключенные зависимости исследуемых функций либо от координаты y в (x, z) – геометрии, когда магнитное поле и ось анизотропии лежат в плоскости расчета xz , либо от координаты z в аксиальной z -геометрии, когда магнитное поле и ось анизотропии ортогональны плоскости расчета xy . В отличие от второго варианта, когда отсутствуют наклонные к магнитному полю моды и имеется аксиальная симметрия задачи, в первом.... усложняет динамику турбулентности, описание которой в 2D3V становится некорректным в сравнении с полноценным трехмерным расчетом.

В работе используются безразмеренные значения времени, волнового числа и амплитуд мод магнитного поля (??):

$$\tau = \omega_p t, \quad K = \frac{kc}{\omega_p}, \quad b_{K_n} = \frac{B_{K_n}}{\sqrt{8\pi N T_{\parallel 0}}}, \quad \omega_p^2 = \frac{4\pi N e^2}{m_e}, \quad T_{\parallel 0} = \frac{m_e c^2 \beta_{\parallel 0}^2}{2}, \quad (4.2)$$

Температура измеряется в энергетических единицах, т.е. с учетом постоянной Больцмана k_B . Для описания эволюции однородной компоненты распределения частиц по скоростям $f_0(t, \vec{\beta}) = \iiint_{-\infty}^{\infty} f(\vec{v}, \vec{r}, t) d^3\vec{r}$ вводится относительная поправка к ней и эффективный параметр анизотропии:

$$\delta f_0(t, \vec{\beta}) = \frac{f_0(t, \vec{\beta}) - f_0(0, \vec{\beta})}{f_0(0, 0)}, \quad A = \frac{2 \iiint_{-\infty}^{\infty} \beta_z^2 f_0(\tau, \vec{\beta}) d\beta_x d\beta_y d\beta_z}{\iiint_{-\infty}^{\infty} (\beta_x^2 + \beta_y^2) f_0(\tau, \vec{\beta}) d\beta_x d\beta_y d\beta_z} - 1. \quad (4.3)$$

Кроме выявления динамики указанных величин (??), представленные ниже расчеты призваны выявить закономерности в эволюции турбулентных магнитных и электрических полей и плотности тока электронов, а также пространственных спектров данной турбулентности.

Ключевыми параметрами в рассматриваемой начальной задаче о магнитной турбулентности являются начальная анизотропия A_0 распределения электронов по скоростям и нормированное внешнее магнитное поле $b_{ext} = B_{ext}/\sqrt{8\pi NT_{\parallel 0}} \lesssim 1$, равное обратному квадратному корню из плазменного бета-параметра. Данные величины не только задают диапазон первоначально неустойчивых мод, но и определяют дальнейшую нелинейную эволюцию спектра. В отсутствие магнитного поля имеется апериодическое нарастание лишь ТМ-мод, магнитное поле которых ортогонально плоскости, определяемой волновым вектором и осью анизотропии. При заданной величине поперечной компоненты волнового вектора наибольшими инкрементами обладают поперечные моды, волновые вектора которых перпендикулярны к оси анизотропии. Для них диапазон неустойчивости включает волновые числа в промежутке $(0; \sqrt{A_0})$. [??] При $A_0 \ll 1$ максимальный инкремент (в единицах ω_p) равен $\gamma_{\max} \approx 2\beta_{\perp 0}(A_0/3)^{3/2}$ и достигается для оптимального волнового числа $K_{\perp \text{opt}} \approx (A_0/3)^{1/2}$. При $A_0 \gg 1$ имеем $\gamma_{\max} \approx \beta_{\perp 0} \left([(A_0 + 1)/2]^{1/2} - 1 \right)$ для оптимального волнового числа $K_{\perp \text{opt}} \approx \left([(A_0 + 1)/2]^{1/2} - 1 \right)^{1/2}$ (рис. ??а).

В присутствии внешнего магнитного поля b_{ext} имеются две неустойчивые ветви: так называемые "периодическая- и "апериодическая"[???]. Моды, направленные преимущественно вдоль внешнего магнитного поля, а значит, и оси анизотропии, относят к периодическим, поскольку их линейный инкремент мал в сравнении с действительной частотой и в сравнении с линейным инкре-

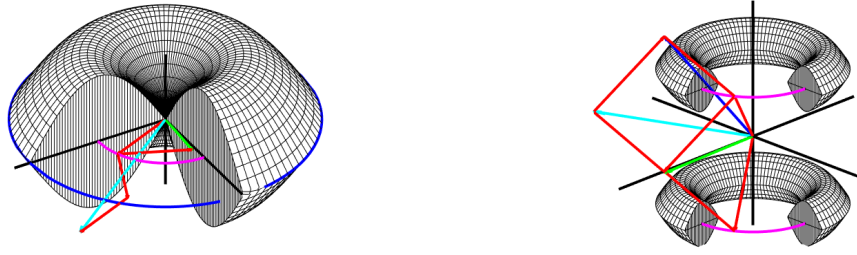


Рисунок 4.1 — Трехмерная иллюстрация области аперодической неустойчивости в пространстве волновых векторов (а) в отсутствие внешнего магнитного поля и (b) в достаточно сильном внешнем магнитном поле. Синяя линия соответствует границе неустойчивости поперечных мод $|K_{\perp}| = \sqrt{A}$ в отсутствие внешнего магнитного поля, а розовая линия – оптимальным модам \vec{K}_{opt} . Красные линии демонстрируют примеры оптимальных волновых векторов, взаимодействие которых в значительной степени определяет генерацию мод (зеленый, бирюзовый и синий цвет) вне области линейной неустойчивости.

ментом мод другой ветви [Li2000]. Поэтому влияние "периодической- ветви фактически не проявляется в расчетах методом частиц в ячейках, проводимых в настоящей работе, и не учитывается в приближенном квазилинейном описании.

Другую ветвь неустойчивости в литературе принято называть аперодической [???], хотя нами показано, что в определенных условиях у ее линейно поляризованных мод присутствует действительная частота, увеличивающаяся с ростом внешнего магнитного поля B_{ext} и уменьшением угла θ между волновым вектором \vec{K} и этим магнитным полем. Область неустойчивости поперечных мод с увеличением внешнего поля достаточно быстро сужается, как с длинноволновой, так и с коротковолновой стороны спектра, а линейный инкремент всех мод, остающихся неустойчивыми, уменьшается. В работе [Emelyanov2023_Radiophys] в пределе $\gamma \ll K_{\perp}\beta_{\perp}$, реализующемся при невысокой начальной анизотропии ($A_0 \lesssim 1$), либо при высокой анизотропии

и внешнем магнитном поле, близком к подавляющему, область неустойчивости поперечных мод оценивалась как:

$$K_{\perp} \in \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{A_0} \cos \left[\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{b_{ext}}{b_{s\perp}(A_0)} \right) \right]; \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{A_0} \cos \left[\frac{\pi}{3} - \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{b_{ext}}{b_{s\perp}(A_0)} \right) \right] \right) \quad (4.4)$$

где $b_{s\perp}(A_0)$ — нормированное магнитное поле, подавляющее неустойчивость поперечных мод, квадрат которого оценен в [Emelyanov2023_Radiophys] как:

$$b_{s\perp}^2(A_0) = \frac{8\pi}{27} \frac{A_0^3}{1 + A_0^3} < 1. \quad (4.5)$$

По мере увеличения внешнего магнитного поля b_{ext} монотонно уменьшается не только линейный инкремент всех поперечных мод, но и угол между внешним магнитным полем и волновым вектором моды с наибольшим инкрементом (рис. ??b) [Moya2022; Li2000; Camporeale2008]. Таким образом, для наклонных мод неустойчивость может развиваться при $b_{ext} > b_{s\perp}(A_0)$. Вводя величину магнитного поля $b_s(A_0)$, при которой апериодическая неустойчивость полностью подавлена, приведем оценку для неё из работы [Hellinger2014], аппроксимирующую численно полученный порог неустойчивости в диапазоне значений начальной анизотропии A_0 от 0.2 до 9:

$$b_s^2(A_0) = \left(\frac{A_0}{1.27(1 + A_0)} \right)^{\frac{1}{0.954}}. \quad (4.6)$$

Сравнение оценок (??) и (??) показывает, что если при высоких начальных анизотропиях отношение $b_s^2/b_{s\perp}^2$ лишь немного превышает единицу, то при низких начальных анизотропиях оно может составлять несколько порядков (рис. ??). Значит, существует широкий диапазон параметров, в котором принципиально важен учет наклонных мод, так как поперечные моды устойчивы в линейном приближении.

4.1 Деформация распределения частиц в зависимости от величины внешнего магнитного поля

В отсутствии внешнего магнитного поля и наклонных мод ранее наблюдалась значительная деформация функции распределения частиц на стадии

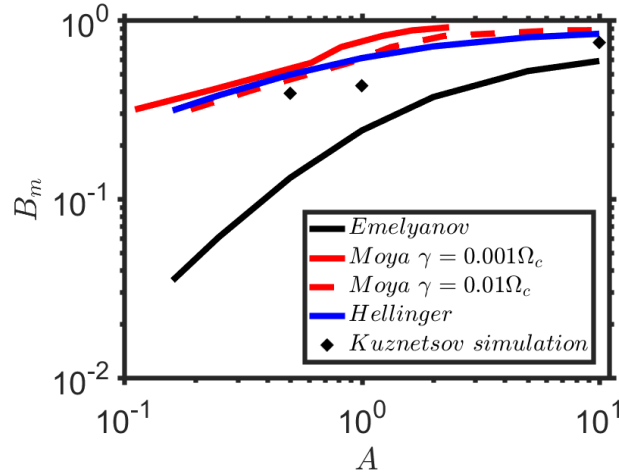


Рисунок 4.2 — Зависимость подавляющего внешнего магнитного поля от начальной анизотропии для поперечных апериодических мод (??) (черный цвет), всех апериодических мод согласно оценке (??) (синий цвет) и согласно результатам расчетов [Moya2022] (красный цвет).

насыщения экспоненциального роста во всей области скоростей порядка тепловых [Kuznetsov2023]. В данном процессе происходит быстрое увеличение поперечной к оси анизотропии скорости электронов, двигавшихся сначала преимущественно вдоль этой оси, так что его форма принимает вид, существенно отличный от бимаксвелловского (рис. ??). В дальнейшем форма функции распределения частиц, остающаяся сильно не бимаксвелловской, изменяется медленно, квазилинейно, т.е. исключительно за счет интегрального нелинейного влияния мод на однородную компоненту функции распределения в условиях формально линейной эволюции каждой моды согласно текущему значению инкремента (декремента) и частоты (в общем случае ненулевой), определяемыми этой медленно меняющейся функцией распределения частиц. Это было показано сравнением симуляций методом частиц в ячейках с расчетами, учитывающими исключительно квазилинейное взаимодействие. На временах, по меньшей мере пятикратно превышающих момент окончания экспоненциального роста, учет наклонных мод и нелинейных взаимодействий, с ними связанных, в отсутствие внешнего магнитного поля не оказывает существенного влияния на эволюцию распределения частиц по скоростям за исключением, возможно, кратковременного переходного промежутка примерно от $\omega_p t = 80$ до $\omega_p t = 100$ при насыщении неустойчивости.

В присутствии внешнего магнитного поля, по-прежнему, при насыщении неустойчивости происходит сравнительно быстрое увеличение поперечной к

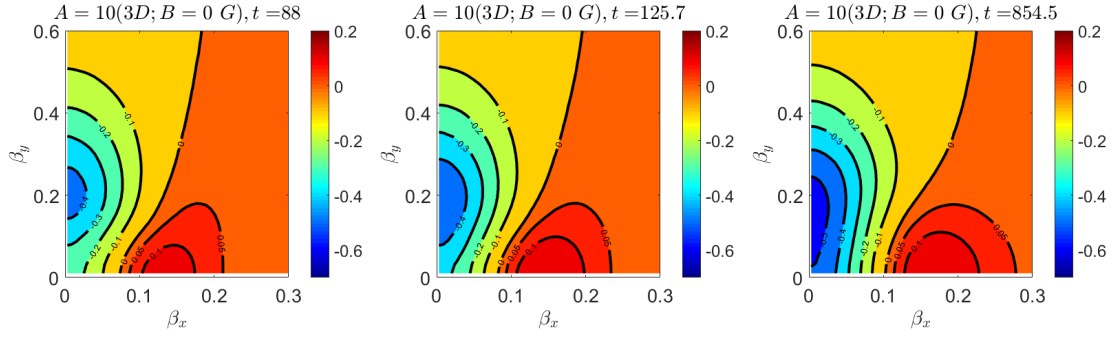


Рисунок 4.3 — Вычисленные для моментов времени (а) $\omega_p t = 88$, (б) $\omega_p t = 125.7$, (с) $\omega_p t = 854.5$ линии уровня $-0.5, -0.4, -0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.05$ и 0.1 нормированной на максимум начального распределения поправки к однородной компоненте функции распределения ($??$), которая в начальный момент времени являлась бимаксвелловской с параметром анизотропии $A_0 = 10$. Внешнее магнитное поле отсутствует: $b_{ext} = 0$.

оси анизотропии скорости электронов, двигавшихся сначала преимущественно вдоль этой оси. С увеличением внешнего магнитного поля количество таких электронов уменьшается, продольная скорость области их наибольшего прироста в момент насыщения неустойчивости увеличивается от нуля до $\beta_{\parallel} \sim 3\beta_{\perp 0}$, а поперечная остается примерно неизменной $\beta_{\perp} \lesssim 2\beta_{\perp 0}$ (рис. $??$). В ходе дальнейшего нелинейного развития турбулентности в отсутствие внешнего магнитного поля форма ФР частиц по скоростям меняется слабо, преимущественно за счет нагрева в поперечном к оси анизотропии направлении электронов с малой продольной скоростью, что расширяет область значительного оттока частиц в диапазон малых скоростей ($\beta_{\perp} < \beta_{\perp 0}, \beta_{\parallel} < \beta_{\parallel 0}$) (рис. $??$). Посредством сравнения трехмерных и двумерных аксиально симметричных расчетов кодом ЕРОСН с квазилинейным моделированием, в котором исключено прямое нелинейное взаимодействие между модами и оставлено лишь квазилинейное взаимодействие, было выявлено, что хотя к моменту насыщения неустойчивости указанные распределения частиц аналогичны, на более поздних временах они качественно отличаются в диапазоне малых скоростей (ср. рис. $??$ и рис. $??$). Эта разница определяется существенно отличной динамикой спектра в обсуждаемых симуляциях (см. раздел $??$). Из этих различий следует, что квазилинейное приближение недостаточно для описания эволюции турбулентности уже при довольно слабом внешнем магнитном поле, например, $b_{ext} = 0.4$ при $A_0 = 10$.

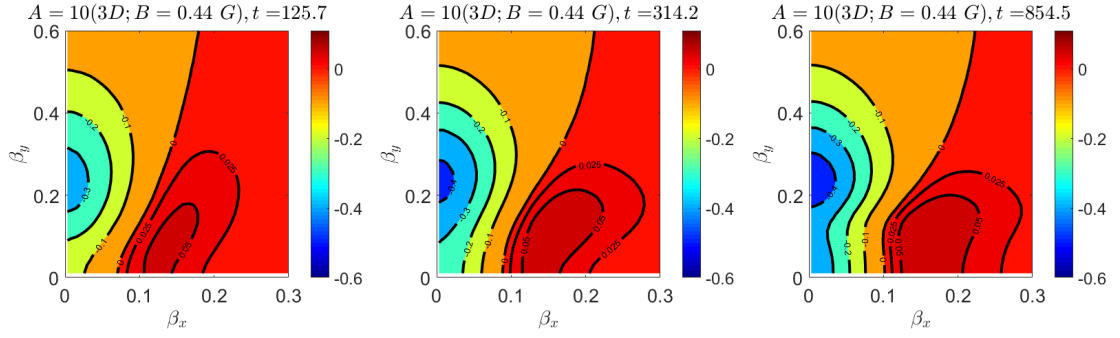


Рисунок 4.4 — Вычисленные для моментов времени (а) $\omega_p t = 125.7$, (б) $\omega_p t = 314.2$, (с) $\omega_p t = 854.5$ линии уровня $-0.4, -0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.025$ и 0.05 нормированной на максимум начального распределения поправки к однородной компоненте функции распределения ($??$), которая в начальный момент времени являлась бимаксвелловской с параметром анизотропии $A_0 = 10$. Внешнее магнитное поле $b_{ext} = 0.4$.

Нелинейное долговременное изменение ФР становится всё более заметным с увеличением магнитного поля: при $b_{ext} = 0.71$ деформация ФР происходит преимущественно значительно позднее насыщения линейной апериодической неустойчивости. Продольная скорость расширяющейся области наибольшего прироста снижается с $\beta_{\parallel} \sim 3\beta_{\perp 0}$ до $\beta_{\parallel} \sim 2\beta_{\perp 0}$, а поперечная почти не меняется. Область значительного оттока частиц, абсолютный максимум которого достигается при $\beta_{\parallel} \sim 3\beta_{\perp 0}$, также существенно расширяется на нелинейной стадии, причем появляется локальный максимум в области малых скоростей ($\beta_{\perp} < \beta_{\perp 0}, \beta_{\parallel} < \beta_{\parallel 0}$).

Функции распределения частиц по скоростям в двумерных расчетах 2D3V с магнитным полем, лежащим в плоскости моделирования, демонстрируют качественно схожую динамику. Наиболее значительные отличия наблюдаются в отсутствие внешнего магнитного поля: ФР в 2D3V-расчете теряет аксиальную симметрию, изотропизуясь лишь в плоскости, ортогональной к перпендикулярным волновым векторам. В присутствии внешнего магнитного поля распределение частиц испытывает ларморовское вращение и посредством этого приобретает возможность изотропизоваться в обоих перпендикулярных к оси анизотропии направлениях, стремясь, что особенно ярко выражено в сильном внешнем магнитном поле, к аксиально симметричному виду, аналогичному распределению частиц в трехмерных симуляциях.

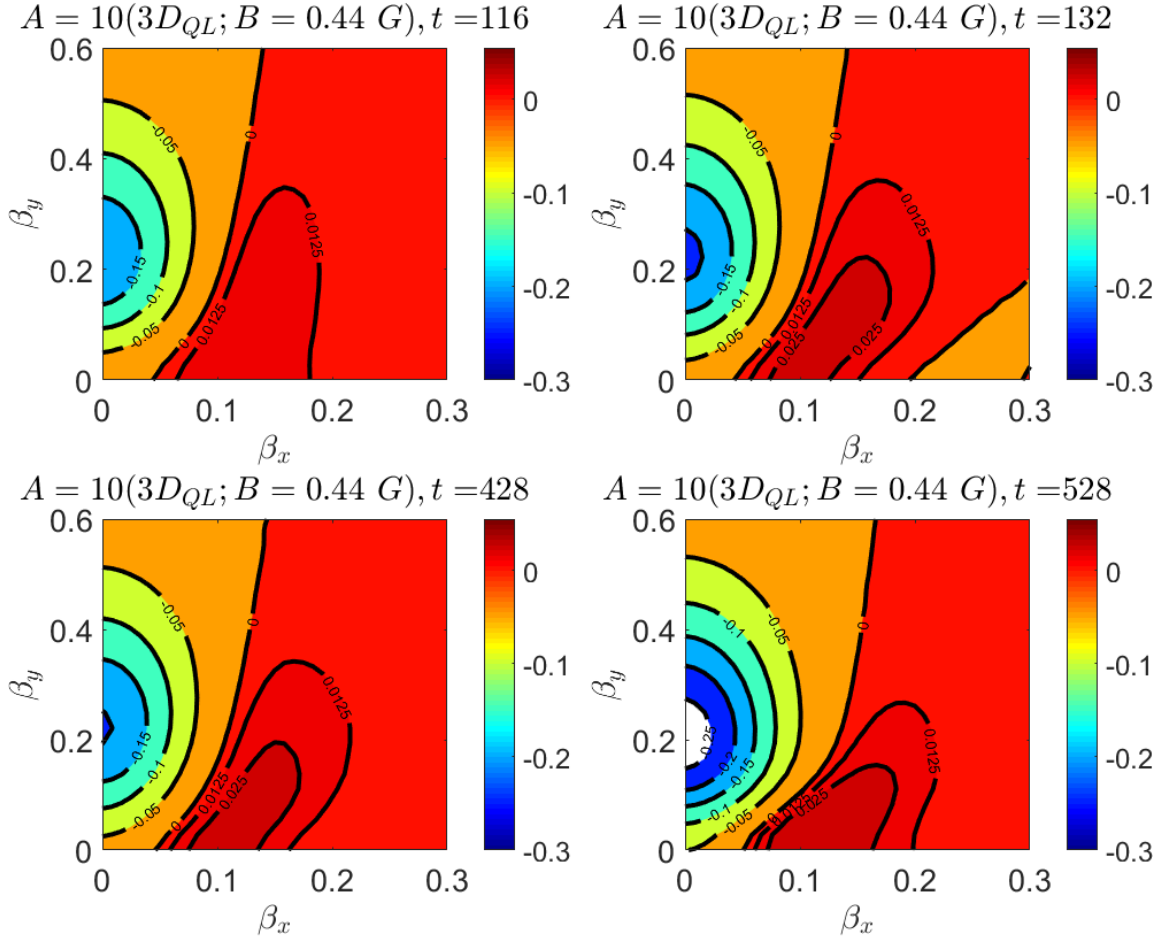


Рисунок 4.5 — Вычисленные в квазилинейном аксиально симметричном приближении [Kuznetsov2023] для моментов времени (а) $\omega_p t = 84$, (б) $\omega_p t = 92$, (с) $\omega_p t = 100$, (д) $\omega_p t = 420$ линии уровня $-0.5, -0.4, -0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.05$ и 0.1 нормированной на максимум начального распределения поправки к однородной компоненте функции распределения ($??$), которая в начальный момент времени являлась бимаксвелловской с параметром анизотропии $A_0 = 10$.

Внешнее магнитное поле $b_{ext} = 0.4$.

4.2 Эволюция интегральных характеристик турбулентности при различных значениях внешнего магнитного поля

Параметр анизотропии A , будучи интегральным отражением формы распределения частиц, в отсутствие внешнего магнитного поля испытывает наиболее значительное снижение к моменту насыщения неустойчивости, а в сильном магнитном поле, равном, например, $b_{ext} = 0.71$, ситуация противопо-

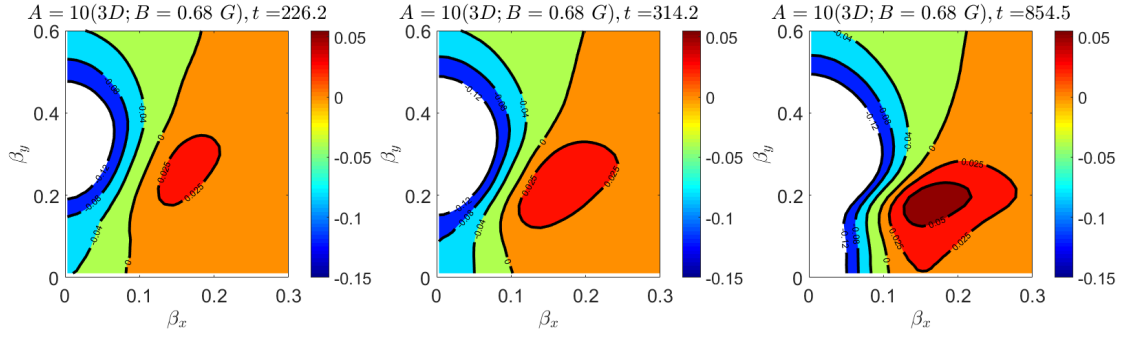


Рисунок 4.6 — Вычисленные для моментов времени (а) $\omega_p t = 226.2$, (б) $\omega_p t = 314.2$, (с) $\omega_p t = 854.5$ линии уровня $-0.4, -0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.025$ и 0.05 нормированной на максимум начального распределения поправки к однородной компоненте функции распределения (??), которая в начальный момент времени являлась бимаксвелловской с параметром анизотропии $A_0 = 10$. Внешнее магнитное поле $b_{ext} = 0.59$.

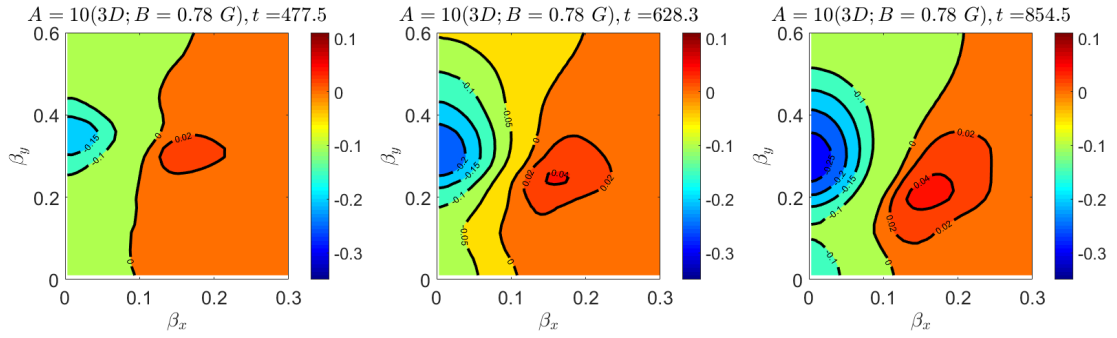


Рисунок 4.7 — Вычисленные для моментов времени (а) $\omega_p t = 477.5$, (б) $\omega_p t = 628.3$, (с) $\omega_p t = 854.5$ линии уровня $-0.25, -0.2, -0.15, -0.1, -0.05, 0, 0.02$ и 0.04 нормированной на максимум начального распределения поправки к однородной компоненте функции распределения (??), которая в начальный момент времени являлась бимаксвелловской с параметром анизотропии $A_0 = 10$. Внешнее магнитное поле $b_{ext} = 0.71$.

ложная и изотропизация распределения происходит преимущественно в ходе нелинейной эволюции (рис. ??b). Так, в первом случае к насыщению неустойчивости в $\tau_s = 88$ анизотропия резко, примерно в 5 раз, уменьшается до ≈ 2 , далее её снижение плавно замедляется и на временах $2\tau_s = 176$ она составляет $A \approx 1.1$. Во втором случае к моменту насыщения неустойчивости $\tau_s = 390$ анизотропия снижается всего до ≈ 7.2 , а на временах $2\tau_s = 780$ составляет уже $A \approx 3.83$.

Тем интереснее, что величина среднеквадратичного магнитного поля к концу симуляции в этих противоположных случаях различалась всего на 5% (рис. ??a,d). В отсутствие внешнего поля эта величина сравнительно быстро выросла, достигла насыщения и начала быстро затухать. В сильном же внешнем поле апериодическая неустойчивость достигла своего насыщения в 4 раза позднее и при в 3.5 раза меньшем турбулентном магнитном поле, однако после этого среднеквадратичное магнитное поле до конца симуляции находилось на примерно одном и том же уровне, что предопределило близость обсуждаемых величин к концу обеих симуляций. Полученное совпадение не выглядит случайным, так как среднеквадратичное магнитное поле в двух других расчетах с промежуточными значениями магнитного поля $b_{ext} = 0.4$ и $b_{ext} = 0.59$ к концу симуляции пришло к сравнимым значениям, отличающимся всего на 10% и 20% соответственно. Идентичный результат наблюдается и для аналогичных симуляций при начальной анизотропии $A_0 = 1$. Это позволяет предполагать, что внешнее магнитное поле, неизбежно присутствующее в корональных петлях, хотя и существенно меняет динамику турбулентного магнитного поля непосредственно после насыщения неустойчивости, слабо влияет на среднеквадратичную величину последнего на глубоко нелинейных временах, на которых масштабы турбулентности во всех направлениях сопоставимы.

Во всех трехмерных симуляциях преобладает поперечная к оси анизотропии компонента магнитного поля, кратно, но не на порядки превосходя продольную компоненту. На протяжении нелинейной эволюции турбулентности их отношение уменьшается. Так, в отсутствие внешнего магнитного поля при насыщении неустойчивости их отношение примерно равно $b_{\perp}/b_{\parallel} \approx 4$, на момент окончания расчета — $b_{\perp}/b_{\parallel} \approx 3$, а в сильном внешнем магнитном поле $b_{ext} = 0.71$ при насыщении неустойчивости их отношение примерно равно $b_{\perp}/b_{\parallel} \approx 10$, на момент окончания расчета — $b_{\perp}/b_{\parallel} \approx 5$.

Значения характерных перпендикулярного $\langle K_{\perp} \rangle$ и продольного $\langle K_{\parallel} \rangle$ волновых чисел к моменту насыщения неустойчивости соответствуют волновому вектору наиболее неустойчивой моды, а значит, определяются линейной теорией. Здесь усреднение понимается в следующем смысле:

$$\langle \dots \rangle = \frac{\int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \dots b_K^2 d^3 K}{\int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} b_K^2 d^3 K}, \quad (4.7)$$

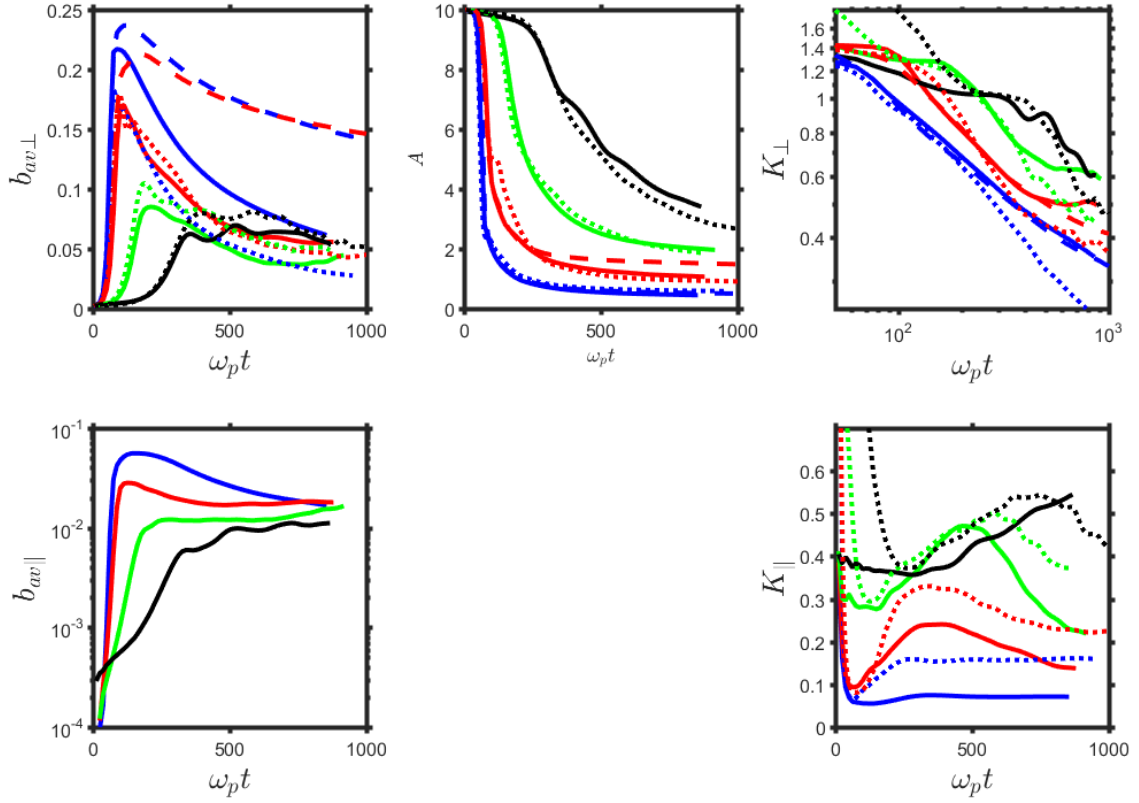


Рисунок 4.8 — Эволюция (а) поперечной и (д) продольной компонент средне-квадратичного магнитного поля b_{av} , (б) параметра анизотропии A , характерных (с) поперечной $\langle K_{\perp} \rangle$ и (ф) продольной $\langle K_{\parallel} \rangle$ компонент волнового числа при значениях внешнего магнитного поля $b_{ext} = 0$ (синий цвет), $b_{ext} = 0.4$ (красный цвет), $b_{ext} = 0.59$ (зеленый цвет) и $b_{ext} = 0.71$ (черный цвет) в трехмерных (сплошная линия), двумерных с наклонными модами (пунктир) и двумерных аксиально симметричных (штрихи) симуляциях. Начальная анизотропия равна $A_0 = 10$.

Первое увеличивается с ростом внешнего магнитного поля, пока наиболее неустойчивыми модами остаются поперечные моды. При дальнейшем увеличении внешнего магнитного поля определяющими всю динамику турбулентности становятся наклонные моды, а характерное перпендикулярное волновое число снижается. Характерное продольное волновое число $\langle K_{\parallel} \rangle$ в момент насыщения неустойчивости с ростом внешнего магнитного поля увеличивается.

В ходе последующей нелинейной эволюции поперечный масштаб турбулентности практически монотонно возрастает (рис. ??с и рис. ??f). Продольный масштаб сначала убывает вследствие нелинейного возбуждения разнообраз-

ных наклонных мод, устойчивых согласно линейной теории, а затем тоже возрастает. К концу симуляции во всех случаях продольный и поперечный масштабы оказывались сопоставимы, так что становится невозможно говорить о филаментационной структуре токов. В целом, результаты согласуются с [Hellinger2014; Camporeale2008], отмечавшими увеличение масштаба турбулентности и уменьшение угла между внешним магнитным полем и характерным волновым вектором. Несмотря на хорошее количественное совпадение для всех четырех значений внешнего магнитного поля результатов эволюции параметра анизотропии (точность до 15%) и среднеквадратичного магнитного поля (без случая $b_{ext} = 0$ точность до 20 %) у двумерных и трехмерных расчетов, сравнение в этих расчетах продольного и поперечного характерных масштабов турбулентности показывает, что на нелинейной стадии они значительно расходятся и могут кратно отличаться. Это существенно затрудняет изучение долговременной спектральной эволюции трехмерной турбулентности на основе анализа двумерных симуляций, как это, по-видимому, делается в указанных выше работах. Анализ спектральной динамики турбулентности, генерируемой шланговой модой, ниже основан на трехмерных симуляциях и посвящен преимущественно спектральной динамике поперечной компоненты магнитного поля, усредненной по аксиальному углу. Усреднение приводит к сглаживанию шумов и осцилляций, наблюдаемых на стадии затухания мод, что позволяет оценить показатель степенного спада их амплитуды.

4.3 Влияние внешнего магнитного поля на спектральную эволюцию шланговой турбулентности и нелинейные эффекты четырехволнового и трехволнового взаимодействия мод

4.3.1 Динамика спектра вейбелевской турбулентности и нелинейное взаимодействие мод в отсутствие внешнего магнитного поля

В отсутствие наклонных мод и внешнего магнитного поля общий сценарий эволюции спектра вейбелевской турбулентности, который по существу мож-

но назвать квазилинейным, был подробно описан в работе [Kuznetsov2023] в аксиально симметричной двумерной геометрии (все моды лежат в плоскости, ортогональной к оси анизотропии). При бимаксвелловском начальном распределении частиц неустойчивой оказывается исключительно ТМ-мода, магнитное поле которой ортогонально к плоскости определяемой осью анизотропии и волновым вектором. После насыщения неустойчивости спектр магнитного поля, управляемый преимущественно квазилинейным взаимодействием, смещается в длинноволновую область так, что характерное волновое число уменьшается степенным образом, а степень наклона длинноволнового и коротковолнового хвостов остается примерно постоянной, что говорит об автомодельности динамики спектра. Единственным наблюдаемым нелинейным эффектом является развитие ТМ-гармоник, нечетным образом кратных к оптимальной, преимущественно утроенной гармонике, генерируемой четырехволновым взаимодействием [Garasev2021; Kuznetsov2023]. Таким образом, были выделены 4 стадии эволюции ТМ-мод: экспоненциальный рост согласно линейному дисперсионному уравнению, степенной рост мод, волновое число которых меньше характерного $\langle K_{\perp} \rangle$, осцилляционное затухание мод, волновое число которых больше характерного $\langle K_{\perp} \rangle$, и сверхбыстрый нелинейный рост вследствие четырехволнового взаимодействия (рис. ??а). Показатель степенного роста оценивался примерно от 1 до 2, а показатель затухания, которое после усреднения по аксиальному углу оказывалось степенным, лежал в небольшом диапазоне значений от -1.3 до -1 для широкого диапазона значений начальных анизотропий.

Другим нелинейным эффектом, который наблюдается в аксиально симметричной двумерной (как в работе [Kuznetsov2023]) и трехмерной (3D3V) геометриях, является трехволновая генерация линейно устойчивых ТЕ-мод, т.е. мод, электрическое поле которых ортогонально к плоскости, определяемой волновым вектором и осью анизотропии, посредством взаимодействия двух апериодических неустойчивых ТМ-мод (см. рис. ??а). Этот эффект проявляется на стадии линейной неустойчивости в экспоненциальном росте ТЕ-мод с инкрементом, меньшим или порядка удвоенного максимального (точной оценке препятствует высокий уровень шумов). Область наблюдаемой генерации волновых чисел ТЕ-мод сравнима с областью линейно неустойчивых мод, а оптимальная ТЕ-мода немного смещена в длинноволновую область относительно оптимальной ТМ-моды ($\approx 20 - 30\%$). В двумерной (2D3V) геометрии (как в

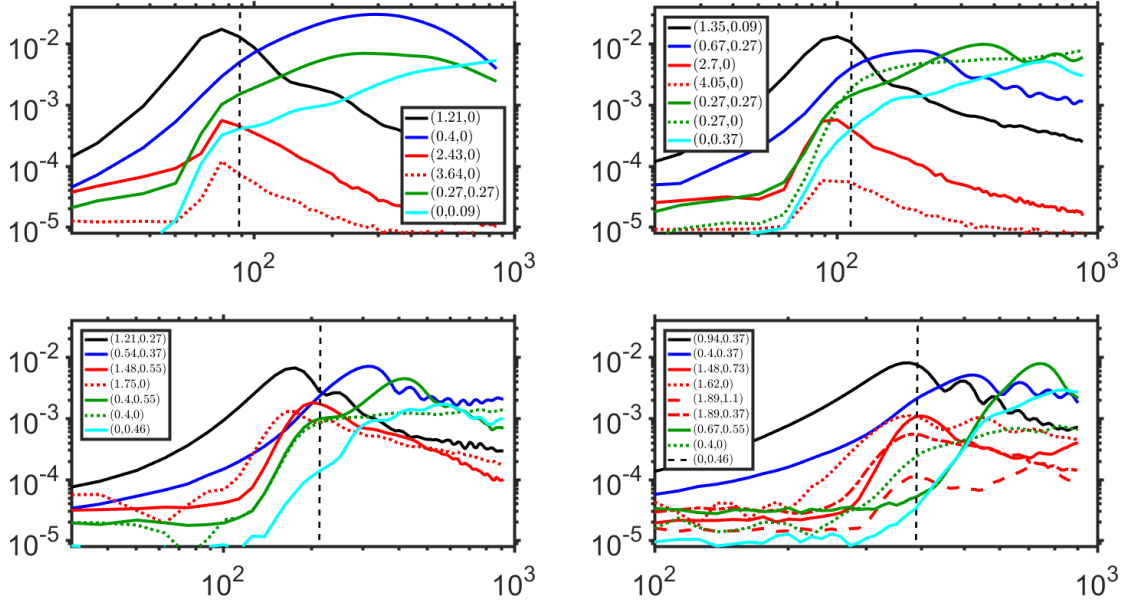


Рисунок 4.9 — Эволюция типичных усредненных по аксиальному углу мод: примерно оптимальной моды \vec{K}_{opt} (черный цвет); линейно неустойчивой моды, испытывающей степенное нарастание (синий цвет); линейно устойчивых, затухающих непосредственно после сверхбыстрой генерации мод (красный цвет); линейно устойчивых, примерно степенным образом нарастающих после окончания сверхбыстрой генерации мод (зеленый цвет), наиболее энергонесущей моды с $K_{\perp} = 0$ (бирюзовый цвет) при внешнем магнитном поле (a) $b_{ext} = 0$, (b) $b_{ext} = 0.4$. (c) $b_{ext} = 0.59$, (d) $b_{ext} = 0.71$. Вертикальный пунктир соответствует первому локальному максимуму среднеквадратичного магнитного поля в каждом случае. Начальная анизотропия $A_0 = 10$.

работах [Camporeale2008; Hellinger2014]) с наклонными модами подобное взаимодействие геометрически невозможно, поэтому продольная компонента магнитного поля отсутствует.

Добавление наклонных мод еще сильнее увеличивает разнообразие и влияние нелинейных взаимодействий, из-за которых наблюдается нелинейный сверхбыстрый рост не только поперечных ТМ-мод коротковолнового крыла, но и широкого разнообразия наклонных ТМ-мод, инкремент которых, согласно линейной теории для текущего распределения частиц, близок к нулю или вовсе отрицателен (рис. ??). Хотя квазилинейное взаимодействие, по-видимому, продолжает играть важную роль, спектральная динамика существенно перестает быть квазилинейной: спектр турбулентности за счет

прямых нелинейных взаимодействий между гармониками расширяется вдоль оси анизотропии, а среднеквадратичное магнитное поле затухает значительно быстрее, чем в аксиально симметричных расчетах без учета наклонных мод. Мы предполагаем, что приблизить результаты квазилинейных расчетов к результатам трехмерных симуляций методом частиц в ячейках если не в переходной области после насыщения неустойчивости, то хотя бы на глубоко нелинейной стадии развития может ввод аномальной частоты столкновений в БГК-приближении [Bhatnagar1954; Medvedev2017], эффективно описывающих нелинейные взаимодействия между модами магнитного поля и распределения частиц. Эта возможность станет предметом дальнейших исследований.

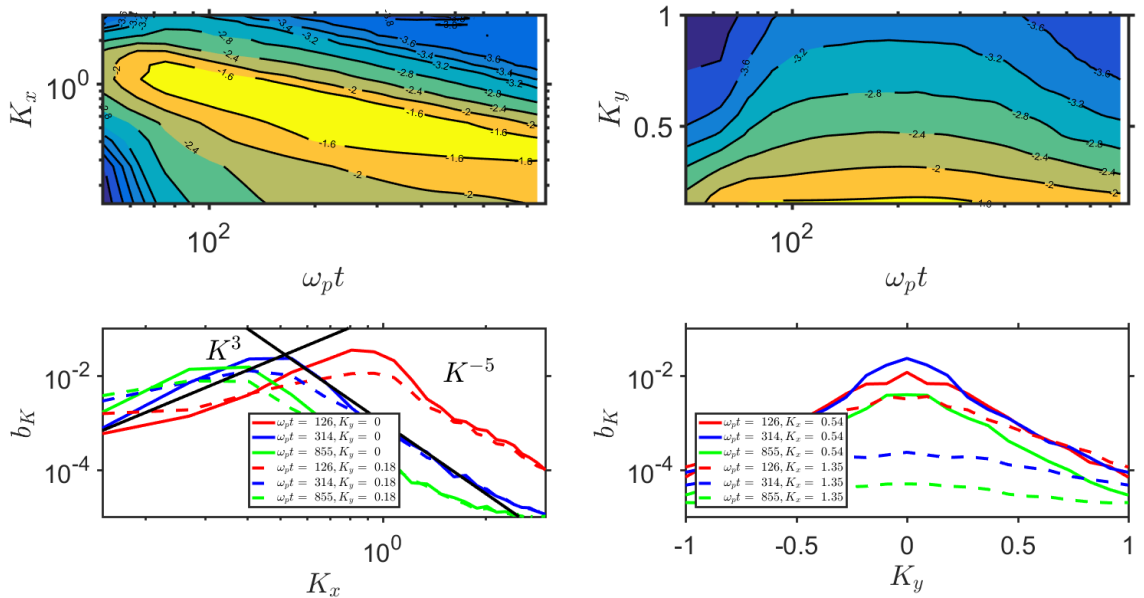


Рисунок 4.10 — Эволюция спектра турбулентности в двойном логарифмическом масштабе: (а) линии уровня логарифма усредненных вдоль оси анизотропии амплитуд мод магнитного поля $|b_K|$; (б) линии уровня логарифма усредненных поперек оси анизотропии амплитуд мод магнитного поля $|b_K|$; (в) спектр $|b_K|$ магнитного поля поперек оси анизотропии при продольных волновых числах $K_{\parallel} = 0$ (сплошная) и $K_{\parallel} = 0.18$ (пунктир). (г) спектр $|b_K|$ магнитного поля вдоль оси анизотропии при поперечных волновых числах $K_{\perp} = 0.54$ (сплошная) и $K_{\perp} = 1.35$ (пунктир) в моменты времени $\omega_p t$, равные 126 (красный цвет), 314 (синий), 855 (зеленый). Внешнее магнитное поле отсутствует $b_{ext} = 0$.

Гармоники по-прежнему могут находиться на одной из 4 возможных стадий эволюции: экспоненциальный, степенной или сверхбыстрый рост, а также осцилляционное затухание. Показатель степенного роста, который могут испытывать и нелинейно индуцированные сравнительно длинноволновые наклонные гармоники, по-прежнему оценивается от 1 до 2. Усреднение по аксиальному углу позволяет также выделить показатель усредненного затухания, который после добавления наклонных мод увеличивается и теперь оценивается от -2 до -1.5 .

В незамагниченной плазме продольная компонента турбулентного магнитного поля возникает исключительно вследствие нелинейной генерации. Во внешнем магнитном поле неустойчивая апериодическая мода обладает смешанной поляризацией (ни ТМ- ни ТЕ-), что существенно сближает и без того схожую и взаимосвязанную спектральную динамику поперечной и продольной компонент магнитного поля. Поэтому в последующих главах обсуждается спектр именно поперечной компоненты турбулентного магнитного поля.

4.3.2 Конкуренция вейбелевской и шланговой турбулентности и нелинейное взаимодействие мод в сравнительно слабом внешнем магнитном поле

Уже при $b_{ext} < b_{s\perp}$ значение линейного инкремента может оказаться существенно выше у наклонных мод апериодической неустойчивости, чем у поперечных мод, а значит, учет наклонных мод становится невозможен. При сравнительно слабом внешнем магнитном поле $b_{ext} = 0.4$ (рис. ??) инкремент поперечных мод все еще сравним с максимальным, но область неустойчивости как в поперечном, так и в продольном к оси анизотропии направлениях существенно уменьшается [Emelyanov2023_Radiophys; Moya2022]), а длинноволновая граница области неустойчивости становится отличной от нуля (?). Помимо этого, апериодические неустойчивые моды теперь являются смешанными, то есть не являются ни ТЕ-, ни ТМ-модами.

Из-за нелинейной генерации мод в длинноволновой области, спектр турбулентности вскоре после насыщения неустойчивости сравнительно быстро расширяется в эту область (рис. ??b). Подобная сверхбыстрая генерация

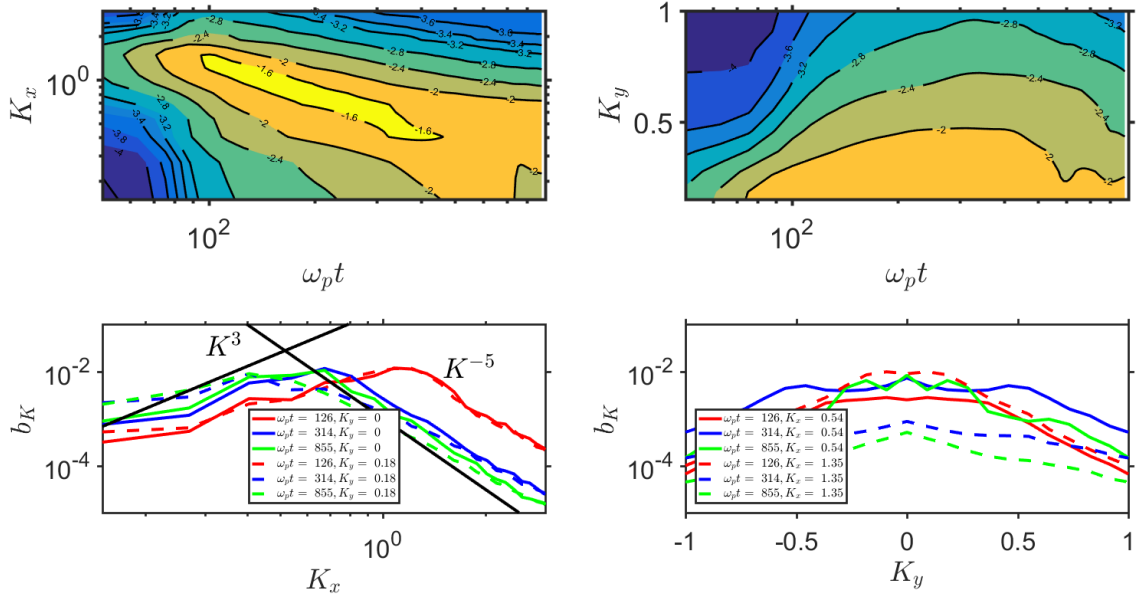


Рисунок 4.11 — Эволюция спектра турбулентности в двойном логарифмическом масштабе: (а) линии уровня логарифма усредненных вдоль оси анизотропии амплитуд мод магнитного поля $|b_K|$; (б) линии уровня логарифма усредненных поперек оси анизотропии амплитуд мод магнитного поля $|b_K|$; (в) спектр $|b_K|$ магнитного поля поперек оси анизотропии при продольных волновых числах $K_{\parallel} = 0$ (сплошная) и $K_{\parallel} = 0.18$ (пунктир). (г) спектр $|b_K|$ магнитного поля вдоль оси анизотропии при поперечных волновых числах $K_{\perp} = 0.54$ (сплошная) и $K_{\perp} = 1.35$ (пунктир) в моменты времени $\omega_p t$, равные 126 (красный цвет), 314 (синий), 855 (зеленый). Внешнее магнитное поле $b_{ext} = 0.44$.

длинноволновых, линейно устойчивых мод, которые уже на временах, двукратно превосходящих время насыщения неустойчивости, становятся основными энергонесущими модами, отсутствует в квазилинейном приближении, что предопределяет отличную эволюцию спектра. В квазилинейных аксиально симметричных симуляциях наблюдаются лишь не затухающие колебания линейно неустойчивых мод, а смещение спектра за пределы области линейной неустойчивости отсутствует. Поэтому на временах уже двукратно превышающих момент насыщения неустойчивости спектр существенно не квазилинеен, что отражается на распределении частиц по скоростям (ср. рис. ?? и рис. ??).

Тем не менее, многие черты квазилинейной эволюции спектральная динамика сохраняет: характерное волновое число по-прежнему смещается в длинноволновую область; более коротковолновые моды, чем характерная

в данный момент времени мода, осцилляционно затухают, а многие более длинноволновые, в том числе и нелинейно индуцированные при насыщении неустойчивости — нарастают по степенному закону. Затухание линейно неустойчивых гармоник замедляется в сравнении со случаем отсутствия внешнего магнитного поля и показатель их усредненного степенного затухания оценивается от -1.3 до -0.8 . Показатели степенного нарастания основных энергонесущих гармоник по-прежнему лежат в промежутке от 1 до 2, в том числе и для некоторых нелинейно индуцированных длинноволновых мод. Исключением из обеих оценок являются длинноволновые, почти поперечные, нелинейно индуцированные моды ($K_x \lesssim 0.6, K_y \lesssim 0.1$), показатели нарастания и затухания которых стремятся к нулю. Таким образом, хотя квазилинейное взаимодействие по-прежнему остается весьма существенным в присутствии внешнего магнитного поля, непосредственно вид наблюдаемого спектра турбулентного магнитного поля в значительной степени определяется прямым межмодовым нелинейным взаимодействием.

4.3.3 Динамика спектра шланговой турбулентности и нелинейное взаимодействие мод в подавляющем поперечные моды внешнем магнитном поле

Начиная с величины внешнего магнитного поля $b_{ext} = 0.59$ анализ линейного дисперсионного соотношения предсказывает устойчивость поперечных мод (рис. ??). Оптимальный волновой вектор (волновой вектор с наибольшим линейным инкрементом) при $b_{ext} = 0.59$ образует угол с осью анизотропии, приблизительно равный 77° , а область апериодической неустойчивости продолжает обужение как в продольном, так и в поперечном направлении. Топология области неустойчивости в трехмерном пространстве изменилась: ранее она состояла из одной связанной области, ограниченной квазитороидальной поверхностью, а теперь — из двух (рис. ??). В ходе нелинейной динамики спектра, как и в работах [Camporeale2008; Hellinger2014], наблюдается смещение его максимума в длинноволновую область и уменьшение отношения характерного поперечного волнового числа к продольному. На протяжении нелинейной эволюции существенны квазипоперечные моды ($K_{\parallel} < K_{\parallel opt}/2$), сгенерированные в широ-

ком диапазоне волновых чисел за счет трехволнового взаимодействия линейно неустойчивых мод и нарастающие с инкрементами, близкими к удвоенному максимальному инкременту (рис. ??c). К моменту насыщения неустойчивости амплитуда их магнитного поля в 2 – 4 раза ниже амплитуды магнитного поля наиболее линейно неустойчивой моды, а на временах в 3 – 4 раза более поздних они становятся основными энергонесущими модами. Моды с удвоенной к линейно неустойчивым модам продольной компонентой волнового вектора ($K_{\parallel} \approx 2K_{\parallel opt}$) генерируются за счет того же механизма в широком, сравнимом с областью линейной неустойчивости, диапазоне значений поперечной компоненты (рис. ??b). Аналогично, к моменту насыщения неустойчивости их амплитуда в 2 – 4 раза ниже амплитуды наиболее линейно неустойчивых мод. В течение последующей эволюции часть из них может стать основными энергонесущими модами, но к концу симуляций наблюдается затухание удвоенных продольных мод.

По-прежнему выделяются 4 возможные стадии эволюции для гармоник. Линейно неустойчивые апериодические моды испытывают экспоненциальный рост в соответствии с дисперсионным соотношением. После насыщения своего роста каждая мода в отдельности осцилляционно затухает. При насыщении неустойчивости наблюдается сверхбыстрый рост поперечных и удвоенных продольных мод.

Область волновых чисел, в которой наблюдается степенной рост, можно грубо оценить: $K_{\parallel opt} \lesssim K_{\parallel} \lesssim 2K_{\parallel opt}$, $0 \lesssim K_{\perp} \lesssim 2K_{\perp opt}$. В работах [Camporeale2008; Hellinger2014] предполагается, что длинноволновое смещение спектра с уменьшением угла наклона между характерным волновым вектором и магнитным полем происходит квазилинейно, и предпринимаются попытки его объяснить на основе линейной теории. Важно, что скорость их степенного роста сравнима со скоростью экспоненциального роста линейно неустойчивых мод (а при внешнем поле $b_{ext} = 0.71$ значительно превосходит), что кажется невероятным в контексте квазилинейного взаимодействия, так как наблюдаемое нарастание происходит при уже значительно изотропизованном распределении частиц по скоростям.

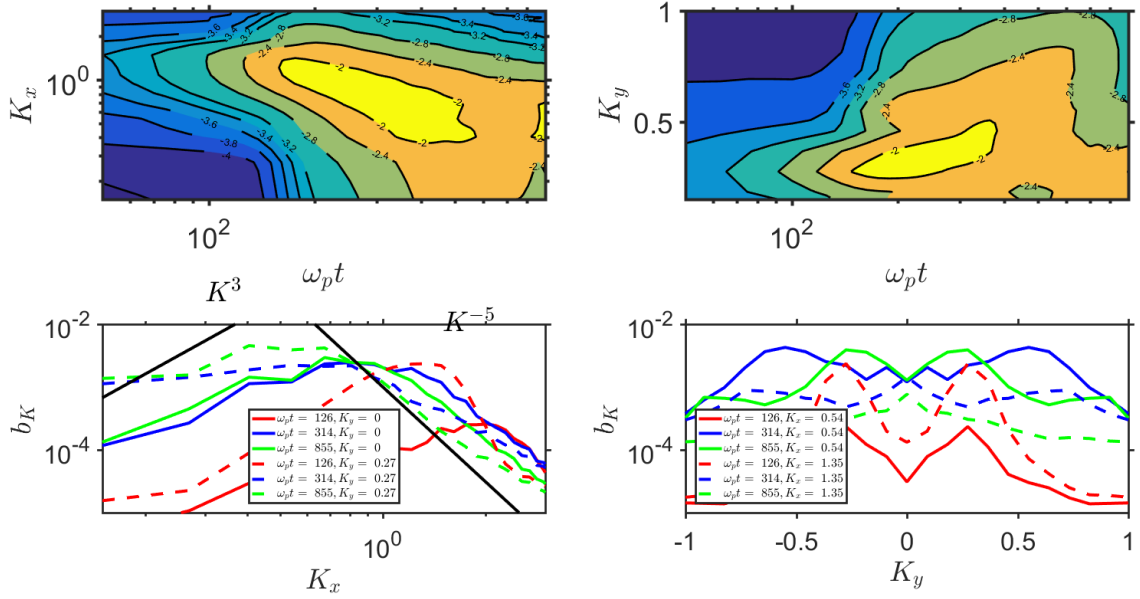


Рисунок 4.12 — Эволюция спектра турбулентности в двойном логарифмическом масштабе: (а) линии уровня логарифма усредненных вдоль оси анизотропии амплитуд мод магнитного поля $|b_K|$; (б) линии уровня логарифма усредненных поперек оси анизотропии амплитуд мод магнитного поля $|b_K|$; (в) спектр $|b_K|$ магнитного поля поперек оси анизотропии при продольных волновых числах $K_{\parallel} = 0$ (сплошная) и $K_{\parallel} = 0.27$ (пунктир). (г) спектр $|b_K|$ магнитного поля вдоль оси анизотропии при поперечных волновых числах $K_{\perp} = 0.54$ (сплошная) и $K_{\perp} = 1.35$ (пунктир) в моменты времени $\omega_p t$, равные 126 (красный цвет), 314 (синий), 855 (зеленый). Внешнее безразмерное магнитное поле $b_{ext} = 0.59$.

4.3.4 Шланговая турбулентность и нелинейное взаимодействие мод в сильном внешнем магнитном поле

Оптимальный волновой вектор линейного роста аperiодической неустойчивости при $b_{ext} = 0.78$ образует угол с осью анизотропии, приблизительно равный 70° , а область неустойчивости крайне обужена около соответствующей моды. К моменту насыщения неустойчивости наблюдается нелинейная генерация не только поперечных и удвоенных продольных мод, но и гармоник с примерно утроенным и даже учетверенным оптимальным продольным волновым числом (рис. ??d), что придает спектру вдоль оси анизотропии гребенчатую форму. Далее в ходе нелинейной эволюции поперечное волновое

число наиболее энергонесущих мод уменьшается, а продольное — увеличивает-ся. Вслед за спектральным смещением наиболее энергонесущих мод происходит пропорциональное смещение кратных индуцированных гармоник. Вследствие этого спектр сглаживается в продольном направлении, теряя гребенчатую форму. Подобный процесс происходил и при меньшем поле $b_{ext} = 0.59$, но был менее заметен из-за скоротечности и более широкого спектра линейно неустойчивых мод.

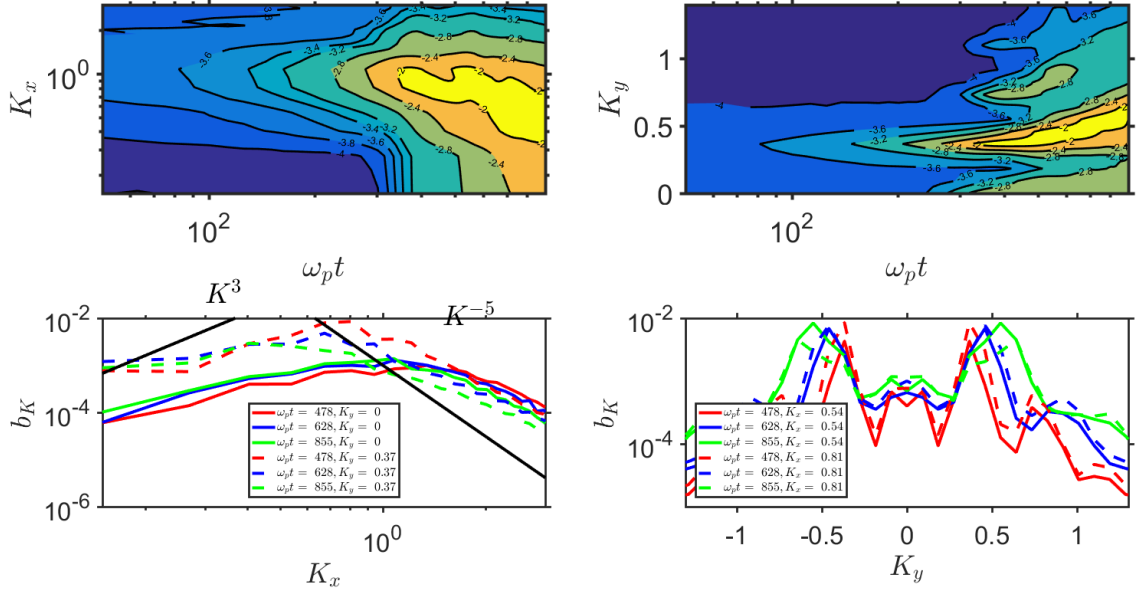


Рисунок 4.13 — Эволюция спектра турбулентности в двойном логарифмическом масштабе: (а) линии уровня логарифма усредненных вдоль оси анизотропии амплитуд мод магнитного поля $|b_K|$; (б) линии уровня логарифма усредненных поперек оси анизотропии амплитуд мод магнитного поля $|b_K|$; (с) спектр $|b_K|$ магнитного поля поперек оси анизотропии при продольных волновых числах $K_{||} = 0$ (сплошная) и $K_{||} = 0.37$ (пунктир). (d) спектр $|b_K|$ магнитного поля вдоль оси анизотропии при поперечных волновых числах $K_{\perp} = 0.54$ (сплошная) и $K_{\perp} = 0.81$ (пунктир) в моменты времени $\omega_p t$, равные 478 (красный цвет), 628 (синий), 855 (зеленый). Внешнее безразмерное магнитное поле $b_{ext} = 0.71$.

На протяжении линейной неустойчивости происходит экспоненциальный рост смешанных апериодических мод в соответствии с линейной теорией. При насыщении неустойчивости наблюдается нелинейная генерация квазипоперечных ($K_{||} < K_{||opt}/2$), удвоенных ($K_{||} \approx 2K_{||opt}$) и утроенных ($K_{||} \approx 3K_{||opt}$) продольных гармоник, а также гармоник на коротковолновом хвосте области

неустойчивости ($(K_{\parallel} \approx K_{\parallel opt}, K_{\perp} \gtrsim 2K_{\perp opt})$). Квазипоперечные моды нарастают с инкрементами, близкими к удвоенным вследствие трехволнового взаимодействия. Подобно четырехволновой генерации утроенной моды в отсутствие внешнего магнитного поля, для нелинейной генерации гармоник на коротковолновом хвосте линейной области неустойчивости должны сложиться три основные энергонесущие моды (рис. ??b). Инкременты нелинейного роста удвоенных продольных мод оценить затруднительно из-за шумов, однако они оказываются существенно выше удвоенного линейного, что дает основание предполагать генерацию этих гармоник не только посредством простого сложения двух линейно неустойчивых мод, но и за счет нелинейных взаимодействий более высокого порядка. То же касается и генерации утроенной продольной моды (рис. ??d). К насыщению неустойчивости уровень квазипоперечных и удвоенных продольных мод примерно на порядок ниже основной энергонесущей моды, утроенной продольной — на два порядка, гармоник коротковолнового хвоста — примерно полтора порядка. В ходе нелинейного смещения максимума спектра в линейно устойчивую область происходит быстрая, нелинейная генерация мод, отдельные участки которой лучше аппроксимируются экспоненциальной функцией, а отдельные — степенной с показателем, достигающим 10.

4.4 Условия применимости квазилинейного подхода к описанию шланговой турбулентности

низкое внешнее магнитное поле

Глава 5. Зависимость насыщающего вейбелевскую неустойчивость магнитного поля от вида распределения частиц по скоростям в одномерном и двумерном случаях

Неравновесной плазме, частицы которой испытали стохастическое ускорение под действием того или иного широкополосного электромагнитного излучения свойственно наличие надтеплого „хвоста“ в энергетическом распределении частиц [Maksimovic2005; Vasyliunas1968; Lazar2022]. В этой связи актуальны задачи лабораторной астрофизики с лазерной плазмой [Romanov2004; Thaury2010; Silva2020; Shukla2020; Zhang2020], получаемой абляцией различных мишеней фемтосекундными импульсами петаваттных лазеров, и задачи физики солнечного (звездного) ветра, начиная с корональных областей его происхождения и кончая границами между магнитными облаками в нем или областями его взаимодействия с магнитосферами планет [Baumjohann2012; Dudik2017; Livadiotis2017; Marsch2006; Yoon2017; Echim2010]. Для обоих указанных классов задач имеется непосредственная возможность получать информацию как о распределении частиц по энергии, так и об анизотропии распределения частиц по скоростям. Наблюдаемый надтепловой „хвост“, свойственный также различным каппа-распределениям, делает последние удобными для использования в численном моделировании процессов развития вейбелевской неустойчивости и генерации долгоживущей квазимагнитостатической турбулентности.

В рамках обычно рассматриваемой начальной пространственно однородной задачи неоднократно проверялось, что возникающая с уровня шумов турбулентность и среднеквадратичная величина связанного с ней магнитного поля в существенной мере зависят от начальной анизотропии распределения частиц [Lemons1979; Kato2005; Borodachev2010; Davidson1972; Ruyer2015; Lazar2022]. Тем не менее эта зависимость остается мало изученной, особенно если учесть чувствительность выводов о развитии вейбелевской неустойчивости к виду распределения частиц по энергиям [Lazar2010; Silva2021].

Для определенности эффективная температура частиц считается наибольшей вдоль оси y . Тогда если бы в трехмерном случае функция распределения (ФР) частиц обладала аксиальной симметрией по отношению к скоростям

в плоскости x, z , то неустойчивость развивалась только для волновых возмущений необыкновенного типа и приводила к ТМ-вейбелевской турбулентности [Kalman1968; Vagin2014]. Имея в виду аналогичную ситуацию для рассматриваемых ниже двумерных расчетов, будем считать ФР симметричной по проекции скорости частиц на ось x , т.е. не зависящей от знака этой проекции. Для интересующих нас ТМ-возмущений волновые векторы гармоник электромагнитного поля и соответствующих гармоник анизотропной ФР энергонесущих частиц (пусть электронов), как и вектор электрического поля, лежат в плоскости x, y , а вектор магнитного поля ортогонален этой плоскости, т.е. параллелен оси z (рис. ??б). Неустойчивость насыщается, т.е. прекращается рост среднеквадратичного магнитного поля, тогда, когда оно в достаточной мере выравнивает средние значения продольной (T_{\parallel} , вдоль оси y) и поперечной (T_{\perp} , вдоль оси x) эффективных температур. При этом присутствие этого поля, его пространственная неоднородность и понизившийся и тоже неоднородный уровень анизотропии $A = T_{\parallel}/T_{\perp} - 1$ исключают экспоненциальное нарастание каких-либо возмущений, в том числе крупномасштабных, хотя слабонелинейная перестройка пространственного спектра турбулентности в длинноволновую сторону продолжается и далее (см., например, [Kocharovsky2016; Zhou2022; Borodachev2016_Radiofiz; Dieckmann2009; Romanov2004]). Детальнее постановка задачи, используемые приближения, схема вывода уравнений и особенности расчетов даны в следующем разделе. Далее приведены основные результаты расчетов, касающиеся зависимости насыщающего магнитного поля вейбелевской турбулентности от начальной анизотропии плазмы и от основного параметра κ энергетического капша-распределения. В заключительном разделе полученные выводы соотнесены с рядом актуальных проблем физики космической и лазерной плазмы. Проведенное моделирование показало также богатую динамику пространственного спектра вейбелевской турбулентности и согласованной деформации функции распределения частиц на долговременной нелинейной стадии неустойчивости после ее насыщения. Однако изложение результатов такого рода выходит за рамки настоящего краткого сообщения и будет дано в более подробной статье.

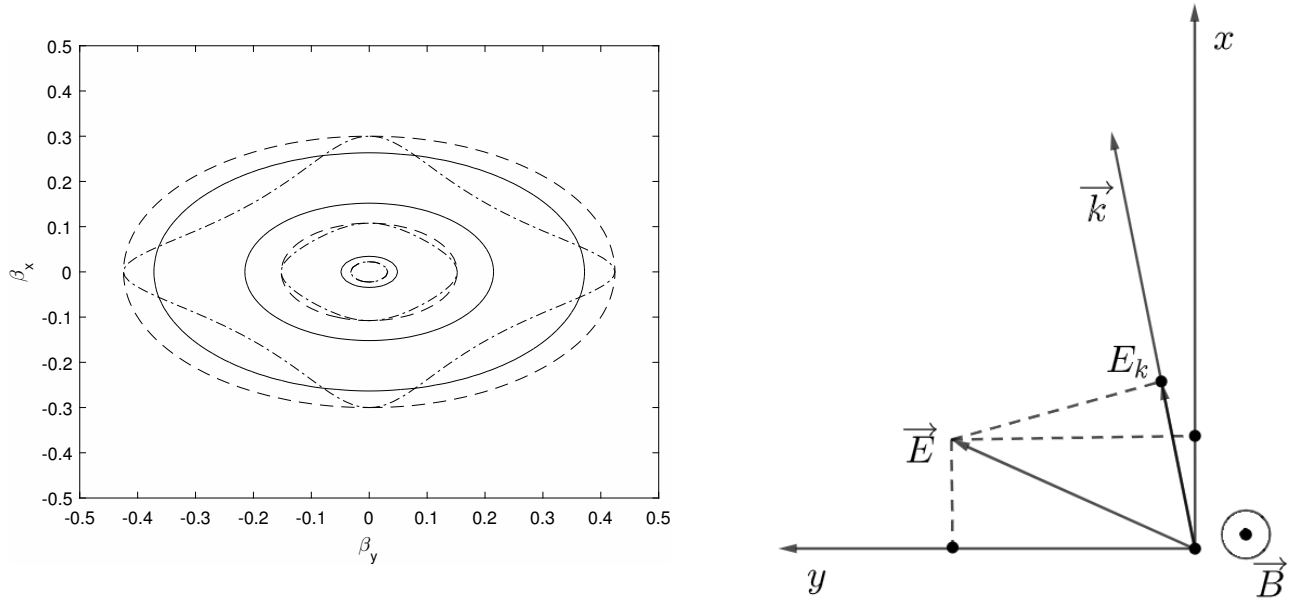


Рисунок 5.1 — а) Линии уровня 0.001, 0.1 и 0.9 от максимального значения для бимаксвелловской (сплошная кривая), бикаппа- (штриховая) и продукт-бикаппа- (штрихпунктир) функций распределения электронов по нормированным скоростям β_x и β_y при $\kappa = 2$, поперечной (вдоль оси x) тепловой скорости $\beta_{\perp} = 0.1$ и параметре анизотропии $A = 1$. б) Взаимное расположение волнового вектора \vec{k} , лежащего в плоскости x, y , и векторов магнитного \vec{B} и электрического \vec{E} полей в отдельной пространственной гармонике ТМ-вейбелевской турбулентности.

5.1 Постановка задачи, уравнения для гармоник и схема их решения

В пределе $\kappa \rightarrow \infty$ распределения (??), (??) сводятся к бимаксвелловскому:

$$\Psi(\vec{\beta}) = \frac{1}{\pi\beta_{\perp}\beta_{\parallel}} \exp\left(-\frac{\beta_x^2}{\beta_{\perp}^2} - \frac{\beta_y^2}{\beta_{\parallel}^2}\right). \quad (5.1)$$

Его характерные сечения, как и сечения распределений (??), (??) при $\kappa = 2$, представлены на рис. ??а для параметра анизотропии $A = 1$. Здесь и ниже в иллюстрациях и расчетах для определенности полагаем $\beta_{\perp} = 0.1$: конкретное значение этого параметра не влияет на основные выводы работы. На рис. ??б для поставленной задачи показано расположение векторов электрического \vec{E} и магнитного \vec{B} полей рассматриваемых однородных гармоник необыкновенного

типа $\exp(-i\vec{k}\vec{r})$ с волновым вектором \vec{k} , проекция на который электрического поля в общем случае не равна нулю: $E_k \neq 0$.

С целью анализа насыщения развивающейся ТМ-вейбелевской неустойчивости используем приближенный метод разложения по пространственным гармоникам решения уравнений Власова – Максвелла с шумоподобным начальным возмущением магнитного поля, обладающим примерно равномерным спектром в области неустойчивых волновых чисел. Такой метод можно применять в виду слабой нелинейности (квазилинейности) кинетического уравнения Власова в рассматриваемых условиях: для любой отдельной гармоники магнитного (и соответствующего электрического) поля $B_1(t, \vec{r}) = \text{Re} [B_1(t) \exp(-i\vec{k}\vec{r})]$ с волновым вектором \vec{k} можно не учитывать кратные гармоники $\ell\vec{k}$ с целым $\ell > 1$ и необходимо учесть только три гармоники поправок к ФР, $\delta f_\ell(t, \vec{r}) = \text{Re} [f_\ell(t) \exp(-i\ell\vec{k}\vec{r})]$, со значениями $\ell = 0, 1, 2$. При этом наличие большого числа однотипных гармоник, обладающих случайными фазами и достаточно плотно заполняющих значимую область волновых векторов, обеспечивает гладкую форму и плавность изменения ФР, исключая сколько-нибудь значительные эффекты когерентной интерференции и допуская неадекватный вид ФР, например отрицательные ее значения, только при скоростях много больше эффективных тепловых, т. е. для очень малой, несущественной фракции электронов.

Качественные оценки и численные решения полученной системы уравнений показывают, что насыщение отдельной основной гармоники магнитного поля $B_1(t)$, непосредственно создаваемой первой гармоникой ФР $f_1(t)$, по существу определяется согласованной динамикой нулевой и второй гармоник ФР $f_{0,2}(t)$, но не третьей (и высшими) гармониками магнитного поля и ФР. Благодаря слабой нелинейности (квазилинейности) процесса вейбелевской неустойчивости нарушение применимости используемой теории возмущений можно ожидать лишь для сильно изрезанных анизотропных функций распределения частиц, не представляющих интереса для рассматриваемого нами круга задач.

Используем последнее обстоятельство и в общем случае двумерно-неоднородной задачи с большим числом $m \cdot s$ неколлинеарных производящих гармоник $\{(k_1; k_1), (k_1; k_2), \dots, (k_2; k_1), \dots, (k_m; k_s)\}$ (их компоненты состоят из m проекций $\vec{k}\vec{x}_0$ и s

проекций $\vec{k}\vec{y}_0$), расположенных часто и перекрывающих всю существенную область волновых векторов неустойчивости. В этом представлении магнитное поле имеет вид суммы по целочисленному векторному индексу $\vec{n} = (n_x, n_y)$: $B(t, x, y) = \text{Re} \sum_{n_x=1}^m \sum_{n_y=1}^s B_{k_{\vec{n}}}(t) \exp(-ik_{n_x}x - ik_{n_y}y)$. Аналогичный вид имеет каждая из двух кратных гармоник-возмущений ФР, т.е. компонент $\delta f_1(t, x, y)$ и $\delta f_2(t, x, y)$, разложенных на комплексные гармоники $f_{1k_{\vec{n}}}(t)$ и $f_{2k_{\vec{n}}}(t)$ соответственно; нулевая (действительная) гармоника $f_0(t) = \delta f_0(t)$ зависит только от вектора скорости и дает поправку к ФР, усредненную по плоскости x, y . Подобно обоснованному выше пренебрежению кратными коллинеарными гармониками, в приведенной ниже приближенной системе самосогласованных уравнений исключены неколлинеарные суммарные и разностные гармоники $\vec{k}_j + \vec{k}_i$, $\vec{k}_j - \vec{k}_i$, а также неколлинеарные гармоники вида $2\vec{k}_i \pm \vec{k}_j$:

$$\frac{\partial \psi_0}{\partial \tau} + \sum_{n_x, n_y=1}^{m, s} \left(\hat{\Phi}(b_{K_{\vec{n}}}, \psi_{K_{\vec{n}}}^*) + \hat{\Phi}^*(b_{K_{\vec{n}}}^*, \psi_{K_{\vec{n}}}) \right) = 0, \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial \psi_{K_{\vec{n}}}}{\partial \tau} + iK_{n_x} \beta_x \psi_{K_{\vec{n}}} + iK_{n_y} \beta_y \psi_{K_{\vec{n}}} + 2\hat{\Phi}(b_{K_{\vec{n}}}, \Psi(\vec{v}) + \psi_0) + \hat{\Phi}^*(b_{K_{\vec{n}}}^*, \psi_{2K_{\vec{n}}}) = 0, \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial \psi_{2K_{\vec{n}}}}{\partial \tau} + 2iK_{n_x} \beta_x \psi_{2K_{\vec{n}}} + 2iK_{n_y} \beta_y \psi_{2K_{\vec{n}}} + \hat{\Phi}(b_{K_{\vec{n}}}, \psi_{K_{\vec{n}}}) = 0, \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial b_{K_{\vec{n}}}}{\partial \tau} = -ie_y K_{\vec{n}} K_{n_x} + ie_x K_{\vec{n}} K_{n_y}, \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial e_x K_{\vec{n}}}{\partial \tau} = ib_{K_{\vec{n}}} K_{n_y} - \beta_{\parallel}^{-1} \int \int_{-\infty}^{+\infty} \beta_x \psi_{K_{\vec{n}}}(\tau, \beta_x, \beta_y) d\beta_x d\beta_y, \quad (5.6)$$

$$\frac{\partial e_y K_{\vec{n}}}{\partial \tau} = -ib_{K_{\vec{n}}} K_{n_x} + \beta_{\parallel}^{-1} \int \int_{-\infty}^{+\infty} \beta_y \psi_{K_{\vec{n}}}(\tau, \beta_x, \beta_y) d\beta_x d\beta_y. \quad (5.7)$$

Здесь использованы безразмерные время и волновое число,

$$\tau = \omega_p t, \quad K = \frac{kc}{\omega_p}; \quad \omega_p^2 = \frac{4\pi N e^2}{m_e},$$

а также нормированные (комплексные) гармоники магнитного поля и ФР:

$$b_{K_{\vec{n}}} = \frac{B_{K_{\vec{n}}}}{\sqrt{8\pi N T_{\parallel}}}, \quad T_{\parallel} = \frac{m_e c^2 \beta_{\parallel}^2}{2}; \quad \psi_{\ell \cdot K_{\vec{n}}} = \frac{c^2 f_{\ell \cdot K_{\vec{n}}}}{N}, \quad \ell = 0, 1, 2. \quad (5.8)$$

Комплексные компоненты электрического поля $e_{xK_{\vec{n}}}$ и $e_{yK_{\vec{n}}}$ (см. рис. ??б) нормированы так же, как магнитное поле $b_{K_{\vec{n}}}$. Для двумерной задачи введен оператор

$$\hat{\Phi}(b_{K_n}, e_{xK_{\vec{n}}}, e_{yK_{\vec{n}}}, \psi(\vec{\beta})) = \frac{e_{yK_{\vec{n}}}}{2} \frac{\partial \psi(\vec{\beta})}{\partial \beta_y} + \frac{e_{xK_{\vec{n}}}}{2} \frac{\partial \psi(\vec{\beta})}{\partial \beta_x} - \frac{b_{K_n}}{2} \left(\beta_x \frac{\partial \psi(\vec{\beta})}{\partial \beta_y} - \beta_y \frac{\partial \psi(\vec{\beta})}{\partial \beta_x} \right) \quad (5.9)$$

который отличается от указанного ранее оператора (??) в одномерной задаче.

Представленная система интегро-дифференциальных уравнений (??)–(??) с оператором (??) решалась стандартным методом Стёрмера – Верле (Leapfrog) [Birdsall2018].

Шаг по времени $d\tau$ составлял малую величину $d\tau \sim 0.05\text{--}0.5$ в сравнении с наименьшим временным масштабом рассматриваемой безразмеренной системы уравнений, который определяется собственными длинами волн магнитного поля и тока ($\sim \pi/K$) и имеет порядок единицы. Расчетная сетка для нормированных скоростей β_x , β_y как переменных трех компонент (??)–(??) анизотропной ФР, разложенных по производящим гармоникам, выбиралась анизотропной с соответствующими шагами $d\beta_x \sim \beta_{\perp}/15$ и $d\beta_y \sim \beta_{\parallel}/15 = \beta_{\perp}\sqrt{1+A}/15$. Количество производящих пространственных гармоник $m \cdot s$ в типичных расчетах составляло несколько тысяч и выбиралось из условия независимости (с точностью до нескольких процентов) вычисляемого магнитного поля насыщения неустойчивости от дальнейшего увеличения чисел m и s , что обычно имело место начиная с чисел ~ 100 и ~ 30 соответственно.

5.2 Особенности насыщения неустойчивости для различных анизотропных распределений электронов

Основные результаты численного моделирования вейбелевской неустойчивости в двумерной задаче 2D2V суммированы на рис. ?? и ?? в представительном интервале параметров начальной анизотропии $0.1 \leq A \leq 20$. Как и ожидалось, максимальная величина среднего квадрата нормированного магнитного поля $b_{sat}^2 = (8\pi NT_{\parallel})^{-1} \sum_{\vec{n}} |B_{K_{\vec{n}}}|^2$, достигаемая в ходе ТМ-неустойчивости и иногда называемая магнетизацией, растет с увеличением величины A . При малых значениях $A < 1$ рост оказывается довольно быстрым и зависящим от

энергетического распределения электронов. Он теряет эту зависимость и замедляется при $A > 1$, останавливаясь на уровне немного выше 10% в пределе $A \gg 1$. О последнем свидетельствуют также контрольные расчеты, выполненные для бимаксвелловского распределения с $A = 1, 10, 30$ с использованием кода EPOCH [Arber2015] в 2D3V подходе, т.е. методом частиц в ячейках (PIC) с учетом зависимостей всех величин от двух пространственных координат и всех трех компонент скоростей электронов. Результаты применения обоих подходов совпадают с точностью порядка 10%-30% и подтверждают известную оценку насыщающего магнитного поля, в которой обратный гирорадиус и гирочастота типичных частиц по порядку величины сравниваются соответственно с волновым числом и инкрементом наиболее сильно выросших гармоник поля [Borodachev2016_Radiofiz; Nechaev2019_Radiophys; Garasev2022_JPP], что было проверено для всех проведенных расчетов. Предшествующие аналогичные расчеты для отдельных значений параметра анизотропии $A = 24$ и $A = 99$ см. в [Morse1971; Stockem2009]. Осуществленный впервые детальный расчет зависимости насыщающего магнитного поля от параметра анизотропии в данной геометрии задачи стал возможен благодаря разработанному методу на основе уравнений для гармоник $(??)-(??)$, $(??)$, который позволяет осуществлять вычисления во много раз быстрее, чем метод частиц в ячейках. С использованием последнего трехмерные расчеты подобной зависимости ни для какой геометрии еще не проводились, а детальные двумерные расчеты известны лишь для аксиально симметричного бимаксвелловского распределения частиц с осью наибольшей температуры, ортогональной плоскости расчета, для параметров анизотропии $A \sim 1-50$ [Kato2005; Borodachev2010] (примеры насыщения аналогичной неустойчивости, называемой филаментационной, в случае двух встречных пучков частиц см. в [Dieckmann2009; Ruyer2015]). В указанном случае вейбелевской ТМ-неустойчивости насыщающее поле отличается от представленных на рис. ??, ?? значений на величину $\sim 10\% - 50\%$, что связано с учетом только ортогональных оси анизотропии волновых векторов, приводящим к двумерно изотропной турбулентности. В нашем случае, когда допустимы любые углы наклона волнового вектора к оси анизотропии y , лежащей в плоскости расчета, спектр турбулентности оказывается существенно анизотропным и для насыщения неустойчивости магнитное поле должно нарасти до немного другой величины.

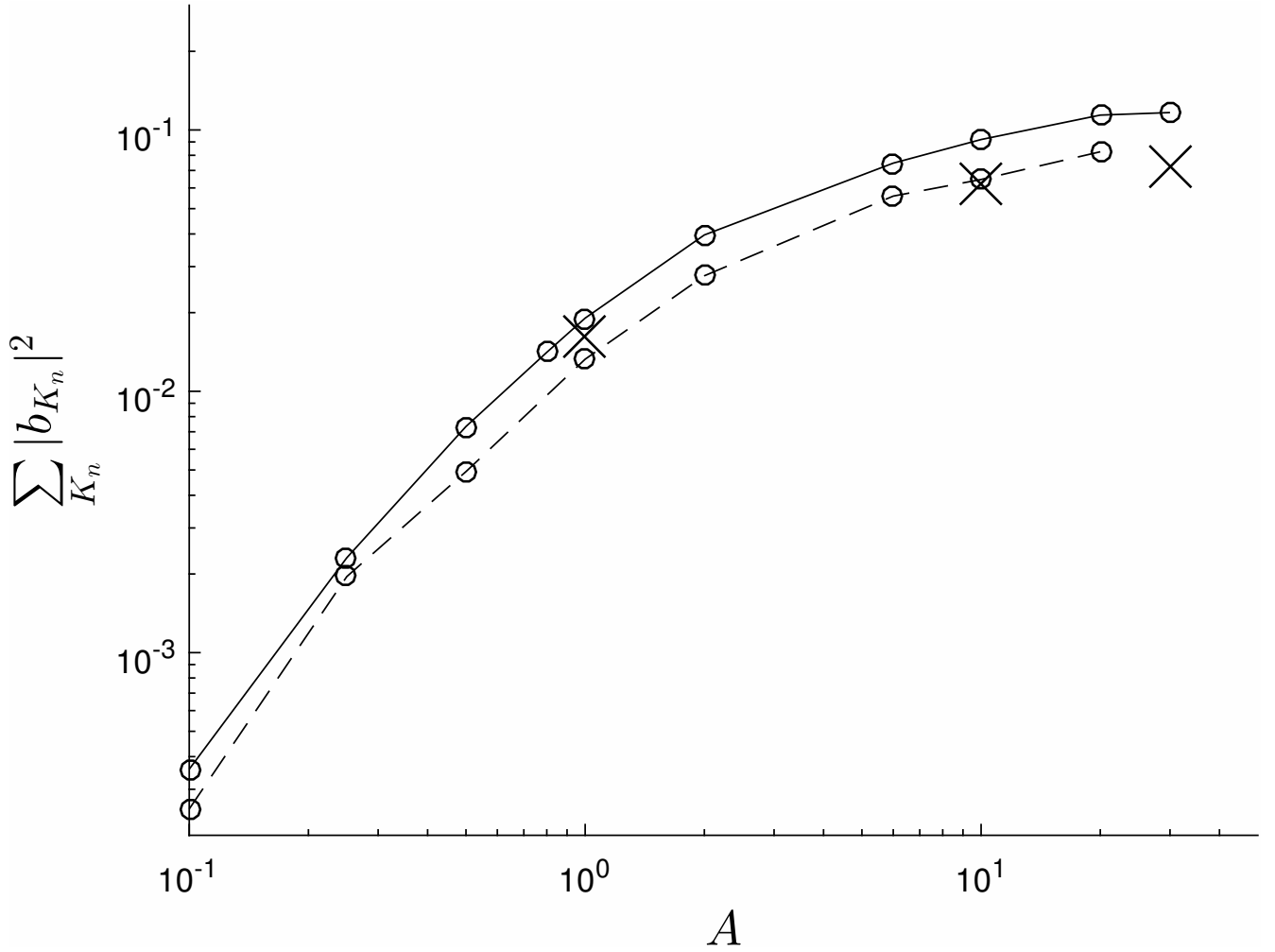


Рисунок 5.2 — Зависимость среднего квадрата нормированного насыщающего магнитного поля (см. (??)) от параметра анизотропии A для бикаппа-распределения (??) при $\beta_{\perp} = 0.1$ и различных значениях параметра каппа: $\kappa = 2$ — штрихи, $\kappa = \infty$ — сплошная кривая (бимаксвелловское распределение). В последнем случае крестиками показаны три контрольные точки, рассчитанные в рамках 2D3V кода ЕРОСН методом частиц в ячейках.

Проведенные нами одномерные расчеты по уравнениям (??)-(??) для набора гармоник с нулевой проекцией волнового вектора на ось y при $A \gg 1$ хотя и не являются вполне корректными, но дают тот же порядок величины турбулентного магнитного поля, ортогонального направлению наибольшей температуры, вдоль которого преимущественно возбуждаются вейбелевские токи и направлено электрическое поле (ТМ-волна в этом вырожденном случае становится обыкновенной). Сказанное согласуется с результатами давно проведенных одномерных PIC-расчетов 1D3V с осью неоднородности, параллельной оси анизотропии, вдоль которой температура минимальна; см,

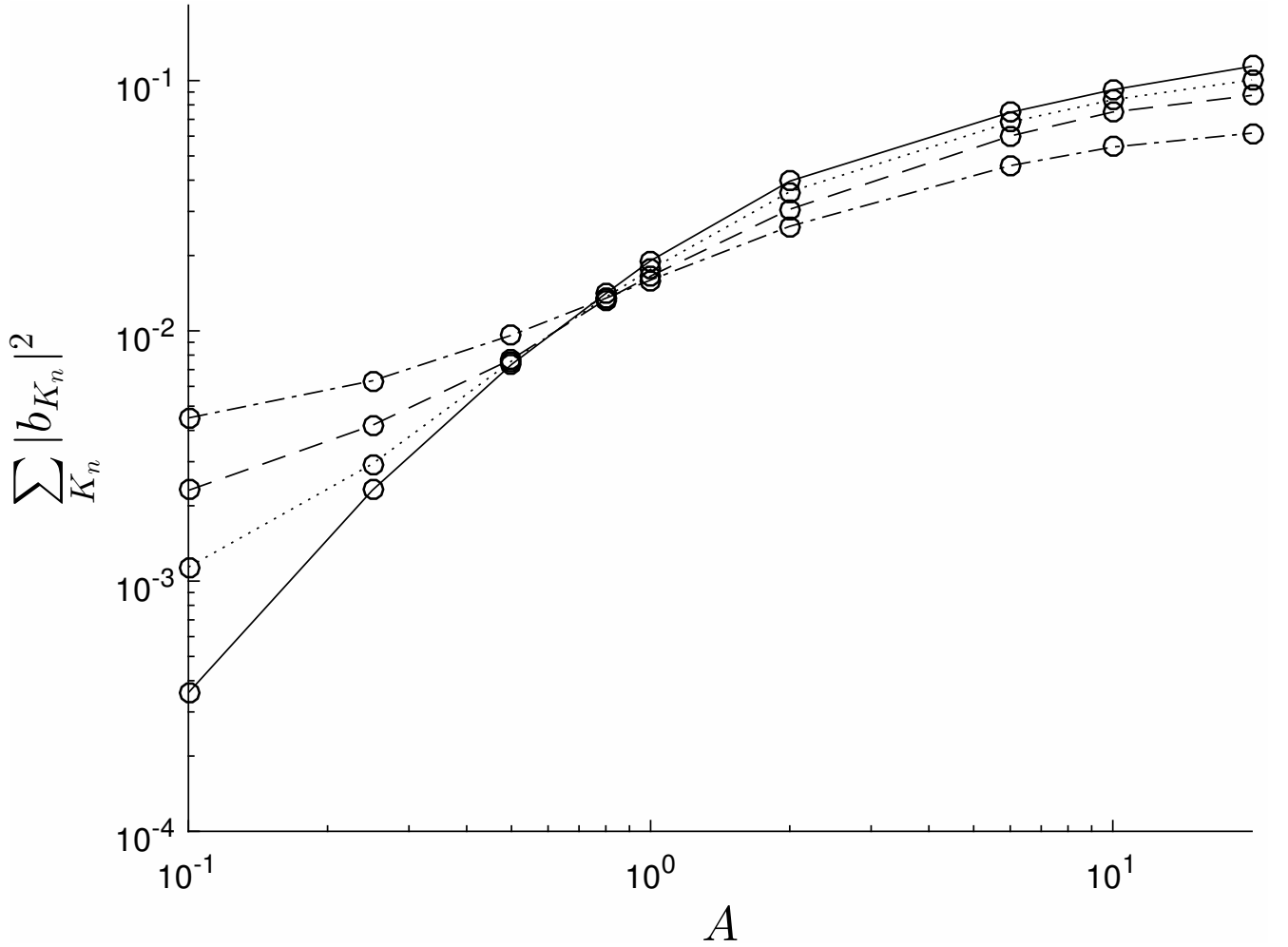


Рисунок 5.3 — Зависимость среднего квадрата нормированного насыщающего магнитного поля (см. (??)) от параметра анизотропии A для продакт-бикаппа-распределения (??) при $\beta_{\perp} = 0.1$ и различных значениях параметра каппа: $\kappa = 1$ — штрихпунктир, $\kappa = 2$ — штрихи, $\kappa = 4$ — пунктир, $\kappa = \infty$ — сплошная кривая (бимаксвелловское распределение).

например, [Lemons1979; Stockem2010; Seough2015] и указанную там литературу. Для малых параметров анизотропии $A \ll 1$ одномерные расчеты, как и приближенная квазилинейная теория (ср. [Pokhotelov2011; Dieckmann2009; Ruyer2015]), многократно занижают насыщающее магнитное поле и неприменимы для оценки его реальных значений в двумерной и трехмерной постановках задачи. При этом критерии насыщения, по-видимому, могут быть весьма чувствительны к виду ФР и геометрии задачи, определяющим типы неустойчивости, причем как ТМ- (для необыкновенной волны), так и ТЕ- (для обыкновенной волны) типы могут развиваться одновременно. Сравнительный анализ различных качественных критериев насыщения вейбелевской

неустойчивости выходит за рамки настоящей работы; они обсуждаются, например, в работах [Kocharovsky2016; Kato2005; Stockem2009; Stockem2010; YOON2011].

Недостатком метода частиц в ячейках, кроме больших затрат вычислительных ресурсов, является высокий уровень численных шумов ФР частиц, вообще говоря, спектрально неравномерный. Это обстоятельство понижает точность и ограничивает возможность проведения корректных расчетов, особенно при малых параметрах анизотропии $A \ll 1$, когда ТМ- и ТЕ-неустойчивости развиваются настолько медленно, что скорость изотропизации частиц на шумовой компоненте электромагнитного поля становится сравнимой с инкрементом вейбелевской неустойчивости. Такого недостатка нет в развитом методе возмущений на основе пространственных гармоник, где шумы легко контролируются и могут быть адекватно заданы выбором подходящего спектра начального магнитного поля. Вместе с тем достоинством метода частиц в ячейках является кинетический учет всех трех компонент скорости частиц в двумерных (2D3V) и даже одномерных (1D3V) расчетах, отсутствующий в развитом здесь методе. Наконец, методом частиц в ячейках можно одновременно рассчитывать ТМ- и ТЕ-неустойчивости вейбелевского типа и другие кинетические неустойчивости, например пучковую для ленгмюровских волн. Таким образом, результаты расчетов согласно двум сравниваемым подходам вне рамок рассматриваемой рафинированной двумерной задачи о ТМ-турбулентности могут заметно различаться.

5.2.1 Бимаксвелловское и бикаппа-распределения

Согласно проведенным расчетам с использованием уравнений (??)–(??), для бимаксвелловского распределения средний квадрат насыщающего магнитного поля ТМ-вейбелевской неустойчивости b_{sat}^2 лишь немного, не более чем на 30% превышает его значение для бикаппа-распределений при $\kappa \geq 2$; см. рис. ??. Более того, для этих бикаппа- и бимаксвелловского распределений характерные волновые числа k_x , отвечающие максимуму спектра развивающейся турбулентности в ортогональном оси анизотропии направлении \vec{x}_0 , и характерные ширины этого спектра вдоль осей x и y оказались почти

идентичными как на линейной стадии неустойчивости, так и в течении ее долговременной квазилинейной эволюции. Близость значений насыщающего магнитного поля для указанных распределений (??) и (??) согласуется с близостью инкрементов обусловленных ими вейбелевских неустойчивостей (рис. ??), найденных из численных расчетов среднеквадратичного магнитного поля на этапе его экспоненциального роста задолго до момента насыщения. Эти инкременты лишь немного меньше максимальных инкрементов, вычисленных из соответствующих дисперсионных уравнений (о последних см., например, [Mikhailovsky1971; Lazar2006; Vagin2014; Kocharovsky2016; Ruyer2015; Silva2021]).

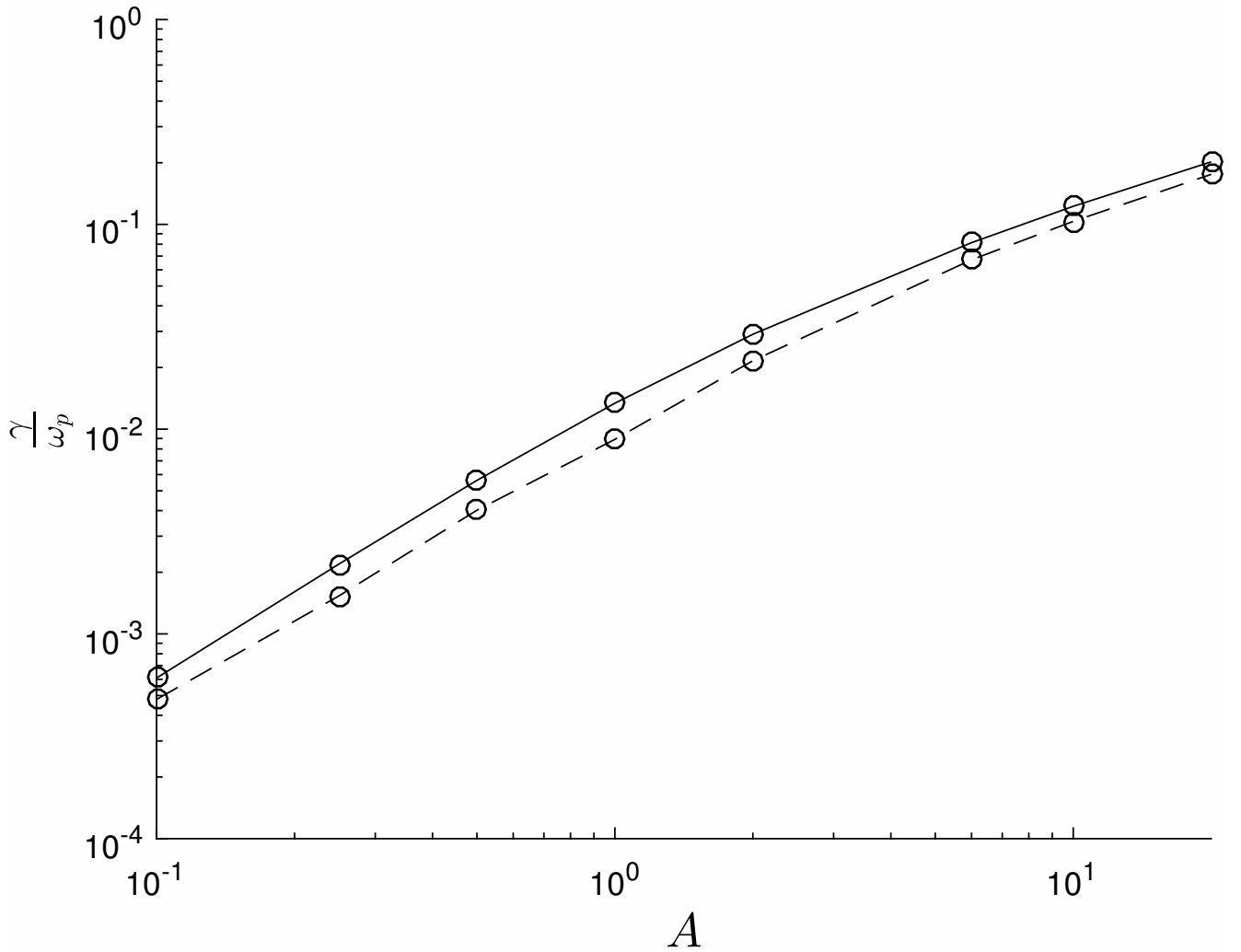


Рисунок 5.4 — Зависимость инкремента γ (нормированного на плазменную частоту ω_p) среднеквадратичного магнитного поля от параметра анизотропии A для бикаппа-распределения (??) при $\beta_{\perp} = 0.1$ и различных значениях параметра каппа: $\kappa = 2$ — штрихи, $\kappa = \infty$ — сплошная кривая (бимаксвелловское распределение).

Полученный результат согласуется также с практически одинаковой формой деформации указанных ФР электронов к моменту насыщения неустойчивости, о чем можно судить, прежде всего, из найденных в наших расчетах пространственно однородных поправок $\delta f_0(v_x, v_y)$, т. е. $\psi_0(\beta_x, \beta_y)$. Соответствующая деформация ФР вызвана совокупным действием всех гармоник квазимагнитостатической турбулентности и в свою очередь определяет квазилинейную эволюцию каждой из этих гармоник, непосредственно не взаимодействующих между собой: их начальное нарастание, длительное существование с медленным изменением амплитуды и последующее неизбежное затухание. Более подробный анализ данного круга явлений, изученных нами численно, заслуживает отдельной публикации и может позволить продвинуться в аналитическом описании двумерной ТМ-турбулентности после ее насыщения, а также дополнить имеющуюся квазилинейную теорию одномерной вейбелевской неустойчивости при малых значениях параметра анизотропии A [Pokhotelov2011].

5.2.2 Продакт-бикаппа-распределение

Детализируем сделанные выше общие утверждения применительно к продакт-бикаппа-распределению (??), для которого обнаруживается существенное влияние величины κ на исследуемую зависимость насыщающего поля от начальной анизотропии ФР, особенно в области ее малых величин $A < 0.8$ согласно рис. ?? . Монотонные зависимости среднего квадрата насыщающего магнитного поля от параметра анизотропии A для различных величин κ имеют разный наклон и пересекаются в одной точке $A = 0.8$. При $A \sim 0.1$ эти зависимости приближенно являются степенными с показателями, которые примерно равны $2/5, 2/3, 1, 2$ для $\kappa = 1, 2, 4, \infty$ соответственно (и могут оказаться меньше при $A < 0.1$).

Ниже точки $A = 0.8$ квадрат насыщающего магнитного поля b_{sat}^2 значительно падает с ростом величины κ , достигая минимального значения при $\kappa \rightarrow \infty$, т. е. для бимаксвелловского распределения. Напротив, выше указанной точки $A = 0.8$ величина b_{sat}^2 растет с ростом κ , хотя и не столь значительно, поскольку ее максимальное значение для величины κ вблизи 1 составляет несколько процентов и всего в пару раз меньше предельно достижимого зна-

чения квадрата магнитного поля b_{sat}^2 , реализующегося для бимаксвелловского распределения и немного превышающего 10%.

Для продакт-бикаппа-распределений в отличие от бикаппа-распределений величина κ гораздо значительнее влияет на нелинейную эволюцию как характерного волнового числа k_x , отвечающего максимуму спектра турбулентности и направленного в ортогональном оси анизотропии направлении \vec{x}_0 , так и характерных ширин турбулентного спектра вдоль осей x и y . С ростом величины κ уширение спектра вдоль оси анизотропии ФР увеличивается, тогда как ширина спектра поперек этой оси уменьшается одновременно с уменьшением указанной проекции k_x волнового вектора максимума турбулентного спектра. Подобное уменьшение наиболее существенно на начальной нелинейной стадии эволюции спектра (и становится довольно малым на поздней стадии, которой мы не интересуемся в настоящей работе).

Сделанное наблюдение согласуется с уменьшением при росте κ инкремента нарастания магнитного поля (рис. ??), вычисленного на линейной стадии задолго до насыщения неустойчивости и примерно равного максимальному инкременту, получающемуся из соответствующего дисперсионного уравнения (см. о нем [Mikhailovsky1971; Lazar2006; Vagin2014; Kocharovsky2016; Ruyter2015; Silva2021]). Уменьшение инкремента с увеличением κ от 1 до ∞ значительно лишь для небольшой начальной анизотропии $A \lesssim 1$: для $A = 1$ инкремент уменьшается примерно вдвое, а для $A = 0.1$ — в 20 раз. Заметим, что в последнем случае почти в 20 раз уменьшается и квадрат насыщающего магнитного поля b_{sat}^2 (рис. ??). Вместе с тем это поле слабо зависит от величины κ при большой начальной анизотропии $A \gg 1$. Выведенная в настоящей работе система приближенных уравнений (??)–(??), (??) для ТМ-гармоник турбулентности позволяет исследовать насыщение вейбелевской неустойчивости и ее дальнейшую нелинейную эволюцию при малых величинах параметра анизотропии, включая область $A \lesssim 0.01$ (которая вряд ли легко доступна расчетам методом частиц в ячейках из-за неизбежных для него численных шумов). Подобная близость к порогу неустойчивости характерна для многих физических ситуаций, и особенности обсуждаемого эффекта насыщения роста ТМ-вейбелевской турбулентности в этих условиях заслуживают специального исследования.

В этом отношении актуальны, например, задачи лабораторной астрофизики с лазерной плазмой [Romanov2004; Thaury2010; Silva2020; Shukla2020; Zhang2020], получаемой абляцией различных мишеней фемтосекундными им-

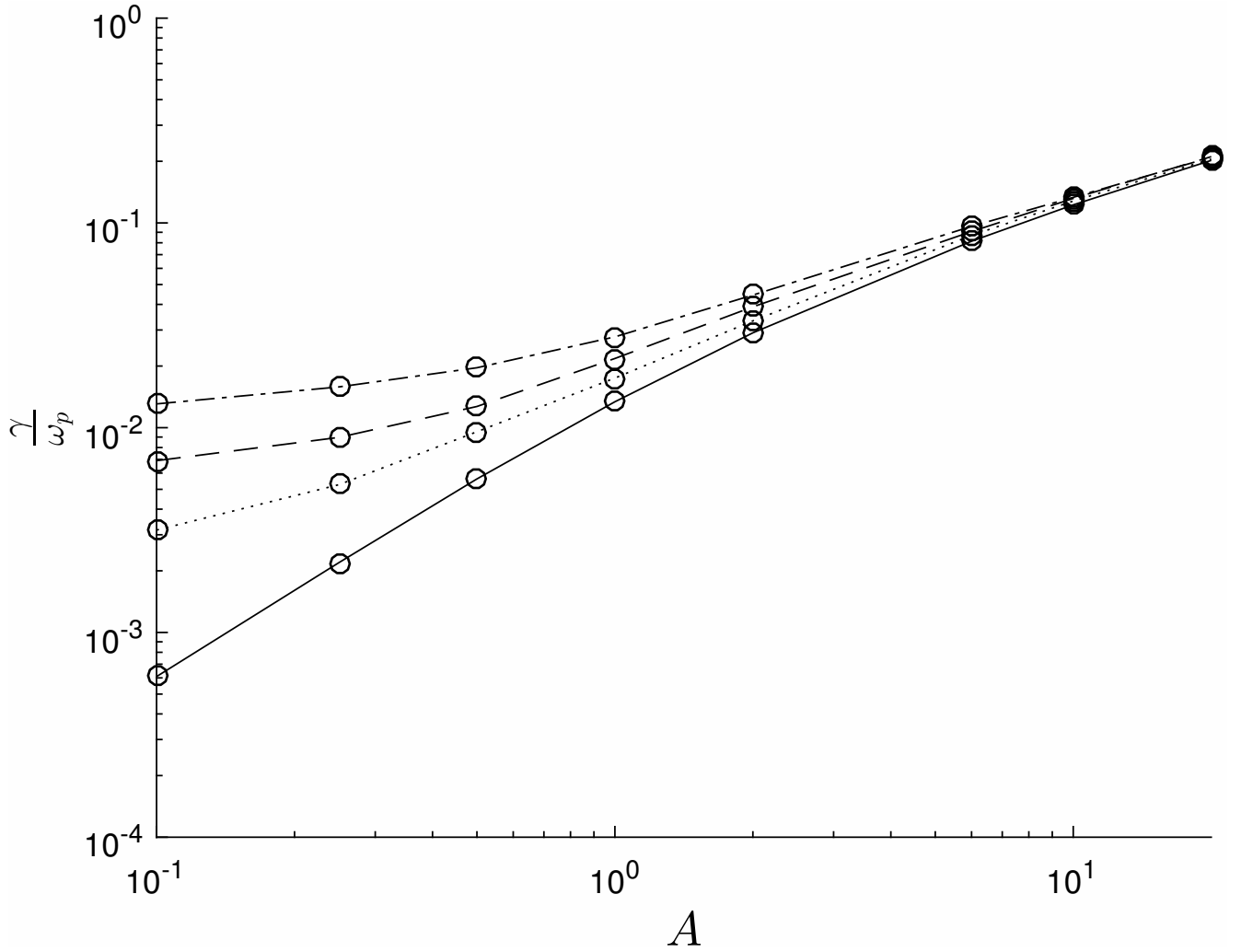


Рисунок 5.5 — Зависимость инкремента γ (нормированного на плазменную частоту ω_p) среднеквадратичного магнитного поля от параметра анизотропии A для продакт-бикаппа-распределения (??) при $\beta_{\perp} = 0.1$ и различных значениях параметра капша: $\kappa = 1$ — штрихпунктир, $\kappa = 2$ — штрихи, $\kappa = 4$ — пунктир, $\kappa = \infty$ — сплошная кривая (бимаксвелловское распределение).

пульсами петаваттных лазеров, и задачи физики солнечного (звездного) ветра, начиная с корональных областей его происхождения и кончая границами между магнитными облаками в нем или областями его взаимодействия с магнитосферами планет [Baumjohann2012; Dudik2017; Livadiotis2017; Marsch2006; Yoon2017; Echim2010]. Для обоих указанных классов задач имеется непосредственная возможность получать информацию как о распределении частиц по энергии, так и об анизотропии распределения частиц по скоростям. Наблюдаемое наличие надтеплого „хвоста“ в энергетическом распределении частиц [Maksimovic2005; Vasyliunas1968; Lazar2022], свойственное различ-

ным каппа-распределениям, делает последние удобными для использования в численном моделировании процессов развития вейбелевской неустойчивости и генерации долгоживущей квазимагнитостатической турбулентности.

Начатое в настоящей работе исследование зависимостей насыщающего среднеквадратичного магнитного поля от параметров каппа κ и анизотропии A представляется важным для оценки влияния такого рода турбулентности на ряд наблюдаемых явлений в лазерной и космической плазме. В частности, важными представляются найденные конкретные зависимости уровня насыщения вейбелевской турбулентности от параметра анизотропии, которые для одних ФР (например, бикаппа- и бимаксвелловской) оказываются близкими, а для других (продакт-бикаппа-распределений с разными значениями κ) — сильно различающимися при $A < 0.3$.

Полученная и использованная нами система уравнений для взаимодействующих гармоник возмущений магнитного поля и ФР особенно перспективна для анализа эволюции квазимагнитостатической турбулентности в случае малой анизотропии ФР, т. е. при небольшом превышении порога вейбелевской неустойчивости, что является типичным, в частности, для плазмы солнечного ветра, а также для лазерной плазмы после прекращения подкачки в нее энергичных электронов. Более того, эта система уравнений применима и для описания развития неустойчивости даже в отсутствие анизотропии эффективных температур немаксвелловской ФР, когда профиль энергетического распределения частиц играет определяющую роль [Silva2021; Lazar2010]. Для подобных задач преимущества расчета на основе предложенной системы уравнений по сравнению с обычным расчетом методом частиц в ячейках могут оказаться важными.

Заключение

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем.

Автор выражает благодарность и большую признательность научному руководителю Кочаровскому Владимиру Владиленовичу за поддержку, помощь, обсуждение результатов и научное руководство.