

На правах рукописи

Перепёлкина Анастасия Юрьевна

**Трёхмерный кинетический код для  
моделирования замагниченной плазмы**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные  
методы и комплексы программ

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном учреждении  
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики  
им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

**Научный** кандидат физико-математических наук,  
**руководитель:** **Левченко Вадим Дмитриевич**

**Официальные** **Бородачев Леонид Васильевич,**  
**оппоненты:** доктор физико-математических наук, доцент, Физиче-  
ский факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, доцент  
**Брантов Андрей Владимирович,**  
доктор физико-математических наук, Физический ин-  
ститут имени П.Н. Лебедева (ФИАН), ведущий науч-  
ный сотрудник

**Ведущая** Институт вычислительной математики и математиче-  
**организация:** ской геофизики Сибирского отделения РАН

Защита диссертации состоится 6 октября 2016 года в 14 час. 00 мин. на заседа-  
нии совета Д002.024.03 при ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по адресу: 125047,  
Москва, Миусская пл., д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной  
математики им. М.В. Келдыша РАН и на сайте [www.keldysh.ru](http://www.keldysh.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук

Корнилина М.А.

## 1. Общая характеристика работы

Диссертация посвящена разработке эффективного программного комплекса (кода) CFHall для моделирования замагниченной плазмы. В ней исследуются следующие вопросы: разработка и реализация локально-рекурсивных нелокально-асинхронных алгоритмов для решения самосогласованной системы уравнений Власова-Максвелла методом «частица-в-ячейке» для существенно многомасштабных задач кинетики плазмы; применение кода CFHall для решения актуальных задач физики плазмы на примере исследования мелкомасштабной неустойчивости во взаимодействии лазерного импульса со сверхкритической плазмой.

**Актуальность работы.** Кинетические коды выбирают для моделирования такой плазмы, в которой неравновесностью функции распределения нельзя пренебречь. Методы кинетического моделирования плазмы развиваются с 1980-х годов, но использование написанных ранее кодов в современных приложениях затруднительно, так как трехмерная полностью кинетическая реализация очень требовательна к вычислительным ресурсам. Появление новых параллельных вычислительных архитектур с развитой иерархией подсистемы памяти и развитие методов программирования приводят к возможности решения ранее неисследованных задач. В этих условиях нельзя не уделять внимания таким направлениям исследований, как выбор численного метода с учетом возможности эффективной реализации при сохранении точности результатов, разработка и реализация алгоритмов с учетом выбранной схемы и устройства компьютера.

Выделим основные проблемы, возникающие при реализации метода на новых вычислительных системах. В актуальных сейчас трехмерных многомасштабных задачах для хранения значений полей во всех сеточных узлах, а также импульсов и положений всех частиц, необходим большой объем памя-

ти (Big data problem). При проведении распределенных вычислений во время синхронизации время уходит на передачу большого количества данных между процессорами, простой процессоров во время ожидания завершения операций другими (Weak/Strong scaling). При проведении локальных вычислений загрузка и сохранение этих данных оказывает заметную нагрузку на пропускную способность памяти (Memory bound problem).

Из-за этого, если код реализован без внимания к эффективному выбору схемы, алгоритмов, и программных средств, повышение производительности вычислительной системы не приводит к соответствующему повышению темпа вычислений. Под производительностью имеется в виду количество операций в секунду, и это является основным направлением развития компьютеров.

Численный эксперимент считается наиболее перспективным методом изучения причин транспорта электронов к аноду в холловских плазменных двигателях. Вероятно, турбулентные процессы в плазме играют в этом явлении решающую роль. Оценить скорость переноса электронов важно как можно более точно, так как от этого зависят такие важные параметры, как расход топлива, эффективность ионизации рабочего тела и тяга двигателя. Для этой задачи используют специализированные кинетические коды в 2D3V геометрии и с некоторым количеством приближений. Специализация кодов заключается в использовании разных моделей столкновений и ионизации частиц, описании пристеночных эффектов. Приближения включают изменение отношения масс электронов и ионов, калибровку постоянной проницаемости вакуума. Но, так как приближения сдвигают порог возникновения плазменных неустойчивостей, то такие коды не подходят для изучения явления аномального переноса.

Моделирование этого процесса в трехмерной постановке без упрощающих предположений на данный момент считается невозможным в международном научном сообществе. Это связано именно с широким диапазоном масштабов протекающих в плазме двигателя процессов. Пространственная

сетка должна быть достаточно подробной, чтобы разрешить самые небольшие характерные масштабы плазмы канала, и в то же время охватывать область градиента магнитного поля. По времени необходимо разрешить высокочастотные процессы, а время моделирования должно быть достаточным, чтобы получить оценки выходных параметров. Это приводит к необходимости выполнения до  $10^7$  шагов по времени. Кроме того, что большое число шагов требует большого количества вычислений и времени, необходимого на эти вычисления, требуется обеспечить сохранение энергии после выполнения такого количества шагов. Это указывает на необходимость работы над увеличением порядка точности используемых численных схем.

Другая задача, которая была рассмотрена в процессе работы над кодом, — это исследование роли вейбелевской неустойчивости при взаимодействии лазерного импульса со сверхкритическим плазменным слоем. Вейбелевской (филаментационной) неустойчивостью называют неустойчивость в плазме с анизотропным распределением частиц по скоростям. Она проявляется в экспоненциальном росте компонент магнитного поля, перпендикулярных выделенной оси анизотропии, сначала в виде структуры из тонких филаментов, толщина (поперечный размер) которых порядка длины скин-слоя. В процессе развития этой структуры филаменты сливаются в более крупные, и в итоге могут образоваться крупномасштабные устойчивые магнитные поля в плазме. Все больше внимания этому явлению уделяется в связи с исследованиями астрофизической плазмы и в задачах ускорения заряженных частиц лазерным импульсом.

Во взаимодействии лазерного излучения со слоем плазмы создаются условия для протекания филаментационной неустойчивости. Кроме этого, происходит множество трехмерных нелинейных процессов, распределение частиц заметно отличается от максвелловского, так что дать описание более точного поведения системы только при помощи аналитических выкладок пока не считается возможным. Процесс филаментации происходит слишком быстро

и на небольших пространственных масштабах, так что экспериментальное наблюдение не может дать надежную информацию о ранней стадии процесса. На возникновение магнитных полей вследствие филаментации тока может уйти заметная доля энергии. Крупные и устойчивые структуры магнитного поля могут повлиять на протекание последующих более медленных процессов. В последних работах, посвященных трехмерному моделированию взаимодействия лазерного импульса со сверхкритическим плазменным слоем, использованы сетки с количеством ячеек не более  $1.5 \cdot 10^6$ . При использовании суперкомпьютеров это число может быть увеличено до  $10^8$ . Это приводит к тому, что либо размер шага по пространству соизмерим с мельчайшим масштабом исследуемой филаментационной структуры, либо область моделирования недостаточна для того, чтобы вместить поперечные размеры лазерного импульса.

**Цель работы** состоит в создании инструмента для моделирования плазмы, отвечающего необходимым требованиям для наблюдения самосогласованных нелинейных многомасштабных процессов в замагниченной плазме на доступных вычислительных устройствах. Для достижения этой цели решены следующие **задачи**: выбор наиболее подходящей математической модели и численных методов ее решения; реализация численной схемы в коде на основе локально-рекурсивных нелокально-асинхронных алгоритмов; верификация полученного программного комплекса на задаче о филаментационной неустойчивости; применение этого комплекса в решении задачи о роли вейбелевской неустойчивости в ускорении частиц электромагнитным импульсом.

**Практическая ценность.** Разработан программный комплекс для моделирования кинетики замагниченной плазмы. Он обладает высокой эффективностью, позволяющей проводить расчеты с высокой скоростью без существенных приближений. Становится доступным решение новых типов задач,

вычисления для которых ранее считались невыгодными с точки зрения затрат времени и использования вычислительных мощностей. В применении к актуальным вопросам плазменных технологий проведены вычисления по образованию магнитных полей при взаимодействии фокусированного лазерного импульса с сверхкритическим плазменным слоем. Получены оценки доли энергии, уходящей на генерацию магнитных полей. Этот результат полезен для усовершенствования механизмов ускорения частиц электромагнитным излучением. Благодаря универсальности кинетического подхода, высокому темпу счета и понятному интерфейсу код можно использовать для решения несложных трехмерных задач в интерактивном режиме в образовательных целях.

**Научная новизна.** Ко времени работы над диссертацией все существующие программные комплексы для 3D3V моделирования плазмы методом «частица-в-ячейке» использовали пошаговую синхронизацию, так что алгоритм LRnLA для выбранной численной модели реализован **впервые**.

Моделирование взаимодействия лазерного импульса со сверхкритическим плазменным слоем в предшествующих работах производилось с рядом упрощений. Впервые проведено 3D3V моделирование в постановке, включающей сфокусированный лазерный импульс при шаге сетки, много меньшим ожидаемого размера филамента магнитного поля.

**Положения, выносимые на защиту.**

- Разработаны и реализованы локально рекурсивные нелокально асинхронные алгоритмы для метода макрочастиц решения трехмерной самосогласованной системы уравнений Власова-Максвелла. В сравнении с алгоритмами с пошаговой синхронизацией минимизируется нагрузка на пропускную способность памяти и количество синхронизаций между процессами.

- Создан универсальный программный комплекс для моделирования трехмерной кинетики замагниченной плазмы с применением различных шагов по времени для электромагнитных полей и частиц, использованием эффективных алгоритмов и современных возможностей процессоров. Продемонстрирована возможность решения существенно разномаштабных задач на доступных вычислительных системах.
- В результате вычислительного эксперимента показано, что зависимость доли энергии, ушедшей на образование квазистационарных магнитных полей вследствие вейбелевской филаментационной неустойчивости при ускорении частиц лазерным импульсом, от амплитуды используемого импульса в проведенном вычислительном эксперименте оказывается немонотонна и максимум достигает 4.5%.

**Личный вклад соискателя.** Теория LRnLA алгоритмов разработана научным руководителем, Левченко В.Д. Подготовка безразмерной системы единиц (разд. 1.3), подбор задач для тестирования (разд. 2.7.1), численных параметров к ним выполнена Горячевым И.А. Моделирование с использованием кода CFHall частично проведено Горячевым И.А. (разд. 2.7.1) и Левченко В.Д. (разд. 3.3.1). Остальные представленные в диссертации результаты получены автором самостоятельно.

**Достоверность и обоснованность результатов** в первую очередь обеспечивается использованием признанных и неоднократно исследованных численных схем и алгоритмов. Тестирование кода проведено на ряде изученных ранее задач, для которых справедливы аналитические оценки. Применимость к целевым задачам показана примером вычисления в актуальной задаче о роли вейбелевской неустойчивости при взаимодействии лазерного импульса со сверхкритическим плазменным слоем.



**Апробация работы.** Результаты, описанные в диссертации, докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях: 54-я, 55-я, 56-я научные конференции МФТИ; First Russian — Italian joint seminar on mathematical and physical models applications to condensed matter and preservation of the cultural heritage (On the occasion of ICIAP 2011, г. Равенна, Италия); 38-я, 39-я, 40-я, 41-я Международная (Звенигородская) Конференция По Физике Плазмы и Управляемому Термоядерному Синтезу; ISPlasma 2011 (г. Нагоя, Япония); Забабахинские научные чтения, (г. Снежинск), 16-20 апреля 2012; Международная молодёжная конференция-школа "Современные проблемы прикладной математики и информатики г.Дубна, 22-27 августа 2012г; 11th APCPST and 25th SPSM, (г. Киото, Япония); ММСР 2013 (г. Дубна); XXXI ICPIG (г. Гранада, Испания); XXV IUPAP Conference on Computational Physics (г. Москва); 41st EPS conference (г. Берлин, Германия); Научный сервис в сети Интернет: многообразие суперкомпьютерных миров (г. Новороссийск, 2014г.).

Результаты были представлены и неоднократно обсуждались на научных семинарах кафедры прикладной математики научно-образовательного центра ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, семинаре ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова. Работа поддержана грантами РФФИ 11-01-00282-а, 12-01-00490-а, 12-01-00708-а, 14-01-31483-мол\_а.

Объем диссертации составляет 109 страниц, диссертация содержит 39 рисунков, 6 таблиц и 122 наименования списка литературы.

## 2. Содержание

**Введение** содержит описание проблемы, которой посвящена диссертация, обоснована актуальность, сформулирована цель работы, представлены выносимые на защиту положения.

**Первая глава** содержит обоснование выбора математической модели, подробное описание численных методов, стоящих в основе программного комплекса.

**Обоснование выбора модели** строится на основе обзора литературы по задачам, стоящим на грани применимости численных методов кинетического моделирования плазмы. Для конкретного примера выбрана задача о моделировании плазмы канала холловского электрореактивного двигателя (ХД). Выбранная модель трехмерна, учитывает самосогласованную динамику электромагнитных полей, не содержит калибровок физических параметров. Численная схема обладает вторым порядком аппроксимации.

**Уравнения и численные методы** Код основан на решении самосогласованной системы уравнений Власова-Максвелла.

$$\frac{\partial f_\alpha}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial f_\alpha}{\partial \vec{r}} + e_\alpha \left( \vec{v} \times \vec{B} + \vec{E} \right) \frac{\partial f_\alpha}{\partial \vec{p}} = 0. \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{E}, \quad \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \nabla \times \vec{B} - \vec{j}, \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad \nabla \cdot \vec{E} = \rho. \quad (2)$$

$$\rho = \sum_\alpha \int f_\alpha e_\alpha d\vec{v}, \quad \vec{j} = \sum_\alpha \int \vec{v}_\alpha f_\alpha e_\alpha d\vec{v}. \quad (3)$$

Уравнения записаны в безразмерной системе единиц. Масса измеряется в массах электрона  $m_e$ ; заряд – в зарядах электрона  $e$ , скорости – в скоростях света  $c$ , время – в обратных плазменных частотах электронов  $\omega_p^{-1}$ . Из этого выбора следует единица для полей  $m_e \omega_p c / e$  и единица для размеров  $c / \omega_p$ .

Эволюция электромагнитных полей реализована по схеме в конечных разностях во временной области на сдвинутых сетках (FDTD – Finite Difference Time Domain) со вторым порядком аппроксимации. Для моделирования плазмы использован метод «частица-в-ячейке» (Particle-in-Cell – PIC). В ка-

честве форм-факторов рассматривалось семейство функций  $\Lambda^\ell$ :

$$\Lambda^\ell(x - x') = \int \Lambda^{\ell-1}(x - x'') \Lambda^0(x' - x'') dx'', \quad \Lambda^0(x) = \begin{cases} 1, & |x| < 0.5, \\ 0, & |x| > 0.5 \end{cases} \quad (4)$$

$$\Lambda^\ell(\vec{r}) = \Lambda^\ell(x) \Lambda^\ell(y) \Lambda^\ell(z). \quad (5)$$

Выбран форм-фактор с  $\ell = 2$ . Ускорение макрочастиц вычисляется с учетом релятивизма по схеме Бориса.

Реализовано несколько видов **граничных условий**: периодические граничные условия, условия симметрии и граничные условия на идеальном проводнике. При попадании на границы области частицы либо упруго отталкиваются, либо их импульс становится равным нулю и больше не изменяется. Если на границе задается некоторая определенная добавка к полям, зависящая от координаты и времени, то она определяет **источник** электромагнитного излучения.

Для описания существенно разномасштабных систем введена и обоснована следующая особенность: выгодно использовать в модели два различных временных шага:  $dt_{FLD}$  для обновления значений полей и  $dt_{PIC}$  для ускорения и движения макрочастиц и подсчета токов.

Описанная кинетическая модель получается трёхмерной, нелинейной, самосогласованной и не включает калибровок физических параметров. Численная схема имеет второй порядок аппроксимации.

Приведено тестирование порядка аппроксимации схемы в задаче о продольных колебаниях холодной плазмы. Зависимость ошибки аппроксимации от шага имеет квадратичный характер.

**Вторая глава** содержит обоснование выбора и описание алгоритмов, средств и методов реализации.

Алгоритм задает правило обхода графа зависимостей задачи. Определив граф зависимостей задачи в  $(d + 1)$ -мерном пространстве операций-данных,

можно задать алгоритм как  $(d + 1)$ -мерную фигуру в этом пространстве вместе с правилом ее разбиения на более мелкие фигуры и порядком их обхода.

На  $d$ -мерной сетке заданы некоторые начальные значения. Задача моделирования состоит в нахождении значений спустя  $NT$  итераций выбранной численной схемы. Граф зависимостей в  $(d + 1)$ -мерном пространстве состоит из  $NT$  слоев по оси итераций. Каждому из слоев соответствует сетка, идентичная сетке данных, но ее узлы содержат не значение некоторого поля, а операцию вычисления этого значения по выбранной численной схеме на конкретной итерации. Между узлами графа определяются односторонние связи зависимостей, указывающие, данные результатов каких операций необходимы для выполнения этого узла.

Представим алгоритм в этом пространстве как некоторую фигуру (см. рис. 1). Содержание алгоритма состоит в исполнении всех операций (узлов графа зависимостей), которые он покрывает. Эту фигуру можно разбить на составные части так, чтобы зависимости, пересекающие каждую границу разбиения, были исключительно односторонними. Это будет означать, что для выполнения алгоритма необходимо выполнить все его составные части в порядке, определяемом зависимостями между ними. Выполнение составных частей можно распределить между несколькими процессорами. Если между частями есть зависимость, то их необходимо выполнять последовательно. Если зависимости нет, то возможно асинхронное выполнение.

Каждая из составных частей также соответствует алгоритму и имеет правило разбиения. Уровень разбиения определяется параметром, названным ранг. При однократном разбиении из алгоритма ранга  $R$  получаются алгоритмы ранга  $R - 1$ . Если фигура покрывает лишь один узел графа (или их некоторое минимальное количество), то ее алгоритм может состоять не в дальнейшем разбиении, а в выполнении операции, соответствующей этому узлу. Этой фигуре присвоен минимальный ранг, равный нулю.

На начальном этапе разбиения алгоритм определяется фигурой, покрыв-

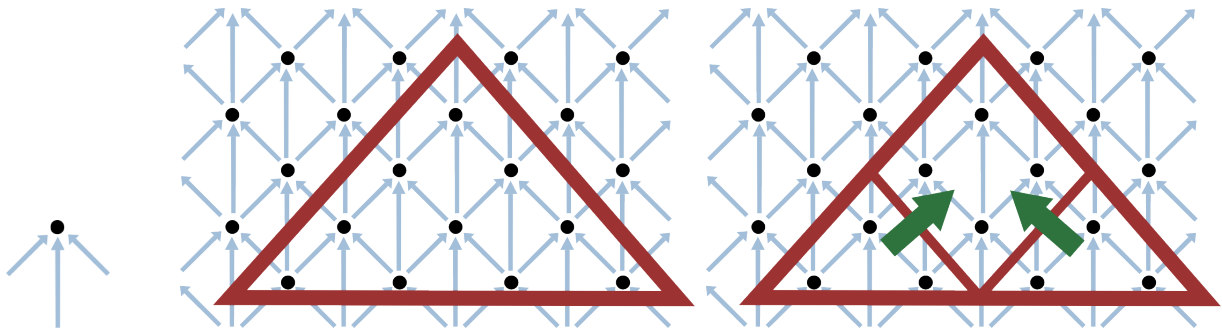


Рис. 1. Пример графа зависимости для одномерного вычисления по схеме FDTD. Локальный шаблон численной схемы (слева). Многоугольник покрывает некоторые узлы графа (в центре). Многоугольник разбит на части; зависимости, пересекающие границу разбиения, односторонние (справа)

вающей весь граф зависимостей задачи.

**Выбор алгоритма** определяется шаблоном численной схемы, моделью параллельности используемого вычислительного устройства, средствами реализации.

Одним из вариантов локально-рекурсивного является разбиение  $d + 1$ -мерного пространства на призмы. Основания призмы целиком лежат в одном слое итераций по времени. Наклон боковых ребер призмы выбирается так, чтобы они были как можно ближе к нормали к основаниям (для повышения локальности), но удовлетворяли необходимому свойству при разбиении фигуры алгоритма на подобные фигуры. То есть, все зависимости, пересекающие одну грань, должны быть односторонними. Этот наклон определяется шириной локального шаблона схемы.

Основание призмы выбирается исходя из требований локальности алгоритма и простоты его реализации. Из первого требования основания выбирается согласно форме локального шаблона схемы. Для схем типа «крест» одной из оптимальных фигур оснований становится  $d$ -мерный ортоплекс (отрезок, ромб или октаэдр), так как эта фигура наиболее плотно описывает шаблон. Шаблон для схемы макрочастиц оптимально вписывается в  $d$ -мерный куб.

Основание вида  $d$ -мерного куба отвечает также требованию простоты реализации рекурсивного алгоритма, так как при произвольном  $d$  возможно  $d$ -бинарное разбиение основания на подобные фигуры, и  $d + 1$ -бинарное разбиение фигуры алгоритма.

Таковыми свойствами обладает LRnLA алгоритм, названный ConeFold (рис. 2). Этот алгоритм выбран для реализации в коде.

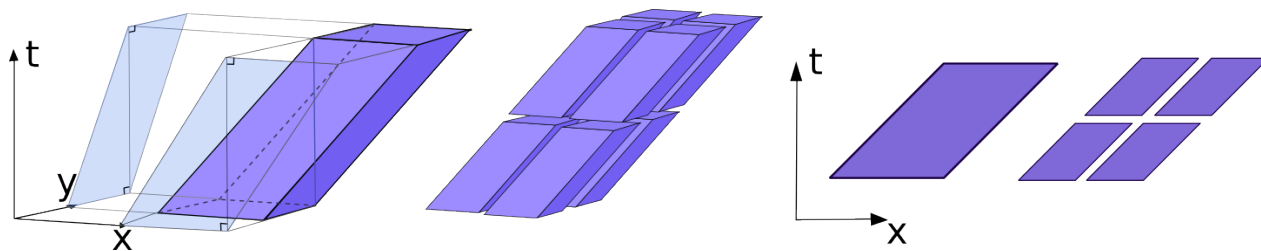


Рис. 2. Форма и разбиение алгоритма ConeFold. Проекция для 2D и 1D разбиений

Описана **специфика применения алгоритмов к методу макрочастиц**. Упомянуты видоизменения алгоритма при **адаптации для параллельной реализации** (рис. 3). Если на верхнем основании ConeFold'a поставить еще одну такую же фигуру, получится более высокая призма. Так строится алгоритм ConeTorre. ConeTorre представляет из себя высокую наклонную призму, которая разбивается горизонтальными плоскостями на алгоритмы ConeFold. ConeTorre имеет коэффициент локальности больший, чем ConeFold. Так как основания составляющих его ConeFold попарно совпадают (верхнее основание предыдущего с нижним основанием следующего), для вычислений требуется меньше загрузок данных.

Алгоритм TorreFold устроен так, что каждый ConeTorre отдается на выполнение одному параллельному потоку. Только когда выполнение некоторого ConeTorre завершается, поток освобождается и начинает следующий ConeTorre, который не был ранее задействован. TorreFold подходит для систем, где количество параллельных потоков ограничено, а именно для многоядерных процессоров, Xeon Phi.

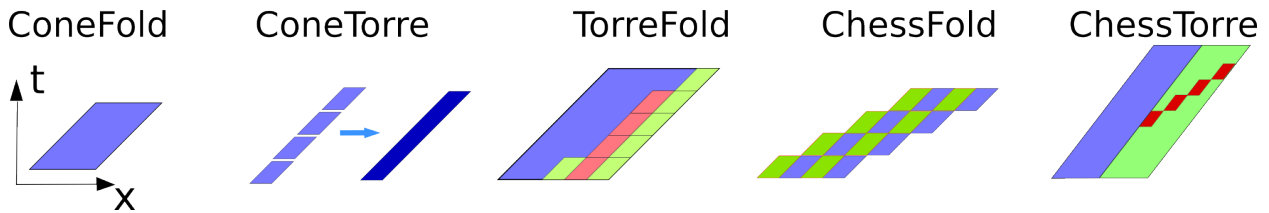


Рис. 3. Алгоритмы на основе ConeFold в одномерной проекции. В TorreFold сегменты разного цвета могут обрабатываться параллельными потоками. В ChessFold сегменты одного цвета асинхронны

Если целью является максимальная асинхронность, то лучше подходят алгоритмы на основе ChessTorre (рис. 3). Этот подход используется для распределения вычислений между NUMA-узлами. Внутри узла вычисления могут быть распределены между потоками при помощи алгоритма TorreFold. При использовании суперкомпьютера доступно дальнейшее вложение алгоритмов. Полную область можно подвергнуть декомпозиции на ConeTorre и использовать TorreFold. Каждый алгоритм ConeTorre будет посчитан на отдельном узле кластера. На узле внутри ConeTorre выполняется ChessFold, и это составляет алгоритм ChessTorre.

**Реализация в программном комплексе** осуществляется на языке C++, асинхронные вычисления осуществляются при помощи интерфейса POSIX threads. Алгоритмы ConeFold выполнены в виде рекурсивных шаблонов функций, параметризованных по рангу и типу данных. Для хранения данных использован двумерный локально-рекурсивный массив из SSE/AVX векторов данных вдоль третьей оси.

Для реализации численной схемы в рамках LRnLA алгоритмов с учетом граничных условий использована автоматическая кодогенерация, реализованная на языке Python.

**Третья глава** содержит примеры применения кода на задачах физики плазмы. Для тестирования выбрана задача о роли вейбелевской неустойчиво-

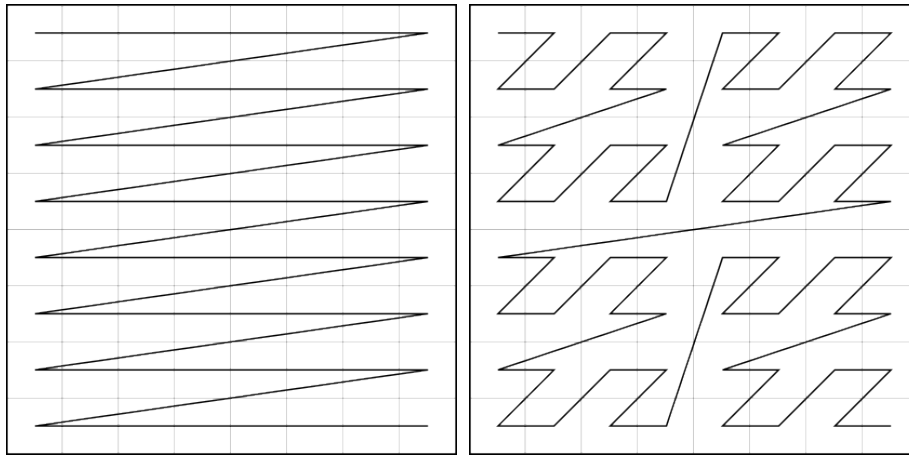


Рис. 4. Заполнение двумерного массива в обычном порядке (слева) и по кривой Лебега (справа)

сти при взаимодействии лазерного импульса со сверхкритическим плазменным слоем. Приведены сведения о механизме неустойчивости и аналитические оценки ее инкремента в некоторых системах.

Рассмотрены три отдельные постановки:

- Два холодных релятивистских пучка электронов с противоположно направленными скоростями. Рост неустойчивости из начального возмущения в скорости частиц. Ионы являются неподвижным фоном.
- Два противоположно направленных релятивистских пучка электронов с конечной тепловой скоростью. Начального периодического возмущения нет, рост неустойчивости проходит из начального теплового шума. Ионы являются неподвижным фоном.
- Ускорение электронов в слое плазмы фокусированным лазерным импульсом. Электроны слой плазмы обладает конечной тепловой скоростью. Ионы подвижны.

В третьей задаче интерес представляют вопросы, какую роль вейбелевская неустойчивость играет в этом процессе, как быстро она протекает, какого масштаба возникают вследствие нее магнитные поля, и как они влияют



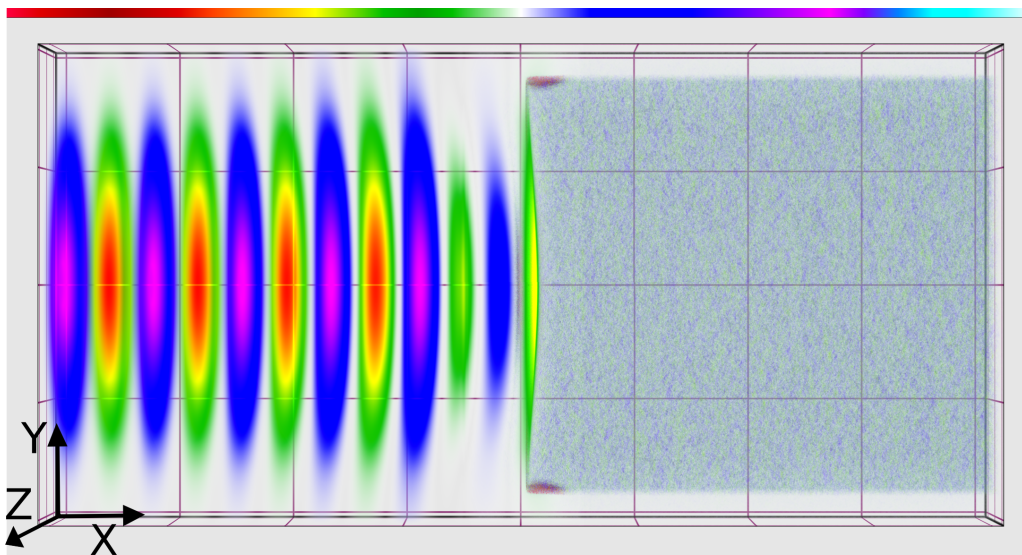


Рис. 5. Геометрия постановки задачи.

на остальные протекающие в этой системе процессы. При численном моделировании этой задачи важно подобрать численные параметры так, чтобы процесс неустойчивости не был искажен.

Для выбора численных параметров, необходимых для моделирования вейбелевской неустойчивости, инструмент моделирования верифицируется на первых двух задачах. Изучается размер филамента в зависимости от времени, нарастание энергии магнитных полей, в зависимости от шага сетки, количества макрочастиц.

В разделе 3.4 изучается задача о взаимодействии лазерного импульса со сверхкритическим плазменным слоем. Обоснована постановка задачи. В выбранной постановке слой плазмы занимает около половины области (рис. 5). Импульс сфокусирован в точку на поверхности плазменного слоя. Постановка задачи получается двумерной, но для моделирования использована трехмерная модель и трехмерная область, так что появление трехмерных структур ничем не ограничено.

Под действием лазерного излучения наблюдается возникновение филаментационной структуры, слияние филаментов. Для образования стационарного магнитного поля на поверхности плазмы достаточно времени около  $200\omega_p^{-1}$ .

Для дальнейшего выявления влияния процесса филаментации в этой системе построены графики зависимости отношения энергии, содержащейся в магнитных полях, и кинетической энергии ускоренных частиц от времени. Зависимость максимума по времени этого отношения от амплитуды импульса оказалась немонотонной.

### 3. Основные результаты работы

- Реализованы локально рекурсивные нелокально асинхронные алгоритмы класса ConeFold для метода макрочастиц решения самосогласованной системы уравнений Власова-Максвелла. Разработанный программный комплекс оптимален для моделирования неустойчивостей в замагниченной плазме. Выполнение расчетов за приемлемое время обеспечено не приближениями математической модели, а увеличением эффективности использования компьютера. Моделирование проходит в 3D3V геометрии, решается полная самосогласованная система уравнений Власова-Максвелла, использован форм-фактор второго порядка точности, нет калибровок физических параметров.
- Проведено моделирование эволюции филаментационной неустойчивости в изолированных постановках с целью выявления необходимых условий численного эксперимента для адекватного наблюдения ее в более сложных процессах. Получен инкремент нарастания отдельных мод поперечной неустойчивости. Исследована эволюция ширины филаментов в зависимости от физических и численных параметров. Показано, что филаменты возможно наблюдать до тех пор, пока их поперечный размер занимает не менее 4 ячеек. До начала слияния филаментов их ширина растет линейно со временем и скорость роста пропорциональна тепловой скорости в начальном распределении частиц. На процесс слияния может существенно повлиять численный шум, но этим влиянием

можно пренебречь, если брать 16 и более макрочастиц на ячейку. Из трехмерных распределений компонент токов и полей сделан вывод о том, что для полного описания процесса необходима полностью трехмерная численная модель.

- Для примера актуального применения численного эксперимента в исследовании роли вейбелевской неустойчивости во взаимодействии лазерного импульса со слоем плазмы выбрана двумерная постановка с плоской геометрией лазерного импульса. Такая постановка позволила в некоторой степени отделить процесс образования филаментации от других нелинейных процессов и получить следующие полезные результаты о природе протекания филаментации. Во-первых, филаментация оказывается одним из самых быстрых процессов в системе, и уже на временах  $\sim 200\omega_p^{-1}$  в результате нее вблизи поверхности плазменного слоя образуются стационарные магнитные поля. Во-вторых, зависимость доли энергии, ушедшей на образование магнитных полей, от амплитуды используемого импульса немонотонна. Знание этой зависимости может оказаться полезным в планировании будущих экспериментов ускорения частиц плазмы.

Научные результаты диссертации опубликованы в 26 работах, из которых 3 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ [21–23].

## **Список публикаций автора по теме диссертации**

1. Горячев И.А., Левченко В.Д., Перепёлкина А.Ю. Исследование аномального переноса электронов в плазме холловского двигателя (ХД) // Тезисы XXXVIII Конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу / ИОФАН. — г. Звенигород Московской обл., 2011. — 14–18 февраля.

2. Perepelkina A.Yu, Goryachev I.A., Levchenko V.D. Fully Kinetic Model of Hall Thruster Plasma Dynamics Based on LRnLA // 3rd International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma -2011) / Nagoya Institute of Technology. — Nagoya, Japan, 2011. — March 6-9. — P. 110.
3. Perepelkina A.Yu., Levchenko V.D. Fully kinetic 3D model of magnetized plasma // First Russian – Italian Joint Seminar on Mathematical and Physical Models Applications to Condensed Matter and Preservation of the Cultural Heritage. — Ravenna, Italy, 2011. — September 12-13. — P. 8–9.
4. Перепёлкина А.Ю. Численное моделирование плазмы в канале холловского двигателя // Труды 54-й научной конференции МФТИ. Управление и прикладная математика / МФТИ. — Т. 2. — Долгопрудный, 2011. — С. 116.
5. Левченко В.Д., Перепёлкина А.Ю., Калининкова Е.И. 3D3V моделирование взаимодействия лазерных импульсов с плазмой при помощи универсального PIC кода CFHALL // Тезисы докладов XXXIX Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС / Плазмаиофан. — Москва, 2012. — 6-10 февраля. — С. 102.
6. Горячев И.А., Левченко В.Д., Перепёлкина А.Ю. Трёхмерная полностью кинетическая численная модель замагниченной плазмы канала холловского двигателя // Тезисы докладов XXXIX Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС / Плазмаиофан. — Москва, 2012. — 6-10 февраля. — С. 222.
7. Горячев И.А., Левченко В.Д., Перепёлкина А.Ю. Трёхмерная полностью кинетическая численная модель замагниченной плазмы канала холловского двигателя // Забабахинские научные чтения: сборник материалов XI Международной конференции / РФЯЦ–ВНИИТФ. — Снежинск : РФЯЦ–ВНИИТФ, 2012. — 16-20 апреля. — С. 147.
8. Левченко В.Д., Перепёлкина А.Ю. 3D3V моделирование взаимодей-

- ствия пикосекундных лазерных импульсов с подкритическим плазменным слоем // Забабахинские научные чтения: сборник материалов XI Международной конференции / РФЯЦ–ВНИИТФ. — Снежинск : РФЯЦ–ВНИИТФ, 2012. — 16-20 апреля. — С. 135.
9. Горячев И.А., Левченко В.Д., Перепёлкина А.Ю. Трёхмерный кинетический код CFHALL для моделирования замагниченной плазмы // Международная молодёжная конференция-школа «Современные проблемы прикладной математики и информатики». Тезисы докладов. — Дубна, 2012. — 22-27 августа. — С. 158–161.
  10. Perepelkina A.Yu., Goryachev I.A., Levchenko V.D. 3D3V Weibel Instability Simulation with CFhall Code // 11th APCPST (Asia Pacific Conference on Plasma Science and Technology) and 25th SPSM (Symposium on Plasma Science for Materials) / Nagoya Institute of Technology. — Kyoto, Japan, 2012. — Oct 2-5. — P. 145.
  11. Перепёлкина А.Ю. Инструмент генерации кода LRnLA алгоритмов // Труды 55-й научной конференции МФТИ. Управление и прикладная математика / МФТИ. — Т. 2. — Долгопрудный, 2012. — С. 58.
  12. Горячев И.А., Левченко В.Д., Перепёлкина А.Ю. Генерация мелкомасштабного поля при взаимодействии лазерного импульса со сверхкритической плазмой // XL Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС. Тезисы докладов / Плазмаиофан. — Москва, 2013. — 11-15 февраля. — С. 102.
  13. Перепёлкина А.Ю., Левченко В.Д. Кинетическая 3D модель замагниченной плазмы // Физические и математические модели плазмы и плазмopodobных сред / Под ред. Дж.Майно, Г.И.Змиевская. — Москва : ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, 2012. — С. 43–52.
  14. Perepelkina A.Yu., Levchenko V.D., Goryachev I.A. 3D Simulation of Filamentation Instability in Laser Interaction with Overdense Plasma with CFhall Code // Mathematical modeling and computational physics. Book

- of Abstracts of the International Conference. — Dubna, 2013. — July 8-12. — P. 144–145.
15. Perepelkina A.Yu., Levchenko V.D., Goryachev I.A. Numerical simulation of Weibel instability driven magnetic field generation with CFHall code // XXXI International Conference on Phenomena in Ionized Gases. e-Book of abstracts / Ed. by F.J. Gordillo-Vázquez. — Granada, Spain : Spanish National Research Council (CSIC), 2013. — July 14-19. — P. PS4–022. — URL: <http://www.icpig2013.net/buscador/index.html>.
  16. Perepelkina A., Levchenko V., Goryachev I. Numerical simulation of Weibel instability in laser interaction with plasma // XXV IUPAP Conference on Computational Physics. — Moscow, Russia, 2013. — August 20-24.
  17. Перепёлкина А.Ю., Левченко В.Д. Численное исследование вейбелевской неустойчивости в двухлучковой системе // Труды 56-й научной конференции МФТИ. Управление и прикладная математика / МФТИ. — Т. 2. — Долгопрудный, 2013. — С. 70.
  18. Перепёлкина А.Ю., Левченко В.Д., Горячев И.А. Исследование роли вейбелевской неустойчивости во взаимодействии лазерного излучения со сверхкритической плазмой при помощи численного моделирования // ХLI Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС. Тезисы докладов / Плазмаиофан. — Москва, 2014. — 10-14 февраля. — С. 142.
  19. Горячев И.А., Левченко В.Д., Перепёлкина А.Ю. Исследование роли вейбелевской неустойчивости во взаимодействии лазерного излучения со сверхкритической плазмой при помощи численного моделирования // Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша. — 2014. — № 26. — URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-26>.
  20. Perepelkina A Yu, Levchenko VD, Goryachev IA. 3D3V plasma kinetics code DiamondPIC for modeling of substantially multiscale processes on heterogenous computers // 41st EPS Conference on Plasma Physics / Ed.

by Prof. O. Scholten ; EPS. — Europhysics Conference Abstracts no. 38F. — Berlin : European Physical Society, 2014. — June. — P. O2.304.

21. Перепёлкина А.Ю., Левченко В.Д., Горячев И.А. Трёхмерный кинетический код CFHall для моделирования замагниченной плазмы // **Математическое моделирование**. — 2013. — Т. 25, № 11. — С. 98–110. — URL: <http://mi.mathnet.ru/mm3421>.
22. Perepelkina A Yu, Goryachev I A, Levchenko V D. CFHall Code Validation with 3D3V Weibel Instability Simulation // **Journal of Physics: Conference Series**. — 2013. — Vol. 441, no. 1. — P. 012014. — URL: <http://stacks.iop.org/1742-6596/441/i=1/a=012014>.
23. Perepelkina A.Yu, Goryachev I.A., Levchenko V.D. Implementation of the Kinetic Plasma Code with Locally Recursive non-Locally Asynchronous Algorithms // **Journal of Physics: Conference Series**. — 2014. — Vol. 510, no. 1. — P. 012042.
24. Трёхмерное численное моделирование распространения плазмонных поляритонов в волноводе / И.А. Горячев, А.В. Закиров, В.Д. Левченко, А.Ю. Перепёлкина // XL Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС. Тезисы докладов / Плазмаиофан. — Москва, 2013. — 11-15 февраля. — С. 274.
25. Верификация программного комплекса для Прямого моделирования в сейсморазведке CF/Geo4 на стандартных геофизических моделях / Т.В. Левченко, С.А. Хилков, А.В. Иванов и др. // Школа-семинар Петромодель 2013. — Петергоф, 2013. — 15-20 сентября.
26. Горячев И.А., Левченко В.Д., Перепёлкина А.Ю. Программная модель и оценка производительности для гетерогенных систем с графическими процессорами // Международная молодёжная конференция-школа «Современные проблемы прикладной математики и информатики». Тезисы докладов. — Дубна, 2012. — 22-27 августа. — С. 78–80.

Подписано в печать 16.06.2016. Формат 60x84/16. Усл.печ.л. 1,4. Тираж 70 экз. Заказ А-27.

ИПМ им. М.В.Келдыша РАН. 125047, Москва, Миусская пл., 4