

Отзыв

официального оппонента на диссертацию Перепёлкиной Анастасии Юрьевны «Трёхмерный кинетический код для моделирования замагниченной плазмы», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 - математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертация Перепёлкиной Анастасии Юрьевны посвящена разработке и построению высокоэкономичных алгоритмов параллельного счета, их реализации в виде программного комплекса трёхмерного кинетического моделирования плазмы и практического использования в численном решении одной из задач, актуальных в области исследований взаимодействия поля с веществом.

В настоящее время активно ведутся теоретические изыскания и натурные эксперименты, связанные с поглощением мощных лазерных импульсов конденсированными мишенями, с разработкой эффективных плазменных двигателей, с построением надежных систем удержания плазмы магнитным полем и т.п. В силу принципиальной сложности аналитического описания численное моделирование высокой точности на данный момент является одним из наиболее достоверных средств диагностики, предсказания и объяснения плазменных процессов в подобных установках. При этом трёхмерные релятивистские постановки компьютерных экспериментов по методу макрочастиц, отвечающие современным запросам науки и техники, предъявляет особые, весьма жесткие требования к вычислительным ресурсам используемых ЭВМ, что обуславливает всевозрастающее использование технологий высокопроизводительного счета, в частности, параллельных вычислений. Особенно ярко эта тенденция проявляется при исследовании многомасштабных задач физики сильно неравновесной плазмы, где развитие высокочастотных неустойчивостей, как правило, существенно влияет на квазистационарные режимы изучаемых процессов.

К сожалению, в настоящее время наиболее распространенные супер-ЭВМ (кластерного типа) по сути лишены средств рационального распараллеливания сложных программ на уровне их трансляции. Для достижения приемлемой эффективности расчетов на современных мультипроцессорах с распределенной памятью требуются методики построения кодов с продуманной системой межузловых связей, определяемых особенностями не только реализуемых алгоритмов, но спецификой современных компьютерных архитектур, подразумевающей развитую иерархию подсистемы памяти и многоуровневую параллельность.

Актуальность диссертационной работы обусловлена тем, что в ней предложена, обоснована и реализована методика, предполагающая более эффективное, по сравнению с известными аналогами, использование компьютерных ресурсов, что может быть полезным в исследовательских и инженерных расчётах, связанных с кинетикой неравновесной плазмы и существенно расширить круг задач, решаемых дискретным моделированием.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

Первая глава содержит методику выбора математической модели и численных методов, лежащих в основе разрабатываемого программного комплекса кинетического моделирования плазмы. Для конкретного примера рассмотрена задача о моделировании плазмы канала холловского электроактивного двигателя (ХД).

Выбранная модель трехмерна, учитывает самосогласованную динамику полей и частиц, не содержит калибровок физических параметров. Численный алгоритм основан на решении

самосогласованной системы уравнений Власова-Максвелла методом частица-в-ячейке (Particle-in-Cell — PIC). Эволюция электромагнитных полей предполагает использование конечных разностей во временной области на сдвинутых сетках со вторым порядком аппроксимации. При этом показано, что экономичное описание существенно разномасштабных процессов возмущений поля и плотности заряда предполагает наличие в модели двух различных временных шагов: для обновления значений полей и для движения макрочастиц

Вторая глава, являющаяся ключевой, содержит обоснование выбора алгоритмов и описание средств и методов их реализации.

Формально алгоритм можно интерпретировать как правило обхода графа зависимостей задачи. Тогда 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.

Выбор алгоритма определяется шаблоном численной схемы, моделью параллельности используемого вычислительного устройства, средствами реализации. Одним из вариантов является локально-рекурсивное разбиение $d+1$ -мерного пространства на призмы. Основания призмы целиком лежат в одном слое итераций по времени и выбираются, исходя из требований локальности алгоритма и простоты его реализации. Наклон боковых ребер призмы определяется шириной локального шаблона схемы. При этом он выбирается так, чтобы ребра были как можно ближе к нормали основания (для повышения локальности), но удовлетворяли необходимому свойству при разбиении фигуры алгоритма на подобные фигуры. То есть, все зависимости, пересекающие одну грань, должны быть односторонними.

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

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

Третья глава содержит пример применения кода в задаче о роли вейбелевской неустойчивости при взаимодействии лазерного импульса со сверхкритическим плазменным слоем. Здесь приведены сведения о механизме неустойчивости и аналитические оценки ее инкремента. Обоснована постановка численных экспериментов. Ее отличительные черты: слой плазмы занимает около половины области; импульс сфокусирован в точку на поверхности плазменного слоя. При этом для решения по сути двумерной задачи использована трехмерная модель, так что допускает появление объемных структур.

Под действием лазерного излучения наблюдается возникновение филаментационной структуры и образование стационарного магнитного поля на поверхности плазмы. Для оценки влияния процесса филаментации в этой системе построены графики зависимости отношения энергии, содержащейся в магнитных полях, и кинетической энергии ускоренных частиц от времени. Их анализ выявил, что зависимость максимума по времени этого отношения от амплитуды импульса оказалась немонотонной факт достаточно неожиданный.

Методическим обоснованием проведенных численных исследований служит предварительное решение трех задач с постепенным усложнением постановок.

1. Два холодных релятивистских пучка электронов с противоположно направленными скоростями. Рост неустойчивости возникает из начального возмущения в скорости частиц. Ионы являются неподвижным фоном.

2. Два противоположно направленных релятивистских пучка электронов с конечной тепловой скоростью. Исходного периодического возмущения нет, рост неустойчивости проходит из начального теплового шума. Ионы являются неподвижным фоном.

3. Ускорение электронов в слое плазмы вызывается фокусированным лазерным импульсом. Электроны слоя плазмы обладают конечной тепловой скоростью. Ионы в отличие от первых двух постановок подвижны.

Заключение посвящено обобщению полученных в диссертационной работе результатов, а также формулировке их наиболее перспективных приложений.

Научная новизна заключается в применении локально рекурсивных нелокально асинхронных (LRnLA) алгоритмов для разработки программного комплекса моделирования кинетики плазмы. Суть данного подхода заключается в отказе от интуитивного пошагового во времени обхода области и нахождении оптимального порядка вычислений при анализе графа зависимостей задачи на четырёхмерной сетке координат-времени. Узлы, операции в которых можно провести без подгрузки дополнительных данных, заключаются в фигуры. В процессе вычислений, соответствующие этим фигурам, обрабатываемые данные локализуются на верхних уровнях иерархии памяти, что приводит к ускорению их обработки. Конкретный алгоритм выбирается при совместном анализе численной схемы и целевой компьютерной архитектуры и в данном случае представляет собой призмы с наклонными гранями, оптимальным образом покрывающие шаблон численной схемы PIC-метода и достаточно простые в реализации.

Эффективное использование компьютерных ресурсов позволило реализовать PIC-схему высокого порядка точности в трёхмерной геометрии без существенных упрощений, что выделяет разработанный подход на фоне существующих решений.

Впервые проведено моделирование взаимодействия лазерного импульса со слоем сверхкритической плазмы в трёхмерной области, достаточной для огибающей лазерного импульса, при этом шаг пространственной сетки разрешил свободное развитие филаментов тока и магнитного поля вследствие вайбелевской неустойчивости.

Обоснованность и достоверность полученных результатов и защищаемых положений обеспечивается корректностью используемого математического аппарата, совпадением результатов многочисленных тестов с теоретическими прогнозами, верификацией программно реализованных численных алгоритмов на классических задачах физики плазмы с известными аналитическими решениями, системностью подхода к выбору параметров кинетического моделирования на основе серии методических расчетов в иерархически усложняющихся постановках компьютерных экспериментов..

Практическая ценность работы состоит в создании удобного инструмента численного моделирования, эффективного при работе с большими задачами на персональных компьютерах. Это открывает возможность проведения массовых расчетов, например, в задачах оптимизации физических параметров установок. Вместе с тем использование кода на суперкомпьютерах позволяет моделирование процессов, для описания которых нужны рекордно большие размеры данных и количество вычислений, что, безусловно, полезно как для инженерных расчетов, так и для развития теоретических представлений в области физики плазмы.

Недостатки диссертации.

Употребление термина «замагниченная плазма» в тексте и особенно заголовке диссертации является не вполне корректным. Правильнее, как мне представляется, была бы терминология «магнитоактивная плазма».

Не достаточна ретроспектива работ по тематике диссертации. В частности, не указан ряд серьезных публикаций по параллельным вычислениям, дискретному моделированию взаимодействий лазер – плазма, численным исследованиям вайбелевской неустойчивости.

Обсуждение LRnLA алгоритмов (глава 2) составляет, по-видимому, наиболее важную

часть диссертации. Однако их описания фрагментарны и довольно запутаны. Не хватает более четкой терминологии и логически выстроенного изложения, что несколько затрудняет общее восприятие материала.

Автору стоило бы дополнительно поработать над общей и профессиональной стилистикой, поскольку в тексте, помимо опечаток, встречаются малопонятные выражения. Например, «... не известно, насколько достоверными будут результаты о не сконструированных заранее установках ...» - стр. 18; или «... о выхождении на насыщение нефизических неустойчивостей ...» - стр. 32; или «... одномерные зависимости полей от пространства ...» - стр. 63 и тому подобное.

Наконец, при хорошем иллюстративном наполнении работы, комплексные графики малоинформативны, поскольку нет расшифровки представленных на них кривых (смотри, например, рис. 2.19 на стр. 64).

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации, которая полностью соответствует специальности 05.13.18 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Работа удовлетворяет общим требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно критериям, изложенным в разделе II «положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ. Автореферат правильно отражает содержание диссертационной работы. Считаю, что Перепёлкина Анастасия Юрьевна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

19.09.2016

Доктор физ.-мат. наук, доцент
Бородачев Леонид Васильевич

доцент кафедры математики физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,
Телефон: 89151144209
Адрес электронной почты: borodach2000@mail.ru

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет.
Адрес: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, дом 1,
стр. 2, физический факультет, кафедра математики.

Подпись Л.В. Бородачева заверяю.

Лавр-10/н



Л. П. Ковалева