

ОТЗЫВ

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

Для описания неравновесных процессов в физике плазмы необходимость использования кинетических методов не вызывает сомнений. Например, кинетический подход является основой для описания взаимодействия мощных коротких лазерных импульсов с твердотельными и газовыми мишенями, когда нелинейные явления играют определяющую роль и возникающая плазма является существенно неравновесной. Численное моделирование методом «частица-в-ячейке» является одним из основных инструментов описания такой плазмы, без привлечения которого в настоящее время практически не публикуется ни одного значимого результата в этой области физики высоких энергий. При этом, большинство расчетов проводится на максимально доступных численных ресурсах, использование которых является наиболее существенным ограничением для моделирования реальной экспериментальной ситуации. Так, существует понимание в необходимости проведения трехмерных кинетических расчетов, реализация которых с уже написанными кодами сильно затруднена. Даже значительное увеличение доступных компьютерных мощностей далеко не всегда позволяет провести требуемые трехмерные расчеты с достаточной точностью. Создание новых численных кодов, наиболее эффективно использующих компьютерные ресурсы, является необходимым условием для адекватной интерпретации экспериментальных данных. При этом особую ценность имеют универсальные коды, с использованием которых можно решать широкий круг задач физики плазмы, а не узко-специфические программы направленные на решение одной конкретной проблемы. Таким образом, избранная диссертантом тема является крайне актуальной в настоящее время.

В работе описывается разработанный трехмерный кинетический численный код CFHall, который может быть использован для изучения эволюции неравновесной плазмы в различных условиях и, в частности, для описания взаимодействия лазерного излучения с плазмой. Автором приводится описание основных алгоритмов для решения системы уравнений Власова-Максвелла, лежащих в основе кода, и их реализации для проведения трудоемких трехмерных параллельных расчетов. Демонстрируется эффективность работы кода на примере изучения эволюции вейбелевской неустойчивости в трехмерной

геометрии.

Диссертация А. Ю. Перепелкиной имеет объем 109 страниц, включая 39 рисунков, 9 таблиц и библиографию из 122 наименований, и состоит из введения, трех глав и заключения.

Во введении дана общая характеристика работы, обосновывается ее актуальность, сформулированы цели исследования, защищаемые положения, практическая ценность и научная новизна работы, представлена структура диссертации.

Первая глава посвящена, в основном, описанию реализации математической модели кинетики плазмы в численном счете. Автором обосновывается необходимость решения кинетических уравнений для моделирования плазмы и уравнений Максвелла для описания электромагнитных полей в трехмерной геометрии; приводится алгоритм построения конечно-разностной схемы решения уравнений Максвелла и метод макрочастиц для описания движения заряженных частиц плазмы. Представлены реализация граничных условий для полей и частиц и способ задания лазерного импульса. Указывается на возможность использования разных шагов по времени для расчетов электромагнитных полей и движения частиц. Приводится результат тестирования порядка аппроксимации алгоритма на примере вычисления частоты плазменных (легмюровских) колебаний электронов плазмы.

Вторая глава описывает основные достижения диссертационной работы, заключающиеся в создании алгоритмов, позволяющих многократно повысить эффективность численного кода. В первую очередь речь идет о нахождении наиболее оптимального порядка проведения вычислений, исходя из требований повышения локальности последовательно обрабатываемых данных и уменьшения обмена данными между процессорами. Это достигается за счет использования разработанных уникальных алгоритмов, позволяющих отказаться от синхронизации всех используемых процессоров на каждом шаге по времени. Стоит также отметить использование эффективных схем хранения данных, которые также позволяют многократно ускорить проведение вычислений. Особое внимание уделено обработке границ расчетной области, для чего написаны специальные алгоритмы и используется автоматическая кодогенерация. Разработан интерфейс для ввода начальных данных и специальные программы для обработки полученных результатов. Проведено тестирование кода на ряде задач физики плазмы. Подробно рассмотрена задача о разлете плазмы в скрещенных постоянных электрическом и магнитном полях.

Третья глава посвящена изучению эволюции Вейбелевской неустойчивости плазмы

с анизотропным распределением электронов в трехмерной геометрии. Автором приводится линейная теория Вейбелевской неустойчивости, используемая для сравнения инкремента раскачки неустойчивости с результатами численного счета. Изучается эволюция ширины возникающих филаментов магнитного поля в зависимости от численных параметров для двух встречных релятивистских пучков электронов, имеющих тепловое максвелловское распределение по скоростям. Показано, что ширина филаментов (изначально определяемая либо дебаевским радиусом, либо численным разрешением) линейно растет во времени со скоростью, определяемой тепловой скоростью электронов. Также исследована вейбелевская неустойчивость при воздействии лазерного импульса фемтосекундной длительности на плотный плазменный слой. Продемонстрировано формирование стационарных магнитных полей на коротких временах, сравнимых с длительностью лазерного импульса. Найдена максимальная энергия этих магнитных полей в зависимости от интенсивности падающего на мишень импульса.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Диссертация А. Ю. Перепелкиной выглядит как завершенное исследование, посвященное созданию эффективного кода для описания неравновесной плазмы. Основные результаты диссертации хорошо обоснованы и достоверны. Вместе с тем она не лишена и недостатков:

1. На мой взгляд, в диссертационной работе не достаточно убедительно доказано преимущество созданного кода над существующими аналогами. В литературе описано достаточно большое количество задач, решенных методом «частица-в-ячейке» с указанием затраченных ресурсов. Повторение любого из уже опубликованных расчетов не только бы явилось хорошим тестом для написанного кода, но и могло бы служить убедительным и наглядным доказательством его преимуществ.
2. В последнем параграфе второй главы приведены задачи, на которых проводилось тестирование кода, однако результаты тестирования не представлены в диссертации.
3. Ни в одном из примеров численных расчетов не приведены параметры компьютеров, на которых они проводились, и примеры используемых алгоритмов для повышения эффективности параллельных расчетов, которые и являются одним из основных результатов диссертационной работы. Для лучшего понимания используемых алгоритмов было бы полезно подробно описать все их характеристики на примере конкретного проведенного расчета.

4. Результаты численного моделирования вейбелевской неустойчивости плазмы, облучаемой коротким лазерным импульсом, не достаточно полно проанализированы с физической точки зрения. Не обсуждаются возможные причины немонотонной зависимости доли энергии магнитных полей (по сравнению с энергией частиц) от интенсивности лазерного излучения. Для этого было бы полезно построить зависимость энергии заряженных частиц (электронов) от интенсивности лазерного излучения. Неясно является ли вынесенное в защищаемые положения максимальное значение отношения энергии магнитных полей к энергии ускоренных частиц (4.5%) универсальной величиной или оно характерно только для рассматриваемой длительности лазерного импульса и плотности плазмы. Время образования квазистационарных магнитных структур в рассмотренном примере совпадает с длительностью лазерного импульса. Является ли это совпадение случайным? Из текста диссертации не понятно, как полученные результаты могут быть полезны для усовершенствования механизмов ускорения частиц лазерными импульсами, как отмечается в работе.
5. Заглавие диссертации не совсем точно отражает ее содержание. Разработанный и описанный в диссертации код подходит для моделирования и не замагниченной плазмы, что, в частности, демонстрируется на приведенных примерах. Поэтому неясно, зачем занижается область использования разработанного кода и периодически подчеркивается в тексте диссертации, что целью работы является моделирование замагниченной плазмы.

Отмеченные выше недостатки, носящие, в основном, рекомендательный характер, не влияют на положительную оценку работы в целом. Диссертация А. Ю. Перепелкиной содержит ряд новых и интересных результатов, важных как для прикладных приложений, так и для дальнейших теоретических работ. Созданный численный код может послужить хорошим инструментом для проведения широкого круга теоретических исследований как в области взаимодействия мощных коротких лазерных импульсов с плазмой, так и других задач неравновесной плазмы. Особо стоит отметить возможность использования написанного кода в образовательных целях. Результаты диссертационной работы известны научной общественности в нашей стране и за рубежом, неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях, три работы опубликованы в реферируемых журналах из списка ВАК. Автореферат полностью отражает содержание

диссертации.

Данная диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым положением о порядке присуждения ученых степеней к диссертациям, предъявляемым на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а ее автор, А. Ю. Перепелкина, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Отдела квантовой радиофизики
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Физического института
им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,
119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, 53
тел. 499 135 7827 E-mail: brantov@sci.lebedev.ru

Брантов Андрей Владимирович

Подпись А. В. Брантова удостоверяю



Ученый секретарь ФИАН к.ф.-м.н. Цвентух Михаил Михайлович. 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53. (499) 132-62-06. scilpi@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН). 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53. (499) 135-42-64. postmaster@lebedev.ru