

Наименование работы:

Моделирование взаимодействия плазмы с мощным электронным пучком

Состав коллектива исполнителей:

1. В.А.Вшивков
2. А.В.Снытников
3. Г.Г.Лазарева
4. Е.А.Месяц
5. Д.Н.Горпинченко

Контактное лицо

А.В.Снытников, snytav@ssd.ssc.ru

Научное содержание работы

Постановка задачи

На многопробочной магнитной ловушке ГОЛ-3 (ИЯФ СО РАН) наблюдается понижение электронной теплопроводности на 2-3 порядка по сравнению с классическим значением в результате релаксации в плазме мощного электронного пучка. Этот эффект представляет большой интерес с точки зрения построения энергетического термоядерного реактора, и на данный момент теоретическое описание его отсутствует.

Задача заключается в том, чтобы воспроизвести на суперЭВМ резонансное взаимодействие релятивистского электронного пучка с плазмой, и, во-вторых, промоделировать возникающую в дальнейшем турбулентность.

Современное состояние проблемы

Для вычислительных экспериментов по моделированию взаимодействия плазмы с пучком были заданы следующие начальные условия: температура электронов $T_e = 1$ кэВ, температура ионов $T_i = 0$, плотность плазмы $n = 10^{17}$ см⁻³, отношение плотностей электронов пучка и электронов плазмы равна 10^{-3} , энергия пучка равна 1 МэВ. Размер сетки 512×64×64, 150 модельных частиц в ячейке.

Тестирование созданной модели проведено с помощью проверки выполнения законов сохранения энергии и импульса и проверки сходимости результатов при уменьшении шага сетки и увеличении числа модельных частиц. Кроме того, исследована динамика обмена энергии между ионной и электронной компонентами плазмы в отсутствие пучка. Также показано, что теплопроводность модельной плазмы в отсутствие пучка пропорциональна $T^{5/2}$, что соответствует классической зависимости.

В результате численного моделирования была получена модуляция плотности плазмы с амплитудой равной 3 (относительно начальной плотности плазмы). Обнаружено рассеивание пучка, связанное с развитием неустойчивости, которая сопровождается формированием областей с пониженным коэффициентом теплопроводности. Вследствие релаксации пучка перенос тепла электронами плазмы также значительно уменьшается, и, соответственно, уменьшается коэффициент электронной плазменной теплопроводности.

Коэффициенты переноса в исследуемом процессе носят аномальный характер, и по сравнению с классическими коэффициентами оказываются на 2 порядка меньше. При этом

частота столкновений для электронов равна инкременту неустой, возникающей в модельной плазме.

Ожидаемые результаты по окончании периода работы

1. Построение кинетической теории сильнонеравновесных электронных распределений в плазме, возникающей при взаимодействии электронных пучков с плазмой. Построение будет выполнено как обобщение зависимостей, полученных в ходе конкретных расчетов.
2. Исследование зависимости транспортной частоты соударений от импульса.
3. Трехмерное численное моделирование турбулентного нагрева электронов плазмы электронным пучком, трехмерное численное моделирование турбулентного подавления электронной теплопроводности, сравнение с экспериментом. Для этого предполагается выполнить расчеты с параметрами, максимально приближенными к экспериментальным.

Основные результаты, полученные к настоящему времени

- Создана модель взаимодействия плазмы с мощным электронным пучком на основе метода частиц в ячейках.
- Показано, что теплопроводность модельной плазмы в отсутствие пучка пропорциональна $T^{5/2}$, что соответствует классической зависимости.
- Получена модуляция плотности плазмы с амплитудой равной 3 (относительно начальной плотности плазмы).
- Обнаружено рассеивание пучка, связанное с развитием неустойчивости, которая сопровождается формированием областей с пониженным коэффициентом теплопроводности.
- Промоделировано уменьшение коэффициента электронной плазменной теплопроводности вследствие релаксации пучка.
- Установлено, что коэффициенты переноса в исследуемом процессе носят аномальный характер, и по сравнению с классическими коэффициентами оказываются на 2 порядка меньше.
- При этом частота столкновений для электронов равна инкременту неустойчивости, возникающей в модельной плазме.

Эффект от использования кластера в достижении целей работы

Используемая на кластере ИВЦ НГУ быстродействующая файловая система SFS позволяет быстро проводить расчеты с большим количеством выдач. В рамках данного проекта требуется проводить именно такие расчеты, в частности, требуется выдавать фурье-образы всех основных величин (один фурье-образ 160 Мб, 5 выдаваемых величин: электрическое и магнитное поле, плотности ионов и электронов, скорости электронов, 400 выдач в расчете средней продолжительности). Поэтому использование кластера ИВЦ НГУ (наряду с НКС-30Т, ССКЦ СО РАН) дает практически уникальную возможность проводить расчеты по указанной теме. Собственно расчет может быть проведен на многих машинах, но возможность хранения и обработки результатов счета отсутствует практически на всех формально очень мощных компьютерах (МВС-100К, СКИФ МГУ).

Иллюстрации, визуализация результатов

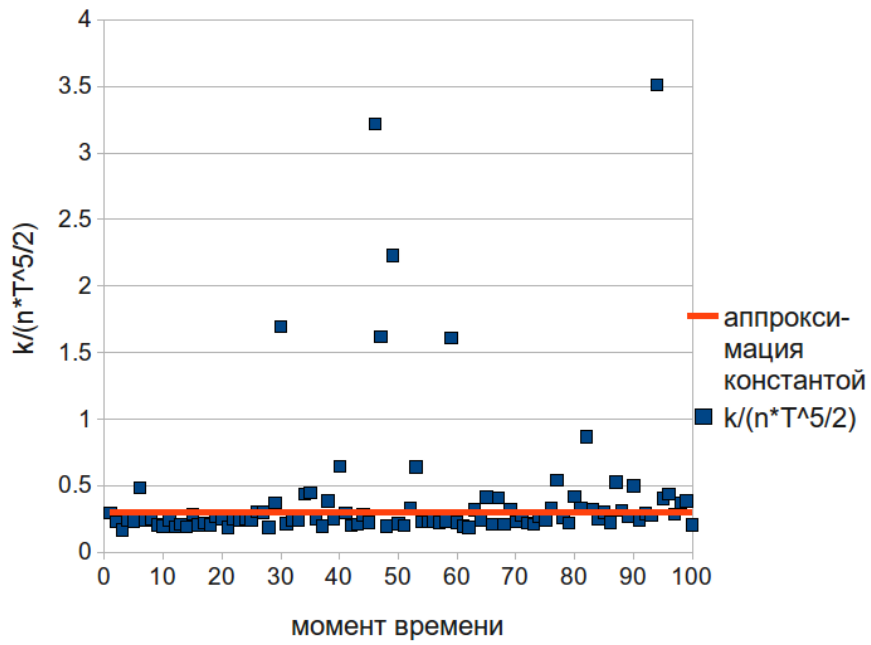


Рис. 1. Проверка наличия классической зависимости коэффициента теплопроводности от температуры.

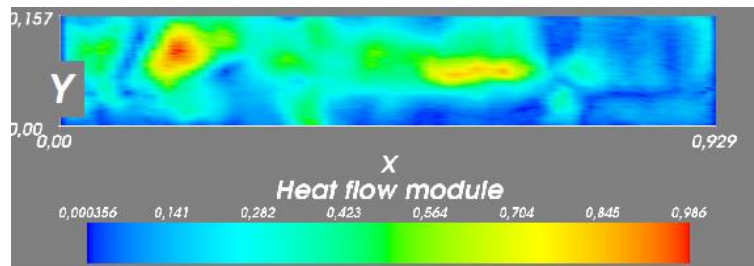


Рис.2. Коэффициент электронной теплопроводности плазмы после релаксации электронного пучка(нормированный на начальное значение).

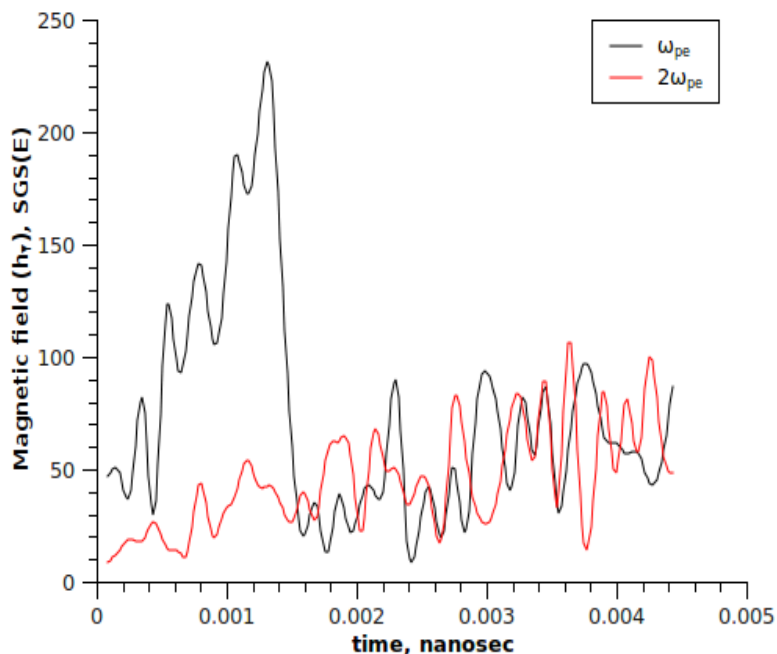


Рис. 3. Появление излучения на удвоенной плазменной частоте. Черная линия — максимальная амплитуда на одинарной частоте, красная — на двойной частоте.

Перечень публикаций, содержащих результаты работы

1. А.В. Снытников. "Сравнительный анализ производительности кластерных суперЭВМ на примере задачи о релаксации электронного пучка в высокотемпературной плазме", принято в печать, "Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского", 2010
2. В.А.Вшивков, А.В. Снытников. Вычисление температуры при моделировании высокотемпературной плазмы методом частиц в ячейках на суперЭВМ. Принято в печать, Научный вестник Новосибирского государственного технического университета, 2010
3. A.V. Snytnikov. Supercomputer simulation of plasma electron heat conductivity decrease due to relativistic electron beam relaxation. Procedia Computer Science, Volume 1, Issue 1, May 2010, Pages 607-615.
4. А.В.Снытников. Моделирование на суперЭВМ аномальной теплопроводности в плазме термоядерной ловушки. Всероссийская суперкомпьютерная конференция "Научный сервис в сети Интернет: масштабируемость, параллельность, эффективность"-2009. 21-26 сентября 2009, Новороссийск, Абрау-Дюрсо.
5. В.А.Вшивков, А.В.Снытников. Построение эффективного параллельного метода решения уравнения Пуассона для моделирования эволюции протопланетного диска. Международная научная конференция "Параллельные Вычислительные Технологии 2009". 30 марта – 3 апреля 2009, Нижний Новгород.
6. А.В.Снытников. Сравнительный анализ производительности кластерных суперЭВМ на примере задачи о релаксации электронного пучка в высокотемпературной плазме. Международная научная конференция "Параллельные Вычислительные Технологии 2009". 30 марта – 3 апреля 2010, Уфа.