

- Тема работы.

Трехмерное моделирование эффекта аномальной теплопроводности в рамках кинетического подхода

- Состав коллектива.

А.В.Снытников, к.ф.-м.н., н.с. ИВМиМГ СО РАН

Е.А.Месяц, к.ф.-м.н., м.н.с. ИВМиМГ СО РАН

К.В.Лотов, д.ф.-м.н., профессор НГУ

- Научное содержание работы:

1. Постановка задачи.

Задача заключается в том, чтобы разработать эффективный параллельный алгоритм для трехмерного моделирования эффекта аномальной теплопроводности на установке ГОЛ-3 (ИЯФ СО РАН) в рамках кинетического подхода. Данный алгоритм должен быть позволять проводить расчеты на сетке размером порядка миллиона ячеек с не менее чем 1000 модельных частиц в каждой ячейке.

2. Современное состояние проблемы.

Современное состояние исследований в области вычислительной физики плазмы характеризуется отказом от упрощенных моделей, таких например, как гидродинамические, в пользу кинетической теории, позволяющей получить как более углубленные знания, так и количественную трактовку явлений, которые сопровождают взаимодействие релятивистских пучков с плазмой. Таким образом, предлагаемые в проекте задачи численного моделирования процессов взаимодействия пучков с плазмой и построения феноменологической теоретической модели, основанная на результатах расчетов, отражают сложившуюся тенденцию.

В настоящее время в связи с бурным развитием вычислительной техники, в том числе появлением многопроцессорных комплексов, метод частиц в ячейках получил широкое распространение для моделирования нестационарных задач физики разреженной плазмы. Его распространению способствует и то, что он является фактически единственным методом для моделирования вышеупомянутых задач. Но при решении задач с большим числом частиц и в течение большого времени стали проявляться недостатки метода, которые раньше нельзя было заметить. Эти недостатки связаны с проявлением счетных шумов, которые в физике плазмы связаны с большой разницей во временных и пространственных масштабах ионной и электронной компонент плазмы. Для преодоления этого недостатка довольно часто при моделировании используется нефизическое отношение массы иона к массе электрона. Другой путь заключается в применении гибридных моделей, в которых одна из компонент плазмы описывается с помощью гидродинамического приближения и соответствующие уравнения решаются конечно-разностными методами. Недостатки различных модификаций метода частиц вызывают попытки тем или иным способом совершенствовать метод и приспособивать его к конкретным физическим задачам. Следует заметить, что теоретическими исследованиями метода частиц и созданием новых модификаций занимаются, в основном, за рубежом. Например, в работе Westermann (Inter.J.Numer.Modelling, 1994) предложена модификация метода частиц для решения задач на нерегулярных сетках. Основная идея заключается в конформном преобразовании области с криволинейными границами в прямоугольник. Другой подход с использованием конечных элементов рассмотрен в работе

Kazeminezhad, Zalesak, Spicer (Comp.Phys.Commun., 1995). В работе Gibbons, Hewett (J.Comp.Physics, 1995) развивается модель Дарвина для моделирования низкочастотных плазменных явлений. Теоретическая работа Larson, Hewett, Langdon (Comp.Phys.Commun., 1995) посвящена моделированию методом частиц осесимметричных задач, в ней обращено внимание на погрешности метода вблизи оси симметрии.

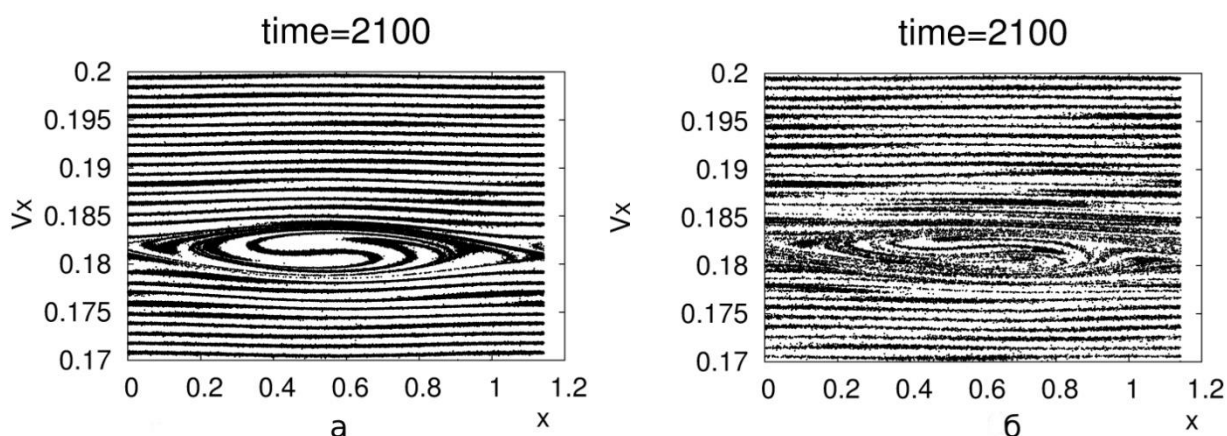
3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.

Используется метод частиц в прямоугольной области. Область разделяется на подобласти с перекрытием в один слой, пересылки граничных значений поля и токов выполняются средствами MPI (MPI_sendrecv). В рамках каждой подобласти модельные частицы разделены равномерно между процессорами(ядрами), обрабатывающими данную подобласть. Распределение токов, вычисленное внутри подобласти, суммируется по всем процессорам (MPI_Allreduce).

4. Полученные результаты.

На основе метода частиц в ячейках создана параллельная трехмерная численная модель, позволяющая моделировать процессы релаксации теплового электронного пучка в плазме (рис. 1). Данный код позволяет моделировать эволюцию и неустойчивость электронного пучка в плазме в трех разных режимах неустойчивости. Проведена большая серия расчетов при различных численных (шаг сетки по пространству, количество частиц в ячейке) и физических (плотность и температура пучка, размер области) параметрах модели. Исследовано насыщение роста отдельно взятой неустойчивой моды. При различных счетных параметрах исследована точность получаемого решения. Найдена зависимость точности полученных результатов от количества модельных частиц. Определено минимально необходимое количество модельных частиц для корректного воспроизведения инкремента неустойчивости.

5. Иллюстрации, визуализация результатов.



- *Рис. 1. Электроны пучка на фазовой плоскости (x, V_x) для кинетического режима при достаточном и малом числе частиц в ячейке. а) число частиц в ячейке = 2500, б) число частиц в ячейке = 500. Момент времени $t=2100$*

- **Эффект от использования кластера в достижении целей работы.**

Расчеты по моделированию релаксации электронного пучка в плазме были проведены во много благодарю именно тому, что на кластере ИВЦ НГУ доступно большое дисковое пространство, а также благодаря относительно небольшому времени ожидания в очереди задач (по сравнению с ССКЦ, НИВЦ МГУ или МСЦ РАН)

- **Перечень публикаций, содержащих результаты работы (если есть). Указать импакт-фактор журнала (Thomson Reuters, РИНЦ,...).**

- 1. К.В. Лотов, Е.А. Месяц, А.В. Снытников. Моделирование кинетической неустойчивости электронного пучка в плазме методом частиц в ячейках. // Математическое моделирование, 2014, номер 11, **РИНЦ: 0.235**

- 2. B. Glinskiy, A.Romanenko, A.Snytnikov, I. Kulikov, I. Chernykh, V.Vshivkov. Co-design of parallel numerical methods for plasma physics and astrophysics//Supercomputing: Frontiers and Innovations.

- 3. K.V.Lotov, I.V.Timofeev, V.A.Vshivkov, E.A.Mesyats, A.V.Snytnikov. Note on quantitatively correct simulations of the kinetic beam-plasma instability // в печати: Physics of Plasmas. **Импакт-фактор 2,475.**

- 4. I. Kulikov, I. Chernykh, A. Snytnikov, B. Glinskiy, A. Tutukov "AstroPhi: A code for complex simulation of the dynamics of astrophysical objects using hybrid supercomputers" // Computer Physics Communications. 2015. V. 186. P. 71-80. DOI: 10.1016/j.cpc.2014.09.004. **Импакт-фактор 3,394**

- 5. Главы в монографии: Parallel Programming: Practical Aspects, Models and Current Limitations, **Editors:** Mikhail S. Tarkov. **ISBN:** 978-1-60741-263-2

Chapter 3 - Large-Scale and Fine-Grain Parallelism in Plasma Simulation pp. 59-70, **A. Snytnikov**

Chapter 4 - Numerical Modelling of Astrophysical Flow on Hybrid Architecture Supercomputers pp. 71-116, I. Kulikov, I. Chernykh, **A. Snytnikov**, V. Protasov, A. Tutukov, B. Glinsky

- **Ваши впечатления от работы вычислительной системы и деятельности ИВЦ НГУ, а также Ваши предложения по их совершенствованию.**

В настоящий момент производится модернизация программы для работы на гибридных суперЭВМ, что, по предварительным экспериментам, дает значительный прирост производительности, поэтому желательно, чтобы кластер был дополнен узлами с ускорителями вычислений (Nvidia Kepler или Intel Xeon Phi).