

Технология решения задач физики плазмы на суперЭВМ

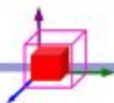
А.В.Снытников

Институт Вычислительной Математики и Математической Геофизики СО
РАН

12 мая 2016 г.

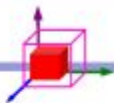
по материалам диссертации на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ



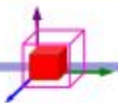
Почему именно "технология"

- ▶ Технология (от др.-греч. *τεχνη* — искусство, мастерство, умение; *λογος* — мысль, причина; методика, способ производства) — совокупность методов, процессов и материалов, используемых в какой-либо отрасли деятельности, а также научное описание способов технического производства (Толковый словарь С.И.Ожегова)
- ▶ По причине отсутствия экзафлопсных суперЭВМ можно обсуждать только лишь технологию решения задач
- ▶ Необходимо представить всю совокупность методов и подходов, используемых для достижения высокой производительности для задач физики плазмы



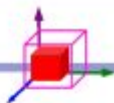
Динамика высокотемпературной плазмы

- ▶ Особый интерес с точки зрения математики: трудности выбора и обоснования модели, разработки вычислительных методов и программной реализации вычислительных алгоритмов (Ч.Бэдсэл, Б.Лэнгдон, «Физика плазмы и математическое моделирование», 1989)
- ▶ Особая сложность: При моделировании плазменных неустойчивостей и турбулентностей в установках УТС при высоких температурах (1-5 КэВ, что соответствует 10 млн.градусов) плазма имеет очень большое количество степеней свободы, необходимость учета которых приводит к использованию соответствующих больших объемов памяти. (В.Т.Астрелин и др. Монография под ред. В.Г.Хорошевского, 2012)
- ▶ Особая важность: УТС является единственным вариантом решения энергетической проблемы.



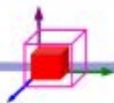
Задача 1: релаксация пучка в плазме

- ▶ Коэффициент электронной теплопроводности на установке ГОЛ-3 (ИЯФ СО РАН) уменьшается в 10^2 - 10^3 раз по сравнению с классическим значением для плазмы с такой плотностью и температурой
- ▶ Аналогичные процессы происходят во время солнечных вспышек II и III типа, при распространении бесстолкновительных ударных волн в космической плазме и в схемах "быстрого поджига" в инерциальном термоядерном синтезе, A.Bret et al., Phys.Plasmas, 120501, 2010
- ▶ Задача заключается в том, чтобы путем кинетического моделирования исследовать возникающую в плазме турбулентность для того, чтобы создать аппроксимационное слагаемое, пригодное для подстановки в МГД-уравнения для моделирования в дальнейшем всей установки в целом.



Моделирование установки ГОЛ-3

- ▶ Установка ГОЛ-3: В.Т.Астрелин, И.В.Кандауров, В.М.Свешников "Численное моделирование транспортировки и сжатия электронного пучка сходящимся магнитным полем при его инжекции в многопробочную ловушку ГОЛ-3" // Успехи Прикладной Физики, 2013, Том 1, номер 5.
- ▶ Двумерная модель формирования из твердотельной крупинки плотного плазменного облака и его нагрева на установке ГОЛ-3-II [Текст] : доклад, тезисы доклада / В. Т. Астрелин, А. В. Бурдаков, Н. А. Губер, В. М. Ковеня // XXVIII Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Звенигород, 19 - 23 февраля 2001. - М., 2001. - С. 226



Кинетическая модель плазмы

$$\frac{\partial f_{i,e}}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial f_{i,e}}{\partial \vec{x}} + \vec{F} \frac{\partial f_{i,e}}{\partial \vec{p}} = St\{f\}, \quad \vec{F} = q_{i,e} \left(\vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{v}, \vec{B}] \right)$$

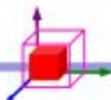
$$\nabla \times \vec{B} = 4\pi \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad \vec{j} = \sum_{i,e} \int f_{i,e} \vec{v} d\vec{v}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{1}$$

$$\Delta \vec{E} = 4\pi \rho \tag{2}$$

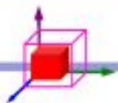
$$\Delta \vec{B} = 0$$

$$\vec{p} = \gamma \vec{v}, \quad \gamma^{-1} = \sqrt{1 - v^2} \tag{3}$$



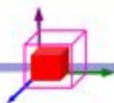
Задача 2: Тлеющий разряд

- ▶ Тлеющий разряд в силан-водородной плазме (Температура ~ 1000 К, напряжение на ВЧ-электрореде ~ 10 В, частота 13 МГц и 58 МГц)
- ▶ На заземленном электрореде образуется пленка аморфного гидрида кремния, применяемая затем в промышленности
- ▶ Задача заключается в том, чтобы путем кинетического моделирования исследовать приэлектродную функцию распределения ионов по энергиям
- ▶ Особую сложность для моделирования представляет собой реакция рекомбинации, вероятность которой мала, но тем не менее ее учет принципиально важен



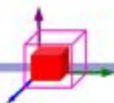
О перспективных экзафлопсных суперЭВМ

- ▶ Появление таких суперЭВМ ожидается к 2018-2020 (или к 2022-2025) году.
- ▶ Существуют проекты экзафлопс-ЭВМ, представленные Nvidia, Cray, и Fujitsu.
- ▶ Международная суперкомпьютерная конференция «Научный сервис в сети Интернет: экзафлопсное будущее», 19 по 24 сентября 2011.
- ▶ С 2010 по 2016 в зарубежных журналах опубликовано более 300 статей, посвященных экзафлопсным вычислениям
- ▶ Отдельные публикации в российских журналах, например: Степаненко С. А., Южаков В. В. Эксафлопсные суперЭВМ. Контуры архитектуры // Программные системы: теория и приложения, Volume 4 Issue 4, 2013



Приложения для экзафлопсных суперЭВМ

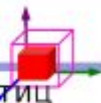
- ▶ Использование суперЭВМ большей, чем сейчас мощности может дать серьезный эффект в следующих областях: астрофизика (V.Springel, 2013), разработка новых материалов (Ono et al., CPC, 2015), физика высокотемпературной плазмы и УТС (В.Т.Астрелин и др., 2012), разработка новых лекарств (В.В.Воеводин, ММГ-08, «Научный сервис в сети Интернет-2014)
- ▶ Такие же надежды возлагались на суперЭВМ всех предыдущих поколений, (Н.Н.Миренков, PaCT-2009)
- ▶ Разработка технологии реализации численных моделей для экзафлопсных суперЭВМ актуально именно сейчас, так как появление таких суперЭВМ ожидается в ближайшие годы



Применение к другим плазменным задачам

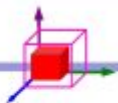
Полученные результаты, а также разработанные методы могут быть использованы специалистами в области

1. физики высокотемпературной плазмы и УТС, В.Т.Астрелин и др. Монография под ред. В.Г.Хорошевского, 2012
2. физики солнечных вспышек, A.Bret et al. //Phys. Plasmas, 2010
3. моделирования взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли, Russell, C.T., The Solar Wind Interaction with the Earth's Magnetosphere: A Tutorial //IEEE Transactions on Plasma Science, 2002



Применение к другим приложениям метода частиц

1. моделирование промышленных плазменных установок, В.Е. Карпов, А.И. Лобанов//ПаВТ-2009, IEEE Transactions on Plasma Science, 1991
2. моделирование полупроводниковых устройств, Хокни,Иствуд, 1987
3. Сейсмология, при использовании метода частиц как альтернативы решению уравнения эйконала, Bjorn Engquist// Acta Numerica, 2003, pp.1-86
4. гидро- и газодинамическом моделировании, Yutong Lu// RSD, 2015, Григорьев Ю.Н., Вшивков В.А., Федорук М.П., 2004
5. при реализации на суперЭВМ численных методов различного назначения, использующих вычисления на сетке и вычисления с частицами



Актуальность работы

- ▶ Трехмерное кинетическое моделирование высокотемпературной плазмы актуально в силу того, что в настоящее время активно идет создание прототипов энергетического термоядерного реактора.
- ▶ Создание технологии разработки алгоритмического и программного обеспечения для суперЭВМ экзафлопсного класса актуально в силу необходимости обеспечить возможность полноценного использования мощности таких суперЭВМ при решении прикладных задач, что исключительно важно при их высоком энергопотреблении (от нескольких десятков МВт).

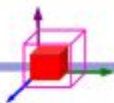


Статьи посвященные, экзафлопсным вычислениям

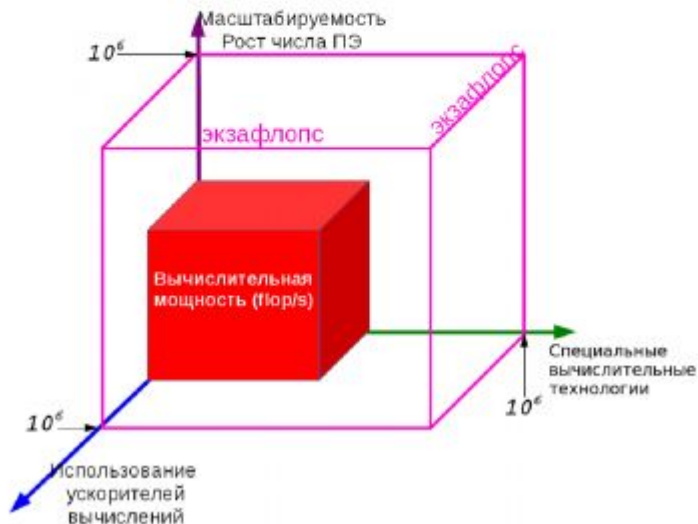
Условное наименование направления	В % от общего числа
масштабируемость и увеличение числа ПЭ	54
использование ускорителей вычислений	21
специальные вычислительные технологии	25

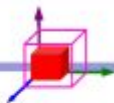
«Специальные вычислительные технологии»:

- ▶ вычислительные методы, позволяющие достигать более высокой точности без увеличения числа ПЭ
- ▶ методы, разработанные специально для экзафлопсных машин
- ▶ адаптация имеющихся численных методов для работы на очень большом количестве ПЭ.



Достижение эксафлопс-производительности



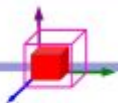


Достижение экзафлопс-производительности

На рисунке объем куба символизирует производительность, а каждая из осей координат - одно из возможных средств ее достижения:

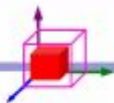
- ▶ Масштабируемость. Рост числа ПЭ.
- ▶ Использование ускорителей вычислений
- ▶ Специальные вычислительные технологии

Если при использовании каждого из инструментов 1 условный флопс увеличивается в 10^6 раз, то в итоге экзафлопс может быть достигнут.



Цель исследования

- ▶ Разработать оптимальную по производительности реализацию математических моделей **высокотемпературной плазмы** на основе метода конечных разностей и конечных объемов, а также различных вариантов метода частиц, допускающую перенос на любую из доступных архитектур суперЭВМ для проведения расчетов с необходимым высоким разрешением на перспективных экзафлопсных суперЭВМ.



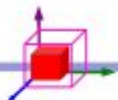
Краткое содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав:

1. Увеличение количества процессорных элементов для повышения точности вычислений и масштабируемость алгоритмов
2. Эффективная реализация численных алгоритмов на гибридных суперкомпьютерных архитектурах и использование ускорителей вычислений
3. Специальные вычислительные технологии для снижения вычислительных затрат и повышения точности
4. Решаемые физические задачи

и заключения.

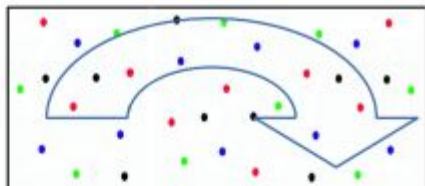
Глава 1. Увеличение количества процессорных элементов для повышения точности вычислений и масштабируемость алгоритмов



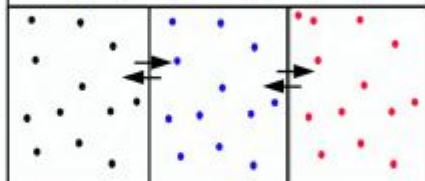
Варианты декомпозиции

- ▶ **Эйлерова** декомпозиция: разделение расчетной области (пространства моделирования) между процессорными элементами (ПЭ) на части по координате (ячейки сетки и находящиеся в них частицы)
- ▶ **Лагранжева** декомпозиция: разделение расчетной области (пространства моделирования) между процессорными элементами (ПЭ) на части по количеству подвижных элементов (частицы, независимо от координаты)
- ▶ **Смешанная эйлерово-лагранжева** декомпозиция (Снытников А.В.//«Абрау-Дюрсо», 2009): Расчетная область разделяется на подобласти для решения уравнений Максвелла, и на каждую подобласть назначается группа из M ПЭ, далее частицы каждой подобласти разделяются дополнительно между этими M ПЭ

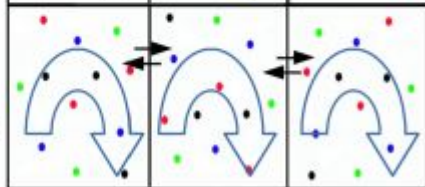
Лагранжева
декомпозиция

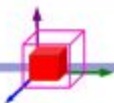


Эйлерова
декомпозиция



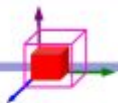
Эйлерово-
Лагранжева
декомпозиция





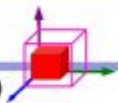
Теоретическое обоснование

- ▶ Понятие минимального фрагмент было введено В.Э.Малышкиным, 2001
- ▶ Для эйлеровой декомпозиции минимальным фрагментом является слой сетки вместе с частицами
- ▶ Для лагранжевой декомпозиции минимальный фрагмент - одна частица
- ▶ Тем не менее, для лагранжевой декомпозиции (из-за необходимости осуществлять коллективные коммуникации по всем ПЭ) нарушается критерий линейности алгоритма (В.Э.Малышкин, 1991)
- ▶ Эйлерово-лагранжева декомпозиция позволяет одновременно минимизировать размер фрагмента и обеспечить линейность

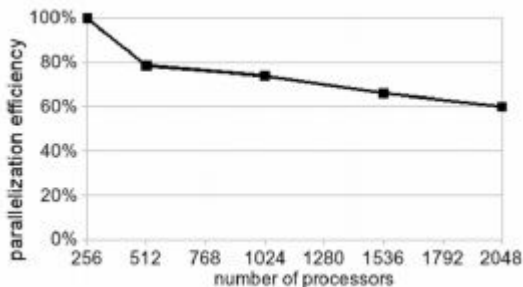


Максимальное количество модельных частиц

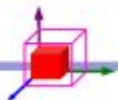
- ▶ Имитация космического пространства на Blue Gene/Q (500 тыс процессоров BG/Q, моделирование 1,1 трлн. частиц). Argonne/Los Alamos/Lawrence National Laboratories. В докладе С.А.Горбаса(IBM) на конференции "Научный сервис в сети интернет-2014"
- ▶ Моделирование космологической эволюции (нейтрино) на Tianhe2, 110 миллиардов частиц, В докладе Yutong Lu, National University of Defense Technologies, China// Russian Supercomputing Days 2015
- ▶ Моделирование взаимодействия пучка заряженны частиц с плазмой// Michael Bussmann, Advanced Accelerator Concepts Workshop AAC 2012, Austin, TX, USA, с помощью кода PIConGPU, 2.8 млрд. частиц
- ▶ А.В.Снытников: 160 миллионов частиц, на "Ломоносов"



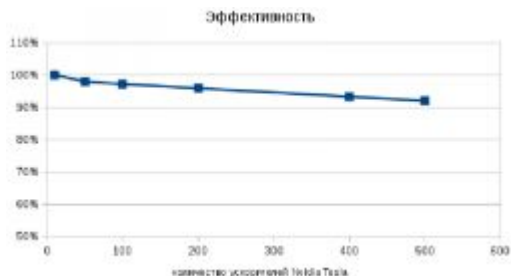
Эффективность (в слабом смысле) до 2000 ПЭ



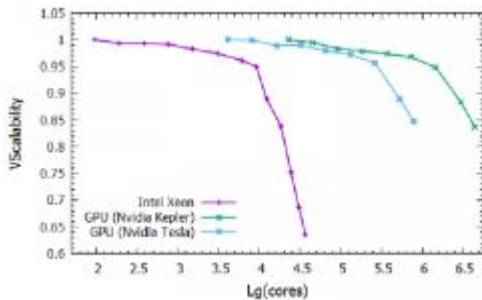
- ▶ Размер сетки $N_1 \times 128 \times 128$, где N_1 - число процессорных ядер, процессоры Intel Xeon разных модификаций
- ▶ Декомпозиция области: эйлерово-лагранжева
- ▶ Тесты проведены на MVS-100K, МСЦ РАН



Эффективность (в слабом смысле) до 500 ПЭ



- ▶ Размер сетки $N_1 \times 128 \times 128$, где N_1 - число процессоров
- ▶ Декомпозиция области: лагранжева
- ▶ Тесты проведены на «Ломоносов», НИВЦ МГУ



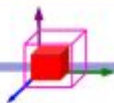
∴

(

)

AGNES

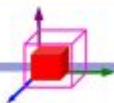
2.



Использованные подходы

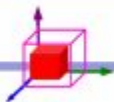
1. Использование разделяемой памяти GPU для расчета токов по частицам
2. Повышение эффективности использования кэш-памяти, для этого
 - ▶ **Вычисление токов в отдельных ячейках**
 - ▶ **Дублирование полей в ячейках**
3. Хранение частиц в массивах по ячейкам
 - ▶ Использование текстурной памяти GPU для хранения частиц
 - ▶ Список частиц в ячейке: Вместо массива структур используется двумерный массив
4. **Сортировка (переупорядочивание) частиц по ячейкам**
5. Верификация результатов путем побитового сравнения с расчетом на CPU

- └ Реализация на гибридных суперЭВМ
- └ Реализация на графических ускорителях



Ускорение по сравнению с 4 ядрами Intel Xeon





Методика переноса: постановка задачи

-

:
Intel Xeon Phi,
Sun UltraSPARC

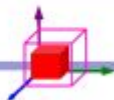
Nvidia I ,
Intel Xeon

-

(!!!)

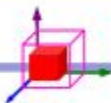
GPU Intel Xeon Phi

-



Основные проблемы переноса с CUDA на MIC

- CUDA
- CUDA
- Nvidia
- CUDA
- C, CUDA,



Основные принципы методики

- ▶ Архитектурно-зависимые участки кода
 - ▶ Сводятся к минимуму
 - ▶ Оформляются в виде процедур
 - ▶ Выносятся во внешнюю подключаемую библиотеку
- ▶ Таким образом в тексте программы присутствует некий обобщенный вызов процедуры, который приобретает конкретную форму при компиляции в зависимости
 - ▶ От компилятора
 - ▶ От архитектуры

```

int Kernel_Launcher(
Cell*Particle> *cells,KernelParams *params,
unsigned int grid_size_x,unsigned int grid_size_y,unsigned int grid_size_z,
    unsigned int block_size_x,unsigned int block_size_y,unsigned int block_size_z,
    int shmem_size,
    SingleNodeFunctionType h_snf,char *name)
{
struct timeval tv1,tv2;
#ifdef __CUDACC__
    dim3
blocks(grid_size_x,grid_size_y,grid_size_z),threads(block_size_x,block_size_y,block_size_z
);

    gettimeofday(&tv1,NULL);
    GPU_Universal_Kernel<<<blocks,threads,shmem_size>>>(cells,params,h_snf);
    DeviceSynchronize();
    gettimeofday(&tv2,NULL);
#else
    char hostname[1000];
    gethostname(hostname,1000);

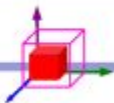
#ifdef OMP_OUTPUT
    printf('function %s executed on %s \n',name,hostname);
#endif

    gettimeofday(&tv1,NULL);

    omp_set_num_threads(OMP_NUM_THREADS);

#pragma omp parallel for
    for(int i = 0;i < grid_size_x;i++)
    {
        ..
        h_snf(cells,params,i,j,k,il,jl,kl);

```

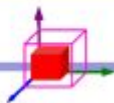



Энергозатраты вычислительного алгоритма

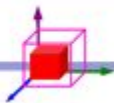
		(Kepler)
	0	75
	6.9	113
	0.00003	76
	0.00019	102

Intel ,
 160 , . . 43.2 Mflops,
 400 6 , 0.7 Mflops/ .

- └ Реализация на гибридных суперЭВМ
- └ Со-дизайн параллельных численных методов



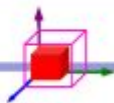
Определение со-дизайна



Со-дизайн при решении задач физики плазмы

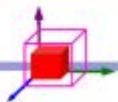
- 1.
- 2.
- 3.

GPU



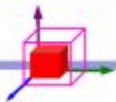
Использование со-дизайна на этапе 1

- ▶ Моделируется небольшой объем плазмы после вхождения пучка ($\sim 20R_D$)
- ▶ В экспериментах зафиксирована модуляция плотности плазмы 300 % (на длине $\gg R_D$)
- ▶ Следовательно, число частиц в соседних подобластях не может отличаться в разы, и необходимости в динамической балансировке загрузки в таком варианте нет



Результат со-дизайна на этапе 1

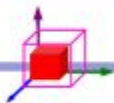
- ():
.. //
- , ,
2003, .51-55.
- :
.. // , 3-2 / 2011
-



Использование со-дизайна на этапе 2

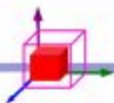
- ,
- (, FFT), . . , . . ,
 . . // . 2008. . 44. 5. . 112-122
- - (FDTD),
 . . , . . //
 , .6, 2, .47-63, 2001.

A,V.Snytnikov //Procedia Computer Science, Volume 1, Issue
1, May 2010, Pages 607-615



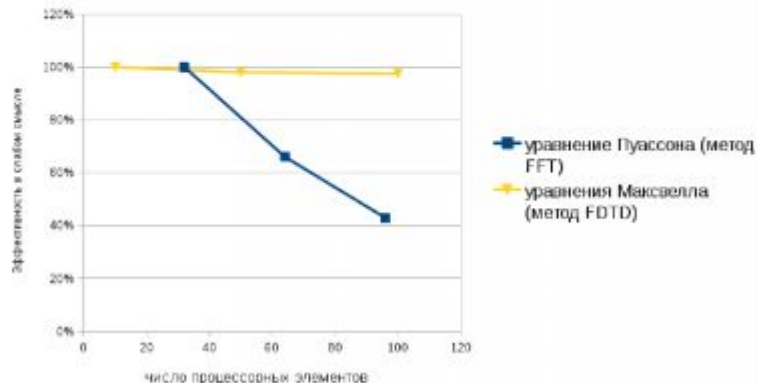
Прямое решение ур. Власова - почему нет?

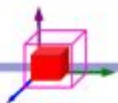
- ▶ Для тестовой задачи (моделирование двухпотоковой неустойчивости) в кинетическом режиме резонансный интервал по скоростям ($\Delta v_{res} \sim 0.01$)
- ▶ Таким образом шаг сетки в пространстве скоростей $h_v = 0.001$
- ▶ Сетка в пространстве скоростей необходима трехмерная (по y, z - минимальная)
- ▶ В итоге размер сетки
 $N_x \times N_y \times N_z \times N_{v_x} \times N_{v_y} \times N_{v_z} = 100 \times 6 \times 6 \times 1000 \times 10 \times 10$
- 2.937 GB
- ▶ По методу частиц 1.175 Gb (Для 5000 частиц в ячейке)
- ▶ Преимущество по точности резонанса (Ю.Н.Григорьев)



Использование со-дизайна на этапе 2

Сравнение параллельной эффективности методов расчета э/м поля

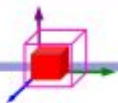




Использование со-дизайна на этапе 3

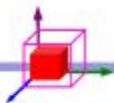
- ▶ Традиционный вариант реализации метода частиц – все частицы в одном большом массиве неэффективен при счете на GPU (ускорение в 2 раза на CPU, и более чем на порядок - на GPU предыдущих поколений, GeForce 680)
- ▶ Поэтому частицы распределены по ячейкам, и расчет происходит в варианте “одна ячейка сетки – один потоковый блок GPU”
- ▶ Теоретически более эффективен вариант “группа соседних ячеек сетки – один потоковый блок GPU” (Rossi, 2012)

3.



Создание модификации метода частиц

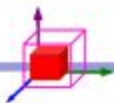
- ▶ Регулировка численности модельных частиц исходя из оценки уровня численных шумов
- ▶ Использование переменной массы модельных частиц для учета небольших примесей в плазме
- ▶ Сохранение локальной функции распределения по скоростям
- ▶ Для существенно неравновесной плазмы ячейка должна быть разбита на микроячейки по координатам и по скоростям, и все перечисленные действия выполняются для отдельных микроячеек.



Постановка тестовой задачи

- ▶ Тестовая задача: Моделирование рекомбинации в тлеющем ВЧ-разряде в силан-водородной плазме
- ▶ Особенность задачи: скорость рекомбинации мала, ($\Delta n/n = 10^{-8} \text{sec}^{-1}$, 1 частица из 100 млн.)
- ▶ Таким образом, для того, чтобы скорость реакции была близкой к реальной, необходимо иметь в ячейке порядка 100 млн. частиц
- ▶ Для демонстрации преимущества метода с адаптивными массами проводится моделирование с использованием
 1. классического метода частиц в ячейках, все модельные частицы имеют равные фиксированные массы
 2. метода с адаптивным изменением масс модельных частиц

- └ Специальные вычислительные технологии
- └ Адаптивное изменение масс модельных частиц



Результат решения тестовой задачи

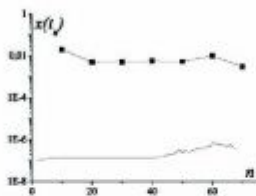
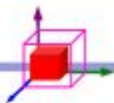


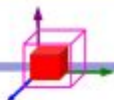
Рис.: Максимальное изменение плотности положительных ионов, нормированное на величину плотности в зависимости от номера временного шага, $x(t_n)$: линия с маркерами - классический метод частиц в ячейках, все модельные частицы имеют равные фиксированные массы; гладкая линия - алгоритм с адаптивным изменением масс модельных частиц.

Результат: Скорость рекомбинации при использовании адаптивных масс модельных частиц существенно ближе к реальной, чем для частиц фиксированной массы



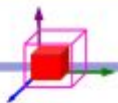
Число частиц и производительность

- ▶ В результате использования адаптивных масс скорость рекомбинации становится близка к реальной
- ▶ Этот же результат (по точности) достигается увеличением числа модельных частиц на 5 порядков
- ▶ Таким образом производительность метода частиц с адаптивными массами соответствует производительности классического метода частиц с числом частиц, большим на несколько порядков
- ▶ Назовем эту увеличенную производительность фактической производительностью метода частиц с адаптивными массами



Параметризованная реализация

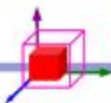
- ▶ С помощью механизма шаблонов, процедурных переменных и виртуальных функций C++ обеспечивается возможность замены тех частей алгоритма, которые зависят от задачи.
- ▶ Создается класс «пространство моделирования», содержащий ячейки, которые в свою очередь, содержат частицы.
- ▶ Он является параметризованным (т.е. выполняется в виде шаблона C++)
- ▶ Его параметры: классы «ячейка» и «частица»)
- ▶ При этом класс ячейка сам по себе является шаблоном (его параметром является класс «частица»)



Пример - класс "ячейка"

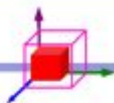
```
template <template <class Particle> class Cell >  
class Plasma  
{  
public:  
    int Nx, Ny, Nz;
```

- ▶ Список частиц
 - ▶ Формат хранения частиц должен допускать оптимизацию для GPU
 - ▶ В частности, нежелательны массивы структур или классов
- ▶ поля в данной ячейке
- ▶ токи в данной ячейке.
- ▶ Основным содержанием являются процедуры
 - ▶ раздачи заряда частицы на сетку и наоборот,
 - ▶ интерполяции полей в точку нахождения частицы.



Класс «пространство моделирования»

- ▶ Электромагнитные поля, плотности, токи
- ▶ Список ячеек (частицы хранятся распределенными по ячейкам из соображений эффективности)
- ▶ Методы (виртуальные для обеспечения возможности замены):
 1. Расчет поля
 2. Начальное распределение
 3. Граничные условия
 4. Сортировка частиц
 5. Межпроцессорные пересылки
 6. Расчет токов по частицам
 7. Диагностики



Переход к другой задаче

```
template <template <class Particle> class Cell >
class GPUBeam: public GPUPlasma<Cell>
{
public:
    GPUBeam() {}
    ~GPUBeam() {}

    GPUBeam(int nx, int ny, int nz, double lx, double ly, double lz, |
            double ni1, int n_per_cell1, double q_m, double TAU):
        GPUPlasma<Cell>(nx, ny, nz, lx, ly, lz, ni1, n_per_cell1, q_m, TAU)

    void InitParticles(thrust::host_vector<Particle> & vp);

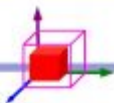
    void BoundaryConditions();
};
```

4.

Физическая задача: релаксация мощного электронного пучка в плазме



- ▶ В экспериментах на установке ГОЛ-3 (ИЯФ СО РАН) вследствие релаксации мощного электронного пучка наблюдается понижение электронной теплопроводности,
 - ▶ Астрелин В.Т., Бурдаков А.В., Поступаев В.В. // Физика плазмы, Т.24, с.450-462, 1998,
 - ▶ Бурдаков А.В. «Результаты и состояние дел на ГОЛ-3», Научная сессия ИЯФ, 2010,
http://www.inp.nsk.su/news/rss/2011_59_10_Burdakov.pdf
- ▶ Коэффициент электронной теплопроводности уменьшается в 10^2 - 10^3 раз по сравнению с классическим значением для плазмы с такой плотностью и температурой
- ▶ Это позволяет лучше нагревать плазму и дольше удерживать ее в нагретом состоянии вследствие намного меньшего теплового потока на торцы установки



Фазовые плоскости

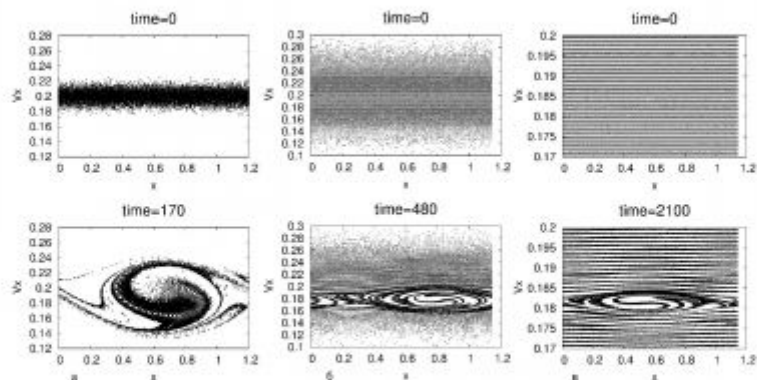
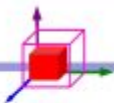


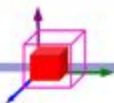
Рис.: Электроны пучка на фазовой плоскости (x, v_x) для а) гидродинамического ($\Delta v = 0.007, l_p = 100$), б) переходного ($\Delta v = 0.02, l_p = 500$) и в) кинетического ($\Delta v = 0.02, l_p = 5000$) режимов. Результат получен совместно с К.В.Лотовым (ИЯФ СО РАН) и Е.А.Генрих(Месяц)



Исходные уравнения

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial f_{\alpha}}{\partial t} + \vec{v} \nabla f_{\alpha} + \frac{q \vec{E}}{m} \frac{\partial f_{\alpha}}{\partial \vec{v}} = St\{f_{\alpha}\} \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 4\pi \rho. \end{array} \right. \quad (4)$$

где ρ - плотность, \vec{v} - скорость, $\vec{E} = -\nabla \Phi$ - напряженность электрического поля, Φ - потенциал, f_{α} - функция распределения частиц сорта α , $St\{f\}$ - столкновительный член.



Вид расчетной области

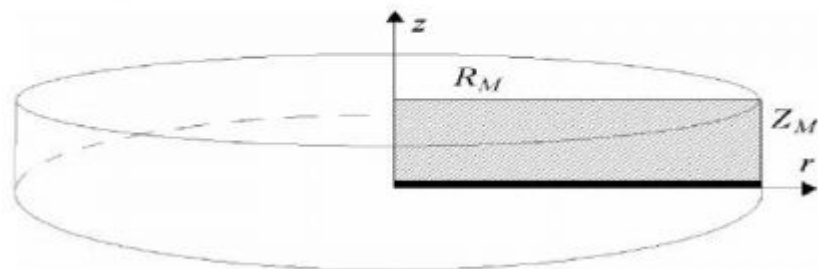
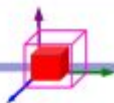


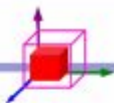
Рис.: Конфигурация расчетной области.



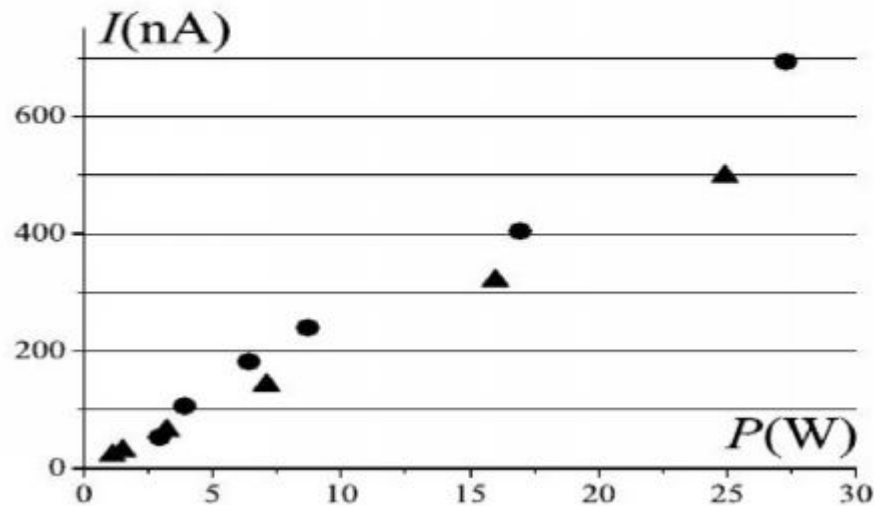
Учет столкновительных процессов

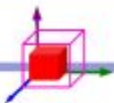
В модели рассматриваются следующие процессы:

- ▶ Упругое столкновение $e^- + SiH_4 \rightarrow SiH_4 + e^-$
- ▶ Ионизация $e^- + SiH_4 \rightarrow SiH_2^+ + 2H + 2e^-$
- ▶ Колебательное возбуждение $e^- + SiH_4 \rightarrow SiH_4^* + e^-$
- ▶ Прилипание $e^- + SiH_4 \rightarrow SiH_3^- + H$
- ▶ Диссоциация $e^- + SiH_4 \rightarrow SiH_2^+ + 2H + 2e^-$
- ▶ Упругое столкновение $e^- + H_2 \rightarrow H_2 + e^-$
- ▶ Ионизация $e^- + H_2 \rightarrow H_2^+ + 2e^-$
- ▶ Колебательное возбуждение $e^- + H_2 \rightarrow H_2^* + e^-$
- ▶ Диссоциация $e^- + H_2 \rightarrow 2H + e^-$



Ток ионов на ВЧ-электрод

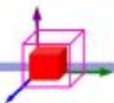




Заключение

Основные элементы технологии могут быть сформулированы следующим образом: программа, реализующая численную модель может быть эффективной на суперЭВМ экзафлопсного класса если:

1. в программе используется эйлерово-лагранжева декомпозиция расчетной области коммуникаций
2. программа ориентирована на использование ускорителей вычислений
3. существует возможность замены реализации численных методов и межпроцессорных коммуникаций на оптимизированные для конкретной суперкомпьютерной архитектуры
4. наиболее времяемкие фрагменты программы являются архитектурно независимыми, т.е. выполнены с применением методики, позволяющей быстро переходить с одного вида ускорителей вычислений на другой

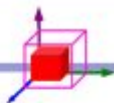


Защищаемые научные результаты-1

В работе присутствуют оригинальные результаты одновременно из трех областей: математического моделирования, численных методов и комплексов программ. Эти три области соответствуют трем пунктам паспорта специальности 05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ по физико-математическим наукам.

Пункт третий (Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий):

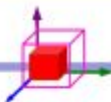
1. Новая модификация метода частиц в ячейках с адаптивными массами модельных частиц
2. Впервые реализована возможность подстановки новых вычислительных процедур для метода частиц в ячейках без изменения программы в целом. Процедуры подставляются в виде параметров шаблонов языка C++,



Защищаемые научные результаты-2

Пункт четвертый (Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента):

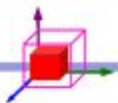
1. Оригинальный вариант эйлерово-лагранжевой декомпозиции расчетной области
2. Разработка, обоснование и тестирование новой эффективной методики межархитектурного переноса программ для гибридных суперЭВМ,



Защищаемые научные результаты-3

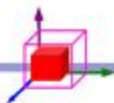
Пункт пятый (Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента):

1. Впервые для небольшого количества модельных частиц получено точное значение скорости рекомбинации в моделировании ВЧ-разряда в силан-водородной плазме
2. Впервые в ходе трехмерного кинетического моделирования получены точные значения инкрементов двухпоточковой неустойчивости



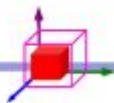
Апробация

- ▶ Всего по теме диссертации автором лично и в соавторстве опубликовано более 50 работ, в том числе 27 статей
- ▶ В том числе 16 статей в журналах из списка ВАК
- ▶ Международные научные конференции
 - ▶ Parallel Computing Technologies (Нижний Новгород, 2003, Красноярск, 2005, Новосибирск, 2009)
 - ▶ «Происхождение и эволюция биосферы» (Новосибирск, 2005),
 - ▶ «Современные проблемы вычислительной математики и математической физики» (Москва, 2009)
 - ▶ «Дифференциальные уравнения. Функциональные пространства. Теория приближений» (Новосибирск, 2008)
 - ▶ International Conference on Computational Science (Амстердам, 2010)
 - ▶ «Научный сервис в сети Интернет» (Новороссийск, 2009, 2011, 2014),
 - ▶ Russian Supercomputing Days-2015 (Москва, 2015)



Практическая значимость работы

- ▶ Суперкомпьютерное моделирование может сделать более реальными планы по созданию энергетического реактора на базе открытой ловушки
- ▶ Суперкомпьютерное моделирование может быть полезно для исследования природы солнечных вспышек и исследования их влияния на магнитосферу Земли и арктическую навигацию



Спасибо

!!!