

О перспективах достижения эксафлопс-производительности в расчетах на основе метода частиц-в-ячейках*

А.В. Снытников

Проведенные физические оценки показали, что для адекватного воспроизведения спектра плазменной турбулентности с помощью метода частиц в ячейках необходимо проведение трехмерных расчетов с размером сетки не менее 2000 узлов по каждому направлению (и не менее 1000 частиц в ячейке). В перспективе это потребует использования эксафлопс-компьютеров. В докладе представлены два варианта реализации алгоритма для моделирования взаимодействия электронного пучка с плазмой, которые позволят достигать эффективно использовать эксафлопс-вычислители, когда они будут созданы. Первый вариант — это трехмерная декомпозиция расчетной области, с помощью которой уже сейчас достигается высокая масштабируемость. При этом для расчета в отдельной подобласти используется группа процессоров (или ядер), что позволяет не ограничивать снизу объем подобласти. Второй вариант предполагает использование графического ускорителя вместо группы процессоров для расчета отдельной подобласти.

1. Введение

Актуальность данной работы связана с необходимостью точного расчета характеристик неустойчивостей, возбуждаемых релятивистским электронным пучком в субтермоядерной плазме на установке ГОЛ-3 (ИЯФ СО РАН), а также выяснения причин возникновения аномальной электронной теплопроводности [2]. В силу того, что плазма в данном случае является существенно неравновесной, использование упрощенных (например, магнитогидродинамических) методов невозможно, расчет необходимо производить в рамках кинетического подхода, то есть с помощью метода частиц в ячейках, что требует больших вычислительных ресурсов. Конкретной физической задачей в данном случае является расчет спектра плазменной турбулентности. Для ее решения необходимо проведение трехмерных расчетов с высоким разрешением по всем трем координатам в силу того, что плазменные колебания в данном случае являются существенно анизотропными.

Также в последнее время ведутся интенсивные дискуссии о проблемах создания программного обеспечения для компьютеров с производительностью порядка 10^{18} операций с плавающей точкой в секунду (эксафлопс-компьютеров) [1]. В статье делается попытка оценить пригодность метода частиц-в-ячейках для достижения эксафлопс-производительности. Применение метода частиц принципиально необходимо в тех случаях, когда физическая ситуация является неясной, и нет возможности сделать упрощающие предположения, однако этот метод очень ресурсоемкий, что ограничивает его использование. Поэтому возможность реализации метода частиц-в-ячейках на эксафлопс-компьютерах, с одной стороны, решит проблему низкой скорости работы метода, с другой стороны, позволит достичь эксафлопс-производительности быстрее, чем на других физических приложениях, таких как гидро/газо-динамика, теория упругости и так далее (такое возможно в силу большей локальности данных в методе частиц по сравнению с решением СЛАУ, методами конечных элементов или конечных объемов).

*Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, гранты 11-01-00249, 11-01-00178 и 11-01-00459, а также интеграционных проектов СО РАН № 113 и № 26.

2. Описание алгоритма для моделирования взаимодействия электронного пучка с плазмой

2.1. Описание модели

Численная модель, используемая для решения задачи о релаксации пучка, состоит из уравнений Власова для электронной и ионной компонент плазмы и системы уравнений Максвелла. В общепринятых обозначениях эта система имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{i,e}}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial f_{i,e}}{\partial \vec{r}} + \vec{F}_{i,e} \frac{\partial f_{i,e}}{\partial \vec{p}} &= 0, & \vec{F}_{i,e} &= \frac{q_{i,e}}{m_{i,e}} \left(\vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{v}, \vec{B}] \right) \\ \text{rot} \vec{B} &= \frac{4\pi}{c} \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \text{rot} \vec{E} &= - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{div} \vec{E} = 4\pi\rho$$

$$\text{div} \vec{B} = 0$$

В данной работе используется алгоритм решения системы уравнений (1), описанный в работе [3]. Далее все уравнения будут приводиться в безразмерном виде. Для обезразмеривания используются следующие базовые величины:

- характерная скорость \tilde{v} – скорость света $\tilde{v} = c = 3 \times 10^{10}$ см/с
- характерная плотность плазмы $\tilde{n} = 10^{14}$ см⁻³
- характерное время \tilde{t} – плазменный период (величина, обратная к электронной плазменной частоте) $\tilde{t} = \omega_p^{-1} = \left(\frac{4\pi n_0 e^2}{m_e} \right)^{-0.5} = 5.3 \times 10^{-12}$ с

Уравнения Власова решаются методом частиц в ячейках (PIC). В рамках этого метода решаются уравнения движения модельных частиц, которые являются уравнениями характеристик для уравнения Власова. Величины с индексом i соответствуют ионам, с индексом e – электронам.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{p}_e}{\partial t} &= - \left(\vec{E} + [\vec{v}_e, \vec{B}] \right) \\ \frac{\partial \vec{p}_i}{\partial t} &= \kappa \left(\vec{E} + [\vec{v}_i, \vec{B}] \right) \\ \frac{\partial \vec{r}_{i,e}}{\partial t} &= \vec{v}_{i,e}, & \kappa &= \frac{m_e}{m_i}, & \vec{p}_{i,e} &= \gamma \vec{v}_{i,e}, \gamma^{-1} = \sqrt{1 - v^2} \end{aligned}$$

Для решения уравнений движения используется схема с перешагиванием:

$$\begin{aligned} \frac{\vec{p}_{i,e}^{m+1/2} - \vec{p}_{i,e}^{m-1/2}}{\tau} &= q_i \left(\vec{E}^m + \left[\frac{\vec{v}_{i,e}^{m+1/2} - \vec{v}_{i,e}^{m-1/2}}{2}, \vec{B}^m \right] \right) \\ \frac{\vec{r}_{i,e}^{m+1} - \vec{r}_{i,e}^m}{\tau} &= \vec{v}_{i,e}^{m+1/2}, \end{aligned}$$

здесь τ – временной шаг. Для нахождения электрических и магнитных полей используется схема, в которой поля определяются из разностных аналогов законов Фарадея и Ампера [3]. Эта схема имеет второй порядок аппроксимации по пространству и по времени.

2.2. Постановка задачи

Рассмотрим следующую постановку задачи. В начальный момент в трехмерной области решения (размер области L), которая имеет форму прямоугольного параллелепипеда:

$$0 \leq x \leq L_X, \quad 0 \leq y \leq L_Y, \quad 0 \leq z \leq L_Z$$

находится плазма, состоящая из электронов и ионов. Модельные частицы распределены по области равномерно. Задается плотность плазмы и температура электронов, температура ионов считается нулевой. Дополнительно в области присутствуют электроны пучка, которые также распределены по области равномерно (предполагается, что пучок уже вошел в расчетную область). Электроны пучка отличаются от электронов плазмы тем, что они имеют кинетическую энергию направленного движения $\varepsilon = 1$ МэВ, а их температура равна нулю. Модельные частицы, соответствующие электронам пучка, имеют меньшую массу, нежели модельные частицы, соответствующие электронам плазмы (отношение их масс равно отношению плотности плазмы и плотности пучка). Итак, исходными параметрами задачи являются: плотность и температура электронов плазмы, отношение плотности электронов плазмы к плотности электронов пучка, энергия электронов пучка:

- плотность электронов плазмы $n_0 = 10^{17}$ см³. Плотность плазмы намеренно завышена по сравнению с реальной плазмой на установке ГОЛ-3 для того, чтобы эффекты релаксации пучка проявлялись в течение более короткого времени
- температура электронов плазмы $T_0 = 1$ КэВ
- отношение плотности электронов пучка к плотности электронов плазмы $\alpha = 10^{-3}$
- энергия электронов пучка $\varepsilon = 1$ МэВ

2.3. Параллельная реализация

Распараллеливание выполнено методом декомпозиции расчетной области по направлению, перпендикулярному направлению движения электронного пучка. Используется смешанная эйлерово–лагранжева декомпозиция. Сетка, на которой решаются уравнения Максвелла, разделена на одинаковые подобласти по одной из координат. С каждой подобластью связана группа процессоров (в том случае, когда вычисления производятся на многоядерных процессорах, процессором для единообразия будет именоваться отдельное ядро). Далее, модельные частицы каждой из подобластей разделяются между процессорами связанной с этой подобластью группы равномерно, вне зависимости от координаты.

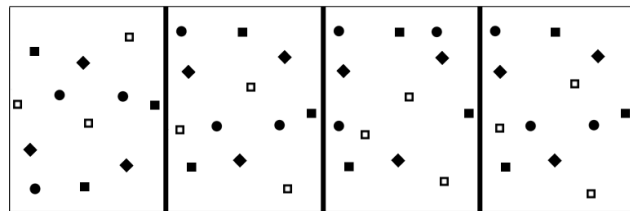


Рис. 1. Одномерная декомпозиция области. Область решения разбита вдоль координаты Y на 4 подобласти, частицы каждой подобласти равномерно распределены между четырьмя процессорами независимо от координаты. Различные символы, обозначающие частицы: круг, квадрат, ромб, полый квадрат означают принадлежность частиц к разным процессорам.

Каждый из процессоров группы решает уравнения Максвелла во всей подобласти. Далее решаются уравнения процессоров группы производит обмен граничными значениями тока и полей с соседними подобластями, и затем рассылает полученные граничные значения всем процессорам своей группы.

2.4. Эффективность распараллеливания

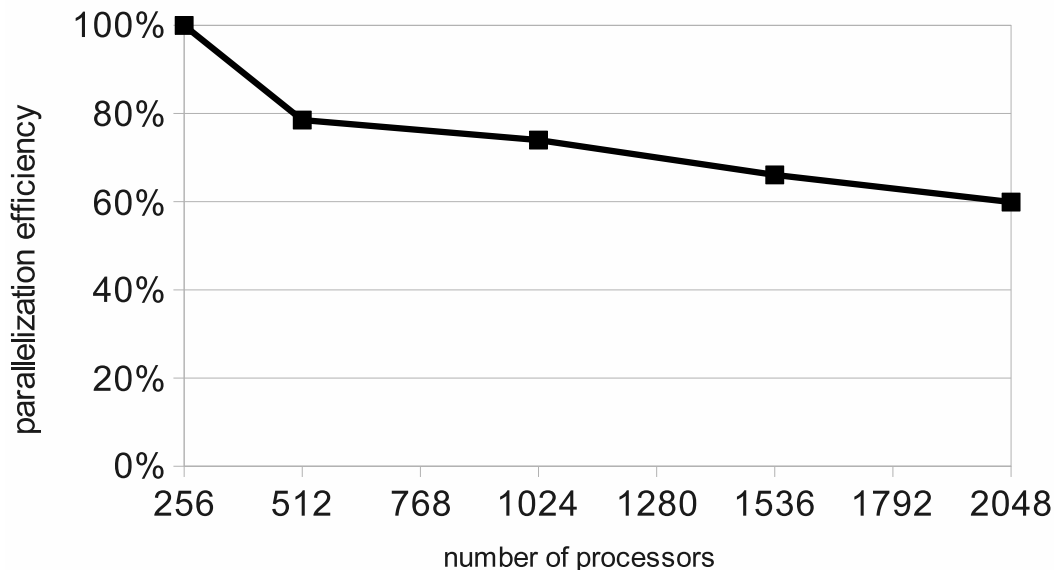


Рис. 2. Эффективность распараллеливания, вычисляемая по формуле 2. Расчеты проведены на МВС-100К, МСЦ РАН.

Основная цель создания параллельной программы для моделирования аномальной теплопроводности в плазме — возможность счета на больших сетках и с большим количеством модельных частиц. Поэтому эффективность распараллеливания вычислялась следующим образом

$$k = \frac{T_2}{T_1} \times \frac{N_1}{N_2} \times \frac{S_2}{S_1} \times 100\% \quad (2)$$

здесь T_1 - время счета с использованием N_1 процессоров, T_2 – время счета с использованием N_2 процессоров, S_1, S_2 – характерные размеры задач, в данном случае число узлов сетки по координате X. При этом размер задачи увеличивается пропорционально числу процессоров, т.е. нагрузка на отдельный процессор не возрастает. Цель такого определения эффективности – понять, насколько увеличивается время счета при увеличении числа процессоров и неизменной нагрузке на один процессор. В идеале время должно остаться тем же самым ($k = 100\%$ в идеале).

За основу для сравнения при этом берется модель, требующая большого времени вычислений (сетка $256 \times 128 \times 128$ узлов, 150 частиц в ячейке). В расчетах по определению эффективности увеличивается только размер сетки по X, все остальные параметры остаются неизменными. Вопрос о том, насколько быстрее можно посчитать на суперкомпьютере задачу, которую можно посчитать и на настольной машине, в данной работе не рассматривается: такие задачи не представляют интереса с физической точки зрения. Из этого рисунка можно сделать вывод, что созданная программа способна эффективно использовать более тысячи процессорных ядер. С другой стороны, падение эффективности довольно заметное, и очевидно, что используемая двумерная декомпозиция не сможет обеспечить эффективность для десятков тысяч и более ядер.

2.5. Аномальная теплопроводность в вычислительных экспериментах

Актуальность настоящей работы связана с тем, что в экспериментах на многопучковой магнитной ловушке ГОЛ-3 (ИЯФ СО РАН) наблюдается понижение электронной теплопроводности на 2–3 порядка по сравнению с классическим значением. Известно множество работ по моделированию теплопроводности в термоядерных установках. Вычисление температуры в этих работах производится в основном с помощью гидродинамических уравнений. Таким образом функция распределения электронов по энергиям предполагается максвелловской, что может не соответствовать действительности. Для вычисления неравновесных распределений применяют, в частности, бессеточные модификации метода частиц. Однако для метода частиц в ячейках не известны критерии, позволяющие понять, насколько правильным является полученное в расчетах распределение температуры, и таким образом, корректность моделирования теплопроводности также оказывается под вопросом.

В результате проведения вычислительных экспериментов выяснилось, что движение электронов пучка, первоначально равномерное и однонаправленное, после релаксации пучка становится вихревым. Это приводит к тому, что поток энергии электронов

$$q = \left| \int dx dy \frac{mv_e^2}{2} \vec{v}_e \right|$$

также приобретает сложную структуру с модуляциями по осям X и Y , и более того, возникают подобласти, где поток энергии близок к нулю (рис. 3). На рисунке 3 линия уровня с наименьшим значением (0.01) соответствует 1 % начальной величины потока энергии электронов. Из рисунка видно, что в значительной части расчетной области поток энергии меньше начального. Более подробный анализ показывает, что в отдельных частях области поток энергии электронов на несколько порядков меньше начального.

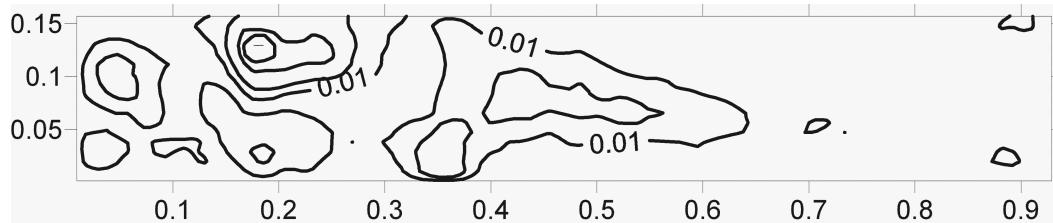


Рис. 3. Линии уровня потока энергии электронов в плоскости XY , $z = Z_M/2$, момент времени $t = 2.9$ (в единицах плазменного периода). Величина потока нормирована на его значение в момент времени $t = 0$. В расчете использована сетка $512 \times 64 \times 64$ узла, 50 модельных частиц каждого сорта (электроны пучка, электроны плазмы и ионы) в ячейке, 40 4-ядерных процессоров Xeon, кластер НКС-30Т, ИВМиМГ СО РАН, расчетная область поделена на 16 подобластей, как описано в разделе 2.3. Для расчета частиц каждой подобласти используется 10 ядер.

Это означает что удалось на качественном уровне воспроизвести эффект аномально-го понижения электронной теплопроводности. Однако для более точного моделирования и выяснения причин этого явления необходимо более высокое разрешения и увеличение количества модельных частиц.

3. Оценка потребностей в вычислительных ресурсах

В настоящее время проведены расчеты взаимодействия релятивистского электронного пучка с плазмой, позволившие в квазиодномерном случае точно рассчитать инкремент двух-поточковой неустойчивости: получено $\gamma = 0.081$, точное значение $\gamma = 0.077$ [5]. Однако для

этого пришлось значительно увеличить число модельных частиц по сравнению с расчетом, представленным на рисунке 3, а именно до 1000 в одной ячейке. Число узлов сетки $120 \times 4 \times 4$, размер области 1.2 (в безразмерных единицах). При этом величина дебаевского радиуса 8.9×10^{-3} в тех же единицах. Таким образом длина области в дебаевских радиусах составляет 134.8.

Далее для оценки полного размера задачи могут быть высказаны следующие соображения

- Для адекватного моделирования плазменных неустойчивостей необходимо иметь не менее 16 узлов сетки на длине дебаевского радиуса.
- Число модельных частиц не может быть уменьшено, иначе полученные результаты будут носить лишь приближенный характер в известных физических случаях (упомянутая выше двухпоточковая неустойчивость), в новых же физических случаях вообще ничего невозможно будет получить.
- Задача является существенно трехмерной. В силу того, что возбуждаемые пучком плазменные волны распространяются под углом к направлению движения пучка, задача не может быть сведена к двумерной или одномерной без потери существенной части физического смысла. Это означает, что число узлов сетки в направлениях, ортогональных направлению движения пучка (Y и Z), должно быть сравнимым с числом узлов по направлению X.

Таким образом, получаем следующую оценку размера сетки: $2156 \times 2156 \times 2156$ при 1000 модельных частиц каждого типа в ячейке. Это означает объем памяти 1.4 Петабайт и вычислительную нагрузку порядка 1.5 PetaFLOP (около 50 операций на каждую частицу) в течение одного временного шага.

Исходя из этого можно сказать, что для решения рассматриваемой задачи во всей полноте, а именно точного расчета спектра плазменной турбулентности, необходимо применение машин с производительностью более 1 PetaFLOPS, то есть перспективных эксафлопс-компьютеров. Может показаться, что применения современных суперЭВМ петафлопного класса будет достаточно, но во-первых, приведенные выше цифры оценочные, во-вторых, они показывают минимально необходимый объем вычислений (134 дебаевских радиуса, 16 ячеек на дебаевский радиус, 1000 частиц), в-третьих 1.5 PetaFLOP – это на один временной шаг, которых требуются десятки тысяч.

4. Перспективы достижения эксафлопс-производительности

4.1. Повышение масштабируемости: трехмерная декомпозиция

В настоящий момент соотношение времени счета и времени пересылок выглядит, как показано в таблице 1. Приведено две различных сетки: одна, на которой сейчас проводятся расчеты, и другая, намного меньше. Эта вторая сетка приведена для того, чтобы показать, что соотношение времени счета и времени пересылок остается примерно постоянным. Объем пересылаемых данных, связанных с частицами, составляет порядка 20 Кбайт для обеих сеток (пересылки выполняются между соседними подобластями), таким образом он также не растет вследствие одинакового числа частиц в ячейке. Время пересылки измерено с помощью Intel Trace Analyzer&Collector на кластере НКС-30Т, ИВМиМГ СО РАН.

Выше уже говорилось, что используемая в настоящий момент одномерная декомпозиция области не может обеспечить достаточную масштабируемость для расчетов на десятках тысяч и более ядер. Невозможно это в силу того, что в такой декомпозиции минимальным фрагментом является слой сетки, и принадлежащие ему частицы. Это достаточно много (для приведенной выше оценки размера задачи, 2156×2156 , 1000 частиц в ячейке – 660 Гб).

Таблица 1. Временные характеристики программы для моделирования взаимодействия электронного пучка с плазмой с одномерной декомпозицией расчетной области.

Размер сетки $N_X \times N_Y \times N_Z$	$512 \times 64 \times 64$	$16 \times 16 \times 16$
Число подобластей	16	4
Число процессов для расчета одной подобласти	10	1
Время счета, движения частиц, сек.	0.8	0.03
Время расчета электромагнитного поля, сек.	0.15	0.002
Время пересылки частиц Скорость пересылки, Мбайт/сек	2.8	302

Такой фрагмент очевидно не поместится в память одного процессорного элемента, а при обработке его группой процессоров будут сильно перегружены коммуникации. Поэтому, для того, чтобы иметь возможность делить расчетную область на подобласти сколь угодно малого размера, была реализована трехмерная декомпозиция. Отдельная подобласть также обрабатывается группой процессоров, так что топология имеет вид 4-мерной решетки с тремя периодическими и одним непериодическим измерением. Последнее (непериодическое) измерение соответствует группе процессоров, назначенных для обработки подобласти. Эти процессоры выполняют между собой коллективные обмены, и только один из них поддерживает связь с другими подобластями.

Время работы программы с трехмерной декомпозицией было измерено на СКИФ-МГУ "Чебышев". При размере сетки в 200^3 узлов и увеличении числа подобластей по каждой координате от 2 до 8 соотношение времени решения уравнений электромагнитного поля и времени пересылок граничных значений находилось в интервале 7 - 10 (пересылка занимает от 10 % до 14% времени решения). В силу того, что время счета частиц значительно больше времени расчета поля, результаты измерений позволяют надеяться, что при трехмерной декомпозиции вычисления на больших сетках будут возможны и эффективны.

4.2. Сокращение времени счета: расчет на графических ускорителях

Расчет динамики частиц, выполненный на графической карте GeForce 9400, на 16 ядрах, сам по себе показал значительное повышение производительности по сравнению с расчетом на процессорах Xeon или Nehalem, таблица 2. Необходимо отметить, что время счета включает в себя также время обращения к памяти, и таким образом сильно различается на разных системах (аналогично, преимущество графических ускорителей достигается за счет быстрой локальной памяти).

Таблица 2. Сравнение времени счета движения частиц на универсальных процессорах и графическом ускорителе. Для процессора Xeon показано наименьшее время, полученное на кластере СКИФ-МГУ "Чебышев". Производительность оценивается исходя из того, что на одну частицу выполняется порядка 50 операций с плавающей точкой

Вычислитель	Время счета 1 млн. частиц, мс (на 1 поток)	Производительность, GygaFLOPS
GeForce9400	50	0.9
Tesla2050	2.3	22
Xeon	204.08	0.22
Nehalem	316.32	0.158

Таким образом, расчет с помощью одного ядра графической карты происходит на два порядка быстрее. Приведенные цифры относятся только к реализации метода частиц и не могут быть использованы для оценки и сравнения производительности указанных систем в общем случае.

Относительно перспектив реализации метода частиц на перспективных гибридных суперЭВМ необходимо сделать два замечания. Во-первых, для этого необходимо упорядочивание частиц по ячейкам, так чтобы один поток графической карты работал бы только с частицами внутри одной ячейки, или компактной группы ячеек. Во-вторых, все пересылки между подобластями должны выполняться только отдельно от вычислений: один, специально выделенный процессор взаимодействует с графическим ускорителем, другой одновременно с этим выполняет пересылки. Важно отметить, что вычислительные потоки CUDA ни в коем случае не выполняют пересылок (не возникает такой необходимости), и никак не взаимодействуют с потоками, связанными с другой подобластью.

Таким образом, если использовать графический ускоритель как замену группы процессоров (раздел 2.3), используемых для расчета движения модельных частиц в рамках одной подобласти, то можно во-первых, значительно ускорить расчет, во вторых, тем самым полностью исключаются коммуникации между потоками, связанными с одной подобластью (внутри одного графического ускорителя), что же касается пересылок между подобластями (связанными с разными графическими ускорителями), то они не могут быть более медленными, чем сейчас, когда данные пересылаются между группами процессоров, из-за меньшего количества физических связей в суперкомпьютере. Рассмотрим пересылку частиц между двумя соседними подобластями. Если сейчас с одной подобластью связано, например, 8 процессов (каждый занимает одно процессорное ядро), а пересылки частиц из одной подобласти в другую выполняются только между двумя выделенными процессами (условно «головными» процессами), то необходимо выстраивать маршрутизацию для сообщений в системе, физически состоящей из 16 ядер (или, с точки зрения MPI, из 16 потоков). В том случае, когда расчет выполняется на графическом ускорителе (в 8, 100, 200 потоков CUDA...), а пересылки будут выполняться только между двумя MPI-потоками. Вероятно, такая пересылка займет не больше времени, чем в первом случае.

4.3. О перспективах экзафлопс-вычислений

Для рассмотрения того, как можно достичь экзафлопс-производительности в расчетах на основе метода частиц-в-ячейках, возьмем за основу характеристики компьютера Tianhe-1A (№ 1 в списке Top-500 на октябрь 2010 года, [9]). Именно этот компьютер рассматривается во-первых, из-за того, что, как показано выше, графические ускорители дают значительное преимущество в расчетах по методу частиц, во-вторых, в силу того, что в недавнее время компании NVIDIA и CRAY представили проекты экзафлопс-компьютеров именно на основе гибридной архитектуры, сходной с архитектурой Tianhe-1A (ссылки в докладе [8]).

Используя оценку производительности одного графического ускорителя Tesla на методе частиц-в-ячейках, полученную в предыдущем разделе (22 GigaFLOPS), оценку размера задачи (сетка $2156 \times 2156 \times 2156$ и 3×10^{13} частиц) и характеристики суперкомпьютера Tianhe-1A [9]: 7168 графических ускорителей Tesla и 14336 серверных процессоров Xeon, 32 Гб оперативной памяти в пересчете на один ускоритель, то производительность такого гибридного компьютера для метода частиц в ячейках будет 0.2 PetaFLOPS.

Если, как было описано выше,

1. выделить для каждой подобласти один ускоритель Tesla и один универсальный процессор
2. считать, что необходимое количество частиц помещается в оперативную память узла (в действительности этого нет, на каждый узел приходится 4.2 млрд. частиц или 201 Гб на узел, реально имеется 32 Гб на узел, и может быть размещено около 400 млн. частиц (эта цифра берется за основу для дальнейших рассуждений))
3. предположить, что обмен данными между подобластями не превысит имеющийся сейчас. При размещении на каждом узле 400 млн. частиц перелетают 5 % или 20 млн. частиц (1 Гб), что не превышает пропускную способность даже имеющихся сейчас сетей типа Infiniband.

то в таком случае масштабирование компьютера Tianhe-1A в 5 раз дало бы для метода частиц в ячейках производительность порядка 1 PetaFLOPS (эта же производительность могла бы быть достигнута при использовании порядка 700 тыс. 4-ядерных процессоров Xeon, в соответствии с таблицей 2). Ясно, что в таком случае до производительности в 1 ExaFLOPS остается большое расстояние, тем не менее, с помощью использования графических ускорителей такая производительность достигается легче и быстрее, чем при использовании только лишь процессоров общего назначения.

Следует отметить, что безусловно, приведенные в этом разделе величины имеют характер грубой оценки. Тем не менее, можно считать, что они верны по порядку величины. Более того эти оценки основаны на свойствах метода частиц (локальность данных), а также на свойствах физической задачи (невозможность резких изменений плотности на масштабах 10-100 дебаевских радиусов), из чего следует невозможность пересылки большого количества частиц на одном шаге. Поэтому можно ожидать, что они останутся верными даже и при других характеристиках используемого оборудования.

5. Заключение

Приведены оценки необходимых вычислительных мощностей для решения задачи о взаимодействии электронного пучка с плазмой, а именно сетка $2156 \times 2156 \times 2156$ при 1000 модельных частиц каждого типа в ячейке. Исходя из свойств метода и особенностей физической задачи и предполагая возможность быстрой (по сравнению с временем счета сотен миллионов частиц на графическом ускорителе) пересылки модельных частиц между соседними подобластями, предлагается возможный путь достижения производительности

порядка 1 эксафлопс на суперкомпьютерах гибридной архитектуры в расчетах на основе метода частиц–в–ячейках.

Список литературы

1. ExaScale Software Study: Software Challenges in Extreme Scale Systems. DARPA report. September 14, 2009. [http://www.er.doe.gov/ascr/Research/CS/DARPA_exascale – software \(2009\).pdf](http://www.er.doe.gov/ascr/Research/CS/DARPA_exascale_software(2009).pdf)
2. V.T.Astrelin, A.V.Burdakov, V.V.Postupaev. Generation of Ion–Acoustic Waves and Suppression of Heat Transport during Plasma Heating by an Electron Beam. //Plasma Physics Reports. Vol. 24, No. 5, 1998, pp. 450-462.
3. В.А.Вшивков, К.В.Вшивков, Г.И.Дудникова. Алгоритмы решения задачи взаимодействия лазерного импульса с плазмой. //Вычислительные технологии, Том 6, № 2, 2001.
4. Н.Кролл, А.Трайвеллис. "Основы физики плазмы М: "Мир 1975.
5. К.В.Лотов, А.В.Терехов, И.В.Тимофеев. О насыщении двухпотоковой неустойчивости электронного пучка в плазме. //Физика плазмы, 2009, Том 35, № 6, стр. 567-574.
6. Ю.Н.Григорьев, В.А.Вшивков "Численные методы "частицы–в–ячейках". Новосибирск: "Наука 2000.
7. Ч. Бедсел, Б.Лэнгдон "Физика плазмы и математическое моделирование М:"Мир 1989.
8. А.С. Степаненко. Оценки ускорения вычислений гибридными системами. //Труды Пятой Международной Конференции «Параллельные вычисления и задачи управления». Россия, Москва. 26–28 октября 2010. Стр.29-38.
9. <http://www.top500.org>