

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПЛАЗМОЙ МЕТОДОМ ЧАСТИЦ В ЯЧЕЙКАХ

А.А. Голованов, Е.Н. Неруш, В.Ф. Баишаков, И.Ю. Костюков

*Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского,
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

Описаны различные алгоритмы и реализующая их программа, используемая для моделирования взаимодействия лазерного излучения экстремально высокой интенсивности с веществом с учётом эффектов квантовой электродинамики.

Введение

Расчёт ускорения заряженных частиц в сверхсильных световых полях требует огромных затрат компьютерных ресурсов, и очень важно из всех методов моделирования выбрать наиболее эффективный. Так, использование конечно-разностных методов для решения уравнения для функции распределения частиц в плазме требует выделения памяти на описание огромной области в шестимерном пространстве (импульсы и координаты). При этом во многих задачах функция распределения соответствует горячей плазме с достаточно хорошо коллимированными пучками частиц с энергией, много большей средней температуры плазмы (например, в задаче ускорения электронов плазменной волной). Таким образом, почти всюду в шестимерной области моделирования функция распределения близка к нулю, и существенны лишь её значения в небольшом объёме. Напротив, в методе частиц в ячейках расчёт эволюции системы производится только в тех областях, где значения функции распределения существенны, поскольку в этом методе функция распределения аппроксимируется совокупностью квазичастиц, движущихся по тем же траекториям, что и реальные частицы, что дает колоссальный выигрыш в производительности по сравнению с конечно-разностными методами.

1. Используемые алгоритмы

В методе частиц в ячейках функция распределения представляется как сумма квазичастиц. Для расчёта плазменной динамики необходимо решать уравнения движения квазичастиц, а также уравнения, описывающие динамику электромагнитного поля. В основу разработанной программы были положены алгоритмы, используемые в коде VLPL [1] (например, явный алгоритм решения уравнений Максвелла NDFX, свободный от численной дисперсии в одном направлении). Однако для расчёта траекторий частиц был использован обладающий рядом преимуществ алгоритм, недавно предложенный в работе [2].

Остановимся подробно на процессе излучения (для примера – излучения фотонов электронами), описываемом в разработанной программе с использованием метода Монте-Карло. В данном методе специальная функция («генератор событий») на каждом шаге по времени и для каждого электрона с использованием генератора случайных чисел решает, следует ли производить излучение фотона данным электроном и какова энергия излученного фотона, если излучение происходит. Естественно, генератор событий должен быть устроен таким образом, чтобы в среднем давать распределение излученных фотонов, соответствующее реальной спектральной плотности вероятности излучения. В разработанной программе используется оригинальный подход, схожий с

методом Монте-Карло для численного интегрирования. Энергия излученного фотона лежит в пределах от 0 до энергии электрона, излучившего фотон. Спектральная плотность вероятности излучения в этом интервале может быть ограничена некоторым максимальным значением. Таким образом, геометрически имеем кривую – зависимость спектральной плотности вероятности излучения от энергии излучаемого фотона, вписанную в прямоугольную область с углами в точках (0,0) и (энергия электрона, выбранный максимум спектральной плотности распределения вероятности излучения). С использованием генератора случайных чисел можно генерировать точки, имеющие равномерное распределение в этой прямоугольной области. В методе численного взятия интеграла площадь под кривой вычисляется по количеству точек, попавших под кривую. В предложенном генераторе событий излучение фотона производится, если сгенерированная точка попадает под кривую, при этом энергия излученного фотона равна x -координате сгенерированной точки. Очевидно, что вероятность попадания случайно сгенерированной точки под кривую тем выше, чем выше (при данной частоте) значение спектральной плотности распределения вероятности излучения. Строго говоря, можно показать, что при соответствующем выборе максимального уровня спектральной плотности вероятности излучения и нормировок распределение излученных с использованием такого генератора событий фотонов даёт результат, достаточно близкий к реальному.

Таким образом, в разработанной программе на каждом шаге по времени для каждого электрона с использованием равномерного распределения вычисляются два случайных числа: частота излучения и число, сравниваемое с вероятностью излучения на данной частоте. Если это число оказывается меньше этой вероятности излучения, то производится излучение фотона – энергия электрона уменьшается, а в область моделирования добавляется новая квазичастица – фотон. С использованием данного генератора событий в программе описывается некогерентное синхротронное излучение гамма-квантов электронами, движущимися в сверхсильном лазерном поле. Данное излучение становится важно при интенсивностях выше 10^{23} Вт/см², поскольку приводит к существенным потерям энергии электронами.

2. Используемые технологии

Написанная программа использует многопоточность, что легко реализуемо за счет «локальности» выбранных алгоритмов. Под «локальностью» здесь подразумевается то, что величина полей в узлах сетки и кинематические величины квазичастиц на следующем шаге по времени зависят только от величины полей в узлах, соседних для данного узла или данной квазичастицы. При этом сохраняется конечная скорость распространения взаимодействий, за счёт чего область моделирования можно разделить на пересекающиеся подобласти, в каждой из которых можно производить расчёты независимо от других определённое время. Длительность этого промежутка времени выбирается меньшей, чем половина промежутка времени, необходимого для распространения возмущения через область пересечения. При таком выборе неверно будут посчитаны только значения полей в узлах сетки, близких к границе области. Однако за счёт обмена значениями полей в области пересечения можно восстановить правильные значения и продолжить вычисления. Таким образом, можно производить расчёты динамики в разных областях на разных процессорах, лишь изредка производя обмен небольшим количеством данных между ними (см. рис. 1), что идеально для создания многопоточковых программ.

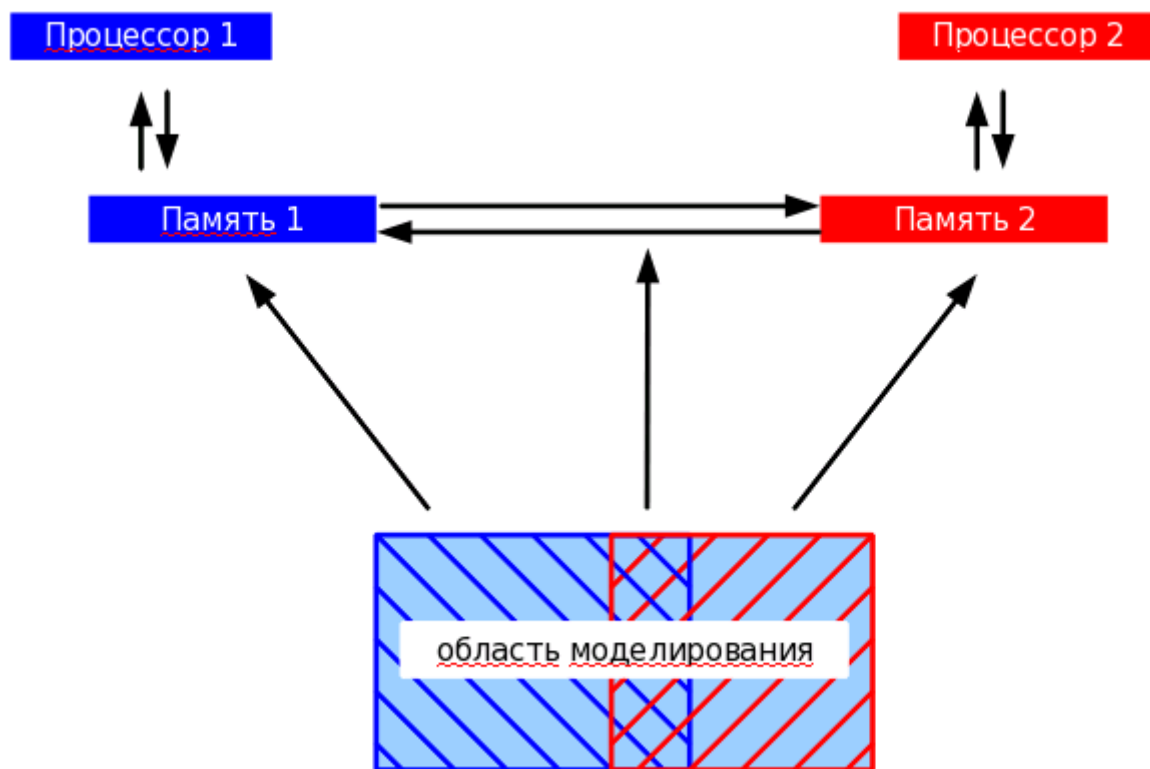


Рис. 1. Схема разделения области моделирования между двумя потоками в случае применения «локальных» численных схем

Для разделения программы на потоки были использованы технологии pthreads (POSIX threads) и NUMA (Non-uniform memory access, неоднородный доступ к памяти). Библиотека pthreads определяет набор функций и типов, позволяющий создавать и синхронизировать потоки, а также управлять ими.

Технология неоднородного доступа к памяти является в настоящее время очень перспективной. В архитектуре с неоднородным доступом к памяти для каждого процессора выделен отдельный канал для доступа к отдельной секции памяти (процессор со «своей» памятью называется узлом). Таким образом, доступ процессора к памяти внутри одного узла происходит быстрее и на большей скорости, чем доступ к памяти соседних узлов. При использовании технологии неоднородного доступа к памяти достаточно разбить область моделирования на части, для каждой из частей выделить память на отдельном узле и обрабатывать данные в каждой области отдельным потоком. Операционная система (использовалась ОС Linux) автоматически распределит потоки именно по тем процессорам, с которых доступ к памяти будет наиболее быстрым, то есть на каждом узле производится моделирование именно в той подобласти, данные для которой записаны в память данного узла. И лишь изредка производится обмен небольшим объёмом данных между узлами.

Таким образом, технология неоднородного доступа к памяти увеличивает пропускную способность памяти по отношению к технологии симметричного доступа к памяти, что оказалось существенным при использовании 2-процессорной 8-ядерной рабочей станции с двумя NUMA-узлами (получено двукратное ускорение выполнения программы).

Тестирование программы и последующее моделирование проводилось для параметров, близких к параметрам экспериментов по ускорению электронов, проводящихся на установке PEARL, созданной в ИПФ РАН, а также для параметров строящихся и проектируемых сверхмощных лазерных систем.

Работа поддержана грантом правительства Российской Федерации (проект No. 14.B25.31.0008).

Литература

1. Pukhov A. The virtual laser plasma laboratory // J. Plasma Phys. 1999. V. 61. No 10. P. 425-428.
2. Vay J.-L. Simulation of beams or plasmas crossing at relativistic velocity // Physics of Plasmas. 2008. 15. 056701.