



Рис. 6.
Изообласти температуры в задаче нестационарного истечения нагретой струи

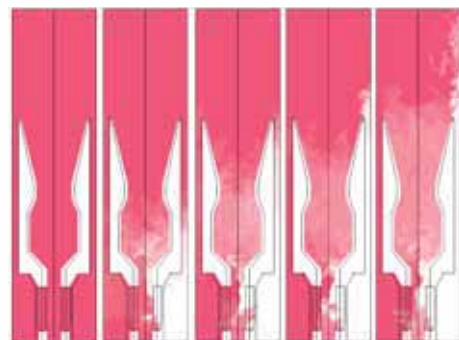


Рис. 7.
Изообласти температуры в задаче нестационарного смешения струй с различными скоростями и температурами

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goloviznin V.M. Balanced Characteristic Method for Systems of Hyperbolic Conservation Laws. Doklady Math. 72 (2005). P. 619–623.

3D PIC моделирование взаимодействия светового поля экстремальной интенсивности с плазменными средами



28 3D PIC моделирование взаимодействия светового поля экстремальной интенсивности с плазменными средами

В настоящее время широко в мире ведется исследование уникальных свойств плазмы, создаваемой мощным лазерным излучением. Для лучшего понимания процессов, происходящих в такой плазме, активно используется многомерное численное моделирование. Для численного моделирования взаимодействия интенсивного лазерного излучения с заранее приготовленной бесстолкновительной плазмой авторами разработана параллельная программа «Мандор», решающая трехмерную релятивистскую систему уравнений Максвелла–Власова методом PIC. В статье приводятся примеры решения актуальных задач с использованием этой программы.

АВТОРЫ:

И.А. Сидоров – аспирант, Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В. Ломоносова, Ин-т общей физики им. А.М. Прохорова РАН;
e-mail: igor.cug@gmail.com

А.В. Брантов – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, Физический ин-т им. П.Н. Лебедева РАН;
e-mail: brantov@lebedev.ru

В.Ю. Быченко – докт. физ.-мат. наук, г.науч. сотрудник, Физический ин-т им. П.Н. Лебедева РАН;
e-mail: bychenko@sci.lebedev.ru

Д.В. Романов – канд. физ.-мат. наук, доцент, Красноярский государственный педагогический университет им. В.П. Астафьева;
e-mail: d-v-romanov@yandex.ru

А.Б. Савельев – докт. физ.-мат. наук, проф., Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова;
e-mail: abst@physics.msu.ru

В настоящее время в мире широко ведется исследование уникальных свойств плазмы, создаваемой мощным лазерным излучением. Для лучшего понимания процессов, происходящих в такой плазме, активно используется многомерное численное моделирование. Так называемые континуальные модели плазмы, описывающие движение плазмы как жидкости, применимы лишь для достаточно узкого круга задач, в которых распределения частиц плазмы близки к равновесным. Вместе с тем прямой расчет уравнений движения для всех частиц в плазме затруднен из-за их огромного количества. Из-за этого повсеместно используются приближенные методы описания плазменного состояния, среди которых в последнее время большую популярность приобрел метод Particle-in-cell (частица в ячейке), заключающийся в том, что большое количество одинаковых плазменных частиц заменяется гораздо меньшим количеством модельных квазичастиц с аналогичными свойствами [1]. Этот метод позволяет добиться адекватного описания плазмы при многократном уменьшении степени сложности задач, так что их можно рассчитывать на современных компьютерах.

Одной из наиболее актуальных и важных проблем современной физики является исследование взаимодействия электромагнитных лазерных полей экстремальной интенсивности с плазмой [2]. Такое взаимодействие приводит, в частности, к ускорению электронов до энергий свыше 1 ГэВ, а ионов – до энергий в сотню МэВ. В ближайшей перспективе считается возможным создание на этой основе малогабаритных лабораторных ускорителей частиц с энергиями в 1 ТэВ. Пучки лазерно-ускоренных ионов имеют множество перспективных применений в инжекторах для ионных ускорителей, ионной радиотерапии, в изготовлении радиоизотопов и быстром поджиге термоядерной мишени.

Характерный пространственный масштаб процессов, происходящих в плазме, сравним с длиной волны лазерного излучения (порядка 1 мкм), а временной масштаб – с периодом светового поля (около 1 фс). Можно оценить требования к ресурсам компьютера исходя из того, что для адекватной работы метода PIC необходимо, чтобы количество квазичастиц, приходящихся на характерный размер процесса, было не менее 10. Так, для расчета N-мерной задачи в области размера 100 мкм требуется 10^{3N} частиц. Получается, что если для одномерного расчета ресурсов (в первую очередь оперативной памяти) персонального компьютера может хватить, то для более адекватных реальности 2D и 3D расчетов требуются суперкомпьютерные системы.

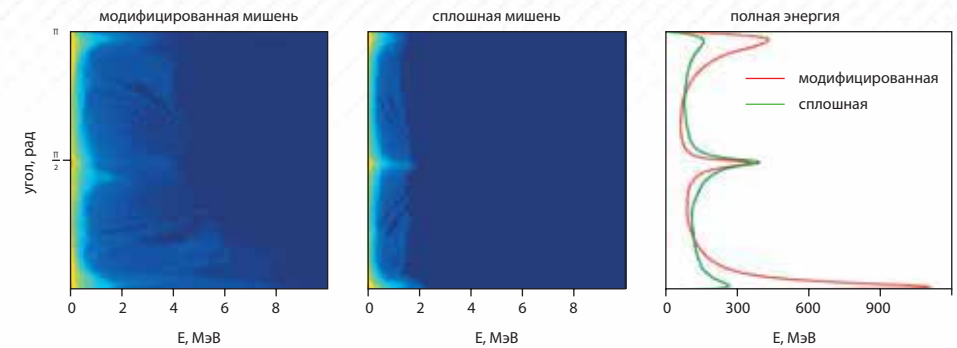
Для численного моделирования взаимодействия интенсивного лазерного излучения с заранее приготовленной бесстолкновительной плазмой была разработана параллельная программа «Мандор», решающая трехмерную реля-

тивистскую систему уравнений Максвелла–Власова методом PIC. Подробное описание программы приведено на специальном сайте ее разработчика [3]. При написании кода использован язык программирования C99. Пакет работает под управлением операционных систем семейства UNIX и использует MPI-2 для обмена сообщениями при распараллеливании задачи. Для решения уравнений Максвелла используется явная схема второго порядка аппроксимации по времени и координатам (схема Yee). Алгоритм одновременного учета входа и выхода электромагнитных волн реализован введением "total field/scattered field" интерфейса. Кинетическое уравнение Власова решается с использованием метода характеристик и релятивистской модификации схемы Бориса. Распараллеливание алгоритма достигается декомпозицией счетной области на подобласти, каждая из которых обчисляется отдельным процессором. При однородной декомпозиции наибольшая эффективность распараллеливания достигается для равномерного распределения плазмы в области. В реальных задачах распределение плазмы почти всегда неоднородно, поэтому для увеличения эффективности в данной программе было применено неоднородное параметрическое разбиение области. Такой метод разбиения минимизирует объем пересылок и позволяет добиться точной балансировки. Также увеличение быстродействия достигается тем, что значения для пересылок находятся заранее и пересылаются параллельно с выполнением шагов по времени.

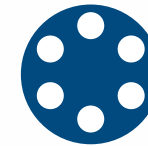
Ниже даны два примера решения актуальных задач с использованием пакета Mandor.

В первом примере исследовалось ускорение ионов с использованием специально микроструктурированной мишени. Численно исследовалась мишень следующего типа: диск радиуса 7,5 мкм с несколькими отверстиями радиуса 1,5 мкм, расположенными на расстоянии 3,5 мкм от центра диска. Лазерный импульс с интенсивностью 10^{19} Вт/см², радиусом 5 мкм и длительностью 200 фс направлен в центр диска, перпендикулярно ему. При взаимодействии лазерного излучения с плазмой образуются потоки горячих электронов, которые, проходя сквозь отверстия в мишени, будут генерировать магнитные поля, способные коллимировать ионные пучки и придавать им дополнительное ускорение. Помимо этого возможно увеличение поглощения лазерной энергии из-за ускорения электронов в области отверстий продольным электрическим полем Гауссова пучка. Расчеты проводились на суперкомпьютере СКФ МГУ «Чебышев» с использованием 128 ядер. Время типичного расчета (10^7 ячеек, 10^8 частиц) составляло 6 часов.

На рис. 1 приведены распределения протонов по энергиям и углам в момент времени 400 фс после входа импульса в расчетную область. Для мишени



структурированная мишень



сплошная мишень

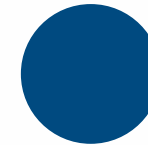


Рис. 1. Спектрально-угловые характеристики ионов из сплошной и ситообразной фольги

с отверстиями протоны в целом имеют большую энергию, чем в случае сплошной мишени.

Во втором примере исследовалась генерация высокоэнергетических ионов при взаимодействии ультракоротких (15 фс) релятивистски сильных (интенсивность $7,4 \cdot 10^{21}$ Вт/см²) лазерных импульсов с плотными газовыми струями и твердотельными фольгами. Для моделирования взаимодействия лазерного импульса с газовой струей в качестве мишени использовался слой плазмы, состоящий из протонов и электронов с критической плотностью

(оптимальная плотность для рассматриваемых лазерных параметров и толщины мишени) и толщиной 40λ с резкой границей плазма–вакуум. В случае твердотельной мишени использовалась CH₂ фольга (плотность $240 \rho_c$, оптимальная толщина фольги $0,1 \lambda$). Полученные энергетические спектры ускоренных протонов представлены на рис. 2. В обоих случаях спектр имеет тепловую форму с резким обрывом на максимальной энергии 220 МэВ. Однако полное число протонов, генерируемых из тонкой фольги, оказывается большим по сравнению с их числом из газовой мишени ($5 \cdot 10^9$ и $2 \cdot 10^9$ частиц с энергией более 150 МэВ соответственно). Дальнейшее увеличение энергии протонов (до 260 МэВ) возможно с использованием пространственно ограниченных мишеней с попереч-

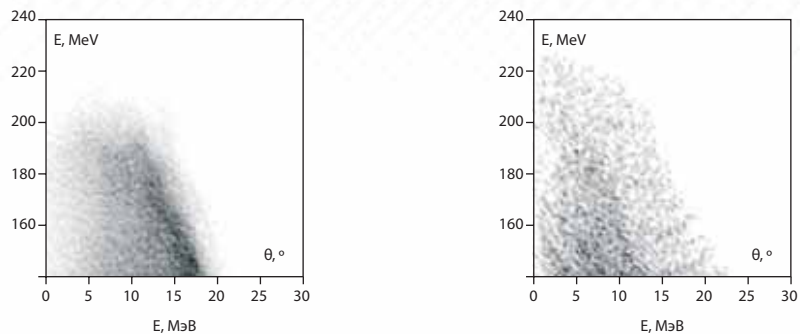


Рис. 2.
Угловое распределение энергетичных протонов из газа (слева) и фольги (справа)

ными размерами порядка пятна фокусировки лазерного импульса (см. рис. 3, демонстрирующий пространственное распределение частиц).

Данная работа проводится в рамках совместной лаборатории «Релятивистской лазерной плазмы» ОКР ФИАН и МЛЦ МГУ с частичной финансовой поддержкой со стороны РФФИ и Роснауки.

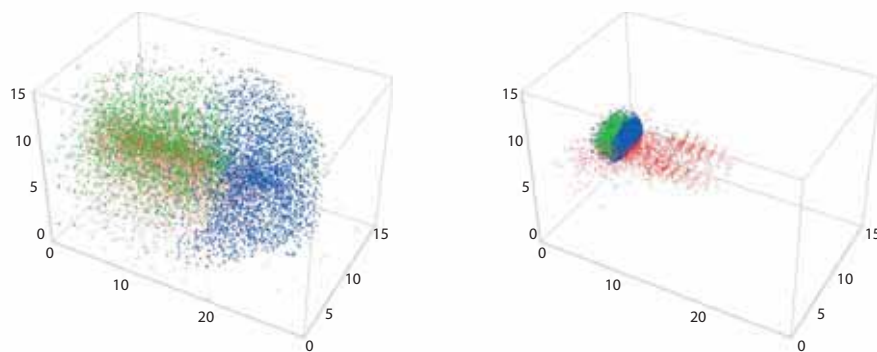


Рис. 3.
Распределение частиц (электроны – красный цвет, ионы углерода – зеленый, а протоны – синий) из CH_2 мишени при $t = 20$ фс (слева) и $t = 130$ фс (справа)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бэдсел Ч., Ленгдон А. Физика плазмы и численное моделирование. М., 1989.
2. Mourou G.A., Tajima T., Bulanov S.V. Optics in the relativistic regime // Rev. of Modern Physics. 2006. 78(2). P. 309–371.
3. <http://mandor.ilc.edu.ru/mandor3>.

Изучение механизма действия митохондриальных ионных антиоксидантов методами молекулярной динамики

