

Отчёт ИВЦ НГУ

Берендеев Е.А.

Тема работы

Численное моделирование динамики плазмы в осесимметричных магнитных ловушках-мишенях.

Состав коллектива (с указанием места учёбы/работы, учёных степеней и званий).

Берендеев Е.А., ИВМиМГ СО РАН

Научное содержание работы:

Постановка задачи.

Основным методом накопления и нагрева высокотемпературной плазмы в термоядерных установках с магнитным полем является атомарная (нейтральная, перезарядная) инжекция ионов необходимой энергии. Одним из наиболее эффективных методов получения мощных нейтральных пучков высокой энергии является нейтрализация пучков отрицательных ионов в плазменной ловушке - мишени. В ИЯФ СО РАН предложена линейная ловушка с инверсными пробками (с обратным магнитным полем). Благодаря сохранению в аксиально-симметричной системе обобщенного момента импульса, продольное удержание частиц (кроме осевых) окажется очень жёстким. В ловушке радиальные потери плазмы ограничены мультипольными магнитными стенками кольцевой геометрии. Поскольку в аксиально-симметричном магнитном поле отсутствует азимутальный компонент поля, а стационарное азимутальное электрическое поле цилиндрической плазмы равно нулю, в такой ловушке не может возникать нормальный к стенкам стационарный дрейф плазмы в скрещенных полях. Поэтому, благодаря естественной МГД устойчивости плазмы в мультипольном поле, электроны плазмы хорошо удерживаются, накапливаются и нагреваются, во внутренней области потенциал плазмы понижается, что ведет к улучшению удержания ионов. При этом проблема потерь плазмы в широко апертурные проходные отверстия в торцах, в которых находятся инверсные магнитные пробки, а так же через цилиндрические мультипольные магнитные стенки ловушки на ее вакуумную камеру остаётся открытой. Математическое моделирование позволяет найти точки выхода плазмы из ловушки, чтобы в дальнейшем, изменяя магнитную систему ловушки, уменьшить потери плазмы и, соответственно, повысить параметры удерживаемой плазмы. В качестве математической модели рассматривается решение системы уравнений Больцмана для каждой компоненты плазмы и уравнений Максвелла для электромагнитных полей. Полностью кинетическая модель имеет более общий характер и позволяет получить существенно более полное описание процессов динамики плазмы. Однако, при описании всей области ловушки такая модель требует огромных вычислительных ресурсов для расчётов траекторий миллиардов модельных частиц. Современные суперЭВМ позволяют проводить такие расчёты, но требуют разработки эффективных алгоритмов параллельных вычислений.

Современное состояние проблемы.

Известно, что получение атомарных пучков с энергией более 0.5 МэВ из пучков ускоренных отрицательных ионов возможно с помощью различных нейтрализующих мишеней. В мишенях из обычных газов можно получать ~ 55 % атомов. При нейтрализации пучков отрицательных ионов на плазменной мишени можно достичь выхода атомов ~ 85 %, что подтверждено экспериментально на импульсных плазменных мишенях. Таким образом, переход к плазменной мишени позволяет повысить выход атомов на 20-30 %. При необходимой мощности стационарных атомарных инжекторов около 10 МВт это является существенным продвижением в проблеме создания мощных источников быстрых нейтронов и термоядерных реакторов, особенно безнейтронных. В настоящее время, в силу новизны предложенной ловушки, нет единого подхода к моделированию мишеней такого типа. Тем не менее, существует ряд подходов к моделированию плазмы в подобных физических условиях. Поведение плазмы

описывается уравнением Больцмана и системой уравнений Максвелла для электромагнитных полей. Численные модели, используемые для исследования низкотемпературной плазмы могут быть разделены на три группы по методу решения кинетического уравнения Больцмана: гидродинамические, кинетические и гибридные. В кинетическом подходе вычисляются зависящие от времени и координат решения уравнения Больцмана, которые дают распределения скоростей электронов и ионов. Уравнение Больцмана решается либо непосредственно (с помощью двучленного приближения), либо с использованием статистических подходов (метод Монте-Карло). При том, что кинетические модели требуют больших вычислительных затрат, они в меньшей степени зависят от начальных предположений и дают более точные результаты. В настоящее время в связи с бурным развитием вычислительной техники, в том числе с появлением многопроцессорных комплексов, широкое распространение для моделирования нестационарных задач физики плазмы получил метод частиц в ячейках. При решении задач с большим числом частиц и в течение большого времени стали проявляться недостатки данного метода, обусловленные проявлением счетных шумов, которые в физике плазмы связаны с большой разницей во временных и пространственных масштабах для 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 приспособлять его к конкретным физическим задачам. Заметим, 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 путем конформного преобразования области с криволинейными границами. Другой подход с использованием конечных элементов рассмотрен в работе [Kazeminezhad, Zalesak, Spicer. Comp.Phys.Comm., 1995]. В работе [Gibbons, Hewett. J.Comp.Physics, 1995] развивается модель Дарвина для моделирования низкочастотных плазменных явлений. Теоретическая работа [Larson, Hewett, Langdon. Comp.Phys.Comm., 1995] посвящена моделированию методом частиц осесимметричных задач, в ней рассмотрены погрешности метода вблизи оси симметрии. В работе [Chen et al. Physics of Plasmas, (2013).] предлагается сочетание кинетического и статистического подхода. Подобный подход реализован и в настоящем проекте. Траектории частиц вычисляются исходя из кинетического уравнения Власова и затем корректируются с помощью статистического подхода в зависимости от происходящего в данное время физического процесса — рекомбинация, диссоциация, столкновение. Актуальность проекта подчёркивается в первую очередь особенностью рассматриваемой ловушки - геометрии магнитной системы, инжекция пучка и т. д., а также необходимостью проводить моделирование во всей области. Это требует с одной стороны масштабируемого до нескольких тысяч вычислительных ядер алгоритма параллельных вычислений, а с другой стороны модификации метода частиц для учёта особенностей моделируемого объекта. Несмотря на обилие параллельных алгоритмов для метода частиц [коды COMBI, IMPACT, Beam Beam 3D], универсального подхода для решения конкретной задачи всё же не существует. Коллективом авторов заявки разработан алгоритм параллельных вычислений для декартовых координат, учитывающий конфигурацию магнитного поля и масштабируемый до 8192 процессорных ядер. В ходе работы над проектом этот алгоритм постоянно усовершенствуется с учётом особенностей рассматриваемой задачи, например, введение адаптивной массы частиц, а также современной гибридной архитектуры суперЭВМ, оснащённых ускорителями Intel Xeon Phi.

Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.

Поскольку ловушка осесимметрична, рационально проводить все вычисления в цилиндрической системе координат R-Z. Для решения уравнения Больцмана используется метод частиц-в-

ячейках в цилиндрической системе координат с применением схемы с перешагиванием, обеспечивающей второй порядок точности по времени и пространству. Для каждой частицы уравнения движения без учёта рассеяния и столкновений совпадают с уравнениями характеристик кинетического уравнения Власова, поэтому соответствующие уравнения для каждой модельной частицы можно решать независимо, с высокой эффективностью. Затем с использованием статистических методов скорости и координаты частиц корректируются с учётом процессов рассеяния, рекомбинации и т. д. При этом, возможно как удаление, так и возникновение заряженных частиц в области. Чтобы корректно рассчитать изменение концентрации, предполагается использовать метод адаптивных масс, предложенный в работе [В. А. Вшивков и др. Вычислительные технологии, 2008.] Поскольку величина магнитного поля ловушки в различных областях отличается в десятки раз, для расчёта траекторий используется адаптивный шаг по времени — в областях с малой величиной магнитного поля траектории частиц более плавные, и положение частиц требуется вычислять гораздо реже. Такой подход позволит сократить время вычислений, однако, требует модификации алгоритма параллельных вычислений. Обычно для распараллеливания метода частиц в ячейках выбирается метод эйлерово-лагранжевой декомпозиции. Наиболее простая декомпозиция представляет собой разделение области на полосы (в соответствующей системе координат). Для наибольшей эффективности вычислений с целью уменьшить число межпроцессорных коммуникаций необходимо модифицировать имеющиеся алгоритмы с учетом специфики решаемой задачи (например, электромагнитных сил, при моделировании которых требуется обмен данными между процессорами по принципу «все-со-всеми») и архитектуры современных процессоров. Кроме того, особенностью задачи является существенно неравномерное распределение частиц в области, что требует дополнительной модификации алгоритма параллельных вычислений. Чтобы моделировать динамику плазмы во всей области ловушки, необходимо использовать около 10^{10} модельных частиц. Для проведения таких расчётов потребуется использование одновременно до нескольких тысяч вычислительных узлов. При реализации самого метода частиц также предлагается ввести несколько модификаций. Для того, чтобы избежать необходимости решения уравнения Пуассона на каждом шаге, используются модифицированные формулы учёта потока плазмы через границы ячеек, предложенные в [Villasenor J., Buneman O. Computer Phys. Comm. 1992] для декартовых координат. Этот подход требует решения уравнения Пуассона только в начальный момент времени, что также позволит сократить объём вычислений. При решении уравнения Пуассона и расчёта значений электрических полей в начальный момент времени используется метод последовательной верхней релаксации с красно-чёрным упорядочиванием. В последующие моменты времени значения электромагнитных полей находятся из уравнений Фарадея и Ампера по схеме, предложенной Лэнгдоном и Лазинским [Langdon A.B., Lasinski B.F. Meth. Comput. Phys. 1976].

Полученные результаты.

Для детального кинетического описания плазмы, учета важных кинетических эффектов построена численная модель плазмы, поведение которой описывается уравнением Больцмана. На основе разработанной математической модели плазменной ловушки-мишени проведены расчёты динамики заряженных частиц в ловушке. С вычислительных экспериментов воспроизведён процесс зажигания плазмы, распределение плотности различных компонент плазмы (электронов фона, ионов H^+ , H_2^+ , H_3^+). Основное внимание было уделено истечению плазмы из ловушки и эффективности её удержания в магнитном поле. Результаты расчётов плотности плазмы на оси в области магнитной пробки представлены в приложении. Наблюдается ступенчатое падение плотности всех ионных компонент плазмы вдоль оси в области инверсной магнитной пробки. Этот результат полностью соответствует наблюдениям, полученным экспериментальным путём в работе [Dimov, G. I., Emelev, I. S. Technical Physics, 2014]. Достигнутая в расчётах средняя плотность плазмы составила до $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Именно такой плотности предполагается достичь на создаваемой ловушке. Также получено распределение плотности плазмы у стенок ловушки, найдены основные точки выхода плазмы.

Согласно расчетам, поток плазмы на стенки ловушки достигает 9.5 А . Ток ионов в торцевые отверстия со временем стабилизируется на уровне 0.5 А. Таким образом, с помощью численных экспериментов показано, что магнитная система со слабым продольным полем и инверсными пробками в торцевых отверстиях в магнитном поле позволяет добиться достаточно малого потока плазмы из ловушки.

Ещё одним ключевым результатом Проекта стала разработка высокоэффективных параллельных алгоритмов для моделирования динамики плазмы. Предложена модификация алгоритма эйлерово-лагранжевой декомпозиции для двумерного случая, учитывающая балансировку вычислительной нагрузки в системах с разным временным шагом в подобластях.

Эффективность балансировки вычислительной нагрузки проверена на суперкомпьютере НКС-30Т с использованием до 256 процессорных ядер и кластере НГУ.

Иллюстрации, визуализация результатов.

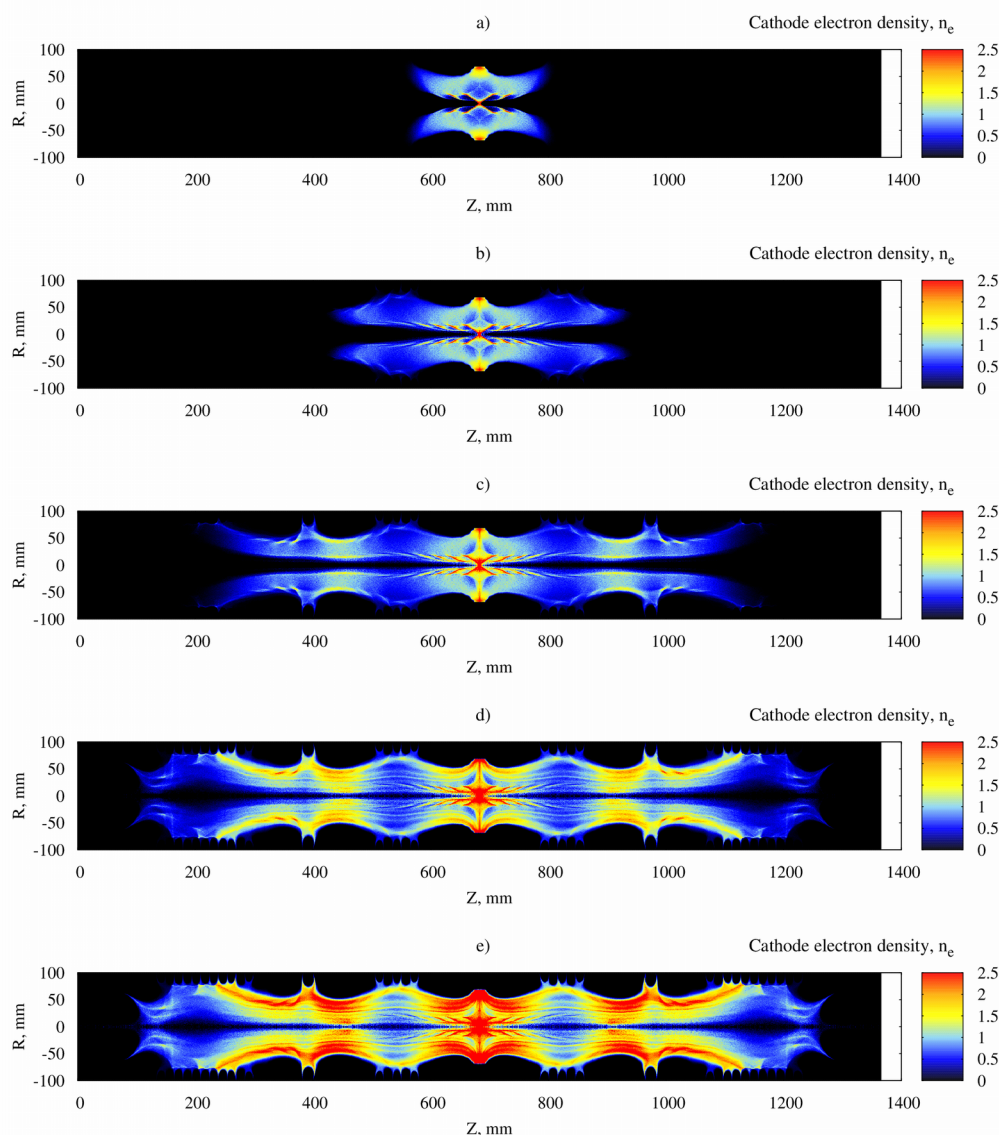


Рисунок 1. Плотность катодных электронов, нормированная на $n_{ek} = 1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, в различные моменты времени (a – 1 нс, b – 10 нс, c – 40 нс, d – 60 нс, e – 80 нс.)

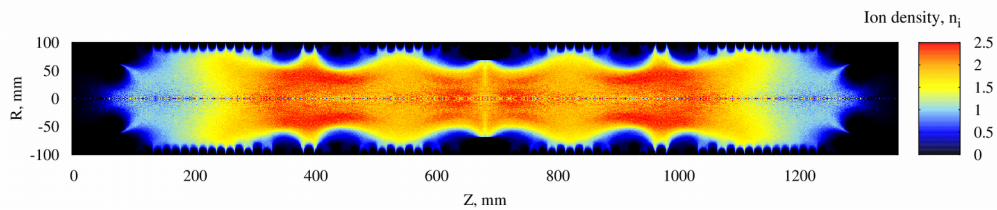


Рисунок 2. Плотность ионов плазмы в момент времени 400 нс. $n_i = 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$

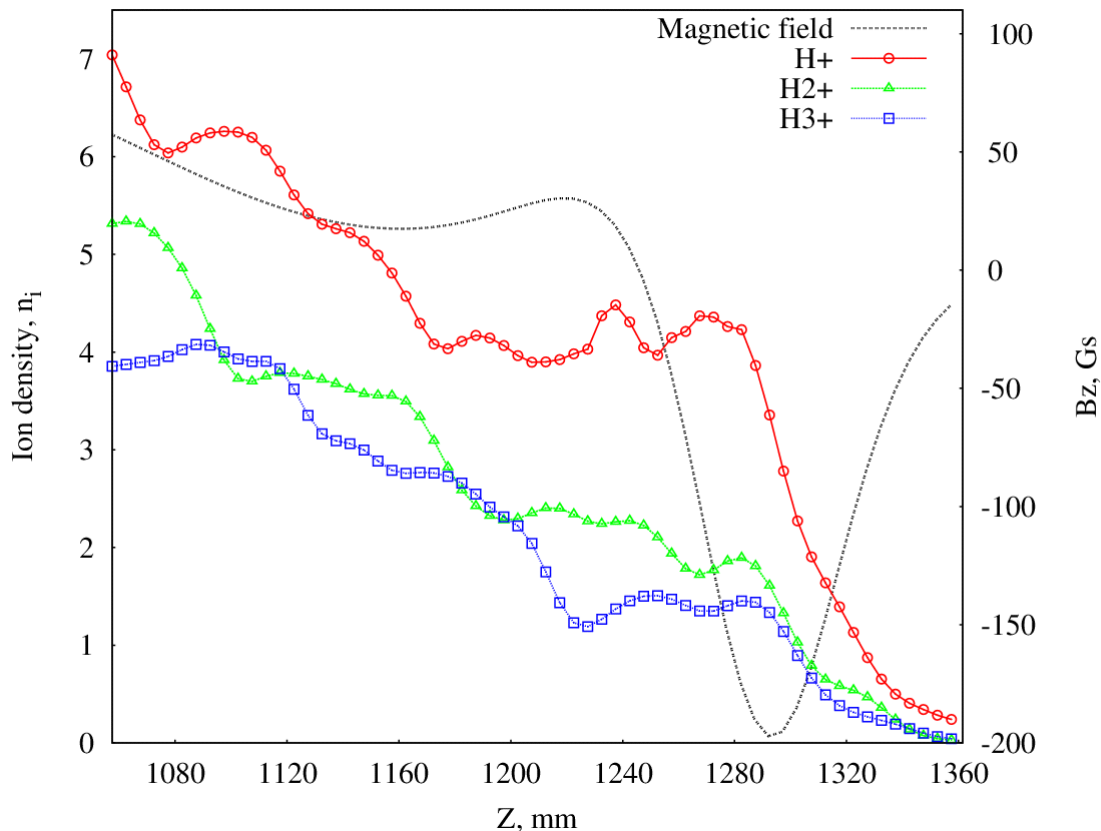


Рисунок 3. Плотность различных ионных компонент плазмы на оси ловушки в области магнитной пробки в момент времени 400 нс. $n_i = 1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$

Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Для решение поставленной задачи необходима большая вычислительная мощность, поскольку требуется рассчитывать траектории миллиардов модельных частиц. В рамках выполнения проекта активно использовался кластер НГУ. Основные расчёты были проведены именно на нём.

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

- Берендеев Е.А., Димов Г.И., Иванов А.В., Лазарева Г.Г., Федорук М.П. Моделирование низкотемпературной многокомпонентной плазмы в ловушке-мишени // Доклады Академии Наук. 2015, т. 460, № 5, с. 529-531. Импакт-фактор РИНЦ 0,756
- Berendeev E.A., Dimov G.I., Dudnikova G.I., Ivanov A.V., Lazareva G.G., Vshivkov V.A. Mathematical and experimental simulation of a cylindrical plasma target trap with inverse magnetic mirrors // Journal of Plasma Physics, 2015, vol. 81, issue 05, P. 1-8. JCR IF 0,981

Ваши впечатления от работы вычислительной системы и деятельности ИВЦ НГУ, а также

Ваши предложения по их совершенствованию.

Использование ресурсов ИВЦ НГУ является необходимым, т. к. решаются задачи большой вычислительной сложности. По работе с пользователями ИВЦ НГУ выгодно отличается от других суперкомпьютерных центров.