

# Численное моделирование турбулентности при взаимодействии электронного пучка с плазмой в установках УТС

Исполнители: Берендеев Е.А., Месяц Е.А., Снытников А.В.  
Контактное лицо: Берендеев Е.А. ,evgeny.berendeev@gmail.com

## Постановка задачи

Целью данного проекта является создание физико-математических и численных моделей высокого уровня для исследования проблемы устойчивости и нагрева плазмы релятивистским электронным пучком в установках УТС. Задача устойчивости и возбуждения турбулентности при коллективном взаимодействии электронного пучка с плазмой имеет фундаментальное значение не только для исследований в рамках УТС, но и для изучения различных космических явлений. Исследование основных процессов, ответственных за формирование турбулентных спектров, позволяет определить эффективность различных режимов нагрева плазмы в открытых ловушках и найти условия эффективной доставки энергии электронных потоков в центр плотных мишеней в схемах инерциального синтеза. Для решения системы кинетических уравнений и уравнений Максвелла будет использована авторская модификация метода частиц в ячейках. Определение аномальных коэффициентов переноса в бесстолкновительной плазме при численном моделировании на основе метода частиц является актуальной нетривиальной задачей, решение которой будет получено в ходе выполнения данного проекта.

Данный проект направлен на изучение сценария возбуждения плазменной турбулентности электронным пучком на основе численного моделирования и теоретического анализа. При этом наибольший интерес представляют параметры пучка и плазмы, которые характерны для экспериментов по нагреву плазмы в открытой ловушке ГОЛ-3 (ИЯФ СО РАН). Особенность релаксации пучка при этих параметрах состоит в том, что раскачиваемая на начальной стадии резонансная волна имеет существенно надтепловую энергию. Такой режим не может быть описан в рамках существующих теоретических подходов слабой и сильной турбулентности. Одномерные численные расчеты показали, что переход от динамической стадии к турбулентному состоянию в этом режиме характеризуется появлением захвата пучка и коротковолновой модуляционной неустойчивостью, развитие которой создает механизм прямого переноса энергии из области возбуждения в область сильного затухания, минуя стадию коллапса. Чтобы убедиться в реалистичности такого сценария необходимо провести трехмерное численное моделирование с помощью метода частиц в ячейках. Создание методики нахождения аномальных коэффициентов переноса для метода частиц в ячейках, позволит внести существенный вклад в теорию метода. Будут

рассмотрены две различные постановки задачи. В первой будет учтена нелинейная динамика пучка в поле возбуждаемых волн, что позволит выяснить роль эффектов захвата в условиях, когда неустойчивым оказывается достаточно широкий трехмерный спектр колебаний. Во второй ток пучка будет промодулирован и задан извне так, чтобы обеспечить постоянную накачку в резонансную волну с надтепловой амплитудой. В этом случае интерес представляет трехмерная нелинейная динамика плазмы, ответственная за формирование турбулентного спектра в режиме с надтепловой накачкой.

Таким образом, численное моделирование в рамках более общей трехмерной модели позволит идентифицировать основные нелинейные процессы, определяющие турбулентный нагрев плазмы электронным пучком, и определить адекватность одномерных расчетов.

С другой стороны, трёхмерная постановка задачи требует огромных вычислительных ресурсов, поэтому для исследования физических эффектов на больших масштабах, необходимо проводить двумерное численное моделирование.

В ходе выполнения проекта предполагается создать трехмерную и двумерную численную модели и провести их тестирование, разработать эффективные алгоритмы параллельных вычислений для современных суперЭВМ, идентифицировать наиболее неустойчивые колебания в трехмерном случае и исследовать роль эффектов захвата в условиях возбуждения косых волн, на основе численного моделирования определить сценарий установления турбулентности в системе плазма-пучок, сравнить мощность нагрева плазмы в состоянии развитой турбулентности с результатами одномерных расчетов и результатами реальных экспериментов.

## **Современное состояние проблемы**

Несмотря на обилие теоретических моделей, описывающих различные режимы пучково-плазменного взаимодействия, задача предсказания с их помощью результатов реальных экспериментов все еще далека от решения. Дело в том, что максимально приближенная к эксперименту постановка задачи зачастую требует отказа от привычных для теории идеализаций, таких как слабое или сильное магнитное поле, гидродинамический или кинетический характер пучковой неустойчивости, приближение случайных фаз возбуждаемых в плазме турбулентных пульсаций. Кроме того, при длительной инжекции пучка эволюция пучково-плазменной системы может проходить через целую последовательность стадий, определяемых различными нелинейными процессами. В связи с этим становится актуальным численное моделирование основных закономерностей исследуемых процессов, позволяющее с единых позиций изучить всю картину проходимых пучком этапов релаксации и определить адекватность существующих

теоретических представлений о механизмах развития и установления турбулентности в системе плазма-пучок.

## **Полученные результаты.**

Первым этапом проекта является разработка эффективных параллельных алгоритмов для моделирования больших задач методом чатстиц в ячейках.

В этом направлении были достигнуты следующие результаты:

Рассмотрены основные варианты параллельной реализации метода частиц, в том числе равномерный расброс частиц по процессорам и декомпозиция области с распределением частиц по пространственному признаку. Как показали наши расчёты, наиболее эффективной является комбинация этих вариантов распараллеливания, когда область разделена на группы процессоров, в каждой из которых происходит равномерный расброс частиц по процессорам группы. Это позволяет ускорить вычисления до 2-х раз, сохранив балансировку нагрузки на процессоры. Также была показана высокая масштабируемость алгоритма на 2000 процессорных ядер. Результаты работы были представлены на Международной научной конференции "Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ) 2012"

<http://pavt.susu.ru/2012/short/198.pdf>

С помощью предлагаемого алгоритма удалось проводить расчёты, в которых число модельных частиц достигало значения 10 000 000 000.

## **Эффект от использования кластера в достижении целей работы**

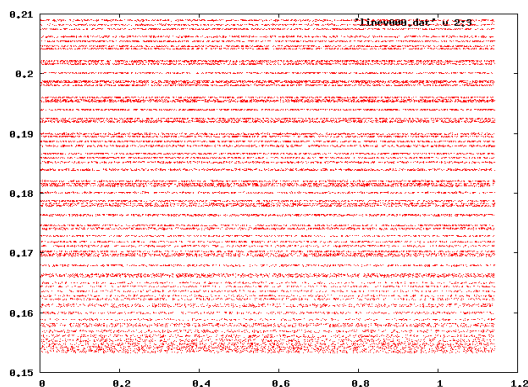
В рамках выполнения проекта активно использовался кластер НГУ. Основные расчёты были проведены именно на нём. Также было выполнено сравнение производительности групп узлов кластера НГУ с узлами суперкомпьютеров НКС-30Т, МВС-100К, «Ломоносов». Это позволило увидеть узкие места алгоритма. Кроме того проведение большой группы расчётов, требующих большой выдачи данных возможно только на кластере НГУ. В дальнейшем планируется использовать графические ускорители и узлы с большим объёмом общей памяти, что позволит существенно сократить время вычислений.

## **Иллюстрации, визуализация результатов**

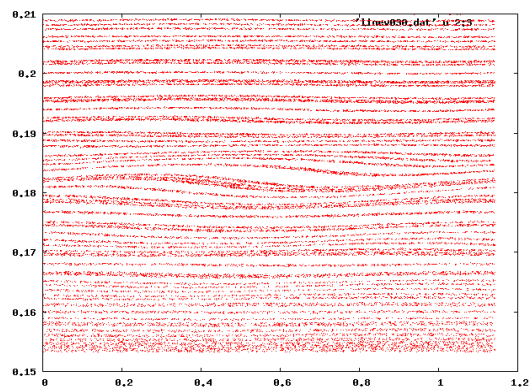
Была проведена серия расчётов для моделирования взаимодействия электронного пучка малой плотности. Только часть пучка взаимодействует с плазмой.

На рисунках представлено фазовое пространство  $(X,V)$  частиц пучка в различные моменты времени и возникающая турбулентность.

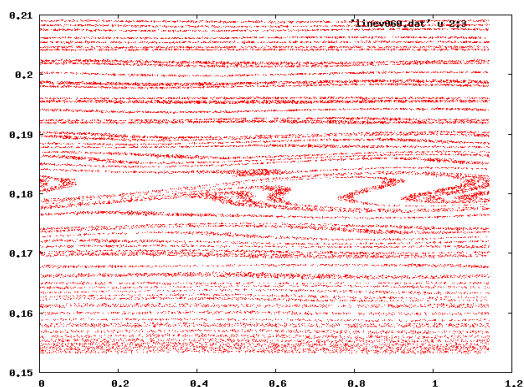
Time 0



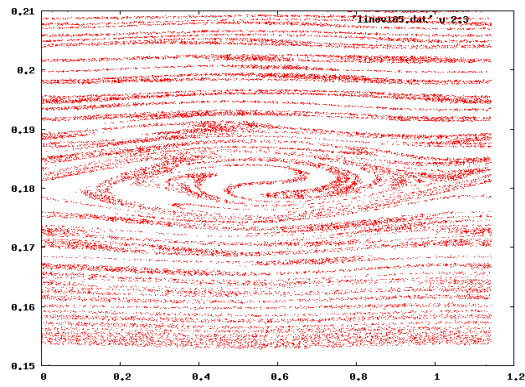
Time 180



time 360



time 990



## Перечень публикаций, содержащих результаты работы

Материалы Международной научной конференции "Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ) 2012"  
<http://pavt.susu.ru/2012/short/198.pdf>

**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. Хотелось бы выразить особую благодарность Калюжному Владиславу Анатольевичу за помощь в работе и оперативную поддержку пользователей. По работе с пользователями ИВЦ НГУ выгодно отличается от других суперкомпьютерных центров.