

**Отчет о проделанной работе на оборудовании
информационно-вычислительного центра НГУ
Автор: Петренко Алексей Васильевич
Тема работы: «Самоорганизация протонных сгустков
высокой энергии в плазме»**

Сведения о пользователе

Петренко Алексей Васильевич, к. ф.-м. н., научный сотрудник Института ядерной физики СО РАН им. Г. И. Будкера и Европейского центра ядерных исследований (ЦЕРН).

Состав коллектива

- Лотов Константин Владимирович (научный руководитель), г.н.с. ИЯФ СО РАН, д.ф.-м.н., доцент НГУ, K.V.Lotov@inp.nsk.su, раб. тел. 329-46-23.
- Петренко Алексей Васильевич, н.с. ИЯФ СО РАН, к.ф.-м.н., AWAKE Project Associate at CERN, alexey.petrenko@cern.ch, раб. тел. +41227662530.
- Соседкин Александр Павлович, ст. лаборант ИЯФ СО РАН, аспирант НГУ, раб. тел. 329-46-23.
- Минаков Владимир Алексеевич, ст. лаборант ИЯФ СО РАН, аспирант ИЯФ СО РАН, раб. тел. 329-46-23.
- Горн Александр Андреевич, ст. лаборант ИЯФ СО РАН, магистрант НГУ, раб. тел. 329-46-23.

Работа была поддержана грантом РФФИ № 14-12-00043 «Самоорганизация протонных сгустков высокой энергии в плазме». Руководитель проекта Лотов Константин Владимирович.

Общее описание работы

В настоящее время в ЦЕРНе проводится эксперимент AWAKE по кильватерному ускорению электронов в плазменной волне, созданной протонным пучком высокой энергии. Новосибирская команда физиков из ИЯФ и НГУ занимается численными расчетами, необходимыми для проведения данного эксперимента. Данный эксперимент является первой попыткой использования ультрарелятивистского протонного пучка в качестве драйвера для плазменного кильватерного ускорителя. За счет большой энергии протонного пучка теоретически таким методом можно ускорить электроны до энергии, сопоставимой с энергией протонного пучка (0.5-7 ТэВ), в одной плазменной секции с высоким темпом ускорения. Основная сложность в использовании протонных пучков для возбуждения плазменных волн высокой амплитуды заключается в том, что типичная длина протонного сгустка, выпущенного из ускорителя, составляет десятки сантиметров, тогда как длина волны плазменных колебаний с высокой амплитудой электрического поля (~ 1 ГВ/м) обычно порядка одного миллиметра или еще меньше. Таким образом для эффективного возбуждения плазменной волны протонный пучок необходимо либо многократно продольно сжать перед инъекцией в плазму, что технически очень сложно, либо разбить на последовательность коротких сгустков, которые смогут раскачать плазменную волну резонансно. В эксперименте AWAKE длинный протонный пучок разбивается на последовательность коротких микросгустков за счет поперечной двухпоточковой неустойчивости протонного пучка в плазме. Данный процесс является сильно нелинейным и в настоящее время его удается адекватно описать только при помощи численного моделирования методом частиц в ячейках.

Используемые численные алгоритмы и коды

Для моделирования процесса микро-банчирования протонного пучка в плазме нами использовались несколько компьютерных

кодов, моделирующих динамику пучка и плазмы методом частиц в ячейках: во первых это работающий в приближении цилиндрически-симметричной плазменной волны LCODE¹ и полностью трехмерный QV3D². Оба этих кода используют квазистатическое приближение, поэтому для независимой проверки этого приближения в некоторых особых случаях также использовался код WARP³, работающий в более общем приближении, но потребляющий гораздо больше вычислительных ресурсов.

Особенностью кластера НГУ является наличие узлов с большим объемом оперативной памяти (НР XL230a Gen9, 192 ГБ ОЗУ), которые оказались очень полезны для трехмерных расчетов при помощи кода QV3D, требующего большого объема оперативной памяти.

Основные результаты

Работа велась в двух направлениях – численное моделирование процесса самомодуляции пучка в неидеальных условиях в текущем эксперименте (т.е., например, при наличии поперечного смещения пучка относительно центра плазменного канала), а также проектирование возможного следующего этапа эксперимента AWAKE, целью которого будет ускорение электронных сгустков с малым угловым и энергетическим разбросом.

Например, на рис. 1 показан результат расчета самомодуляции пучка в плазме в случае, если пучок распространяется со смещением относительно центра плазменного канала. По результатам этого моделирования можно сделать важный вывод, что самомодуляция пучка имеет большую чувствительность к поперечному смещению только в случае низкой плотности плазмы, когда поперечный размер плазменной волны сопоставим с радиусом плазменного канала. Таким образом, для успешного разбиения пучка на требуемую в

¹<http://www.inp.nsk.su/~lotov/lcode>

²A. Pukhov. Particle-In-Cell Codes for Plasma-based Particle Acceleration, CERN Yellow Reports, 2016. <http://dx.doi.org/10.5170/CERN-2016-001.181>

³<http://warp.lbl.gov/>

эксперименте осе-симметричную последовательность протонных микросгустков плотность плазмы должна быть достаточно высокой, чтобы влияние граничных условий на самомодуляцию пучка свелось к минимуму.

Для проекта следующего этапа эксперимента AWAKE на основе подробных расчетов в программах LCODE, QV3D и WARP была предложена схема инжекции электронов¹.

Публикации

Результаты работы были представлены на нескольких семинарах, собраниях коллаборации AWAKE и одной конференции:

A. Petrenko, A. Pukhov, K. Lotov, A. Gorn, V. Minakov, A. Sosedkin. Simulations of the possible AWAKE Run-2 experiment at CERN². EAAC'2017 Workshop, 24-30 September 2017, Elba, Italy.

A. Petrenko. Particle acceleration driven by a high-energy hadron beam³. Fermilab's APT seminar, 2017.

A. Caldwell et al. (AWAKE Collaboration). AWAKE Status Report⁴. CERN report CERN-SPSC-2017-039 (2017), page 15.

Также к публикации готовятся две статьи в реферируемых журналах.

Комментарии о работе ИВЦ НГУ

Впечатление от работы сотрудников ИВЦ НГУ и кластера очень положительное.

В процессе работы был выработан интересный подход к формированию заданий и обработке полученных результатов (это может быть полезно и для других пользователей кластера): на расположенном недалеко от НГУ сервере (в ИЯФ СО РАН) был установлен

¹<https://agenda.infn.it/getFile.py/access?contribId=22&sessionId=3&resId=0&materialId=poster&confId=12611>

²<https://agenda.infn.it/getFile.py/access?contribId=22&sessionId=3&resId=0&materialId=poster&confId=12611>

³<http://beamdocs.fnal.gov/AD-public/DocDB/ShowDocument?docid=5326>

⁴<https://cds.cern.ch/record/2287092>

Jupyter Hub¹, представляющий собой веб-сервер с возможностью запуска документов в формате Jupyter Notebook, а также командной строки через веб-интерфейс. Связь между этим сервером и кластером (clu.nusc.ru) осуществлялась как через ssh (для запуска задач), так и через директорию смонтированную на веб-сервере при помощи команды sshfs. Зайдя на данный веб-сервер можно в интерфейсе Jupyter Hub по ссылкам перейти в рабочую директорию на кластере и запустить один из документов Jupyter Notebook, формирующий задание, либо обрабатывающий и визуализирующий результаты расчетов. При этом документ Jupyter Notebook запущен на сервере в ИЯФ, а все данные, включая сам документ, хранятся на кластере clu.nusc.ru — это очень удобно для удаленной работы, так как доступ к данным осуществляется мгновенно и не требует никакой синхронизации данных между рабочим компьютером и кластером. Вся работа осуществляется в окне браузера, результаты расчетов можно проверить в любой момент даже при помощи смартфона.

В последнее время формат Jupyter Notebook быстро развивается и фактически становится стандартом в научных вычислениях и обработке данных. В этой связи интересно было бы рассмотреть возможность осуществлять доступ к кластеру НГУ сразу через Jupyter Hub, установленный прямо на сервере clu.nusc.ru, минуя промежуточный этап дополнительного сервера в ИЯФ.

Похожий подход недавно начали использовать в ЦЕРНе, где был запущен облачный сервис обработки данных SWAN².

¹<https://github.com/jupyterhub/jupyterhub>

²<https://swan.web.cern.ch>

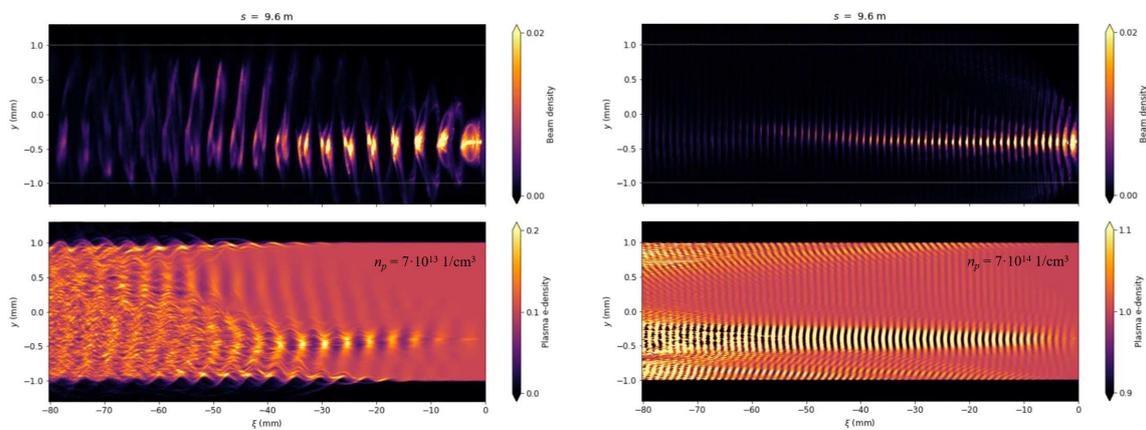


Рис. 1: Результат трехмерного расчета в программе QV3D само-модуляции протонного пучка в плазме низкой (слева) и высокой (справа) плотности с поперечным смещением пучка относительно центра плазменного канала. Изображения сверху показывают карту плотности протонного пучка, внизу — соответствующую карту электронной плотности плазмы. Более подробное описание см. в отчете CERN-SPSC-2017-039 <https://cds.cern.ch/record/2287092>