

# Отчёт по работе с ресурсами ИВЦ НГУ.

Анненков Владимир Вадимович

9 июня 2013 г.

## Тема работы

Вычисление инкремента неустойчивости релятивистского пучка в горячей замагниченной плазме в рамках точной кинетической теории.

## Состав коллектива исполнителей

- Анненков Владимир Вадимович, annenkov.phys@gmail.com — исполнитель, контактное лицо;
- Тимофеев Игорь Валериевич, timofeev@ngs.ru — научный руководитель.

## Научное содержание работы

### Постановка задачи

Система, состоящая из плазмы и движущегося в ней электронного пучка, подвержена развитию различного рода неустойчивостей. Линейная теория позволяет находить спектр неустойчивых колебаний, определять их поляризацию и скорость нарастания. Эта информация важна для построения различных моделей релаксации пучка, поскольку именно наиболее неустойчивые моды определяют дальнейшую нелинейную эволюцию системы.

В последнее время проблема вычисления инкремента неустойчивых колебаний в системе плазма-пучок является предметом активных исследований. Вопрос об эффективности релаксации электронных потоков в плазме весьма актуален как для схемы быстрого поджига мишени в инерциальном термоядерном синтезе, так и для различных астрофизических задач, таких как генерация высокоэнергетических космических лучей, гамма-всплеск, а также солнечных радио-всплесков III типа. С другой стороны, появление адекватных задаче вычислительных ресурсов позволило проводить точные вычисления, выходящие за рамки распространённых аналитических моделей, основанных на различных приближениях.

Данная проблема актуальна также и для лабораторных пучково-плазменных экспериментов. Наш интерес к проблеме связан с изучением особенностей коллективного пучково-плазменного взаимодействия в ловушке открытого типа ГОЛ-3 (ИЯФ СО РАН), где турбулентный нагрев плазмы осуществляется мощным релятивистским электронным пучком. Характерной особенностью этих экспериментов является наличие в плазме релятивистских надтепловых хвостов, содержащих большую часть кинетической энергии плазмы, и сильное магнитное поле. Формирование таких хвостов может существенно повлиять на скорость накачки неустойчивых колебаний и стать одной из возможных причин экспериментально

наблюдаемых срывов нагрева плазмы при длительной инжекции пучка. С другой стороны, по мере прохождения пучка вглубь плазмы может существенно меняться его функция распределения, вызывая ослабление неустойчивости и влияя на профиль энерговыделения. Таким образом, для адекватного описания этих экспериментов необходимо обобщить линейный анализ пучковой неустойчивости на случай произвольных распределений частиц пучка и плазмы по импульсам.

## Современное состояние проблемы

Численные решения точного дисперсионного уравнения для неустойчивости горячего электронного пучка в горячей изотропной плазме без использования каких-либо упрощающих предположений были получены сравнительно недавно [1–3]. Анализ дисперсионного уравнения в замагниченной плазме с учетом кинетических эффектов представляет значительно более сложную задачу, требующую применения параллельных численных алгоритмов на мощных ЭВМ. В этом случае гидродинамический режим неустойчивости был изучен достаточно детально [4, 5], а кинетическое рассмотрение ограничивалось случаями строго продольного [6] или строго поперечного [7] распространения колебаний относительно магнитного поля.

Анализ всего спектра неустойчивых колебаний в горячей замагниченной плазме с горячим пучком в рамках точной релятивистской кинетической теории упоминается в литературе как сложнейшая задача (“daunting task”) Клеммоу-Догерти [8]. Первым шагом к её решению была работа [9], в которой рассматривалась модель холодной замагниченной плазмы с моноэнергетическим релятивистским пучком, имеющим угловой разброс. Однако моноэнергетическим пучок можно считать только лишь при входе в плазму. По мере распространения частицы пучка должны получать значительный разброс по импульсам.

Целью данной работы являлось решение задачи вычисления инкремента в системе плазма-пучок в наиболее общей постановке, то есть для произвольной релятивистской функции распределения, произвольной величины магнитного поля и без использования упрощающих предположений об относительной плотности пучка и характере поляризации неустойчивых колебаний.

## Описание работы

Непосредственной математической задачей работы являлось нахождение неустойчивых решений дисперсионного уравнения

$$F(\omega) = |k_i k_j - k^2 \delta_{ij} + \omega^2 \varepsilon_{ij}| = 0,$$

где  $k_i$  – компоненты волнового вектора,  $\delta_{ij}$  – дельта-символ Кронекера,  $\varepsilon_{ij}$  – тензор диэлектрической проницаемости системы.

Для решения дисперсионного уравнения во всём  $k$ -пространстве использовался метод Ньютона, принцип которого состоит в том, что, начиная с удачно выбранного начального приближения для корня функции  $F(\omega) = 0$ , можно получить его значение с любой заданной наперёд точностью, уточняя корень по рекуррентной формуле  $\omega_{n+1} = \omega_n - \frac{F(\omega_n)}{F'(\omega_n)}$ , где  $F'(\omega_n)$  – производная функции. Сходимость метода обуславливается выбором начального приближения  $\omega_0$ .

Найдя решение дисперсионного уравнения в произвольной точке  $k$ -пространства (рис. 1, а) на интересующей нас ветви колебаний, можно использовать его в качестве начального приближения для метода Ньютона в соседних точках (рис. 1, б) и, в итоге, получить решение для всей ветви неустойчивых колебаний (рис. 1, в).

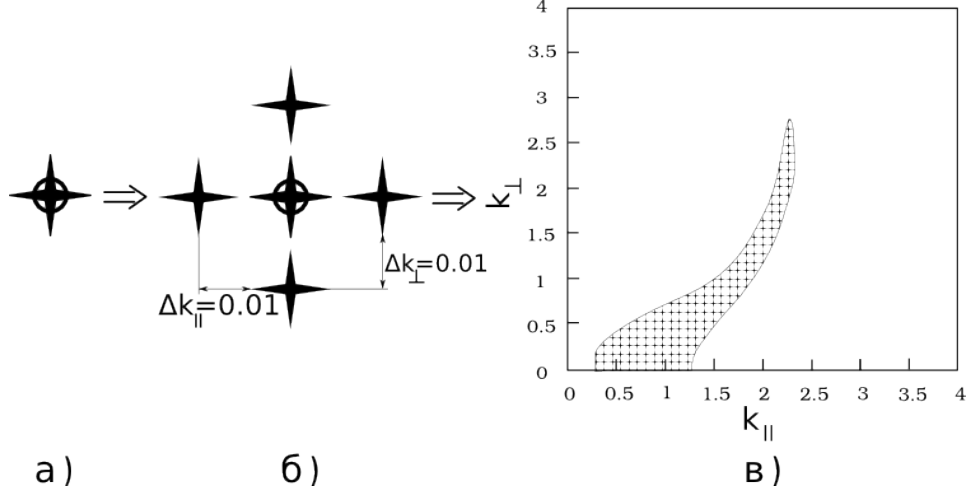


Рисунок 1: Выращивание решения всей ветви колебаний из одной точки  $k$ -пространства.

## Полученные результаты

Использовалось следующее релятивистское распределение частиц по импульсам, позволяющее учитывать конечность температуры и анизотропию в температурном разбросе по отношению к поперечному и продольному направлениям:

$$f^{(\sigma)}(p_{\perp}, p_{\parallel}) = \frac{n^{(\sigma)}}{\pi^{3/2} \Delta p_{\perp}^{(\sigma)2} \Delta p_{\parallel}^{(\sigma)}} \exp \left( -\frac{p_{\perp}^2}{\Delta p_{\perp}^{(\sigma)2}} - \frac{(p_{\parallel} - p_b^{(\sigma)})^2}{\Delta p_{\parallel}^{(\sigma)2}} \right).$$

Инкремент пучковой неустойчивости вычислялся для пучка с относительной плотностью  $n^{(b)} = 0.002$ , скоростью  $v^{(b)} = 0.9$  в магнитном поле  $\Omega = 2$ . Для исследования влияния температуры электронов плазмы были выбраны температурные параметры пучка ( $\Delta p_{\parallel}^{(b)} = 0.05$  и  $\Delta p_{\perp}^{(b)} = 0.5$ ) примерно соответствующие тем, которые использовались в работе [9] для моноэнергетического пучка с угловым разбросом. Оказалось, что более плавное распределение пучка приводит к подавлению слабых неустойчивостей, раскачиваемых на циклотронных резонансах, которые наблюдались в работе [9]. В связи с этим на полученных картах инкремента видна неустойчивость только верхнегибридной моды, попадающей в черенковский резонанс с частицами пучка.

Как видно из рис. 2 (а),(b),(c), увеличение температуры электронов плазмы приводит к подавлению косых неустойчивостей, практически не влияя на продольные. Из этого можно сделать вывод, что повышение температуры плазмы в процессе инжекции пучка до десятков кэВ не приводит к стабилизации наиболее неустойчивых мод. С другой стороны, из рис. 2 (d),(e),(f) следует, что увеличение продольного разброса пучка существенно снижает инкремент неустойчивости равномерно во всём  $k$ -пространстве.

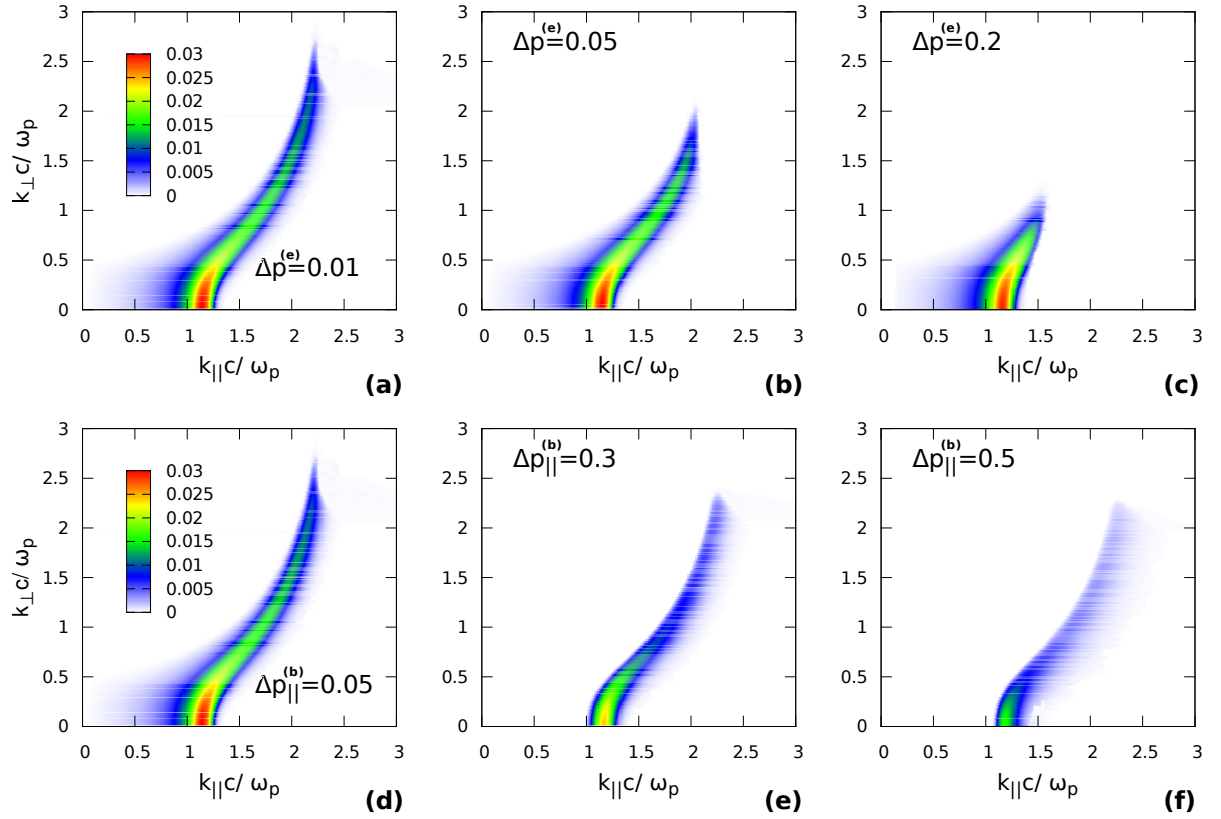


Рисунок 2: (a),(b),(c) – зависимость инкремента пучковой неустойчивости от температуры плазменных электронов в магнитном поле  $\Omega = 2$  при заданных параметрах пучка  $\Delta p_{\parallel}^{(b)} = 0.05$  и  $\Delta p_{\perp}^{(b)} = 0.5$ . (d),(e),(f) – влияние увеличивающегося продольного разброса пучка при фиксированных температуре плазмы  $\Delta p^{(e)} = 0.01$  и поперечной температуре пучка  $\Delta p_{\perp}^{(b)} = 0.5$ .

## Использование ресурсов ИВЦ

Для получения представленных результатов использовался собственный код, написанный на языке C++ с использованием распараллеливания по технологии MPI. Каждая картина вычислялась в среднем около суток на восьми восьмиядерных узлах.

Данная работа была представлена на 51-й Международной Научной Студенческой Конференции и заняла первое место в подсекции физики плазмы.

Опубликована в тезисах 51-й МНСК (Новосибирск, 2013), секция физики сплошных сред, подсекция физики плазмы, с.69.

## Дальнейшая работа

В ближайшее время планируется провести схожие расчёты для другого распределения электронов плазмы. В следующем году — модернизировать код для моделирования случая столкновения пучков под углом к магнитному полю, применительно к задаче генерации терагерцового излучения на установке ГОЛ-3 (ИЯФ СО РАН).

# Литература

- [1] L. Gremillet, D. Benisti, E. Lefebvre, and A. Bret. Linear and nonlinear development of oblique beam-plasma instabilities in the relativistic kinetic regime. *Physics of Plasmas*, 14(4):040704, April 2007.
- [2] A. Bret, L. Gremillet, D. Bénisti, and E. Lefebvre. Exact Relativistic Kinetic Theory of an Electron-Beam-Plasma System: Hierarchy of the Competing Modes in the System-Parameter Space. *Physical Review Letters*, 100(20):205008, May 2008.
- [3] A. Bret, L. Gremillet, and D. Bénisti. Exact relativistic kinetic theory of the full unstable spectrum of an electron-beam-plasma system with Maxwell-Jüttner distribution functions. *Physical Review E*, 81(3):036402, March 2010.
- [4] Brendan B. Godfrey, William R. Shanahan, and Lester E. Thode. Linear theory of a cold relativistic beam propagating along an external magnetic field. *Physics of Fluids*, 18(3):346, March 1975.
- [5] A. Bret, M. E. Dieckmann, and C. Deutsch. Oblique electromagnetic instabilities for a hot relativistic beam interacting with a hot and magnetized plasma. *Physics of Plasmas*, 13(8):082109, August 2006.
- [6] R. C. Tautz and R. Schlickeiser. Counterstreaming magnetized plasmas. I. Parallel wave propagation. *Physics of Plasmas*, 12(12):122901, December 2005.
- [7] J.R. Cary. Simple criteria for the absence of the beam-Weibel instability. *Physics of Fluids*, 24(10):1818, October 1981.
- [8] A. Bret, L. Gremillet, and M. E. Dieckmann. Multidimensional electron beam-plasma instabilities in the relativistic regime. *Physics of Plasmas*, 17(12):120501, December 2010.
- [9] I. V. Timofeev, K. V. Lotov, and A. V. Terekhov. Direct computation of the growth rate for the instability of a warm relativistic electron beam in a cold magnetized plasma. *Physics of Plasmas*, 16(6):063101, June 2009.