

КОЛЛЕКТИВНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЕ

Конкурс научных работ: 2016

А. В. Милованов, ведущий научный сотрудник ИКИ РАН

- 1 **Авторы** – [Carlevaro, N](#) (Carlevaro, Nakia); [Milovanov, AV](#) (Milovanov, Alexander V.); [Falessi, MV](#) (Falessi, Matteo V.); [Montani, G](#) (Montani, Giovanni); [Terzani, D](#) (Terzani, Davide); [Zonca, F](#) (Zonca, Fulvio).
- 2 **Название** – Mixed Diffusive-Convective Relaxation of a Warm Beam of Energetic Particles in Cold Plasma // Сложная диффузионно-конвективная релаксация широкого пучка энергичных частиц в холодной плазме
- 3 **Ссылки на публикацию** – ENTROPY (ISSN: 1099-4300; 5-year Impact factor: 1.780)
Volume 18, Issue 4, Article number: 143 (24 pp.) DOI: [10.3390/e18040143](https://doi.org/10.3390/e18040143). Published APRIL 2016. *Also available from:* <http://arxiv.org/abs/1512.07045>
- 4 **Общая формулировка научной проблемы и ее актуальность** – Работа посвящена одной из самых известных проблем в теории плазменной турбулентности – задаче о бесстолкновительной релаксации пучка энергичных частиц в холодной плазме. Обычный путь в исследовании данной проблемы состоит в применении теории слабой турбулентности (амплитуды волн считаются малыми – энергия волновых движений существенно меньше тепловой энергии частиц), с последующим обоснованием квазилинейного приближения (колебания и волны рассматриваются как линейные, а единственным учитываемым нелинейным эффектом является изменение функции распределения резонансных частиц в результате индуцированного излучения и поглощения волн). Как известно, квазилинейная релаксация пучка заряженных частиц в холодной плазме приводит к образованию "плато" на функции распределения за счет диффузии энергичных частиц в пространстве скоростей в

сторону более низких энергий (происходит диффузионное расплывание области, занятой энергичными частицами, вследствие резонансного взаимодействия с присутствующими в плазме волнами). Задача существенно усложняется, если по каким-либо причинам условия квазилинейной теории не могут быть в полной мере исполнены, например, необходимо учесть более сложные параметры нелинейного ограничения неустойчивостей. *В какой мере учет более сложных нелинейностей может повлиять на диффузионный характер релаксации?* При всей кажущейся простоте данный вопрос представляет собой крайне сложную проблему, значение которой выходит за рамки только физики плазмы. Фактически речь идет о том, является ли диффузия универсальным процессом релаксации, и если нет, то *каковы сценарии развития процессов релаксации недиффузионного типа?* Если релаксация недиффузионная, то наши предположения о случайных блужданиях частиц по резонансам могут оказаться слишком упрощенными, что наравне с чисто плазменными приложениями открывает новые перспективы для обсуждения природы хаоса в динамических системах. Таким образом, классическая задача о релаксации пучка энергичных частиц имеет несколько измерений, глубину которых невозможно оценить, не встав на путь отказа от квазилинейной теории, и не подвергнув пересмотру устоявшиеся представления о броуновской диффузии как о естественном процессе релаксации в системе волн и частиц.

- 5 **Конкретная решаемая в работе задача и ее значение** – Рассмотрена *задача о коллективной релаксации сложной системы*, состоящей из большого числа взаимодействующих пучков в холодной плазме, при этом дополнительно учитывается возможность обмена резонансными частицами между пространственно разнесенными пучками вследствие нелинейного уширения резонансов. Предполагается, что релаксация каждого отдельно взятого пучка может быть описана в рамках квазилинейной теории. Интерес представляет кинематика процессов коллективной релаксации с учетом нелинейного взаимодействия между пучками.
- 6 **Используемый подход, его новизна и оригинальность** – Задача решается стандартными методами статистической физики на основе уравнения Чепмена-Колмогорова.
- 7 **Полученные результаты и их значимость** – Построена система нелинейных динамических уравнений, обобщающая известные из классической литературы уравнения квазилинейной теории. В окончательном виде уравнение для неравновесной функции распределения приведено к уравнению Клейна-Крамерса в само-согласованном электрическом поле (последнее учитывает также поляризационные эффекты за счет инжекции пучка). В

уравнении для спектра колебаний использовано обобщенное значение инкремента неустойчивости, предворительно полученное (по известным из нелинейной термодинамики правилам) с учетом обменных реакций между пучками (см. разд. 3 работы). Показано, что в построенной системе уравнений возможны как процессы релаксации диффузионного типа (асимптотический результат), так и более сложные сценарии, из которых особо отметим лавинообразные процессы с образованием неустойчивого само-развивающегося фронта (при синфазной передаче резонансных частиц от пучка к пучку). В последнем случае протекание процессов релаксации напоминает возникновение ударной волны в пространстве скоростей (для не слишком больших времен – порядка нескольких периодов обращений частиц в потенциальной яме волны – данный процесс удастся смоделировать на основе уравнения Бюргерса), при этом с течением времени на фронте волны развиваются естественные дисперсионные явления вследствие диффузионного ухода резонансных частиц из области неустойчивости. Формирование неустойчивого релаксационного фронта в пространстве скоростей хорошо видно по результатам численного моделирования, представленным в разд. 4 настоящей работы, при этом читатель обратит внимание как на укрупнение формы огибающей системы пучков (со стороны более низких энергий), так и на появление характерного \log -нормального "хвоста" за фронтом релаксации (со стороны более высоких энергий). После прохождения фронта динамическая релаксация "хвоста" всегда диффузионная (в пределе больших времен). При более общем рассмотрении удастся показать, что процессы обмена в связанной системе пучков приводят к нелинейному усилению неустойчивостей в областях, где вторая производная огибающей системы пучков положительна, и к их демпфированию (вследствие сохранения числа частиц) в областях с отрицательной второй производной, что при естественном начальном распределении амплитуды пучков приводит сначала к укрупнению огибающей со стороны тепловых энергий, а затем к диффузионному расплыванию сформировавшегося неустойчивого фронта в результате квазилинейной релаксации. Полученные результаты охватывают широкий спектр приложений теории плазменной турбулентности: в частности, задача о релаксации сложных пучков с тонкой внутренней структурой возникает при описании процессов торможения высокоэнергетических частиц – продуктов термоядерных реакций в токамаках и стеллараторах. Из космической тематики выделим задачу о времени жизни частиц высоких энергий в радиационных поясах Земли (теория в данном случае предсказывает аномально малые времена – существенно меньше квазилинейных). Экспериментальное подтверждение (или опровержение) данного результата могло бы дать новый импульс исследованию

плазменных процессов в ближней магнитосфере Земли в периоды высокой солнечной активности.