

Заявка подается в номинации «лучшая научная работа или цикл работ молодого учёного».

1. Авторы (являющиеся сотрудниками ИКИ РАН)

А.А. Лужковский (инженер, 27 лет), Д.Р. Шкляр

2. Название

«Самосогласованное описание ленгмюровских волн в неоднородной плазме»

3. Ссылки на публикацию

A. A. Luzhkovskiy, D. R. Shklyar; Self-consistent description of Langmuir waves in an inhomogeneous plasma. *Phys. Plasmas* 1 July 2025; 32 (7): 072104. <https://doi.org/10.1063/5.0266890>

4. Общая формулировка научной проблемы и ее актуальность

Исследование динамики ленгмюровских волн в неоднородной плазме представляет собой фундаментальную проблему в физике лабораторной и космической плазмы. Изучение электростатических ленгмюровских волн в плазме без внешнего магнитного поля позволяет рассматривать систему уравнений с одной пространственной и одной скоростной координатой, что существенно упрощает проведение численных расчетов по сравнению с многомерными задачами. Актуальность проблемы также связана с известной аналогией между описанием резонансных частиц в поле ленгмюровской и свистовой волн. Система уравнений, характеризующая динамику резонансных электронов, имеет схожую математическую структуру в обоих случаях, что создает единую теоретическую основу для исследования нелинейного взаимодействия.

5. Конкретная решаемая в работе задача и ее значение

В работе решается задача Коши для системы уравнений, описывающей самосогласованную эволюцию поля ленгмюровских волн и функции распределения резонансных электронов. Предлагаемый подход позволяет получать устойчивые в математическом плане решения исходной системы в широком диапазоне физических условий: для случаев однородной и неоднородной плазмы, устойчивой и неустойчивой невозмущенной функции распределения, а также для одиночной волны и широкого спектра волн. Практическое значение работы заключается в создании эффективных подходов для численного моделирования нелинейного взаимодействия волн и частиц в неоднородной среде.

6. Используемый подход, его новизна и оригинальность

Вместо традиционного описания динамики электрического поля ленгмюровских волн через уравнение Пуассона в работе используется уравнение Ампера-Максвелла. Это позволяет рассматривать самосогласованную систему уравнений эволюционного типа, что наиболее адекватно для описания динамики физических процессов.

Важным и новым элементом нашего подхода является учет вклада нерезонансных электронов с помощью диэлектрической проницаемости, что позволяет решать кинетическое уравнение только для функции распределения резонансных электронов. Это существенно сокращает вычислительные затраты, поскольку исключает необходимость моделирования нерезонансных электронов, которые формируют наиболее плотную «холодную» компоненту, но не участвуют в процессах роста или затухания волн. В работе также представлен оригинальный подход, который позволяет задавать неоднородность плотности плазмы с помощью внешней потенциальной силы.

7. Полученные результаты и их значимость

Реализованный подход к самосогласованному моделированию динамики ленгмюровских волн воспроизводит известные физические явления. В частности, в случае одной волны малой амплитуды в однородной плазме наблюдается затухание Ландау с линейным инкрементом. Тогда как при рассмотрении случая одной волны с большой начальной амплитудой возникает фазовое перемешивание, которое приводит к затухающим во времени колебаниям амплитуды волнового электрического поля. Для широкого спектра волн с перекрывающимися резонансами в однородной плазме численный расчет показал формирование плато на профиле функции распределения, в согласии с предсказаниями квазилинейной теорией.

Применение разработанного метода также дало новые результаты, связанные с эволюцией ленгмюровских волн в различных физических условиях: в однородной и неоднородной плазме, а также при устойчивых и неустойчивых невозмущенных функциях распределения резонансных частиц. В частности, показано, что неоднородность плотности плазмы приводит к зависимости резонансной скорости от координаты. Это проявляется в образовании нелинейных структур в фазовом пространстве на разных скоростях и может сопровождаться возникновением характерной пространственной модуляции амплитуды волны. В случае, когда начальное возмущение электрического поля состоит из нескольких пространственных гармоник, изменение функции распределения распространяется на большую область фазовой плоскости и приобретает более сложную структуру по сравнению со случаем одной волны.