

ОТЗЫВ

официального оппонента Рыскина Никиты Михайловича
на диссертационную работу Китаева Ильи Николаевича «Нелинейные явления в электростатических плазменных волнах: обратные волны, потоки частиц, двухтоновые волны и самобиения», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
1.3.3 – «Теоретическая физика»

Исследование нелинейных волновых процессов в потоках заряженных частиц играет важную роль в разных областях физики, таких как радиофизика, электроника, физика плазмы, астрофизика и ряд других. Несмотря на стремительный прогресс вычислительной техники и программных средств, развитие общих методов теоретического исследования нелинейных волновых процессов по-прежнему является актуальной задачей, а нахождение точных аналитических решений нелинейных задач традиционно привлекает внимание широкого круга исследователей. Хотя, как справедливо отмечает автор диссертации, нелинейным волнам в плазме и плазмopodobных средах посвящено множество работ, ряд вопросов еще не получил должного освещения. Наличие дрейфовой скорости у одной из компонент плазмы приводит к нарушению симметрии и появлению новых нетривиальных эффектов. В частности, становится возможным появление боковых волн, распространяющихся под углом к направлению дрейфовой скорости, а также обратных волн. Интригующими представляются вопросы о возможности переноса частиц нелинейными электростатическими волнами и о проявлении квантовых эффектов при распространении плазменных волн. Таким образом, тема диссертации И.Н. Китаева, которая направлена на ликвидацию указанных пробелов, представляется весьма актуальной и интересной.

В диссертации изучаются так называемые электростатические (ленгмюровские и ионно-звуковые) волны в плазме без магнитного поля. Работа содержит целый ряд новых содержательных научных результатов. В Главе 1 последовательно развивается теория боковых электростатических

волн. Рассматриваются три типа волн: ленгмюровские волны в нейтрализованном электронном потоке, ионно-звуковые волны в электронно-ионной плазме с движущимися ионами, а также пыле-акустические волны в плазме с однонаправленно движущимися пылинками. Все задачи решаются по единому методическому плану. Вначале автор получает и анализирует дисперсионные соотношения для линейных волн, что позволяет найти параметры, при которых существуют боковые волны с различным углом сноса, а также обратные волны, у которых групповая и фазовая скорости имеют противоположную направленность. Далее, с учетом этих результатов, исследуются решения в виде стационарных нелинейных волн. В итоге описание рассматриваемых систем сводится к уравнению консервативного нелинейного осциллятора с различным видом потенциальной функции (так называемый псевдопотенциал Сагдеева). Анализ колебаний этого осциллятора позволяет установить форму волн, распространяющихся под различными углами относительно скорости потока частиц.

В Главе 2 исследуется вопрос о том, имеет ли место перенос частиц при распространении волн в неподвижной плазме. Здесь рассмотрена интересная задача об ионно-звуковых волнах в плазме с двумя сортами ионов. В этом случае дисперсионная характеристика имеет две ветви — быструю и медленную. Анализ показал, что для быстрой волны потоки ионов обоих сортов сонаправлены, а для медленной направлены в противоположные стороны. Этот факт в перспективе открывает возможность создания нового метода сепарации частиц. В еще большей степени данный эффект выражен в случае так называемых сверхнелинейных волн, для которых псевдопотенциал имеет несколько локальных минимумов. Также проанализировано направление потока частиц в пылеакустических волнах. Установлено, что для периодических нелинейных волн этот поток направлен против распространения волны, тогда как в случае солитонов, скорость которых превышает скорость пылевого звука, — в направлении распространения волны.

Третья, заключительная глава диссертации посвящена волнам в квантовой вырожденной плазме. Основной вопрос, естественно, заключается

в том, привносит ли квантовость какие-либо принципиально новые особенности. В диссертации развита теория ленгмюровских волн в холодной и теплой квантовой плазме, характеризующейся весьма специфическими уравнениями состояния. Получены дисперсионные соотношения, из которых следует, что по мере увеличения частоты характер дисперсии меняется с нормального на аномальный. В результате две волны, имеющие различные частоты, могут распространяться с одинаковой фазовой скоростью. При анализе стационарных нелинейных волн получены сложные квазипериодические профили — двухтоновые волны. В частности, если скорость распространения стационарной волны слегка превышает минимальную, частоты двух линейных волн, имеющих одинаковую фазовую скорость, близки друг к другу, так что образующаяся стационарная волна носит характер биений.

Аналогичные результаты получены и для ионно-звуковых волн. Здесь обнаружена интересная особенность: для сверхзвуковых волн найдены решения, представляющие собой своего рода суперпозицию периодической волны и солитона.

Наконец, рассмотрена квантовая двухкомпонентная электронно-дырочная плазма, где дисперсионная характеристика имеет две ветви — плазмонную и фононную. Показано, что для плазмонной ветви также возможно возникновение двухтоновых стационарных волн.

Таким образом, в диссертации обнаружен целый ряд новых, нетривиальных эффектов, и совокупность представленных результатов можно считать серьезным шагом в развитии теории нелинейных электростатических волн в плазме.

По тексту диссертации можно сделать ряд замечаний, основные из которых сводятся к следующему:

- 1) Анализируя решения в виде стационарных нелинейных волн, автор, как правило, сводит уравнения, описывающие ту или иную задачу, к уравнению консервативного нелинейного осциллятора. В диссертации приводятся графики для потенциальных функций и численные решения, иллюстрирующие профили волн в различных ситуациях. Если бы в

диссертации были приведены и обсуждены фазовые портреты осцилляторов, это бы сделало анализ характера стационарных волн более наглядным. Утверждения типа «эти профили неразличимы от профилей обычных волн» представляются не вполне удачными, лучше бы было сказать, что они качественно аналогичны.

2) В еще большей степени предыдущее замечание относится к материалу, представленному в Главе 3. Здесь для описания стационарных волн получаются уравнения четвертого порядка, т.е. динамические системы с двумя степенями свободы. В принципе, не вызывает удивления, что они имеют квазипериодические решения. Если бы автор проанализировал их с точки зрения теории динамических систем, это помогло бы лучше представить структуру траекторий в фазовом пространстве. Представляется, что в системе с двумя степенями свободы должны быть два типа нормальных колебаний. Подбором начальных условий можно регулировать их амплитуды и получать тот или иной тип решений.

3) В диссертации основное внимание уделяется решениям в виде стационарных нелинейных волн. Эти решения являются хотя и точными, но частными. Сам по себе их анализ не дает ответа ни на вопрос об устойчивости полученных решений, ни о том, насколько сложно их реализовать (т.е. будут ли начальные возмущения того или иного вида с течением времени эволюционировать в эти стационарные волны, насколько специфическими эти возмущения должны быть, и т.д.). Хорошим способом ответить на эти вопросы было бы численное моделирование (на основе используемых в диссертации гидродинамических моделей плазмы или же с помощью современных PIC-кодов). К сожалению, диссертация не содержит подобных результатов.

4) Понятия фазовой и групповой скорости, строго говоря, определены для линейных волн: фазовая — для гармонической волны, групповая — для волнового пакета с узким спектром. Перенос этих понятий на случай стационарных нелинейных волн, на мой взгляд, требует дополнительного обсуждения. Автор предлагает считать обратной волну, скорость распространения которой направлена навстречу потоку частиц. В то же

время, в главе 2 показано, что, например, в ионно-звуковой волне возникает встречный поток частиц. Значит ли это, что она тоже является обратной?

5) Желательно было бы видеть обсуждение возможностей экспериментального наблюдения обнаруженных эффектов. В некоторых случаях, например, на стр. 44, автор даже упоминает о подобном эксперименте, однако, на мой взгляд, этот вопрос заслуживает более подробного обсуждения. В основном все результаты представлены в нормированных безразмерных переменных, тогда как было бы желательно привести примеры с конкретными значениями параметров.

6) Трудно понять фразу «поскольку составляющие волны синхронны друг с другом, то они должны взаимодействовать. В данной работе мы рассматривали решение в виде стационарной волны, и взаимодействие не учитывалось» (стр. 97). Возможно автор имел в виду, что при синхронизме двух волн должна быть перекачка энергии между ними, что приводит к биениям, однако эти биения могут быть нестационарными (см. выше замечание 3).

Разумеется, отмеченные недостатки не снижают общей положительной оценки диссертации, которая представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком уровне. Представленный в ней материал представляет несомненный интерес для широкого круга исследователей, занимающихся изучением нелинейных волновых процессов в плазме и других системах заряженных частиц. Самостоятельность и оригинальность исследования, включая личный вклад автора, не вызывают сомнений. Результаты диссертации обладают научной новизной и практической значимостью, основные выводы и положения, выносимые на защиту, представляются обоснованными и достоверными, а содержание диссертации соответствует специальности 1.3.3—«Теоретическая физика». Автореферат достаточно полно и адекватно отражает содержание диссертации. Результаты диссертации широко опубликованы, включая 14 статей в авторитетных российских и зарубежных научных изданиях, таких как *Physics of Plasmas*, *IEEE Transactions on Plasma Science*, *Физика плазмы* и

др. Также материалы диссертации прошли апробацию на ряде научных конференций.

Считаю, что диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу и полностью удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г.), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Китаев Илья Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – «Теоретическая физика».

Официальный оппонент:

Рыскин Никита Михайлович 

д.ф.-м.н. (01.04.03 и 01.04.04), профессор, главный научный сотрудник лаборатории вакуумной микро- и наноэлектроники (СФ-1), Саратовский филиал ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

410019, г. Саратов, ул. Зеленая, 38.

e-mail: RyskinNM@gmail.com

Тел. 8(8452)391225

« 12 » февраля 2024 г.

Подпись Рыскина Н.М. заверяю:

Заместитель директора по научной работе СФ ИРЭ РАН,

к.ф.-м.н.



 Д.В. Фатеев