

533.9.01

ВСЕСОЮЗНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ТЕОРИИ ПЛАЗМЫ**(Киев, 19—23 октября 1971 г.)**

Исследования по физике плазмы занимают заметное место в современной науке. Эти исследования тесно связаны с решением таких важнейших научно-технических проблем современности, как осуществление управляемого термоядерного синтеза, разработка магнитогидродинамического способа преобразования тепловой энергии в электрическую и освоение космоса.

¹/₂ 11 УФН, т. 107, вып. 1

Важность задач, стоящих перед физикой плазмы, и огромное многообразие явлений, изучаемых этой наукой, предопределили интенсивное развитие физики плазмы в последние два десятилетия. Из небольшого раздела физики, занимавшегося изучением узкого круга явлений, физика плазмы превратилась в самостоятельное широкое направление, которое в настоящее время интенсивно вторгается и проникает в другие области физики. Взаимосвязь и взаимопроникновение между физикой плазмы и смежными разделами физики наиболее полно проявляются в области теории, так как в их основе лежит общность используемых методов и внутреннее единство фундаментальных физических законов. Очевидна роль, которую должны играть в этих условиях представительные встречи ведущих ученых, работающих в области фундаментальных вопросов теории плазмы. Между тем исследования по физике плазмы ведутся столь широким фронтом, что за последние два десятилетия не удавалось собрать вместе физиков-теоретиков, занимающихся всеми аспектами физики плазмы. Всесоюзная конференция по теории плазмы явилась первой попыткой такой встречи не только в нашей стране, но и в мировой практике.

Всесоюзная конференция по теории плазмы была проведена в Киеве с 19 по 23 октября 1971 г. Конференцию проводил Институт теоретической физики АН УССР совместно с Научным советом по проблеме «Физика плазмы» АН СССР. Организационный комитет конференции возглавлял Н. Н. Боголюбов.

Конференция вызвала огромный интерес среди физиков не только в Советском Союзе, но и за рубежом. В работе конференции приняли участие свыше 250 активно работающих физиков-теоретиков из различных физических центров Советского Союза (Москвы, Ленинграда, Киева, Харькова, Новосибирска, Горького, Тбилиси). Среди них — Н. Н. Боголюбов, Б. Б. Кадомцев, М. А. Леонтович, Р. З. Сагдеев, А. А. Самарский, А. И. Ахиезер, А. С. Давыдов, С. И. Цекар, А. А. Смирнов, М. С. Рабинович, А. А. Рухадзе, В. П. Силин и многие другие. В работе конференции приняли также участие 50 иностранных ученых из 14 стран, в том числе: из США — 12 чел., ГДР — 9 чел., ФРГ — 8 чел., Франции — 5 чел., Чехословакии — 3 чел., Швеции — 3 чел., Нидерландов — 2 чел., Японии — 2 чел., Англии, Бельгии, Болгарии, Венгрии, АРЕ и Уругвая — по 1 чел. Среди зарубежных ученых в работе конференции участвовали известные физики: Г. Драйсер, М. Гликсман, Г. Грэд, М. Розенблют, А. Саймон, У. Томсон, Б. Фрид (США), Р. Балеску (Бельгия), Д. Тер-Хаар (Англия), Х. Вильгельмсон (Швеция), Г. Кельб (ГДР), В. Кроль (ФРГ), Г. Лаваль, Э. Каноббио (Франция), Й. Ишикава, С. Ишимару (Япония) и другие.

В соответствии с программой конференция была открыта 19 октября 1971 г. Н. Н. Боголюбовым. С приветственным словом к присутствующим обратился председатель Киевского горисполкома В. А. Гусев, который отметил, в частности, значительный вклад, внесенный в теорию плазмы украинскими физиками-теоретиками, и выразил уверенность в том, что конференция явится ярким событием в научной жизни столицы Украины. С приветствиями выступили также Б. Б. Кадомцев и М. Розенблют (США). Н. Н. Боголюбов во вступительном слове дал глубокий анализ современного состояния теории плазмы, охарактеризовал значение конференции и сформулировал стоящие перед ней задачи.

На девяти пленарных заседаниях конференции были заслушаны 19 обзорных докладов, 16 раппортерских докладов (на основе 115 представленных оригинальных сообщений) и ограниченное количество (23) наиболее интересных оригинальных сообщений. Были обсуждены следующие проблемы: общие вопросы статистической теории; равновесие и процессы переноса в плазме; колебания, излучение и устойчивость плазмы; нелинейные процессы в плазме, волны конечной амплитуды и ударные волны; турбулентность и стохастические процессы в плазме; математическое моделирование и численные методы в теории плазмы; электромагнитные явления в плазموподобных средах и общие вопросы теории управляемого термоядерного синтеза. Был организован также ряд семинаров по некоторым актуальным вопросам теории плазмы.

Общие вопросы статистической теории. Важнейшая проблема статистической теории, стоящая перед физиками еще со времен Больцмана, состоит в том, как согласовать необратимость кинетических уравнений с обратимостью уравнений механики. Фундаментальный вклад в решение этой проблемы внес Н. Н. Боголюбов, предложивший общий метод построения кинетических уравнений из уравнения Лиувилля. Метод Боголюбова основывается на введении последовательности многочастичных функций распределения, для которых выводятся цепочка зацепляющихся уравнений. При этом кинетическое уравнение для одночастичной функции распределения может быть получено путем обрыва указанной цепочки. Такой обрыв возможен лишь при наличии малого параметра в теории или же в результате каких-либо специальных предположений.

В докладе Р. Балеску, представленном на конференцию, указан способ преодоления этой трудности. В самом общем виде показано, что при выполнении определенных условий (предполагающих существование термодинамического предела и зависящих от характера взаимодействия между частицами) последовательность функций

распределения может быть разбита на две части, одна из которых подчиняется замкнутому уравнению эволюции — аналогу кинетического уравнения, а вторая претерпевает процесс фазового перемешивания, который «стирает» эту составляющую по мере того, как система приближается к равновесию. Требование инвариантности относительно переноса во времени обеспечивает единственность такого разбиения. Кинетическая составляющая в пренебрежении взаимодействием между частицами соответствует полному отсутствию корреляций. Так как физические величины определяются только кинетической составляющей последовательности функций распределения, полученное кинетическое уравнение, хотя и не описывает всей эволюции системы, тем не менее дает полное описание макроскопических свойств системы и объясняет необратимый переход системы в состояние равновесия.

Кинетическое уравнение Балеску в частных случаях переходит в известные кинетические уравнения: кинетическое уравнение Больцмана для идеального газа с учетом парных соударений, кинетическое уравнение Ландау для плазмы, учитывающее далекие кулоновские соударения, и кинетическое уравнение Балеску — Ленарда, отличающееся от предыдущего случая учетом поляризации плазмы. В перечисленных кинетических подходах взаимодействие между частицами учитывается только при рассмотрении установления состояния равновесия, влиянием взаимодействия на термодинамические функции полностью пренебрегается. В докладе Ю. Л. Климонтовича рассмотрены обобщения указанных кинетических подходов, связанные с учетом в интегралах столкновений пространственной неоднородности и эффектов запаздывания. Учет пространственной неоднородности и эффектов запаздывания в интегралах столкновений означает учет влияния взаимодействия между частицами на термодинамические функции и уравнение состояния, т. е. фактически сводится к учету неидеальности системы.

Совершенно иной подход к описанию систем заряженных частиц, основанный на обращении флуктуационно-диссипативного соотношения, изложен в докладе А. Г. Ситенко и И. П. Якименко. Флуктуационно-диссипативное соотношение для равновесных систем устанавливает связь между флуктуациями и диссипативными свойствами. Поэтому в случае равновесной плазмы задание диэлектрической проницаемости полностью определяет флуктуации. Наоборот, зная флуктуации не взаимодействующих токов, путем обращения флуктуационно-диссипативного соотношения можно определить тензор диэлектрической проницаемости. Корреляционная функция не взаимодействующих токов определяется вероятностью перехода, нахождение которой сводится к решению дифференциального уравнения с начальными и граничными условиями. Такой подход позволяет полностью описать электродинамические свойства равновесной плазмы без использования кинетического уравнения, что оказывается весьма существенным при рассмотрении ограниченных плазменных систем и в ряде других случаев.

В случае неравновесной плазмы (находящейся, однако, в стационарном устойчивом состоянии) для описания флуктуаций недостаточно задания тензора диэлектрической проницаемости: необходимо задание еще корреляционной функции для флуктуаций тока не взаимодействующих частиц. В работах А. Г. Ситенко на основе обобщения флуктуационно-диссипативного соотношения на случай неравновесных систем развит метод, позволяющий полностью описывать электродинамические свойства таких систем. Этот метод оказался весьма эффективным при рассмотрении электродинамических свойств ограниченной неравновесной плазмы, также при исследовании в ней различных нелинейных электромагнитных процессов.

Понятия и методы, возникшие первоначально в теории плазмы, в дальнейшем нашли широкое применение и при изучении свойств других статистических систем. На конференции был заслушан ряд докладов, посвященных рассмотрению свойств различных классических и квантовых систем заряженных частиц. В докладе И. Р. Юхновского изложена статистическая теория равновесной системы заряженных частиц, основанная на использовании метода коллективных переменных. Равновесная статистическая теория может считаться построенной, если определена свободная энергия системы или последовательность функций распределения для одной, двух и т. д. частиц. В методе коллективных переменных, первоначально введенном Бомом и Пайнсом для описания плазменных колебаний, кулоновское взаимодействие рассматривается в пространстве коллективных переменных, а короткодействующие взаимодействия — в пространстве координат отдельных частиц. Исследованы различные системы заряженных частиц (электронов и ионов в электролитах и ионных кристаллах) с мультимольной структурой. Свободная энергия представлена в виде суммы энергии идеального газа, дебаевской энергии для заряженных частиц и вирального ряда, отдельные слагаемые которого выражаются через неприводимые групповые интегралы. Показано, что учет мультимольного экранирования существенно усиливает устойчивость. Исследовано поведение свободной энергии и бинарной функции распределения в различных областях значений характерных параметров системы. Кроме классических систем исследованы также свойства статистически вырожденных систем заряженных частиц.

В докладе И. П. Базарова обсуждается вопрос о применимости кинетического уравнения с самосогласованным полем для описания динамики кристаллической

решетки. Показано, что определяемый таким образом спектр коллективных колебаний совпадает с борновским спектром колебаний кристаллической решетки в виде акустической и оптической ветвей. Хотя равновесное уравнение самосогласованного поля описывает кристалл без учета корреляции в движении частиц, в классической области термодинамические величины оказываются не зависящими от этого учета. На основании предложенного метода построена теория ангармонических эффектов в кристаллах, определена кривая предельной устойчивости кристалла и построена теория полиморфных превращений в кристаллах.

В докладе Н. Н. Боголюбова (мл.) рассмотрен вопрос об определении квазисредних для некоторых модельных систем. Показано, что квазисредние можно вычислять, не прибегая к дополнению гамильтониана членами с источниками, однако при этом необходимо использовать более сложную мажорационную технику. Вопросам применения метода функций Грина к описанию систем многих частиц посвящен доклад Б. И. Садовникова. Основываясь на неравенстве Боголюбова для фурье-образов статистической функции Грина, показано, что в системе с кулоновским взаимодействием флуктуации плотности ограничены в пространстве любой размерности. Исследованы коллективные возбуждения в системах многих частиц и показано, что квазичастичные возбуждения при наличии коллективных возбуждений в системе исчезают, если температура отлична от нуля. Обсуждена связь уравнений обобщенного метода самосогласованного поля с двухвременными статистическими функциями Грина.

Равновесие и процессы переноса в плазме. Одной из основных проблем, от решения которых зависит возможность осуществления управляемого термоядерного синтеза, является создание установок, способных достаточно долго удерживать плазму. Этим объясняется то большое внимание, которое уделяется в настоящее время развитию теории процессов переноса в плазме, в частности изучению диффузии. Поскольку в настоящее время наилучшие результаты (по параметру $n\tau$, где n — концентрация и τ — время удержания плазмы) достигнуты на установках типа «токамак», то естественно, что наибольшее число теоретических работ посвящено изучению диффузии и теплопроводности плазмы именно в таких установках.

В докладе А. А. Галева изложена теория процессов переноса в тороидальных системах, получившая название неоклассической. Эта теория основывается на рассмотрении движения квазичастиц, вводимых в результате усреднения по быстрому квазипериодическому движению в системе. В случае прямолинейных силовых линий магнитного поля усреднение производится по быстрому ларморовскому вращению и в качестве квазичастиц рассматриваются ларморовские кружки. В тороидальных системах с аксиально-симметричным магнитным полем помимо усреднения по ларморовскому вращению необходимо дополнительное усреднение, обусловленное наличием частиц, запертых между локальными магнитными пробками и совершающих между ними быстрые колебания. С этим усреднением связано введение новой квазичастицы — «банана», характеризующей траекторией, описываемой ларморовским кружком в процессе дрейфового движения. Постоянство траекторий, совершаемых частицей в первом и во втором случаях, связано с сохранением соответственно магнитного момента и продольного адиабатического инварианта. Нарушение сохранения инвариантов вследствие соударений приводит к перемещению всей траектории на расстояние порядка ее размера поперек магнитных поверхностей. Простая оценка на основе соображений о случайном характере перемещения показывает, что это должно приводить к увеличению коэффициентов переноса. В результате такого неоклассического расчета оказывается, что коэффициент диффузии явно зависит от частоты электрон-электронных соударений. В области малых частот коэффициент диффузии быстро растет с ростом частоты соударений (банановый режим), достигая насыщения при характерной частоте. При очень больших частотах коэффициент диффузии принимает предельное гидродинамическое значение. Результаты неоклассической теории хорошо согласуются с последними экспериментальными измерениями на установках «стеллатор» и «токамак». Серьезным подтверждением правильности неоклассической теории могут служить изысканные измерения потерь энергии по ионному каналу на установке «токамак», проведенные Л. А. Арцимовичем с сотрудниками.

Критический разбор работ по классической диффузии в плазме (в том числе и в тороидальных системах) проведен в обзорном докладе Г. Грэдэ. В случае малой длины свободного пробега локальные коэффициенты переноса могут быть определены в каждой точке пространства. Однако при конечной длине свободного пробега коэффициенты переноса могут быть определены только после усреднения по магнитным поверхностям. Поэтому в общем случае процессы переноса носят нелокальный характер и существенно зависят от различных диссипативных процессов (особенно при учете непотенциальности электрического поля), конкретной геометрии системы и характера нелинейности процессов. Стандартные методы расчета оказываются неприменимыми, необходимо построение новых методов. Проведенные численные расчеты показывают, что при стандартных методах поправки могут иметь порядок основных величин.

Интересные результаты при изучении динамики двумерной плазмы получены Дж. Тейлором и У. Томсоном. Статистические свойства такой плазмы исследованы в приближении модели ведущего центра. Определены корреляционная функция для скоростей и коэффициент диффузии. Показано, что для этой модели всегда имеет место аномальная ($1/B$) зависимость диффузии от магнитного поля. Помимо зависимости $1/B$ плазма в приближении модели ведущего центра обладает другими необычными свойствами. Хотя единственным стационарным состоянием является состояние теплового равновесия, система не обнаруживает тенденции релаксировать к нему; вместо этого она осциллирует около равновесного состояния.

Различные аспекты проблемы равновесия, удержания и нагрева плазмы в тороидальных системах рассмотрены в ряде докладов. Неоклассическая теория магнитного нагрева плазмы в тороидальной системе развита Э. Каном и др. Задаче удержания плазмы в тороидальной системе посвящена работа Р. Дори и др. Влияние переменного электромагнитного поля на диффузию в установках типа «токамак» исследовано А. Самейном. Показано, что с помощью наложения низкочастотного магнитного поля можно компенсировать потерю частиц, обусловленную неоклассической диффузией. Оригинальное определение среднего времени диффузного движения зарядов в плазме предложено в работе А. А. Гурья. Аномальная проводимость плазмы, связанная с возникновением неоднородности (например, вследствие развития ионизационной неустойчивости в низкотемпературной плазме), исследована Ю. А. Дрейзиным и А. М. Дыхне. Движение плазмы в гофрированном магнитном поле с периодом гофрировки, малым по сравнению с длиной свободного пробега частиц, рассмотрено Г. И. Будкером, В. В. Мирновым и Д. Д. Рютовым. Если характерные расстояния, на которых существенно изменяются параметры плазмы, значительно превышают длину свободного пробега, то продольное движение плазмы может быть описано системой уравнений для моментов функций распределения. Показано, что гофрировка магнитного поля приводит к существенному уменьшению теплопроводности в поперечном направлении и к уменьшению скорости расширения плазмы.

Колебания, излучение и устойчивость плазмы. В теории плазмы важное место занимают исследования колебаний, излучения и различных неустойчивостей. Современное состояние теории устойчивости плазмы детально проанализировано в докладе А. Б. Михайловского. Основная тенденция в развитии теории устойчивости заключается в том, что в настоящее время теоретики стали более тщательно анализировать закон сохранения энергии, тогда как раньше основным был анализ закона сохранения импульса. Фактически это означает переименование интересов теоретиков с одного класса неустойчивостей, которые условно можно назвать силовыми, на другой класс неустойчивостей — тепловые. К силовым неустойчивостям можно отнести пучковую неустойчивость, дрейфовую неустойчивость и др., дисперсионные уравнения для которых можно получить без использования уравнений баланса тепла. К тепловым неустойчивостям можно отнести: акустическую неустойчивость слабоионизованной плазмы, обусловленную передачей нейтральными атомами энергии, приобретаемой электронами при Джоулевым нагреве; неустойчивость энтропийных волн, связанную с дрейфово-конвективным переносом тепла в неоднородно нагретой плазме, и др. В то время как силовые неустойчивости играют определяющую роль в случае бесстолкновительной плазмы низкого давления в однородном магнитном поле, тепловые эффекты оказываются существенными в плазме с конечным β или при наличии магнитного поля с искривленными силовыми линиями, или же в условиях частых столкновений между частицами. Докладчик свел в стройную систему все известные в настоящее время типы неустойчивостей как в однородной, так и в неоднородной плазме и дал им исчерпывающую характеристику. Экспериментально подтверждено реальное существование не только пучковой, желобковой и токово-конвективной неустойчивостей, но и многих других (электронно-циклотронных, электромагнитных, токовых, конусных и т. п.) неустойчивостей, которые обсуждаются в докладе. Неустойчивости проявляются не только в лабораторной плазме, но играют существенную роль и в процессах, происходящих в околоземной и космической плазме.

Развитию нелинейной теории желобковой неустойчивости посвящено сообщение А. Саймона и К. Венга. В плазменных ловушках с магнитными пробками существует критическое значение плотности, при превышении которого система оказывается неустойчивой. Показано, что учет нелинейного взаимодействия волн при значениях плотности выше критического приводит к возникновению неустойчивости взрывного типа.

Большой интерес вызвали доклады Д. Д. Рютова и А. А. Рухадзе по проблеме взаимодействия релятивистских и ультрарелятивистских пучков с плазмой. Этот интерес в значительной степени обусловлен ведущимися в настоящее время поисками принципиально новых путей осуществления управляемого термоядерного синтеза. А. А. Рухадзе привел сравнительный анализ эффективности и экономичности различных проектов термоядерных реакторов («токамаки», лазерные установки, высокоинтенсивные импульсные устройства) и привел весьма убедительные аргументы в пользу

термоядерных установок, основанных на использовании релятивистских электронных пучков для нагрева плазмы. Детально проведен теоретический анализ ряда вопросов, возникающих при изучении взаимодействия релятивистских электронных пучков с плазмой: условия инжекции релятивистского электронного пучка в плазму, тормозное излучение, возбуждение электромагнитных волн в плазме, влияние конечных размеров системы, учет температуры пучка и т. д. Обсужден вопрос о возможности использования релятивистских электронных пучков в качестве источника мощного монохроматического электромагнитного излучения для зондирования плазмы в верхних слоях ионосферы Земли.

Различные аспекты теории излучения в плазме рассмотрены в ряде докладов, представленных на конференцию. В сообщении Ф. Г р а ф ф а рассмотрены особенности поля излучения, создаваемого источником в неоднородной плазме. Анизотропия в излучении поперечных волн, связанная с неоднородностью плазмы, рассмотрена Н. С. Е р о х и н ы м и С. С. М о и с е е в ы м. Детально исследовано переходное излучение равномерно движущегося заряда в неоднородной изотропной, а также магнитоактивной плазме. Показано, что излучение сильно зависит от угла между градиентом плотности и скоростью заряда. Резонансное излучение плазмы, движущейся в узкощелевом периодическом волноводе, рассмотрено В. П. Ш е с т о п а л о в ы м и др. Спектр излучения, захваченного в плазменной полости, исследован Б. А. Т р у б н и к о в ы м. Интересный метод исследования линейной трансформации волн в неоднородной плазме предложен Т. А. Д а в ы д о в о й. Этот метод основан на введении матрицы рассеяния, связывающей амплитуды волн до и после взаимодействия. Линейная трансформация электромагнитных волн в тороидальных системах рассмотрена в работе А. Д. П и л и п и В. Н. Ф е д о р о в а.

Рассмотрению волновых процессов в неоднородной и ограниченной плазме были посвящены доклады С. С. М о и с е е в а и И. П. Я к и м е н к о. В настоящее время наиболее полно развита теория слабонеоднородной неограниченной плазмы и ограниченной однородной плазмы. В докладе И. П. Я к и м е н к о приведены интересные результаты по теории распространения, дифракции и рассеяния волн в ограниченной плазме с учетом пространственной дисперсии. Особенно следует отметить развитую автором последовательную теорию электромагнитных флуктуаций и рассеяния волн в ограниченной плазме.

Н е л и н е й н ы е п р о ц е с с ы в п л а з м е, в о л н ы к о н е ч н о й а м п л и т у д ы и у д а р н ы е в о л н ы. Значительные успехи достигнуты в последнее время в исследовании нелинейных процессов в плазме. Роль нелинейных процессов в плазме определяется тем, что без их учета фактически невозможно построение последовательной теории устойчивости плазмы, теории процессов переноса и т. д. Действительно, неустойчивости, предсказываемые на основе линейной теории, свидетельствуют об ограниченном характере такой теории, так как экспоненциальный рост возмущения фактически означает неприменимость линейного приближения.

Широкий круг вопросов, связанных с современным состоянием теории нелинейных процессов в плазме, нашел отражение в докладе В. Н. О р а е в с к о г о, в котором детально рассмотрены распространение и устойчивость волн конечной амплитуды в плазме. В отличие от обычных газов и жидкостей, в плазме могут существовать установившиеся волны конечной амплитуды при полном пренебрежении диссипаций. Это связано с тем, что ограничение роста крутизны переднего фронта волны в плазме возможно за счет отклонения закона дисперсии от линейного. Поэтому даже в разреженной плазме, в которой можно полностью пренебречь столкновениями, могут существовать установившиеся волны. Учет диссипации приводит к возникновению затухания колебаний или же к образованию ударных волн. Если диссипация носит коллективный характер, то соответствующие ударные волны являются бесстолкновительными. Устойчивость установившихся волн определяется нелинейными взаимодействиями. Эффекты самовоздействия волн — самофокусировка и самосжатие — могут изменять только динамику волны и не приводят к возбуждению других волн. Неустойчивость установившихся волн обусловлена возбуждением новых типов волн и колебаний, связанных распадными условиями с исходной волной. Взаимодействие волн может приводить не только к распадным неустойчивостям, но и к частотному сдвигу, который в свою очередь может приводить к развитию аperiodической неустойчивости. Изучение неустойчивостей волн конечной амплитуды представляет и практический интерес, поскольку указанные неустойчивости могут быть использованы в качестве эффективного средства нагрева плазмы.

В работе А. Б е р т о м ь е, Г. Л а в а л я и Р. П е л а обсуждается возможность использования нелинейных эффектов для стабилизации неустойчивых колебаний в плазме. Показано, что в низшем порядке по резонансному взаимодействию мод затухающие волны не могут стабилизировать неустойчивость, если только две затухающие волны не сливаются в гармонику неустойчивой волны. Однако учет членов более высокого порядка приводит к стабилизации. Проблема взрывных неустойчивостей, связанных с электронными и ионными пучками в ионизированных газах, рассмотрена в докла-

де Х. Вильгельмсона. Проведены численные расчеты коэффициентов, определяющих интенсивность взаимодействия, а также этапы развития неустойчивостей во времени.

В докладе Л. М. Горбунова изложены результаты ряда работ по параметрическим и распадным неустойчивостям в плазме. Значительный интерес представляют работы В. В. Пустовалова и В. П. Силкина по развитию параметрической неустойчивости в плазме и Л. М. Горбунова по распадной неустойчивости с учетом выноса волн. В докладе Н. Л. Цинцадзе представлены работы по изучению влияния сильных высокочастотных полей на характер собственных колебаний в плазме и ее устойчивость. Нелинейные волны в многокомпонентной плазме при наличии магнитного поля рассмотрены А. Д. Патаей. Широкий круг вопросов по нелинейной теории резонансного взаимодействия частиц и волн в плазме (пучково-плазменные системы, распространение сильных электромагнитных волн в плазме, гидродинамические течения плазмы с анизотропным давлением, нелинейное затухание Ландау в проводниках и др.) рассмотрен в докладе В. Д. Шапиро.

Турбулентность и стохастические процессы в плазме. Проблема турбулентности занимает центральное место в теории нелинейных и стохастических процессов в плазме. В настоящее время может считаться достаточно разработанной только теория слабой турбулентности. Исчерпывающий обзор теории слабой турбулентности и связанного с этой теорией круга идей был дан в докладе Б. Б. Кадомцева.

Под турбулентностью в плазме, так же как и в обычной жидкости, подразумевают состояние, связанное с возбуждением многих коллективных степеней свободы до уровня, значительно выше теплового. В предположении слабого взаимодействия между волнами для описания турбулентности используется теория возмущений, основанная на разложении решения нелинейных уравнений по степеням амплитуд волн с последующим усреднением по случайным фазам и выделением секулярных членов. Слаботурбулентное состояние соответствует совокупности большого числа волн, удовлетворяющих в низшем приближении линейной системе уравнений.

Взаимодействие резонансных частиц с волнами учитывается в так называемом квазилинейном приближении. Уравнения квазилинейного приближения описывают эволюцию во времени интенсивности колебаний и функции распределения резонансных частиц. В следующем приближении учитываются трехволновые процессы распада и слияния волн и процессы индуцированного рассеяния волн на частицах. В этом случае в плазме возможна передача энергии по спектру, а именно, энергия волн определенного типа, расщепляемых из-за неустойчивости, может перекачиваться вследствие нелинейного взаимодействия волн в области затухания. В отличие от турбулентности в обычной жидкости, где поток энергии направлен от больших масштабов к меньшим, в плазме возможны потоки и в противоположном направлении.

Картина турбулентности значительно усложняется при дальнейшем учете взаимодействия волн и частиц. Учет такого взаимодействия приводит к возможности образования сгустков частиц, скоррелированных в фазовом пространстве и проявляющих себя как отдельные макрочастицы. Последующее размешивание частиц в таких сгустках приводит к движению в фазовом пространстве, сходному с течением несжимаемой жидкости. Размеры корреляционных областей уменьшаются со временем, и это приводит к потоку энергии по спектру в область больших волновых чисел. При этом, однако, возникают колебания частиц, запертых в потенциале поля волн, с частотами, пропорциональными дробной степени амплитуды. Появление дробных степеней означает отсутствие аналитичности, поэтому уже при умеренной турбулентности пользоваться разложением по амплитудам волн нельзя. С этим обстоятельством связана основная трудность построения последовательной теории сильной турбулентности.

Интересная попытка построения теории турбулентности на основе цепочки уравнений Боголюбова предпринята в работе С. Ишима и др. Характерной особенностью развиваемого подхода является учет того факта, что эффективное взаимодействие между двумя частицами может существенно изменяться из-за наличия сильных корреляций в турбулентной плазме. Обсуждены различные физические следствия, вытекающие из такого подхода, в частности, рассмотрены аномальная диффузия и излучение в турбулентной плазме.

Оригинальный метод стохастического нагрева плазмы предложен А. И. Ахмезером и др. Идея метода основана на увеличении энергии плазмонов с помощью медленной модуляции внешнего магнитного поля. Энергия, сообщаемая плазмам при таком методе нагрева, может значительно превосходить джоулево тепло, непосредственно получаемое частицами.

Нелинейное взаимодействие высокочастотных волн с плазмой рассмотрено в докладе К. Обермана. Нелинейная модуляция волн с произвольной дисперсией в бестолкновительной плазме на основе модифицированного метода теории возмущений исследована в работе Й. Ишикавы. Нелинейные эффекты (самоканализация вистлеров, усиление, излучение и рассеяние электромагнитных волн) в турбулентной

плазме рассмотрены в докладе В. Н. Цытовича. Ряду вопросов теории слабой турбулентности был посвящен также раппортерский доклад И. А. Ахизера.

Математическое моделирование и численные методы в теории плазмы. В связи с появлением быстродействующих электронно-вычислительных машин и разработкой численных методов наряду с традиционными методами (теоретическими и экспериментальными) исследования в физике плазмы большое значение приобретает математическое моделирование или численный эксперимент. Если раньше при изучении сложного явления необходимо было ограничиваться качественным анализом и рассмотрением предельных случаев, описываемых уравнениями, имеющими аналитическое решение, то теперь возможно использование более полных физических моделей. Вводимой модели сопоставляется математическая задача, для которой строится вычислительный алгоритм, позволяющий находить ее численное решение. Варьируя различные параметры задачи, можно провести детальное исследование физического процесса в рамках принятой модели, выявить основные закономерности процесса, оценить влияние различных факторов. Последующий переход к более совершенной модели позволяет найти границы применимости рассмотрения и т. д. Математическое моделирование в некоторых случаях может заменить длительные и дорогостоящие физические эксперименты. В настоящее время планирование сложных физических экспериментов практически невозможно без предварительной математической обработки на электронно-вычислительных машинах предполагаемых экспериментальных результатов.

Современное состояние проблемы математического моделирования получило достаточно полное отражение в докладе А. А. Самарского, посвященном рассмотрению численных методов в теории низкотемпературной плазмы. Низкотемпературная плазма хорошо описывается уравнениями магнитогидродинамики с учетом процессов теплопроводности, вязкости, конечной проводимости и переноса излучения. Соответствующая система дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений нелинейна и в общем случае допускает только численные решения. В настоящее время моделирование в низкотемпературной плазме сводится либо к решению одномерных нестационарных задач, учитывающих всю совокупность физических процессов и позволяющих выявить основные физические закономерности, либо к решению двумерных задач упрощенной модели с целью выяснения вопроса об устойчивости и влиянии крайних условий.

Основным методом численного решения задач магнитогидродинамики является метод конечных разностей, сводящийся к следующему: в областях изменения переменных вводятся сетки с определенными шагами; производные, входящие в дифференциальные уравнения, заменяются в узлах сетки разностными отношениями; в результате взамен дифференциального уравнения получается система разностных уравнений, порядок которой равен числу узлов сетки. Последовательность таких систем уравнений для различных сеток называется схемой. Используемые разностные схемы должны удовлетворять определенным требованиям: давать решение задачи с заданной точностью, удовлетворять условиям устойчивости, экономичности, универсальности алгоритма и т. д. Принципиальное значение имеет доказательство (установленное в последние годы) того факта, что, если схема устойчива и аппроксимирует некоторое дифференциальное уравнение, решение разностной задачи сходится (при стремлении шагов сетки к нулю) к решению дифференциального уравнения. Поэтому изучение точности разностной схемы сводится к изучению аппроксимации и устойчивости. Для широкого класса разностных схем (соответствующих нестационарным задачам) в настоящее время получены необходимые и достаточные условия устойчивости. Имея классы устойчивых схем, можно искать схемы, удовлетворяющие дополнительным требованиям точности и экономичности. Вследствие ограниченности возможностей вычислительных машин практическое значение имеет построение таких схем, которые характеризуются оптимальными свойствами на реальных сетках, а не при стремлении шагов сетки к нулю. К таким практически важным схемам относятся консервативные схемы, для которых законы сохранения выполняются на сетке. Наиболее эффективными являются следующие методы получения разностных схем заданного качества: интегро-интерполяционный метод получения консервативных схем, метод регуляризации в классе устойчивых схем и метод суммарной аппроксимации. Эти методы применимы не только для линейных, но и для нелинейных задач. В качестве примеров эффективности использования предложенного метода рассмотрены две задачи динамики низкотемпературной плазмы: нахождение распределения полей и токов в плазме с анизотропной проводимостью при малых значениях магнитного числа Рейнольдса и исследование влияния нелинейного характера электронной теплопроводности и граничных условий на развитие ионизационной неустойчивости в плазме.

Другие примеры математического моделирования процессов в плазме (сильноточные излучающие разряды, магнитогидродинамические пульсации при воздействии высокочастотного поля большой амплитуды, процессы переноса и уравнения состояния в плотной плазме, разлет плазмы в вакуум и взаимопроникновение плазменных обла-

ков и т. д.) рассмотрены в докладах С. П. Курдюмова, В. С. Имшенника, Н. Н. Калиткина и Ю. С. Сигова. В докладе Ю. П. Днестровского и Д. П. Костомарова были подробно освещены методы численного моделирования кинетических процессов в плазме и, в частности, указаны те типы задач, которые могут быть решены и уже решены с их помощью.

Проблеме использования систем типа «он-лайн» (состоящих из электронно-вычислительной машины и экспериментального устройства) с целью изучения динамики различных процессов (в том числе и нелинейных) в плазме был посвящен интересный доклад Б. Фрида. В качестве иллюстрации эффективности предлагаемого метода рассмотрены следующие процессы в плазме: потоковая неустойчивость при движении частиц поперек магнитного поля, бесстолкновительные ударные волны и нелинейные ионнозвуковые волны.

Электромагнитные явления в плазмоподобных средах. Специфические плазменные явления играют существенную роль не только в газовой плазме, создаваемой в лабораторных условиях, но и в естественной плазме: околозвездной плазме, космической плазме, околоземной плазме, плазме твердых тел и т. д. Отдельное заседание на конференции было посвящено рассмотрению различных электромагнитных явлений в такой плазме.

В докладе Д. Тер-Хаара детально рассмотрены основные особенности радиоизлучения пульсаров и обсуждена простая плазменная модель излучения, удовлетворительно объясняющая указанные особенности. Пульсар отождествляется с вращающейся нейтронной звездой (с массой порядка солнечной и радиусом порядка 10^6 см), обладающей дипольным магнитным моментом, направленным под углом к оси вращения. Магнитное поле на поверхности достигает величины порядка 10^{12} гс. Пульсар окружен магнитосферой, представляющей собой плазму, плотность которой вблизи поверхности нейтронной звезды достигает значения 10^{19} см $^{-3}$. Заряженные частицы могут ускоряться полем вращающегося диполя до релятивистских скоростей (плотности потоков частиц достигают значений 10^8 см $^{-3}$ при скоростях около 10^9 см/сек). Однако учет некогерентного излучения отдельных частиц не может объяснить наблюдаемую мощность радиоизлучения пульсара ($10^{28} \pm 2$ эрг/сек). Такую мощность может обеспечить только коллективный механизм излучения, учитывающий комптоновскую трансформацию плазменных колебаний в радиоизлучение. Указанный механизм приводит к направленности и поляризации излучения, хорошо согласующимся с наблюдаемыми. Обсуждается также связь между колебаниями интенсивности радиоизлучения пульсаров и свойствами межзвездной плазмы.

Вопросам теории динамических процессов в околоземной плазме посвящен доклад Б. А. Тверского. Экспериментальные исследования с помощью искусственных спутников показали, что структура магнитосферы Земли определяется взаимодействием потока солнечной плазмы (солнечного ветра) с магнитным полем Земли. Так как скорость солнечного ветра относительно Земли значительно превосходит звуковую и альфеновскую скорости, образуется ударная волна. Прошедшая через ударную волну плазма обтекает полость, в которой локализовано геомагнитное поле. Вблизи диполя силовые линии деформированы слабо и образуют магнитную ловушку, заполненную частицами (плотность 10^3 см $^{-3}$) с относительно большими энергиями. Распределение частиц характеризуется рядом максимумов, соответствующих радиационным поясам Земли. Позади диполя на расстояниях порядка $8a$ (где a — земной радиус) образуется протяженный плазменный слой, вытягивающий силовые линии в так называемый хвост магнитосферы. Радиус хвоста составляет вблизи Земли около $20a$, а длина около 10^3a . Благодаря большим размерам хвост содержит значительное количество энергии, которая может трансформироваться в энергию частиц, сбрасываемых в атмосферу Земли вдоль силовых линий. При этом в соответствующих областях северного и южного полушарий разгораются яркие полярные сияния, связанные с возбуждением интенсивных электромагнитных колебаний и называемые магнитной суббурей. В случае мощных суббурь часть плазмы инжектируется из хвоста в области радиационных поясов и формирует кольцевой ток, вызывающий общее понижение магнитного поля на Земле. В докладе обсуждается магнитогидродинимический механизм взаимодействия потока плазмы с магнитным диполем, приводящий к образованию плазменного хвоста и дающий удовлетворительное объяснение основной совокупности наблюдаемых процессов в магнитосфере.

Плазменные явления в твердых телах обсуждались в ряде докладов. В докладе М. Гликсмана детально рассмотрены неустойчивости в полупроводниковой плазме. Рассмотрен случай подвижных электронов и дырок. Основное внимание уделено рассмотрению геликоидальных неустойчивостей, возникающих при наложении внешних параллельных электрического и магнитного полей. Взаимодействие возмущения тока носителей с магнитным полем приводит к усилению этого возмущения. В результате в полупроводнике возникают нарастающие колебания геликоидального типа. Рассмотрено влияние различных факторов на геликоидальные колебания в ограниченных образцах, указано на необходимость учета влияния собственного магнитного поля,

которое оказывается весьма существенным при больших токах. Рассмотрены неустойчивости в полупроводниковой плазме, связанные с пинч-эффектом, а также другие виды неустойчивостей: электроакустическая, двухпоточковая и т. д. Отмечается, что исследование колебаний и неустойчивостей в полупроводниках является удобным средством выяснения физической природы плазменных неустойчивостей и проверки правильности теории.

Различным вопросам теории плазменных явлений в твердых телах были посвящены доклады Л. Э. Гуревича и И. В. Иоффе, И. И. Бойко и В. М. Чернушенко и В. В. Владимирова. Рассмотрены поперечные волны и структуры в проводящих средах при наличии стационарных потоков, пинч-эффект в электронно-дырочной плазме, рассеяние и трансформация волн в неравновесной плазме полупроводника с анизотропной энергетической зоной, трубчатый осциллятор и т. п. Следует отметить, что, хотя между явлениями в газовой плазме и в твердотельной плазме существует много сходного, имеется также и существенное отличие. В полупроводниковой плазме существуют многие типы неустойчивостей, которые имеют место в газовой плазме. Это позволяет использовать полупроводниковую плазму для моделирования некоторых процессов в газовой плазме. Благодаря, однако, специфике полупроводниковой плазмы (большое разнообразие механизмов рассеяния, ловушек и форм энергетических зон) в ней возникает ряд новых явлений, имеющих практическое значение. В частности, возникают новые типы неустойчивостей (эффект Ганна), появляются аномальные флуктуации (связанные с зонной структурой) и обусловленные ими аномалии в рассеянии волн, существенно изменяется явление пинч-эффекта и рекомбинационное свечение из пинча и т. д. В полупроводниковой плазме каждая новая обнаруженная неустойчивость — потенциальный прибор (генератор или преобразователь частот). Усилия исследователей твердотельной плазмы направлены на поиски новых типов неустойчивостей и условий их возбуждения, в то время как в газовой плазме усилия исследователей направлены на подавление неустойчивостей.

Некоторые актуальные вопросы физики плазмы. Рассмотрению ряда актуальных вопросов теории плазмы, непосредственно связанных с проблемой управляемого термоядерного синтеза, были посвящены доклады Р. З. Сагдеева и М. Розенблюта. Детальному обсуждению подверглись различные аномалии свойств плазмы, связанные с возникновением неустойчивостей и в значительной степени определяющие динамику плазмы в термоядерных установках.

В докладе Р. З. Сагдеева было подробно рассмотрено аномальное сопротивление плазмы. Если величина электрического поля в плазме превосходит некоторое критическое значение, то сопротивление плазмы резко возрастает. Величина критического поля оказывается иногда чрезвычайно малой. Аномальное сопротивление плазмы (при полях больше критического) связано с возникновением неустойчивостей в плазме. В случае неустойчивости электроны в дополнение к обычным потерям импульса из-за парных кулоновских соударений теряют добавочный импульс, отдавая его излучаемым волнам и колебаниям различного типа. Аномальное сопротивление можно выразить через эффективную частоту соударений, характеризующую потерю импульса электронами. Эта эффективная частота оказывается значительно больше (в десятки раз) частоты кулоновских соударений. В докладе приведена полная сравнительная картина влияния различных неустойчивостей на аномальное сопротивление плазмы. На начальной стадии при движении электронов относительно ионов в плазме развивается бунемановская неустойчивость, связанная с раскачкой электростатических колебаний со скоростью нарастания порядка плазменной ионной частоты. Приравнявая эффективную частоту соударений электронов скорости нарастания неустойчивости и подставляя в закон Ома, можно получить аномальное сопротивление на начальной стадии. Вследствие возникающих флуктуаций электроны тормозятся, средняя скорость электронов уменьшается и бунемановская неустойчивость прекращается. Тогда определяющей оказывается ионнозвуковая неустойчивость. Вначале плотность энергии ионнозвуковых колебаний нарастает экспоненциально, а затем при больших амплитудах включается эффект нелинейного насыщения, в результате чего устанавливается квазиравновесное состояние. При этом основную роль играет эффект нелинейного рассеяния волн на ионах, так как трехволновые взаимодействия запрещены. Из баланса линейного нарастания и нелинейного насыщения можно найти квазистационарный спектр, который и определяет эффективную частоту соударений. Получаемая таким путем формула для аномального сопротивления хорошо согласуется с экспериментальными данными. В докладе приведен критический анализ использованных допущений и намечены пути дальнейшего развития теории.

Современному состоянию теоретических исследований по проблеме управляемого термоядерного синтеза и, в частности, по проблеме магнитного удержания плазмы в термоядерных установках был посвящен доклад М. Розенблюта. В докладе подробно разобрана теория устойчивости в открытых и закрытых магнитных ловушках. Несмотря на то, что наиболее обнадеживающие экспериментальные результаты получены на закрытых (тороидальных) системах, докладчик считает целесообразным

проведение дальнейших теоретических исследований как для закрытых, так и для открытых магнитных систем.

Проблема устойчивости и стабильности плазмы обсуждена на основе энергетического принципа. Рассмотрен баланс между изменением энергии плазмы и энергией, связанной с развивающейся неустойчивостью. В открытых магнитных ловушках функция распределения анизотропна, поэтому наиболее опасны высокочастотные неустойчивости (к ним относится и неустойчивость, связанная с конусом потерь). Эти неустойчивости конвективны, поэтому могут проявляться только в том случае, если длина системы превышает некоторую критическую длину, которая определяется отношением фазовой скорости волны к инкременту нарастания. Поэтому не обязательно наиболее быстро нарастающая неустойчивость является наиболее опасной. Критические размеры оказываются чувствительными к условиям отражения от концов системы. Введен критерий сверхадиабатичности, при выполнении которого возможно удержание частицы в системе. Учет эффекта сверхадиабатичности может существенно ограничить диффузию частиц (потери в конусе). Отмечается более низкий уровень высокочастотной турбулентности в открытых системах, поэтому они более удобны для исследования нелинейных процессов.

В закрытых магнитных системах (тороидальные ловушки) функция распределения изотропна, поэтому более опасны низкочастотные неустойчивости. Обсуждается неоклассический подход при описании процессов переноса. Последовательный учет граничных условий позволил найти в области «бананового» режима поправки к результатам Галеева и Сагдеева. Обсуждена применимость псевдоклассической формулы для переноса тепла электронами. Проведено сопоставление данных по переносу для «токамаков» и «стеллараторов». Если первые лучше согласуются с псевдоклассическим подходом, то вторые — с результатами расчетов Бома. Рассмотрены возможные физические причины аномального проникновения тока через поверхность в «токамаках» и ряд других вопросов. В конце доклада отмечается, что хотя в настоящее время и существует качественное понимание большинства нестабильностей в магнитных системах, тем не менее проблема требует еще дальнейших исследований.

С заключительным словом на конференции выступил Р. З. Сагдеев, который высоко оценил научный и организационный уровень конференции и выразил глубокую благодарность коллективу Института теоретической физики АН УССР, усилиями которого были созданы все условия для успешной работы конференции.

Подводя итог, можно констатировать, что первая Всесоюзная конференция по теории плазмы, собравшая практически всех ведущих физиков, активно работающих в области теории плазмы и смежных областях физики, позволила обсудить наиболее принципиальные актуальные проблемы современной теории плазмы и наметить основные направления дальнейшего развития теории. Конференция дала советским физикам отличную возможность ознакомиться с работами большого числа важнейших зарубежных научных центров, представители которых приняли участие в конференции. В результате состоявшегося во время работы конференции обмена мнениями ведущие зарубежные и советские физики — участники конференции — пришли к единодушному выводу о целесообразности утверждения международного статуса Конференции по теории плазмы и проведения ее через 2 года снова в г. Клеве с тем, чтобы в будущем такая конференция систематически проводилась в городах Советского Союза и за рубежом.

А. Г. Ситенко