

на перфоленту и затем на БЭСМ-4. В настоящее время с помощью этого современного оборудования обрабатываются ядерные эмульсии, облученные на Серпуховском ускорителе π -мезонами с энергией 45 и 60 ГэВ и протонами с энергией 76 ГэВ.

В распоряжении экспериментаторов имеется также станция космических лучей, расположенная в горах на высоте 3340 м над уровнем моря. Станция оснащена современными установками, предназначенными для проведения исследований ядерных взаимодействий частиц космического излучения с веществом. В стадии отладки находится уникальный комплекс, состоящий из четырех камер Вильсона с общим объемом 2,6 м³ и ионизационного калориметра площадью 8 м². Эта установка позволит проводить исследования ядерных взаимодействий в области энергий, на два порядка более высоких, чем получаемая с помощью существующих ускорителей.

Кроме высокогорной станции в Институте имеется промежуточная станция космических лучей, которая находится на высоте 1700 м над уровнем моря.

IV Европейская конференция по управляемым термоядерным реакциям и физике плазмы

С 31 августа по 4 сентября 1970 г. в Риме состоялась IV Европейская конференция по управляемым термоядерным реакциям и физике плазмы*, организованная Европейским физическим обществом (отделение физики плазмы). В конференции приняли участие около 400 ученых из 22 стран, в том числе неевропейских. Был заслушан 191 доклад (из них семь обзорных) по 16 направлениям: «Токамаки», мультиполи, стеллараторы, открытые магнитные ловушки, пинч-разряды, плотная плазма, высокочастотные методы получения и нагрева плазмы, взаимодействие пучков с плазмой, бесстолкновительные ударные волны и турбулентный нагрев, стабилизация плазмы системами обратной связи и динамическими методами, ударные трубы, диагностика плазмы, теория тороидального удержания, линейные волны и неустойчивости, нелинейные явления, общая теория. Обзорные доклады были посвящены итогам работы теоретической группы в Институте теоретической физики МАГАТЭ в Триесте, термоядерным реакторам, высокочастотным проблемам и возможностям их использования в термоядерных устройствах, лазерной плазме, изучению скропинчей, определению надтепловых флюктуаций электрического поля из измерений профилей спектральных линий.

В последнее время среди замкнутых систем, используемых для удержания высокотемпературной плазмы, наибольший интерес проявлялся к тороидальным системам типа «Токамак», впервые предложенным в СССР. Это объясняется, тем, что на установке «Токамак-3» в Институте атомной энергии имени И. В. Курчатова впервые была получена устойчиво удерживаемая высокотемпературная плазма. На секции «Токамаки» было заслушано 7 докладов. Экспериментальным исследованиям было посвящено три доклада. Доклад советских ученых (№ 18) содержал анализ энергетического баланса и времени жизни ионов в плазме на установке «Токамак-3». Основной вывод заключается в том, что в течение стационарного периода

Обе станции, расположенные на разных высотах, позволят изучать развитие в нижних слоях земной атмосферы процессов, вызванных ядерноактивными частицами очень высоких энергий. Выполняемые на этих станциях работы ведутся совместно с физиками Москвы (ФИАН СССР), Польши, Чехословакии, Болгарии.

Кроме исследований по фундаментальным проблемам строения материи в Институте запланированы и проводятся работы прикладного характера, связанные с решением народнохозяйственных задач республики. При этом используются установки Института ядерной физики АН КазССР (ядерный реактор, циклотрон).

Организация Института физики высоких энергий АН КазССР — крупное событие в научной и культурной жизни Казахской республики, отметившей свое 50-летие.

А. А. КОСТРИЦА, А. И. КУЧИН

разряда основная часть тепла, теряемого ионами в присеевой области плазмы, обусловлена классической теплопроводностью с учетом запертых частиц. Экспериментальные значения ионной температуры оказались в хорошем согласии с формулой, которая была выведена авторами из выражения для классического коэффициента теплопроводности, предложенного Галеевым и Сагдевым. Этот факт подтверждает предположение о кулоновском механизме процесса теплопередачи в плазменном шнуре в рассматриваемом диапазоне параметров плазмы.

Совместный доклад советских и английских ученых (№ 19) был посвящен определению энергии плазмы на установке «Токамак-3» с помощью диамагнитного метода и измерений томсоновского рассеяния. Измерения, выполненные обоими методами в широком диапазоне параметров, оказались в хорошем согласии, а величина энергосодержания плазмы возрастала пропорционально квадрату разрядного тока.

В Принстонской лаборатории физики плазмы (США) установка «Стелларатор-С» была переделана в установку «Токамак СТ» с малым радиусом плазменного шнуря 14 см, большим — 110 см и продольным магнитным полем напряженностью до 35 кэ. Результатам, полученным на этой установке за несколько месяцев работы, и посвящен доклад № 21б. За исключением некоторых деталей, касающихся распределения электронной температуры в сечении плазменного шнуря на конечной стадии разряда и характера развития отдельных мод магнитогидродинамической неустойчивости шнуря, данные полученные на установках «Токамак СТ» и «Токамак-3», практически совпадают.

В разных странах сейчас сооружается более десяти установок типа «Токамак». Конструкция одной из систем («Алкатор»), рассчитанная на получение магнитных полей до 120 кэ, описана в докладе американских ученых (№ 20). На основе численных расчетов, с учетом эффекта аномального сопротивления, авторы предполагают получить на этой установке плазму с плотностью до 10^{14} см⁻³ и температурой в несколько килоэлектронвольт.

* Труды конференции изданы Национальным комитетом по атомной энергии Италии. Рим, 1970.

При изучении процессов, протекающих в той или иной системе, весьма полезную информацию можно получить путем численных расчетов, основанных на различных моделях плазмы. Сравнению расчетов с экспериментальными данными были посвящены доклады № 16 (Франция) и № 17 (СССР). Авторы последнего доклада получили хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных для установки «Токамак-3» на основе классической теории процессов переноса с учетом запертых частиц и введения феноменологических коэффициентов для величин сопротивления и электронной теплопроводности плазмы.

Ограниченностю омического метода нагрева плазмы заставляет искать новые методы для получения температур плазмы выше нескольких килоэлектронвольт. Недавно академиком Л. А. Арцимовичем была предложена идея, развитая впоследствии американскими физиками Фюртом и Иошиковой, о нагреве плазмы методом адиабатического сжатия внешними вертикальными магнитными полями, используемыми в «Токамаках» для управления положением плазменного шнуря в камере. В докладе № 15 (США) решалась задача по определению конфигурации магнитного поля, позволяющей одновременно сохранять равновесие шнуря и получать дополнительный нагрев плазмы. В оптимальном случае оказывается возможным повысить температуру ионов в три раза.

Результаты работ на установках «Токамак» позволяют рассчитывать на дальнейшее повышение плотности, температуры и времени жизни плазмы при дальнейшем увеличении размеров установок, напряженности продольного магнитного поля и силы разрядного тока.

Стеллараторной программе исследований было посвящено 12 докладов, из них удержанию плазмы в стеллараторах и явлениям, происходящим при этом, посвящены доклады №№ 25—27, 29 и 31—34. В остальных докладах рассматривались проблема нагрева плазмы (№ 28), диффузия плазмы и дрейфовые волны в прямолинейном участке стеллараторного поля (№ 36), движение плазмы в криволинейном участке и влияние на это движение дивертора (№ 30), термоядерный реактор на основе торсатронного варианта стелларатора (№ 35).

Основной и наиболее важный результат, полученный на стеллараторе «Протоклео» (доклад № 25, Великобритания), сводится к тому, что время жизни плазмы растет пропорционально произведению угла поворота силовых линий на квадрат среднего радиуса граничной поверхности. При этом время жизни не зависело от величины ширины. Исследуя удержание плазмы в стеллараторе «Ливень-1» (доклад № 31), советские ученые обнаружили новое явление. Измерения показали, что в плазменном шнуре имеется направленный ионный поток, распределенный по сечению шнуря, и его интеграл по площади сечения отличен от нуля. Авторы предполагают, что это явление связано с наличием радиального электрического поля, изменяющего величину угла преобразования. В этом случае при определенных условиях имеется группа «резонансных» ионов, уходящих на стенки. Возникающая асимметрия в функции распределения скоростей и регистрируется в виде направленного потока.

На двухзаходном стеллараторе W-II A (ФРГ) были выполнены работы, представленные тремя докладами. Интересным представляется результат проверки влияния накаленной сферы (диаметр 3 мм), используемой для термической ионизации рабочего газа (барий), на удержание плазмы. В отсутствие сферы плазма

создавалась с помощью фотоионизации. Время жизни плазмы в обоих случаях оказалось практически одинаковым и с точностью до коэффициента 2 соответствующим значению, вычисленному на основе теории Пфириша и Шлютера.

Исследования на стеллараторах показывают, что время жизни плазмы при имеющих место небольших величинах электронной температуры и плотности (бесстолкновительная и промежуточная области) хорошо согласуется с классической теорией с учетом запертых частиц.

В работах по мультипольным системам (4 доклада) наиболее интересные результаты были получены на сфераторе с левитирующим сверхпроводящим кольцом (доклад № 246, США). Время удержания дейтериевой плазмы, создаваемой электронно-циклотронным резонансом, составляло в режиме левитации 100—200 мсек, т. е. всего в 2,5 раза меньше расчетного классического времени. Если же токонесущее кольцо поддерживалось с помощью поддержек, то время удержания плазмы падало до 10 мсек. Результаты получены для случая холодной плазмы, и авторы предполагают на новой установке получить плазму с температурой ионов 100 эв. С точки зрения изучения физических явлений подобные установки несомненно представляют большой интерес. Однако необходимость осуществления левитации проводников практически лишает подобные системы перспективы создания на их основе термоядерных реакторов.

Работы, обсуждавшиеся на секции «Ловушки с магнитными пробками», можно условно разделить по таким направлениям, как удержание плазмы с горячими ионами или электронами, удержание в ловушках с комбинированными пробками, в том числе высокочастотными, инъекция плазмы в ловушку, изучение неустойчивостей. В установках ПР-6 (доклад № 86, СССР) и MTSE II (доклад № 90, Великобритания) с конфигурацией магнитного поля типа «минимум В», где создавались достаточно хорошие вакуумные условия, наблюдается аномально быстрый распад плазмы с плотностью более 10^{12} см^{-3} . При этом имеет место высокочастотное излучение на ионной циклотронной частоте. Однако идентифицировать неустойчивость, вызывающую эти явления, авторам пока не удалось. Интересны работы, представленные французскими (доклады № 78 и 86) и советскими (доклад № 85) учеными, по улучшению удержания плазмы с помощью высокочастотного поля, приложенного вблизи магнитной пробы. Показано, что если частота высокочастотного поля близка к электронной циклотронной, то можно существенно уменьшить утечку ионов из ловушки.

Большинство работ по пинч-разрядам (доклады № 37—53) связано с изучением устойчивости и методов стабилизации разрядов с помощью винтовых магнитных полей. Экспериментальные работы, представленные на конференции, характеризуются разнообразием типов пинчей и параметров установок. Существенно новых результатов по удержанию плазмы в линейных системах в этих докладах не было. Сейчас большинство экспериментаторов переходит к изучению тороидальных пинч-разрядов, в которых благодаря отсутствию потерь на концах время жизни плазмы может быть значительно увеличено, если будет решена проблема равновесия.

На секции «Плотная плазма» обсуждались работы по изучению плазмы, образующейся в фокусе, лазера, а также систем типа «плазменный фокус». В обзорном докладе А. Карузо были приведены результаты иссле-

дования свойств лазерной плазмы, полученные в различных лабораториях за последние 1—2 года. В настоящее время разработана общая картина процесса образования плазмы мощным лазерным излучением. Однако остаются пока неясными такие вопросы, как точный учет фокусировки излучения, поведение коэффициента поглощения и отражения при плотности, близкой к критической, роль неравновесности состояния. Все это приводит к расхождению в оценках требуемых мощностей излучения для создания плазмы с термоядерными параметрами от 10^{13} до 10^{15} вт. Из экспериментальных работ наибольший интерес вызвали доклады № 112 (Франция) и № 113 (ФРГ). В первой работе удалось получить до 10^5 нейтронов за импульс при энергии лазера около 60 Дж, излучаемой за время 3,5 нсек. Во второй работе изучался важный вопрос поглощения энергии луча при плазменной частоте, большей лазерной, т. е. плотностях плазмы выше критической. При облучении полизтиленовой пленки получена плазма с плотностью $8 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$.

Главными вопросами в изучении систем типа плазменного фокуса являлись выяснение механизма возникновения нейтронного излучения и определение зависимости нейтронного выхода от параметров конденсаторной батареи. В работе итальянских ученых (доклад № 117) максимальный выход нейтронов достигал $2 \cdot 10^{11}$ за импульс и оказался пропорциональным энергии батареи в степени 2,3 независимо от того, менялись ли емкость или напряжение батареи. Это позволяет в будущем для повышения выхода нейтронов использовать батареи на большие энергии, но при технических удобных величинах напряжения.

Вопросы высокочастотных методов создания и нагрева плазмы рассматривались в 11 докладах на соответствующей секции и в большей или меньшей степени еще в 16 докладах. Большое внимание было удалено высокочастотным методам нагрева ионов, особенно в торoidalных системах. Несколько докладов посвящено изучению уже ставшего традиционным ионно-циклotronного метода нагрева, но в различных модификациях (№ 103, США и № 105, Франция). В докладе № 101 (Франция) дан теоретический анализ нагрева ионов в торoidalных системах методом магнитной накачки бегущей волной. В докладе советских ученых (№ 104) по нагреву плазмы при частотах, близких к нижней гибридной, показана связь между поглощением в этой области частот и линейной трансформацией, а также возможность эффективного нагрева ионов в соответствии с теоретическими оценками. Этому же методу были посвящены работы французских и бельгийских ученых (доклады № 131 и 100). Несколько работ связано с дальнейшим развитием исследований по формированию плазмы и нагреву электронов под действием сверхвысокочастотных волн, применением СВЧ-методов ионизации и ускорения плазмы для создания плазменных источников. Следует отметить, что методы создания плазмы и нагрева электронов с помощью СВЧ-волны в диапазоне частот между электронной, циклотронной и верхней гибридной получили в настоящее время широкое распространение на многих установках.

В работах по взаимодействию электронных и ионных пучков с плазмой основными вопросами были нагрев ионов в системе плазма — пучок и возбуждение пучком колебаний. Из теоретических работ несомненный интерес представляет доклад № 74 (СССР), где предложена новая теория взаимодействия пучка с плазмой с учетом эффекта группировки пучка. В этом случае результирующая функция распределения имеет вид двух-

максвелловской, что находится в хорошем согласии с численными расчетами и экспериментом.

В программу конференции было включено 8 работ по собственно диагностике. В этих и других работах описываются новые или сильно модифицированные диагностические методы. Доклад № 146 (США) посвящен принципиальному уточнению обработки результатов, полученных с помощью зондов при плавающем потенциале (доклад № 40, США) — применению киноголографии для восстановления профиля плазмы в тэта-пинче, доклад № 626 (СССР) — измерению степени анизотропии электрических полей по линейному штарк-эффекту, доклад № 125 (ФРГ) — измерению магнитного поля плазмы по лазерному рассеянию. Наиболее интересным из обсуждавшихся направлений является измерение амплитуд, дисперсии и анизотропии электрических полей в плазме по линейному и квадратичному штарковскому уширению. Этому вопросу был посвящен и обзорный доклад Г. Грима (США).

Как известно, в последние годы была развита новая теория процессов переноса в торoidalных системах (так называемая классическая теория с учетом запертых частиц) первоначально Галеевым и Сагдеевым (СССР), а затем Коврижных (СССР), Фюром и Розенблютом (США) и другими. Из докладов секции «Торoidalное удержание» наибольший интерес вызывала совместная работа американских и советского ученых (доклад № 12) об эффекте дополнительного pinchesования из-за наличия продольного электрического и азимутального магнитного полей в бесстолкновительной плазме в торoidalных системах. Этот эффект приводит при определенных условиях к появлению дополнительного потока плазмы по направлению к оси системы и к уменьшению скорости диффузии. Заметим, что аналогичный результат независимо был получен также Галеевым.

В настоящее время теория волн и неустойчивостей в линейном приближении хорошо разработана и в известной мере является завершенным разделом физики плазмы. Основное внимание в докладах на эту тему было удалено дальнейшему развитию и углублению ранее высказанных идей и сравнению теории с экспериментом. Изучение условий возбуждения и распространения волн, как правило, рассматривалось для довольно простых конфигураций магнитных полей.

Нелинейным явлением в плазме — одному из основных направлений развития теории — было посвящено 27 докладов. Они касались как теоретического, так и экспериментального изучения эха в плазме, взаимодействия волн в плазме (распадная и параметрическая неустойчивости), взаимодействия волн и частиц (эффект захвата частиц и нелинейное затухание Ландау). Ряд выводов и результатов представляют несомненный интерес для дальнейшего развития теории, а также для практических целей диагностики плазмы, электроники и радиофизики. Весьма характерной тенденцией в теоретических исследованиях являются рост числа и улучшение качества работ с применением ЭЦВМ.

Из-за краткости данного обзора не все направления и работы, представленные на конференцию и несомненно представляющие интерес, были рассмотрены выше. Предпочтение отдано работам, более тесно связанным с проблемой управляемых термоядерных реакций. Кроме того, некоторые темы были опущены, поскольку они обсуждались на специальных конференциях. Например, в июне 1970 г. в Принстоне (США) состоялась конференция по стабилизации плазмы системами обрат-

ных связей и динамическими методами (см. «Атомную энергию», т. 29, стр. 471, 1970 г.).

Конференция показала, что развитие работ по управляемому термоядерному синтезу по-прежнему идет по нескольким направлениям, однако предпочтение

отдается тем системам, которые могут послужить в дальнейшем прототипом термоядерного реактора.

Следующую У Европейскую конференцию намечено провести в 1972 г. во вновь создаваемом центре термоядерных исследований в Гренобле (Франция).

Э. И. КУЗНЕЦОВ

XV Международная конференция по физике высоких энергий

Конференция проходила с 26 августа по 4 сентября 1970 г. в Киеве. В работе конференции приняли участие более 800 специалистов из 40 стран мира; представлено 850 докладов.

По тематическим признакам доклады были разбиты на 35 групп, и соответственно было организовано 35 секционных заседаний. На 19 секционных заседаниях обсуждались экспериментальные работы, на 16 — теоретические. Впервые за всю двадцатилетнюю историю подобных конференций количество теоретических работ превысило количество работ экспериментальных. Некоторые специалисты ожидают крупных открытий именно в теории элементарных частиц.

На пленарных заседаниях было заслушано 18 репортажных докладов по всем основным направлениям физики высоких энергий во всех лабораториях мира, а также по результатам дискуссий на секционных заседаниях. Репортажами на пленарных заседаниях были данные советские и зарубежные ученые: И. Ю. Кобзарев, В. М. Лобашов, Л. Д. Соловьев, А. Н. Тавхелидзе, Д. С. Чернавский (все СССР), А. Врублевский (Польша), Дж. Аллаби (ЦЕРН), Д. Моррисон (Великобритания), Нгуен Ван Хьеу (ДРВ), А. Астье (Франция), Г. Венециано (Израиль), Р. Плано (ЦЕРН), К. Любельмайер (ФРГ), Б. Зумино, Н. Самиос, К. Хепп, Р. Уилсон (ФРГ), А. Барут (все США). Ввиду чрезвычайно большого интереса к результатам первых экспериментов, выполненных на крупнейшем в мире Серпуховском ускорителе протонов на энергию 76 ГэВ, на пленарные заседания были также вынесены доклады советских ученых Ю. Д. Прокошкина (ИФВЭ) и В. А. Никитина (ОИЯИ). В последний день конференции все делегаты с большим вниманием и интересом прослушали специальные сообщения о перспективе развития основной экспериментальной базы физики высоких энергий — ускорителей заряженных частиц.

Было проведено несколько семинаров по специальным вопросам экспериментальной и теоретической физики. Один из них был посвящен фундаментальным проблемам теории элементарных частиц и проходил в Институте теоретической физики АН УССР. Перед началом состоялось торжественное открытие вновь построенного комплекса зданий этого института. На этом семинаре выступили М. А. Марков, Д. И. Блохинцев, В. А. Матвеев, О. А. Хрусталев (все СССР), А. Салам (Гринингтон), К. Янг, Т. Ву и Б. Сакита (все США). В докладах обсуждались различные подходы к устранению существующих трудностей квантовой теории поля.

Большой интерес вызвали сообщения о результатах экспериментов на Серпуховском ускорителе. Группа экспериментаторов под руководством Ю. Д. Прокошкина измеряла полные сечения взаимодействия частиц и античастиц с нуклонами при энергиях до 65 ГэВ. Экспериментальные полные сечения отличались от предсказаний теории и, в частности, известной теории Померанчука. Этот факт широко обсуждался на конференции и во время ее работы. Предложены

объяснения и уточнения теоретической модели, которая теперь удовлетворительно описывает экспериментально полученные зависимости полных сечений от энергии в исследованном диапазоне.

Один из первых опытов на Серпуховском ускорителе был выполнен группой ученых ОИЯИ под руководством В. А. Никитина. Вместе с советскими специалистами в исследованиях процесса рассеяния высокочастотных протонов на протонах и дейtronах на малые углы принимали участие специалисты социалистических стран — участники ОИЯИ. В опыте применялась необычная по своей идее методика и современная детектирующая аппаратура, позволяющая вести по ходу эксперимента обработку данных с помощью ЭВМ. Опыт проводился непосредственно внутри вакуумной камеры ускорителя, и в качестве мишени служила сверхзвуковая газовая струя водорода или дейтерия. Показано, что при повышении энергии взаимодействующих частиц ядерные силы не гасят силы электрические, а происходит их взаимное усиление. Из этих же опытов стало ясно, что чем выше энергия, тем больше сжимается конус рассеяния частиц.

Огромный интерес вызвали у многих делегатов конференции результаты эксперимента по регенерации К⁻мезонов на водороде, выполненные группой ученых ОИЯИ под руководством И. А. Савина. Неожиданный результат, полученный этой группой буквально накануне конференции, не мог быть глубоко понят ни его авторами, ни узнавшими о нем теоретиками и несомненно будет предметом тщательного изучения и осмысливания в ближайшие несколько месяцев.

На конференции были представлены результаты работ, выполненных практически на всех действующих ускорителях. Но особым вниманием пользовались результаты, полученные на пучках частиц, рекордных по своим параметрам, в частности крупнейшего электронного линейного ускорителя в Станфорде (США). Особый интерес вызвали опыты по глубоко неупругому рассеянию электронов при энергиях до 20 ГэВ, выполненные на этом ускорителе.

Наблюдается сильное стремление работать на лептонных пучках при больших энергиях. Для этих целей даже предлагается использовать пучки лептонов, которые можно получать на крупнейших протонных ускорителях.

Конференция показала значительное увеличение роли метода встречных пучков в экспериментах по физике высоких энергий. Было представлено 11 работ, выполненных этим методом (6 из Фраскати, 4 из Новосибирска и 1 из Орса). Крупным событием последних двух лет явилось вступление в строй действующего электронно-позитронного накопителя во Фраскати. В стадии наладки находятся установки: ВЭПП-3 в Новосибирске и «Байпас» в Кембридже (США). В области экспериментов по проверке применимости законов квантовой электродинамики на малых расстояниях для высоких энергий метод встречных пучков уже сейчас находится вне конкуренции. В области