

и длиной 1,5 м. Расчетное поле на оси соленоида будет 7,6 Тл при диаметре внутреннего отверстия 1,3 м. На втором этапе этой работы предполагается изготовить внутреннюю часть с отверстием диаметром 50 см и полем на оси 12 Тл.

Следует отметить широкие международные научные связи итальянских лабораторий, в которых проводятся

работы по магнитному удержанию плазмы в тороидальных системах, с научными лабораториями других стран.

Итальянские специалисты высоко оценивают научные результаты, полученные на советских токамаках.

БРЕВОВ Н. Н.

XIV Европейская конференция по взаимодействию лазерного излучения с веществом

Конференция, состоявшаяся 15—19 сентября 1980 г. в пригороде Парижа Пализо, была посвящена обсуждению исследований в области лазерного термоядерного синтеза (ЛТС). В ее работе участвовали около 150 специалистов, представляющих ведущие научно-исследовательские лаборатории европейских стран, Канады, США и Японии, в которых активно работают над проблемой инициирования термоядерного синтеза лазерным излучением. На пленарных заседаниях было заслушано 88 докладов о результатах оригинальных исследований, выполненных за время, прошедшее после проведения предыдущей конференции. В нескольких обзорных докладах сообщались планы и программы лабораторий и обсуждались перспективы развития по основным направлениям, определяющим возможность осуществления в ближайшие 3—5 лет демонстрационного эксперимента по термоядерному синтезу в системах с инерционным удержанием плазмы.

В настоящее время есть достаточно веские основания полагать, что достижение положительного энергетического выхода по отношению к вкладываемой в термоядерную мишень энергии будет возможно на установках, генерирующих импульсы лазерного излучения энергией 100—300 кДж и длительностью несколько наносекунд. Две установки такого класса сооружаются в США: «Шива-Нова», представляющая собой многоканальный лазер на неодимовом стекле (Ливерморская лаборатория им. Лоуренса), и CO_2 -лазер «Антарес» (Лос-Аламосская научная лаборатория). Финансирование строительства «Шивы-Новой» полностью обеспечено, введение в эксплуатацию первой очереди, рассчитанной на получение энергии 100 кДж в импульсе наносекундной длительности, планируется на 1984—1985 гг. В Лос-Аламосской лаборатории принято решение об ускоренном сооружении двух модулей «Антареса» с тем, чтобы уже в 1983—1984 гг. начать эксперименты (ранее предполагалось создание шести-модульной установки, каждый модуль которой обеспечивает пучок энергией ~20 кДж). Планы других лабораторий ограничиваются CO_2 -лазерами и лазерами на неодимовом стекле, работающими в диапазоне энергии, не превышающем ~10 кДж. На конференции сообщалось о двух установках такого класса, сооружаемых в ФИАНе — это лазерные системы на неодимовом стекле «Дельфин» и УМИ-35.

В качестве оптимальных мишеней для лазерных систем следующего поколения в диапазоне энергии 0,4—1 МДж рассматривались сферические мишени с двумя оболочками-поршнями, в которых наряду с внешней сжимающей оболочкой сравнительно большого диаметра (~1 мм), покрытой веществом с малым атомным номером (аблято), имеется капсула небольшого размера из материала с большим атомным номером и D — T-топливом. Пространство между оболочками заполнено D — T-смесью малой плотности. Проводятся численные оптимизационные расчеты для уточнения размера и конструкции мишеней такого типа с учетом сегодняшнего понимания физических процессов и явлений, протекающих при поглощении лазерного излучения в плазменной короне, сжатии и термоядерном поджиге. Предотвращение нагревания термоядерного топлива быстрыми электронами на ранних стадиях сжатия,

достижение высокого гидродинамического КПД и устойчивости сжатия, обеспечение термоядерного зажигания в центральной капсуле с последующим нагревом основной массы сжимаемой D — T-смеси за счет поглощения энергии α -частиц — продуктов реакции — вот те проблемы, решение которых позволяет свести к минимуму требуемую для осуществления демонстрационного эксперимента энергию лазерного импульса. При этом, естественно, налагаются более жесткие требования на качество изготовления мишеней. Следует, как показывают расчеты, остановиться на разумном компромиссе, выбирая мишени, создание которых допускает современный уровень техники, и не слишком увеличивая необходимую энергию лазерного излучения.

Интенсивно продолжаются экспериментальные исследования сжатия стеклянных микробаллончиков-мишеней, заполненных газообразной D — T-смесью, под воздействием лазерного излучения на действующих установках в США (фирма КМС, Ливерморская и Лос-Аламосская лаборатории, Рочестерский университет), СССР (ФИАН им. П. Н. Лебедева), Франции (Научно-исследовательский центр в Лиме), Великобритании (Резерфордская лаборатория) и Японии (университет в Осаке). В большинстве представленных на конференции работ сообщались результаты изучения процесса сжатия в абляционном режиме. Переход от малообещающего режима, известного под названием «режим взрывающейся оболочки-поршня», со значительным предварительным прогревом D — T-топлива и невысоким гидродинамическим КПД к абляционному сжатию осуществлялся увеличением до 5—15 мкм толщины слоя полиэтилена или другого пластикового материала на поверхности стеклянных баллончиков (их диаметр варьировался в различных опытах от 50 до 200 мкм). Одновременно повышается длительность лазерных импульсов (от 100—200 пс до 0,5—1,5 нс) и давление D — T-смеси. В результате оказалось возможным достижение плотности D — T-смеси ~2—5 г/см³ (в 10—20 раз больше плотности в жидком состоянии) при сравнительно скромной энергии лазерного импульса ~100 Дж. Рекордные параметры получены на «Шиве», где максимальная зарегистрированная плотность достигала 30—40 г/см³. В экспериментах энергия падающего на мишень излучения составляла ~4 кДж, поглощаемая энергия не превышала 700—800 Дж. Однако вследствие увеличения массы мишеней энергии лазерного излучения было недостаточно для эффективного нагревания сжатого топлива, и ионная температура, а следовательно, и нейтронный выход оказывались существенно ниже, чем в режиме взрывающейся оболочки-поршня. На «Шиве», например, температура снизилась с 6—7 до 0,5 кэВ, нейтронный выход уменьшился с ~10¹⁰ до 10⁸—10⁷ нейтронов.

Во многих лабораториях начаты эксперименты и получены предварительные результаты облучения сферических мишеней лазерными пучками с короткой длиной волны (как правило, соответствующей второй, третьей и четвертой гармоникам рабочей частоты излучения неодимового лазера). На конференции обсуждались теоретические работы и численные расчеты, показывавшие преимущества использования в ЛТС коротковолнового излучения. Крат-

кое резюме по всем выполненным в этом направлении исследованиям — с укорочением длины волны поглощение излучения происходит в более плотных областях плазменной короны; при большей плотности и соответственно меньшей температуре в зоне поглощения классическое столбовителное поглощение становится доминирующим; количество быстрых надтепловых электронов и их температура уменьшаются; с приближением зоны поглощения к мишени возрастает давление на абляционной поверхности. Зависимости коэффициента поглощения и температуры быстрых электронов от длины волны проверяли экспериментально в широком диапазоне плотности светового потока при облучении плоских и сферических мишеней. Совокупность полученных данных согласуется с теоретическими предсказаниями. Так, можно, по-видимому, считать достоверной зависимость температуры быстрых электронов от плотности светового потока и длины волны падающего на мишень излучения. Измерения, выполненные на длине волны 1,06; 0,53; 0,35 и 0,265 мкм, приводят к зависимости $T_{\text{быстр}} \sim (\lambda^2)^{0,4 \pm 0,1}$. Коэффициент поглощения лазерного излучения плазмой существенно возрастает с уменьшением длины волны, интенсивность высокоэнергетического рентгеновского излучения убывает. В Рочестерском университете и Ливерморской лаборатории, а также в Высшей Политехнической школе Франции рассчитаны мишени, в которых при облучении второй, третьей и четвертой гармониками излучения неодимового лазера удастся получить термоядерную вспышку с энергией лазерных импульсов в несколько раз меньшей, чем при использовании излучения на основной частоте. За последний год в этих лабораториях показана возможность преобразования частоты неодимового лазера во вторую и третью гармоники с высоким КПД преобразования по энергии. Подробные исследования зависимостей КПД преобразования излучения неодимового лазера во вторую ($\lambda = 0,53$ мкм) и третью ($\lambda = 0,35$ мкм) гармоники на кристаллах КДР от плотности светового потока, их длины волны, расходимости первичного лазерного пучка явились содержанием нескольких докладов. К настоящему времени достигнут КПД преобразования во вторую и третью гармоники, равный соответственно 72 и 55%, без устранения френелевских потерь на поверхности оптических элементов при диаметре пучков до 80 мм. Показано, что распределение интенсивности по сечению пучка в результате преобразования ухудшается незначительно. Рассматривается вопрос о преобразовании частоты излучения на выходе оконечных усилительных каскадов «Шивы-Новый» во вторую и третью гармоники.

Широкое развитие получили эксперименты, в которых облучают тонкие металлические фольги и органические пленки, моделирующие оболочки сферических мишеней. Плоская геометрия облегчает диагностику, поскольку доступными для наблюдения оказываются обе поверхности мишени. В Научно-исследовательской лаборатории Военно-морского флота (США) и ИАЭ им. И. В. Курчатова выполнен цикл исследований на тонких одно- и многослойных мишенях по выделению степени ограничения теплопроводности в плазменной короне, устойчивости ускорения вещества мишени в абляционном режиме при искусственно создаваемой начальной неоднородности толщины мишени в пределах фокального пятна и пространственно-периодической модуляции интенсивности облучения. Проведены опыты по моделированию процесса ускорения для двухоболочечных мишеней.

Продолжаются поиски лазеров, перспективных с точки зрения их использования в лазерных термоядерных реакторах будущего: малая длина волны, высокий КПД, работа с частотой повторения импульсов 1—10 Гц. Обстоятельный доклад на эту тему был представлен Ливерморской лабораторией. В качестве возможных кандидатов рассматривались КгF-лазер со схемой рамановской компрессии выходного импульса, тандем КгF-лазер и СН₄-лазер и, наконец, впервые упомянутый на конференции твердотельный MgF₂-лазер с добавками ванадия. На КгF-лазере

при энергии выходного пучка ~ 100 Дж в импульсе длительностью 10 нс проводят эксперименты. Неприятным является малая прочность оптических элементов для излучения с короткой длины волны, что приводит к необходимости увеличения числа каналов в крупномасштабных системах и соответственно значительно повышению стоимости установки.

Много новых и интересных данных появилось и в исследованиях чисто физического характера, посвященных взаимодействию лазерного излучения с плотной плазмой. Продолжается интенсивное изучение вынужденного бриллюэновского рассеяния в плазменной короне при различном пространственном масштабе изменения плотности, исследуется развитие параметрических неустойчивостей и генерация излучения на гармониках и субгармониках основной частоты облучающего плазму лазерного пучка. Содержательные доклады о возможностях диагностики лазерной плазмы посредством анализа излучения, рассеиваемого на гармониках рабочей частоты неодимового лазера, были представлены сотрудниками ФИАНа. Нельзя не упомянуть в этой связи и об экспериментах, выполненных на СО₂-лазере «Гелиос» в Лос-Аламосской лаборатории. Здесь при облучении сферических мишеней в спектре излучения плазмы зарегистрированы высокие гармоники рабочей частоты ($\lambda = 10,6$ мкм). Причем в тех случаях, когда плотность светового потока превышала 10^{16} Вт/см², в видимой области спектра наблюдались гармоники до 27-й включительно. Генерация столь высоких гармоник удается связать со значительным укрупнением профиля плазмы под воздействием светового давления.

Большое внимание уделялось на конференции развитию диагностических методов, позволяющих проводить измерения с высоким временным и пространственным разрешением в условиях сверхплотной плазмы. Разработаны и успешно применяются быстродействующие электронно-оптические преобразователи для рентгеновского диапазона, обеспечивающие при съемке в режиме непрерывной фоторазвертки временное разрешение на уровне нескольких пикосекунд. Широкое распространение получил метод кодирующих апертур для получения распределения источников высокоэнергетического рентгеновского излучения и заряженных частиц — продуктов термоядерных реакций в мишенях. Хорошего качества фотографии, демонстрирующие неравномерность нагрева поверхности сферических мишеней и локальные спонтанные магнитные поля напряженностью до 150 Тл, были представлены сотрудниками Резерфордской лаборатории. В качестве наиболее перспективных методов измерения параметров термоядерного топлива и оболочки-поршня при большой степени сжатия разрабатываются радиохимические методы и методы активной рентгеновской диагностики. Первые основаны на определении наведенной термоядерными нейтронами радиоактивности в элементах, входящих в состав конструктивных материалов мишени или специально вводимых в мишень. Подобраны элементы, наиболее подходящие для проведения подобных измерений в представляющем интерес диапазоне плотностей. Разработаны способы определения доли общей массы, попавшей на коллектор при разлете вещества мишени.

Многообещающим является определение степени сжатия и изучение динамики оболочек сложных мишеней посредством получения теневых фотографий в рентгеновском излучении, эмиттируемом мощным внешним источником. Рентгеновский источник, обладающий всеми необходимыми качествами, представляет собой вспомогательную мишень в виде плоского диска из вещества с большим атомным номером, которая размещена в непосредственной близости к исследуемой мишени и облучается сфокусированным лазерным пучком, ответственным от основного пучка. Исследования показали, что в качестве материалов для вспомогательной мишени наиболее подходящими являются никель, олово и медь, линейчатое излучение которых в диапазоне энергии квантов 4—6 кэВ оказывается интенсивным и позволяет получать контрастные изобра-

жения в условиях, реализуемых в экспериментах по ЛТС.

Подводя итоги конференции, следует отметить широту и целенаправленность работ по ЛТС. Понимание, достигнутое по некоторым кардинальным вопросам, и быстрое развитие технической базы дают возможность с достаточным основанием прогнозировать осуществление в ближай-

шие годы научной демонстрации ЛТС и с оптимизмом смотреть в будущее. Вместе с тем выяснены проблемы, требующие дальнейших экспериментальных и теоретических исследований.

КОВАЛЬСКИЙ Н. Г.

Международная конференция «Нейтрино-80»

Конференция, организованная итальянским Национальным институтом ядерной физики при содействии Европейского физического общества, состоялась в Эриче (Италия) 23—28 июня 1980 г. В ее работе участвовали около 200 специалистов.

Первые три доклада были посвящены 50-летию со дня первого упоминания В. Паули о возможном существовании новой нейтральной частицы, позднее названной нейтрино. Доклады, в которых излагались основные этапы развития физики нейтрино, сделали ученые, стоявшие у истоков зарождения нейтринной физики: Р. Пайерлс (Великобритания), Ф. Райнес (США) и Б. М. Понтекорво (СССР).

На конференции рассматривалась главным образом физика нейтрино. По астрофизическим проблемам были сделаны два обзорных доклада. Массу покоя нейтрино обсуждали на отдельном заседании в связи с принципиальной важностью этой проблемы.

Имеет ли нейтрино массу, отличную от нуля? Наибольший интерес вызвала работа, выполненная в ИТЭФ (СССР) В. А. Любимовым и др. Основным ее выводом является утверждение об ненулевой массе покоя электронного антинейтрино. Анализируя β -спектр трития, авторы пришли к выводу, что масса электронного антинейтрино с 99%-ным уровнем достоверности находится в пределах 14—46 эВ, с 90%-ным равна 30 ± 10 эВ. Опионером по этому вопросу на конференции выступил К. Бервиком (Швеция), известной работами по измерению β -спектра трития. Он высоко оценил β -спектрометр, созданный в ИТЭФ, и методические достоинства работы, а также назвал некоторые экспериментальные вопросы, требующие дальнейшего уточнения. Однако не было названо ни одного пункта в работе, который ставил бы под сомнение окончательный результат. С другой стороны, на конференции отмечалось, что наличие массы покоя у нейтрино имеет не только фундаментальное значение для современной физики, но и далеко идущие космологические последствия. Безусловно, необходимо независимое экспериментальное подтверждение этого результата в других экспериментах.

Космологическим следствиям наличия массы покоя у нейтрино посвящен доклад Я. Б. Зельдовича и др. Наличие у нейтрино ненулевой массы покоя всего в несколько электронвольт приводит к коренным изменениям структуры и процесса расширения Вселенной в целом.

Проверка закона сохранения лептонных чисел. Осцилляции нейтрино. Большой интерес на конференции вызвало обсуждение возможной нарушения закона сохранения лептонных чисел и связанного с этим явления осцилляций нейтрино, т. е. периодических изменений интенсивности и спектров нейтрино данного сорта, из-за перехода одного вида в другой. Впервые гипотеза о возможности смешивания лептонов при массе нейтрино, отличной от нуля, была высказана Б. М. Понтекорво в 1957 г. В последние годы она была детально рассмотрена в теоретических работах Б. М. Понтекорво и С. М. Биленького. Интерес к проблеме усилился в связи с проведенным в последнее время анализом экспериментов, выполненных на реакторе в Саванна-Ривер группой Ф. Райнеса (США). На основе анализа экспериментов по исследованию сечений взаимодействия электронных антинейтрино с водородом и дейтерием

на разном расстоянии от реактора было получено указание на возможное наблюдение осцилляций нейтрино. Однако результаты измерения отношения экспериментальных значений сечений реакции $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ к теоретически ожидаемому сечению, выполненные в 1980 г. на исследовательском реакторе в Гренобле (Франция), не требуют введения осцилляций.

Обсуждение на конференции совокупности экспериментальных данных показало, что убедительных оснований для утверждения о наблюдении осцилляций нейтрино в настоящее время нет. Безусловно, исследования в ближайшие годы будут расширены.

Проверка закона сохранения барионного числа. В последние несколько лет обсуждается возможность нарушения закона сохранения барионного числа. В рамках теории «великого объединения» электрослабых и сильных взаимодействий элементарным процессом, приводящим к такому нарушению, является переход кварков в лептоны. К сожалению, теоретические оценки времени жизни нуклона неточны и наиболее вероятные из них равны в среднем 10^{30} — 10^{32} лет. В настоящее время есть более 40 проектов экспериментальных установок для измерения времени жизни нуклона. Наиболее крупные планируют построить в США и Франции. По планам, первые результаты на уровне 10^{32} лет по моде распада $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ будут получены в американском эксперименте (М. Гольдхабер и др.) к концу 1981 г. Установку массой 10 тыс. т разместят в соляной шахте на глубине 600 м. Она представляет собой водяной куб, который будет просматриваться со всех сторон фотоумножителями для регистрации черенковского излучения от продуктов распада $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ или $n \rightarrow e^- + \pi^+$.

Еще один чувствительный способ проверки закона сохранения барионного числа с его изменением на две единицы состоит в наблюдении возможного перехода нейтрон-антинейтрон. Теоретически этот вопрос впервые был рассмотрен В. А. Кузьминым (ИЯИ АН СССР). В 1980 г. на исследовательском реакторе в Гренобле начался эксперимент по наблюдению такого процесса. Вероятность перехода нейтрона в антинейтрон оценивается 10^{-20} .

Поиск источников «прямых» нейтрино. В 1970 г. Б. М. Понтекорво впервые предложил метод поиска новых короткоживущих частиц регистрацией нейтрино, а не по заряженным продуктам их распада. Предлагалось направить протонный пучок от ускорителя на протяженную (~ 10 ядерных длин) мишень с тем, чтобы поглотить π - и K -мезоны — обычные относительно долгоживущие источники нейтрино. Если образуются новые короткоживущие частицы, то они не успевают поглотиться до распада и их можно эффективно зарегистрировать детекторами нейтрино высоких энергий. Один из первых экспериментов такого типа был поставлен в ИФВЭ (СССР) объединенной группой ИФВЭ — ИТЭФ. Впоследствии эти эксперименты стали называть beam-dump (буквально пучок-поглотитель).

Новые данные, полученные в ЦЕРНе в 1979 г., сообщил на конференции Ф. Лидак. Основные результаты таковы: получены оценки 15—30 мкбн полных сечений образования очарованных частиц в реакции $pp \rightarrow DD\bar{X}$ при энергии 400 ГэВ. Рождение очарованных частиц