

ϕ -мезонов. Благодаря отсутствию взаимодействий в конечном состоянии регистрируемых в этом эксперименте вторичных частиц, он является уникальным для изучения динамики ультррелятивистских взаимодействий тяжелых ионов.

В ОИЯИ для установки NA45 были созданы элементы системы быстрого триггера и изготовлен большой магнит для времяпроекционной камеры (TPC).

Довольно активное участие принимает группа Ю.В.Заневского в эксперименте HADES в GSI (Германия). Для этого эксперимента специалисты группы изготовили систему уникальных дрейфовых камер. Установка HADES представляет собой широкоапертурный диэлектронный спектрометр для изучения рождения лептонных пар в столкновениях тяжелых ядер в области кинетических энергий до 2 ГэВ на нуклон. Эта установка способна работать при интенсивностях пучка до 10^8 частиц/с. Детектор имеет геометрический акцептанс почти 40% для e^+e^- пар и разрешение по массам 0,8% для ρ - и ω -мезонов.

В настоящее время началось плодотворное сотрудничество ЛВЭ с GSI по участию в работах по новому проекту Международного ускорительного центра для исследований с ионами и антипротонами.

Многолетнее плодотворное международное научное сотрудничество в рамках проекта WASA/PROMICE осуществляется ЛВЭ (руководитель Б.А.Морозов) с Университетом в Уппсала (Швеция). В этом проекте с помощью 4π -детектора проводятся прецизионные исследования порогового образования и редких распадов легких мезонов на ускорительном накопительном комплексе CELSIUS с использованием внутренней каплеобразной водородно-дейтериевой мишени.

На установке WASA/PROMICE в пучках ускорителя CELSIUS получены экспериментальные данные о механизмах взаимодействий протонов с протонами и дейтронами в надпороговой области энергий. Измерены дифференциальные сечения реакции $pd \rightarrow {}^3\text{He} + \eta$ в интервале энергий протонов от 930 до 1100 МэВ. Впервые в эксклюзивной постановке экспериментально изучена реакция $dp \rightarrow dp\gamma$ в интервале энергий дейтронов от 436,7 до 559,0 МэВ. Впервые экспериментально изучена реакция $pp \rightarrow pp\pi^+\pi^-$ с большой статистикой вблизи энергетического порога.

6. Эксперименты ЛВЭ на ускорителях ФНАЛ и БНЛ

Дальнейшее развитие методики исследования упругого рассеяния протонов на малые углы (ранее успешно использованной в экспериментах на синхрофазотроне и ускорителе ИФВЭ) позволило группам физиков ЛВЭ под руководством В.Г.Кадышевского, А.А.Кузнецова, В.А.Матвеева, С.В.Мухина и В.А.Никитина провести первые совместные эксперименты на вновь созданном в то время крупнейшем в мире ускорителе ФНАЛ (Батавия, США). Огромная заслуга в организации этого сотрудничества и успешном проведении этого цикла экспериментов принадлежит ГКАЭ СССР, дирекции ОИЯИ, а также дирекции ФНАЛ.

В совместных советско-американских экспериментах, начиная с марта 1972 года, была детально изучена закономерность поведения вещественной части амплитуды упругого рассеяния протонов и дифракционного конуса в широком интервале энер-



В дирекции ОИЯИ (слева направо): Н.Н.Боголюбов, Р.Вильсон (США), К.Ланиус (ГДР) и А.А.Кузнецов обсуждают итоги работы первой группы совместного ОИЯИ—ФНАЛ эксперимента в Батавии (США). Июль 1975 г., Дубна

гий от 8 до 400 ГэВ (см. рис. 14а и 14б); а также установлены неизвестные ранее свойства дифракционной диссоциации протонов на протонах и легких ядрах¹.

В частности, было обнаружено явление антиэкранировки нуклонов в дейтроне, которое состоит в том, что в определенной кинематической области при неупругой дифракции когерентные волны от отдельных нуклонов складываются конструктивно и дифференциальное сечение рассеяния на дейтроне превышает удвоенное сечение.

Полученные результаты экспериментально подтвердили справедливость предсказаний дисперсионных соотношений в новой области энергий.

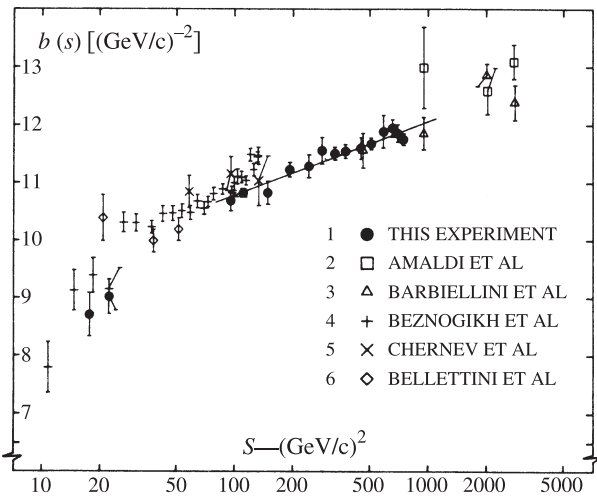
Впервые было экспериментально подтверждено, что основные представления о микропричинности справедливы до расстояний 10^{-15} см.

Совокупность результатов, полученных на трех крупнейших в то время ускорителях мира, обогатила науку выдающимися достижениями и была широко признана на мировом уровне. Эти работы в 1983 году были отмечены Государственной премией СССР. Лауреатами Государственной премии за цикл работ «Дифракционное рассеяние протонов при высоких энергиях» стали Ю.К.Акимов, В.А.Никитин, Б.А.Морозов, Ю.К.Пилипенко, Л.С.Золин, С.В.Мухин, М.Г.Шафранова, В.А.Копылов-Свиридов, А.А.Кузнецов (ОИЯИ), А.А.Воробьев (ЛИЯФ), Е.Л.Фейнберг (ФИАН), В.А.Царев (ФИАН).

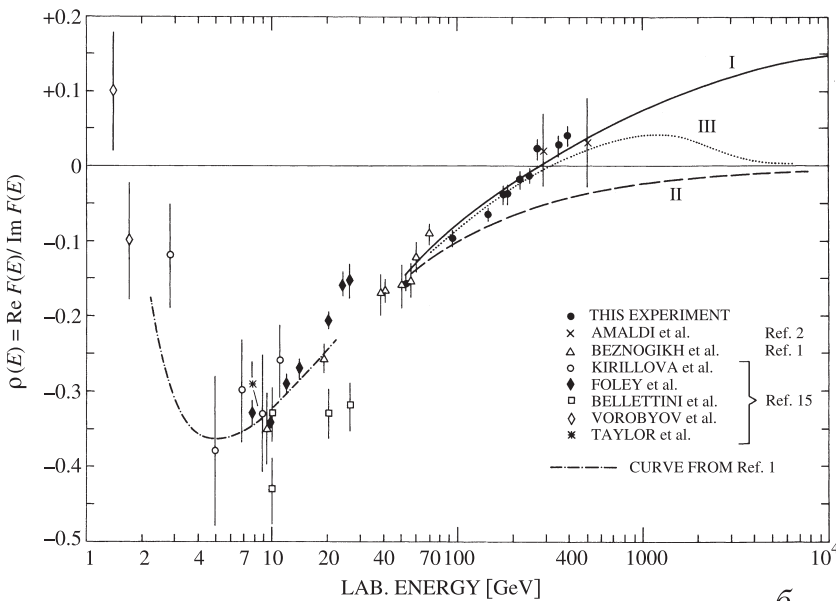
В 1975 году группой физиков ОИЯИ и Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе под руководством Э.Н.Цыганова и Д.Дрипки были совместно предложены и осуществлены на ускорителе ФНАЛ эксперименты по измерению электромагнитных формфакторов пиона и каона в упругом пион-электронном и каон-электронном рас-

¹ Gross D. et al. Real part of the p - p , p - d , and p - n forward scattering amplitudes from 50 to 400 GeV // Phys. Rev. Lett. 1978. V. 41. No. 4. P. 217–220.

Рис. 14а. Компиляция данных по параметру наклона дифракционного конуса pp -рассеяния $b(s)$. Данные получены в ЛВЭ ОИЯИ, ИФВЭ и ФНАЛ



a



б

Рис. 14б. Компиляция данных по $\rho(E)$ – параметру упругого pp -рассеяния. Данные получены в ЛВЭ ОИЯИ, ИФВЭ и ФНАЛ. Кривые – различные варианты расчета по дисперсионному соотношению

сеянии при энергии 100 и 250 ГэВ. Поскольку было необходимо существенно улучшить пространственное и угловое разрешение спектрометра, в него были включены прецизионные дрейфовые камеры, имевшие рекордную координатную точность, составляющую 55 мкм. Камеры с такими параметрами были созданы В.П.Пугачевичем, Д.В.Уральским и М.Д.Шафрановым.



Д.Дрилки (США), М.Турала (ПНР), Э.Н.Цыганов во время подготовки спектрометра к рабочему сеансу на ускорителе ИФВЭ

В этой серии экспериментов был впервые измерен электромагнитный радиус отрицательного каона, который оказался равным $(0,53 \pm 0,05)$ фм.

Совместная аппроксимация результатов упругого пион-электронного рассеяния экспериментов ИФВЭ и ФНАЛ при энергиях 50, 100 и 250 ГэВ позволила получить значение радиуса пиона, равное $(0,636 \pm 0,024)$ фм.

Одновременное (в одном эксперименте) измерение упругого рассеяния пионов и каонов на электроны при энергии 250 ГэВ позволило впервые провести прямое экспериментальное определение разности их формфакторов: $\langle r_{\pi}^2 \rangle - \langle r_k^2 \rangle = (0,16 \pm 0,06)$ фм², что хорошо согласуется с указанными выше отдельными измерениями.

Группа Ю.А.Панебратцева активно участвует в эксперименте STAR, а группа А.Г.Литвиненко – в эксперименте PHENIX на встречных пучках коллайдера RHIC. Коллайдер релятивистских адронов и ядер (RHIC), расположенный в Брукхейвенской национальной лаборатории (BNL), был введен в эксплуатацию в 2000 году. Он ориентирован на изучение столкновений ядер вплоть до золота (Au) при энергии до $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ на нуклонную пару, а также поляризованных протонов.

Таким образом, до запуска LHC на RHIC будет изучаться столкновения ядер при самых высоких энергиях (больше чем в 10 раз превышающих энергию столкновений на SPS в ЦЕРНе).

В скором времени после обнаружения эффекта гашения струй (в первом сеансе 2000 года) коллаборацией PHENIX было принято решение расширить область идентификации частиц до импульсов порядка 10 ГэВ/с. Группы из университета Цукубо, научных центров ОИЯИ и BNL приняли участие в реализации этого проекта, полу-

чившего название «High p_t project». В проекте предполагалось расширить область идентификации частиц за счет установки стенки из черенковских счетчиков с аэрогелевым радиатором. Детектор PHENIX имеет развитую систему идентификации частиц и ориентирован на изучение ядерных столкновений с большим набором пробников, прежде всего тех, что несут информацию о ранней стадии реакции. Вместе с существующей системой идентификации частиц аэрогелевые счетчики с коэффициентом преломления n порядка 1,01 позволяют разделять пионы, каоны и протоны (антипротоны) до импульсов порядка 10 ГэВ/с.

В результате напряженной совместной работы групп первая половина аэрогелевого детектора была успешно смонтирована в ноябре 2003 года. В настоящее время продолжается набор статистики с новой детекторной подсистемой. Аэрогелевый детектор работает без сбоев, и коллаборация PHENIX планирует иметь новые экспериментальные данные, проливающие свет на природу эффекта гашения струй.

Большая работа проведена сотрудниками лаборатории по эксперименту STAR.

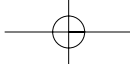
В результате были измерены инклюзивные распределения адронов по поперечному импульсу в широком диапазоне по центральности в Au+Au столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 130$ ГэВ. Выход адронов оказался подавлен в области больших поперечных импульсов в центральных событиях по сравнению с периферическими столкновениями и нуклон-нуклонными. В периферических взаимодействиях подавления по отношению к нуклон-нуклонным не наблюдается. Подавление непрерывно меняется в области промежуточных центральностей столкновений. Полученные результаты свидетельствуют о сильном влиянии ядерной среды в области больших поперечных импульсов адронов в столкновениях тяжелых ионов при высоких энергиях.

Сотрудничество с американскими физиками принесло и другие новые ценные результаты.

В 1976 году Э.Н.Цыгановым была теоретически предсказана возможность отклонения траекторий заряженных частиц изогнутыми монокристаллами. Утверждалось, что траектории частиц, захваченных в режим каналирования в кристалле, будут следовать за направлением изогнутых кристаллографических плоскостей вплоть до некоторого критического радиуса, который зависит от массы и скорости частицы, ее заряда и от интенсивности межатомного электрического поля кристалла. При каналировании реализуется режим устойчивого движения, в который могут захватываться положительно заряженные частицы, вошедшие в кристалл под углом относительно кристаллографических осей или плоскостей меньше некоторого критического значения. Критический угол характеризует предельную поперечную кинетическую энергию частицы и определяет условие ее захвата в процессе каналирования.

Для проверки возможности отклонения пучка изогнутым монокристаллом в 1979 году был поставлен опыт на синхрофазотроне ОИЯИ. В коллектив экспериментаторов вошли специалисты из ЛВЭ, Института ядерных исследований в Сверке (Польша), Физико-технического института в Харькове (Украина), Томского политехнического института, Радиового института в Ленинграде, Фермиевской ускорительной лаборатории и Государственного университета в Нью-Йорке.

В результате тонкого эксперимента было установлено, что пучок протонов с энергией 8,4 ГэВ, попавших в режим каналирования, отклоняется на различные углы в диапазоне до 26 мрад от направления падающего пучка.



Так было установлено существование нового, не известного ранее явления, показано, что с помощью изогнутого кристалла можно управлять траекториями заряженных частиц.

Следующим шагом было доказательство возможности вывода пучка из ускорителя с помощью изогнутого монокристалла. Эксперимент был поставлен на пучке протонов синхрофазотрона ОИЯИ при трех значениях их энергии: 4,2, 6,0 и 7,5 ГэВ.

В 1984 году результаты этого эксперимента подтвердили, что с помощью изогнутого монокристалла пучок протонов выведен из синхрофазотрона.

Таким образом, на стыке наук – кристаллографии, физики электромагнитных взаимодействий частиц высоких энергий и физики ускорителей – родилось новое научное направление.

Работа получила высокую оценку – в 1996 за цикл работ «Разработка новых методов управления пучками частиц высоких энергий на современных ускорителях с помощью изогнутых кристаллов и их реализация» Э.Н.Цыганов и А.М.Таратин от ОИЯИ и ряд сотрудников Института физики высоких энергий (Серпухов) и Санкт-Петербургского института ядерной физики были удостоены Государственной премии РФ в области науки и техники.

7. Совместные исследования ЛВЭ–RIKEN

Основной целью совместного ЛВЭ–RIKEN эксперимента явилось изучение спиновой структуры ${}^3\text{He}$ (${}^3\text{H}$) на расстояниях, недостижимых в настоящий момент, с использованием электромагнитных пробников посредством измерения угловых зависимостей тензорных анализирующих способностей A_{yy} , A_{xx} , A_{xz} в реакциях $d+d \rightarrow {}^3\text{He}+n$ и $d+d \rightarrow {}^3\text{H}+p$. Эти поляризационные наблюдаемые величины чувствительны к спиновому распределению нейтрона (протона) в ${}^3\text{He}$ (${}^3\text{H}$) на малых расстояниях в рамках приближения однонуклонного обмена. Наблюдается сильная чувствительность этих поляризационных наблюдаемых величин к использованной волновой функции трехнуклонной связанной системы, в особенности при малых углах испускания. С другой стороны, так как ${}^3\text{He}$ и ${}^3\text{H}$ являются зеркальными по зарядовой симметрии, отличие в их наблюдаемых величинах может быть интерпретировано в терминах нарушения зарядовой симметрии. Измерение тензорных анализирующих способностей, которые в первом порядке не чувствительны к кулоновским коррекциям, в реакциях $d+d \rightarrow {}^3\text{He}+n$ и $d+d \rightarrow {}^3\text{H}+p$, особенно при больших импульсах, могло бы обеспечить дополнительную информацию о природе нарушения зарядовой симметрии. Коллаборация ЛВЭ–RIKEN провела измерение на установке SMART тензорных A_{yy} , A_{xx} , A_{xz} и векторной A_y анализирующих способностей на пучке поляризованных дейтронов циклотрона осенью 2000 года. Данные были измерены со статистической погрешностью $\pm 0,02$ при энергиях 270 и 200 МэВ во всем угловом диапазоне для реакции $d+d \rightarrow {}^3\text{H}+p$. Тот же самый набор анализирующих способностей был получен для канала $d+d \rightarrow {}^3\text{He}+n$ при 270 МэВ между 0° и 120° в системе центра масс.

Эти исследования планируется продолжить на пучках поляризованных дейтронов ускорительного комплекса ЛВЭ.

