

539.12(063)

XIX МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

С 23 по 31 августа 1978 г. в Токио состоялась XIX Международная конференция по физике высоких энергий. Конференции этой серии созываются под эгидой Союза чистой и прикладной физики (ЮПАП) один раз в два года и представляют собой форумы для обсуждения последних результатов исследований в этой бурно развивающейся сейчас области физики. Более 1100 делегатов из 50 стран мира приняли участие в этой конференции, представив на нее свыше 1200 работ. Такое обилие материалов предопределило и структуру конференции, которая первые три дня проводилась по принципу параллельных секций с обсуждением, наряду с оригинальными сообщениями, обзоров по узким проблемам.

Рапортерские доклады на пленарных заседаниях представляли обзоры ситуации в больших разделах физики высоких энергий. Список тем этих пленарных заседаний с фамилиями рапортеров и председателей выглядел следующим образом: Адрон-адронные реакции, малая множественность; рапортер В. А. Царев (СССР), председатель Э. Гольдвассер (США). Адрон-адронные реакции, большая множественность; рапортер Двобльд Р. (США), председатель Ван-Хов (ЦЕРН). Явления при больших l_T , структура струй; рапортер Р. Сосновский (Польша), председатель Ван-Дардел (Швеция). Прямое образование лептонных пар в адронных реакциях; рапортер Л. Ледерман (США), председатель Фальк-Вариан (ЦЕРН). Динамика адронных реакций; рапортер Г. Венециано (ЦЕРН), председатель Е. Вроблевский (Польша). Динамика реакций при высоких энергиях; рапортер Р. Филд (США), председатель Л. Д. Соловьев (СССР). Реакции e^+e^- ; рапортер Фельдман (США), председатель Шонпер (ФРГ). Спектроскопия частиц, эксперимент; рапортер Г. Флюгге (ФРГ) и Кэшмор (Англия), председатель Стаффорд (Англия). Спектроскопия частиц, теория; рапортер И. Хара, председатель И. В. Чувило (СССР). Реакции eN , μN и γN ; рапортер Е. Габатулер (ЦЕРН), председатель Паул (ФРГ). Нейтринные реакции; рапортер Титтель (ФРГ), председатель Конверси (Италия). Нейтринные реакции, данные на пузырьковых камерах; рапортер Ц. Балтай (США), председатель Колли (Англия). Теория слабых

взаимодействий и модели элементарных частиц; раппортер С. Вайнберг (США), председатель Х. Харари (Израиль). Квантовая хромодинамика и связанные проблемы; раппортер Б. Сакири (США), председатель Ц. Янг (США). Объединенные теории, супергравитация и новые идеи; раппортер А. Салам (Триест), председатель Р. Маршал (США). Будущие проекты в физике высоких энергий; раппортер Э. Гольдвассер (США). Заключительный доклад; раппортер Й. Намбу (США), председатель Такеда (Япония).

Параллельно конференции на специальной секции состоялось обсуждение проектов будущих ускорительных и накопительных установок на высокие энергии, резюме которого было представлено Э. Гольдвассером (Батавия, США) на пленарном заседании.

Введение в строй в последние годы новых и существенная модернизация запущенных ранее ускорительных и накопительных установок (протонный синхротрон на энергию 400 Гэв в ЦЕРНе (Женева), повышение энергии до 470 Гэв на таком же ускорителе в Батавии (США), доведение энергии в e^+e^- накопителе DORIS в DESY (Гамбург, ФРГ) до 10 Гэв и т. д.) позволило с помощью нового поколения сложных, высокоавтоматизированных детекторов частиц высоких энергий существенно расширить и интенсифицировать исследование, повысить их результативность и надежность получаемых результатов. В результате комплексных теоретических и экспериментальных исследований различных проблем физики элементарных частиц, приведших в последние годы к ряду крупных открытий и обнаружению закономерностей принципиально нового характера, получили существенное развитие наши представления о свойствах микромира, и сейчас мы, по-видимому, находимся на пороге построения единой картины субатомного мира. При этом оказалось, что информация самого различного рода из, казалось бы внешне не связанных между собой областей этого раздела современной физики играет очень важную роль при выяснении наиболее существенных сторон изучаемых явлений.

Остановимся на главных характеристиках адрон-адронных процессов. Представленные на конференции новые данные об энергетических зависимостях полных сечений pp -, p^-p^- -, np -, pn -, Kp -, Kp^- -взаимодействий, полученные на пучках от ускорителя в Батавии (США) (сотрудничество Брукхейвен — Батавия — Рокфеллер ун-т), показывают, что до импульсов 370 Гэв/с они продолжают расти, а разности полных сечений взаимодействия частиц и античастиц с протонами уменьшаются с ростом энергий в соответствии со следствиями теоремы Померанчука.

В комбинации с данными из исследований в космических лучах эти результаты указывают на то, что полные сечения растут с энергией как ln^2s , где s — квадрат полной энергии взаимодействующих частиц в СЦМ. Отметим, что такой рост отвечает максимально допустимому в рамках общих требований теории поля (Фруассар и др.). Развитие новых методов исследований процессов рассеяния на рекордно малые углы (группа ЛИЯФ с низозионными камерами нового типа, группа ОИИИ с газовыми сверхзвуковыми струями-мишенями в ускорителях) позволило детально изучить кулон-ядерную интерференцию в упругом рассеянии заряженных частиц. Это дало возможность измерить реальные части амплитуд A упругого рассеяния в π^-p -рассеянии в интервале импульсов 30—140 Гэв/с (сотрудничество ЦЕРН — Клермон — Ферран — Ленинград — Лион — Упсала), а также в pp -, pd - и pHe -рассеянии вплоть до энергий 400 Гэв (сотрудничество Батавия — Аризона — Дубна — Рокфеллер. ун-т — Рочестер. ун-т). Оказалось, что при энергиях 335 Гэв в нуклон-нуклонном рассеянии и 60 Гэв в π^-p -рассеянии отношения $Re A/Im A$ из отрицательных при меньших энергиях, переходя через нуль, становятся положительными при больших энергиях. Комплекс этих данных и данных о полных сечениях хорошо подтверждает справедливость дисперсионных соотношений и, как следствие, справедливость основных принципов квантовой теории поля и ряда весьма общих подходов к описанию этих явлений (теории полюсов Редже и т. д.), давая новую пищу для размышлений по поводу их дальнейшего описания. Так, вопреки теории Глаубера, скорости сужения дифракционных пиков упругого pd - и pHe -рассеяния оказались одинаковыми и постоянными при приближении к дифракционному минимуму, что, вероятно, свидетельствует о большой роли неупругих поправок в данном процессе. Об этом же свидетельствуют и экспериментально наблюдаемые осцилляции в t -зависимости сечений упругих pd - и pHe -рассеяний. Имеются и новые важные данные о свойствах упругого рассеяния за дифракционным пиком.

Так, в новых прецизионных экспериментах по упругому π^-p -рассеянию в интервале импульсов 1—3,5 Гэв/с, выполненных на недавно вошедшем в строй в Японии протонном синхротроне КЕК на энергию 12 Гэв, выяснилось, что с ростом энергии положения минимумов и максимумов сдвигаются в области меньших значений $-t$, а величина сечения в максимуме растет с ростом s . Любопытны также новые данные об упругом нейтрон-протонном рассеянии, полученные группой Мичиганского университета (США) на ускорителе в Батавии. Оказалось, что при энергии нейтронов 100 Гэв при $t = -1,25 (GeV)^2$ $d\sigma(np)/dt \approx 3d\sigma(pp)/dt$, но при энергии 280 Гэв эти сечения равны.

Однако измерения в области больших передач (до $14 (GeV/c)^2$) обнаруживают существенные отклонения от дифракционного характера, одно из возможных объясне-

ний которых — микроструктура протона ($\sim 0,4$ фм). Для более полного понимания этих явлений потребуются новые достаточно сложные эксперименты, поскольку величины $d\sigma/dt$ упругого NN -рассеяния при $E = 400$ Гэв и $-t = 14$ (Гэв/с)² имеет значения порядка 10^{-37} см²/(Гэв/с)².

Принципиально новые эффекты обнаружены при изучении рассеяния поляризованных протонов на поляризованных протонных мишенях в Аргоннской национальной лаборатории в США. Измерения в интервале энергий от 1 Гэв до 12 Гэв показывают, что разность сечений $\Delta\sigma_L = \sigma(\rightleftharpoons) - (\sigma\leftarrow)$ и один из корреляционных тензоров C_{LL} имеют сложные энергетические зависимости. Такое их поведение интерпретируется как факт существования ранее неизвестных двухбарийных резонансных pp -состояний. Одно из них с массой $M = 2260$ Мэв, шириной 200 Мэв и упругостью 20–30% считается 3F_3 — состоянием pp -системы с $J^P = 3^-$. Возможно, что имеются и другие такие состояния вида 1D_2 и 1G_4 . Свидетельства о возможном существовании двух барионных резонансных систем были получены ранее в ОИЯИ в исследованиях $\Lambda^0 p$ -комбинаций. Более подробно на этом явлении мы еще остановимся ниже. Получены данные о поляризации в упругом pp -рассеянии в новом интервале энергий 100–300 Гэв в опытах в ЦЕРНе и в Батавии. Оказалось, что поляризация довольно заметна. Например, при 300 Гэв в pp -рассеянии при $-t = 1,3$ (Гэв/с)² $P \approx 20\%$. Следует ожидать дальнейшего роста интереса к поляризационным явлениям.

Большой экспериментальный материал был представлен также по дифракционной диссоциации в pp - и pp -взаимодействиях при больших энергиях. По-прежнему противоречивы сведения об A_1 -мезоне с массой около 1,1 Гэв $J^{PC} = 1^{++}$ и распадом в основном по каналу $\rho\pi$. Многочисленные новые экспериментальные данные опять не прояснили вопрос его существования, как и вопрос о существовании нонета мезонов с $J^P = 1^+$. Новые данные о когерентной нуклонной дифракционной диссоциации получены в опытах Дубны — Аризонского университета — Лаборатории им. Ферми — Рочестерского университета в интервале энергии 50–400 Гэв на ускорителе в Батавии. Детальные сведения о $d^2\sigma/dt dM_x$ в реакциях типа $p\text{He} \rightarrow X\text{He}$ дают богатую информацию для анализа в рамках различных моделей, в частности для понимания механизма трехмерного обмена. Это же следует сказать и о новых многочисленных данных о квазидвухчастичных реакциях и по недифракционным процессам.

По-видимому, сейчас в рамках комбинированного подхода кварковых моделей и модели полюсов Редже можно дать удовлетворительное описание наблюдаемых экспериментальных данных. В теоретическом плане сейчас важно установить существование связей между редже-эйкональным подходом и квантовой хромодинамикой, которая, как будет показано ниже, претендует сейчас на роль динамической теории сильных взаимодействий. Указания на существование таких связей уже имеются, что было видно из сообщений В. И. Захарова, Д. Гросса и раппортерского доклада Г. Венециано.

Оказалось, что многочисленные данные по множественным процессам (только на эту конференцию было представлено более 200 работ) также находят удовлетворительное объяснение в рамках кварк-партоновых подходов. Так, например, экспериментально подтверждается вытекающая из кварк-глюонной модели адронов идея о том, что спектры вторичных пионов разных знаков должны отражать распределения по x_i и d -кварков в начальных адронах. Аналогичные сведения можно извлечь и из анализа спектров вторичных частиц в области фрагментации. Хорошо соответствуют новые данные о процессах с большими передачами предсказаниям правил кваркового счета (Матвеев — Мурадян — Тавхелидзе и Бродский — Фаррар), согласно которым должно иметь место соотношение $x d\sigma/dx \sim (1-x)^{2n-1}$, где n определяется параметрами модели.

Особенно большое внимание было уделено процессам с большой передачей импульса. Это связано как с прогрессом теории — доказано, что квантовая хромодинамика (КХД) приводит к модифицированной партоновой картине как инклюзивных, так и эксклюзивных процессов, — так и с новыми экспериментальными данными. Окончательно установлено нарушение скейлинга в глубоконеупругих процессах, причем характер нарушения и его количественная величина хорошо согласуются с предсказанием КХД. (Правда, величина отношения σ_L/σ_T оказывается пока непонятно большой ($\sim 0,21$)). Это же можно сказать и о процессе рождения $\mu^+\mu^-$ -пар в адронных соударениях. Одним из «камней преткновения» для КХД было слишком быстрое убывание сечений рождения адронов с большим p_T ($\sim p_T^{-8}$). Новые измерения в области $p_T = 8-16$ Гэв/с свидетельствуют о замедлении этого падения ($\sim p_T^{-6}$) и значительно лучше согласуются с КХД, хотя о полном согласии говорить пока еще рано. К этому же рода процессам следует отнести и так называемое кумулятивное рождение на ядрах, которым на конференции была посвящена целая секция (руководитель А. М. Балдин.) Основное внимание здесь было уделено кварк-партоновой картине этого явления, которая неплохо воспроизводит основные его закономерности и особенно подобие многих черт этого процесса и процессов с большими p_T .

Следует, однако, заметить, что в ряде случаев роль неасимптотических поправок в достигнутой сейчас экспериментальной области энергий достаточно велика, и тре-

буются новые исследования этого вопроса. С экспериментальной точки зрения необходимо отрабатывать методику анализа многочастичных событий, где главной проблемой является идентификация адронных струй, в которые превращаются первоначальные кварки или глюоны. Начало такой работы уже положено, и можно говорить о некоторых данных о структуре событий (не отдельных частиц, а больших их конгломератов) с большими поперечными переданными импульсами p_T . Так, например, при исследованиях в Батавии с методикой калориметрического триггера установлен скейлинг в распределении частиц в струе по продольному импульсу (независимость распределения от импульса струи). В опытах на SPS (ЦЕРН) было обнаружено, что средний электрический заряд в струе стремится к $\frac{1}{3} e$, когда доля импульса соответствующих частиц стремится к единице. Установлен еще ряд закономерностей как с относительно ясной интерпретацией, так и еще требующих дальнейшего анализа.

Большой материал накоплен сейчас в исследованиях процессов рождения лептонов в адрон-адронных взаимодействиях. Так в ЦЕРНе на встречных пучках величина $d\sigma/dM_{\mu^+\mu^-}$ измерена вплоть до $M_{\mu\mu} = 15 Gэв$. В целом можно говорить, что эта группа процессов объясняется в рамках КХД, где она рассматривается как эффект аннигиляции пары кварк — антикварк в лептонную пару $\mu^+\mu^-$. Однако имеются трудности в понимании поперечного импульса пары.

Следующим важным разделом исследований по физике высоких энергий, широко обсуждавшимся на конференции, были исследования e^+e^- -аннигиляций в адронные состояния на встречных электрон-позитронных пучках вплоть до энергий $2 \times 5 Gэв$. Сначала отметим новые попытки детального исследования возможного существования новых векторных мезонов в интервале масс от 1 до 3 $Gэв$. Имеются указания, что такие мезоны могут существовать, но надежных сведений пока нет.

Важным является вопрос о величине полного сечения e^+e^- -аннигиляции в адронные состояния. Обычно экспериментальные данные об этой величине представляются в виде отношения $R = \frac{\sigma(e^+e^- \text{ адроны})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ в рамках квантовой электродинамики (КЭД) хорошо изучено. Оно имеет энергетическую зависимость вида $1/s$. В рамках КХД процесс $e^+e^- \rightarrow$ адроны рассматривается как аннигиляция e^+e^- в пару $q\bar{q}$ с дальнейшим переходом кварка и антикварка в различные адронные состояния. Тогда в однофотонном приближении сечение аннигиляции в адроны тоже должно быть пропорционально $1/s$, а величина R должна быть константой, численно равной сумме квадратов зарядов всех кварков, формирующих адронные состояния при данной полной энергии системы. Измерения проводились на двух основных e^+e^- -накопителях на большие энергии SPEAR в SLAC (Стэнфорд, США) и DORIS в DESY (Гамбург, ФРГ).

Величина R растет с энергией от некоторого малого значения (порядка 0,1) при энергии 1 $Gэв$ до $R = 2$ при 1,3 $Gэв$, затем до энергии около 2 $Gэв$ $R = 2$ и не меняется с энергией, свидетельствуя, что в этой области энергий проявляются три кварка u -, d - и s - с тремя цветами каждый. Интервал энергий от 2 $Gэв$ до 3 $Gэв$ пока трудно характеризовать однозначно ввиду противоречивости данных различных экспериментальных групп. Затем начинается область Ψ -мезонов. Здесь расположено несколько резонансов, которые не дают возможности анализировать поведение величины R с точки зрения весьма общих кварковых подходов. Как известно, узкие J/Ψ (3,1)-мезон и Ψ' (3,7)-мезоны являются состояниями со скрытым квантовым числом чарма (чармониями, распадающимися на лептонные пары и адронные состояния без чарма). Далее расположены широкие резонансные состояния, которые интерпретируются как связанные состояния мезон — антимезон, каждый из которых уже с открытым квантовым числом чарма. Более легкие из них D -мезоны $D^0 = (cu)$ и $D^+ = (c\bar{d})$ и соответственно \bar{D} -мезоны, $\bar{D}^0 (u\bar{c})$ и $D^- = (d\bar{c})$, и более тяжелые мезоны $F^+ = (cs)$ и $F^- = (\bar{c}s)$. Первые имеют массы порядка 1800 $Mэв$, а вторые по новым измерениям имеют $m_F = 2,03 Gэв$ и $m_{F^*} = 2,14 Gэв$. Указанная выше зона широких резонансов простирается вплоть до энергий порядка 5 $Gэв$. Здесь величина R имеет значение около 4,7, а систематических деталей данных при энергиях более 5 $Gэв$ еще не получено. При энергии 10 $Gэв$ начинается область Υ -мезонов, которые считаются аналогами Ψ -мезонов, но состояниями уже новых b -кварков с $Q = -1/3$. Новые экспериментальные данные о Υ - и Υ' -мезонах, представленные на конференции группами, работающими на DORIS, выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} m_{\Upsilon} &= 9,46 \pm 0,01 Gэв, & \Gamma_{e^+e^-} &= 1,3 \pm 0,2 кэв, \\ B_{\mu\mu}^{\Upsilon} &= 2,6 \pm 1,4\%, & \Gamma_{tot}^{\Upsilon} &\geq 25 кэв, \\ m_{\Upsilon'} &= 10,10 \pm 0,01 Gэв, & \Gamma_{\Upsilon'}^{e^+e^-} &= 0,32 \pm 0,010 кэв. \end{aligned}$$

Кроме того, анализ спектров эффективных масс $\mu^+\mu^-$ -комбинаций, полученных группой Ледермана в опытах в Батавии, с учетом данных об Υ - и Υ' -мезонах свидетельствует о существовании третьего мезона Υ'' с массой 10,38 $Gэв$.

Анализ величины R в этой области энергий нужно вести также с учетом данных о новом тяжелом лептоне. Первые указания на его существование были получены в 1975 г. при анализе лептонных пар, генерированных в e^+e^- -аннигиляциях совместно с другими частицами.

На конференции в Токио обсуждались результаты уже 15 опытов по этому вопросу. Итоги этих обсуждений можно суммировать следующим образом. Существует тяжелый τ -лептон с массой $(1782 \pm 3) M_{\text{эв}}$ со спином, равным $1/2$, распадающийся со временем жизни менее 10^{-12} сек по $V-A$ -варианту слабого взаимодействия, о чем свидетельствует значение параметра Мишеля в спектре электронов от τ -распада: $\rho_{\tau} = 0,83 \pm 0,19$ (теория для $V-A$ дает $\rho_{\tau} = 0,53$), что исключает $V+A$ -вариант ($\rho_{\tau} = -0,15$) и чистые V - или A -варианты ($\rho_{\tau} = 0,19$). Практически можно утверждать также, что есть новое нейтрино ν_{τ} , экспериментальное ограничение на массу которого $m(\nu_{\tau}) < 250 M_{\text{эв}}$.

Поскольку масса τ -лептона велика, то, кроме лептонных каналов распада $\tau^- \rightarrow l \nu_{\tau} \tilde{\nu}_l$ (где l — электрон или μ -мезон, $\tilde{\nu}_l$ — соответствующее антинейтрино), на которые приходится по 20% вероятности распада, открыты также и каналы распада с адронами: $\tau^- \rightarrow \nu_{\tau} A^-$, где $A^- = \pi^-, \rho^-, A_1^-$ и т. д. Кстати, распад $\tau^- \rightarrow \nu_{\tau} A_1^-$ будет уникальной возможностью решить вопрос о существовании A_1 -мезона, поскольку, в отличие от адронных реакций, здесь нет проблемы взаимодействия с фоном в конечном состоянии.

Возвращаясь к вопросу об аннигиляции e^+e^- в адроны, следует еще сказать о топологических свойствах адронных струй, которые в интервале энергий между областями Ψ - и Υ -мезонов имеют структуру, следующую из двухкварковой картины, разлета начального адронного состояния, а при энергии, равной массе Υ -мезона, уже структуру трехглюонного разлета.

Приведенные основные факты, полученные при изучении e^+e^- -аннигиляций, особенно открытия Υ -мезонов и τ -лептона, имеют огромное значение для формирования современных представлений о микромире, о чем речь пойдет несколько ниже.

Большой интерес на конференции встретили работы по экспериментальному поиску и теоретической интерпретации экзотических адронных состояний — дибарионов, барион-антибарионных систем и других. Обсуждение этих результатов, в частности, дипротонного резонанса $2260 M_{\text{эв}}$ и указаний на резонансы в $\Delta^0 p$ -системе, полученные в Дубне несколько лет назад, содержалось в ряде докладов на параллельных секциях и пленарных заседаниях, в рапорттерских докладах Г. Флюгге, И. Хары и в заключительном докладе И. Намбу. Представляет значительный интерес работа по изучению образования двухбарионных резонансов с помощью пучков γ -квантов. В частности, аномалия в энергетической зависимости поляризации протонов при фоторасщеплении дейтона γ -квантами с энергией $550 M_{\text{эв}}$ интерпретируется как указание на существование дибарионного состояния с массой $2380 M_{\text{эв}}$, шириной $\Gamma \sim 100 M_{\text{эв}}$ и квантовыми числами $J^P = 3^+, I = 0$.

Особенное значение для проверки предсказаний модели кваркового мешка имеет поиск дибариона с двойной странностью и массой в районе $2150 M_{\text{эв}}$, который можно рассматривать как сильно связанное состояние в системе $\Lambda^0 \Lambda^0$ -гиперонов, с $J^P = 0^+$ и энергией связи $\sim 80 M_{\text{эв}}$. Таким образом, данное состояние было бы стабильным по отношению к сильным взаимодействиям. В докладе Кисья (БНЛ) были доложены предварительные данные по поиску этого состояния методом недостающей массы в реакции $p + p \rightarrow K^+ K^+ X_0$ при энергии начального протона $34 G_{\text{эв}}$. Результаты опыта отрицательны, авторы намереваются продолжить поиски, увеличив чувствительность аппаратуры. Указания на существование $\Lambda^0 \Lambda^0$ -систем с положительными энергиями связи были получены при изучении реакции $\pi^- p \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$ группой ИТЭФ в Серпухове. Изучение барион-антибарионных состояний (начало этого направления положено работами Шапиро в ИТЭФ), получивших наименование бариониев, также весьма актуально в свете этих концепций. В ряде докладов обсуждались теоретические результаты, относящиеся к физике дибарионов (Матвеев, Сорба, де Сварт и др.). Несомненно, изучение дибарионных систем — перспективное направление физики элементарных частиц.

Большое внимание на конференции было уделено квантовой хромодинамике (КХД). Для выяснения принципиальных вопросов КХД важную роль играют недавние работы Грибова и Полякова. Очень популярны также так называемые инстантоны (Белавин, Поляков, Тюпкин, Шварц). Инстантонные решения продемонстрировали нетривиальную топологическую структуру вакуума и описывают туннелирование между состояниями с различными значениями топологического заряда цветного векторного глюонного поля.

Как известно, одной из наиболее простых формулировок свойства невылетания кварков явилась модель кваркового мешка, понятие которого возникло благодаря пионерским работам дубненских теоретиков, а также теоретиков из Массачусетского технологического института (США) и других. В работе Каллана, Дашена и Гросса (Принстон, США), доложенной на параллельной секции, предложено обоснование

картины кваркового мешка в рамках квантовой хромодинамики, исходя из рассмотрения инстантонов во внешнем поле (поле кварков). Получено утверждение о фазовом переходе при некотором критическом поле между плотной фазой (обычный вакуум, много инстантонов) и разреженной фазой (мало инстантонов, внутри адрона).

Обсуждалась также возможность вычисления параметров ряда резонансов в рамках правил сумм квантовой хромодинамики для процесса аннигиляции $e^+e^- \rightarrow$ адроны (Вайнштейн, Захаров, Шифман).

Теперь обратимся к изложению основных моментов современного понимания проблем слабых и электромагнитных взаимодействий элементарных частиц.

Открытие нейтральных токов в нейтринной физике сделали весьма вероятной для описания этого круга явлений гипотезу Вайнберга — Салама об единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий с единственным параметром — углом Вайнберга θ_W , дающим связь констант этих взаимодействий G_F и e в виде $(1/\sqrt{2})G_F = e/8U_W \sin \theta_W$ где M_W — масса промежуточного заряженного векторного бозона слабых взаимодействий.

Теория позволяет вычислить сечения чисто лептонных процессов (например, $\nu_\mu e \rightarrow \nu_\mu e$) в терминах угла θ_W . Используя КХД или другие модельные представления, можно рассмотреть также лептон-адронные столкновения типа $l + N \rightarrow l + A$, где A — любое адронное состояние, а l — как заряженный (e^- , μ^-), так и нейтральный лептон (ν_e , ν_μ). Эта идея стимулировала огромные экспериментальные программы по исследованиям как упругих, так и неупругих взаимодействий с участием лептонов больших энергий.

Экспериментальная ситуация в нейтринной физике при ускорительных энергиях суммируется по итогам Токийской конференции следующим образом. Прежде всего, в доступном сейчас интервале энергий нейтринно до 200 Гэв полные сечения нейтринно-электронных и нейтринно-нуклонных взаимодействий линейно зависят от энергии нейтринно. Данные для чисто лептонных процессов приведены ниже в табл. 1. Для нейтринно-адронных полных сечений имеем

$$\sigma_{\text{tot}}^{\nu} (E_{\nu}) = (0,63 \pm 0,05) E_{\nu} \cdot 10^{-38} \text{ см}^2,$$

$$\tilde{\sigma}_{\text{tot}}^{\nu} (E_{\nu}) = (0,31 \pm 0,04) E_{\nu} \cdot 10^{-38} \text{ см}^2,$$

где E_{ν} в Гэв. Таким образом,

$$\frac{\sigma_{\text{tot}}^{\nu}}{\tilde{\sigma}_{\text{tot}}^{\nu}} = 0,49 \pm 0,05.$$

Из линейного роста сечения следует оценка на массу промежуточного бозона

$$M_W > 30 \text{ Гэв.}$$

Теперь перейдем к неупругим процессам в нейтринно-адронных взаимодействиях. Как известно, свойства нейтринных процессов определяются тремя структурными функциями, зависящими от квадрата четырехмерного переданного адронам импульса — Q^2 и переданной энергии ν . В рамках гипотезы о скейлинговой инвариантности полагается, что функции $W_i(Q^2, \nu)$ зависят не по отдельности от Q^2 и ν , а только от их отношения $x = -Q^2/2M\nu$ и вводятся новые структурные функции (при Q^2 и $\nu \rightarrow \infty$ и фиксированном x): $MW_1(Q^2, \nu) = F_1(x)$, $\nu W_2(Q^2, \nu) = F_2(x)$ и $MW_3(Q^2, \nu) = F_3(x)$. Для этих функций в рамках партонной картины для партонов со спином, равным 1/2, имеет место соотношение Каллана — Гросса $2xF_1(x) = F_2(x)$. Таким образом, в этом случае свойства нейтринных процессов определяются только двумя структурными функциями $F_1(x)$ и $F_3(x)$, первая из которых связана с такой же структурной функцией в глубоко-неупругом электрон-нуклонном рассеянии. Анализ экспериментально измеренных характеристик нейтринных процессов, обусловленных заряженными токами, свидетельствует о том, что партоны тоже являются левыми частицами. Различные Q^2 -зависимости структурных функций в различных интервалах переменной x свидетельствуют в соответствии с предсказаниями КХД о нарушении скейлинга в реализованном сейчас интервале $Q^2 < 100 (\text{Гэв})^2$ при энергиях нейтринно до 200 Гэв. Найденные из опытных данных усредненные характеристики и моменты распределения нейтринных процессов в общем соответствуют предсказаниям КХД и дают богатую информацию о свойствах партонной модели адронов и ее динамике.

Наконец, приведем характеристики эффектов от нейтральных токов в нейтринных взаимодействиях с электронами и адронами. Количественно вклад эффектов от нейтральных токов суммируется в табл. 1.

По всем этим данным для угла Вайнберга сейчас получается следующее значение:

$$\sin^2 \theta_W = 0,23 \pm 0,02.$$

Вопрос о соответствии теории Салама — Вайнберга экспериментальным данным можно теперь проиллюстрировать набором констант связи нейтральных токов (табл. II), в которой через $u_{L,R}$ и $d_{L,R}$ обозначены константы нейтральных токов левых и правых u - и d -кварков.

Особый интерес приобретает теперь исследование несохранения P -четности в eN -взаимодействиях, предсказанного моделью Вайнберга — Салама. Явление было впервые обнаружено за несколько месяцев до конференции в опыте, проводимом Барковым

Таблица I

Процессы	Экспериментальные значения сечений	$\sin^2 \vartheta_W$	Предсказание теории Вайнберга — Салама с $\sin^2 \vartheta_W = 0,25$
1. Чисто лептонные $\tilde{\nu}_e e^- \rightarrow \tilde{\nu}_e e^-$ $\nu_\mu e^- \rightarrow \nu_\mu e^-$ $\tilde{\nu}_\mu e^- \rightarrow \tilde{\nu}_\mu e^-$	$(5,7 \pm 1,2) \cdot 10^{-42} E_\nu, \text{ см}^2$ $(1,7 \pm 0,5) \cdot 10^{-42} E_\nu, \text{ см}^2$ $(1,8 \pm 0,9) \cdot 10^{-42} E_\nu, \text{ см}^2$	$0,29 \pm 0,05$ $0,21 \pm 0,09$ $0,30 \pm 0,06$	5,0 1,5 1,3
2. Упругое рассеяние $\nu_\mu p \rightarrow \nu_\mu p$ $\tilde{\nu}_\mu p \rightarrow \tilde{\nu}_\mu p$	$(0,11 \pm 0,02) \sigma (\nu_\mu n \rightarrow \mu^- p)$ $(0,19 \pm 0,08) \sigma (\nu_\mu p \rightarrow \mu^+ n)$	$0,26 \pm 0,06$ $\approx 0,5$	0,12 0,11
3. Образование одного π^0 -мезона $\nu_\mu N \rightarrow \nu_\mu N \pi^0$ $\tilde{\nu}_\mu N \rightarrow \tilde{\nu}_\mu N \pi^0$	$(0,45 \pm 0,08) \sigma (\nu_\mu N \rightarrow \mu^- N \pi^0)$ $(0,57 \pm 0,11) \sigma (\tilde{\nu}_\mu N \rightarrow \mu^+ N \pi^0)$	$0,22 \pm 0,09$ $0,15 \pm 0,52$	0,42 0,60
4. Инклюзивное рассеяние $\nu_\mu N \rightarrow \nu_\mu + \dots$ $\tilde{\nu}_\mu N \rightarrow \tilde{\nu}_\mu + \dots$	$(0,29 \pm 0,01) \sigma (\nu_\mu N \rightarrow \mu^- + \dots)$ $(0,35 \pm 0,025) \sigma (\tilde{\nu}_\mu N \rightarrow \mu^+ + \dots)$	$0,24 \pm 0,2$ $0,3 \pm 0,1$	0,30 0,38

Таблица II

Константа	Теория с $\sin^2 \vartheta_W = 0,25$	Опыт	Константы	Теория с $\sin^2 \vartheta_W = 0,25$	Опыт
g_V	$-\frac{1}{2} + 2 \sin^2 \vartheta_W = 0$	$0,00 \pm 0,01$	d_L	$-\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \sin^2 \vartheta_W = -0,42$	$-0,40 \pm 0,07$
g_A	$-\frac{1}{2} = -0,5$	$-0,55 \pm 0,10$	u_R	$-\frac{2}{3} \sin^2 \vartheta_W = -0,17$	$-0,19 \pm 0,06$
u_L	$\frac{1}{2} - \frac{2}{3} \sin^2 \vartheta_W = 0,33$	$0,35 \pm 0,07$	d_R	$\frac{1}{3} \sin^2 \vartheta_W = 0,08$	$0,00 \pm 0,11$

и Золотаревым в Институте ядерной физики (Новосибирск). Было наблюдеено вращение плоскости поляризации при прохождении лазерного света через пары висмута, причем величина эффекта находится в хорошем согласии с теорией (И. Б. Хриплович и др.). Эта работа была представлена на конференции в Токио и вызвала большой интерес. Отметим, что две группы экспериментаторов (Оксфорд и Сизл) исследующих тот же эффект, имеют пока либо отрицательный результат, либо не соответствующий количественно теории.

Непосредственно перед конференцией был закончен опыт по изучению инклюзивного сечения рассеяния на дейтонах и водороде электронов, поляризованных по и против импульса. Целью этого эксперимента является поиск нарушения P -четности в eN -взаимодействиях. Действительно, теория дает для величины асимметрии

выражение

$$A \equiv \frac{\sigma_R - \sigma_L}{\sigma_R + \sigma_L} = \frac{9G_F Q^2}{20 \sqrt{2} \pi \alpha} \left[1 - \frac{20}{9} \sin^2 \vartheta_W + (1 - 4 \sin^2 \vartheta_W) \frac{1 - (1-y)^2}{1 + (1-y)^2} \right],$$

где $y = \nu/E$, ν — переданная энергия, σ_R , σ_L — сечения взаимодействия право- и левополяризованных электронов.

Согласно данным, полученным в SLACe, экспериментальное значение коэффициента A равно $A/Q^2 = -(9,5 \pm 1,6) \cdot 10^{-5} \text{ ГэВ}^{-2}$, что дает $\sin^2 \vartheta_W \approx 0,21$.

Из изложенного видно, насколько фундаментальны притязания единой теории Салама — Вайнберга в комбинации с КХД на описание большого комплекса экспериментальных данных. На конференции не обсуждалось практически никаких альтернатив этому теоретическому варианту. Отсюда видна исключительная важность дальнейших исследований по этим проблемам.

Была представлена новая богатая информация и о других слабых и электромагнитных процессах. Мы не имеем возможности излагать ее более или менее детально. Здесь можно отметить такие результаты, как новый верхний предел на относительную вероятность распада $\mu \rightarrow e\gamma$, который равен теперь $2 \cdot 10^{-10}$ (Лос-Аламос). Для верхнего предела относительной вероятности распада $\mu \rightarrow 3e$ приводились данные ОИЯИ: $B(\mu \rightarrow 3e) < 9 \cdot 10^{-9}$. На мезонной фабрике SIN в Швейцарии было показано, что относительные вероятности конверсии отрицательных мюонов в электроны и позитроны при мю-захвате ядрами серы меньше соответственно $1,8 \cdot 10^{-10}$ и $1,57 \cdot 10^{-9}$. Установлены новые уровни отсутствия процессов $\nu_\mu N \rightarrow eX$. При низких энергиях в опытах в ЦЕРНе с камерой Гаргамель найдено, что соответствующее сечение меньше $2 \cdot 10^{-3}$ от полного, а при высоких энергиях менее 0,05 (БЭБС) и менее 0,025 (Батавия).

В ЦЕРНе уточнены характеристики распадов Ω^- -гиперона. Для времени жизни найдена величина $\tau_\Omega = (0,82 \pm 0,06) \cdot 10^{-10} \text{ сек}$, а для вероятностей различных мод распада найдены следующие значения:

$$B(\Omega^- \rightarrow \Lambda K^-) = 67,0 \pm 2,2\%, \quad B(\Omega^- \rightarrow \Xi^0 \pi^-) = 24,6 \pm 1,9\%, \quad B(\Omega^- \rightarrow \Xi^- \pi^0) = 8,4 \pm 1,1\%.$$

Коэффициент асимметрии в распаде $\Omega^- \rightarrow \Lambda K^-$ найден равным $\alpha_\Omega = 0,06 \pm 0,14$. Отметим, что основные характеристики Ω^- -распада были впервые предсказаны в работах Вайнштейна, Захарова и Шифмана. По проблеме CP -нарушения в K -распадах были представлены результаты совместной работы ИТЭФ (СССР) — Падуя (Италия) по улучшению оценки верхнего предела вероятности распада $K_S^0 \rightarrow 3\pi^0$. Показано, что $|\eta_{00}|^2 < 0,31$.

Из работ по изучению электромагнитных характеристик адронов отметим новые данные о среднеквадратичных зарядовых радиусах K^- и K^0 -мезонов. В опытах сотрудничества ОИЯИ — Фермилаб — Калифорнийский университет по упругому K^- - e -рассеянию получено, что $\sqrt{\langle R_{K^-}^2 \rangle} = (0,5 \pm 0,07) \phi$, а в опытах в Батавии по K_L^0 — K_S^0 регенерации на электронах получено, что $\sqrt{\langle R_{K^0}^2 \rangle} = (0,23 \pm 0,07) \phi$, что соответствует сегодняшним теоретическим представлениям.

Обратимся теперь к проблеме систематики элементарных частиц. Известно, что в результате многочисленных исследований последнего десятилетия был достигнут существенный прогресс в систематике частиц (включая частицы-резонансы) в рамках симметрии $SU(6) \times SU(2)$ с применением преобразования Меллоши кварков токовых и кварков структурных.

Смущающим обстоятельством стало большое (порядка 130—150) число «элементарных» частиц — мезонов и баронов. Открытия ψ -мезонов, интерпретируемых как связанные $c\bar{c}$ -состояния кварков с новым квантовым числом чарма (очарования), а затем Υ -мезонов, интерпретируемых аналогичным образом как связанные $b\bar{b}$ -состояния кварков с еще одним новым квантовым числом «красота», совершенно по-новому поставили проблему систематики частиц. Очевидно, что существование c - и b -кварков приводит к существенному расширению семейства элементарных частиц, для систематики которых надо применять в случае n кварков $SU(n) \times SU(2)$ -симметрию. Поэтому возникает вопрос, а не является ли фундаментальным семейством адронов набор кварков с различными «запахами» u, d, s, c, b и т. д. При этом прежняя систематика превращается в аналог атомной физики.

Основания для такой постановки вопроса весьма серьезны, особенно в связи с открытием в последние годы упомянутых выше семейств Ψ - и Υ -мезонов и τ -лептона. Оказывается, что наиболее вероятной картиной микромира на самом «элементарном» сейчас уровне является следующая. Имеется глубокая лептон-кварковая симметрия. Поскольку нейтрино — частицы безмассовые, то частицы формируют следующие левые

$$\text{дублеты: } \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L.$$

Кроме того, имеются правые синглеты заряженных лептонов с массами e_R^- , μ_R^- , τ_R^- , а также кварковые синглеты q_R . Взаимодействия переносятся калибровочными векторными полями. Им соответствует четыре векторных бозона в универсальной теории слабых и электромагнитных взаимодействий: W^- , W^+ , Z_0 -бозоны и фотон γ , а также восемь безмассовых векторных глюонов g в квантовой хромодинамике, описывающей явления в мире адронов. Генерация масс промежуточных бозонов механизмом Хиггса нуждается во введении по крайней мере одного дублета скалярных мезонов Хиггса.

При такой формулировке спектроскопии элементарных частиц возникают следующие вопросы:

1. Существует ли t -кварк, чтобы составить третий дублет кварков? Ожидается, что t -состояния, аналог семейств Ψ - и Υ -мезонов, будут иметь массы порядка 30 Гэв . Запуск e^+e^- -накопителя на энергию $2 \times 19 \text{ Гэв}$ в DESY (ФРГ) нацелен в первую очередь на решение этой проблемы.

2. Появятся ли четвертая пара, пятая пара и д. т. дублетов лептонов и кварков? Это задача более далекого будущего (масса следующего qq -состояния может быть порядка 100 Гэв). Но здесь имеются ограничения из астрофизических данных на число нейтрино различных типов. Оказывается, что $N_\nu \leq 6$. Пока мы знаем три типа нейтрино: ν_e , ν_μ , ν_τ . Заметим, что современные сведения о свойствах микромира нуждаются только в трех кварковых дублетах.

3. Существуют ли, сколько их и каковы свойства промежуточных векторных мезонов? В рамках изложенных выше теоретических идей их массы оцениваются величинами порядка $70\text{--}100 \text{ Гэв}$. Сооружаемая в настоящее время в США накопительная pp -установка «Изабелла» на энергию $2 \times 400 \text{ Гэв}$, а также эксперименты на встречных pp -пучках в ЦЕРНе (1981—82 гг.) нацелены на решение именно этой задачи. Весьма интенсивно обсуждаются проекты e^+e^- -накопителей на энергии в интервале $2 \times 70 \text{ Гэв} \text{--} 2 \times 150 \text{ Гэв}$. Особенно интересны такие встречные e^+e^- -пучки как генераторы Z^0 -бозона. Поскольку он связан со всеми лептонами, то именно здесь, изучая реакции типа $e^+e^- \rightarrow l^+l^-$, мы узнаем, существуют ли новые тяжелые лептоны.

4. Существуют ли и каковы хиггсовы мезоны? Серьезных соображений об их возможной массе пока нет.

5. Какова природа феномена удержания кварков, на котором основаны идеи квантовой хромодинамики? Здесь нужны и новые экспериментальные данные о множественных процессах и дальнейшее развитие теоретических идей, связанных с решением этого круга проблем.

6. Имеет ли решение проблема создания единой теории микромира? Успех теории Салама — Вайнберга в объяснении с единой точки зрения слабых и электромагнитных взаимодействий вселяет надежды на возможное решение и этой глобальной проблемы. На конференции обсуждались модели с «большим» объединением всех известных видов взаимодействий.

Эти модели можно разделить на два больших класса: с простой и полупростой объединяющей группой. В первом варианте энергия, при которой взаимодействия расщепляются, очень велика: 10^{25} Гэв . Во втором варианте $10^4\text{--}10^6 \text{ Гэв}$. Любопытно, что из них следует нестабильность протона: первая даст для его времени жизни величину, большую 10^{37} лет, а вторая порядка $10^{29}\text{--}10^{30}$ лет. Эти модели, конечно, весьма интересны, но сегодня нет экспериментальных критериев для их обсуждения. К этому же классу попыток относятся и исследования по суперсимметриям и супергравитации. В рамках этих идей обсуждаются теоретико-групповые идеи объединения спинорных и бозонных полей, а также гравитации, которая появляется в расширенном виде: гравитон со спином, равным 2, и гравитино со спином, равным 3/2. Отметим большой вклад в эту проблему советских физиков (Е. С. Фрадкин, В. И. Огиевецкий, Д. В. Волков и др.).

Таким образом, даже такой краткий (и все же довольно объемный) обзор проблем, обсуждавшихся на конференции в Токио, свидетельствует об огромном прогрессе в развитии наших представлений о микромире на данном этапе и еще больших новостях, которые нас ожидают даже в ближайшее время.

Многие из обсуждавшихся выше проблем были представлены в УФН статьями: А. И. Вайнштейна, И. Б. Хрипловича (1974, т. 112), В. И. Захарова, Б. Л. Иоффе, Л. Б. Окуня (1975, т. 117), А. И. Вайнштейна, М. Б. Волошина, В. И. Захарова, В. А. Новикова, Л. Б. Окуня, М. А. Шифмана (1977, т. 123), Б. А. Арбузова, А. А. Логунова (1977, т. 123), Дж. Илиопулоса (1977, т. 123), Я. И. Азимова, Л. Л. Франкфурта, В. А. Хозе (1978, т. 124) и Д. А. Киржница (1978, т. 125).

И. В. Чувило