539.12

XV МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

(Киев, 26 августа—4 сентября 1970 г.)

XV Международная конференция по физике высоких энергий проходила в Киеве с 26 августа по 4 сентября 1970 г. Конференция проводилась при поддержке Международной ассоциации чистой и прикладной физики, Государственного комитета по использованию атомной энергии СССР, Академии наук СССР и Академии наук УССР; в подготовке конференции непосредственное участие принимали ОИЯИ (Дубна) и ИТФ (Киев). Работа Оргкомитета конференции, возглавляемого Н. Н. Боголюбовым и включавшего представителей ведущих научных учреждений, получила высокую оценку советских и зарубежных участников.

Подобные конференции, являющиеся наиболее представительными форумами специалистов в области физики высоких энергий, организуются через два года последовательно в США, Западной Европе и СССР. Нынешняя, собравшая более 800 делегатов, проводилась по следующей форме: первые три дня работало шесть параллельных секций, на которых были заслушаны и обсуждены оригинальные сообщения, пять дней было отведено для раппортерских докладов, явившихся обзором достижений по физике высоких энергий за последние два года, т. е. со времени Венской конференции. Кроме того, по программе конференции было проведено два семинара. На заседании «Дальнейшие перспективы развития физики высоких энергий» обсуждались вопросы ускорительной техники будущего (доклады Э. Маламуда, Дж. К. Уокера (Батавия, США), Б. П. Мурина (РТИ АН СССР), Э. Нэппа (Лос-Аламос), Э. М. Мак-Миллана (Калифорнийский университет, США), В. П. Саранцева (ОИЯИ), А. И. Алиханьяна (Ереванский физический институт), Б. П. Грегори (ЦЕРН) и Г. И. Будкера (ИЯФ СО АН СССР); на семинаре «Фундаментальные вопросы теории» обсуждались новейшие достижения квантовой теории поля, а также современные составные модели элементарных частиц (доклады М. А. Маркова (Москва), А. Салама (Трнест), Д. И. Блохинцева (ОИЯИ), Ч. Янга (Стоуни-Брук, США), Ченг и Ву (Стоуни-Брук), В. М. Матвеева (ОИЯИ), А. А. Логунова и О. А. Хрусталева (ИФВЭ) и Сакиты (США).

Для конференции было характерно обилие новых данных, полученных с точностью большей, чем ранее. Открытие новых черт уже известных явлений заменяло научные сенсации. Естественно, что многие проблемы так и остались открытыми. Это — нарушение теоремы Померанчука, существование кварков, спектроскопия тяжелых резонансов, расщепление A_2, CP-проблема, W-бозон и др. Ответ на них в будущем неразрывно связан с дальнейшим повышением энергии ускорителей и интенсивностью ускоряемых ими частиц. Это единственный путь для организации систематических исследований и получения надежных сведений о механизме взаимодействия элементарных частиц.

Мы попытаемся дать обзор основных направлений и достижений, представленных на конференцию и, естественно, не можем претендовать на полноту.

I. ЭКСПЕРИМЕНТ

1. Резонансы

На этой конференции не было потока сообщений о новых резонансах, столь характерных для предыдущих. Здесь, по-видимому, сказалось резкое повышение требований к точности работ по обнаружению резонансов.

Отметим два важных направления исследований:

а) Продолжаются поиски экзотических состояний, запрещенных в кварковой модели. Найден один такой резонанс —Z^*. Несмотря на довольно высокий уровень достоверности, к его существованию относятся с недоверием.

б) Года два тому назад был обнаружен уникальный эффект — расщепление пика, соответствующего резонансу A_2 ($I^G J^P = 1^-2^+$) — частице с массой около 1300 *Мэв*, что может означать либо существование принципиально нового явления, либо наличие двух резонансов с одинаковыми квантовыми числами и близкими массами. В любом случае расщепление A_2 угрожало бы основам схемы классификации частиц по унитарным мультиплетам. Вопрос о расщеплении A_2 после конференции остался открытым.

2. Адронные столкновения при высоких энергиях

Наиболее богатый экспериментальный материал был изложен в секциях, обсуждавших адронные столкновения при высоких энергиях; на конференцию были представлены важные новые данные, впервые полученные на Серпуховском ускорителе.

Несмотря на то, что упругое рассеяние вперед является наиболее полно исследованной областью высокоэнергетического рассеяния адронов, на конференцию было по-прежнему представлено много результатов по упругому рассеянию. В частности, были представлены наиболее детальные кривые дифференциальных сечений для $\pi \pm p$-, $K \pm p$-, pp- и $p\bar{p}$-рассеяний при различных передачах импульса.

С помощью Серпуховского ускорителя были измерены дифференциальные сечения упругого pp- и pd-рассеяния для передаваемого четырехимпульса $0{,}001 < |t| < 0{,}080$ (*Гэв/с*)^2 и в области интерференции между кулоновской и ядерной амплитудой рассеяния при 70 *Гэв* и 34 *Гэв*.

Были сообщены также предварительные результаты более точных измерений полных сечений π^-p-, K^-p- и $p\bar{p}$-взаимодействий в области импульсов до 65 *Гэв/с*. Величины полных сечений, полученные на Серпуховском ускорителе, совпадают при импульсах $p \leqslant 25$ *Гэв/с* с данными, полученными на других ускорителях. В области импульсов 20—65 *Гэв/с* они согласуются в пределах погрешностей с результатами предыдущих серпуховских измерений.

Полные сечения взаимодействия π^--мезонов с протонами σ_{tot} (π^-p) уменьшаются с ростом импульса до $p \approx 35$ *Гэв/с* и далее остаются постоянными в пределах $\sim$0,2 *мбн*. Если аппроксимировать полные сечения σ_{tot} (π^-p) при $p \geqslant 35$ *Гэв/с* линейной зависимостью от импульса p, то наклон этой прямой оказывается равным ($-0{,}005 \pm 0{,}004$) *мбн*/(*Гэв/с*).

Аналогичный вывод можно сделать также для полных сечений K^-p-взаимодействия. При импульсах $p \geqslant 35$ *Гэв/с* наклон энергетической зависимости сечения σ_{tot} (K^-p) оказывается близким к нулю: ($-0{,}005 \pm 0{,}006$) *мбн*/(*Гэв/с*).

С ростом импульса в области $p \geqslant 35$ *Гэв/с* полные сечения π^-p- и K^-p-взаимодействий обнаруживают постоянство и значительно отклоняются от зависимостей, вычисленных по полюсной реджиевской теории на основании данных при меньших энергиях. Энергетическая зависимость полных сечений взаимодействия антипротонов с протонами согласуется с расчетами.

Из совокупности приведенных результатов можно считать окончательно установленными следующие черты упругого рассеяния:

1) резкий пик вперед для всех этих реакций;

2) плавное поведение для $|t| \leqslant 1{,}2$ *Гэв*^{2} и сужение пика вперед для K^+p- и pp-рассеяний;

3) наличие провала при $|t| \approx 0{,}6$—$0{,}8$ *Гэв*^{2}, сопровождаемого вторичным максимумом, который убывает с ростом первичного импульса для K^-p-, $\pi^\pm p$- и pp-рассеяний.

На конференцию были представлены новые результаты по изучению зарядово-обменных рассеяний вперед и назад в различных интервалах импульсов; например, в np-зарядово-обменном рассеянии довольно ясно наблюдается пик вперед при всех импульсах с характерной шириной — m_π^2, а в $\pi^-p \to n\pi^0$-рассеянии назад виден сильный провал при $u \approx -0{,}25$ *Гэв*^{2}, сопровождаемый широким максимумом при $u \approx -0{,}7$ *Гэв*^{2}.

Были представлены новые результаты по измерению поляризаций в высокоэнергетическом рассеянии, изучению упругого рассеяния на большие углы, изучению

неупругих двухчастичных реакций, новые измерения отношения действительной и мнимой частей амплитуд рассеяния вперед, новые измерения полных сечений. Большинство полученных данных уточняет существующие представления о свойствах исследовавшихся процессов.

На конференцию было представлено большое количество экспериментальных работ, в которых изучались неупругие взаимодействия адронов как в ускорительной области энергий, так и в области энергий космических лучей. Однако экспериментальная информация здесь неодинакового качества. Если можно говорить, что сечения и множественность заряженных частиц известны достаточно хорошо, вплоть до очень высоких энергий ($\sim$1000 *Гэв*), то об угловых и импульсных распределениях вторичных частиц можно с высокой степенью достоверности говорить только в области ускорительных энергий.

3. Слабое взаимодействие

Проблема нарушения *CP*- и *T*-инвариантности все еще ждет своего решения. Процессы распада долгоживущего *K*-мезона, $K^0 \to 2\pi$ и $K^0 \to \pi l \nu$, являются по-прежнему единственным источником информации о нарушении *CP*-симметрии. Несколькими группами было сообщено о результатах измерения модуля амплитуды η_{00}, равной отношению амплитуд процессов распада долгоживущего нейтрального каона и короткоживущего K^0-мезона на два нейтральных пиона. Объединенные группы ИТЭФ и ОИЯИ получили значение $|\eta_{00}| = (2{,}02 \pm 0{,}23)\cdot 10^{-3}$, выделяющееся по точности среди результатов других авторов. Однако до сих пор существуют значительные расхождения в значениях параметра $|\eta_{00}|$, найденных разными группами. В настоящее время ситуация в определении «эта» такова: $|\eta_{+-}| = 1{,}90 \pm 0{,}005$; фаза η_{+-} определена довольно точно и равна 42,5°; фаза η_{00} найдена со значительной погрешностью и составляет 51°.

Наконец, начат новый качественный этап в исследовании свойств процессов $K \to 3\pi$: в настоящее время экспериментаторы ведут изучение этого распада на уровне статистики $\sim 10^6$ распадов.

Большое внимание уделялось измерению различия масс K^0_L- и K^0_S-мезонов; были получены еще более точные значения этой величины, которая играет важную роль в феноменологическом описании свойств системы нейтральных каонов.

Другой важной проблемой теории слабых взаимодействий является оценка эффектов высших порядков по константе слабых взаимодействий *G*. Одним из наиболее эффективных способов оценки величины старших порядков по *G* является изучение распада долгоживущего нейтрального каона на мюонную пару $\mu^+\mu^-$. Полученное на опыте отношение вероятности этого распада к вероятности всех остальных распадов ничтожно мало — $20\cdot 10^{-9}$, что позволяет установить довольно жесткий предел на константу обрезания λ ($\lambda \leqslant 8$ *Гэв*). Эта цифра значительно ниже той, которая обычно предполагается в теории ($\lambda \sim 300$ *Гэв*).

4. Электромагнитное взаимодействие

Благодаря уточненным расчетам и новым экспериментальным данным устранены, наконец, расхождения между теорией и экспериментом, назойливо выступавшие на безоблачном небе квантовой электродинамики.

Получено весьма точное значение постоянной тонкой структуры

$$\alpha^{-1} = 137{,}03 \begin{matrix} 608 \text{ — эффект Джозефсона,} \\ 540 \text{ — тонкая структура,} \end{matrix}$$

позволяющее проверить квантовую электродинамику до шестого порядка включительно. С помощью экспериментов на встречных пучках справедливость квантовой электродинамики проверена на расстоянии до сотых долей ферми.

Продолжаются поиски монополя Дирака; верхний предел рождения гипотетических частиц, согласно последним экспериментальным данным, меньше 10^{-42} *см*^{2}.

В последнее время были получены новые экспериментальные данные по комптоновскому рассеянию на протонах до 17 *Гэв*. Эти результаты весьма ценны, в частности, для проверки модели векторной доминантности.

Особое место занимают экспериментальные данные по глубоконеупругому рассеянию электронов на протонах. Серия экспериментов, поставленных с целью изучения структуры протона, была начата в 1968 г. на Стэнфордском линейном ускорителе протонов (США) до энергии 20 *Гэв*. С помощью этих опытов была замечена так называемая масштабная инвариантность, которая состоит в том, что амплитуду рассеяния, являющуюся, вообще говоря, функцией двух независимых переменных, можно на самом деле выразить через отношение этих переменных.

Результаты различных групп, представленные на конференцию, подтверждают наличие масштабной инвариантности для рассеяния поперечно поляризованных

фотонов и не противоречат масштабной инвариантности для рассеяния продольно поляризованных. К этому вопросу мы еще вернемся позже.

Следует обратить внимание на новую возможность изучения сечения «конденсации» двух виртуальных фотонов в адроны в экспериментах на встречных e^+e^-- и e^-e^--пучках. Относительный вклад этого процесса быстро растет с ростом энергии пучков, и уже в районе 2—3 *Гэв* он будет играть основную роль в образовании адронов. Это открывает новую перспективу развития ускорителей со встречными пучками.

Наконец, отметим, что экспериментальная проверка простейшей модели векторной доминантности в ряде случаев не дает удовлетворительного согласия с теорией.

II. ТЕОРИЯ

Большое количество новых экспериментальных данных высокой точности позволило подвергнуть тщательной проверке ряд существующих теоретических моделей. Многие из них по-прежнему требуют уточнения или пересмотра; растет количество новых моделей, имеющих узкое применение, и все еще недостает достаточно общих теоретических схем, применимых для широкого круга проблем.

1. Описание сильных взаимодействий при высоких энергиях

В последнее время стало очевидно, что описание процессов с помощью одних только полюсов Редже неудовлетворительно. Необходимость учета разрезов очевидна в случае упругого πN-рассеяния, фотообразования ρ-, η-, π^0-, K-мезонов, в случае рождения Δ^{++} в πN-соударениях и ряде других процессов.

Менее очевидно, следует ли вводить в амплитуду для описания экспериментальных данных неподвижные полюсы. Для описания некоторых процессов наличие их в амплитуде необходимо феноменологически, однако это приводит к наличию таких полюсов также в амплитуде для процессов, в которых, согласно эксперименту, их не должно было бы быть.

Если считать «серпуховские энергии» асимптотическими, то для удовлетворительного описания упругого рассеяния необходимо введение также и разрезов, хотя даже в этом случае согласие с экспериментом нельзя считать удовлетворительным.

На конференции обсуждались вопросы, связанные с нарушением теоремы Померанчука. Ответы на них зависят от дальнейшего уточнения экспериментальных данных как по полным сечениям и реальной части амплитуды упругих реакций, так и по регенерации K^0-мезонов.

Конференция продемонстрировала весьма заметные в последнее время усиление интереса к процессам с большой множественностью вторичных частиц и тенденцию возврата к ранее обсуждавшимся идеям. Об этом свидетельствует то, что основными моделями множественного рождения частиц, обсуждавшимися на конференции, были различные мультипериферические схемы и статистическая теория.

Несмотря на то, что появляются все новые и новые варианты мультипериферической теории, общими свойствами для них, как и прежде, остаются логарифмический рост множественности вторичных частиц с энергией, малые поперечные импульсы и требование того, чтобы они приводили к правильной мнимой части амплитуды упругого рассеяния. Долгое время различие в большинстве мультипериферических схем заключалось в том, какими частицами происходит обмен. Так, например, в последние годы широко использовалась мультиреджионная схема с обменом померонами, однако сейчас выяснилось, что построить внутренне непротиворечивую схему с обменом только померонами нельзя, и в случае обмена мезонами качественные свойства модели и ее результаты мало зависят от сорта мезона и от того, реджизован он или нет.

На конференцию было представлено значительное количество работ, в которых изучались вопросы, связанные с так называемой «кластеризацией» при множественном рождении и сравнением теоретических расчетов неупругих процессов с экспериментом. В них показано, что имеющийся экспериментальный материал в области космических лучей не противоречит схеме тяжелых блоков-файрболов, а скорее подтверждает ее. В пользу учета больших масс блоков в мультипериферических схемах, по-видимому, говорит и сравнение с экспериментом в области ускорительных энергий.

Заметный интерес на конференции наблюдался к обсуждению свойств неупругих процессов в связи с масштабной инвариантностью. В частности, отмечалось, что мультипериферические схемы обладают масштабной инвариантностью и для вторичных нуклонов существование этой инвариантности означает независимость распределения коэффициентов неупругости от энергии. В ряде работ было показано, что масштабная инвариантность в мультипериферических схемах имеет место, если сечение таких процессов асимптотически постоянно.

В целом ряде работ для описания процессов множественного образования частиц широко используются различные варианты статистической теории, с помощью которых

удается получить результаты, согласующиеся с экспериментом и удачно дополняющие мультипериферические рассмотрения в соответствующей области энергий.

Процессы упругого рассеяния адронов с успехом описываются в рамках квазипотенциального и оптического приближения.

Квазипотенциальный метод, являющийся релятивистским обобщением потенциального рассеяния, позволяет с помощью квазипотенциала, выбранного феноменологическим путем, воспроизводить основные черты упругого pp-рассеяния при высоких энергиях.

Идея использования оптической картины высокоэнергетического рассеяния адронов с наибольшим успехом используется в эйкональном приближении, в котором угловой момент заменяет параметр столкновения, и, следовательно, динамику реакции можно рассматривать с помощью интегралов по этим непрерывным переменным. Исследовались также релятивистские обобщения эйкональной схемы. Дальнейшим развитием эйкональных схем является редже-эйкональная модель, объединяющая привлекательные черты обеих моделей.

Для описания процессов рассеяния при высоких энергиях в последнее время успешно разрабатываются новые теоретические модели, такие, как партонная, дроплетная, различные статистические модели.

Эффективным оказалось использование предположения о предельной фрагментации (limited fragmentation), из которого можно делать предсказания о вероятности образования частиц определенного сорта. Из гипотезы ограниченной фрагментации следует, в частности, постоянство асимптотического сечения рождения n-частиц. (Дроплетная модель является следствием гипотезы ограниченной фрагментации.)

2. Дуальность

Понятие дуальности родилось на основе анализа дисперсионных правил сумм при конечных энергиях. Дуальные модели и их обобщения заняли прочное место в теории сильных взаимодействий элементарных частиц. Дуальность означает эквивалентность в описании процессов в терминах резонансов в прямом канале и обменных полюсов Редже в t-канале. Дуальные амплитуды обладают кроссинг-симметрией по всем переменным, имеют полюсы в s-канале, соответствующие резонансам при низких энергиях и обладают редже-асимптотикой. Одним из основных недостатков дуальных моделей является отсутствие унитарности мандельстамовской аналитичности. Кроме того, имеются трудности с учетом спина частиц и особенности Померанчука.

В течение последних двух лет было приложено много усилий, направленных на дальнейшее развитие дуальных моделей с целью построения последовательной теории сильных взаимодействий.

Амплитуду в рамках дуальных резонансных моделей естественно считать борновским приближением истинной амплитуды. Многие авторы делали попытки восстановления истинной амплитуды с помощью метода возмущений в рамках теории поля, квазипотенциального уравнения и ряда других методов.

Весьма успешным оказалось обобщение амплитуды Венециано для процессов рождения. Разработана техника вычисления для некоторого класса неупругих процессов, исследуются вопросы, связанные с выяснением спиновой структуры амплитуды и роли вакуумной траектории.

Применение диаграммной техники, напоминающей фейнмановскую, к адронным амплитудам, описываемым с помощью модели составных частиц, породило понятие диаграмм типа «рыболовная сеть» (fishnet diagram). Путем вычисления таких диаграмм, состоящих из бесконечного числа внешних линий и вершин, удалось получить в явном виде дуальные амплитуды.

При изучении свойств факторизации дуальных амплитуд были обнаружены интересные свойства статистического характера, связанные со значительным вырождением уровней.

Дуальные модели находят разнообразное применение. К наиболее успешным и многообещающим следует отнести применение их для вычисления неупругих процессов рассеяния адронов. В течение последних двух лет была освоена техника вычисления пятиточечных функций в рамках обобщенной модели Венециано. Несмотря на большое количество предположений, используемых в ней, эта модель в настоящее время дает наиболее общее описание неупругих процессов рассеяния.

3. Глубоко неупругое рассеяние лептонов и партонная модель

Понятие «глубоко неупругое рассеяние» относится к реакциям, в которых падающий лептон (например, электрон) проникает в глубь адрона, передавая последнему значительную часть своей энергии (большие передачи импульса). Изучение таких процессов является исключительно эффективным методом для проникновения в глубь адронов.

Если рассматривать простую модель рассеяния (оптическую), то можно считать, что с ростом передаваемого импульса вероятность рассеяния электронов довольно быстро убывает. Такого убывания, однако, не наблюдается на опыте. Экспериментальные данные по глубоко неупругому рассеянию электронов подтверждают справедливость других моделей, в частности и партонной, совместимых с «масштабной инвариантностью». Наиболее близкой к физической картине является, по-видимому, партонная модель, в которой предполагается, что адроны состоят из точечных частиц — партонов и рассеяние происходит на партонах. Не ясна природа этих составных частиц (кварки?); правда, во многих случаях это и несущественно.

Экспериментальным подтверждением справедливости партонной модели могут служить также результаты столкновения электронов с позитронами.

На конференцию были представлены результаты, согласно которым в этих реакциях вероятность процесса с рождением пионов ($e^+ + e^- \to N\pi$) оказалась больше, чем это можно было бы ожидать из модели ρ-доминантности. Модель с участием партонов в промежуточном звене больше соответствует экспериментальной ситуации.

4. Теория поля

Как уже упоминалось выше, прошедшие два года ознаменовались рядом великолепных результатов в вычислении тончайших эффектов квантовой электродинамики и сравнении их с экспериментом.

Электромагнитные взаимодействия, однако, по-прежнему остаются единственной областью практического применения квантовой теории поля.

Основным недостатком квантовой электродинамики является бесконечная электромагнитная энергия самодействия электрона (его масса). Вопрос о «самозаряжении» этой энергии за счет гравитационного самодействия электрона усиленно обсуждался на заседании, посвященном фундаментальным проблемам. Хотя классическое рассмотрение гравитации и позволяет надеяться на подобное «самозаряжение», однако квантовое рассмотрение, как выяснилось из дискуссии, встречается со многими трудностями и прежде всего — обеспечением градиентной инвариантности. На конференцию были также представлены результаты, свидетельствующие об успешных исследованиях, касающихся перенормировок массивных полей Янга — Миллса, локализуемых и нелокализуемых нелинейных и нелокальных полей и других направлений квантовой теории поля.

Опыты по глубоко неупругому рассеянию лептонов (масштабная инвариантность) возродили интерес к конформной инвариантности теории. Это интенсивно развивающееся за последние годы направление выделилось в отдельную ветвь теоретической физики.

Значительный интерес был вызван работами по обоснованию различных феноменологических моделей в рамках теории поля. В частности, на примере некоторых полевых моделей в рамках функционального метода было продемонстрировано, что за эйкональный вид амплитуды рассеяния ответственны «мягкие» мезоны. Суммирование же асимптотических частей всех диаграмм, за которые ответственны «жесткие» мезоны, приводит к модифицированному (из-за учета спина) реджиевскому виду амплитуд упругих и квазиупругих процессов и автомодельному поведению глубоко неупругого *ep*-рассеяния. Смычка этих дополняющих друг друга методов может в будущем привести к весьма любопытным результатам.

Ю. А. Будагов, Л. Л. Енковский