

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.12

**ФИЗИКА ФОТОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ —
НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ *)***В. Пановский*

В заголовке этой статьи содержится противоречие: обычно считают, что физика высокой энергии изучает процессы, происходящие при энергиях, больших порога образования нестабильных частиц и, таким образом, невозможно разделить ее разумным способом на части, которые рассматривали бы электроны и фотоны, с одной стороны, и частицы другой природы — с другой. Я буду описывать ту область явлений в физике высоких энергий, где удалось продвинуться далеко вперед благодаря появлению электронных и фотонных пучков, получаемых на ускорителях. Существует надежда, что это продвижение будет продолжаться и в будущем.

Прежде чем перейти к обсуждению специальных физических проблем, разрешите мне сначала пояснить, что понимают под столкновениями электронов или фотонов «высокой энергии» в релятивистском смысле. Вообще говоря, если фотон (масса покоя $m_0 = 0$) или электрон (масса покоя $m_0 = 0,51 \text{ Мэв}$) участвуют в столкновении, они передают в данной системе отсчета некоторое количество энергии ΔE и некоторый импульс Δp . Для того чтобы происходящий процесс можно было описать способом, не зависящим от движения координатной системы, все результаты, имеющие физический смысл, должны быть представлены через ковариантное выражение **)

$$q^2 = \Delta E^2 - \Delta p^2, \quad (1)$$

которое называется квадратом четырехмерного импульса. Если $q^2 > 0$, четыре-импульс называется «времениподобным», если $q^2 < 0$, четыре-импульс называют «пространственноподобным». Эти наименования выбраны по аналогии с релятивистским пространственно-временным интервалом

$$\tau^2 = \Delta t^2 - \Delta x^2, \quad (2)$$

где Δt и Δx представляют собой расстояния между двумя событиями во времени и в пространстве. Если $\tau^2 > 0$, то существует система отсчета, в которой оба события происходят в одном и том же месте, но при этом они разделены во времени. Если $\tau^2 < 0$, то можно найти такую систему координат, в которой оба события происходят одновременно, но разделены в пространстве. В таблице дана сводка этих соотношений.

*) W. K. H. Panofsky, Photon and Electron High Energy Physics: Present and Future, Amer. J. Phys. 31 (6), 409 (1963). Перевод А. О. Вайсенберга.

**) Мы принимаем систему единиц, в которой c , скорость света в пустоте, равна единице.

С общей точки зрения значение физики электронов высокой энергии основывается на том опытном факте, что электроны взаимодействуют с веществом т о л ь к о через электромагнитное поле (у них существует еще слабое (фермиевское) взаимодействие, но оно в 10^{10} раз слабее электромагнитного). В настоящее время существует т о ч н о е согласие между экспериментом и теорией во всех опытах, где вопрос о таком согласии может быть поставлен. В противоположность протонам, нейтронам, пионам и другим частицам, электроны не испытывают непосредственного влияния «сильных» ядерных взаимодействий. По этой причине, опять же

Пространственноподобные
и временноподобные интервалы

	Пространственно-подобный	Временно-подобный
Пространственные и временные интервалы 4-импульс	$\Delta t < \Delta x $ $\Delta E < \Delta p $	$\Delta t > \Delta x $ $\Delta E > \Delta p $

рассматривая вопрос в общем, все опыты с электронами высокой энергии можно разбить на следующие группы.

1. Опыты, в которых некоторая неизвестная или плохо известная структура (например, нуклон или искусственно созданная частица) исследуется с помощью известных электромагнитных законов (под «известными» законами мы понимаем релятивистское квантовое описание электромагнитного поля, которое дальше будем называть квантовой электродинамикой, КЭД).

2. Изучение процессов рождения электронами или фотонами искусственных новых нестабильных частиц. Участие в этих столкновениях частиц, испытывающих сильное взаимодействие (например, нуклонов или пионов), разумеется, осложняет анализ явлений.

3. Эксперименты, имеющие целью расширить область значений квадрата переданного четырехмерного импульса, для которых установлена справедливость КЭД, или найти отклонения от ее предсказаний.

Рассмотрим опыты первой группы. Наиболее известными из них являются ставшие ныне классическими опыты по рассеянию электронов. В этих опытах строение нуклонов и ядер определяется по угловой и энергетической зависимости эффективного сечения упругого и неупругого рассеяния электронов. В этих случаях изучаемая частица является «реальной». Это значит, что она существует в течение долгого времени до столкновения. Ниже мы увидим, что такой же метод исследования можно в принципе применить и к «виртуальным» частицам, под которыми понимают частицы, возникающие и разрушающиеся в течение короткого интервала времени, для которого квантовая механика допускает, в рамках принципа неопределенности, нарушение сохранения энергии.

Рассеяние электронов обычно описывают по аналогии с классической теорией дифракции волн с длиной λ на объекте с линейными размерами порядка D . При этом наибольшую вероятность имеет рассеяние в передний конус с угловым раствором, приблизительно равным λ/D . При более подробном рассмотрении классическая теория дифракции показывает, что угловое распределение, выраженное через угол рассеяния, представляет собой преобразование Фурье для плотности распределения рассеивающего агента в исследуемой структуре. Более точно, амплитуда рассеяния $A(\vartheta, \lambda)$ пропорциональна интегралу от функции распределения по объему с размерами порядка D , т. е.

$$A(\vartheta, \lambda) = \int \rho(\mathbf{x}) \exp(i\mathbf{kx}) d\mathbf{x}, \quad (3)$$

где волновой вектор \mathbf{k} рассеянной волны представляет собой векторную разность между начальными и конечными волновыми векторами, направления которых совпадают с направлениями воли до и после рассеяния соответственно. Величина \mathbf{k} равна, таким образом,

$$\frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2 \sin \frac{\vartheta}{2}.$$

Мы видим, следовательно, что угловое распределение рассеяния представляет собой эффективный метод получения фурье-анализа пространственного распределения в терминах волнового числа \mathbf{k} . В действительности здесь появляется много усложняющих факторов. Однако, тем не менее, релятивистское обобщение классического метода анализа рассеяния дает возможность выразить амплитуду рассеяния электронов через фурье-анализ распределения в зависимости от квадрата переданного четырехмерного импульса q^2 , причем чем больше эта величина, тем более

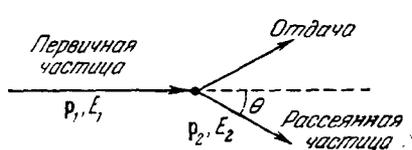


Рис. 1. Геометрия рассеяния быстрой первичной частицы покоящейся частицей.

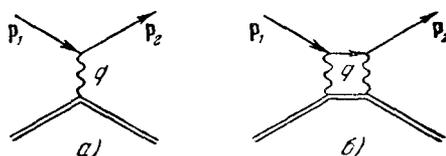


Рис. 2. Диаграмма, представляющая рассеяние электрона нуклоном: а) при обмене одним фотоном, б) при обмене двумя фотонами.

тонкие детали пространственной структуры могут быть замечены. Отсюда видно, что для исследования тонких особенностей структуры частиц необходимы ускорители с возможно большей энергией.

Теперь мы рассмотрим эту ситуацию на языке квантовой механики. Реальный процесс рассеяния (изображенный на рис. 1), при котором, например, электрон рассеивается «неизвестной» частицей, находившейся в начале в покое, может быть сведён к процессу обмена одной или несколькими частицами, переносящими четырехмерный импульс q , как это схематически показано на рис. 2. Эти диаграммы (здесь они применяются не совсем в том смысле, в каком обычно используются диаграммы Фейнмана) интерпретируются следующим образом. На рис. 2 показано, что протон (двойная линия), приближающийся к электрону, и электрон (одиночная линия) взаимодействуют друг с другом через электромагнитное поле. Эта диаграмма может быть выражена словами так: электрон испускает «виртуальный» фотон (волнистая линия), который поглощается протоном.

Та величина, которая при рассеянии электронов высокой энергии соответствует дифракционной амплитуде $A(\vartheta, \lambda)$, приведенной в формуле (3), носит название ф о р м ф а к т о р а $F(q^2)$. Реальные физические взаимодействия, происходящие при рассеянии электронов неизвестной структурой, могут потребовать для своего описания несколько формфакторов. Так бывает, если рассеивающая частица имеет спин и может, таким образом, менять свое спиновое состояние или если она может возбуждаться или распадаться, т. е. если она может менять свое энергетическое состояние.

Если рассеяние является упругим (т. е. если энергетическое состояние рассеивающей частицы не изменяется) и если можно считать, что процесс рассеяния сводится к фотонному обмену, соответствующему диаграмме рис. 2, а, то в этом случае в общем необходимы два формфактора,

обозначаемые $G_E(q^2)$ и $G_M(q^2)$. Первый из них соответствует рассеянию, которое не меняет направления спина частицы, второй формфактор соответствует процессам, при которых проекция момента количества движения на направление переданного импульса изменяется на единицу. На рис. 3 приведены значения формфакторов для двух из наиболее важных «неизвестных» частиц: протона и нейтрона. В этих результатах первоначальные данные Хофштадтера и сотрудников объединены с более поздними данными, полученными в Корнелле и Стэнфорде. По причинам, которые мы здесь не приводим, на рис. 3 приведена с у м а (изотопический скаляр) и р а з н о с т ь (изотопический вектор) значений формфакторов для протонов и нейтронов.

Как нам следует понимать эти данные и какой прогресс в нашем понимании мы можем ожидать в будущем? Прежде всего эти данные можно

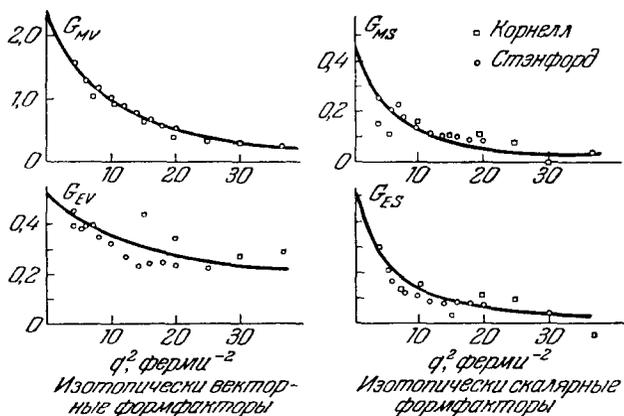


Рис. 3. Формфакторы, полученные в опытах по рассеянию электронов в Стэнфорде и в Корнелльском университете.

интерпретировать по аналогии с рассмотренной выше картиной дифракционного рассеяния при малых энергиях. При этом оказывается возможным построить модели распределения заряда и магнитного момента, которые дают некоторую интуитивную картину строения нуклона. Затем оказывается, что более современный подход, возникший в связи с открытием «резонансных» или «возбужденных» состояний нуклонов и связывающий эти данные с динамической моделью нуклона, также является весьма плодотворным. Для понимания последующих объяснений нужно иметь в виду форму кривых, показанных на рис. 3.

Недавние опыты в области высоких энергий показали, что нуклон может поглотить различные количества энергии, что приводит к наличию ряда энергетических уровней, аналогично тому, как это имеет место с возбужденными состояниями атома.

Избыточная энергия может возникнуть при поглощении «временноподобного» фотона, т. е. фотона, передающего главным образом энергию, а не количество движения.

Благодаря наличию определенных правил отбора только некоторые из возбужденных состояний нуклонов могут оказать влияние на электромагнитные свойства нуклонов. Наиболее важным состоянием является такое, когда ρ -мезон (спин 1, масса $m_0 = 750 M_{\text{эв}}$) «осциллирует» около нуклона. Это состояние приводит к тому, что формфактор имеет характер резонансной кривой, представляющей собой функцию от q^2 , причем

область резонанса расположена вблизи «временноподобной» точки (избыток энергии) с абсциссой, равной квадрату массы покоя резонансного состояния. Заметим, с другой стороны, что упругое рассеяние электрона на невозбужденной мишени соответствует $|\Delta P| > \Delta E$, т. е. при этом q^2 пространственноподно. Что может произойти на временноподобной стороне, т. е. на той стороне графика, который соответствует переносу избытка энергии? На рис. 4 показана ситуация, рассмотренная для одного из известных в настоящее время нуклонных резонансов.

Таким образом, упругое рассеяние отвечает х в о с т у резонансной кривой; сам резонанс не может быть достигнут. В настоящее время для объяснения экспериментальных данных недостаточно единственного резонансного состояния, необходимо усложнить картину и рассмотреть вклад резонансных состояний с большими массами, а также того, что диаграмма рис. 2, а, соответствующая однофотонному обмену, не является единственно возможной.

Решения этой последней проблемы можно достичь, заменяя в экспериментах по рассеянию электронов позитронами. Если работает диаграмма рис. 2, б, то сечения рассеяния для положительных и отрицательных электронов должны отличаться. В настоящее время эти опыты (производимые Пине с сотрудниками) находятся в состоянии осуществления, и уже имеется указание на то, что различие для больших значений q^2 действительно существует.

Мы рассмотрели, каким образом выполненные в прошлом опыты по рассеянию электронов и позитронов пролили свет на проблему структуры нуклона и явились звеном, связывающим эту структуру с резонансами, обнаруженными для систем сильно взаимодействующих частиц. Каково будущее подобных исследований? Прежде всего, необходимо продолжить эти исследования. В частности, в настоящее время ситуация, связанная со структурой нейтрона, является еще весьма неудовлетворительной, так как из-за отсутствия мишеней со свободными нейтронами используются дейтоновые мишени. Усложнения, связанные со структурой дейтона, серьезным образом ограничивают значение анализа формфакторов нейтрона. Кроме того, существуют уже указания на то, что по мере возрастания величины q^2 в пространственно-временной области анализ данных становится все более и более затруднительным. Во-первых, приобретает существенное значение вклад от более сложных взаимодействий, чем те, которые показаны на рис. 2, б. Во-вторых, если не будут обнаружены новые резонансы для больших значений масс, эффективные сечения будут продолжать уменьшаться с увеличением энергии, что замедлит скорость накопления новых экспериментальных данных. В-третьих, переход к большим значениям означает переход в область, где пригодность КЭД уже нельзя считать хорошо установленной, и эта новая проблема осложняет задачу исследования структуры частиц.

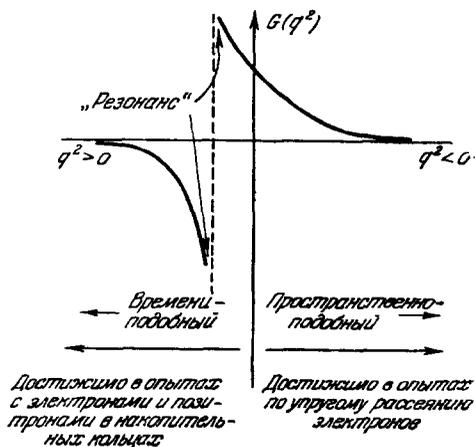


Рис. 4. Схема, показывающая типичную зависимость формфактора от квадрата переданного четырехмерного импульса. Указаны области переданных импульсов, достижимые с помощью упругого рассеяния электронов.

Мы вернемся позже к экспериментальным методам, включающим в себя столкновения между электронами и позитронами, движущимися в противоположных направлениях. Эти опыты дадут возможность сильно расширить наши сведения о структуре нуклонов во времениподобной области, а также исследовать применимость квантовой электродинамики.

Как мы можем исследовать структуру частиц, которые не являются стабильными частицами? Возможный ответ заключается в осуществлении опытов по образованию таких частиц с помощью фотонов и электронов.

Фоторождение пионов было одним из первых успешных применений электронных ускорителей. Взаимодействие между пионами и нуклонами были получены при анализе поведения сечения фоторождения. Фотообразование нестабильных частиц может происходить, вообще говоря, двумя различными способами, схематически показанными на рис. 5.

Рис. 5. Диаграммы, иллюстрирующие фотообразование нестабильных частиц.

На диаграмме а) фотон поглощается нуклоном, на диаграмме б) фотон поглощается рожденной частицей.

На рис. 5, а в точке А фотон благодаря своему электромагнитному полю взаимодействует с электрическими или магнитными характеристиками (заряд или магнитный момент) нуклона. Возбужденный при таком взаимодействии нуклон затем распадается в В на нуклон и частицу Р.

Скорость этой реакции зависит от сил, действующих в В между частицей Р и нуклоном, т. е. от данных, аналогичных тем, которые можно было бы получить, используя частицы Р, генерированные на ускорителе, в качестве внешнего пучка и водородную мишень в качестве рассеивателя.

Поглощение фотона, обладающего нулевой массой покоя, отвечает нулевому значению переданного четырехмерного импульса, $q^2 = 0$, и поэтому поглощение в А не может дать иных сведений о структуре нуклона, чем те, которые следуют из статических измерений. Необходимо, однако, иметь в виду, что наряду с процессом фотопоглощения существует также процесс неупругого рассеяния электронов. При этом вместо поглощения энергии из поля свободного фотона происходит поглощение энергии из поля быстро движущегося электрона. В этом случае вместо рис. 5, а следует рассмотреть рис. 6, а.

В этом случае $q^2 \neq 0$; действительно, та часть процесса, которая заключается во взаимодействии в точках А и С, весьма похожа на обычный процесс рассеяния электронов, показанный на рис. 2. Таким обра-

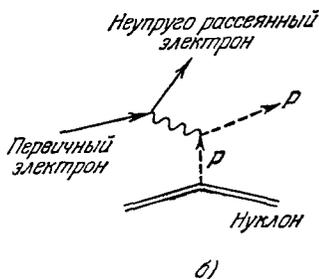
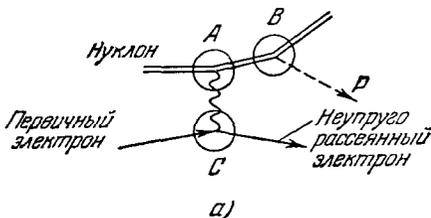
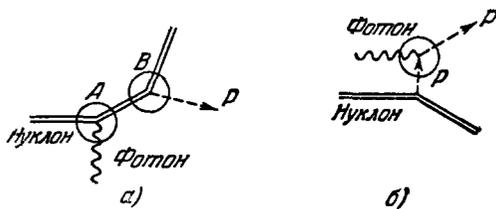


Рис. 6. Диаграммы, иллюстрирующие «образование с помощью электронов» нестабильных частиц.

Они отличаются от диаграмм, приведенных на рис. 5, тем, что поглощение «реального» фотона заменяется поглощением «виртуального» фотона, возникшего при рассеянии электрона

зом, н е у п р у г о е рассеяние электронов также может быть источником информации о структуре нуклона.

Второй механизм фотообразования одиночных частиц показан на рис. 5,б. Здесь фотон поглощается рожденной нестабильной частицей и процесс зависит, таким образом, от взаимодействия между электромагнитными характеристиками новой частицы и полем фотона. Если, как это показано на рис. 6, б, мы заменим поле фотона полем неупруго рассеянного электрона, то результирующая амплитуда рассеяния будет зависеть от с т р у к т у р ы н е с т а б и л ь н о й ч а с т и ц ы. Поэтому процесс электрообразования позволяет получить «виртуальную мишень» нестабильных частиц для рассеяния электронов. Успешное использование этой схемы будет зависеть от того, удастся ли отделить этот процесс от других каналов реакции; в будущем это может оказаться возможным.

Таким образом, оказывается, что фотообразование нестабильных частиц является обширным источником информации о структуре этих частиц и об их взаимодействии с ядрами. Очевидно, что эти работы сохраняют свое значение и в будущем.

Образование нескольких частиц открывает нам ряд новых интересных явлений. Я рассматриваю только два таких явления: электромагнитное образование пар и «периферическое образование». Электромагнитное образование электронно-позитронных пар является хорошо известным процессом, с помощью которого происходит «материализация» гамма-квантов с энергией, большей 1 Мэв . Для электромагнитного излучения высокой энергии это основной процесс поглощения. Для того чтобы гамма-квант мог «конвертировать» в пару, состоящую из положительной и отрицательной частиц, удовлетворив при этом законам сохранения энергии и импульса, необходимо присутствие третьей, тяжелой частицы, которая приняла бы на себя отдачу. Эта частица (вообще говоря, ею может быть ядро того вещества, которое облучается гамма-квантами) принимает на себя отдачу благодаря своему электромагнитному полю, и поэтому весь процесс является «полностью электромагнитным». Это означает, что можно произвести полный теоретический анализ такого процесса с помощью хорошо известных электромагнитных сил. Предсказания этой теории зависят только от массы, спина и возможного магнитного момента положительной и отрицательной частиц пары, поэтому теория может предсказать также вероятность образования с помощью такого механизма других частиц, отличных от электронов и позитронов. Существование такого процесса (кроме электронов) было установлено и для μ -мезонов. Это открывает возможности систематического поиска частиц, так как ожидаемые сечения образования пар могут быть с уверенностью предсказаны. Недавно таким методом в Стэнфорде были произведены поиски частиц, масса которых лежит между массой электрона и мюона. Эти опыты дали отрицательный результат (который, впрочем, не был неожиданным). С развитием методов наблюдения такие опыты могут быть продолжены в будущем с целью обнаружения частиц с большими массами. Создание с помощью образования пар чистых мюонных пучков высокой интенсивности имеет практическое значение.

Пучки, полученные таким методом, были бы значительно меньше загрязнены пионами, чем пучки, образованные при распаде первичных пионов.

Обратимся теперь к «периферическим» столкновениям. Заметим, что если энергия фотона становится очень большой, пара заряженных частиц может возникнуть «почти» в в а к у у м е. Это значит, что для выполнения законов сохранения ядру мишени достаточно поглотить очень небольшой импульс (рис. 7).

Мы можем рассмотреть теперь процесс, в котором из мишени выходит только одна из частиц пары, тогда как другая частица взаимодействует с ядром мишени, вызывая рождение интересующих нас частиц. Результирующее сечение будет очень большим для направления вперед и в действительности может превзойти сечение образования соответствующих частиц протонами для энергий вторичных частиц, близких к энергии бомбардирующей частицы. На рис. 8 произведено сравнение вычисленных сечений для случая образования пионов. Таким образом, электронные ускорители высокой энергии оказываются весьма продуктивными «заводами» для создания вторичных частиц.

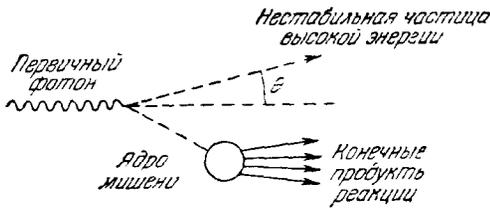


Рис. 7. Диаграмма, иллюстрирующая «периферическое» фотообразование нестабильных частиц высокой энергии, испускаемых в направлении вперед.

существующей при малых энергиях, где протонные ускорители оказываются более подходящими.

Наконец, мы рассмотрим опыты, цель которых расширить область справедливости законов КЭД. В настоящее время справедливость КЭД подтверждена опытами, перекрывающими область от очень больших расстояний взаимодействия до столь малых расстояний, как доли 10^{-14} см. Из принципа неопределенности следует, что изучение физических свойств на малых расстояниях требует передачи большого импульса или релятивистского четырех-импульса. Кроме того, в опытах, поставленных для решения этой проблемы, можно использовать только электроны, фотоны и μ -мезоны, так как это единственные частицы, которые не испытывают все еще плохо изученного ядерного взаимодействия. Так как в общем ядерные силы имеют большую величину, чем силы электромагнитные, наличие в исследуемом процессе ядерных сил может сделать практически ненаблюдаемыми возможные отклонения от КЭД. Конечно, и некоторые из опытов, в которых участвуют протоны, могут позволить установить предел возможного нарушения КЭД. Это можно сделать, сравнивая между собой результаты различных опытов, в которых действие протонов одинаково, но наблюдаются различные электромагнитные процессы.

Если не применять протонной мишени, то пределы применимости КЭД можно исследовать либо а) сравнением электромагнитных свойств «свободных» электронов или мюонов с предсказаниями КЭД, б) изучением столкновений электронных или мюонных пучков с покоящимися электронами, или в) опытами со сталкивающимися электронными пучками. Среди первой группы опытов наибольшее значение имеют выполненные

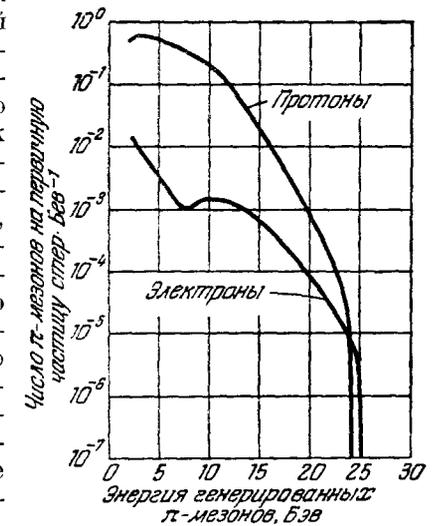


Рис. 8. Кривые, дающие «выход» заряженных пионов, образованных первичными электронами в периферических столкновениях.

Для сравнения приведены экспериментальные данные для выхода пионов, возникающих от протонов с энергией 25 Бэв.

в ЦЕРН измерения g -фактора мюона. У меня нет возможности рассмотреть этот прекрасный результат, и я лишь отмечу, что в этом опыте не было обнаружено никаких отклонений от КЭД.

Опыты второй группы затруднены тем, что при столкновениях быстрого электрона с покоящимся величина квадрата переданного импульса

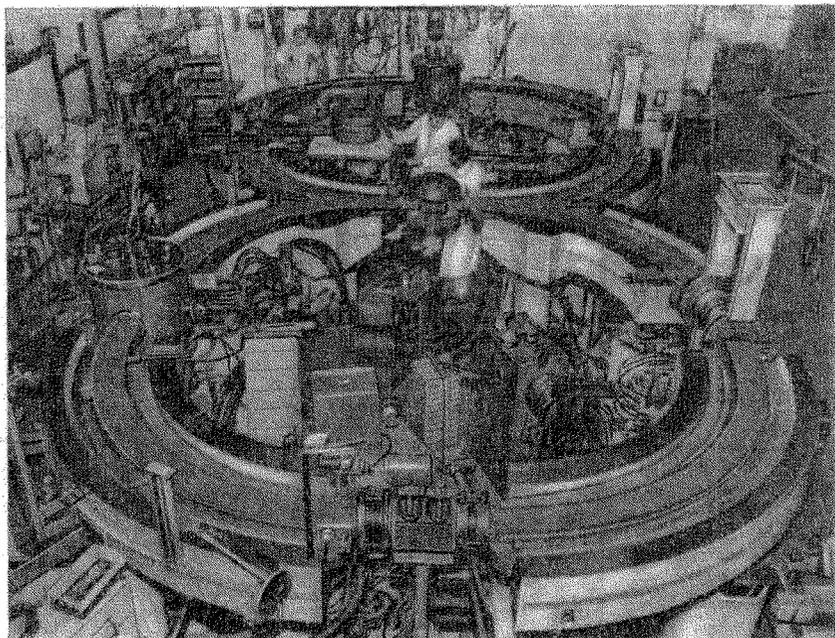


Рис. 9. Стэнфордские накопительные кольца для электронов с энергией 500 Мэв.

Электроны от линейного ускорителя «Мари III» (справа, вне снимка) инжектируются в каждое из накопительных колец с помощью магнитного тракта и импульсной системы ввода. Оба циркулирующих пучка электронов с энергией 500 Мэв испытывают столкновения в общей прямой секции обоих колец. Энергия в системе центра масс, достижимая при использовании этих накопительных колец, эквивалентна энергии, достижимой при столкновении электронов с энергией 1000 Бэв с покоящимися электронами мишени.

оказывается малой даже для очень большой первичной энергии. Действительно, если частица с массой покоя m_0 сталкивается с налетающей частицей, имеющей большую энергию E_0 , квадрат четырехмерного переданного импульса равен

$$q^2 = -2m_0E_0, \quad (4)$$

т. е. если выражать энергию в Мэв, то для электронов $q^2 = -E_0$.

Таким образом, если электрон с энергией 10 Бэв столкнется с покоящимся электроном, величина q^2 будет равна только $-(100 \text{ Мэв})^2$. Поэтому опыты с «выбитыми» электронами могут расширить область применимости КЭД только в том случае, если работать с электронными пучками чрезвычайно высокой энергии.

Наибольшие надежды в отношении проверки применимости КЭД связаны с опытами со встречными пучками. Такие опыты в настоящее время подготавливаются в Стэнфорде, а также группой итальянских физиков во Фраскати. Эта группа воспользуется своим накопительным кольцом для производства опытов на французском линейном ускорителе электронов в Орсе. На рис. 9 приведена фотография накопительных колец

в Стэнфорде. Электроны из линейного ускорителя инжектируются отдельно в каждое кольцо и накапливаются в них. Столкновения должны происходить в прямой секции, общей для обоих колец.

По-видимому, наибольший интерес представляют собой будущие опыты, в которых электроны и позитроны будут накоплены в одном кольце в виде двух движущихся навстречу друг другу пучков, а их столкновение произойдет в некоторой заранее выбранной области. При столкновениях позитрона и электрона следует ожидать как времениподобных, так и пространственноподобных передач импульса, что позволит произвести проверку квантовой электродинамики в обеих этих областях. Причина получения времениподобных значений q^2 при столкновении позитронов и электронов и невозможности таких

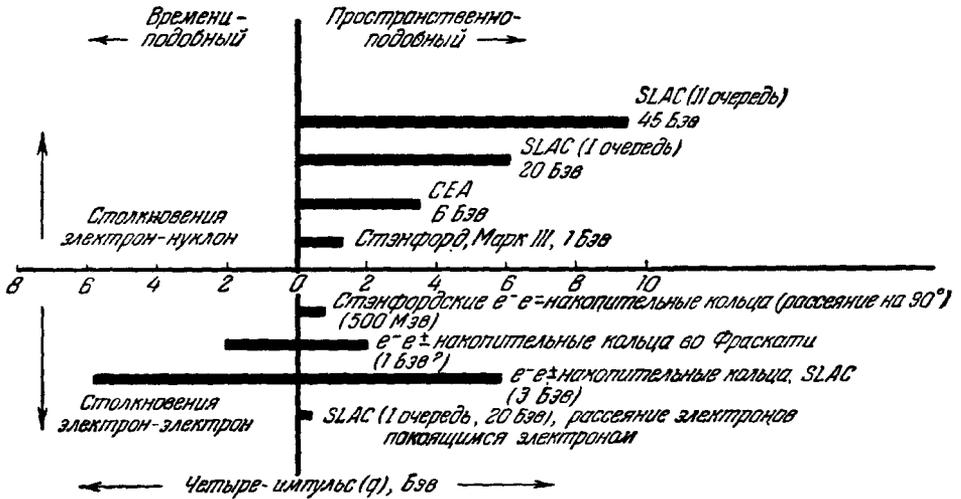
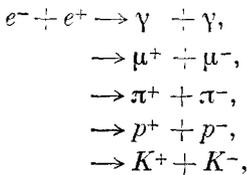


Рис. 10. Горизонтальными полосами показаны области времениподобных и пространственноподобных значений квадрата переданного импульса, достижимые с электронными ускорителями различных типов, существующими в настоящее время, строящимися или находящимися в стадии разработки.

значений q^2 при столкновении одинаковых частиц заключается в том, что позитроны и электроны могут аннигилировать и, таким образом, переданная энергия может превзойти переданный импульс.

При достаточно высокой энергии времениподобная передача может привести к реакциям, подобным следующим:



→ состояния, в которых участвует больше двух частиц.

Таким образом, электронно-позитронные накопительные кольца представляют собой «лабораторию», в которой можно будет создавать пары (или большее число) частиц, получение которых другими методами недоступно, и изучать их взаимодействие. Более того, как следует из рис. 4, непосредственно достижимыми при этом являются и резонансные состояния нуклонов.

Я надеюсь, что этот весьма схематический обзор физики электронов и фотонов высокой энергии показал все же, что здесь мы имеем дело с очень важной и все еще недостаточно разработанной областью. Степень ее разработки сильно зависит от доступных источников высокой энергии. Поэтому я кончу тем, что приведу график (рис. 10) значений величины q^2 , которые доступны в настоящее время или будут доступны после того, как закончится строительство машин, находящихся сейчас в стадии исследования или конструирования. Эти данные демонстрируют возрастающую мощность новых электронных ускорителей на очень большие энергии и потенциальные возможности метода накопительных колец. Как это обычно бывает в физике, эти два типа приборов не конкурируют друг с другом в решении одинаковых проблем, а скорее дополняют друг друга в плодотворных областях исследования.
