

Лекция 1': Экспериментальные методы.

”Маргарита ... воскликнула с удивлением :

– Да ведь они же ЗАКРЫТЫ!

– Дорогая! – дребезжал Коровьев, – в том – то и штука, что закрыты! В этом – то вся и соль! А в открытый предмет может попасть каждый!”

(М.Булгаков, ”Мастер и Маргарита”.)

Понимание закономерностей мира элементарных частиц и отбор подходящих для их описания теоретических принципов немислим без использования разнообразной экспериментальной информации. Исследование структуры материи на сверхмалых субядерных расстояниях (существующие установки позволяют изучать объекты с размерами $\sim 10^{-13} \div 10^{-17}$ см) требует использования частиц сверхвысоких энергий: например, длине волны частицы-пробника $\lambda \sim 10^{-17}$ см соответствует энергия $E \simeq c|\vec{p}| = c\hbar/\lambda \sim 1$ ТэВ. Получение, регистрация и измерение характеристик таких частиц сопряжены с решением довольно сложных технических проблем. История продвижения ”вглубь материи” содержит много впечатляющих изобретений и открытий – подробный рассказ о них может быть предметом отдельного курса. Поэтому ограничимся описанием основных принципов ”технологии эксперимента” в физике высоких энергий.

Центральными элементами современных экспериментальных установок являются *ускорители* – приборы, позволяющие разгонять заряженные частицы до ультрарелятивистских скоростей. Принцип их работы, на первый взгляд довольно простой, остается неизменным со времен первых подобных экспериментов до наших дней: частицы ускоряются электрическим полем, а для изменения направления движения и стабилизации пучка используются магнитные поля. Основными параметрами, характеризующими работу ускорителя, являются максимальная достижимая энергия частиц и плотность пучка, обычно характеризуемая величиной *светимости* – числом взаимодействий в единицу времени, приходящимся на единичное сечение элементарной мишени:

$$L = \frac{1}{\sigma} \frac{dN}{dt} .$$

По своей геометрической конфигурации существующие ускорители подразделяют на *кольцевые* и *линейные*. В кольцевых ускорителях частицы, двигаясь по окружности в магнитном поле, проходят через несколько расположенных вдоль кольца ускорительных станций, где им и сообщается дополнительная энергия. Основным преимуществом кольцевой конфигурации является возможность многократного прохождения

пучка по контуру ускорения, что и позволяет достичь высоких энергий. В этом случае в роли основного ограничивающего фактора выступает трудность удержания частицы в пределах кольца: как известно, радиус орбиты ультррелятивистской частицы при заданной величине магнитного поля растет практически пропорционально энергии

$$R = \frac{cp}{eH} \simeq \frac{E}{eH},$$

и поэтому даже при использовании наиболее сильных магнитов размеры ускорителей очень значительны – длина кольца сооружаемого в США сверхпроводящего суперколлайдера (SSC), который должен будет ускорять протоны и антипротоны до энергии $20TэВ$, равна почти $87км!$ В соответствии с этим при постройке ускорителей возникла необходимость конструирования сильных и не слишком энергоемких электромагнитов, способных работать в течении длительного времени. Даже создание провода обмотки представляло серьезную проблему – ток, текущий по ней, должен быть порядка нескольких килоампер. Кроме того, такой магнит может работать только в режиме сверхпроводимости, что – вкуче с размерами установки – требует совершенно беспрецедентной по мощности системы охлаждения. Наконец, в ускорителе недостаточно просто удерживать частицы внутри кольца – необходима тщательная стабилизация (подавление поперечных движений) пучка. Для этой цели используются магниты со специальной (квадрупольной) конфигурацией поля. Выведение пучка из канала ускорения и направление его на мишень осуществляется с помощью ”кикеров” – дипольных магнитов с очень малым временем переключения поля. Работа всей этой сложной системы магнитов и ускорительных станций должна быть тщательно синхронизирована. Другая проблема кольцевых ускорителей, особенно существенная для ускорителей легких частиц (например, e^\pm), – потери на электромагнитное (”синхротронное”) излучение при движении заряда по криволинейной траектории, быстро растущие с ростом энергии:

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{2e^4H^2}{3m^4c^7} E^2 \simeq 0.98 \cdot 10^{-3} \frac{\partial B}{c} \cdot \left(\frac{E}{mc^2}\right)^2 \cdot \left(\frac{H}{1Гс}\right)^2.$$

Весьма непростыми с технической точки зрения являются также проблемы, связанные с созданием и поддержанием вакуума в канале ускорителя. Все перечисленное и приводит к тому, что современные кольцевые ускорители являются наиболее сложными, масштабными и дорогостоящими приборами экспериментальной физики. Однако при исследовании фундаментальной структуры материи сегодня им нет почти никакой реальной альтернативы.

Особую привлекательность кольцевая схема ускорителя приобрела после реали-

зации идеи *накопительных колец*, работающих в режиме *коллайдера*: так как частицы противоположных зарядов вращаются в магнитном поле в различных направлениях, в одном контуре можно ускорять частицы и античастицы до одинаковых энергий, сформировать из них несколько "сгустков", находящихся на пересекающихся "встречных" орбитах и наблюдать их взаимодействие в состоянии с близким к нулю полным импульсом (в "системе центра масс"). С точки зрения возможности рождения новых частиц коллайдеры существенно более выгодны, чем ускорители с неподвижной мишенью, в которых – в силу закона сохранения импульса – значительная часть энергии налетающей частицы должна остаться в форме кинетической энергии. Нетрудно подсчитать, что при взаимодействии ультррелятивистской частицы с энергией $E \gg M_N c^2$ и импульсом \vec{p} с покоящимся нуклоном мишени масса рождающейся частицы не может превышать

$$M_X \leq \frac{1}{c^2} E_{CЦИ} = \frac{1}{c^2} \sqrt{(M_N c^2 + E)^2 - c^2 p^2} \simeq \frac{1}{c} \sqrt{2M_N E} \ll \frac{1}{c^2} E .$$

В случае коллайдеров практически вся энергия сталкивающихся частиц может быть преобразована в энергию покоя продуктов реакции. Здесь, однако, уместно отметить, что и неподвижная мишень имеет некоторые преимущества – плотность рассеивающих центров n в ней и ее толщина d могут быть сделаны достаточно большими, чтобы обеспечить нужную частоту взаимодействий при заданном токе пучка i_0 :

$$L = \frac{i_0}{|e|} n d ,$$

а если в качестве мишени используется второй пучок, то эту возможность реализовать не удастся, и поэтому обеспечение высокой светимости является существенной проблемой коллайдеров, для которых

$$L = \frac{N_1 N_2 f k}{S} = \frac{i_1 i_2}{e^2 S f k}$$

(здесь S – сечение области пересечения пучков, f – частота обращения частиц по контуру ускорения, а k – число сформированных "сгустков"). Именно для решения этой проблемы и осуществляется накопление частиц в пучках кольцевых ускорителей – коллайдеров.

Основным преимуществом линейных ускорителей является отсутствие радиационных потерь (поэтому их часто используют для ускорения электронов и позитронов), но одновременно возникают и новые проблемы – частицы проходят контур ускорения только один раз, и для достижения высоких энергий при разумной длине ускорителя необходима очень высокая интенсивность ускорения, т.е. создание сильных

электрических полей. Особенно остро эта проблема стоит при построении линейного коллайдера – либо придется строить отдельный ускоритель для каждого из сталкивающихся пучков, либо ускоренные в одном канале пучки частиц нужно будет с помощью системы магнитов направлять навстречу друг другу. К тому же при линейной конфигурации невозможно произвести накопление частиц в пучке, и добиться нужной частоты соударений еще сложнее, чем в кольцевых коллайдерах, и это сильно повышает требования к точности фокусировки пучков. Несмотря на это, именно с линейными ускорителями связана реализация многих перспективных идей по новым технологиям ускорения – например, идеи плазменных ускорителей: возбуждая лазерным пучком резонансные сверхвысокочастотные ($\nu \sim 30 \text{ ГГц}$) колебания в плазме, можно добиться возникновения локальных электрических полей очень большой напряженности, и при соответствующей синхронизации энергия колебаний может эффективно передаваться движущимся в плазме заряженным частицам. Разработка новых схем ускорения очень важна для будущего экспериментальной физики высоких энергий, так как повышение возможностей существующих связано с огромными затратами – эффективность использования средств при постройке последнего поколения ускорителей измеряют – полушутливо-полусерьезно – в единицах ”тераэлектронвольт на гигадоллар”, и для большинства из них этот показатель не намного превышает $2 \text{ ТэВ} / \text{Г}\$$. Например, в 1990 году стоимость сооружения SSC оценивалась в 8.8 млрд. долларов; сейчас ясно, что реальные расходы будут несколько выше. Неудивительно, что именно финансовые возможности рассматриваются сейчас как главный ограничитель развития экспериментальной техники – скорее всего проекты SSC, европейского большого адронного ускорителя (LHC) и ускорительно-накопительного комплекса (УНК) в России, даже если их реализацию удастся довести до конца, будут последними установками такого типа. Приведем характеристики наиболее крупных действующих и сооружаемых или проектируемых (отмечены *) ускорителей:

Название	Принадлежность	частицы	E	L, $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$
TEVATRON	США (Fermilab)	$p\bar{p}$	$2 \times 1 \text{ ТэВ}$	10^{30}
SLC	США (Стэнфорд)	e^+e^-	$2 \times 50 \text{ ГэВ}$	$6 \cdot 10^{30}$
SSC*	США (Техас)	$p\bar{p}$	$2 \times 20 \text{ ТэВ}$?
TRISTAN	Япония	e^+e^-	$\leq 75 \text{ ГэВ}$	10^{31}
LEP (LEP II*)	CERN	e^+e^-	$2 \times 55(100) \text{ ГэВ}$	10^{31}
SPS	CERN	$p\bar{p}$	630 ГэВ	10^{30}
LHC*	CERN	$p\bar{p}$	$5 - 6 \text{ ТэВ}$?

HERA Германия $e^\pm p$ $30 + 820 \text{ ГэВ}$ $2 \cdot 10^{31}$

УНК* Россия $p(\bar{p}?)$ $3(2 \times 3?) \text{ ТэВ}$?

Вторая составляющая экспериментальных комплексов в физике высоких энергий – *детекторы*. Обычно реакции с участием элементарных частиц (“события”) изучаются путем наблюдения *треков* – “следов” вдоль траекторий – заряженных частиц. Используя в первой половине века счетчики Гейгера и туманные камеры Вильсона позднее были заменены на ядерные фотоэмульсии и пузырьковые камеры, которые, в свою очередь, сейчас практически повсеместно вытеснены электронными методиками наблюдения. В последних прохождение заряженной частицы регистрируется большим количеством относительно небольших *трековых детекторов*, отклик которых в виде электрического сигнала усиливается и анализируется электронной аппаратурой и записывается в память компьютера, с помощью которого можно производить отбор событий заданного типа, их обсчет и визуализацию картины события. Рассмотрим основные типы используемых трековых детекторов. Наиболее “быстрыми” по времени срабатывания являются *черенковские* и *переходные* счетчики, работа которых основана на регистрации фотоумножителями фотонов черенковского и переходного излучения, испускаемых ультрарелятивистской заряженной частицей при прохождении через оптически плотную среду или границу раздела сред. Работа всех остальных детекторов так или иначе связана с наблюдением остаточной ионизации, созданной пролетевшей частицей. Например, рекомбинационные процессы приводят к образованию возбужденных атомов вещества, испускающих фотоны при переходе в нормальное состояние. Эти фотоны также можно зарегистрировать с помощью фотоумножителя – таким образом работают *сцинтилляционные* счетчики. Многие из счетчиков – *ионизационные, проволочные, стримерные камеры* – непосредственно реагируют на сигнал тока образовавшихся ионов, стекающих под действием электрического поля на электрод (находящуюся под напряжением пластину или тонкую проволоку). Ускоряясь в поле электрода, ионы и электроны ионизируют новые атомы, образуя лавину. Часто напряжение на электродах подбирают с таким расчетом, чтобы даже в отсутствие внешних ионизирующих факторов между ними шел слабый разряд, и тогда возникновение дополнительной ионизации обнаруживается по резким скачкам тока разряда. Замечательно, что знание скорости дрейфа ионов и электронов и времени прохождения частицы, регистрируемого быстрым (например, черенковским) счетчиком позволяет с высокой точностью определять расстояние от трека до электрода – в лучших современных трековых детекторах погрешность в измерении координат трека не превосходит 50μ ! Время жизни многих

интересующих нас частиц, распадающихся за счет слабого взаимодействия, оказывается порядка $10^{-13} \div 10^{-12} c$, так что за это время они проходят путь $\sim 10^2 \cdot (E/mc^2) \mu$, и указанная точность позволяет различать положение вершин рождения и распада. Поэтому трековые детекторы с высоким разрешением часто называют также "вершинными" детекторами. В последние годы – благодаря малым размерам, дешевизне и простоте работы – все большее распространение получают *полупроводниковые* счетчики, которые представляют из себя слоистые структуры – тонкие пленки полупроводников, образующих *pn* - переходы, с металлизированным напылением между слоями, играющим роль электрода. Возникающая при прохождении частицы ионизация регистрируется по импульсу тока. Основная проблема использования таких счетчиков состоит в изменении свойств полупроводника под действием облучения. В связи с этим сейчас довольно интенсивно ведутся работы по созданию устойчивых к бомбардировке частицами полупроводниковых структур и по тщательному изучению зависимости характеристик полупроводникового детектора от полученной им дозы облучения.

При работе с ультрарелятивистскими частицами серьезную проблему представляет точное определение их энергии в тех случаях, когда кривизна их трека в магнитном поле слишком мала, чтобы ориентироваться на нее. Обычно для ее решения используются *слоистые калориметры* – множество слоев сцинтиллятора, сигнал которого пропорционален остаточной ионизации, и расположенных между ними слоев металла. Размеры калориметра должны быть достаточно большими для полной остановки частицы – в этом случае суммарный сигнал детекторов ионизации довольно точно соответствует энергии частицы. Правда, при конструировании калориметра необходимо учесть наличие нескольких конкурирующих механизмов ионизации – например, если вклад ударной ионизации, обусловленной столкновениями вторичных частиц (протонов, нейтронов, осколков ядер) с ядрами атомов, окажется одного порядка с вкладом электромагнитных лавин, формирующихся за счет испускания жестких γ - квантов с последующим фоторождением электрон-позитронных пар, то связь степени ионизации с энергией поглощенной калориметром частицы может оказаться неоднозначной. Поэтому материал слоев и их толщину подбирают так, чтобы обеспечить доминирующую роль одного из механизмов: например, для усиления ядерной компоненты ионизации можно использовать в качестве металла обедненный уран – его ядра легко делятся, и к тому же при делении испускают нейтроны, которые также инициируют деление соседних ядер. Напротив, для выделения сигнала от e^\pm используют металлы с более устойчивыми ядрами, для которых сечение ро-

ждения пар составляет существенную часть полного сечения рассеяния γ - квантов. Так как длина пробега высокоэнергетичной частицы в веществе довольно велика, современные слоистые калориметры имеют значительные размеры – например, калориметр H1, используемый в установке HERA и предназначенный для измерения энергии частиц в диапазоне $50 \div 500 \text{ ГэВ}$ с ошибкой $\leq 1 \div 3.5\%$, имеет массу рабочего вещества около 500 т.

Ускорительно-детекторные комплексы являются поставщиками огромного количества экспериментальной информации. На практике, однако, теоретикам для обработки нужна информация строго определенного типа, так что интересующие их события составляют лишь $10^{-7} \div 10^{-9}$ от общего числа событий в пучке частиц ТэВ-ных энергий. Поэтому необходима система отбора интересных редких событий. Часто предварительный отбор осуществляется уже на стадии записи информации с трекового детектора с помощью триггерных устройств. При исследовании структуры взаимодействия частиц на очень малых расстояниях наиболее важна информация о жестких процессах с большой передачей импульса. Для таких процессов характерна большая величина углов разлета вторичных частиц, и поэтому возможно отобрать такие процессы с помощью простой схемы совпадений: на входе камеры трековых детекторов ставится быстрый детектор частиц, а на выходе – несколько таких детекторов. Если углы разлета невелики, то все вторичные частицы на выходе попадут в один детектор, и поэтому при срабатывании входного и одного из выходных детекторов сигнал с трековой камеры можно не записывать, в то время как при одновременном срабатывании нескольких выходных детекторов (что свидетельствует о возможности жесткого процесса), времени, в течении которого существует остаточная ионизация в трековых детекторах ($\sim 10 \mu\text{с}$), достаточно для срабатывания электронной схемы, включающей запись информации о событии. Такая фильтрация позволяет сильно упростить анализ информации, но предъявляет повышенные требования к осмысленности поиска, так как есть опасность сделать фильтр чересчур грубым и отсеять новые интересные события.

Завершая рассказ о технике экспериментов с элементарными частицами, следует еще раз подчеркнуть его обзорный характер – для более детального знакомства с работой ускорительной техники и детекторов частиц требуется чтение более специальной литературы по этим вопросам.

Задачи к лекции 1':

1. Найти величину магнитного поля, необходимого для удержания частицы с энергией 10^{15} ГэВ , в кольце ускорителя, охватывающего Землю по экватору ($R \simeq 6400 \text{ км}$). Какова в этом случае будет мощность потерь на синхротронное излучение – для протонов и для электронов?
2. При рассеянии π^- с энергией $E \simeq 800 \text{ МэВ}$ на покоящихся p наблюдается резонансное увеличение сечения. Отношение максимумов частот рождения $\pi^- \pi^0 p$, $\pi^- \pi^+ n$ и $\pi^0 \pi^0 n$, измеренное на эксперименте, составило соответственно

$$N_1 : N_2 : N_3 = 1 : (1.9 \pm 0.2) : (0.15 \pm 0.15) .$$

Найти массу и изотопический спин резонанса.

3. При облучении мишени пучком π^- в детекторе были обнаружены четыре пары $e^+ e^-$, суммарные импульсы которых направлены от одной точки. Координаты точек рождения пар относительно предполагаемой вершины взаимодействия и их энергии равны:

\vec{r}_i , см	E_i , МэВ
(4, 0, 8)	250 ± 10
(-2, 5, 2)	130 ± 5
(1, -3, 1)	40 ± 5
(-1, 3, 3)	80 ± 4

Какое событие имело место в вершине?