

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.12.01

ПОИСКИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ВЕКТОРНЫХ БОЗОНОВ*)**Д. Б. Клайн, К. Руббиа, С. ван дер Меер**

Эти массивные элементарные частицы нужны в теории как переносчики слабых сил. Вскоре они должны быть обнаружены в соударениях протонов с антипротонами.

Одним из основных достижений современной физики было развитие за последние пятнадцать лет нового класса единых теорий, описывающих силы между элементарными частицами. До того как были предложены эти теории, четыре наблюдаемых типа сил природы казались совершенно независимыми друг от друга. Электромагнитные силы управляют взаимодействиями электрически заряженных частиц; слабые силы ответственны за такие процессы, как бета-распад радиоактивных атомных ядер; сильные ядерные силы удерживают составные части ядер; тяготение удерживает составные части Вселенной. Наиболее успешная из новых единых теорий устанавливает связь между электромагнетизмом и слабыми силами, предполагая, что они являются просто различными проявлениями лежащих в их основе единых сил.

Единая электрослабая теория вскоре будет подвергнута решающему экспериментальному испытанию. Основное предсказание теории — это существование трех массивных частиц, называемых промежуточными векторными бозонами. Первый в мире ускоритель частиц с энергией, достаточной для рождения таких частиц, недавно вступил в строй в Европейской Организации ядерных исследований (ЦЕРН) в Женеве. Ускоритель был первоначально предназначен для создания протонов высокой энергии, направляемых на неподвижную мишень, но теперь он переведен на новый режим работы, в котором осуществляется соударение протонов и антипротонов, движущихся навстречу друг другу. На ускорителе со сталкивающимися пучками только что завершены предварительные испытания и планируется, что в следующем месяце начнутся эксперименты со специально разработанным новым детектором частиц. Если промежуточные векторные бозоны существуют и если они обладают свойствами, предсказываемыми электрослабой теорией, то они должны быть вскоре обнаружены. Несомненно, эти частицы — наиболее ценные трофеи физики и их открытие завершило бы исследование, начатое более сорока лет назад.

*) Cline D. B., Rubbia C., van der Meer S. The Search for Intermediate Vector Bosons. — Scientific American, March 1982, v. 246, pp. 38—49. — Перевод И. В. Андреева.

Д. Б. Клайн — профессор физики Висконсинского университета и Фермиевской лаборатории, К. Руббиа — профессор физики Гарвардского университета и сотрудник ЦЕРН, С. ван дер Меер — сотрудник ЦЕРН.

Согласно существующим взглядам на взаимодействие элементарных частиц, сила между двумя частицами возникает при обмене третьей, промежуточной частицей. Такое описание лежит в основе квантовой теории поля. Идея о поле, распространяющемся в пространстве, нужна для того, чтобы объяснить, как разделенные в пространстве частицы могут воздействовать друг на друга; это поле является квантовым, так как оно проявляется в виде дискретных единиц — промежуточных частиц. В электромагнитных и слабых взаимодействиях обмениваемая частица — это член семейства так называемых векторных бозонов. Этот термин относится к классификации частиц по одному из их наиболее существенных свойств — спиновому моменту количества движения. Бозон (названный так в честь индийского физика С. Н. Бозе) — это частица, спин которой, будучи измерен в фундаментальных единицах, равен целому числу, то есть 0, 1 или 2. Векторным называется бозон, величина спина которого равна 1.

В случае электромагнетизма обмениваемый векторный бозон — это фотон, не обладающий массой и зарядом «волновой пакет» электромагнитной энергии, который действует как квант электромагнитного поля. Фотоны легко наблюдать экспериментально (например, в виде света), и, изучая их свойства, физики построили замечательно точную и полную теорию, называемую квантовой электродинамикой, или КЭД, которая представляет собой квантовую теорию электромагнитных сил.

Соответствующий переносчик сил в слабых взаимодействиях — это промежуточный векторный бозон (он называется промежуточным просто потому, что играет роль посредника между частицами). Существование такого рода частиц впервые предположил в 1935 г. японский физик Хидеки Юкава, который в то время искал единое объяснение для двух обнаруженных ядерных сил: сильных и слабых. Юкава заметил, что радиус действия силы должен быть обратно пропорционален массе частицы, переносящей эту силу. Например, радиус электромагнитной силы бесконечен в соответствии с безмассовостью фотона. С другой стороны, две ядерные силы имеют ограниченный радиус действия, и поэтому Юкава предположил, что они должны переноситься частицами, обладающими массой.

В частности, Юкава постулировал существование умеренно тяжелой частицы, позднее названной мезоном, обмен которой приводит к сильному притяжению между протоном и нейтроном. Первая правильно идентифицированная частица такого типа, π -мезон (пион), была открыта в 1947 г. в потоке вторичных частиц, генерированных при соударении частицы космических лучей с атомом в атмосфере; теперь большое число таких частиц может быть при желании генерировано на ускорителях частиц.

В настоящее время считают, что частицы ядер, включая мезоны, построены из более фундаментальных составляющих, называемых кварками. Кварки связаны сильными силами, но эти силы существенно отличаются от тех, которые связывают протоны и нейтроны. Считается, что сила между кварками переносится семейством из восьми безмассовых векторных бозонов, называемых глюонами. Кваркам и глюонам приписывается новое свойство с произвольным названием «цвет», которое играет такую же роль в сильных взаимодействиях, какую электрический заряд играет в электромагнитных взаимодействиях. В силу этой аналогии квантовая теория поля сильных взаимодействий называется квантовой хромодинамикой, или КХД.

□

Слабые ядерные силы имеют еще более короткий радиус действия, чем сильные силы, действующие между протонами и нейтронами. Следовательно, можно ожидать, что промежуточные векторные бозоны, ответ-

ственные за слабые силы, имеют массу, которая больше, чем масса пиона. Ранние попытки обнаружить промежуточные частицы, связанные со слабыми силами, были безуспешными скорее всего потому, что большие массы этих бозонов оставляли их вне досягаемости существовавших ускорителей частиц. Однако до появления в конце 1960-х, начале 1970-х годов единой электрослабой теории, не было хорошей оценки для масс частиц, ответственных за слабые силы.

Электрослабая теория была развита независимо Стивеном Вайнбергом из Гарвардского университета и Абдусом Саламом из Международного центра теоретической физики в Триесте при существенном вкладе Шелдона Ли Глэшоу из Гарварда и ряда других физиков. Эта теория, которая теперь рассматривается как «стандартная» схема электромагнитных и слабых взаимодействий, впервые дала конкретные и проверяемые предсказания для свойств промежуточных векторных бозонов, включая их массу. Более того, теория требовала, чтобы существовало три таких частицы с электрическими зарядами $+1$ (W^+), -1 (W^-) и нуль (Z^0). Наилучшая современная оценка для масс промежуточных векторных бозонов, выраженная через эквивалентную энергию, составляет 79,5 ГэВ для W^+ и W^- и 90 ГэВ для Z^0 . (Сокращение ГэВ обозначает гигаэлектронвольт, или миллиард электронвольт; для сравнения укажем, что масса протона эквивалентна величине, немного меньшей, чем один ГэВ.)

Идея, лежащая в основе стандартной теории, состоит в том, что и электромагнетизм и слабые силы являются проявлениями единого и более фундаментального закона природы. При чрезвычайно высокой энергии (достаточно большой, чтобы W^- и Z -частицы генерировались бы столь же легко, как и фотоны) события, обусловленные этими двумя силами, должны быть неразличимыми. Эта теоретическая унификация достигается объединением фотона и промежуточных векторных бозонов в единое семейство из четырех частиц. Несомненно, что при доступных в настоящее время энергиях электромагнитные взаимодействия резко отличаются от слабых; более того, кажется, что фотон и W^- , и Z -частицы едва ли имеют что-либо общее, так как первый не имеет массы, а три других относятся к наиболее тяжелым частицам, существование которых мы предполагаем. Это несоответствие объясняется в стандартной теории на основе представления о нарушенной симметрии, благодаря которой при понижении энергии возникают различия между силами, подобно тому, как при понижении температуры вещество разделяется на различные фазы.

Один из подходов к пониманию единой электрослабой теории начинается с воображаемого первичного состояния, в котором ни фотон, ни промежуточные векторные бозоны не обладают массами. Именно в результате нарушения симметрии природы W^+ , W^- и Z -бозоны приобретают большую массу, в то время как фотон остается безмассовым. Механизм, приводящий к подобному различию между переносчиками сил, впервые обсуждался в 1964 г. Питером Хиггсом из Эдинбургского университета. Любопытно, что механизм Хиггса может привести к возникновению масс W^- и Z -частиц, только если постулировать существование еще одной массивной частицы, которую стали называть хиггсовским бозоном. Его ищут наряду с промежуточными векторными бозонами.

Электрослабая теория получила важное экспериментальное подтверждение в 1973 г. в результате открытия, сделанного в ЦЕРНе и в Фермиевской Национальной ускорительной лаборатории вблизи Чикаго. Вплоть до этого времени все известные слабые взаимодействия материи приводили к обмену электрическим зарядом. Например, протон мог передать свой заряд $+1$ нейтрину (безмассовой частице, не обладающей зарядом). В результате протон становился нейтроном, а нейтрино превращалось

в позитрон, или антиэлектрон. Все такие события могли быть объяснены обменом заряженных промежуточных векторных бозонов W^+ и W^- . В экспериментах 1973 г. были обнаружены слабые взаимодействия, в которых частицы сохраняли те же заряды, которыми они обладали до соударения, как это имеет место в электромагнитных взаимодействиях. Слабые взаимодействия такого типа можно объяснить только обменом нейтрального промежуточного векторного бозона (Z^0 -частицы) или, при эквивалентном описании, действием нейтрального слабого тока (см. «Обнаружение нейтральных слабых токов», Д. Б. Клайн, А. К. Манн, К. Руббиа; *Scientific American*, декабрь 1974 г.). В 1979 г. Вайнбергу, Саламу и Глэшоу была присуждена Нобелевская премия по физике «за их вклады в теорию единого слабого и электромагнитного взаимодействия между элементарными частицами, включая ... предсказание слабого нейтрального тока».

□

Так как существование нейтральных слабых токов полностью подтвердилось, то естественно было попытаться найти способ обнаружить Z^0 , а также W^+ - и W^- -частицы. Проблема создания частиц с такой большой массой выглядела однако устрашающей. Крупнейшими ускорителями частицы были в то время машины, в которых один пучок протонов разогнался до высокой энергии и затем направлялся на закрепленную мишень. При соударении частицы пучка с частицей мишени основная часть высвободившейся энергии передается этой движущейся двухчастичной системе вместо того, чтобы идти на ее разрушение; только малая часть энергии пучка используется для рождения новых частиц. Казалось несомненным, что единственный шанс наблюдать промежуточный векторный бозон может дать машина, в которой ускоренные навстречу друг другу частицы сталкиваются, преобразуя почти всю свою энергию в новые частицы.

Накопительные кольца для электронов и позитронов уже функционировали в течение нескольких лет. Большое преимущество использования электронов и позитронов состоит в том, что одно кольцо магнитов и радиочастотных полостей может одновременно ускорять частицу и ее античастицу в противоположных направлениях, так что вращающиеся навстречу друг другу пучки образуются в одной имеющей форму бублика вакуумной камере. С другой стороны, так как электроны и позитроны — это очень легкие частицы, они быстро растрачивают свою энергию, когда движутся по криволинейному пути в накопительном кольце. Поэтому сооружение электрон-позитронной машины, достаточно большой, чтобы достигнуть энергии промежуточных векторных бозонов, казалось неосуществимым. Вместо этого существовал план построить накопительные кольца, в которых сталкивались бы летящие навстречу друг другу протоны; чтобы осуществить такие столкновения, нужны два переплетающихся кольца. Не предполагалось, что первая из этих протон-протонных машин начнет действовать до середины 1980-х годов или позднее.

□

В 1976 г. двое из нас (Клайн и Руббиа) вместе с Питером М. Макинтайром пришли к альтернативной идее. Вместо строительства совершенно новой машины со сталкивающимися пучками мы предложили (что гораздо дешевле) превратить существующий протонный ускоритель с фиксированной мишенью в машину со сталкивающимися пучками, запустив вращающийся в противоположном направлении пучок антипротонов в ту же кольцевую камеру, в которой находился имевшийся протонный пучок. Наше предложение встретило поддержку и после тщательного обсуждения проблем, с которыми сталкивался подобный проект, было решено постро-

ить протон-антипротонные машины на основе двух крупнейших в мире протонных ускорителей: суперпротонного синхротрона (SPS) в ЦЕРНе, который начал функционировать при максимальной энергии 400 ГэВ в 1976 г. и более совершенного варианта подобной машины в Фермиевской лаборатории, который в то время находился еще в стадии проектирования.

Реконструкцию в ЦЕРНе было по многим причинам легче осуществить, и она была завершена прошлым летом под руководством Роя Биллинга и одного из нас (ван дер Меер); первые протон-антипротонные соударения при проектной максимальной энергии 270 ГэВ в каждом пучке наблюдались в июле. К концу декабря, когда машина была остановлена на рождественские праздники, было зарегистрировано более 250000 таких соударений; однако, из-за сравнительно малой ожидаемой вероятности образования промежуточных векторных бозонов в протон-антипротонных столкновениях, было неудивительно, что такие бозоны не были зарегистрированы в этих измерениях. Ожидается, что ситуация драматическим образом изменится в следующей серии экспериментов, когда интенсивность пучков, а следовательно и частота соударений будут увеличены на порядок величины или более.

Большая машина со сталкивающимися протон-антипротонными пучками в Фермиевской лаборатории все еще находится в стадии конструирования и должна начать работать в 1985 г. Так как первоначально она была предназначена для ускорения одного протонного пучка до энергии 1 ТэВ, или триллион электрон-вольт, она была названа теватроном. Ожидается, что после ее перевоплощения в машину со встречными пучками будет достигнута полная энергия соударения, равная 2 ТэВ (2000 ГэВ), что следует сравнить с 540 ГэВ машины ЦЕРНа. Когда сооружение машины Фермиевской лаборатории будет завершено, она будет первым большим ускорителем, в котором используется кольцо сверхпроводящих магнитов.

□

Как создать противоположно направленные пучки материи и антиматерии в накопительном кольце? Наиболее сложная часть проблемы для этих двух ускорителей состоит в том, чтобы накопить достаточно плотный «сгусток» антипротонов, обеспечивающий большое число столкновений с вращающимися в противоположном направлении протонами. В противоположность протонам, антипротоны нельзя получить простым способом из какого-либо естественного источника; они сами должны быть созданы в соударениях частиц высоких энергий. Пучок высокоэнергичных протонов направляется на металлическую мишень и антипротоны, созданные при соударениях с атомами мишени, при помощи магнитов вводятся в специальное, предназначенное для этого накопительное кольцо. Этот процесс крайне неэффективен; в среднем один антипротон сравнительно низкой энергии создается примерно миллионом высокоэнергетических протонов, сталкивающихся с мишенью. Чтобы учесть роль такой скорости рождения для дальнейшего, было вычислено, что для получения нужного числа протон-антипротонных соударений в машине со встречными пучками в ЦЕРНе необходимо создать сгустки антипротонов (и протонов), каждый из которых состоял бы по крайней мере из 100 миллиардов частиц. Последовательные небольшие сгустки антипротонов собираются и объединяются друг с другом каждые 2,4 с; при такой скорости требуется около 24 часов, чтобы накопить несколько сотен миллиардов антипротонов для экспериментов со встречными пучками в ЦЕРНе.

Создание достаточного числа античастиц — это не единственная проблема. Когда антипротоны испускаются из мишени, они имеют разброс скоростей и направлений движения. Рассматриваемые в их собственной

системе отсчета антипротоны образуют газ, и их случайное движение можно характеризовать температурой. Если температура слишком высока, некоторые из частиц будут сталкиваться со стенками ускорителя, и пучок будет затухать. Следовательно, необходим какой-то метод «охлаждения» антипротонного пучка (то есть, уменьшения его случайных движений), чтобы сделать его настолько сосредоточенным, насколько это возможно.

Один из таких методов охлаждения пучка, называемый электронным охлаждением, был впервые предложен более десяти лет назад Гершем Ицковичем Будкером из Института ядерной физики в Новосибирске, СССР. Метод основан на кратковременном смешивании «холодного» пучка электронов (такого, в котором все частицы имеют одинаковые скорости и направления движения) с «горячим» антипротонным пучком. При этом часть тепловой энергии случайного движения антипротонов передается электронам. Повторно смешивая антипротонный пучок со свежими электронными пучками, можно в значительной мере охладить антипротоны, если их начальная энергия не слишком велика. Фактическая схема в ЦЕРНе имеет дело с антипротонным пучком, начальная энергия которого слишком высока, чтобы его можно было эффективно охладить этим методом и он более не исследуется для этой цели. Электронное охлаждение, однако, до сих пор изучается для проекта Фермиевской лаборатории.

□

Другой метод охлаждения пучка, в большей мере удовлетворяющий требованиям протон-антипротонного ускорителя ЦЕРНа, был предложен в 1968 г. одним из нас (ван дер Меер). Этот метод, называемый стохастическим охлаждением (так как он основан на статистическом процессе), использует датчик в одной из секций накопительного кольца, чтобы измерять среднее отклонение частиц от идеальной орбиты. Измерение преобразуется в корректирующий сигнал, который передается поперек кольца к «отбрасывателю», расположенному на другой стороне кольца. Отбрасыватель прикладывает электрическое поле к своей секции кольца в подходящий момент времени, чтобы сдвинуть центр масс пролетающих частиц по направлению к идеальной орбите. Хотя частицы движутся почти со скоростью света, корректирующий сигнал может прийти в нужное время, так как он идет по более короткому пути вдоль хорды охлаждающего кольца.

Оба метода охлаждения пучка успешно испытаны в последние несколько лет в Новосибирске, ЦЕРНе и Фермиевской лаборатории. В результате имеются веские основания считать, что полномасштабные коллекторные антипротонные кольца, такие как в ЦЕРНе и Фермиевской лаборатории, будут работать в соответствии с проектом. Охлаждение пучков становится стандартной частью ускорительной технологии.

Для нужд экспериментов в ЦЕРНе частицы проходят через сложную последовательность взаимосвязанных устройств, управляющих пучком (рис. 1). Сначала пучок протонов ускоряется до энергии 26 ГэВ в протонном синхротроне (PS), первоначальном ускорительном кольце ЦЕРНа, сооруженном в 1959 г. Затем протонный пучок направляется на медную мишень, рождая множество частиц, включая небольшое число антипротонов с энергией 3,5 ГэВ. Антипротоны собираются и переводятся в широкоапертурное накопительное кольцо, называемое антипротонным накопителем (AA), в котором они сначала несколько охлаждаются стохастическим методом и затем движутся к немного меньшей орбите, где они соединяются с ранее инжектированными сгустками и подвергаются дальнейшему охлаждению (рис. 2, 3). После того, как собрано несколько сотен

миллиардов антипротонов, они посылаются обратно в PS-кольцо, где ускоряются до энергии 26 ГэВ, прежде чем быть инжектированными в SPS. Тем временем протоны с энергией 26 ГэВ из PS-кольца инжектируются в SPS-кольцо в противоположном направлении. Вращающиеся навстречу друг другу пучки окончательно ускоряются в SPS-кольце до энергии 270 ГэВ каждый. Пучки сталкиваются в двух зонах взаимо-

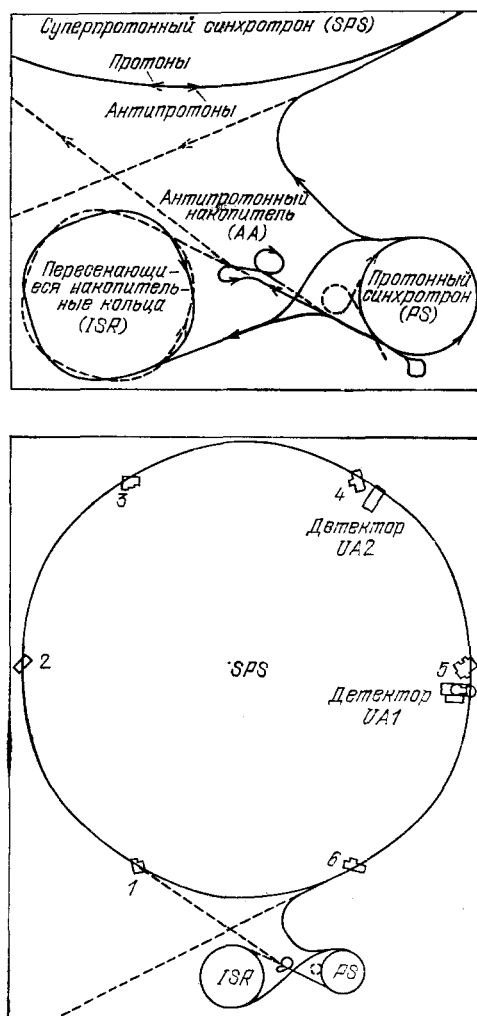


Рис. 1. Вращающиеся навстречу друг другу протоны и антипротоны получают в ЦЕРНе как конечный результат работы нескольких взаимосвязанных ускорительных колец.

Сначала пучок протонов (штриховые линии) ускоряется до энергии 26 ГэВ в протонном синхротроне (PS). Протоны затем направляются на металлическую мишень, рождая (среди других частиц) небольшое число антипротонов с энергией 3,5 ГэВ. Антипротоны (сплошные линии) собираются и переводятся в антипротонный накопитель (AA), где они соединяются с ранее инжектированными антипротонами и концентрируются в плотные сгустки, насчитывающие несколько сотен миллиардов частиц каждый. Антипротонные сгустки посылаются затем обратно в PS-кольцо, где они ускоряются до 26 ГэВ. Антипротоны с энергией 26 ГэВ вырываются в кольцо SPS, где в противоположном направлении уже циркулируют протоны такой же энергии. Эти два пучка окончательно ускоряются в большом кольце до энергии 270 ГэВ каждый. На общем плане показано положение новых детекторов, которые размещены в двух длинных прямолинейных секциях SPS-кольца, где сталкиваются вращающиеся навстречу друг другу пучки. Другие изображенные на рисунке кольца используются для различных других экспериментов.

действия, где находятся большие детекторы частиц (рис. 4). Взаимодействия происходят так редко, что не сказываются на времени жизни пучков несколько часов.

В настоящее время планы Фермиевской лаборатории предусматривают более интенсивный источник антипротонов, чем действующий в ЦЕРНе. Для создания антипротонов в Фермиевской лаборатории будут использованы протоны с более высокой энергией. Исследуется также несколько альтернативных схем. Одна из них использует комбинацию стохастического охлаждения и электронного охлаждения для накопления 100 миллиардов антипротонов менее чем за час. Антипротоны должны

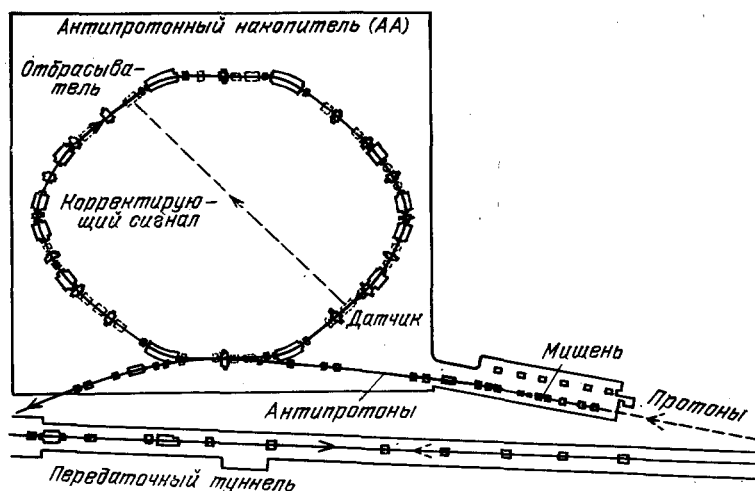


Рис. 2. Антипротонный накопитель выполняет две функции, существенные для экспериментов на встречных пучках в ЦЕРНе: он объединяет последовательно инжектируемые сгустки антипротонов и «охлаждает» их с помощью статистического процесса, называемого стохастическим охлаждением.

Для охлаждения в кольцо помещено большое число связанных между собой датчиков и «отбрасывателей» (заштрихованные прямоугольники), а также магнитов (не заштрихованы), отклоняющих и фокусирующих пучок, как и в любом накопительном кольце. При стохастическом охлаждении датчик одной из секций накопительного кольца измеряет среднее отклонение частиц от идеальной орбиты; затем корректирующий сигнал посылается поперек кольца к отбрасывателю, расположенному на другой стороне, достигая его в нужный момент времени, чтобы подтолкнуть частицы обратно к идеальной орбите. На рисунке показана одна такая связь.

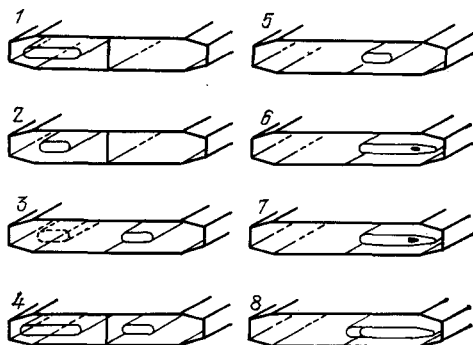


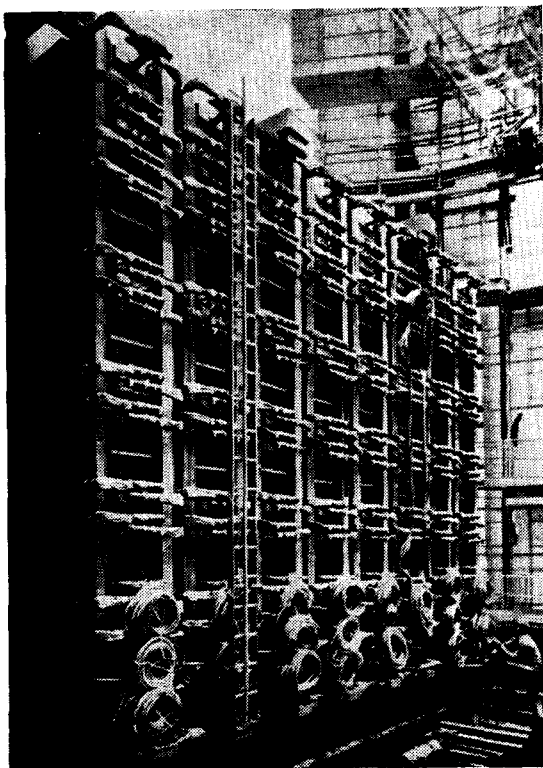
Рис. 3. Накопление и охлаждение антипротонов в АА-кольце иллюстрируется последовательностью рисунков, показывающих поперечное сечение этого кольца.

Первый сгусток, содержащий около 20 миллионов антипротонов, инжектируется в кольцо и циркулирует во внешней части широкоугольной вакуумной камеры (1). Во время инжекции это пространство отделено от остальной части камеры механически управляемой металлической заслонкой. Инжектируемые частицы подвергаются предварительному охлаждению стохастическим методом в течение двух секунд, что ослабляет их случайное движение в 10 раз как в продольном, так и в поперечном направлениях (2). Затем заслонка опускается, и антипротоны с помощью магнитной системы сдвигаются в основную часть камеры, где они будут накапливаться (3). Заслонка опять поднимается, и второй сгусток антипротонов инжектируется через 2,4 с после первого (4). Второй сгусток подвергается той же процедуре, заканчивающейся его объединением с первым (5). Примерно через час, когда инжектировано 1500 сгустков и около 30 миллиардов антипротонов подвергнуто предварительному охлаждению и объединению, в большом сгустке начинает образовываться плотная сердцевина (6). Через 40 часов после инжектирования 60 000 первоначальных сгустков примерно триллион антипротонов вращается в накопителе, и большинство из них сконцентрировано в сердцевине (7). Затем прикладываются магнитные поля, чтобы извлечь эту сердцевину, что дает около 600 миллиардов антипротонов для эксперимента со встречными пучками. Остальные 400 миллиардов антипротонов остаются в накопителе и используются для образования следующего плотного сгустка (8). Еще через 24 часа вторая порция из 600 миллиардов антипротонов будет охлаждена и готова для инжекции. На всех рисунках внутренняя часть кольца находится справа.

впрыскиваться в кольцо теватрона, ускоряться до энергии 1000 ГэВ и сталкиваться с вращающимися навстречу им протонами в двух экспе-

Рис. 4. Новый детектор частиц Европейской Организации ядерных исследований (ЦЕРН) в Женева был спроектирован и построен группой из более чем 100 физиков из 11 институтов Европы и США.

Ожидается, что с помощью этого детектора впервые будет наблюдаться промежуточный векторный бозон. Большой многоцелевой детектор, называемый UA1 (подземная зона один) показан здесь в его «гараже», примыкающем к крупнейшему ускорителю частиц в ЦЕРНе — суперпротонному синхротрону (SPS), который недавно был превращен в машину со сталкивающимися протон-антипротонными пучками. Когда детектор готов к работе, он откатывается по рельсам влево, чтобы встать на пути сталкивающихся пучков. Электронное оборудование покрывает внешнюю часть установки, заслоняя центральные детектирующие камеры.



риментальных зонах. Первая зона, где намечено вскоре начать строительство, предназначена для размещения очень большого детектора.

□

Согласно электрослабой теории, промежуточные векторные бозоны могут рождаться в протон-антипротонных столкновениях с помощью различных механизмов, в которых кварк, входящий в состав протона, взаимодействует с антикварком, входящим в состав антипротона. Предполагается, что и протон, и антипротон состоят из трех составляющих их частиц; пользуясь своеобразной терминологией КХД, говорят, что протон содержит два «верхних» кварка (обозначаемых u) и один «нижний» кварк (d), в то время как антипротон имеет два «антиверхних» антикварка ($\bar{u}$) и один «антинижний» антикварк ($\bar{d}$). Когда кварк и антикварк сталкиваются, они аннигилируют друг с другом, выделяя энергию, которая может вновь материализоваться в виде новых частиц, включая промежуточные векторные бозоны. В некоторых случаях ожидается появление одиночного промежуточного векторного бозона (сопровождаемого частицами другого типа); в других случаях предсказывается рождение пары промежуточных векторных бозонов (рис. 5).

Ожидаемая частота рождения W^+ , W^- и Z^0 -частиц зависит от экспериментального параметра, называемого светимостью, которая определяется как число частиц высокой энергии, проходящих в секунду через квадратный сантиметр поперечного сечения области взаимодействия. Про-

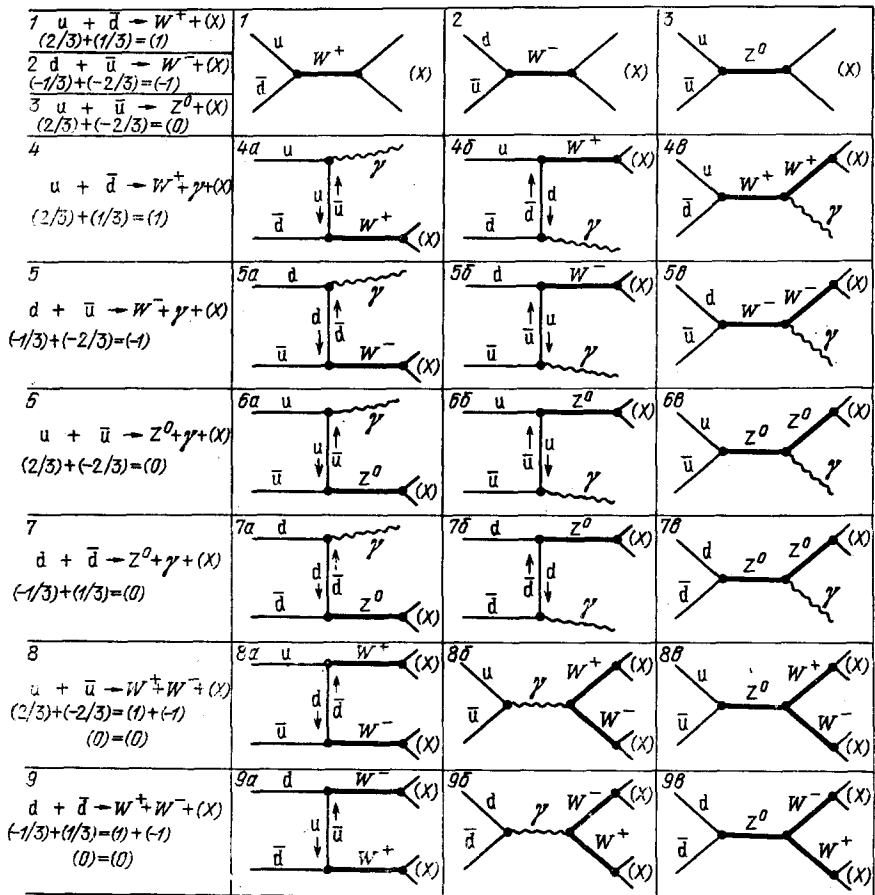
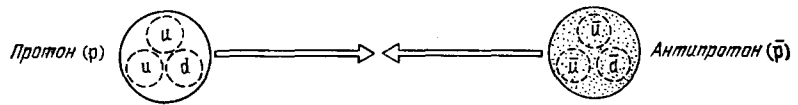


Рис. 5. Ожидается, что новые частицы возникнут в результате протон-антипротонных соударений при высокой энергии, когда кварк, входящий в состав протона, провзаимодействует с антикварком, входящим в состав антипротона.

Как показывает идеализированный рисунок сверху, предполагается, что протон состоит из двух «верхних» кварков (обозначенных как u) и одного «нижнего» кварка (d), в то время как антипротон содержит два «антиверхних» антикварка ($\bar{u}$) и один «антинижний» антикварк ($\bar{d}$). Кварк-антикварковые взаимодействия, которые могут вносить вклад в рождение промежуточных векторных бозонов, показаны в виде символических формул слева и в виде диаграмм справа. Постулируется существование трех промежуточных векторных бозонов: двух заряженных частиц (обозначаемых W^+ и W^-) и одной электрически нейтральной частицы (Z^0). Ожидается, что все три частицы окажутся чрезвычайно короткоживущими и, следовательно, смогут быть обнаружены только по их продуктам распада, изображаемым здесь символом X .

В первом ряду показаны три наиболее вероятных процесса. В следующих четырех рядах показаны процессы, в которых промежуточные векторные бозоны образуются вместе с фотонами (γ) высокой энергии. В последних двух рядах показаны процессы, в которых образуются пары промежуточных векторных бозонов. (Там, где частицы изображены движущимися в двух направлениях вдоль вертикальной линии, взаимодействие может осуществляться любым из этих способов.) Числа в скобках, помещенные под символами слева, указывают электрический заряд каждой из частиц; эти соотношения показывают, что заряд сохраняется во всех случаях. Кварки имеют дробные заряды. Фотоны не имеют заряда.

ектная светимость машины ЦЕРНа при инжекции 600 миллиардов антипротонов на сгусток составляет 10^{30} частиц на квадратный сантиметр в секунду. При том же числе антипротонов на сгусток светимость машины Фермиевской лаборатории должна достигнуть $4 \cdot 10^{30}$ частиц на квадратный сантиметр в секунду (благодаря более высокой энергии и, следовательно, меньшему размеру пучка). Можно рассчитать, что при таких светимостях скорость рождения W^{+-} , W^0 -частиц, и одиночного и парного, должна быть достаточно высокой, чтобы они могли регистрироваться довольно часто, примерно тысячу раз в день (рис. 6). Незадолго до того, как машина в ЦЕРНе была остановлена в декабре, она на короткое время достигла

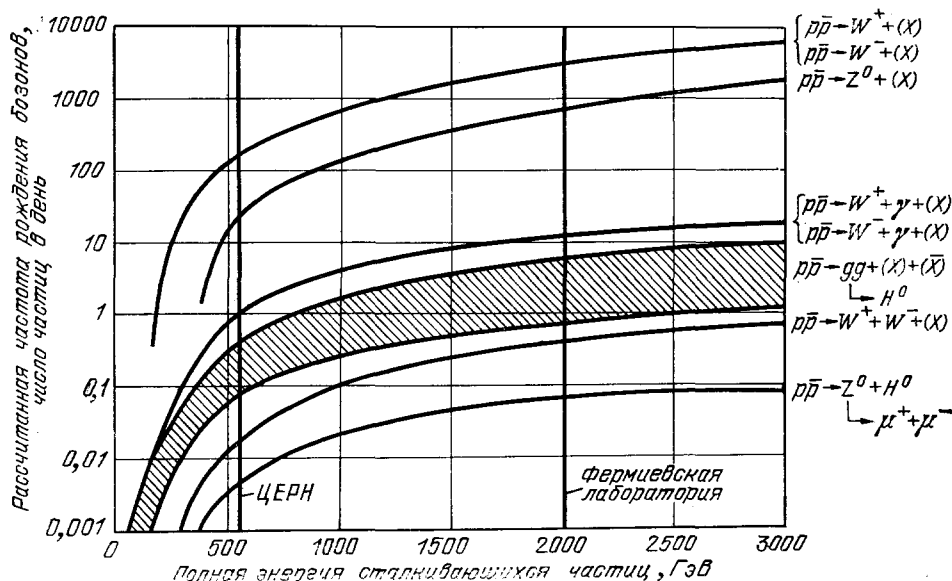


Рис. 6. Вычисленные скорости рождения промежуточных векторных бозонов и хиггсовских бозонов в различных процессах соударения в зависимости от полной энергии сталкивающихся пучков.

Кривые показывают частоту рождения, рассчитанную для каждого процесса, для одного дня работы при проектной частоте соударений ускорителей на встречных пучках в ЦЕРНе и Фермиевской лаборатории. (Фактическая скорость счета будет ниже из-за различных экспериментальных фоновых эффектов.) Две вертикальные линии указывают проектную полную энергию протон-антипротонных столкновений в ЦЕРНе и Фермиевской лаборатории. Ожидается, что процессы, приводящие к рождению заряженного промежуточного векторного бозона, сопровождаемого фотоном высокой энергии, будут служить чувствительными индикаторами магнитных свойств W^{+-} и W^0 -частиц. Процесс, в котором хиггсовский бозон рождается в результате слияния двух глюонов, имеет менее определенную частоту рождения, чем другие процессы, и поэтому для него указана область ожидаемых значений.

светимости 10^{28} частиц на квадратный сантиметр в секунду, достигнув порога, где можно было бы ожидать, что будут замечены первые признаки существования промежуточного векторного бозона. (Первоначальный опыт работы с коллайдером в ЦЕРНе показал также, что для протон-антипротонных столкновений можно в принципе достигнуть светимостей 10^{31} частиц на квадратный сантиметр в секунду и более высоких, если имеется достаточное число антипротонов.)

Как будут проявлять себя промежуточные векторные бозоны, рождаемые в таких столкновениях? Ожидается, что время жизни этих частиц чрезвычайно мало. Примерно за 10^{-20} с они должны самопроизвольно распадаться, образуя различные другие частицы, главным образом, кварк-антикварковые пары и лептон-антилептонные пары. (Лептоны — это

частицы, на которые воздействуют слабые, но не сильные ядерные силы.) Заряженные лептоны, такие как электроны и мюоны, могут быть зарегистрированы различными способами. Основное намерение состоит в том, чтобы зарегистрировать заряженные лептоны от распада промежуточных векторных бозонов и сравнить скорость их рождения или другие характеристики с величинами, которые ожидаются для лептонов, возникающих по другим причинам в процессе соударения. Ожидается, что сигнал, в данном случае угловое распределение лептонов от распадов W^+ , W^- и Z^0 -частиц, будет превышать фоновый «шум» от лептонов из других источников, в особенности при больших углах с направлением пучка (рис. 7).

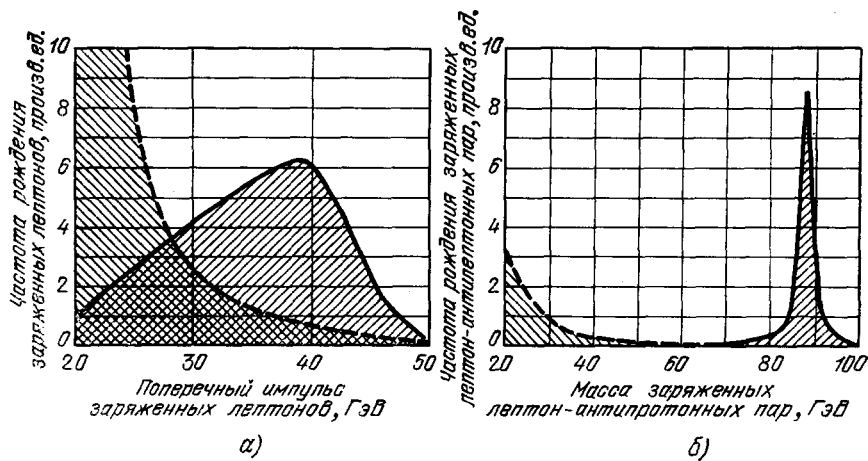


Рис. 7. Характерные сигналы, указывающие на рождение промежуточных векторных бозонов (сплошная линия), как ожидается, будут превышать фоновый «шум» (штриховая кривая), в особенности при больших углах с осью пучка.

На рис. а) приведен рассчитанный спектр заряженных лептонов, рождающихся с большим поперечным импульсом в протон-антипротонных соударениях с рождением заряженных промежуточных векторных бозонов. В сигнале предсказывается пик при поперечных импульсах, равных примерно половине массы заряженного промежуточного векторного бозона. Фоновая частота рождения лептонов, возникающих от других источников в процессе соударения, не имеет пика и меньше по величине, чем частота, обусловленная распадом W^+ и W^- -частиц. На рис. б) приведен рассчитанный спектр масс для распада нейтрального промежуточного векторного бозона в пару заряженных лептонов. В этом случае спектр имеет пик около предсказываемой массы Z^0 -частицы (90 ГэВ). Из-за пренебрежимо малого фонового шума именно в этом процессе наиболее велика вероятность обнаружить Z^0 -бозон.

Одним из безошибочных указаний на наличие промежуточных векторных бозонов было бы появление существенной асимметрии в частоте, с которой лептоны детектируются в направлении пучка антипротонов, и в противоположном направлении. Лептоны, которые возникают непосредственно вследствие сильных или электромагнитных взаимодействий частиц пучка, должны быть распределены совершенно симметрично. Однако, согласно электрослабой теории, распадающиеся промежуточные векторные бозоны должны испускать положительно заряженные лептоны преимущественно в направлении антипротонного пучка, а отрицательно заряженные — преимущественно в обратном направлении. Ожидаемая асимметрия лептонов, которая специфична для событий, вызываемых слабыми силами, возникает из-за спинов частиц, участвующих в рождении и распаде промежуточных векторных бозонов (рис. 8, 9). Наблюдение этого эффекта рассматривалось бы как сильное указание на то, что давно разыскиваемые промежуточные векторные бозоны, наконец-то, открыты. Их другие характеристики тогда могли бы быть измерены.

Окончательным испытанием правильности электрослабой теории было бы наблюдение хиггсовских бозонов среди продуктов протон-антипротон-

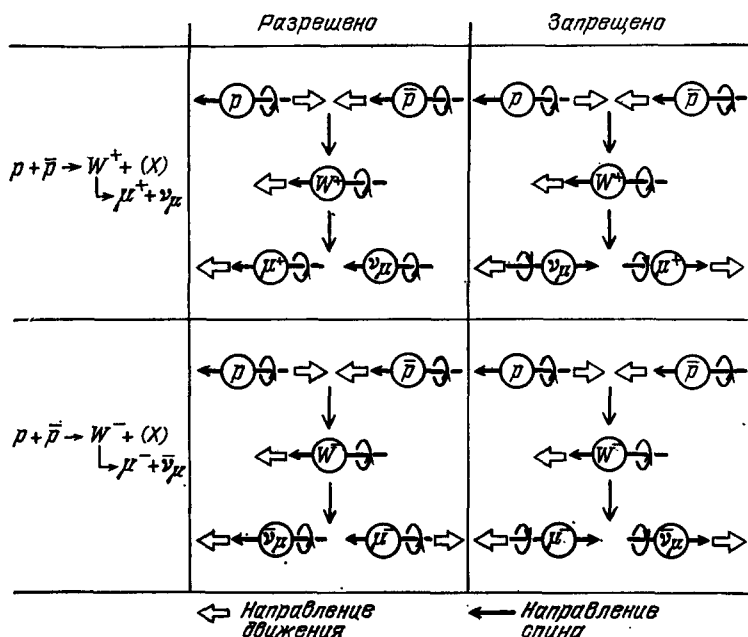


Рис. 8. Направление спина частиц, связанных с рождением и распадом промежуточных векторных бозонов, сильно сказывается на направлении движения продуктов распада. В результате появляется асимметрия в ожидаемой частоте наблюдения заряженных лептонов в различных направлениях по отношению к направлению исходных пучков. (Лептоны — это частицы, подобные электронам и мюонам, которые участвуют в слабых взаимодействиях, но не в сильных.) Например, когда заряженный промежуточный векторный бозон (W^+ или W^-) распадается с образованием мюона (μ^+ или μ^-) и нейтрино мюонного типа (ν_μ или $\bar{\nu}_\mu$), большинство положительно заряженных мюонов вылетает в направлении исходного антипротонного пучка, в то время как большинство отрицательно заряженных мюонов вылетает в направлении исходного протонного пучка (на рисунке налево и направо соответственно). Наблюдение этого эффекта, который специфичен для взаимодействий, вызываемых слабыми силами, рассматривалось бы как сильное указание на кратковременное существование заряженных бозонов среди продуктов распада.

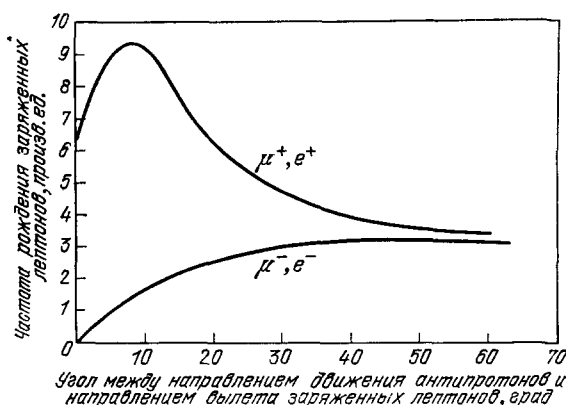


Рис. 9. Асимметрия предсказывается в угловом распределении заряженных лептонов, возникающих в протон-антипротонных соударениях, в которых рождаются заряженные промежуточные векторные бозоны.

Здесь приведено теоретическое предсказание для частоты рождения заряженных лептонов при различных углах относительно направления антипротонного пучка. Эффект наиболее силен в переднем направлении (т. е. при малых углах относительно направления антипротонов). Ожидается, что электроны (e^-) и позитроны (e^+) будут давать вклад в этот эффект наряду с мюонами, хотя электроны и позитроны охотнее взаимодействуют с материалом детектора, чем мюоны, и поэтому детектируются не столь часто. Точки двух приведенных кривых были рассчитаны для протон-антипротонных столкновений с полной энергией 2000 ГэВ. Такая энергия должна быть достигнута на ускорителе со встречными пучками, который сейчас сооружается в Фермиевской национальной ускорительной лаборатории неподалеку от Чикаго.

ных соударений (рис. 10). Открытие этой частицы продемонстрировало бы не только единство электромагнетизма и слабых сил, но также и то, что их объединение имеет такой характер, как это предсказывается стандартной электрослабой теорией. Обсуждение экспериментальной техники, необходимой для детектирования хиггсовского бозона лежит вне рамок этой

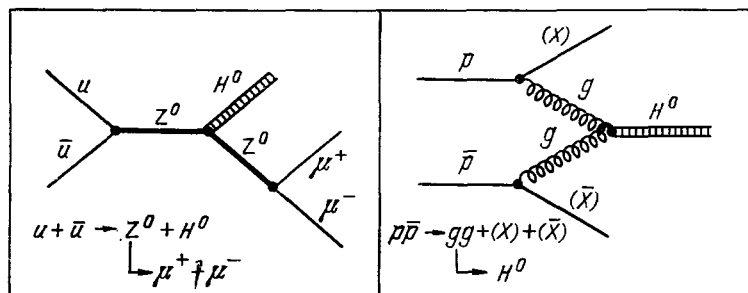


Рис. 10. Хиггсовские бозоны также могут быть впервые обнаружены в экспериментах на встречных пучках в ЦЕРНе или в Фермиевской лаборатории.

Открытие этой массивной незаряженной частицы (обозначаемой H^0) рассматривалось бы как решающая проверка «стандартной» единой теории, связывающей электромагнитные и слабые взаимодействия. Здесь изображены два процесса, которые могут привести к рождению хиггсовских бозонов. Слева хиггсовский бозон рождается в паре с нейтральным промежуточным векторным бозоном. Справа хиггсовский бозон возникает при слиянии двух глюонов, испускаемых при периферическом соударении протона и антипротона. (Глюоны — это промежуточные частицы сильных взаимодействий, которые, как предполагается, удерживают кварки в частицах, составляющих ядра.)

статьи. Однако протон-антипротонные столкновения могли бы привести к рождению хиггсовских бозонов и ожидаемая частота их рождения достаточно высока, чтобы они были открыты, благодаря характерным свойствам их продуктов распада, на ускорителях со сталкивающимися пучками либо в ЦЕРНе, либо в Фермиевской лаборатории.

□

Для поиска продуктов распада промежуточных векторных бозонов и хиггсовских бозонов были спроектированы несколько больших детекторов. Изготовление одной из этих установок, называемой UA1, в настоящее время завершено, и она будет использована при возобновлении исследований в ЦЕРНе в следующем месяце. Этот детектор — результат коллективных усилий более 100 физиков из 11 институтов Европы и США: Аахенского университета, Лаборатории физики частиц в Аннеси, Бирмингемского университета, ЦЕРНа, Колледжа королевы Мэри (Лондон), Колледж де Франс (Париж), Калифорнийского университета в Риверсайде, Римского университета, Резерфордской лаборатории, Ядерного исследовательского центра в Саклэ и Венского университета. Детектор имеет длину 10 метров, ширину 5 метров, и его полный вес равен 2000 тонн. Подземный зал, в котором он установлен, достаточно велик для того, чтобы детектор можно было откатить обратно в «гараж», когда он не должен находиться на пути сталкивающихся пучков (рис. 11, 12).

Детектор UA1 представляет собой многоцелевое устройство, предназначенное для распознавания большого числа частиц и для сбора информации в большом телесном угле вокруг точки столкновения пучков. Он измеряет энергии частиц многими способами, включая измерение кривизны их траекторий в магнитном поле. Большой дипольный магнит создает основное горизонтальное магнитное поле в объеме 85 кубических метров.

Внутри магнита, окружая трубку с пучком, находятся три «дрейфовые камеры», в каждой из которых имеется ряд близко расположенных

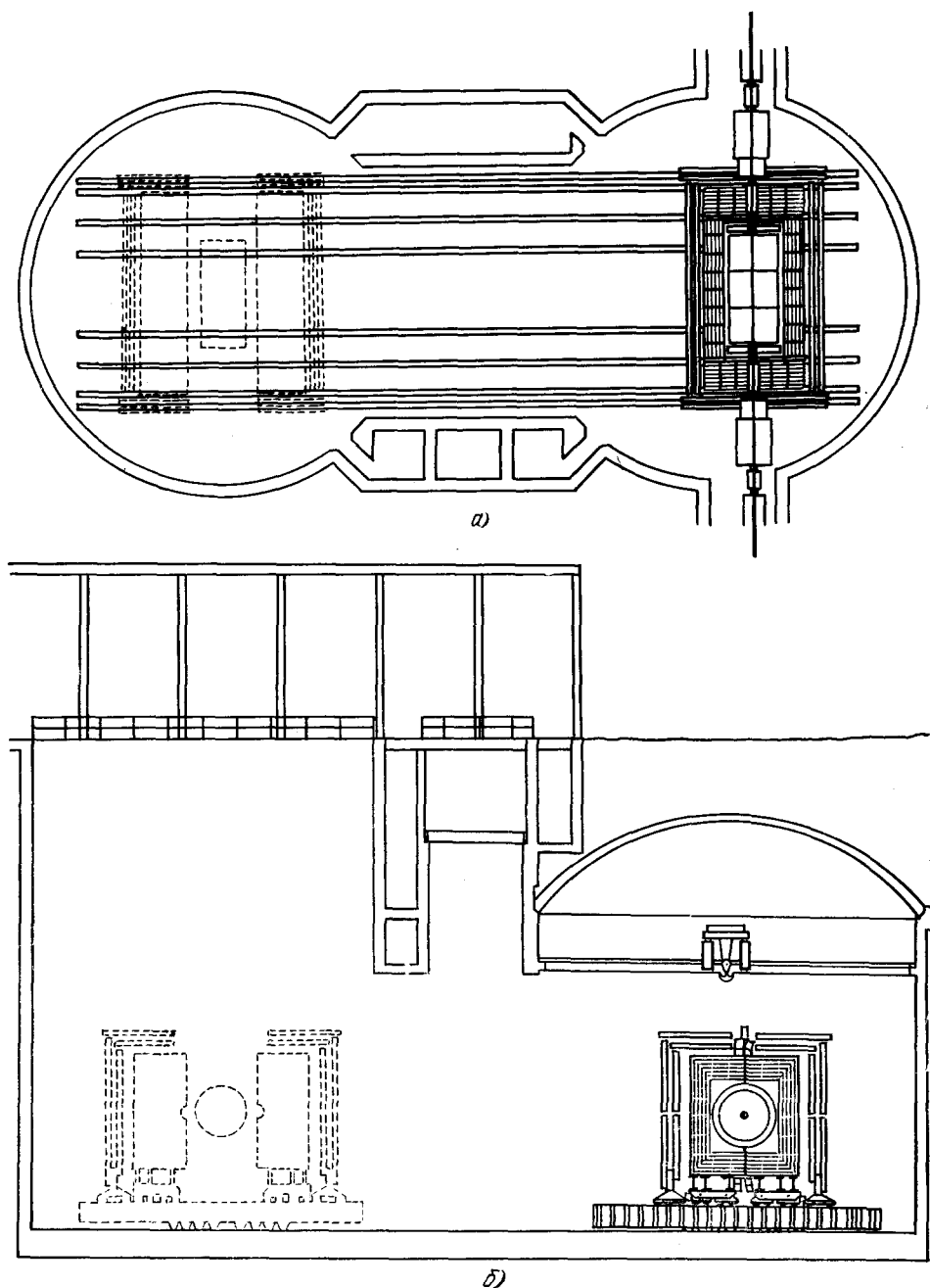


Рис. 11. Детектор UA1 установлен в напоминающей пещеру экспериментальной зоне на глубине примерно 25 м.

И на рис. а), и на рис. б) детектор изображен сплошными линиями, когда он находится в рабочем положении, охватывая трубку с пучком в SPS и штриховыми линиями, когда он установлен в своем гараже. UA1 — это самый большой из детекторов, когда-либо создававшихся для экспериментов со встречными пучками: он имеет 10 м в длину, 5 м в ширину и весит 2000 т. Стоимость его сооружения около 20 млн. долларов.

проволочек и газ при низком давлении (рис. 13). Электрически заряженные частицы, проходящие через камеру, ионизируют молекулы газа; эти ионы затем дрейфуют к проволочкам, где они разряжаются. По виду картины зарядов, появляющихся на многих проволочках, может быть реконструирована траектория частицы. Проволочки в центральной дрейфовой

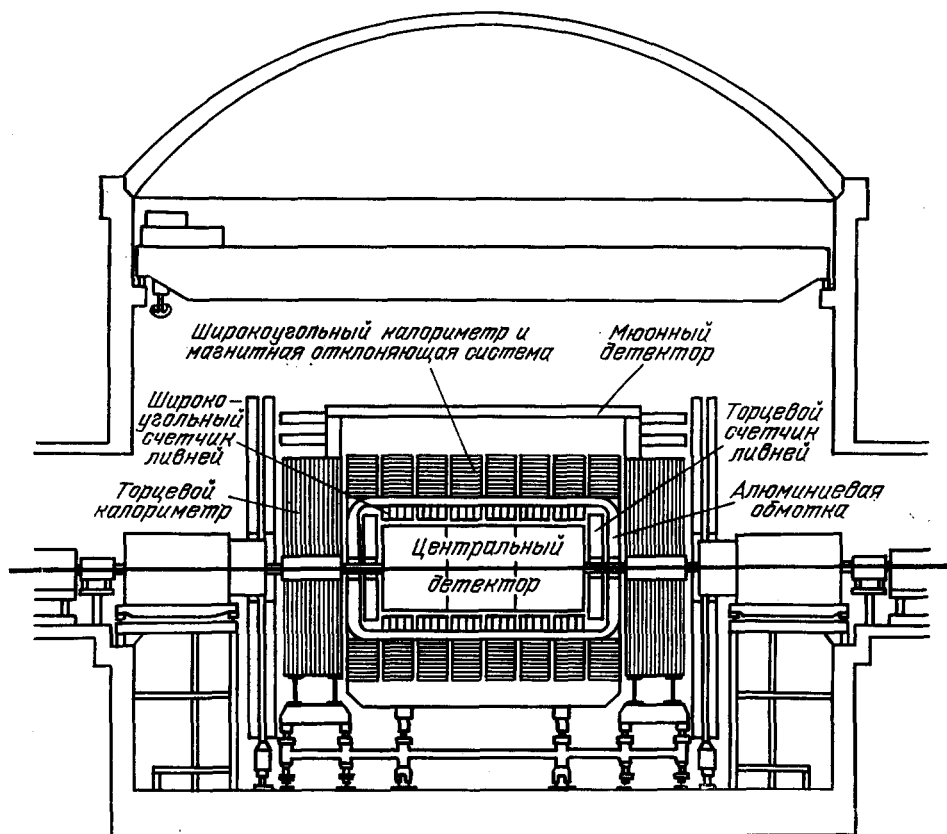


Рис. 12. Вид сбоку на UA1-детектор, где он изображен в рабочем положении на линии SPS-пучка.

Указаны экспериментальные устройства, предназначенные для различных целей, в том числе для поиска промежуточных векторных бозонов.

камере расположены в вертикальных плоскостях, а в двух боковых камерах — в горизонтальных плоскостях. Сигналы от частиц, пересекающих плоскости проволочек, могут быть обработаны компьютером, чтобы дать изображение продуктов распада на экране катодной трубки (рис. 14).

Три дрейфовые камеры окружены различными другими детекторами. Расположенный непосредственно за камерами самый внутренний из этих детекторов представляет собой свинцовый калориметр — устройство, которое измеряет энергию, теряемую в нем заряженной частицей, такой как электрон. В свою очередь калориметр окружен набором железных пластин, проложенных сцинтилляционными счетчиками, чтобы измерять энергию более тяжелых частиц, таких как пионы, по их взаимодействию с атомами железа в пластинах. Наконец, снаружи этой аппаратуры находятся несколько больших камер для детектирования мюонов, которые проходят и сквозь свинец, и сквозь железные пластины.

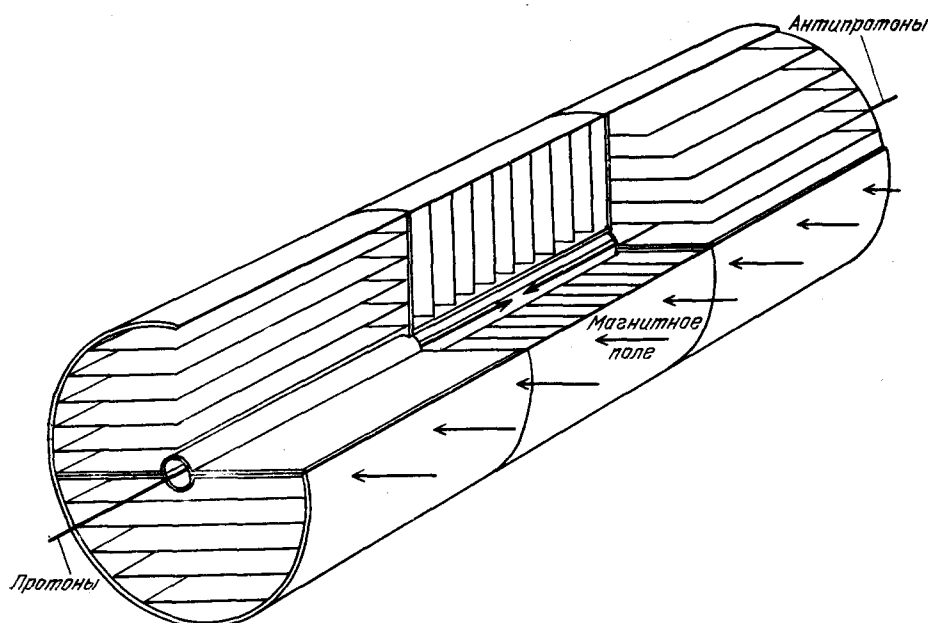


Рис. 13. Центральная детектирующая система в UA1 состоит из трех цилиндрических «дрейфовых» камер, каждая из которых содержит ряд близко расположенных проволок и газ при низком давлении.

Во всех трех камерах проволоочки натянуты горизонтально. В центральной камере горизонтально натянута проволока образует вертикальные плоскости, а в двух боковых камерах — горизонтальные плоскости. Заряженная частица, проходя через камеры, ионизирует молекулы газа, которые затем дрейфуют к проволокам, отдавая свой заряд. Картина зарядов, появляющихся на большом числе проволок, записывается с помощью электрических устройств и затем может быть проанализирована компьютером с тем, чтобы восстановить траекторию частицы на экране катодной трубки. Камеры имеют примерно 3 м в диаметре. Проволочки расположены на расстоянии около трех миллиметров друг от друга.

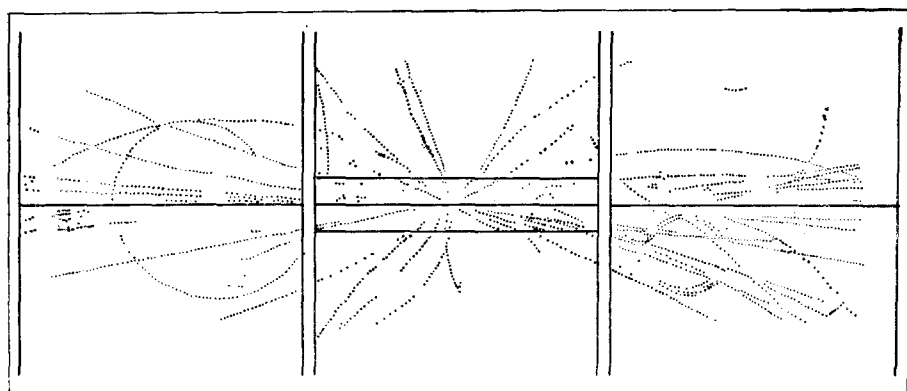


Рис. 14. Картина протон-антипротонного соударения, имевшего место в конце прошлого года, в центральной детектирующей системе UA1, была получена фотографированием изображения, созданного компьютером.

Более 250000 событий такого типа было зарегистрировано компьютером к настоящему времени. Миллионы таких событий должны быть записаны, когда поиски промежуточных векторных бозонов будут возобновлены в ЦЕРНе в следующем месяце. Наложенное магнитное поле искривляет траектории заряженных частиц.

Другой большой детектор, UA2, предназначен главным образом для поисков промежуточных векторных бозонов. Он не имеет магнитного поля и основан на множестве калориметров, подобных тем, которые в детекторе UA1 измеряют энергию и направление движения испускаемых частиц

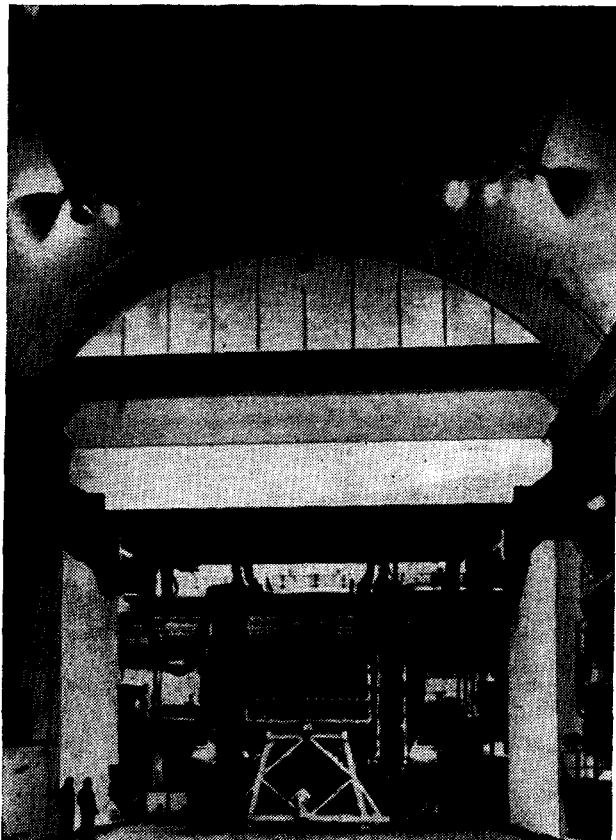


Рис. 15. Другой большой детектор UA2, сооружение которого недавно было завершено в ЦЕРНе.

Он был спроектирован в основном для поисков промежуточных векторных бозонов. В противоположность UA1, он не имеет магнитного поля. Детектор установлен во второй экспериментальной зоне, созданной на глубине 60 м, на некотором расстоянии от UA1. На рисунке этот детектор изображен на линии пучка SPS; во время перерыва в работе он откатывается в большой зал на переднем плане. Большая цилиндрическая шахта наверху используется для спуска громоздких деталей с поверхности.

(рис. 15). Детекторы, похожие на UA1 и UA2, запланированы и в Фермиевской лаборатории. Если промежуточные векторные бозоны существуют, то мы верим, что этих детекторов будет достаточно, чтобы открыть их и исследовать их свойства, тем самым подтвердив единую электрослабую теорию. Если хиггсовские бозоны существуют, они также могут быть обнаружены, тем самым обеспечивая дальнейшее подтверждение теории. Разумеется, возможно также, что электрослабая теория неправильна и ни одна из этих частиц не существует. Так или иначе, ответ вскоре должен быть известен.

ЛИТЕРАТУРА

1. Weinberg S.— Sci. American, July 1974, v. 231, p. 50.— (Перевод: УФН, 1976, т. 118, с. 505).
2. Cline D. B., Mann A. K., Rubbia C.— Ibid., December 1974, v. 231, p. 108.— (Перевод: УФН, 1976, т. 120, с. 97).
3. Wilson R.— Ibid., January 1980, v. 242, p. 26.
4. Cline D., Rubbia C.— Phys. Today, 1980, v. 33, No. 8, p. 44.