1976 г. Май *Том 119, вып. 1*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

621.384.6

УСКОРИТЕЛЬ В БАТАВИИ*)

Р. Вильсон

Большой синхротрон, расположенный в штате Иллинойс, ускоряет протоны до энергии 400 Гэв (400 млрд. эв). С помощью нового сверхпроводящего кольцевого магнита его проектировщики надеются поднять энергию до 1000 Гэв.

С давних пор философы, а в последнее время и физики, заняты проблемой элементарной единицы материи. Неуловимость ее, пожалуй, хорошо описывается строками Мильтона: «И в глубочайшей бездне открывается еще более глубокая...». И все же поиски продолжаются, и то, что уже обнаружено, оказалось странным и удивительным.

На протяжении прошедшего полувека физики строили все новые и новые ускорители для изучения атомного, ядерного и субъядерного мира. На пути от первого генератора Кокрофта — Уолтона 1928 г. до новейшего протонного синхротрона в Батавии (Иллинойс) мощность этих установок возросла в миллионы раз. И все же, несмотря на все достижения, остаются без ответа многие простые вопросы. Почему материя устойчива? Почему электрический заряд электрона точно равен противоположному по знаку заряду протона? Почему этот заряд равен $1{,}6\cdot10^{-19}$ *к*, а масса электрона составляет $9\cdot10^{-28}$ *г*? Почему протон тяжелее его в 1846 раз? Сейчас мы знаем, что электрические и магнитные силы — просто различные проявления одной и той же физической реальности электрического заряда. Однако мы так и не нашли таких же соотношений, объединяющих другие виды сил. А ведь гравитационные, электромагнитные, ядерные и слабые взаимодействия тоже могли бы оказаться просто различными аспектами некоторой единой физической реальности. Действительно, предварительные теоретические соображения, развиваемые С. Вайнбергом и А. Саламом, показывают, что слабое взаимодействие есть лишь другой аспект электрических сил. Однако, даже если эта теория подтвердится, связи между остальными видами взаимодействий останутся глубокой тайной.

Тем не менее теория сделала существенный прогресс. Октеты М. Гелл-Манна и Ю. Нэемана успешно объясняют многие загадочные связи между свойствами, массами и временами жизни множества частиц, открытых в поисках элементарной единицы материи. Развивая эту схему, М. Гелл-Манн и Д. Цвейг выдвинули гипотезу о том, что все адроны (частицы,

*) R. R. Wilson, The Batavia Accelerator, Scientific American 230 (2), 72 (February 1974). Перевод А. Н. Лебедева.

Р. Вильсон — директор Национальной Ускорительной лаборатории, США.

© Scientific American, Inc., 1974.
© Перевод на русский язык, Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», «Успехи физических наук», 1976 г.

испытывающие ядерные силы) являются своеобразными комбинациями трех новых частиц с дробным электрическим зарядом,— кварков. Однако, несмотря на тщательные поиски, кварки так и не были обнаружены.

Поразительная особенность субъядерного мира состоит в том, что многие характеристики частиц, определяемые квантовыми числами, не меняются при столкновении частиц друг с другом. Эти наблюдения привели физиков к формулировке законов, выражающих фундаментальные свойства симметрии природы. Открыв эти величественные законы, физики встали перед необходимостью объяснить, почему некоторые из них иногда нарушаются, хотя эти нарушения и очень малы. Субъядерный мир очень богат явлениями; это прекрасный, но все еще загадочный мир.

Новая машина в Батавии сооружалась в надежде на то, что более глубокий взгляд в субъядерный мир внесет в его понимание ясность, а может быть, и простоту. Синхротрон в Батавии впервые позволил ускорить протоны до энергий, измеряемых сотнями миллиардов электрон-вольт (*Гэв*) вместо десятков миллиардов. 1 *эв* — это энергия, которую приобретает частица, несущая один электронный заряд, при прохождении разности потенциалов в один вольт.

Наиболее впечатляющей частью новой машины является кольцевой магнит диаметром два километра, обеспечивающий последнюю стадию четырехкаскадного процесса ускорения. Протоны, полученные ионизацией водорода в разрядной трубке, сначала ускоряются в электрическом поле напряжением 750 000 *в*, создаваемом генератором Кокрофта — Уолтона — прямым потоком родоначальника ускорителей. Затем протоны направляются в линейный ускоритель — медную вакуумную трубу около метра диаметром и длиной 145 *м*. В ней заключены сотни пар медных электродов между которыми возбуждается переменное электрическое поле, настроенное так, чтобы создавать бегущую волну — электрический эквивалент волны прибоя. Протоны ускоряются вдоль трубы, как если бы они скатывались с этой волны, и на выходе их энергия достигает двухсот миллионов электрон-вольт (*Мэв*).

Затем протоны переводятся в относительно небольшой синхротрон — бустер, потомок двух известных машин, бывших в свое время крупнейшими в мире: бэватрона на 6 *Гэв* в Калифорнийском университете (Беркли) и протонного синхротрона на 28 *Гэв* Брукхейвенской Национальной лаборатории. Бустер, увеличивающий энергию протонов до 8 *Гэв*, состоит примерно из ста электромагнитов, размещенных по кольцу диаметром 150 *м*. Магнитное поле в магнитах 15 раз в секунду меняется от малого уровня до высокого. Покинув линейный ускоритель с энергией 200 *Мэв*, протоны инжектируются в вакуумную камеру в те моменты, когда магнитное поле мало́, и далее удерживаются им на все время возрастания, в течение которого они совершают около 20 000 оборотов по круговой орбите. На каждом обороте протоны проходят через систему электродов, между которыми создается переменное электрическое поле. Частота этого поля синхронизована с частотой обращения, так что на каждом обороте протоны получают энергию, эквивалентную приросту при прохождении разности потенциалов 0,4 *Мв*. В результате двадцати тысяч таких приращений к тому моменту, когда магнитное поле достигает своей максимальной величины, энергия протонов увеличивается с 200 *Мэв* до 8 *Гэв*.

После этого протоны выводятся из бустера магнитным импульсом и проводятся по длинной вакуумной трубе к основному ускорителю, представляющему собой просто увеличенный вариант бустера. Он состоит из 954 магнитов при длине окружности 6,3 *км*. Протоны инжектируются в основное кольцо при 8 *Гэв* и далее ускоряются точно так же, как и в бу-

стере. После 200 000 оборотов по кольцевой вакуумной камере синхротрона, которую физики на своем жаргоне обычно называют «бубликом», протоны достигают 400 *Гэв*. В конце процесса ускорения протоны выводятся

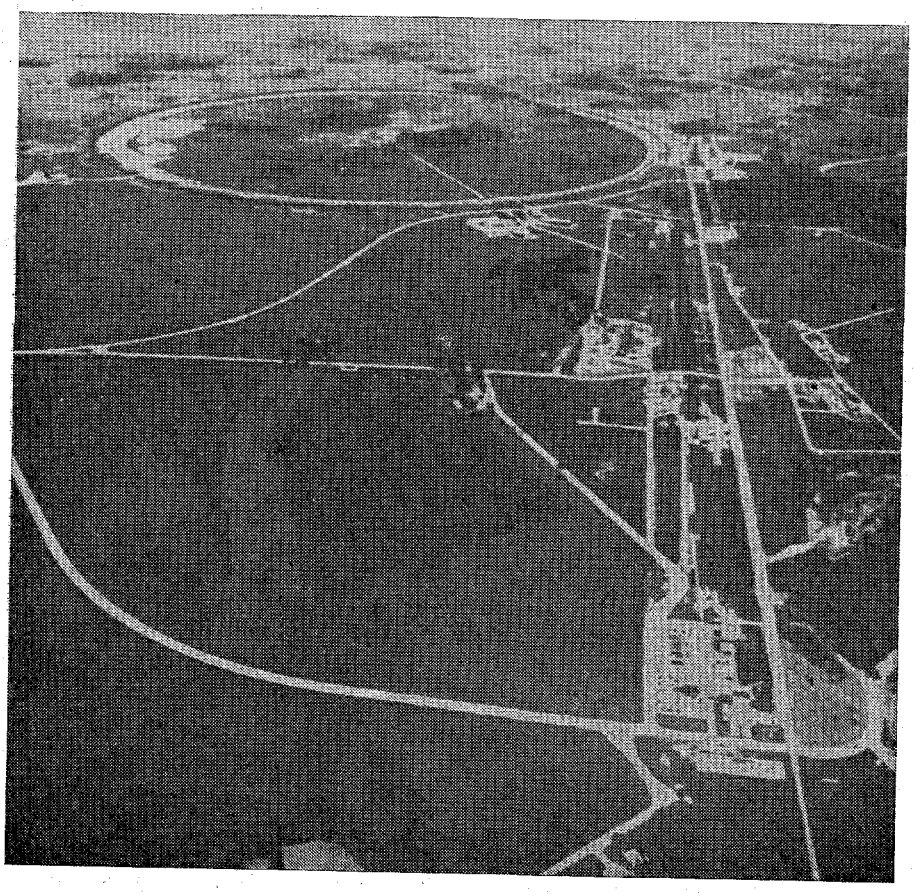

Рис. 1. Основное кольцо самого большого ускорителя в мире расположено в круговом туннеле, находящемся на глубине 6 *м* под землей на территории Национальной Ускорительной лаборатории в Батавии, штат Иллинойс, примерно в 60 *км* к западу от Чикаго.

Установка ускоряет протоны до энергии около 400 *Гэв*, что более чем в пять раз превышает энергию ближайшего по величине ускорителя — протонного синхротрона на 76 *Гэв*, расположенного вблизи Серпухова в СССР.

из основного кольца и направляются в экспериментальные залы, где попадают на мишени, предназначенные для различных исследований (рис. 1,2).

Замысел ускорителя в Батавии возник двадцать лет назад в Радиационной лаборатории имени Лоуренса Калифорнийского университета. Именно Лоуренс сформулировал в 1928 г. циклотронный принцип ускорения частиц. В 30-е и 40-е годы он принимал участие в разработке ряда более мощных машин, включая бэватрон, сооруженный в 1954 г. В начале 60-х годов группа в Беркли разработала предварительные планы сооружения протонного синхротрона на 200 *Гэв*. Примерно в то же время ряд государственных учреждений организовал совещание под председательством Н. Рэмзи из Гарвардского университета для определения следующих этапов национальной программы работ по физике высоких энергий.

Это совещание рекомендовало поставить на первое место сооружение машины на 200 *Гэв* на основе проекта Беркли.

Выбор места для машины был предметом длительных разногласий, поскольку она представляла собой лакомый кусочек как в научном отношении, так и в политическом и общественном. Предлагалось около 125 мест, разбросанных по всей стране. Комитет Национальной Академии наук свел этот список до шести вариантов и передал их для окончательного

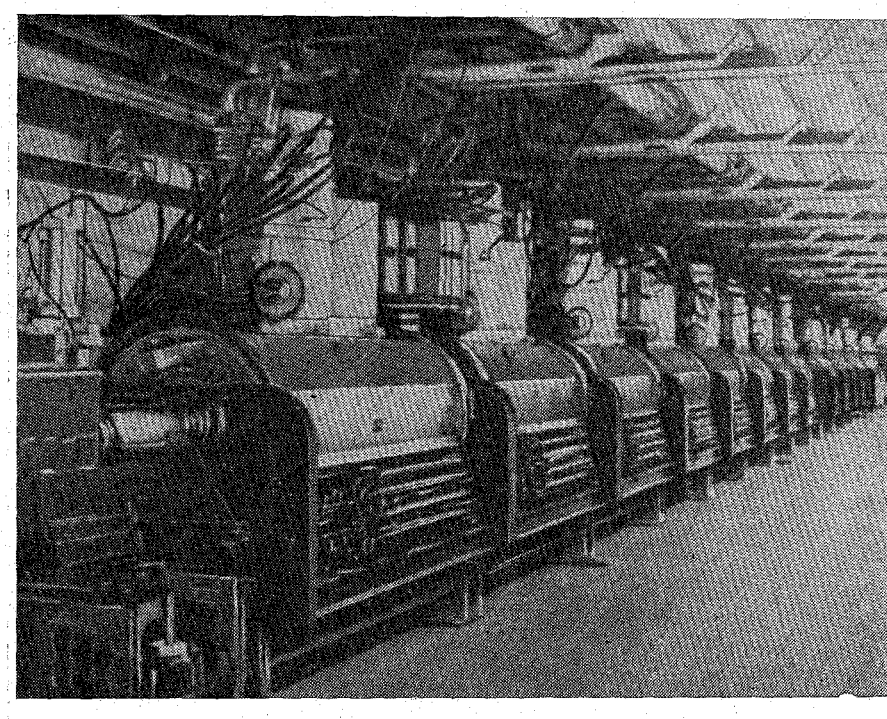

Рис. 2. Высокочастотная ускоряющая станция расположена на ускорителе в Батавии в одном из длинных прямолинейных промежутков основного кольца.

На фотографии видны 15 одинаковых высокочастотных резонаторов, увеличивающих энергию протона со скоростью примерно 2 *Мэв* за оборот. Частота ускоряющего напряжения должна увеличиваться одновременно с частотой обращения. Приобретая энергию на каждом обороте, протоны увеличивают свою скорость от начального значения в 99,6% скорости света, когда при 8 *Гэв* они входят в основное кольцо, до конечного значения в 99,999% скорости света при 400 *Гэв*.

решения членам Комиссии по атомной энергии. Те остановились на районе вблизи Батавии, известном местным жителям под названием Кун Холлоу. Физики быстро окрестили его «перекрестком Дирксена», отметив тем самым роль, сыгранную покойным сенатором от штата Иллинойс при выборе места. К этому времени для постройки и эксплуатации машины было создано объединение национального масштаба, названное Исследовательской ассоциацией университетов.

Конгресс одобрил сооружение ускорителя в 1967 г., но ограничил ассигнования суммой 250 млн. долларов, предназначенной для так называемого «малого варианта» машины, тогда как «полный вариант» согласно проекту Беркли оценивался в 350 млн. долларов. Удешевление достигалось за счет десятикратного снижения интенсивности (до $1{,}5 \cdot 10^{12}$ протонов в секунду), уменьшения числа экспериментальных залов с пяти до трех и исключения из проекта большой пузырьковой камеры. Все эти решения привели к острым закулисным дебатам. Так родилась Националь-

ная Ускорительная лаборатория, шаткой программе которой многие пророчили полный провал.

В это время мне было предложено возглавить проект. Принимая это назначение, я считал, что можно будет превысить значение 200 *Гэв* и не так уж сурово урезать проект, не выходя за рамки 250 млн. долларов. Подобные заявления были близки к браваде, но только таким образом я мог привлечь нужных людей к делу, которое многим казалось обреченным.

Мы решили замахнуться на 500 *Гэв*, рассчитывать на полную интенсивность $1{,}5 \cdot 10^{13}$ протонов в секунду, проектировать экспериментальные залы, исходя из нужд принципиально важных экспериментов (включая использование большой пузырьковой камеры) и пытаться получить энергию 200 *Гэв* в течение пяти лет. Именно для этого 15 июня 1967 г. вблизи «перекрестка Дирксена» собралась у меня небольшая группа отважных людей.

С чего начинается разработка ускорителя? Мы начали с выбора размера основного кольца. Отведенный участок площадью около 10 кв. миль наталкивал на мысль о большом кольце. Чем больше его размер, тем меньшее магнитное поле необходимо для удержания протонов заданной энергии на соответствующем радиусе. С другой стороны, вместе с размером возрастает стоимость сооружения. При заданной конечной энергии 500 *Гэв* минимальный размер кольца определялся практически возможной индукцией поля в магнитах (и расстоянием между ними) (рис. 3).

До некоторой степени произвольно мы выбрали радиус кольца точно равным 1 *км*. Около 25% орбиты было освобождено от магнитов для обеспечения ввода и вывода протонного пучка, размещения оборудования для измерений и коррекции орбиты, а также для установки ускоряющих устройств. При заполнении окружности кольца поворачивающими магнитами на 75% нам нужно было возбудить в них магнитное поле в 9 *кгс*, чтобы удержать протоны с энергией 200 *Гэв* на радиусе в 1 *км*. С помощью обычных стальных электромагнитов с медными обмотками можно получить магнитное поле до 18 *кгс*. Соответственно, достигнув это значение, мы смогли бы удержать в нашем кольце протоны, ускоренные до 400 *Гэв*. А 500 *Гэв* оказались бы досягаемыми, если бы удалось получить магнитное поле в 22,5 *кгс*.

Имея в виду эти рискованные планы, мы решили проектировать электромагниты, которые в конце концов позволили бы получить максимальное магнитное поле, достижимое обычными методами. После некоторых колебаний мы отказались от возможности использования импульсных сверхпроводящих магнитов, которые теоретически могли бы обеспечить магнитное поле, в несколько раз превышающее требуемые 18 *кгс*. Мы недостаточно владели искусством сооружения таких магнитов, чтобы делать на них ставку.

Поскольку магниты и туннель для их размещения относились к числу наиболее дорогих компонентов ускорителя, мы проектировали их, минимизируя стоимость. В этом отношении определяющим параметром является апертура между полюсами магнита, где должна проходить вакуумная камера. Чем больше поперечное сечение камеры, тем легче предотвратить потери протонов из-за попадания их на стенки. Кроме того, за счет электростатических сил протоны взаимно расталкиваются. Поэтому для очень большой интенсивности камера должна быть увеличена, так что величина апертуры магнитов оказывается тесно связанной с максимальной проектной интенсивностью, которая должна быть достигнута на данной машине. С другой стороны, размер магнита, масштабы системы питания, диаметр

туннеля и, конечно, стоимость растут пропорционально размерам камеры (рис. 4).

Взвесив эти факторы, мы остановились на апертуре в 5 *см* по высоте и 10 *см* по ширине для одной половины магнитов и в 3,8 *см* по высоте

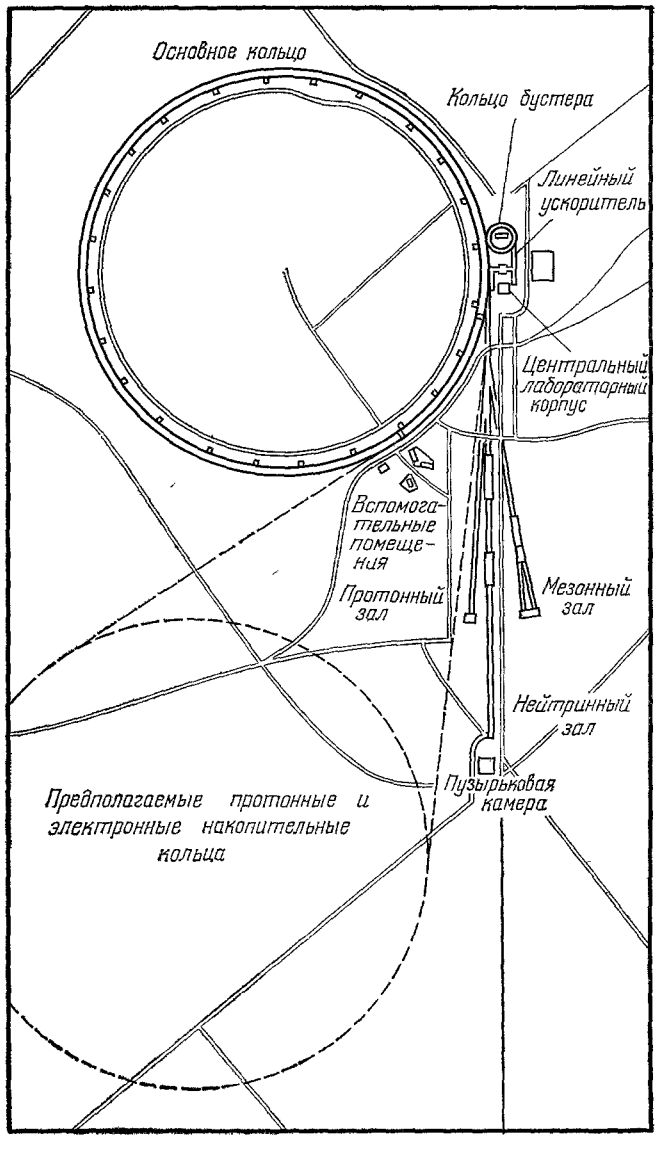

Рис. 3. План Национальной Ускорительной лаборатории, показывающий основное кольцо и другие главные объекты.

Показано также расположение планируемых накопительных колец, предназначенных для протонов с энергией от 400 до 1000 *Гэв* и для электронов с энергией 20 *Гэв*. Выводя из основного кольца протоны с энергией 400 (или 1000) *Гэв* на участок встречи и сталкивая их с накопленными протонами или электронами, можно получить чрезвычайно высокую энергию соударений. Столкновения между протонами во встречных пучках с 1000 *Гэв* по энергетическому выходу эквивалентны одиночному пучку с энергией $2{,}2\cdot10^6$ *Гэв*, попадающему на неподвижную протонную мишень.

и 12,5 *см* по ширине — для другой. В значительной мере этот выбор основывался на опыте и интуиции. Два разных размера апертуры соответствуют модуляции поперечного размера протонного пучка, характерной

для принципа «сильной фокусировки». Длительные расчеты показали, что выбранные апертуры достаточны с точки зрения электростатического расталкивания пучка с интенсивностью в несколько единиц на 10^{14} протонов в импульсе; следовательно, они должны были быть более чем достаточны при нашей проектируемой интенсивности в $1{,}5 \cdot 10^{13}$ протонов в секунду.

Взаимное расталкивание протонов сказывается сильнее всего при инжекции, когда магнитное поле минимально. Другое, еще более важное

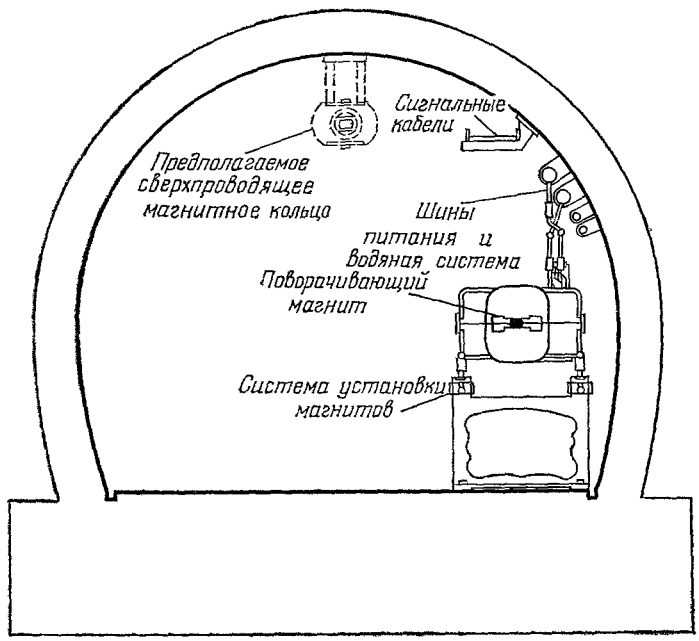

Рис. 4. Туннель основного кольца, показанный в поперечном сечении, имеет в ширину 3 *м* и 2,5 *м* в высоту

Ось вакуумной камеры, в которой ускоряются протоны, находится примерно в 1 *м* над полом. Система установки магнита позволяет юстировать положение оси камеры с точностью 0,25 *мм*. Планируемое второе ускорительное кольцо, состоящее из сверхпроводящих магнитов, должно быть подвешено к потолку. В него будут переводиться протоны из существующего кольца, после чего их энергия будет удваиваться.

соображение по поводу выбора апертуры связано с проблемой вывода протонов, достигших максимальной энергии в момент, когда поле максимально. Чтобы вывести пучок с высокой эффективностью, желательно к моменту вывода иметь как можно большее пространственное разделение траекторий на двух последовательных оборотах, что облегчает перевод пучка в отклоняющий канал. Это разделение прямо пропорционально ширине магнита и при выбранных нами апертурах составляет около одного сантиметра.

В схеме, выбранной для ускорителя в Батавии, поворот частиц и их фокусировка пространственно разделены и осуществляются двумя разными типами магнитов. Во всех ускорителях, построенных до настоящего времени, поле каждого магнита профилировано таким образом, чтобы одновременно обеспечивать и поворот и фокусировку. Такие магниты насыщаются при уровне поля, недостаточном для ускорителя в Батавии. Наши поворачивающие магниты имеют около 6,5 *м* в длину, 30 *см* в высоту и около 80 *см* в ширину (рис. 5). Всего таких магнитов 774, причем каждый весит 11 *т*. Фокусирующие магниты (всего их 180) имеют в длину только 230 *см*, весят по 5 *т* и размещены вдоль кольца с интервалами в 33 *м*.

Они называются квадрупольными, так как имеют по четыре полюса. Действие фокусирующих магнитов на протонный пучок аналогично действию последовательности линз на пучок света: они удерживают протоны сфокусированными в центральной части вакуумной камеры. Магнитное поле, создаваемое четырьмя полюсами, равно нулю на оси камеры и возрастает при отклонении от нее в любом направлении. Следовательно, отклонившиеся протоны испытывают силу, которая в среднем направляет

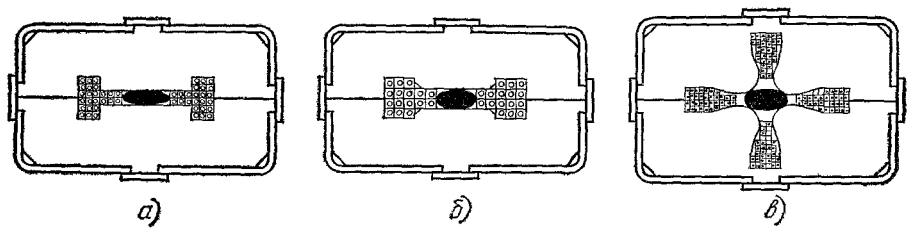

Рис. 5. Поперечное сечение трех типов магнитов, используемых в Батавии: *а*) поворачивающий магнит с малым зазором; *б*) поворачивающий магнит с большим зазором; *в*) квадрупольный, или фокусирующий, магнит.

Эллиптическая апертура в магните с малым зазором имеет 3,8 *см* в высоту и 12,5 *см* в ширину, а в магните с большим зазором соответственно 5 и 10 *см*. Магниты обоих типов имеют длину 6,5 *м* и весят около 11 *т*. Длина фокусирующего магнита 2,3 *м*, вес 5 *т*. Всего на кольце расположено 774 поворачивающих и 180 фокусирующих магнитов.

их обратно к центральной орбите. Благодаря этим фокусирующим силам траектории отклонившихся частиц осциллируют около воображаемой линии, проходящей через середину камеры.

Если уж говорить о необычности ускорителя в Батавии, то, помимо его размеров, надо отметить магнитную систему с разделенными функциями. Кроме того, оригинальна компактная конструкция магнитов, позволившая получить поле хорошей конфигурации при гораздо бо́льших, чем раньше, уровнях индукции. Новинкой является и система питания, связывающая магниты непосредственно с электросетью через большие управляемые селеновые выпрямители, которые только что появились в продаже, когда мы начали сооружение ускорителя. Раньше протонные синхротроны питались от громадных мотор-генераторных установок, гораздо более дорогих и менее надежных.

Поворачивающие магниты основного кольца объединены в группы по четыре, разделенные одним квадрупольным фокусирующим магнитом (рис. 6). Все магниты, особенно фокусирующие, должны быть выставлены с большой точностью, чтобы отклонения их от центральной орбиты не превышали четверти миллиметра. Сначала считалось, что для достижения такой точности магниты должны быть размещены на бетонных опорах, заглубленных примерно на 30 *м* до скального грунта. Поскольку эти опоры обошлись бы в несколько миллионов долларов, мы решили установить магниты непосредственно на полу туннеля. Чтобы предотвратить последствия усадки, магниты поставлены на подвижные основания, положение которых по мере надобности может юстироваться.

Подобные решения, уменьшающие стоимость, принимались на протяжении всего периода разработки. Так, например, благодаря компактности магнитов мы смогли уменьшить ширину туннеля до 3 *м*, а высоту — до 2,5 *м*. Траншея для туннеля рылась открытым способом. Сам туннель был собран из заранее изготовленных бетонных секций, устанавливаемых на монолитном бетонном фундаменте. Верх туннеля находился в 5 *м* под поверхностью земли с таким расчетом, чтобы монолитный фундамент покоился непосредственно на твердой кристаллической породе.

Радиационные повреждения оказались серьезной и до конца не решенной проблемой как на брукхейвенском синхротроне, так и в Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН) в Швейцарии.

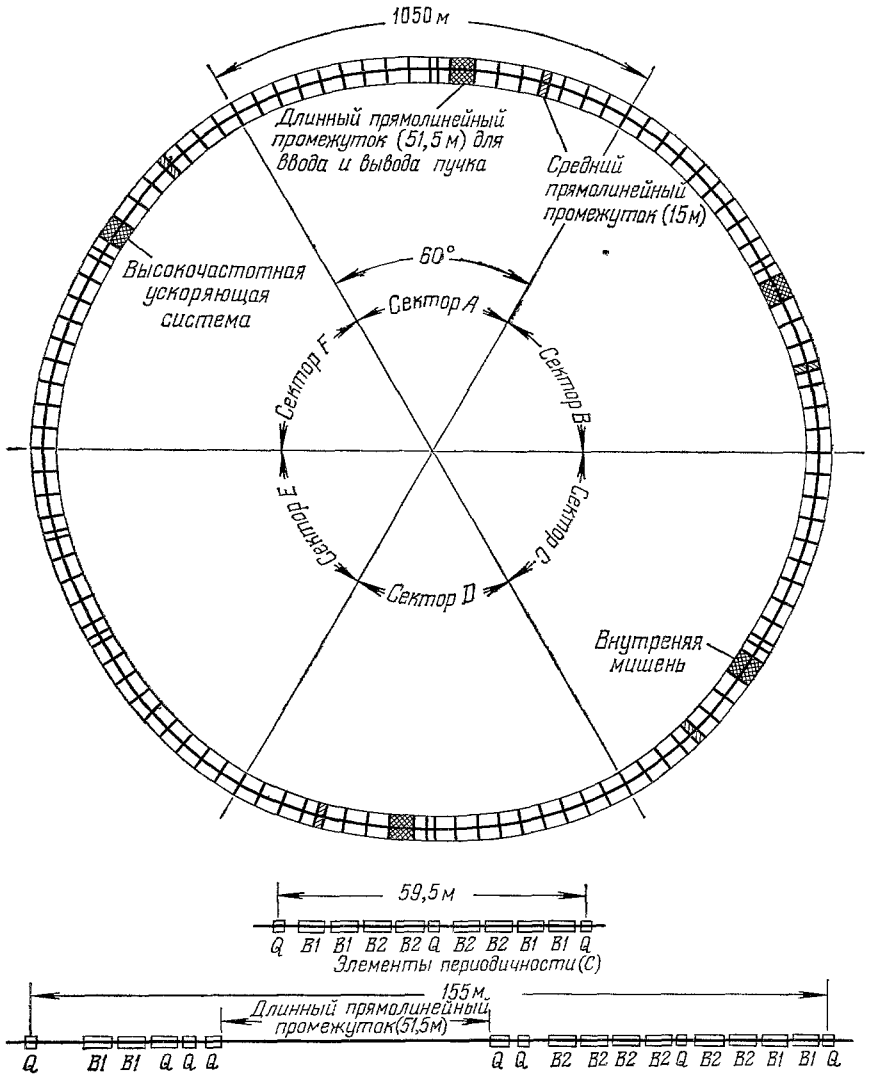

Рис. 6. Структура синхротрона в Батавии, показывающая расположение магнитов по кольцу.

Функции поворота и фокусировки пучка выполняются в этой машине раздельно специализированными магнитами. Кольцо разделено на шесть идентичных секторов, в каждом из которых имеется один длинный прямолинейный участок (двойная штриховка), один прямолинейный участок средней длины (одинарная штриховка) и 14 элементов периодичности (*С*). Длинные прямолинейные участки предназначены для ввода и вывода пучка, а также для размещения высокочастотной ускоряющей системы и внутренних мишеней. Структура элемента периодичности и длинного прямолинейного промежутка показана в большем масштабе под кольцом. Поворачивающие магниты с узким и широким зазором обозначены соответственно B_1 и B_2, квадрупольные, или фокусирующие, магниты — буквой *Q*. В элемент периодичности входит восемь отклоняющих и два квадрупольных магнита.

Некоторые ответственные элементы ускорителей, например, изоляция обмоток электромагнитов, буквально раскрошились под воздействием пучка. Другие элементы стали настолько радиоактивными, что текущие работы затруднились и требовали очень много времени. Мы опасались,

что в Батавии эта проблема будет еще серьезнее, поскольку и энергия и интенсивность должны были превышать ранее достигнутые значения на порядок. Это означало, что полная энергия в пучке возрастала на два порядка и должна была составить почти мегаджоуль; в той же пропорции должны были увеличиться и разрушительные радиационные эффекты.

Радиационные повреждения вызываются протонами, которые выпадают из нормального режима ускорения и теряют свою энергию в любом встретившемся препятствии. Если бы можно было построить машину с такой точностью, чтобы все протоны удерживались в центре камеры вплоть до сброса на расчетную мишень, то проблема радиационных повреждений была бы решена. Следовательно, одним из основных требований нашего проекта было ускорение и использование каждого протона, инжектированного в ускоритель. По этой причине мы решили запроектировать только одну точку вывода пучка вместо нескольких. Мы считали, что машину можно настроить так, чтобы оптимизировать вывод в одной точке, тогда как при выводе в нескольких местах пришлос бы остановиться на некоторой более низкой компромиссной эффективности.

Сейчас мы уже уверены в возможности вывода около 99% протонов, инжектированных в основное кольцо, так что только оставшийся 1% может вызвать радиационные повреждения или другие остаточные радиационные эффекты. Даже эти потери можно сделать безопасными с помощью «скребков»— перемещаемых толстых шторок, устанавливаемых настолько близко к пучку, что они первыми перехватывают любые частицы, выпавшие из режима ускорения.

Подрядчиков всегда сложно заставить выполнить работу вовремя. Наша стратегия заключалась в том, что сначала оговаривалась оплата, соответствующая нормальному сроку окончания. После этого мы иногда предлагали подрядчику «сделку», согласно которой он должен был получать дополнительное вознаграждение за каждый день, сэкономленный по сравнению с программой строительства, оговоренной в соглашении. Для повышения его заинтересованности была предусмотрена прогрессивная система вознаграждения. При выполнении плана досрочно на несколько дней подрядчик должен был получить, скажем, по 100 долларов за день; если же опережение превышало 10 дней, то премия возрастала до 300 долларов. За то, что дата окончания строительства совпадала с «нереальным» сроком нашего первоначального проекта, можно было получить и по 1000 долларов за каждый сэкономленный день, дальнейшее же сокращение сроков уже не премировалось. При стоимости здания в 1 млн. долларов сумма премий могла составить только несколько десятых процента, но сама система настолько сильно действовала на спортивный инстинкт наших подрядчиков, что все оказалось законченным вовремя.

Ввиду большого количества заказов на техническое оборудование мы предпочли не полагаться только на одного поставщика. Иногда треть заказа отдавалась одной фирме, а треть — другой, причем им давалось понять, что оставшаяся часть будет распределена в зависимости от качества выполненной работы и ее стоимости. Впрочем, всех этих ухищрений, конечно, не достаточно для осуществления большого проекта в срок. Ничто не может заменить энтузиазма, решительности и тщательного внимания к деталям, проявленных небольшой группой преданных делу людей.

До поры все шло гладко. Неожиданной помехой стала задержка государственного финансирования по сравнению со сроками, предусмотренными программой. Поскольку заработная плата составляла существенную часть полных расходов, я реагировал на задержку финансирова-

ния не увеличением сроков окончания проекта, а их уменьшением. Наконец, в 1969 г. я в отчаянии заявил, что при надлежащем финансировании и некоторой доле удачи протонный пучок можно будет получить к июлю 1971 г.— на целый год раньше, чем по первоначальному жесткому пятилетнему плану и всего через два с половиной года после начала земляных работ в декабре 1968 г.

Это произвело одно положительное действие — поставило определенную цель перед нашими сотрудниками. Без драматических эффектов трудно иметь дело с большой группой людей. Почти все остальные последствия были отрицательными. Так, многие физики в разных частях страны, уже начавшие планировать эксперименты на новой машине, восприняли новую дату вполне серьезно и соответственно перестроили многие свои планы. Мы почти надорвались, пытаясь, несмотря на сокращение финансирования (а, может быть, именно из-за него), действительно закончить дело к июлю 1971 г. Мы установили на место магниты основного кольца, запустили системы питания, собрали все высокочастотное оборудование, осуществили инжекцию из линейного ускорителя в бустер и из бустера в основное кольцо, и ничто из этого не далось даром. Нам даже удалось получить несколько оборотов протонов в основном кольце. И именно в этот момент все оказалось на грани провала, и наши мечты почти рухнули.

Что же случилось? С одной стороны, обнаружились неожиданные скрытые дефекты в камере. В длину она превышает шесть километров и составлена из примерно тысячи сварных секций из нержавеющей стали. В то же время крошечный кусочек проволоки толщиной в десятую долю миллиметра, случайно попавший внутрь камеры, уже способен нарушить циркуляцию пучка. Перспектива поиска таких малых препятствий на всех этих километрах магнита выглядела довольно удручающей. А в первом же вскрытом магните был обнаружен оторванный кусок пластика, частично перекрывающий апертуру.

Как же проверить внутреннюю часть шестикилометрового стального тора? В отчаянии мы дошли до того, что пробовали научить хорька по кличке Фелиция пролезать по трубе, протаскивая за собой длинную проволоку, к которой уже можно было прикрепить очищающий магнит или миниатюрный пылесос. Фелиция с восторгом протаскивала проволоку по коротким пробным отрезкам трубы, но пришла в ужас при виде самой машины. Кончилось тем, что она отрабатывала свой хлеб, помогая прочищать длинные прямые секции труб в экспериментальном зале.

Задачу очистки камеры пришлось решать другими методами. Мы прибегли к ударным продувам воздухом и к магнитам, протаскиваемым по проволоке, заведенной в конце концов без помощи Фелиции. В общей сложности мы обнаружили и устранили несколько сотен потенциальных препятствий. Даже после запуска машины в камере продолжали обнаруживаться кусочки грязи и другой мусор. Теперь их стало легче искать, так как под протонным пучком они становились радиоактивными и, если не испарялись, могли быть обнаружены портативной ионизационной камерой. Как все это туда попало? По-моему, в основном из-за небрежности. Так, например, дефектный «консервный нож» — инструмент для вскрытия вакуумной камеры — оставил в ней после себя немало стальной стружки.

Самая тяжелая проблема и самая большая задержка оказались связанными с магнитами. Они устанавливались зимой и при индивидуальной проверке работали прекрасно. Когда туннель заканчивался, стояла необычно холодная зима, и он был засыпан промерзшей землей. С наступлением

лета в туннель проник влажный воздух, и из-за конденсации паров возник настоящий ливень, промочивший магниты. Поскольку они не были рассчитаны на работу в подводных условиях, при включении в июле 1971 г. многие из них были пробиты и вышли из строя. Остаток года мы провели, выявляя не только отказавшие магниты, но и те, которые были повреждены до опасной степени. В конце концов мы заменили или переделали почти половину магнитов.

Были и другие трудности. Весь комплекс, состоящий из четырех последовательных ускорителей, управлялся сложной электронной схемой, растянувшейся километров на восемь. Все помещения должны были быть абсолютно безопасными в радиационном и электротехническом отношении, а все основные компоненты, числом более десяти тысяч, и цепи блокировки должны были одновременно работать. А ведь если каждый элемент имеет надежность 99%, то система, состоящая из 10 000 таких единиц, будет работать с вероятностью только 10^{-4}%.

Для того чтобы машина работала часами без отказов, необходимо было иметь среднюю надежность каждого элемента лучше 99,9999%. С самого начала мы знали, что такая надежность на порядок выше, чем требовалось для любого ускорителя в прошлом. Хотя для обеспечения некоторой избыточности была изобретена система управления с использованием ЭВМ, к началу проекта мы не были готовы к созданию элементов с требуемым уровнем надежности.

В конце концов мы решили эти и многие другие проблемы и получили в марте 1972 г. пучок протонов с энергией 200 *Гэв*. Это случилось позднее, чем я надеялся, но все же раньше, чем планировалось первоначально.

Получение протонов большой энергии само по себе довольно бесполезно. Важно, как используются эти протоны для исследования природы. Примерно в то же время, когда были получены первые импульсы ускоренных протонов, мы пригласили семь советских физиков с женами. Они предложили в сотрудничестве с группой американских физиков провести измерения эффективных размеров протона, взаимодействующего с протоном, ускоренным в нашей машине. Подобный эксперимент был только что проведен этой группой на Серпуховском ускорителе в СССР, в то время самой мощной машине в мире, дающей энергию 76 *Гэв*.

Для подготовки нового эксперимента советская группа привезла с собой устройство для впуска в камеру струи водорода, пересекающей протонный пучок. При боковом соударении протона большой энергии с почти покоящимся последний отклоняется почти под прямым углом к траектории налетающей частицы. Измеряя распределение отклонившихся протонов, экспериментатор может сделать вывод о их радиусе. Новые результаты очень хорошо продолжили зависимость, полученную ранее в Серпухове: чем больше энергия налетающего протона, тем большим он «видит» протон мишени. Мы были очень рады, что первый же наш эксперимент был проведен интернациональной группой.

Отнюдь не все эксперименты можно провести, как этот, непосредственно в циркулирующем пучке ускорителя (хотя данный метод имеет ряд преимуществ, позволяя, например, непрерывным образом варьировать энергию). Для большинства экспериментов необходимо вывести пучок и направить его в большие экспериментальные залы. Вывод пучка такой большой энергии ставит ряд новых проблем. В первую очередь используется метод быстрого вывода из основного кольца, при котором магнитным импульсом пучок переводится в область электростатического поля, ограниченного так называемым септумом — системой тонких проволочек (рис. 7 и 8). Отклонение протонов в этом электрическом поле невелико,

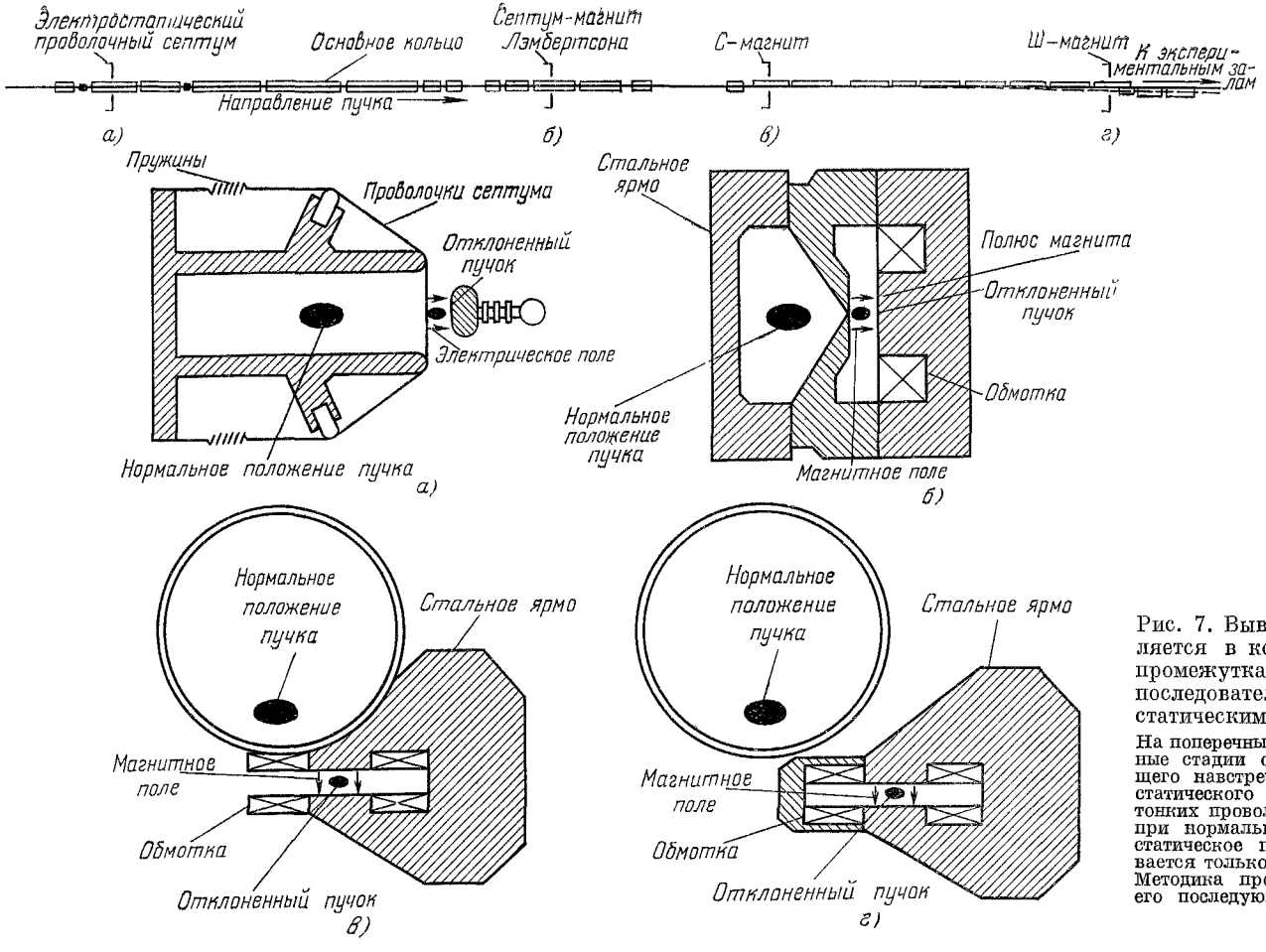

Рис. 7. Вывод протонного пучка осуществляется в конце длинного прямолинейного промежутка основного кольца четырьмя последовательными устройствами: электростатическим (*а*) и тремя магнитными (*б* — *г*).

На поперечных сечениях показаны последовательные стадии отклонения протонного пучка, идущего навстречу наблюдателю. Септум электростатического устройства, образованный системой тонких проволочек, действует как экран, поэтому при нормальной циркуляции протонов электростатическое поле на них не действует и сказывается только на движении отклоненного пучка. Методика проведения пучка через септум для его последующего вывода иллюстрирована на рис. 8.

но достаточно, чтобы перевести их в расположенный вне камеры магнит, который в свою очередь отклоняет частицы и выводит их из ускорителя.

Второй метод вывода, резонансный, основан на самовозбуждении «бетатронных» колебаний протонов, которое можно осуществить, меняя ток в фокусирующих магнитах. Раскачиваясь примерно двадцать раз за оборот около орбиты, протоны все дальше отклоняются от центра камеры и в конце концов попадают, как и в первом методе, в электрическое поле, осуществляющее вывод. Резонансный метод позволяет выводить частицы медленно, за много оборотов, так что выведенный пучок

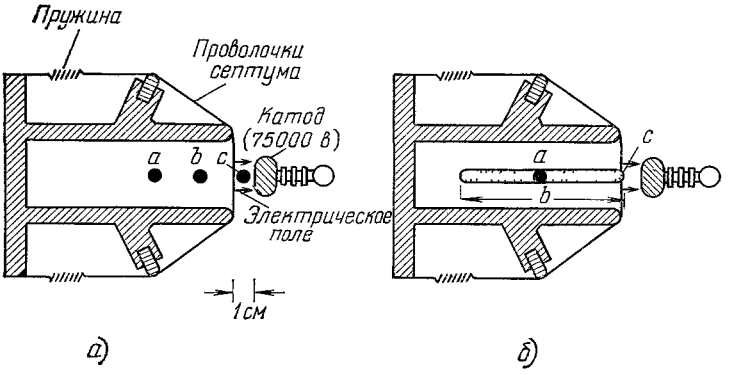

Рис. 8. Два метода, позволяющие экспериментаторам выбирать между быстрым выводом (*а*), сбрасывающим весь пучок за 20 *мксек*, и медленным (*б*), растягивающим импульс на протяжении одной секунды.

При быстром выводе отклоняющие магниты примерно за 0,01 *сек* переводят пучок из положения *a* в положение *b*. Затем быстродействующий магнит «сталкивает» пучок в положение *c* примерно за одну микросекунду, так что все протоны выходят из основного кольца за один оборот При медленном выводе пучок расширяется (*б*) за счет резонансного возбуждения горизонтальных бетатронных колебаний. По мере возрастания ширины пучка его часть (*c*), заходящая за проволочный септум, вытягивается электростатическим полем напряжением 75 000 *в* Полный вывод пучка растягивается больше чем на 50 000 оборотов, т е. примерно на одну секунду, что важно для многих экспериментов, где при быстром выводе регистрирующая аппаратура может насыщаться

будет растянут во времени до секунды. Это полезно для некоторых экспериментов, где скорость регистрации полезных событий ограничена. Описанные методы вывода, порознь или в комбинации, позволяют варьировать длительность импульса от двадцати микросекунд до одной секунды.

После того как протоны выведены из ускорителя, они направляются в экспериментальные залы с помощью системы разводки пучков, состоящей из примерно сотни отклоняющих и фокусирующих магнитов и почти такой же сложной, как и сам синхротрон. Протоны могут идти прямо по направлению вывода в нейтринный зал, налево (западнее) — в мезонный или направо в протонный. Хотя эти названия в известной мере произвольны, они отражают главные направления соответствующих экспериментов. Все эти залы расположены примерно в полутора километрах от места вывода пучка.

Рассмотрим сначала нейтринный зал. Магнитами разводного устройства протоны выводятся на уровень земли и направляются на мишень, представляющую собой обычно стальную пластину, защищенную толстой земляной насыпью. В ливне, образующемся при столкновении протона с атомным ядром вещества мишени, присутствуют самые разные частицы, но в данном случае основной интерес представляют π-мезоны, или пионы, поскольку именно они при распаде дают нейтрино. Большая часть пионов вылетает в узком конусе, направленном по скорости первичного протона,

и может быть выведена магнитным полем в вакуумную трубу длиной примерно 300 *м*. Проходя по этой трубе, пионы распадаются на мюоны и нейтрино. Мюоны, как и все другие частицы, исключая нейтрино, доходят до закрытого конца трубы и в конце концов поглощаются в земляной защите толщиной около километра. Нейтрино, которые участвуют только в слабых взаимодействиях, легко проходят через насыпь и на выходе образуют чистый нейтринный пучок (рис. 9).

Если в распадный канал поступают пионы разных энергий, то и нейтрино на выходе будут обладать широким спектром. Если же пионы предварительно отсепарировать магнитным полем, пропустив в канал только узкий диапазон энергий, то и нейтрино будут приблизительно моноэнергетичными. На практике в пионном пучке присутствуют также каоны,

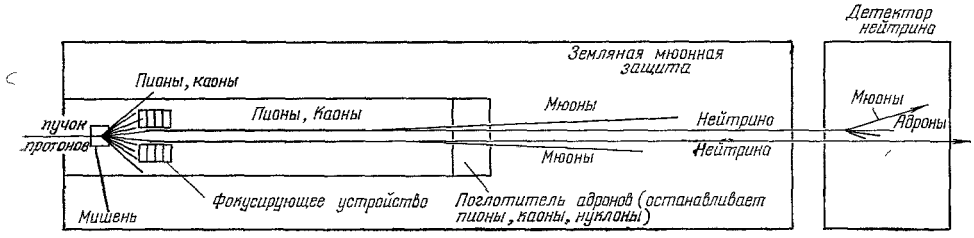

Рис. 9. Чистые нейтринные пучки получаются в Батавии при выведении протонного пучка на стальную мишень.

При соударении образуется ливень, состоящий из разных частиц и содержащий, в частности, пионы и каоны. Заряженные пионы и каоны фокусируются и направляются по трехсотметровой вакуумной трубе. Мюоны, как и другие сильно взаимодействующие частицы, попадают на закрытый конец трубы и в конце концов поглощаются в земляной насыпи протяженностью 1 *км*. Нейтрино, для которых любое вещество практически прозрачно, проходят через защиту и попадают в нейтринный зал, где установлена пятиметровая жидководородная пузырьковая камера. Из каждых 10^{12} нейтрино, попадающих в камеру, в среднем два взаимодействуют с ядрами водорода, или протонами.

тоже распадающиеся с образованием нейтрино. Поскольку пионные и каонные нейтрино обладают разными энергиями, то в спектре нейтринного пучка на выходе должны присутствовать две резкие линии. Такие нейтринные пучки с энергиями, достигающими нескольких сотен миллиардов электронвольт, являются одним из основных инструментов исследований в Батавии.

Из проведенных в других лабораториях работ по взаимодействию нейтрино с протонами известно, что сечение взаимодействия увеличивается с энергией почти линейно вплоть до примерно 5 *Гэв*. Этот линейный рост продолжается, по-видимому, и до 10 *Гэв*, но экспериментальные данные в этой области не очень убедительны из-за малого числа наблюдаемых событий. Наши экспериментаторы теперь набирают тысячи событий в диапазоне 100 *Гэв*, отчасти благодаря большей интенсивности нейтринного пучка, отчасти из-за примерно десятикратного увеличения числа взаимодействий. Мы с нетерпением ждем результатов обработки эксперимента, проведенного группой сотрудников Калифорнийского технологического института, который должен показать, продолжается ли упомянутый линейный рост или кривая начинает загибаться. Предварительные результаты других экспериментов указывают, по-видимому, на линейное возрастание сечения вплоть до 100 *Гэв*.

Одна из причин насыщения этого роста состояла бы в существовании все еще гипотетической *W*-частицы, называемой промежуточным бозоном и имеющей положительный или отрицательный заряд. Прежние данные показывают, что масса этой частицы должна была бы быть эквивалентной

более, чем двум миллиардам электронвольт. Данные, полученные нашими экспериментаторами, показывают, что эта масса наверняка больше 5 *Гэв*, и, возможно, превышает 10 *Гэв*. Если $W^{\pm}$-частицы существуют, то часть их должна обнаружить свое присутствие через одновременное рождение двух мезонов — положительного и отрицательного. Определенных доказательств таких событий пока не получено.

Не менее впечатляющим, чем открытие $W^{\pm}$-частицы, было бы наблюдение нейтрального промежуточного бозона, поскольку он предсказывается теорией Вайнберга, объединяющей электромагнитные и слабые взаимодействия. До развития этой теории ожидалось, что нейтрино должно взаимодействовать с протоном с образованием либо мюона, либо электрона, в зависимости от вида взаимодействующего нейтрино. Согласно новой теории нетрино может взаимодействовать не через заряженный ток, а через нейтральный, переносимый гипотетическим нейтральным промежуточным бозоном. Первое свидетельство безмюонного (или безэлектронного) события, вызванного нейтрино, было получено в ЦЕРНе. При облучении большой пузырьковой камеры «Гаргамель» нейтринным пучком от протонного синхротрона ЦЕРН на 28 *Гэв* наблюдались события, не показавшие присутствия мюонов или электронов.

Подобные события, по-видимому, наблюдались и в Батавии при больших энергиях нейтрино в гигантском детекторе, сооруженном группой физиков из Гарвардского университета и университетов штатов Пенсильвания и Висконсин. Высказывались соображения, что в этих экспериментах мюон мог образовываться, но остался не замеченным. Группа повторила эксперимент с усовершенствованным оборудованием, повышающим вероятность обнаружения мюонов. Новые результаты пока находятся в процессе обработки. Тем временем еще одна попытка была предпринята группой Калифорнийского технологического института, использовавшей аппаратуру того же типа, но, пожалуй, лучше приспособленную для подобных экспериментов. Кроме того, в Батавии сейчас вступает в строй пятиметровая пузырьковая камера. Надо надеяться, что вскоре в этой области будут получены определяющие результаты.

Как я уже упоминал, при получении нейтринного пучка в результате распада пионов образуется также интенсивный поток мюонов. Часть этих мюонов выводится магнитным полем в канал, идущий вдоль западной стороны земляной насыпи, отфильтровывающей нейтринный пучок. Взаимодействие этих частиц с веществом при энергии 100 *Гэв* и выше изучается в мюонной лаборатории. В нее перевезен магнит циклотрона Чикагского университета, используемый как большой спектрометр при детальном исследовании мюонных взаимодействий. Эксперименты с мюонными пучками большой энергии ведутся также на Стэнфордском линейном ускорителе (SLAC), но в Батавии энергия выше, так что диапазон исследований может быть существенно расширен. Само существование мюона, отличающегося от электрона только тем, что его масса больше в 200 раз, представляет собой загадку, ответ на которую могут дать эти эксперименты.

Водородная пузырьковая камера расположена в Батавии в конце нейтринного зала. Хотя она и не была включена в наш урезанный бюджет, мы недавно закончили ее сооружение на нейтринном пучке. Рядом расположена водородная камера размером 75 *см*, перевезенная из Аргоннской Национальной лаборатории и работающая с момента получения первого выведенного пучка летом 1972 г. Протоны или вторичные частицы с нейтринной мишени могут быть выведены в любую из этих камер. Предварительные эксперименты с протонами при энергии 100, 200, 300 и 400 *Гэв* и с пионами при 200 *Гэв* выполнены на малой камере. Результаты экспозиции при 200 *Гэв*, обработанные аргоннской группой, поставившей

камеру, были предметом первой научной публикации Национальной Ускорительной лаборатории в августе 1972 г. Оказалось, что прежние данные о множественности частиц, рождающихся под действием космических лучей, были ошибочны. Эксперименты в Батавии показали, что при каждом соударении рождается 20 и даже 30 частиц. Фотографии с пузырьковой камеры позволяют получить непосредственное и даже эстетическое впечатление о взаимодействии частиц больших энергий.

Теперь коротко остановимся на мезонном зале. Здесь протоны с энергией 300 *Гэв* соударяются с мишенью, образуя вторичные частицы (обычно мезоны), которые разводятся затем по шести каналам, заканчивающимся экспериментальным оборудованием. Эксперименты в этом зале, пожалуй, больше всего напоминают исследования других лабораторий при меньших энергиях. Так, например, здесь уже было сделано несколько попыток найти гипотетические кварки. Хотя ни одной такой частицы не обнаружилось, были установлены новые пределы для вероятности их появления. Во вторичном пучке нейтральных частиц промеряется нейтрон-протонное взаимодействие, имеющее отношение к регенерации нейтрального каона. Один из вторичных каналов заряженных частиц сопряжен со сложным спектрометром, предназначенным для точных измерений взаимодействия мезонов при больших энергиях. На отдельном канале исследуется пион-протонное и протон-протонное рассеяние на большие углы для выяснения структуры протона.

Восточнее нейтринного зала расположен протонный. В отличие от предыдущего, протонный пучок не выводится здесь на поверхность земли, а лишь поднимается с глубины 6 *м* (уровень камеры основного кольца) до глубины 3 *м*. Это делается для того, чтобы использовать естественную земляную защиту от рассеянного излучения. Для размещения мишеней, которые могут выдержать полную интенсивность протонного пучка, вырыто несколько шахт. Зал рассчитан на максимальную энергию протонов, которую мы сможем получить (вероятно, 500 *Гэв*), тогда как возможности мезонного зала ограничены пока энергией 300 *Гэв*.

В протонном зале планируются самые различные эксперименты. В одном из них будет измеряться протон-протонное рассеяние под бóльшими углами, чем это возможно в других залах. Группой из Колумбийского университета уже проводится эксперимент по обнаружению электронов, которые могут испускаться под большими углами. Родственный эксперимент, предпринятый группами Принстонского и Чикагского университетов, будет направлен на поиски любого излучения высокой энергии под большими углами. И то и другое имеет своей целью проникновение в самую глубину протона. Кроме того, мы планируем создать в протонном зале фотонный пучок большой энергии для изучения фоторождения частиц в диапазоне сотен гига-электронвольт. Позднее в этом году будет получен пучок электронов, позволяющий ставить работы по физике электрона в неисследованной области энергий.

Сегодня можно сказать, что сам синхротрон и основное экспериментальное оборудование уже закончены, в том смысле, что бóльшая часть всех компонентов установлена и запущена. Мы можем получать энергию вплоть до 400 *Гэв*. Однако нам пока не удалось наладить надежную работу машины и получить интенсивные пучки протонов. Машина дает пучок для исследований только примерно половину времени. Рекордная интенсивность, $6 \cdot 10^{12}$ протонов в импульсе, примерно в десять раз меньше, чем поставленная цель. Тем не менее около тридцати экспериментов уже выполнено и еще тридцать либо проводятся либо подготавливаются. Еще

пятнадцать экспериментов запланировано на этот год, а около двадцати утверждены, но не обеспечены местом или финансированием.

Пожалуй, наиболее поразительным фактом, обнаруженным в первых экспериментальных работах, является вылет вторичных высокоэнергетичных частиц под большими углами при бомбардировке протонов частицами большой энергии, например, нейтрино. Это напоминает открытие Эрнста Резерфорда, сделанное около шестидесяти лет назад, когда оказалось, что при бомбардировке вещества альфа-частицами (ядрами гелия) они отклоняются на большие углы. Из этого наблюдения Резерфорд немедленно

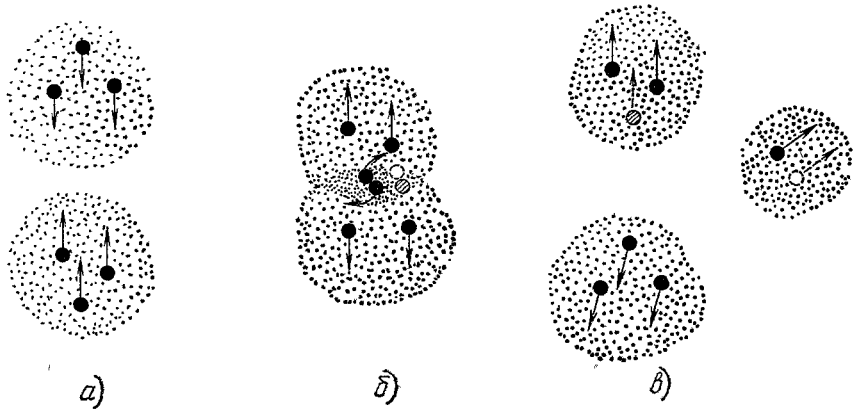

Рис. 10. Модель кварков, изображенная здесь в сильно упрощенном виде, может объяснить, почему вторичная частица, например пион, образуется и вылетает под большим углом при соударении протонов высокой энергии.

На рис. *а*) показаны два протона, сближающиеся с большой скоростью. Каждый из них представляется в виде совокупности трех кварков (или «партонов»), направление движения которых показано стрелками. Заштрихованная область вокруг кварков обозначает остальную часть протона — «клей», или силовое поле, удерживающее кварки вместе. На рис. *б*) протон почти полностью прошел сквозь другой протон. Хотя четыре кварка прошли, «не заметив» друг друга, два кварка все же столкнулись, в результате чего образовалась пара кварк — антикварк (показана светлыми кружками). На рис. *в*) кварки перегруппировались в протон и частицу, которая может рассматриваться как возбужденное состояние протона (другого). Новый антикварк присоединился к одному из исходных кварков, образовав пион, вылетающий под большим углом. В силу сохранения импульса первый протон испытывает небольшое отклонение. Действительная картина подобного соударения, несомненно, гораздо сложнее.

сделал вывод, что атом имеет массивное и компактное ядро в противоположность предложенной Дж. Дж. Томсоном модели «пудинга с изюмом», в которой масса атомного вещества предполагалась размытой.

До последнего времени физики представляли себе протон более или менее однородным. Аналогично открытию Резерфорда излучение частиц из протона под большими углами означает, что часть его является «твердой». Эти выводы не меняются, когда протон бомбардируется нейтрино, мюонами или другими протонами, и не зависит от вида вылетевших частиц, будь то мюоны, пионы, фотоны или протоны. Короче говоря, почти наверное мы начинаем прощупывать внутреннюю структуру протона.

Современные представления о протоне в очень упрощенном виде сводятся к тому, что он состоит из трех (или более) твердых маленьких частиц. Р. Фейнман из Калифорнийского технологического института, называвший сначала эти структурные единицы партонами, теперь считает, что это, возможно, кварки. С этой точки зрения, столкновение протона высокой энергии с протоном мишени в действительности сводится к соударению одного кварка налетающего протона с одним кварком протона мишени (рис. 10). Кварки, образовавшиеся в результате этого соударения, должны вылететь под большими углами. Поскольку непосредственно кварки мы не наблюдаем, то надо предположить, что при выходе из протона

кварк по непонятным причинам магически превращается в обыкновенную частицу. Может быть, это происходит из-за присоединения других кварков, окружающих его, а может быть, при столкновении кварка с кварком образуется пара кварк — антикварк. Так, если бы к кварку на выходе присоединился еще один, то наблюдался бы мезон, если присоединилось два кварка, то мы увидели бы нейтрон, протон или какую-либо экзотическую тяжелую частицу.

Поскольку некоторые внутренние свойства, характеризуемые квантовыми числами, сохраняются при любом взаимодействии, следовало бы ожидать, что при столкновении двух кварков высокой энергии образуются по крайней мере два кварка с противоположными (взаимно компенсирующимися) квантовыми числами. Они могут появиться в виде двух частиц, или в виде двух «струй»— групп частиц, вылетающих из протона в пределах малого телесного угла. Действительно, есть некоторые свидетельства в пользу существования таких струй. Сейчас планируются эксперименты, которые должны показать, действительно ли кварки существуют, и если да, то появляются ли они коррелированными парами, как предсказывает модель кварков. Уже тот факт, что мы можем начать обсуждение столь дальних перспектив, является громадным шагом вперед по сравнению с представлениями, существовавшими всего несколько лет назад.

Поскольку описанные явления становятся все более существенными при повышении энергии соударения, мы, естественно, думали над тем, как выжать из ускорителя больше 400 *Гэв*. Сейчас машина работает при 400 *Гэв* почти так же хорошо, как и при 300 *Гэв*, но при сохранении частоты повторений требует почти двойной электрической мощности. В результате напряжение в электросети, принадлежащей компании «Коммонуэлс Эдисон», падает примерно на один процент. Нам уже пришлось примириться с полупроцентным падением напряжения при энергии 300 *Гэв*. Таким образом, падение напряжения пока ставит предел увеличению энергии. Для устранения этой трудности мы предполагаем включить соответствующие емкости последовательно со вторичной обмоткой силового трансформатора. Через несколько месяцев станет известно, позволят ли эти емкости приблизиться к 500 *Гэв*. Естественно, при большой реактивной нагрузке могут появиться и другие ограничения.

Энергия в 1000 *Гэв* (один тера-электронвольт) не представляется нам недостижимой целью. Для ее получения можно в том же туннеле установить второе кольцо, собранное из сверхпроводящих магнитов. Старое кольцо будет служить тогда бустерным ускорителем, из которого ускоренные протоны должны переводиться в сверхпроводящее кольцо.

Мы уже построили несколько коротких сверхпроводящих магнитов. Проведенные испытания дают надежду на получение поля напряженностью 45 *кгс*, необходимого для энергии 1000 *Гэв*. Пока что у нас остались неизрасходованными примерно 30 млн. долларов, что как раз достаточно для сооружения сверхпроводящего кольца, при условии, что нам не придется истратить больше 10 млн долларов на модернизацию существующих экспериментальных залов и строительство новых.

Строить сверхпроводящее кольцо нас побуждают не только технические соображения, но и финансовые. При существующем режиме работы потребляемая мощность составляет 40 *Мвт*, и эта величина удвоится или даже учетверится при переходе к планируемым режимам (например, при получении импульсов с длинной плоской частью). Сейчас мы платим за электроэнергию несколько миллионов долларов в год, и эта сумма соответственно возрастает. Мы подсчитали, что при переводе протонов из основного кольца в сверхпроводящее на уровне 100 *Гэв* полная мощность

питания основного магнита и криогенного оборудования сверхпроводящего кольца составит 20 *Мвт*. Это остается справедливым для любых режимов работы — для растяжки импульсов в экспериментах с ограниченной скоростью счета, для повышения энергии до 1000 *Гэв* и для того и другого вместе.

Однако существуют убедительные доводы в пользу совсем другого пути. Хорошо известно, что при увеличении энергии ускоренных протонов все меньшая ее часть выделяется при столкновении с покоящимся протоном. Полезная энергия возрастает только как квадратный корень из энергии ускоренных частиц. Так, при 1 *Гэв* можно использовать только 0,43 *Гэв*; при 10 *Гэв* — только 2,9 *Гэв*, а при 1000 *Гэв* — меньше 35 *Гэв*.

Выход из этого положения состоит в том, чтобы направить навстречу друг другу два одинаковых пучка, чтобы при столкновении частиц могла выделиться вся их энергия. Такая схема уже была успешно осуществлена в ЦЕРНе на установке, называемой пересекающимися накопительными кольцами. Протонный синхротрон заполняет протонами с энергией 30 *Гэв* сначала одно кольцо, а затем другое, с противоположным направлением обращения частиц. Кольца расположены так, что пучки вьются один относительно другого, пересекаясь в восьми точках, где при каждом столкновении частиц выделяется 60 *Гэв*. При использовании обычной схемы с одним пучком тот же эффект мог бы быть достигнут лишь при энергии 1800 *Гэв*.

И все же работа с одним пучком имеет определенные преимущества. Прежде всего протоны, попадающие на, скажем, жидководородную мишень, дают в миллионы раз больше соударений, чем при столкновении двух разреженных встречных пучков. Кроме того, при столкновении ускоренного протона с покоящимся образуется много вторичных частиц, между которыми делится энергия движущейся системы. Поэтому, в отличие от встречных пучков, в обычной схеме могут быть получены вторичные пучки пионов и каонов большой энергии, а также третичные пучки нейтрино и фотонов. Реакции с участием вторичных частиц интерпретировать проще, чем столкновения между двумя, по-видимому, очень сложными протонами. Наконец, пучок ускорителя в Батавии можно использовать для заполнения отдельной системы пересекающихся накопительных колец. Например, столкновение двух пучков с энергией 100 *Гэв* соответствовало бы соударению с неподвижной мишенью пучка с энергией 22 000 *Гэв*, два пучка по 400 *Гэв* были бы эквивалентны 320 000 *Гэв*, а встречные пучки с энергией 1000 *Гэв* соответствовали бы $2{,}2 \cdot 10^6$ *Гэв*.

Можно было бы подумать и о некоторых промежуточных шагах, например, об использовании пучка бустера с энергией 8 *Гэв* для столкновения с пучком основного синхротрона при 400 *Гэв* (эквивалентная энергия 6400 *Гэв*). Однако наша комиссия по долгосрочному планированию рекомендовала ориентироваться сразу на более широкие перспективы использования имеющейся территории и ускорителя. Под этим понимается создание установки на встречных пучках с заполнением от сверхпроводящего синхротрона на 1000 *Гэв*. Комиссия рекомендовала также сооружение в том же туннеле электронного накопительного кольца на энергию, скажем, 20 *Гэв*. Идея состоит не в том, чтобы осуществить столкновение электрона с двумя протонами, а в возможности исследовать столкновения протонного пучка при 1000 *Гэв* либо с другим таким же пучком, либо с электронами с энергией 20 *Гэв*.

Возможно, в этой системе трех колец для осуществления той или иной альтернативы придется перемещать часть магнитов вблизи прямолинейного участка встречи, но это не представляет серьезных трудностей. Комиссия рекомендовала такой путь, исходя из того, что при достаточно боль-

ших энергиях усиливающиеся слабые взаимодействия сравняются с уменьшающимися электромагнитными и ядерными и «кто-то уступит», т. е. должны будут проявиться новые явления. Поскольку не известно, что больше подходит для этой цели — электрон-протонные или протон-протонные соударения,— то и предлагается осуществить оба варианта. Мы сейчас начинаем серьезное изучение этого вопроса, которое покажет, что можно будет сделать и сколько это будет стоить.

Возможности Национальной Ускорительной лаборатории в конечном счете ограничиваются лишь размерами ее территории. Наибольшее сверхпроводящее кольцо, которое мы могли бы построить в наших теперешних границах, имело бы в окружности около пятнадцати километров. Положив его в основу установки со встречными пучками, мы смогли бы получить эквивалентную энергию в несколько миллионов гига-электронвольт. Если эксперименты, которые мы можем выполнить сейчас, не дадут желаемой информации или, что более вероятно, новая информация заставит перейти к гораздо большим энергиям, то мы, безусловно сможем их получить в нашей лаборатории на Иллинойской равнине.

ЛИТЕРАТУРА

R. Littauer, R. R. Wilson, Accelerators: Machines of Nuclear Physics, Doubleday Co., 1960.
M. S. Livingston, Particle Accelerators: a Brief History, Harvard Univ. Press. 1969.
R. Junqk, The Big Machine, Ch. Scribner's Sons, 1970.
D. H. Perkins, Introduction to High Energy Physics, Addison-Wesley Publ. Co., 1972.