

СОЗДАНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ НА ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКАХ

Член-корреспондент АН СССР Г.
И. БУДКЕР

В Институте ядерной физики разрабатываются новые методы ускорения заряженных частиц и сооружаются ускорительные установки, при малых габаритах обладающие большими возможностями, чем существующие как у нас, так и за рубежом. В Институте ведутся также исследования по физике элементарных частиц, по физике плазмы и управляемым термоядерным реакциям.

Физика элементарных частиц за последние годы достигла больших успехов благодаря бурному развитию техники ускорения заряженных частиц, начавшемуся около двух десятилетий назад, после открытия В. И. Векслером и Э. Макмилланом принципа автофазировки. Экспериментаторы сейчас имеют в своем распоряжении установки, которые ускоряют пучки частиц до очень высоких энергий и создают потоки разнообразных вторичных частиц (мезонов, антипротонов, гиперонов), не существующих в природе в стабильном виде. Хотя рождение таких частиц изредка удается наблюдать в космических лучах, планомерные исследования в этой области без использования ускорителей невозможны.

Сейчас физика вплотную подошла к изучению структуры элементарных частиц, и для проведения новых экспериментов высокой точности необходимы быстрые частицы все больших энергий и во все возрастающих количествах. Около десяти лет назад, когда завершалось сооружение крупных протонных ускорителей, среди которых был и советский синхрофазотрон в Дубне с максимальной энергией 10 млрд эв (10 Бэв), многим казалось, что возможности ускорительной техники уже исчерпаны и строительство установок на большие энергии невозможно. Но в настоящее время благодаря применению нового принципа сильной фокусировки в США и в ЦЕРН (Швейцария) уже работают два ускорителя с энергией 30 Бэв, а в Советском Союзе строится крупнейший в мире Серпуховский ускоритель на 70 Бэв. Сейчас уже вырисовываются и дальнейшие перспективы роста этих гигантских машин. На проходившей в конце августа 1963 г. в Дубне международной конференции по ускорителям рассматривались разрабатываемые как в СССР, так и за рубежом проекты установок на 300—1000 Бэв, радиусы которых измеряются километрами.

Где же предел увеличения размеров этих гигантских приборов для физических исследований? Нельзя ли достичь хотя бы некоторых существенных результатов, ожидаемых в физике высоких энергий, другими методами? Оказывается, можно, и такие методы существуют. С их разработкой связан ряд исследований, проводимых в Институте ядерной физики Сибирского отделения.

Первый способ уменьшения размеров ускорителей почти очевиден. Увеличение радиуса циклических установок с ростом энергии вызвано применением электромагнитов с железными сердечниками, в которых нельзя получить магнитное поле напряженностью более 15—20 кэс. Отказ от железа позволяет повысить магнитное поле в десятки раз, но реа-

лизация идеи такого «безжелезного» ускорителя требует преодоления ряда серьезных трудностей. Коллективом Института уже сделаны важные шаги в данном направлении, о чем будет рассказано ниже.

Другой способ — использование соударений встречных пучков заряженных частиц. Основная идея этого метода тоже довольно проста. При встречном столкновении одинаковых по массе частиц с одинаковой энергией центр инерции частиц остается неподвижным, поэтому полезная энергия, которая идет на взаимодействие, равна в данном случае сумме энергий сталкивающихся частиц. Совсем иначе обстоит дело при соударении частиц с неподвижной мишенью: здесь часть энергии бесполезно теряется на движение центра инерции, а до сих пор исследования на ускорителях велись именно таким образом. Проигрыш в эффективной энергии взаимодействия получается при этом гораздо большим, чем может показаться человеку, не знакомому с законами релятивистской механики. Например, протоны с энергией 30 *Бэв*, доступной на существующих синхрофазотронах, при взаимодействии с нуклонами неподвижной мишени дают в системе центра инерции энергию всего 8 *Бэв*, в то время как при встречном столкновении пучков энергия их взаимодействия составила бы 60 *Бэв*. Чтобы получить такую энергию с помощью неподвижной мишени, нужен ускоритель на колоссальную энергию — 1800 *Бэв*. Иными словами, в данном случае метод встречных пучков дает выигрыш в энергии более чем в 200 раз!

Таким образом, в настоящее время эксперименты со встречными пучками могут продвинуть физику элементарных частиц в область более высоких энергий. Но у этого метода есть и свои трудности. Плотность взаимодействующих пучков должна быть достаточно большой, чтобы полезные эффекты взаимодействия частиц не маскировались их взаимодействием с молекулами остаточного газа в вакуумной камере ускорителя. Проблема отношения «сигнал—фон» решается здесь, как обычно, двумя путями: уменьшением фона благодаря очень хорошему вакууму (10^{-8} — 10^{-10} мм рт. ст.) и увеличением числа частиц во взаимодействующих пучках.

В связи с решением второй задачи несколько лет назад возникла и сейчас успешно развивается идея накопления частиц в постоянном во времени магнитном поле. Накопитель частиц в одном из вариантов состоит из двух «накопительных колец» — кольцевых магнитов, которые создают управляющее поле и позволяют накапливать частицы, движущиеся по круговым орбитам; кольца имеют общий участок, где частицы встречаясь взаимодействуют. Накопительные кольца должны заполняться частицами путем инжекции из отдельного ускорителя. Именно такого типа установки построены в Институте ядерной физики, где основу программы исследований по физике высоких энергий составляют работы по встречным пучкам.

Одна из этих установок будет использоваться для изучения упругого рассеяния электронов на электронах при энергиях в системе центра масс до 260 *Мэв*, что соответствует относительной энергии ~ 70 *Бэв*. Эти эксперименты позволят проверить справедливость законов квантовой электродинамики на расстояниях порядка 10^{-14} см. Установка для получения встречных пучков электронов состоит из двух расположенных одно над другим соприкасающихся накопительных колец (рис. 1), электронного синхротрона-инжектора и соединяющей их электроннооптической системы. Магнитное поле накопителей слабофокусирующее, его максимальная величина 10 кГс, а радиус орбиты равен 43 см. Энергия, теряемая электронами при движении в накопителе из-за излучения, компенсируется высокочастотной ускоряющей системой. Для получения вы-

сокого рабочего вакуума (около $3 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст.) вакуумная камера установки прогревается до 200°C .

Чтобы вывести ускоренные электроны из синхротрона и ввести их в накопитель, нужно за время, меньшее одного периода обращения частиц, сместить орбиту в область вывода и ввода пучка, т. е. изменить соответствующим образом магнитное поле. Для этой цели применяется система с импульсным магнитным полем, которое возбуждается током силой 10^4 а , проходящим через специальные витки, расположенные в камерах синхротрона и накопителя. Длительность импульса тока 10^{-8} сек., время нарастания 10^{-9} сек. Выйдя из камеры синхротрона, пучок проходит через корректирующие магниты и фокусирующие квадрупольные линзы, поворачивается секторным магнитом и попадает в коммутирующий магнит. Этот магнит дополнительно поворачивает его и направляет поочередно то в верхнее, то в нижнее накопительное кольцо. Ускоритель-инжектор работает в импульсном режиме с частотой 1 раз в 30 сек., поэтому большинство отклоняющих и фокусирующих систем сделано импульсными. Время жизни пучка в накопителе при давлении $3 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст. более 1000 сек. При интенсивности синхротрона 10^{10} электронов в импульсе в каждом кольце удастся накопить ток силой около 1 а. Для регистрации электрон-электронных взаимодействий используются сцинтилляционные счетчики с разрешающим временем 10^{-8} сек., включенные по схеме совпадений и расположенные в горизонтальной плоскости вокруг области встречи пучков, и искровые камеры. В настоящее время установка находится в стадии запуска. 10 августа 1963 г. электроны были впервые впущены в одно из накопительных колец и накоплен электронный ток $\sim 200 \text{ ма}$ при энергии 140 Мэв. Вскоре предполагается начать эксперименты со встречными пучками при уровне энергии каждого пучка 130 Мэв.

Вторая установка Института ядерной физики, предназначенная для накопления электронов и позитронов (рис. 2), на первый взгляд выглядит несколько проще — она имеет только одно накопительное кольцо, потому что электроны и позитроны вращаются в противоположных направлениях в одном и том же магнитном поле. Но на самом деле эта установка гораздо сложнее, и не только потому, что конечная энергия здесь выше и должна составлять в каждом пучке 700 Мэв. Дело в том, что получить нужное количество позитронов очень трудно. Зато на этой установке можно будет поставить гораздо больше разнообразных экспериментов, наблюдать рождение и взаимодействие различных мезонов. Принципиальная схема установки в основном аналогична предыдущей: здесь также применяется инжекция в накопительное кольцо из синхротрона. Магнитное поле накопительного кольца (радиус орбиты 1,5 м) слабофокусирующее, максимальная его напряженность 15 кгс. Магнит имеет четыре прямолинейных промежутка, в один из которых инжектируются электроны, в другой вводятся позитроны, в третьем размещен высокочастотный резонатор, а в четвертом расположена регистрирующая аппаратура. Ускорителем-инжектором будет служить синхротрон на энергию 350 Мэв с интенсивностью пучка не менее $3 \cdot 10^{12}$ электронов в импульсе при частоте повторения циклов до 12 гц. Такая высокая интенсивность необходима, чтобы получить достаточное число позитронов, которые будут образовываться в вольфрамовом конвертере, расположенном в фокальной плоскости двух специально разрабатываемых «параболических» линз. Ожидаемый коэффициент конверсии при отборе позитронов с энергией, равной половине энергии падающих на конвертор электронов, составит $3 \cdot 10^{-4}$. Накопление позитронов и электронов предполагается вести при энергии 150 Мэв, а затем дополнитель-

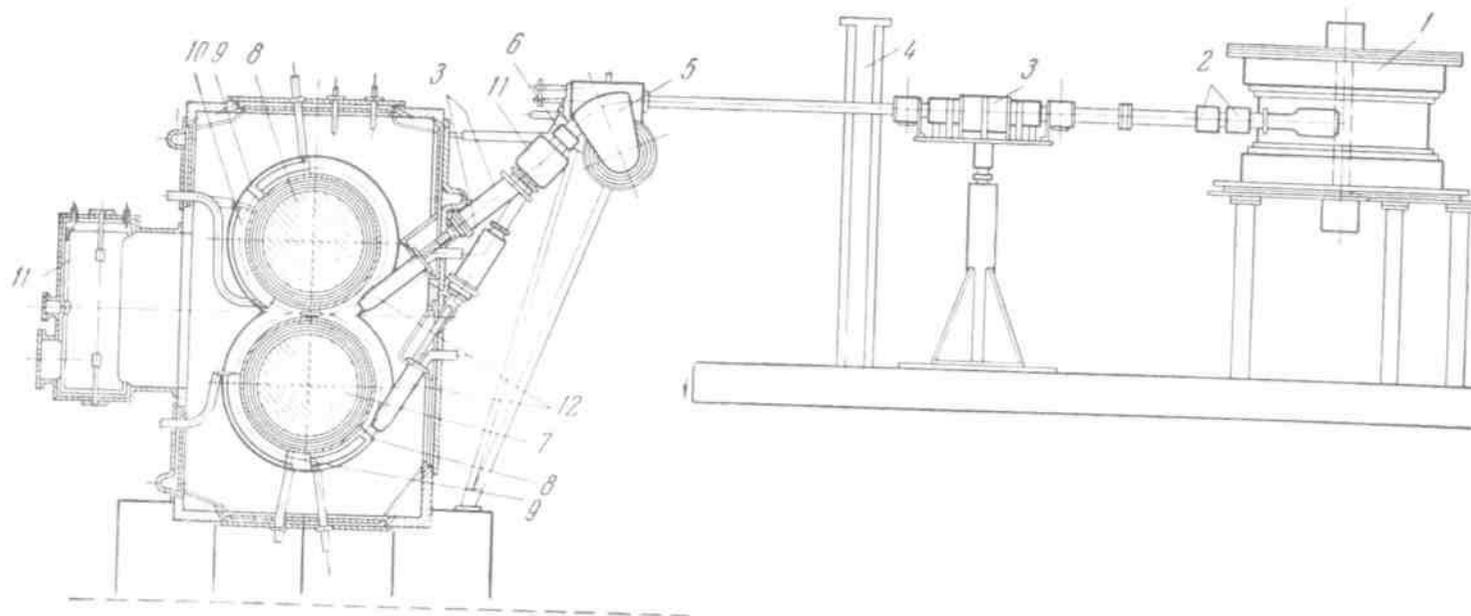


Рис. 1. Схема установки со встречными пучками электронов

1 — синхротрон; 2 — корректирующие магниты; 3 — квадрупольные линзы; 4 — радиационный и магнитный экраны; 5 — поворотный магнит; 6 — корректирующая катушка; 7 — магниты накопительных дорожек; 8 — резонатор; 9 — инфлектор; 10 — высоковакуумный насос; 11 — коммутирующий магнит; 12 — ком-
пенсационные системы

но ускорять их до 700 Мэв, медленно увеличивая магнитное поле в кольце. Большое время жизни накопленных пучков будет обеспечено сверхвысоким вакуумом.

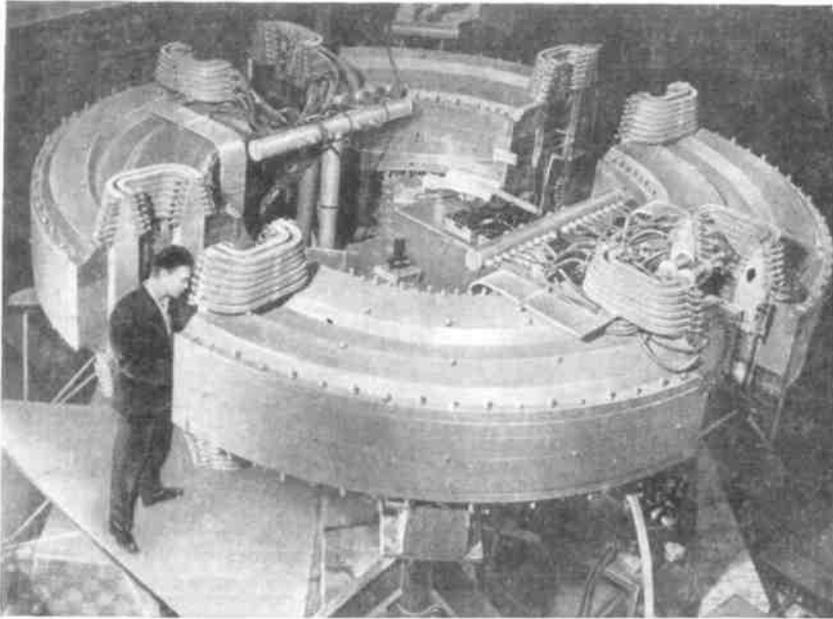


Рис. 2. Общий вид электронно-позитронного накопителя

Создание описанных установок, основанных на использовании метода встречных пучков, требует решения ряда сложных задач. Но, пожалуй, наибольшие трудности коллективу Института придется преодолеть в связи с разработкой третьей установки, предназначенной для исследования протон-протонных взаимодействий. Метод встречных пучков дает эффект лишь при сильно релятивистских энергиях, и для протонов его применение имеет смысл примерно с энергии 10 Бэв. Между тем сооружение ускорителя-инжектора на такую энергию само представляет сложную задачу и, главное, требует огромных средств. Поэтому в Институте ядерной физики было решено разработать установку, основанную на развитии метода встречных пучков и использовании безжелезных магнитов. Научный коллектив Института уже имеет большой опыт создания безжелезных ускорителей. Этот опыт очень помогает в разработке проекта установки, носящей название «протон-протон».

Установка будет представлять собой безжелезный синхрофазотрон со слабой фокусировкой, в котором протоны ускоряются одновременно во встречных направлениях. Применение безжелезного магнита оригинальной конструкции в случае успешной реализации идеи позволит уменьшить радиус орбиты до 2 ж при максимальном поле 200 кгс и энергии протонов 12 Бэв. Схематический поперечный разрез этого магнита приведен на рис. 3а. Импульсный ток, текущий по центральной шине, возвращается по корпусу, одновременно служащему вакуумной камерой (магнитные силовые линии показаны на рисунке пунктиром). Интересная особенность магнита состоит в том, что силы, действующие на цент-

ральную шину со стороны магнитного поля, уравниваются. Схема ускорителя в плане показана на рис. 36. В правой и левой половинах магнита направление тока в центральной шине противоположно. В верхнем и нижнем прямолинейных промежутках частицы переходят с внутренней дорожки магнита на внешнюю и наоборот. Встреча пучков происходит в местах пересечения орбит.

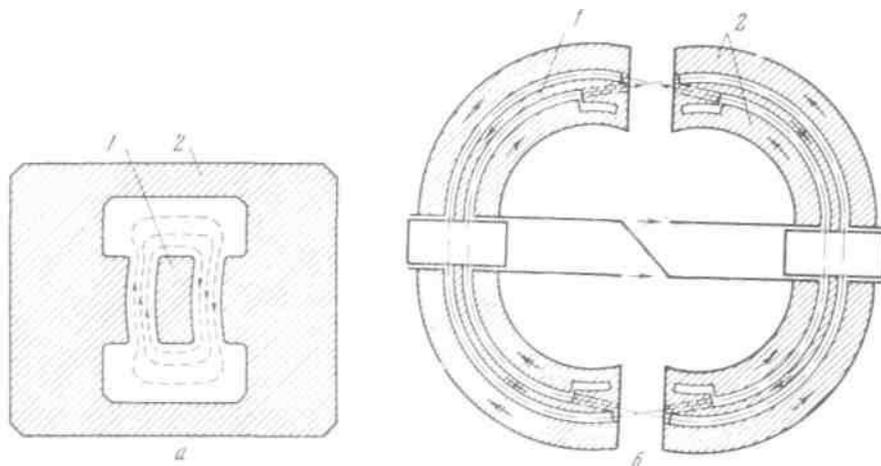


Рис. 3. Установка «протон-протон»
a — схематический разрез магнита (показаны силовые линии магнитного поля); *b* — схема установки в плане (стрелками показаны направления токов)
 1 — центральная уравнивающая шина; 2 — внешняя шина-корпус

Для осуществления этого проекта сейчас проводятся теоретические и экспериментальные исследования, сооружаются модели. Действующая модель электронного ускорителя на 70 Мэв с магнитом такого типа и радиусом орбиты 17 см была запущена еще в 1956 г. в Москве. Сейчас строится вторая модель электронного синхротрона больших размеров и проектируется протонный ускоритель с радиусом 1,3 м, полем 100 кГс и конечной энергией 3 Бэв. Для сооружения установки «протон-протон» предстоит еще решить много сложных технических задач, в том числе разработать систему питания магнита и высокочастотную ускоряющую систему.

Работы Института ядерной физики по встречным пучкам лежат на одном из главных направлений развития физики высоких энергий. Аналогичные работы ведутся в ряде других стран, и скоро накопители со встречными пучками электронов и позитронов вступят в строй. В ЦЕРН намечено строительство накопительного кольца для протонного ускорителя на 30 Бэв. Благодаря этим установкам в ближайшие годы ученые будут располагать новыми фактами о взаимодействии частиц при высоких энергиях.