

Посредством фазотрона Института ядерных проблем Академии наук СССР (рис. 384) в 1952—1958 гг. были проведены исследования с протонами, ускоренными до энергии 660 Мэв, и α -частицами с энергией 840 Мэв. Бомбардировка мишеней пучками ускоренных

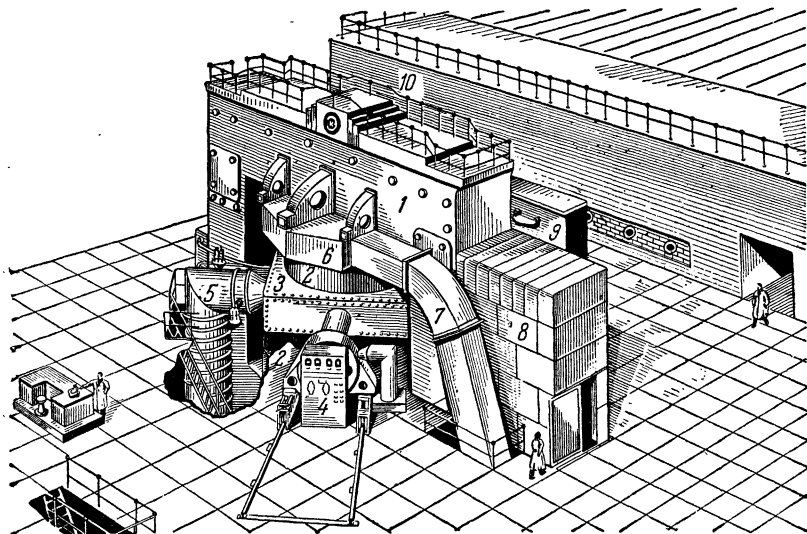


Рис. 384. Фазотрон ФИАН СССР:

1 — ярмо основного электромагнита; 2 — полюса электромагнита; 3 — вакуумная камера; 4 — мощный высокочастотный генератор, питающий ускоряющие электроды; 5 — мощный насос для создания высокого вакуума внутри камеры фазотрона; 6 — катушки электромагнита, заключенные в металлический вентиляционный короб; 7 — вентиляционный трубопровод; 8 — экспериментальная лаборатория, сложенная из бетонных плит; 9 — вспомогательный отклоняющий электромагнит; 10 — защитная бетонная стена.

на этом фазотроне частиц позволяет получать нейтроны с энергией 600 Мэв и π -мезоны с энергией 400 Мэв. Полюсы электромагнита (весьящего 7000 т) имеют диаметр 6 м.

Сооружение фазотронов, рассчитанных на энергию ускоренных протонов, большую 700—800 Мэв, сопряжено с трудностями конструирования огромных электромагнитов.

§ 104. Бетатроны

Так как масса электрона в 1836 раз меньше массы протона, то при одинаковой с протоном скорости кинетическая энергия электрона во столько же раз меньше кинетической энергии протона. Поэтому в фазотроне, позволяющем получить протоны с энергией до 300—400 Мэв, электроны могли бы быть ускорены только до энер-

гий 0,1—0,2 Мэв. При энергии 10 Мэв масса электрона более чем в 22 раза превышает его массу покоя, а при 100 Мэв она уже почти в 200 (в 198,8) раз больше массы покоя. В связи с этим циклотроны и фазотроны, режим работы которых чрезвычайно чувствителен к изменению массы частицы со скоростью, ни при каких усовершенствованиях не могут быть применены для ускорения электронов до энергий в десятки мегаэлектронвольт.

Аппараты, применяемые для ускорения электронов, — *бетатроны* основаны на совершенно ином принципе действия. В них использовано явление электромагнитной индукции — возникновение замкнутых силовых линий электрического поля вокруг изменяющегося со временем магнитного потока. Идею использования электромагнитной индукции для ускорения электронов высказал еще в 1927 г. Видероз и разработал в 1935 г. Штейнбек; детально эта идея была теоретически изучена в 1940 г. Я. П. Терлецким и конструктивно воплощена Керстом, который в 1941 г. построил первый бетатрон.

Электромагнит бетатрона, в отличие от электромагнитов циклотронов и фазотронов, питается переменным током с частотой порядка 60—600 гц. Между полюсами электромагнита расположена кольцевая ускорительная камера, в которой поддерживается чрезвычайно высокий вакуум. В качестве источника электронов используется эмиссия накаливаемого катода, расположенного внутри камеры.

Вследствие изменения во времени магнитного потока в межполюсном пространстве и, в частности, в ускорительной камере индуцируются замкнутые линии электрического поля; циркуляция напряженности этого индуцированного поля, т. е. индуцированная электродвижущая сила \mathcal{E} , определяется законом Фарадея:

$$\mathcal{E} = \oint E_t dl = - \frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt}.$$

Электрическое поле, ускоряя электроны, введенные в ускорительную камеру, заставляет их сотни тысяч раз обегать вдоль замкнутой силовой линии индуцированного электрического поля раньше, чем направление поля изменится на противоположное. Весь процесс ускорения каждой группы электронов завершается в бетатроне в течение примерно четверти периода изменения тока, питающего электромагнит бетатрона. Если, например, индуцированная электродвижущая сила \mathcal{E} составляет только 20 в, то после первого оборота электрон приобретает [т. II, § 44, 1959; в предыдущих изданиях § 51, формула (1)] скорость $2,65 \cdot 10^8$ см/сек. При радиусе орбиты 5 см время пробега электрона по орбите становится равным всего $12 \cdot 10^{-8}$ сек. Двигаясь с такой скоростью, электрон за 0,001 сек совершил бы около 10 000 оборотов. Но скорость электрона с каждым оборотом возрастает и быстро приближается к скорости света. Период одного оборота сокращается до 10^{-9} сек, и поэтому за 1 мсек

(пока направление индуцированного электрического поля остается неизменным) электрон успевает совершить более 900 000 оборотов.

Совершив n оборотов по замкнутой силовой линии электрического поля, электрон приобретает энергию $ne\mathcal{E}$ эв. В рассмотренном случае при $\mathcal{E}=20$ в электрон приобретает энергию $900\,000 \cdot 20$ эв = 18 Мэв. При такой энергии масса²⁸ электрона приблизительно в 32 раза превышает его массу покоя, но для эффективности действия бетатрона при правильно рассчитанном режиме работы это не имеет существенного значения.

Важным условием нормальной работы бетатрона является *стабильность орбиты электронов*, т. е. постоянство ее радиуса. Стабильность орбиты может быть обеспечена только в том случае, когда напряженность магнитного поля на орбите H точно составляет половину средней напряженности \bar{H} магнитного поля внутри контура орбиты. Чтобы убедиться в этом, предположим, что магнитное поле имеет осевую симметрию; в этом случае силовые линии электрического поля будут замкнутыми окружностями с центрами на оси симметрии. Тогда для орбиты радиуса r : $\mathcal{E} = \oint E_r dl = 2\pi r E$; при этом изменения импульса

$$\frac{d(mv)}{dt} = eE = \frac{e}{2\pi rc} \frac{d\Phi}{dt}.$$

Интегрируя это уравнение в пределах от $t=0$ до t при $r = \text{const}$, получаем:

$$mv = \frac{e}{2\pi rc} \Phi.$$

Но $\Phi = \pi r^2 \bar{H}$, где \bar{H} — средняя (по площади, охваченной орбитой) напряженность магнитного поля в момент t . Стало быть,

$$mv = \frac{e}{2c} r \bar{H}.$$

С другой стороны, поскольку центробежная сила, удерживающая электрон на орбите, создается отклоняющим действием магнитного поля, имеющего на орбите напряженность H , то в любой момент времени (согласно формуле Лорентца, т. II, § 67)

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e}{c} vH,$$

или, что то же,

$$mv = \frac{e}{c} rH.$$

Сопоставляя это выражение для количества движения электрона с полученным выше, убеждаемся, что *напряженность магнитного поля на электронной орбите должна в любой момент времени составлять, как и было указано выше, половину средней напряженности магнитного поля внутри контура орбиты*: $H = \frac{1}{2} \bar{H}$. Если это

условие окажется нарушенным, то радиус электронной орбиты не будет оставаться постоянным при возрастании скорости электрона.

Чтобы при случайном отклонении электрона от стабильной орбиты наружу, он был возвращен силами поля на стабильную орбиту и чтобы при случайном отклонении внутрь электрон вследствие инерции движения также возвращался на стабильную орбиту, радиальное распределение напряженности магнитного поля должно убывать с удалением от центра орбиты медленнее, чем центростремительная сила, т. е. медленнее, чем $\frac{1}{r}$. Кроме того, магнитные силовые линии, пересекающие стабильную орбиту

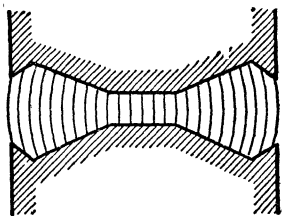


Рис. 385. Поле электромагнита бетатрона.

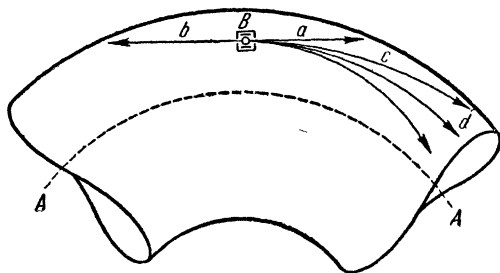


Рис. 386. Траектории электронов в бетатроне: AA — стабильная орбита.

электронов, должны быть несколько вогнуты к центру, чтобы при случайном отклонении электрона от плоскости, в которой расположена стабильная орбита, силы поля возвращали электрон к этой плоскости (аксиальная фокусировка).

Для одновременного выполнения двух указанных условий полюсным наконечникам электромагнита в бетатроне придают особую форму, установленную расчетом и экспериментами, приблизительно такую, какая показана в сечении на рис. 385.

Только небольшая доля всех электронов, вводимых в ускорительную камеру бетатрона, захватывается на стабильную орбиту. На рис. 386 представлена та часть ускорительной камеры, где расположена «электронная пушка» B; пунктиром AA показана стабильная орбита. Электроны выбрасываются пушкой в двух противоположных направлениях a и b. Если электроны, выброшенные в одном направлении, ускоряются в первую четверть периода изменения поля электромагнита, то электроны, выброшенные в противоположном направлении, ускоряются в третью четверть периода. В моменты, когда периодически изменяющийся магнитный поток проходит через нуль, электроны a, выбрасываемые пушкой, не испытывая отклонения, попадают на стенки камеры. При нарастании магнитного

поля траектория электронов s начинает отклоняться, но только тогда, когда отклонение траектории становится достаточно большим, электроны захватываются индуцированной электродвижущей силой на стабильную орбиту AA .

К концу процесса ускорения электроны выводятся со стабильной орбиты специальным импульсом напряжения, подаваемого в обмотки электромагнита.

После отработки первых моделей Керст построил бетатрон, ускорявший электроны немного более чем до 20 Мэв . В 1945 г. был построен бетатрон, дававший γ -фотоны тормозного излучения ускоренных электронов (при их падении на мишень) с энергией

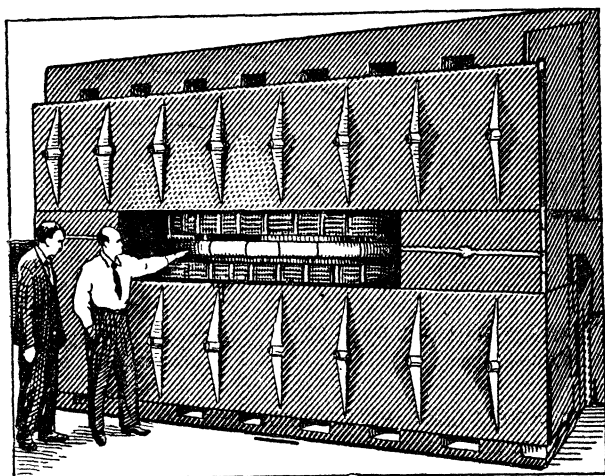


Рис. 387. Внешний вид бетатрона.

$h\nu = 100 \text{ Мэв}$. Этот бетатрон имел радиус стабильной орбиты около 1 м ; ускоряемые электроны проходили в нем путь около 1250 км . Магнит указанного бетатрона весил 130 т и потреблял мощность 200 квт . В 1950—1951 гг. имелись бетатроны уже на 300 Мэв (рис. 387).

Расчеты, проведенные Д. Д. Иваненко и И. Я. Померанчуком, показали, что при увеличении энергии до 500 Мэв потеря энергии электронами на излучение становится равной энергии, приобретаемой ими при движении по стабильной орбите. Однако, раньше чем будут достигнуты эти значения энергии, потери на излучение вызовут значительное сокращение радиуса стабильной орбиты, что уже нарушит нормальную работу бетатрона. Таким образом, максимальная энергия, до которой могут быть ускорены электроны в бетатроне, составляет примерно 500 Мэв .

Тормозное излучение электронов при больших энергиях имеет узко направленный характер и испускается преимущественно по направлению движения электронов (в пределах угла 2° при энергиях 100 Мэв). Оно становится видимым при энергии в несколько десятков мегаэлектронвольт.

§ 105. Синхротроны и синхрофазотроны

В связи с ограничением возможной мощности бетатрона, которое создается излучением электронов, более перспективным является аппарат, совмещающий принцип действия бетатрона с принципом действия циклотрона или, точнее, фазотрона (§ 103). Такие аппараты для ускорения электронов называют *синхротронами*, а аналогичные аппараты для ускорения ионов *синхрофазотронами*.

В начале каждого цикла синхротрон ускоряет электроны по принципу бетатрона, т. е. электрическим полем, которое индуцируется изменяющимся магнитным потоком. Но менее чем через тысячную долю секунды, когда электроны уже успевают набрать энергию порядка 2 Мэв и скорость их становится близкой к скорости света, бетатронный режим работы автоматически заменяется режимом ускорения электронов электрическим полем, которое создается высокочастотным генератором.

Ускорительная камера синхротрона имеет такую же тороидальную форму, как у бетатрона, и в ней, так же как и в камере бетатрона, поддерживается высокий вакуум. Камера эта помещена между кольцевыми полюсными наконечниками электромагнита (рис. 388), имеющими ширину порядка 10 см . Электромагнит, как и у бетатрона, питается переменным током. Внутри камеры имеются два близко расположенных друг к другу электрода, к которым подводится напряжение от высокочастотного генератора. Каждый раз (во второй части цикла), когда электроны проходят зазор между этими электродами, они ускоряются электрическим полем высокочастотного генератора.

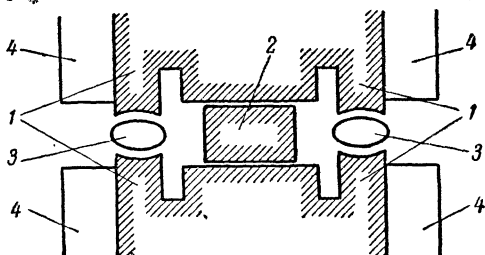


Рис. 388. Схема электромагнита синхротрона: 1 — полюсные наконечники кольцевой формы; 2 — сердечник; 3 — тороидальная ускорительная камера; 4 — обмотки электромагнита.

Но в начальной стадии ускорительного цикла коротковолновый генератор отключен от электродов. Начальный разгон электронов, поступающих в ускорительную камеру из электронной пушки (расположенной в камере синхротрона приблизительно так же, как в бетатроне), осуществляется, как уже упоминалось, электрическим