

Устойчивая работа циклотрона лимитируется, как уже было пояснено выше, возрастанием массы частиц при большом увеличении их скорости, что по уравнению (2) приводит к увеличению периода обращения и поэтому к нарушению резонанса с подводимым к дуантам напряжением. Если амплитуда подводимого напряжения  $V_0$  выражена в киловольтах, то, как показывают расчеты, максимальная энергия, которая может быть сообщена ионам в циклотроне, составляет

$$W_{\text{макс}} = 2,1 \sqrt{V_0 A Z},$$

где  $A$  — масса иона, выраженная в массах протона, и  $Z$  — заряд иона, выраженный в зарядах электрона. Таким образом, при  $V_0 = 100$  кВ циклотрон может дать протоны с энергией не более 21 Мэв и  $\alpha$ -частицы ( $A=4$ ,  $Z=2$ ) с энергией не более 60 Мэв.

Увеличение амплитуды  $V_0$  подводимого напряжения, как показал опыт сооружения и эксплуатации циклотронов, не дает большого выигрыша в энергии выбрасываемых частиц. Наибольшая энергия, до которой удалось ускорить при этом протоны, была получена (1954 г.) при  $V_0 = 410$  кВ и составляет 22 Мэв.

### § 103. Фазотроны

Как было пояснено в предыдущем параграфе, увеличение массы частиц при возрастании их скорости не позволяет в циклотронах сообщать ионам энергию больше нескольких десятков мегаэлектронвольт. Уже при энергии около 5 Мэв скорость протонов достигает  $\frac{1}{10}$  скорости света. Масса протона возрастает при этом всего на  $\frac{1}{2}$  %. Но, согласно формуле (2), этого оказывается достаточно, чтобы при каждом обороте протон отстал по фазе на  $2^\circ$  от переменного напряжения; в результате после нескольких десятков оборотов протон будет попадать в зазор между дуантами при противоположной фазе напряжения, т. е. электрическое поле будет тормозить его движение. Если к этому моменту энергия протона достигла 15—20 Мэв, то в дальнейшем она будет убывать и радиус спиральной траектории протона начнет уменьшаться.

Выход из этого принципиального затруднения (его называют «релятивистским») был найден в 1944 г., когда В. И. Векслер в СССР и независимо Мак-Миллан в США открыли явление *автофазировки* частиц в ускорителях. Если частица по каким-либо причинам пролетает между электродами, создающими переменное ускоряющее поле, в «неподходящий» момент времени (в «неподходящую» фазу изменения этого поля), то при последующих пролетах ситуация улучшается за счет автоматически возникающих ускорения или замедления частицы. Автофазировка имеет место при не слишком больших отклонениях фазы пролета от нормального значения.

Только благодаря использованию явления автофазировки стало возможным создание устойчиво работающих ускорителей релятивистских частиц, дающих достаточно мощные пучки. В фазотроне рост периода обращения частицы за счет роста ее массы с энергией согласно соотношению (2)

$$T = \frac{2\pi c}{eH} m$$

компенсируется ростом периода ускоряющего поля. С этой целью в цепь высокочастотного генератора вводят вращающийся конденсатор. Изменение его емкости изменяет частоту напряжения, подаваемого на ускоряющие электроды. Благодаря автофазировке период обращения частицы колеблется около значений периода изменяющегося ускоряющего поля.

Синхронизацию можно обеспечить и другим способом, т. е. *увеличивая напряженность магнитного поля  $H$*  (пропорционально возрастающей массе ионов) до тех пор, пока ускоряемая группа ионов не будет выведена из аппарата. При такой синхронизации частота подаваемого на дуанты напряжения может быть оставлена постоянной. По конструктивным соображениям предпочитают первый из указанных методов — изменение частоты при неизменности магнитного поля.

Чтобы получить протоны с энергией порядка 100 *Мэв*, пользуясь циклотроном, необходимо было бы повысить амплитуду напряжения, подводимого к дуантам, до 2½ млн. *в* (как это видно из соотношения, приведенного в конце предыдущего параграфа). Фазотрон позволяет получать протоны с энергией 100 *Мэв* при амплитуде высокочастотного напряжения всего 10—15 *кв*. Но фазотрон дает в десятки раз меньший ионный ток, чем циклотрон, так как в фазотроне ускоряется каждый раз (при каждом цикле изменения частоты) только небольшая группа ионов, а именно только те ионы, движение которых начинается в начале цикла изменения частоты (когда частота проходит через максимум); синхронизация, благоприятная в фазотроне для этой группы ионов, для других ионов, которые были бы ускорены циклотроном, оказывается уже неточной.

Конструктивно фазотроны были разработаны в 1947 г. Бробеком. Фазотрон, построенный в 1948 г. Калифорнийским университетом в Беркли, дает протоны с энергией порядка 300 *Мэв* и  $\alpha$ -частицы с энергией около 400 *Мэв*. Электромагнит этого фазотрона имеет полюсы диаметром 4,6 м (184 дюйма) и весит 4000 *т*. Фазотрон, построенный в Чикаго, дает протоны с энергией 440 *Мэв*. На дуанты этого 170-дюймового фазотрона подается переменное напряжение порядка 15 *кв* от высокочастотного генератора, который вследствие вращения конденсатора работает с частотой, изменяющейся для каждого ускорительного цикла от 29 до 17 *Мгц*; ускорительные циклы следуют один за другим по 60 раз в секунду.

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  $\alpha$ -частицами с энергией 840 Мэв. Бомбардировка мишеней пучками ускоренных

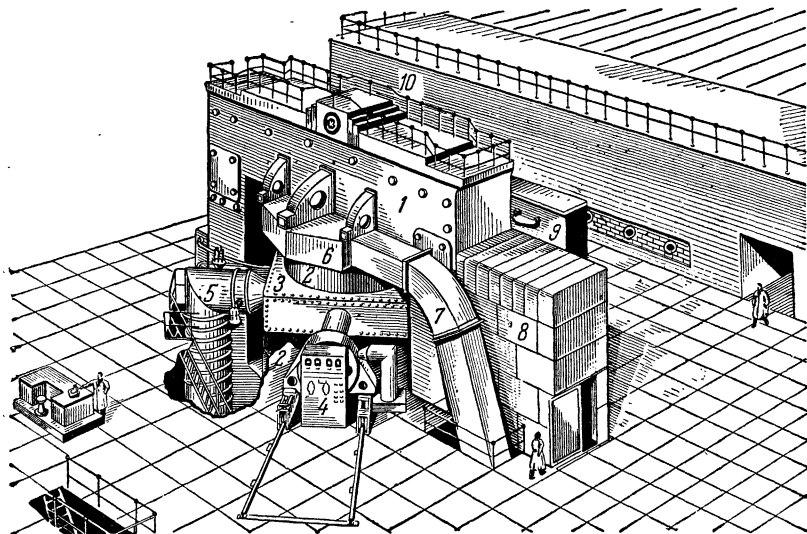


Рис. 384. Фазотрон ФИАН СССР:

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  $\pi$ -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-