

ГЛАВА XIV

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

§ 102. Циклотроны

В ядерной физике первостепенное значение имеют аппараты, ускоряющие заряженные частицы до больших энергий. Первый аппарат такого рода, получивший широкое применение, *циклотрон* был сконструирован в 1932 г. Лоуренсом. До изобретения циклотрона было построено несколько приборов (о них сказано в начале § 106), в которых ионы ускорялись в прямолинейном движении напряжением порядка миллиона и более вольт. В отличие от этого в циклотроне поле мощного магнита заставляет ионы двигаться по окружностям, точнее, *по виткам тесной спирали*, а для ускорения ионов *множественно используется одно и то же относительно невысокое напряжение* (в десятки киловольт), которое изменяется на противоположно направленное каждый раз, когда ион описывает полуокружность.

Ускорение ионов циклотроном происходит в цилиндрической камере между плоскими полюсами большого электромагнита, создающего поле напряженностью около 10 000 э на площади в 10—30 дм² в малых циклотронах и более 1 м² в больших циклотронах. Мощными насосами в камере циклотрона поддерживается вакуум в 10⁻⁵ мм Hg. Источником ионов служит дуга с накаливаемым катодом, горящая при давлении в 10⁻²—10⁻³ мм Hg в центре камеры в особой металлической коробке, стенки которой служат анодом дуги; ионы (водорода, тяжелого водорода или гелия) просачиваются через капиллярное отверстие в этой коробке и попадают в камеру циклотрона около ее центра. Ускорение ионов производится полем между двумя электродами, имеющими форму полого металлического цилиндра, разрезанного по одному из диаметров на две части; эти электроды называют *дуантами*. Напряжение подводится к ним от высоковольтного лампового генератора (рис. 382). Внутри дуантов электрического поля нет, и ионы движутся здесь только под действием магнитного поля, которое, отклоняя ионы, обеспечивает их движение по дуге окружности. Так как *ионы, проходя зазор между дуантами*, каждый раз ускоряются действующим здесь электрическим полем, то радиус дуг окружностей, по которым они дви-

жуются внутри дуантов, при каждом полуобороте несколько возрастает. Чтобы при каждом полуобороте иона переменное электрическое поле между дуантами всегда ускоряло, а не тормозило его движение, напряжение на дуантах должно изменяться на противоположное в такт с полуоборотами иона по виткам спирали. На первый взгляд может показаться, что такая синхронизация неосуществима, так как скорость ионов возрастает толчками (в зазоре между дуантами) и, казалось бы, должно уменьшаться время, в течение которого ион описывает полуокружность. Но дело в том, что при возрастании скорости иона увеличивается и радиус кривизны его траектории, а

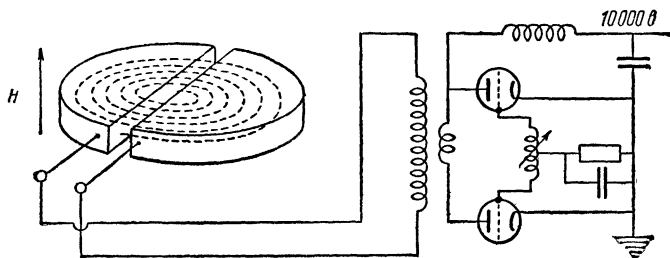


Рис. 382. Схема циклотрона.

стало быть, и длина дуги полуокружности; в результате оказывается, что время, в течение которого ион проходит половину витка описываемой им спирали, остается постоянным; точнее, оно остается независимым от скорости до тех пор, пока возрастание скорости не приведет к заметному увеличению массы иона. В этом нетрудно убедиться, рассмотрев уравнение, которым определяется радиус кривизны траектории иона, имеющего заряд e и массу m и движущегося со скоростью v в однородном магнитном поле H (т. II, § 67):

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e}{c} vH. \quad (1)$$

Из этого уравнения следует, что период T полного оборота иона равен

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi c}{eH} m, \quad (2)$$

т. е. явно не зависит от скорости; однако период пропорционален массе иона и, следовательно, начинает возрастать при достаточно больших скоростях движения.

В соответствии с соотношением (2) резонансная частота ν переменного напряжения, необходимая для осуществления синхронизации, определяется формулой

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{eH}{2\pi c m}.$$

Для протонов $\frac{e}{ct} = 9580$, и поэтому, если частота ν выражена в мегагерцах, а H — в эрстедах, то

$$\nu_{\text{Мгц}} = \frac{9580}{2\pi} \cdot 10^{-6} H = 1,525 \cdot 10^{-3} H, \quad (3)$$

т. е. при $H = 10\,000$ э на дуанты циклотрона для ускорения протонов должно подаваться переменное напряжение, имеющее частоту $15,25$ Мгц. При использовании того же циклотрона для ускорения дейтонов или альфа-частиц, для которых отношение $\frac{e}{ct}$ в 2 раза меньше, чем для протонов, резонансная частота напряжения уменьшается в 2 раза. Если бы тот же циклотрон мы захотели применить для ускорения электронов, для которых отношение $\frac{e}{ct}$ в 1837 раз больше, чем для протонов, то должны были бы повысить частоту переменного напряжения, подаваемого на дуанты, почти до $30\,000$ Мгц, т. е. должны были бы сочетать циклотрон с генератором сантиметровых волн. Это вряд ли осуществимо, а главное — неэффективно, так как уже при небольших энергиях, порядка сотых долей мегаэлектронвольта, возрастание массы электрона со скоростью совершенно нарушило бы согласованность периодов обращения (пропорциональных массе) с периодом подводимого напряжения. Для тяжелых частиц такая «расстройка» резонансного режима наступает при тех же скоростях, что и для электронов, а стало быть, при энергиях во столько раз больших, во сколько раз больше их масса.

Поскольку при каждом обороте по витку спиралевидной траектории ион дважды проходит ускоряющее поле зазора между дуантами, то после n оборотов энергия иона становится равной $2neV_0$, где V_0 — амплитуда ускоряющего напряжения. Выброс ионов производится через 50—100 оборотов, когда энергия иона достигает расчетной величины, обычно порядка 10 Мэв. Пучок ускоренных частиц выводится наружу через окошко полем особой «направляющей пластины», расположенной около этого окошка, герметизированного листком алюминиевой фольги, который легко пронизывается пучком ионов. В воздухе пучок ионов, выбрасываемых из циклотрона, создает светящуюся полосу, длина которой для дейтонов с энергией 15 Мэв превосходит полметра.

Итоговое ускорение, приобретаемое ионами в циклотроне, эквивалентно ускорению, создаваемому постоянным электрическим полем напряжения $V_{\text{эКВ}}$, которое определяется из соотношения $eV_{\text{эКВ}} = \frac{mv^2}{2}$, где v — скорость ионов на выходе из циклотрона. Если $V_{\text{эКВ}}$ выражено не в абсолютных электростатических едини-

цах, а в вольтах, то

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{e}{c} V_{\text{эКВ}} \cdot 10^8.$$

Подставляя сюда значение скорости v из (1):

$$v = \frac{e}{cm} Hr,$$

получаем:

$$V_{\text{эКВ}} = \frac{e}{cm} H^2 r^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 10^{-8} \text{ в.}$$

При $H=10\,000$ э и $r=50$ см находим для протонов, для которых отношение $\frac{e}{cm}$, как уже упоминалось, близко к 10 000:

$$V_{\text{эКВ}} = 10^4 \cdot (10^4)^2 \cdot \left(\frac{10^2}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 10^{-8} = 12,5 \text{ млн. в.}$$

Электрическое поле между дуантами не только ускоряет ионы, но и фокусирует их орбиты в центральной плоскости дуантов. На рис. 383 показано расположение эквипотенциальных поверхностей в зазоре между дуантами; это поле действует как цилиндрическая линза; в нем ион испытывает действие

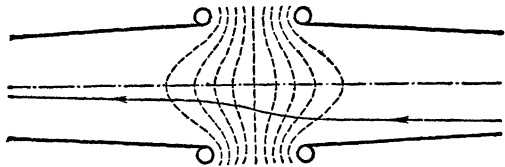


Рис. 383. Электрическое поле между дуантами.

сил, не только ускоряющих его движение, но и приближающих траекторию иона к центральной плоскости.

Циклотроны могут создавать на выходе значительные токи ускоряемых частиц порядка десятков и сотен микроампер. Такой ток соответствует выбросу 10^{14} — 10^{15} частиц в секунду. Циклотрон дает такой же поток альфа-частиц, какой испускается несколькими десятками килограммов чистого радия.

Для питания циклотронов средних размеров применяют коротковолновые генераторы мощностью 50—100 *квт*; в 2—3 раза большая мощность потребляется электромагнитом циклотрона. Отдаваемая мощность в пучке ускоренных ионов в лучшем случае немного превосходит 1—2% от расходуемой мощности (ионному току в 0,2 миллиампера при 15 мегавольт соответствует мощность 3 *квт*).

К 1940 г. самый большой циклотрон был построен в Калифорнийском университете в Беркли. Его электромагнит имеет диаметр 1,5 м и весит около 220 т. Он дает протоны с энергией 8 *Мэв*, дейтоны с энергией 16 *Мэв* и α -частицы с энергией 32 *Мэв*.

Циклотрон Вашингтонского университета дает дейтоны с энергией 21 *Мэв* и наружные пучки ионов в 125—250 *мка*.

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 α -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° 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.