

## ТЕМА 12. УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

### 12.1. Классификация ускорителей

### 12.2. Линейные ускорители

### 12.3. Циклические ускорители

#### 12.1. Классификация ускорителей

*Ускорителями* заряженных частиц называются устройства, в которых под действием электрических и магнитных полей создаются и управляются пучки высокоэнергетических заряженных частиц (электронов, протонов, мезонов и т.д.).

Любой ускоритель характеризуется типом ускоряемых частиц, разбросом частиц по энергиям и интенсивностью пучка. Ускорители подразделяются на *непрерывные* (равномерный во времени пучок) и *импульсные* (в них частицы ускоряются порциями – импульсами). Последние характеризуются длительностью импульса.

По форме траектории и механизму ускорения частиц ускорители делятся на *линейные*, *циклические* и *индукционные*. В линейных ускорителях траектории движения частиц близки к прямым линиям, в циклических и индукционных траекториями частиц являются окружности или спирали.

Рассмотрим некоторые типы ускорителей заряженных частиц.

#### 12.2. Линейные ускорители

1. *Линейный ускоритель*. Ускорение частиц осуществляется электростатическим полем, создаваемым, например, высоковольтным генератором Ван-де-Граафа. Заряженная частица проходит поле однократно: заряд  $q$ , проходя разность потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2$ , приобретает кинетическую энергию  $K = q(\varphi_1 - \varphi_2)$ . Таким способом частицы ускоряются до  $\approx 10$  МэВ. Их дальнейшее ускорение с помощью источников постоянного напряжения невозможно из-за утечки зарядов, пробоев и т.д.

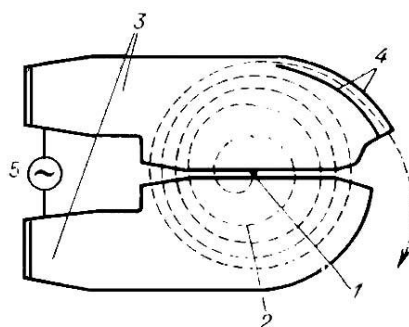
2. *Линейный резонансный ускоритель*. Ускорение заряженных частиц осуществляется переменным электрическим полем сверхвысокой частоты, синхронно изменяющимся с движением частиц. Таким способом протоны ускоряются до энергий порядка десятков мегаэлектронвольт, электроны – до десятков гигаэлектронвольт.



Общий вид линейного ускорителя на бегущей волне приведен на рисунке.

### 12.3. Циклические ускорители

1. *Циклотрон* – циклический резонансный ускоритель тяжелых частиц (протонов, ионов). Принципиальная схема циклотрона приведена на рисунке.



Между полюсами сильного электромагнита помещается вакуумная камера, в которой находятся два электрода в виде полых металлических полуцилиндров, или дуантов (3). К дуантам приложено переменное электрическое поле (5). Магнитное поле, создаваемое электромагнитом, однородно и перпендикулярно плоскости дуантов.

Если заряженную частицу ввести в центр зазора (1) между дуантами, то она, ускоряемая электрическим и отклоняемая магнитным полями, войдет в дуант и опишет полуокружность, радиус которой пропорционален скорости частицы. К моменту ее выхода из первого дуанта полярность напряжения изменяется (при соответствующем подборе изменения напряжения между дуантами), поэтому частица вновь ускоря-

ется и, переходя во второй дуант, описывает там полуокружность уже большего радиуса (2) и т.д.

Для непрерывного ускорения частицы в циклотроне необходимо выполнять условие синхронизма (условие «резонанса») – периоды вращения частицы в магнитном поле и колебаний электрического поля должны быть равны. При выполнении этого условия частица будет двигаться по раскручивающейся спирали, получая при каждом прохождении через зазор дополнительную энергию. На последнем витке, когда энергия частиц и радиус орбиты доведены до максимально допустимых значений, пучок частиц посредством отклоняющего электрического поля выводится из циклотрона (4).

В циклотронах заряженная частица с зарядом  $q$  и массой  $m$  ускоряется до скоростей, при которых релятивистский эффект увеличения массы частицы практически не проявляется. Период обращения частицы

$$T = \frac{2\pi m}{qB}.$$

Радиус траектории частицы

$$R = \frac{mv}{qB}.$$

Циклотроны позволяют ускорять протоны до энергий примерно 20 МэВ. Дальнейшее их ускорение в циклотроне *ограничивается релятивистским возрастанием массы со скоростью*, что приводит к увеличению периода обращения (он пропорционален массе) и синхронизм нарушается. Поэтому циклотрон совершенно неприменим для ускорения электронов (при  $E = 0,5$  МэВ,  $m = 2m_0$ , при  $E = 10$  МэВ  $m = 28m_0$ ).

Ускорение релятивистских частиц в циклических ускорителях можно, однако, осуществить, если применять предложенный в 1944 г. советским физиком В. И. Векслером (1907–1966) и в 1945 г. американским физиком Э. Мак-Милланом (1907–1991) **принцип автофазировки**. Его идея заключается в том, что для компенсации увеличения периода вращения частиц, ведущего к нарушению синхронизма, изменяют либо частоту ускоряющего электрического, либо индукцию магнитного полей, либо то и другое. Принцип автофазировки используется в фазотроне, синхротроне и синхрофазотроне.

2. **Микротрон** (электронный циклотрон) – циклический резонансный ускоритель, в котором, как и в циклотроне, и магнитное поле, и частота ускоряющего поля постоянны во времени, но резонансное условие в процессе ускорения всё же сохраняется за счёт изменения кратного-

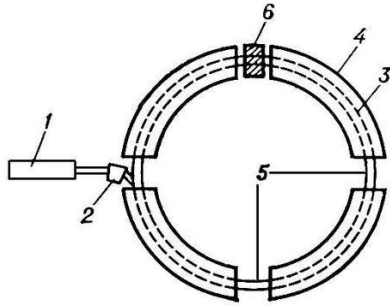
сти ускорения  $q$ . Частица обращается в микротроне в однородном магнитном поле, многократно проходя ускоряющий резонатор. В резонаторе она получает такой прирост энергии, что её период обращения изменяется на величину, равную или кратную периоду ускоряющего напряжения. Причем, если частица с самого начала вошла в резонанс с ускоряющим полем, этот резонанс сохраняется, несмотря на изменение периода обращения. В микротроне действует механизм автофазировки, так что частицы, близкие к равновесной орбите, также будут ускоряться.

Микротрон – ускоритель непрерывного действия, и способен давать токи порядка 100 мА, максимальная достигнутая энергия порядка 30 МэВ (Россия, Великобритания). Реализация больших энергий затруднительна из-за повышенных требований к точности магнитного поля, а существенное повышение тока ограничено электромагнитным излучением ускоряемых электронов.

Для длительного сохранения резонанса магнитное поле микротрона должно быть однородным. Такое поле не обладает фокусирующими свойствами по вертикали; соответствующая фокусировка производится электрическим полем резонатора. Предлагались варианты микротронов с меняющимся по азимуту магнитным полем (секторный микротрон), но сколько-нибудь значительного развития они пока не получили.

3. **Фазотрон** (синхроциклотрон) – циклический резонансный ускоритель тяжелых заряженных частиц (например, протонов, ионов,  $\alpha$ -частиц), в котором управляющее магнитное поле постоянно, а частота ускоряющего электрического поля медленно изменяется с периодом. Движение частиц в фазотроне, как и в циклотроне, происходит по раскручивающейся спирали. Частицы в фазотроне ускоряются до энергий примерно равных 1 ГэВ (ограничения здесь определяются размерами фазотрона, так как с ростом скорости частиц растет радиус их орбиты).

4. **Синхротрон** – циклический резонансный ускоритель ультрарелятивистских электронов, в котором управляющее магнитное поле изменяется во времени, а частота ускоряющего электрического поля постоянна. На рис. 4.3 схематически изображен синхротрон: 1 – инжектор электронов; 2 – поворотный магнит; 3 – пучок электронов; 4 – управляющий электромагнит; 5 – вакуумная тороидальная камера; 6 – ускоряющий промежуток.

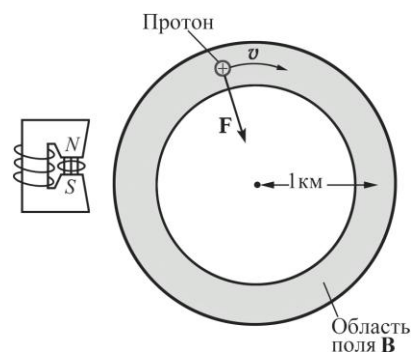


Внешний вид Томского синхротрона на 1,5 ГэВ представлен на рисунке. Электроны в разных синхротронах ускоряются до энергий 5 – 10 ГэВ.

5. **Синхрофазотрон** – циклический резонансный ускоритель тяжелых заряженных частиц (протонов, ионов), в котором объединяются свойства фазотрона и синхротрона. Здесь управляющее магнитное поле и частота ускоряющего электрического поля одновременно изменяются во времени так, чтобы радиус равновесной орбиты частиц оставался постоянным. На рисунке изображен Серпуховской синхрофазотрон У-70 на энергию 70 ГэВ.

Рассмотрим действие лоренцевой силы и рассчитаем энергию протонного ускорителя, представляющего собой кольцевой магнит диаметром 2 км. Между полюсами этого магнита расположена тороидальная вакуумная камера, в которую инжектирован пучок протонов. Если смотреть на ускоритель сверху (рис. 4.6), то пучок протонов движется по часовой стрелке со скоростью  $v$ , близкой к скорости света.

На протон действует центробежная сила, направленная к центру. Если поле  $\vec{B}$  направлено из плоскости чертежа, то сила Лоренца  $\vec{F} = [\vec{v}, \vec{B}]$  всегда направлена к центру.



Центробежная сила равна:

$$F_{\text{ц}} = m_r(v^2 / R),$$

где  $m_r$  – релятивистская масса протона. Так как эта сила обусловлена действием магнитного поля, она равна ( $e\upsilon B$ ). Тогда  $m_r v^2 / R = e\upsilon B$ .

Поскольку  $v \approx c$ , то можно записать  $m_r c^2 = ecBR$  – так можно рассчитать полную релятивистскую энергию протонов:

$$E = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 1,8 \cdot 10^3 = 8,64 \cdot 10^{-8} \text{ Дж} = 540 \text{ ГэВ}.$$

Заметим при этом, что магнитное поле не увеличивает скорость или энергию частиц. Ускорение протонов осуществляется при каждом их обороте в кольце за счет электростатического поля, которое действует на коротком участке кольца.

Планируется построить в г. Серпухове протонный синхрофазотрон на энергию примерно 3 000 ГэВ (диаметр установки примерно 6 000 м).

В фазотронах, микротронах, синхротронах и синхрофазотронах частицы ускоряются до релятивистских скоростей.

Масса частицы  $m$  зависит от ее скорости  $v$ :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

где  $m_0$  – масса покоя частицы;  $\beta = v/c$  – отношение скорости частицы  $v$  к скорости света  $c$  в вакууме.

Кинетическая энергия частицы  $K$ :  $K = W - W_0$ , где  $W = mc^2$  – полная энергия частицы;  $W_0 = m_0 c^2$  – энергия покоя частицы.

Импульс релятивистской частицы

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{K(K + 2m_0 c^2)}.$$

Период обращения релятивистской частицы

$$T = \frac{2\pi m_0}{qB\sqrt{1 - v^2 / c^2}} = \frac{2\pi W}{qBc^2}.$$

Радиус окружности траектории релятивистской частицы

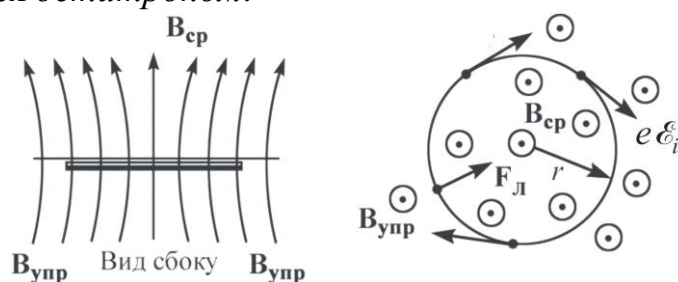
$$R = \frac{m_0 v}{qB\sqrt{1 - v^2 / c^2}}.$$

6. **Бетатрон** – единственный циклический ускоритель (электронов) нерезонансного типа, в котором ускорение осуществляется вихревым электрическим полем.

Электродвижущая сила индукции, создаваемая переменным магнитным полем, может существовать и в отсутствие проводников. Энергия  $K$ , передаваемая вихревым электрическим полем единичному положительному заряду, равна контурному интегралу по замкнутой траектории  $L$ :

$$K = \varepsilon = \oint_L (\vec{E} d\vec{l}) = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Согласно закону Фарадея, этот интеграл равен изменению магнитного потока через замкнутый контур  $L$ . Таким образом, вихревое электрическое поле может действовать на сгусток электронов,двигающихся в изменяющемся магнитном поле, и ускорять их. При определенных условиях движение электронов происходит в переменном магнитном поле по орбите постоянного радиуса и является устойчивым, причем энергия электронов увеличивается за счет вихревого электрического поля, создаваемого изменяющимся магнитным потоком, пронизывающим орбиту частиц. Циклический индукционный ускоритель электронов данного типа называется *бетатроном*.

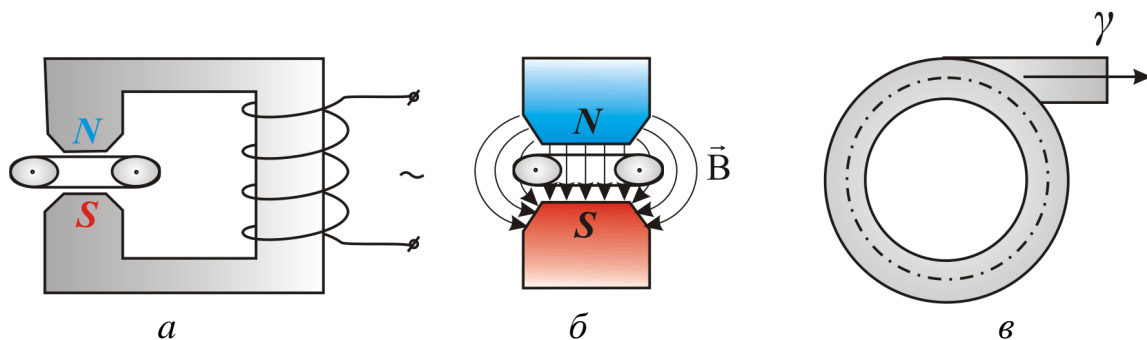


Как показано на рисунке, переменный центральный магнитный поток  $B_{cp}$  создает в бетатроне вихревую ЭДС индукции, ускоряющую электроны. В соответствии с законом сохранения энергии

$$\frac{mv^2}{2} = q\varepsilon_i,$$

при каждом обходе контура энергия электронов увеличивается на величину  $q\varepsilon$ .

Удержание электронов на стационарной круговой орбите осуществляется управляющим магнитным полем  $B_{ynp}$ , определенным образом, изменяющимся во времени.



Бетатрон (а) состоит из тороидальной вакуумной камеры

(рис. в), помещающейся между полюсами электромагнита специальной формы (рис. б). Обмотка электромагнита питается переменным током с частотой  $\nu \approx 100$  Гц.

Переменное магнитное поле выполняет две функции: во-первых, создает вихревое электрическое поле, ускоряющее электроны внутри тороида; во-вторых, удерживает электроны на орбите (силовые линии располагаются так, чтобы пучок электронов находился в состоянии устойчивого равновесия в центре тора).

За время порядка  $10^{-3}$  с электроны успевают сделать до  $10^6$  оборотов и приобрести энергию до 500 МэВ (сотни МэВ в разных ускорителях). При такой энергии скорость электронов близка к скорости света ( $v \approx c$ ).

Кроме того, сам же пучок электронов в данном случае выполняет роль вторичной обмотки трансформатора.

В конце цикла ускорения включается дополнительное магнитное поле, которое отклоняет электроны от стационарной орбиты и направляет их на специальную мишень, расположенную внутри камеры. Попадая на мишень, электроны тормозятся в ней и испускают жесткие  $\gamma$ -лучи или рентген, которые используются в ядерных исследованиях при неразрушающих методах контроля, в медицине и т.д.

Идея бетатрона запатентована в 1922 г. Дж. Слепяном. В 1928 г. Р. Видероз сформулировал условие существования равновесной орбиты – орбиты постоянного радиуса «условие 2:1». Первый действующий бетатрон был создан в 1940 г. Д. Керстом.

В СССР первые бетатроны были разработаны и созданы учеными Томского политехнического института (ныне университета): профессорами А.А. Воробьевым, Л.М. Ананьевым, В.И. Горбуновым, В.А. Москалевым, Б.Н. Родимовым. В последующие годы в институте интроскопии (НИИН при ТПУ) под руководством профессора В.Л. Чахлова, успешно разрабатываются и изготавливаются малогабаритные переносные бетатроны применяемые в медицине, дефектоскопии и других прикладных и научных исследованиях.

Благодаря простоте конструкции, дешевизне и удобству пользования бетатроны нашли особо широкое применение в прикладных целях в диапазоне энергии  $20 \div 50$  МэВ. Используется непосредственно сам электронный пучок или тормозное  $\gamma$ -излучение, энергия которого может плавно изменяться.



### 7. Большой адронный коллайдер (БАК).

В 2000 году физики из ЦЕРНа (европейский центр ядерных исследований), работающие на 27-километровом кольцевом Большом электрон-позитронном коллайдере LEP (Large Electron Positron Collider), обнародовали фотографии превращений элементарных частиц, которые вроде бы свидетельствовали о реальности хиггсовского бозона, однако последующие эксперименты доказали преждевременность этого вывода. В то время считалось, что масса этой частицы не превышает 96 Гэв, что лежало в пределах возможностей церновского коллайдера. В то же время теоретические расчеты показывают, что даже небольшое увеличение массы  $t$ -кварка должно весьма значительно повышать массу хиггсовского бозона. Коль скоро теперь этот кварк «потяжелел» с 175 до 178 Гэв, теоретически вычисленная масса бозона Хиггса оказывается не меньше 117 Гэв, но может составлять и 251 Гэв. Это означает, что бозон Хиггса невозможно получить ни на одном ныне действующем ускорителе, так что выводы европейских физиков и в самом деле приходится признать ошибочными. Однако не будем огорчаться – сейчас ЦЕРН строит более мощный ускоритель, LHC (Large Hadron Collider) – Большой адронный коллайдер. Его энергии должно хватить и для долгожданной поимки хиггсовского бозона – конечно, если его масса вновь не подскочит. Новый суперускоритель ЦЕРНа будет запущен в 2007 году, так что ждать осталось уже недолго.

