

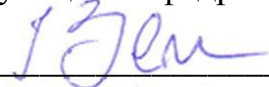
МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Институт высокоточных систем им. В.П. Грязева  
Кафедра «Стрелково-пушечное вооружение»

Утверждено на заседании кафедры  
«Стрелково-пушечное вооружение»  
« 18 » января 2022 г., протокол № 6

Заведующий кафедрой



В.К. Зеленко

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**по проведению практических (семинарских) занятий**  
**по дисциплине (модулю)**  
**«Ускорители заряженных частиц»**

**основной профессиональной образовательной программы**  
**высшего образования – программы магистратуры**

по направлению подготовки  
**15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение**  
**машиностроительных производств**

с направленностью (профилем)  
**Проектирование и конструирование механических частей физических**  
**установок**

Форма обучения: очная

Идентификационный номер образовательной программы: 150405-06-22

Тула 2022 год

## **Разработчик(и) методических указаний**

Патрикова Е.Н., доцент, канд. техн. наук, доцент  
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)

  
(подпись)

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

1. Внимательно прочитайте условия задачи. Сделайте сокращенную запись данных и искомых физических величин, предварительно представив их в интернациональной системе единиц (СИ).

СИ состоит из основных, дополнительных и производных единиц. Основными единицами являются: единица длины – метр (м); массы – килограммы (кг); времени – секунда (с); силы электрического тока – ампер (А); термодинамической температуры – кельвин (К); количества вещества – моль (моль); силы света – кандела (кд).

Дополнительные единицы: единица плоского угла – радиан (рад); единица телесного угла – стерadian (ср).

Производные единицы устанавливаются через другие единицы данной системы на основании физических законов, выражающих взаимосвязь между соответствующими величинами.

В условиях и при решении задач часто используются множители и приставки СИ для образования десятичных и дольных единиц.

2. Вникните в смысл задачи. Представьте физическое явление, о котором идет речь; введите упрощающие предположения, которые можно сделать при решении. Для этого необходимо использовать такие абстракции, как материальная точка, абсолютно твердое тело, луч света.

3. Если позволяет условие задачи, выполните схематический чертеж.

4. С помощью физических законов установите количественные связи между заданными и искомыми величинами, то есть составьте замкнутую систему уравнений, в которой число уравнений равнялось бы числу неизвестных.

5. Найдите решение полученной системы уравнений в виде алгоритма, отвечающего на вопрос задачи.

6. Проверьте правильность полученного решения, используя правило размерностей.

7. Подставьте в полученную формулу численные значения физических величин и проведите вычисления. Обратите внимание на точность численного ответа, которая не может быть больше точности исходных величин.

## 1. Множественные процессы

Один из наиболее плодотворных методов исследования природы взаимодействия элементарных частиц основан на проведении экспериментов, в которых изучают закономерность процессов рассеяния и рождения новых частиц. Чем выше энергия сталкивающихся частиц, тем больше удастся получить данных о взаимных превращениях и структуре частиц, на основе которых можно построить более совершенные теории и законы Природы.

***Так зачем-же нужны все более мощные ускорители?***

Из соотношений неопределенностей Гейзенберга  $\Delta r \Delta p \geq h$  следует, что для выявления деталей структуры порядка  $\Delta r$  нужно иметь зондирующие частицы с импульсом  $\Delta p > h/\Delta r$ .

Если принять  $\Delta p = E/c$ , то  $\Delta r = hc/E$ . Современные ускорители позволяют получать частицы с энергией до  $1000 \text{ ГэВ} \approx 10^{16} \text{ эВ}$ . Следовательно,  $\Delta r \approx (10^{-34} \cdot 10^8)/(10^{12} \cdot 10^{-19}) \approx 10^{-19} \text{ м}$

Таким образом с помощью современных методов исследования мы можем проникнуть вглубь структуры вещества до  $10^{-19} \text{ м}$ .

Различают ***три уровня микромира***:

1. **Молекулярно-атомный**  $E = 1 - 10 \text{ эВ}$   $\Delta r \approx 10^{-8} - 10^{-10} \text{ м}$ .
2. **Ядерный**  $E = 10^6 - 10^8 \text{ эВ}$   $\Delta r \approx 10^{-14} - 10^{-15} \text{ м}$ .
3. **Мельчайшие частицы**  $E > 10^8 \text{ эВ}$   $\Delta r < 10^{-15} \text{ м}$ .

При увеличении энергии сталкивающихся частиц открываются новые каналы, рождается большое число вторичных частиц. Сейчас основную часть наших знаний об элементарных частицах мы получаем в результате экспериментов по *множественному* рождению в столкновениях частиц высоких энергий, проводимых на гигантских ускорителях. По этой причине ведущие страны мира сооружают ускорители – дорогостоящие установки для получения частиц с энергиями  $E \gg mc^2$ .

## 2. Классификация ускорителей

**Ускорителями** заряженных частиц называются устройства, в которых под действием электрических и магнитных полей создаются и управляются пучки высокоэнергетичных 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.

### 3. Линейные ускорители

**1. Линейный ускоритель.** Ускорение частиц осуществляется электростатическим полем, создаваемым, высоковольтным генератором (рис.1). 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.

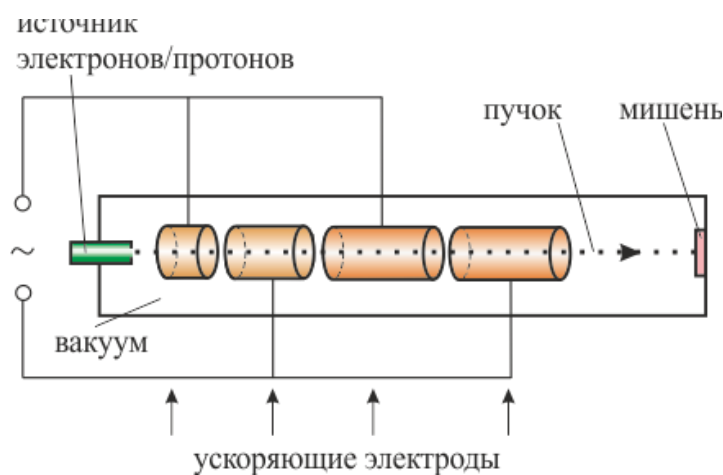


Рис.1

**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 2. Заряженные частицы многократно проходят ускоряющий промежуток в двух резонаторах изображенных на рисунке.



*Рис. 2*

**3. Линейный коллайдер.** В 1966 г. в Станфордском ускорительном центре был построен самый большой линейный ускоритель электронов длиной 3.2 км, имеющий на выходе энергию 23ГэВ. Через 20 лет на базе старого ускорителя началось осуществление нового проекта – создание в мире первого линейного коллайдера SLC. Начиная с весны 1987 г., в течение двух лет, усилиями тысячного коллектива центра были разрешены многочисленный физико-технические проблемы и запущены параллельные пучки электронов и позитронов с энергиями по 50ГэВ. На выходе пучки отклоняются в две большие дуги, и производится встречное столкновение. Этот ускоритель эквивалентен ускорителю с одним пучком энергией  $T_{L0} \sim 10$  ТэВ.

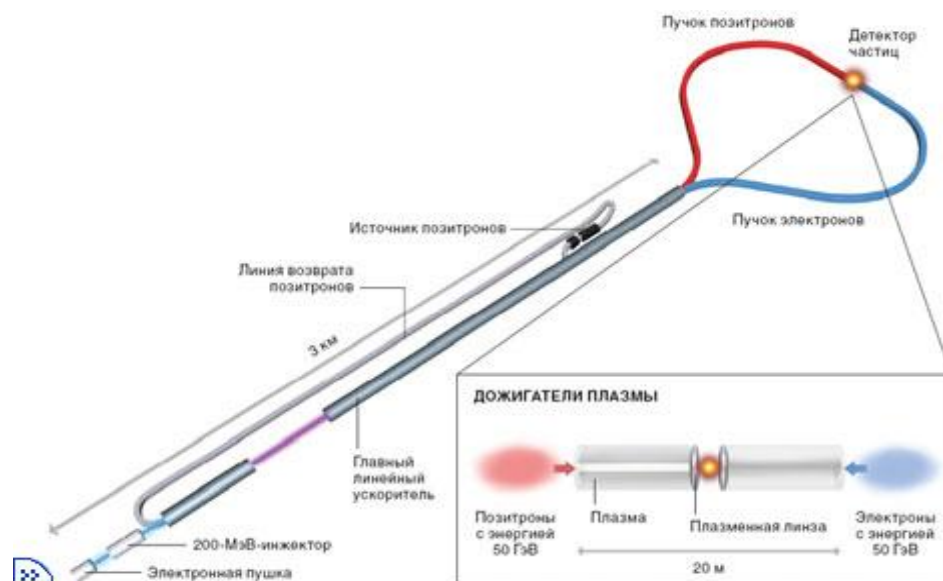


Рис.3

11 апреля 1989 г. детектор обнаружил первую  $Z^0$ -частицу массой 91,2 ГэВ – переносчика электрослабого взаимодействия, которая «согласно» теории трансформировалась в два ливня адронов. В 1990г. на SLC установлен 4000 тонный детектор, позволяющей с высокой точностью исследовать каждый трек частиц.

## 4. Циклические ускорители

**1. 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  $L$ :

$$K = \mathcal{E} = \oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

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, соз-

даваемого изменяющимся магнитным потоком, пронизывающим орбиту частиц (рис. 4). Циклический индукционный ускоритель электронов данного типа называется *бетатроном*.

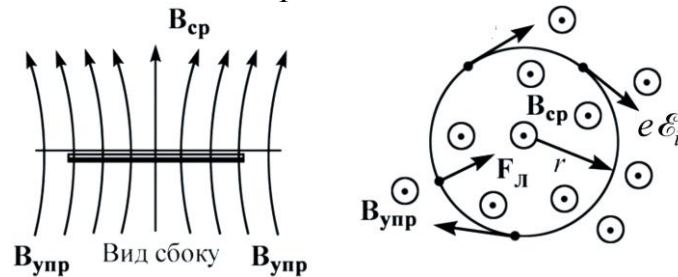


Рис. 4

Как показано на рисунке 4.7, переменный центральный магнитный поток  $B_{cp}$  создает в бетатроне вихревую ЭДС индукции, ускоряющую электроны. В соответствии с выражением (3.4.5)

$$\frac{mv^2}{2} = q\mathcal{E}_i$$

при каждом обходе контура энергия электронов увеличивается на величину  $q\mathcal{E}_i$ .

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

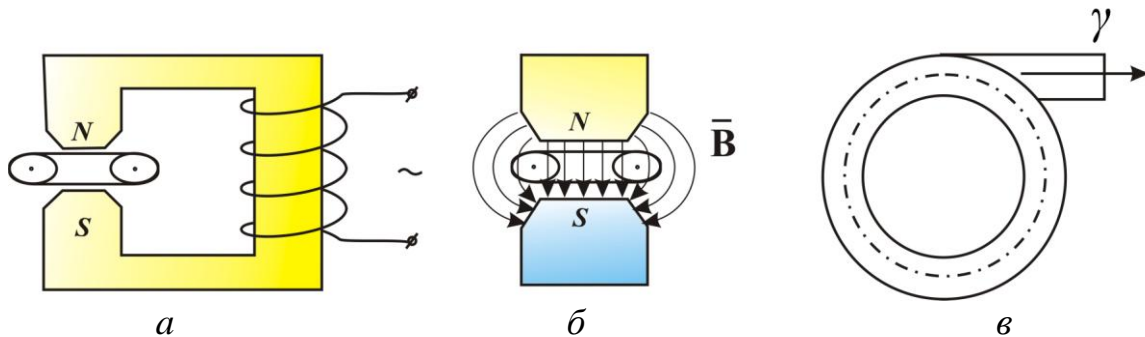


Рис. 5

Бетатрон (рис. 5, а) состоит из тороидальной вакуумной камеры (рис. 4.8 в), помещающейся между полюсами электромагнита специальной формы (рис. 5 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 пучек 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 (рис.6).

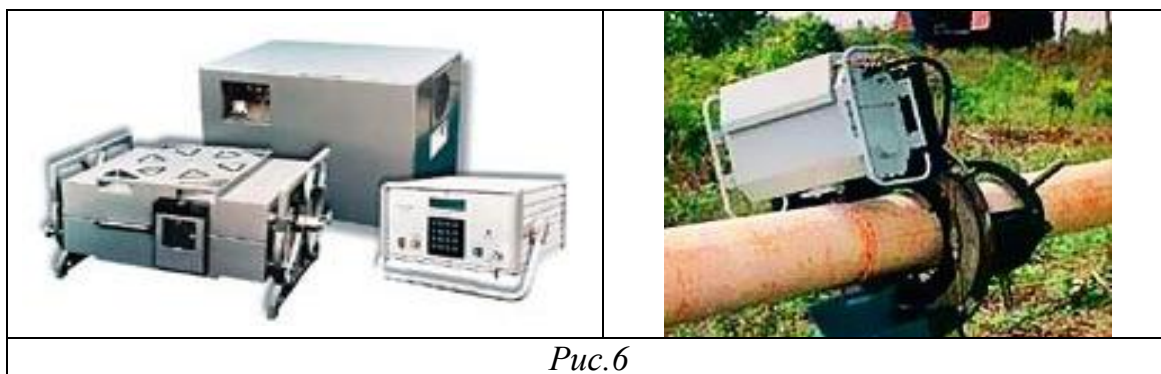
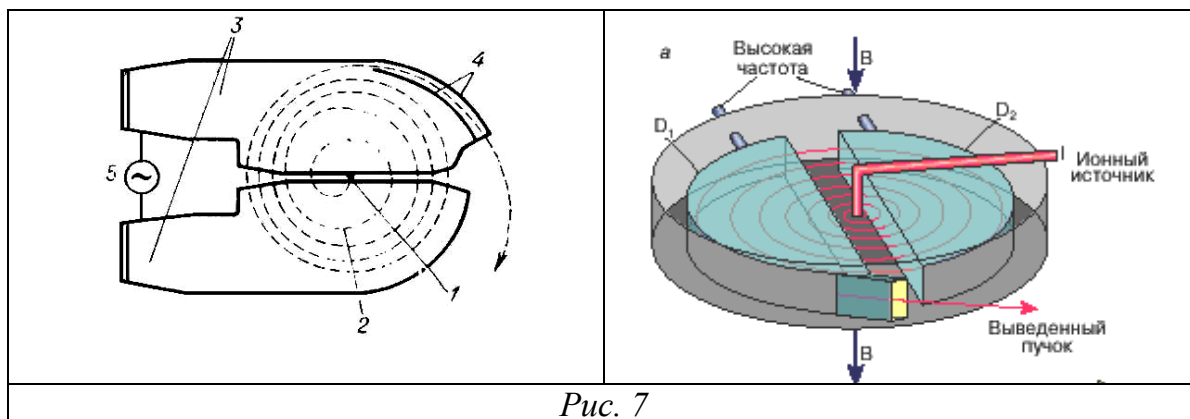


Рис.6

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.

**2. Циклотрон** – циклический резонансный ускоритель тяжелых частиц (протонов, ионов). В 1929г. американский физик Э. Лоуренс предложил идею такого ускорителя.

Принципиальная схема циклотрона приведена на рисунке 7.



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 ускоряется 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  $m = 28m_0$ ).

В циклотроне частицы начинают движения из центра камеры. Генератор работает на фиксированной частоте  $\omega_e = qB/m$ . Поскольку при каждом прохождении зазора кинетическая энергия частицы растет, то согласно увеличивается радиус орбиты  $R = p/qB$ .

Причина ограничения энергии протонов в циклотроне в том, что с ростом энергии уменьшается частотой обращения  $\omega$ . Вследствие этого нарушается условия резонансного ускорения

$$\omega_e = \omega = \frac{qBc^2}{mc^2 + E}.$$

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.

**3. 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 кратности ускорения  $q$ . Частица вращается 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 уско-

ряющим полем, этот резонанс сохраняется, несмотря на изменение периода обращения. В микротроне действует механизм автофазировки, так что частицы, близкие к равновесной орбите, также будут ускоряться.

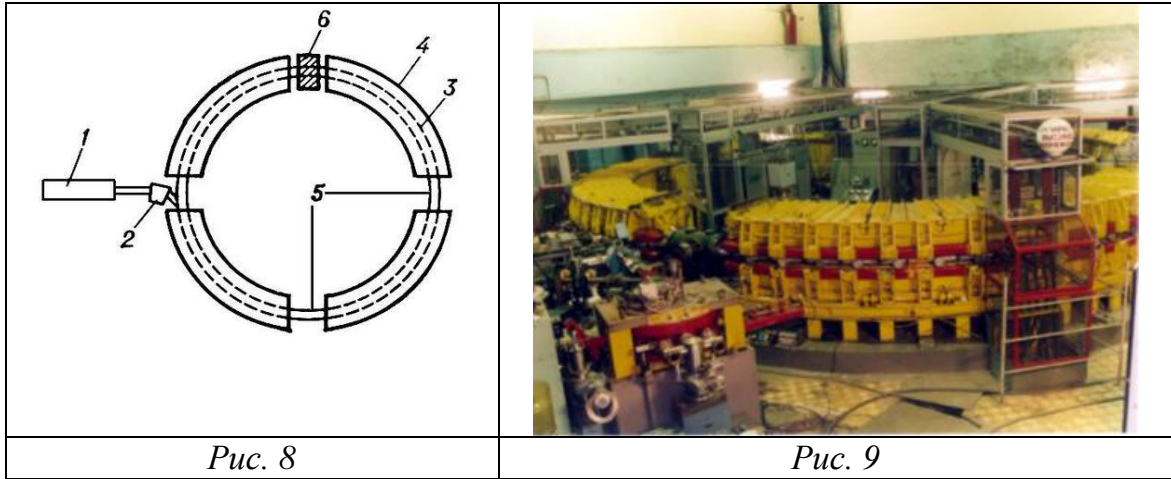
Микротрон – ускоритель непрерывного действия, способен давать токи порядка 100 мА, максимальная достигнутая энергия – порядка 30 МэВ (Россия, Великобритания). Реализация больших энергий затруднительна из-за повышенных требований к точности магнитного поля, а существенное повышение тока ограничено электромагнитным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

**4. 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, т.к. с ростом скорости частиц растет радиус их орбиты).

**5. Электронный синхротрон** – циклический резонансный ускоритель ультрарелятивистских электронов, в котором управляющее магнитное поле изменяется во времени, а частота ускоряющего электрического поля постоянна. На рисунке 8 схематически изображен синхротрон: 1 – инжектор электронов; 2 – поворотный магнит; 3 – пучек электронов; 4 – управляющий электромагнит; 5 – вакуумная тороидальная камера; 6 – ускоряющий промежуток.

Первый ускоритель такого типа с энергией электронов 300 МэВ, построенный в 1947 г. Внешний вид Томского синхротрона на 1,5 ГэВ представлен на рисунке 9.



Электроны в синхротроне вначале ускоряются до энергий 2 – 4 МэВ, при которых их скорость практически равна скорости света. Затем включается высокочастотное напряжение и в ускоряющем промежутке происходит дальнейшее ускорение на орбите постоянного радиуса  $R$ . Поэтому магнитное поле создается только в окрестности узкой кольцевой дорожки в вакуумной камере, имеющей форму тора. Поскольку частота  $\nu = \omega R \sim c$ , то частота генератора должна быть постоянной и равна частоте обращения электронов  $\omega_e = c / R$ :

$$\frac{c}{R} = \frac{eB_z c^2}{mc^2 + E}.$$

Следовательно, приращение энергии должно удовлетворять уравнению

$$\frac{dE}{dt} = e_0 c R \frac{dB_z}{dt}.$$

Таким образом, необходимое приращение энергии в ускоряющем промежутке за время одного оборота  $\Delta t = 2\pi / \omega_e$  определяется скоростью нарастания индукции магнитного поля:

$$\Delta E = \frac{dE}{dt} \Delta t = 2\pi e_0 R^2 \frac{dB_z}{dt}.$$

Следовательно, для выполнения условия синхронизации электрон на каждом обороте должен ускоряться равновесной разностью потенциалов

$$V_p = \frac{\Delta E}{e_0}, \quad V_p = 2\pi R^2 \frac{dB_z}{dt}.$$

Потери энергии на излучение автоматически компенсируются изменением равновесной фазы ускоряющего электрического поля. Труд-

ности создания мощных ускоряющих устройств, компенсирующих потери на излучение, ограничивают предельные достижимые энергии.

Синхротрон является редким примером ускорителей, в которых за короткое время были достигнуты максимальные энергии 5 – 10 ГэВ. В 1964 г. был запущен самый большой в Европе синхротрон лаборатории *DESY* (*Deutsches Elektronen Synchrotron, Гамбург*) с максимальной энергией пучка электронов 7,5 ГэВ.

**5. Синхрофазотрон** – это наиболее современный циклический резонансный ускоритель протонов, позволяющий получить энергии в несколько тысяч ГэВ. В синхрофазотроне принцип автофазировки достигает своего наивысшего развития. Здесь комбинируются технические особенности синхротрона и фазотрона. Для сохранения постоянства радиуса индукция магнитного поля возрастает по мере нарастания энергии. Протон ускоряется в одном или нескольких промежутках, расположенных на орбите. Однако в отличие от электронов, для которых скорость близка к скорости света уже при небольшой энергии ( $v=0,98c$  при  $E=2$  МэВ) и частота обращения практически постоянна, скорость протонов становится постоянной лишь при гораздо больших значениях энергии ( $v = 0,98c$  при  $E=4$  ГэВ). Поэтому в процессе ускорения скорость и частота обращения протонов возрастают. Следовательно, для сохранения резонанса частота ускоряющего поля должна быть связана с законом нарастания индукции магнитного поля соотношением:

$$\omega_e = \frac{e c B}{\sqrt{(m c)^2 + (e B R)^2}}.$$

Первая машина такого типа – *космотрон* на 3 ГэВ (Буркхейвен, США) был запущен в 1952г. На синхрофазотроне с максимальной энергией протонов 6,3 ГэВ, получившим название беватрон (Беркли, США), был открыт антипротон (Нобелевская премия, 1955г.) и антинейтрон (1956г.). В 1965г. было получено первое антиядро-антидейтрон-связанное состояние антинейтрона и антипротона.

На синхрофазотроне в Серпухове (рис. 10) с максимальной энергией протонов 76 ГэВ, запущенном в 1967г., открыты ядра антигелия-3 (1969 г.) и антитрития (1974г.).

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. 11), то пучок протонов движется по часовой стрелке со скоростью  $v$ , близкой к скорости света.

На протон действует центростремительная 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.



Рис. 10

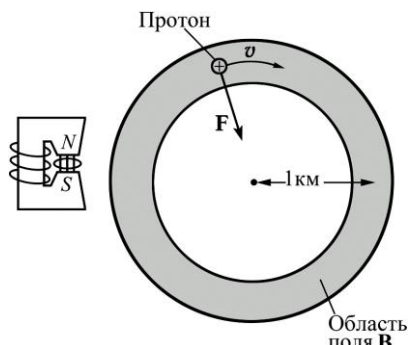


Рис. 11

Центростремительная сила равна

$$F_{ц} = m_r (v^2 / R),$$

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

Поскольку  $v \approx c$ , то можно записать, что  $m_r c^2 = e c B R$  – 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

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{K(K + 2m_0c^2)}.$$

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

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

### **Жесткая фокусировка**

Дальнейшее увеличение энергии связано с применением новых методов фокусировки частиц. Для того, чтобы достичь энергии, скажем 10 ГэВ, протон совершает 4,5 млн оборотов, проходя путь в 2,5 раза больший, чем расстояние от Земли до Луны. Поэтому необходимо обеспечить такую устойчивость пучка, чтобы небольшие отклонения от равновесия орбиты не приводили бы к потере частиц.

В 1950 г. греком Н. Кристофилосом и независимо в 1952г. американцами Е. Курантом, М. Ливингстоном и Г. Снайдером был открыт новый тип магнитной фокусировки, получивший название **сильной или жесткой фокусировки**. Они предложили собрать магнит в виде периодически чередующихся секторов, каждый из которых фокусирует частицы по одной поперечной к скорости координате и дефокусирует по другой. В результате возникает эффективная фокусировка по радиальному и вертикальному направлениям. Значительно сокращается стоимость магнита и системы питания. Именно это открытие сделало возможным создание синхрофазотронов на сверхбольшие энергии.

Устойчивость такого типа можно пояснить примером из оптики: оптическая система, состоящая из рассеивающей и собирающей линз эквивалентна собирающей линзе.

## **5. Ускорители на встречных пучках**

Рассмотрим столкновении частиц равных масс  $m_1 = m_2 = m_0$ . Пусть кинетическая энергия первой частицы, взаимодействующей с неподвижной мишенью равна  $E_k$ . Полная энергия частиц *в системе центра масс* равна  $\sqrt{(2m_0c^2)^2 + 2m_0c^2E_k}$ . В ускорителе на встречных пучках кинетическая энергия каждой частицы равна  $E_0$ . В этом случае полная



энергия частиц равна  $2(m_0c^2 + E_0)$ . Приравнивая полные энергии частиц, получим уравнение:

$$2(m_0c^2 + E_0) = \sqrt{(2m_0c^2)^2 + 2m_0c^2 E_k}.$$

Отсюда получим, что когда  $E_0 \gg mc^2$ , имеем существенное увеличение энергии взаимодействия встречных частиц:  $E_k = 2E_0^2 / mc^2 \gg 4E_0$ .

Самый большой синхрофазотрон – «Тэватрон» Фермиевской национальной ускорительной лаборатории в Батавии (США) разгоняет встречных пучков протонов и антипротонов до энергии  $T_0 = 1 \text{ ТэВ}$  ( $1 \text{ ТэВ} = 10^{12} \text{ эВ}$ ). Поскольку масса протона  $m_p = 938,2796 \text{ МэВ}/c^2$ , то этот ускоритель эквивалентен обычному с энергией одного пучка  $T_{L0} \sim 10^3 \text{ ТэВ}$ .

## 6. Накопительные кольца.

Ускорители на встречных пучках имеют накопительные кольца – вакуумные камеры, в которые поступает частицы из обычного ускорителя и ускоряются собственной электромагнитной системой. В 1982 г. было остановлено главное кольцо синхрофазотрона FNAL. Под ним смонтировали второе кольцо для антипротонов. В 1983 г. была достигнута энергия пучков 500 МэВ. Сейчас энергия пучков доведена до 1 ТэВ. Детектор фиксирует 120 тыс. столкновений за 1 сек. «Тэватрон» – один из самых мощных ускорителей в мире – призван внести ясность в актуальные проблемы физики элементарных частиц.

Сейчас на базе лаборатории ДЭЗИ работают протон-электронные накопительные кольца HERA – электронное кольцо и протонное кольцо. Энергия пучка электронов ограничена из-за потерь на синхротронное излучение, которые уже невозможно компенсировать. В этой уникальной установке использована самая совершенная в то время технология. Поперечник сфокусированного пучка, состоящего из 210 протонных бенчей длиной метр каждый равен примерно одной тысячной миллиметра. Участки кольца длиной 6.3 км составлены из 840 магнитных модулей длиной 12 и 14 метров, индукция поля  $B = 4,53 \text{ Тл}$  создается током силой 6000 А при температуре жидкого гелия. Ускорительные промежутки работают на частоте 52 МГц. 250 датчиков позволяют контролировать поведение пучка. На этой установке можно детально исследовать структуру протона и взаимодействие между электроном и кварком, поскольку электроны не участвуют в сильных цветовых взаимодействиях.

В 1995 г. на накопители антипротонов Европейской организации ядерных исследований вблизи Женевы были синтезированы первые антиатомы – антиводород. Это открытие позволило осуществить проверку основных принципов теории.

Сейчас обсуждается проект создания к 2011 г. крупнейшего комплекса пучков радиоактивных ионов в японском центре РИКЕН. Максимальная энергия ионов  $1 - 1,45$  ГэВ/нукл. Реализация проекта откроет принципиально новые возможности исследования в физике ядра, позволит предельно расширить семейство изучаемых ядер, формируя любые разрешенные природой комбинации нуклонов: ожидается получение до 2,5 тысяч новых изотопов ядер. Возможно, мы станем свидетелями рождения нового направления – астрофизики, исследующей проблемы синтеза элементов во Вселенной.

## 7. Большой адронный коллайдер

**Большой адронный коллайдер** (англ. *Large Hadron Collider, LHC*; сокр. БАК) ускоритель заряженных частиц на встречных пучках, предназначенный для разгона протонов и тяжёлых ионов (ионов свинца) и изучения продуктов их соударений. Коллайдер построен в научно-исследовательском центре Европейского совета ядерных исследований (фр. *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, CERN*), на границе Швейцарии и Франции, недалеко от Женевы. БАК является самой крупной экспериментальной установкой в мире. В строительстве и исследованиях участвовали и участвуют более 10 000 учёных и инженеров из более чем 100 стран (рис. 12).

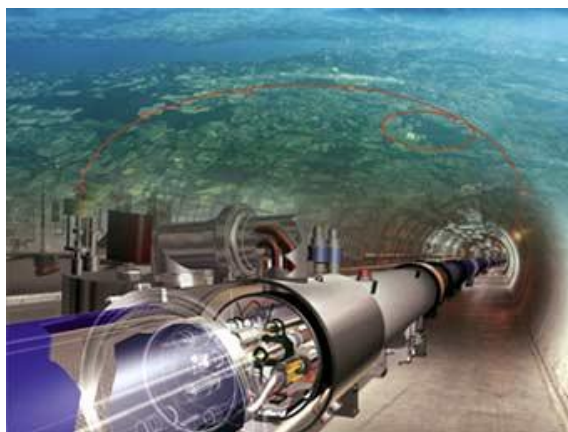


Рис. 12

Большим назван из-за своих размеров: длина основного кольца ускорителя составляет 26 659 м; адронным из-за того, что он ускоряет ад-

роны, то есть частицы, состоящие из кварков; коллайдером (англ. *collide* сталкиваться) из-за того, что пучки частиц ускоряются в противоположных направлениях и сталкиваются в специальных точках столкновения.

## Технические характеристики

В ускорителе предполагается сталкивать протоны с суммарной энергией 14 ТэВ (или  $14 \times 10^{12}$  электронвольт) в системе центра масс налетающих частиц, а также ядра свинца с энергией 5,5 ГэВ ( $5,5 \times 10^9$  электронвольт) на каждую пару сталкивающихся нуклонов (рис. 13).

В будущем, когда наладка оборудования будет завершена, БАК будет самым высокоэнергичным ускорителем элементарных частиц в мире, на порядок превосходя по энергии остальные коллайдеры, в том числе и релятивистский коллайдер тяжёлых ионов RHIC, работающий в Брукхейвенской лаборатории (США).

Светимость БАК во время первого пробега составит всего  $10^{29}$  частиц/см<sup>2</sup>·с. Это весьма скромная величина. Однако, после запуска БАК для экспериментальных исследований, светимость будет постепенно повышаться от начальной  $5 \times 10^{32}$  до номинальной  $1,7 \times 10^{34}$  частиц/см<sup>2</sup>·с, что по порядку величины соответствует светимостям современных В-фабрик BaBar(SLAC, США) и Belle(KEK, Япония). Выход на номинальную светимость планируется в 2011 году.

### Система ускорителей

Циркулирующие в коллайдере пучки протонов способны совершать более 10 тысяч оборотов в секунду, сталкиваясь на каждом круге со встречными пучками

### Основные экспериментальные зоны

Ожидается, что изучение продуктов соударения частиц в БАК даст ответы на важнейшие вопросы теоретической физики

### Общие характеристики

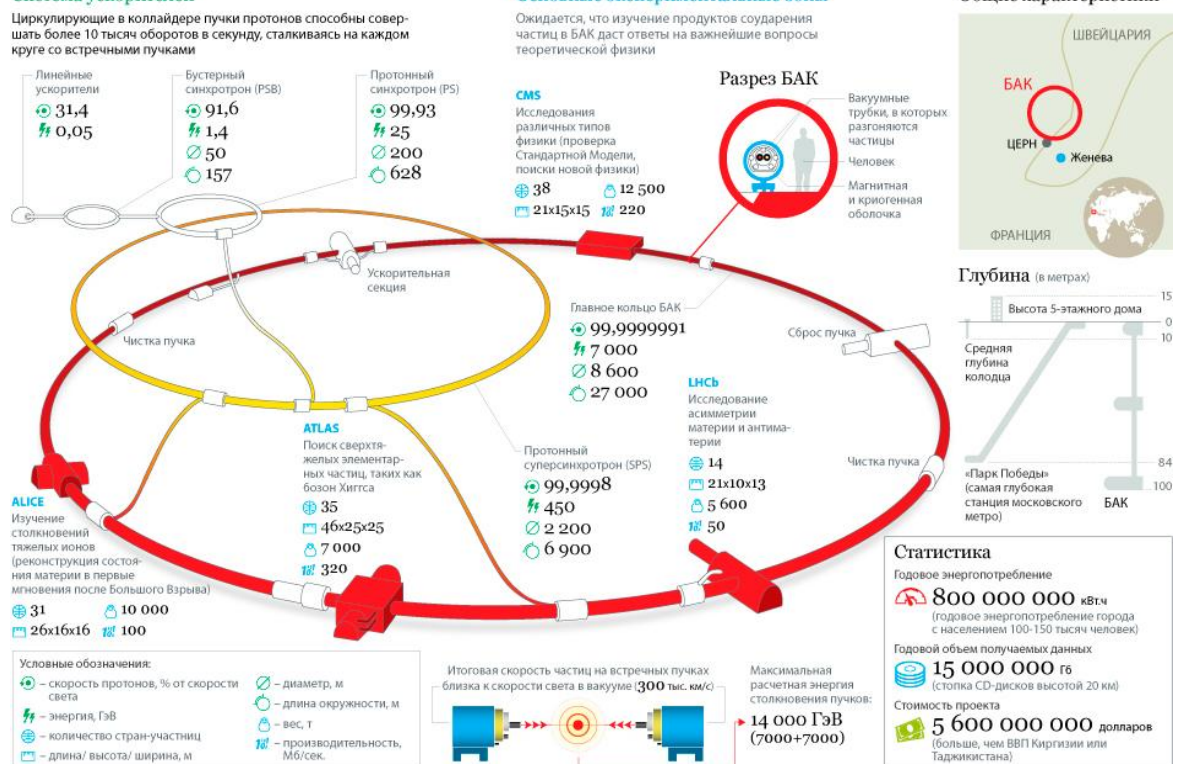


Рис. 13

Ускоритель расположен в том же туннеле, который прежде занимал большой электрон-позитронный коллайдер. Туннель с длиной окружности 26,7 км проложен под землёй на территории Франции и Швейцарии (рис. 14). Глубина залегания туннеля — от 50 до 175 метров, причём кольцо туннеля наклонено примерно на 1,4 % относительно поверхности земли.

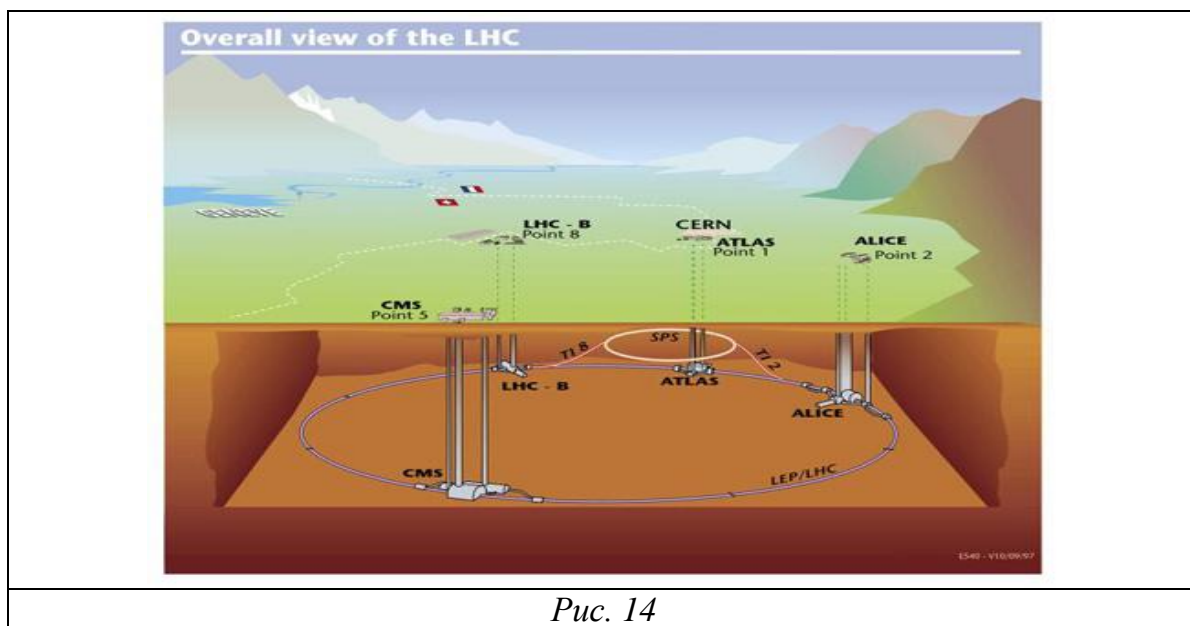


Рис. 14

### Система работы коллайдера

Атомы водорода поступают строго дозированными порциями в камеру *линейного ускорителя* (рис. 15), там от них отделяют электроны, оставляя только ядра водорода. Протоны несут положительный заряд, что позволяет придавать им ускорение при помощи электрического поля. Эту стадию разгона частиц в линейном ускорителе можно сравнить с *первой ступенью космической ракеты*. На выходе отсюда протоны будут двигаться со скоростью равной  $1/3$  скорости света. Теперь они готовы поступить в бустер или во *вторую ступень ракеты*.

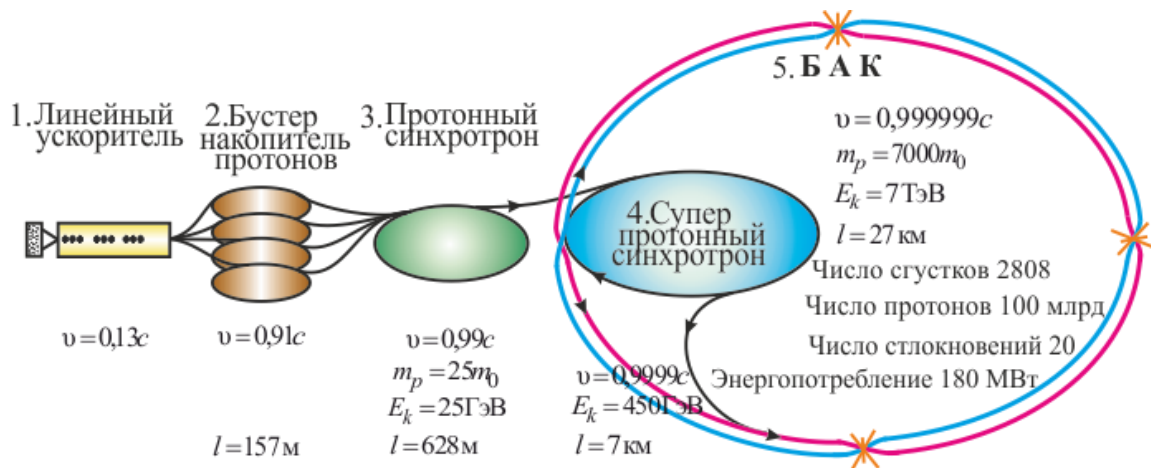


Рис. 15

Чтобы максимально повысить плотность потока частиц их разделяют на 4 части, каждая из которых поступает в отдельное кольцо **бустера** (накопителя). Линейное ускорение здесь уже не эффективно, поэтому применено движение по кругу длинной пути 157 метров. Чтобы придать частицам большую скорость, они проходят по кругу много раз, при этом на них воздействуют пульсирующим электрическим полем. Мощные магниты помогают придать частицам нужное направление и удерживать их на круговой траектории. **Кольцевой ускоритель** разгоняет протоны до 91,6 % скорости света, при этом собирает их в плотный пучок. После этого частицы из 4 колец собираются воедино и поступают в **протонный синхротрон** эта *третья ступень нашей ракеты*.

Протяженность синхротрона 628 метров это расстояние протоны проходят за 1,2 секунды, разгоняясь до 99.9 % скорости света. Именно здесь достигается точка перехода. К энергии движения частиц добавляется энергия электрического поля, но это не приводит к дальнейшему разгону, потому что частицы уже почти достигли максимально возможной скорости света. Но в результате такого воздействия увеличивается масса протонов, если говорить кратко, то протоны не могут ускоряться, а становятся тяжелее. На этой стадии энергия каждой частицы равняется 25 млрд. электронвольт при этом протоны становятся в 25 раз тяжелее чем в состоянии покоя.

Теперь начинается 4 стадия. **Протонный суперсинхротрон** – огромное 7-ми километровое кольцо. Его задача увеличить энергию протонов до 450 млрд. электрон-вольт.

Далее пучки протонов будут готовы к перемещению в **большой адронный коллайдер**. В нем проложены две вакуумные трубы, по ним в противоположных направлениях, движутся пучки протонов. При помощи специальных устройств новые порции протонов поступают в трубы так, чтобы не мешать движению уже загруженных туда пучков. По од-



ной трубе частицы движутся по часовой стрелки, а по другой против. Эти трубы пересекаются в четырех местах где установлены детекторы. Именно здесь протоны можно столкнуть друг с другом. Энергия столкновения в два раза превышает запас энергии каждого протона.

В течение получаса в коллайдер поступают около 2800 порций частиц. Все это время коллайдер придает дополнительную энергию частицамдвигающимся почти со скоростью света. Каждую секунду протоны проходят, 27 километровый круг более 11 тысяч раз постоянно получая, импульсы ускоряющего электрического поля. Энергия каждого протона уже составляет 7 ТэВ, а масса в семь тысяч раз больше нормальной.

Круговую траекторию, частицам придают при помощи магнитного поля. Оно настолько велико, что его электромагниты (рис. 16) должны выдерживать электроток силой двенадцать тысяч ампер, что достигается за счет охлаждения, в результате, которого магниты становятся сверхпроводящими.

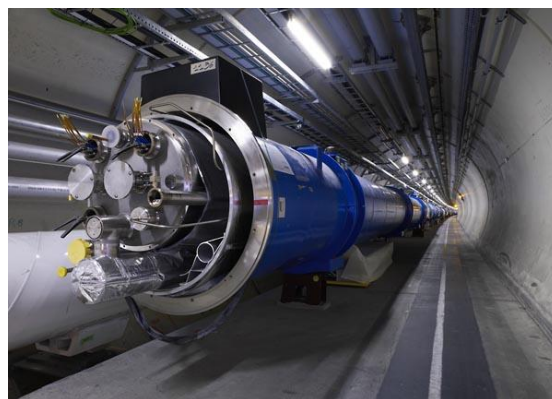
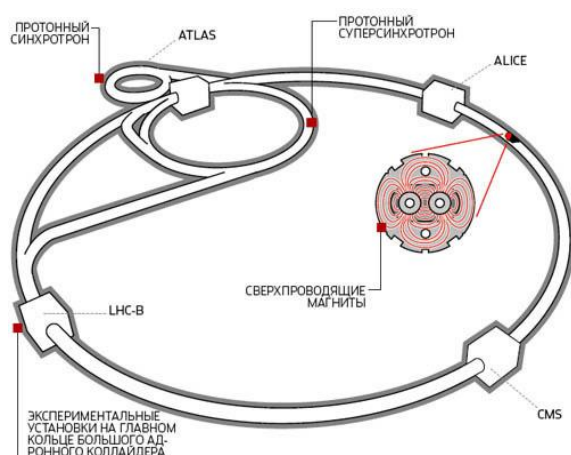


Рис. 16

Теперь протоны готовы к столкновению. Направляющий магнит обеспечивает необходимую для этого траекторию их движения. Общая энергия двух сталкивающихся протонов равна 14 ТэВ (рис. 17).

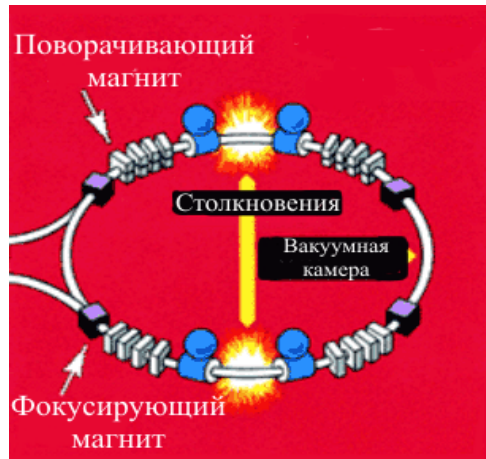
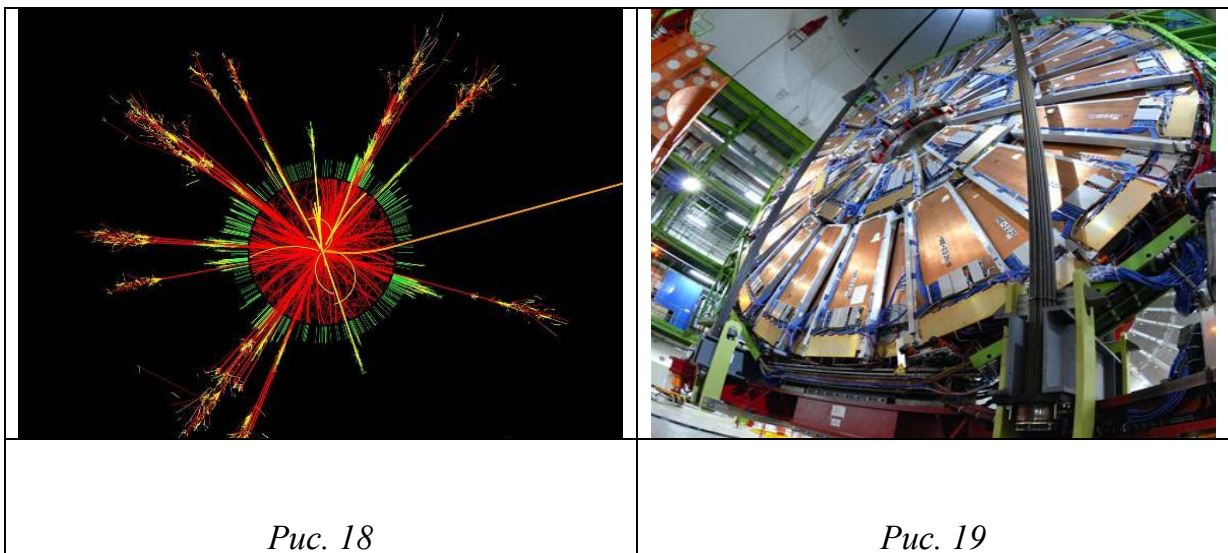


Рис 17

Всплеск от столкновения можно наблюдать в течение двух секунд. Траектории выделившихся в результате столкновения частиц (рис.18) анализируют компьютеры, к которым подключены **детекторы** (рис. 19).



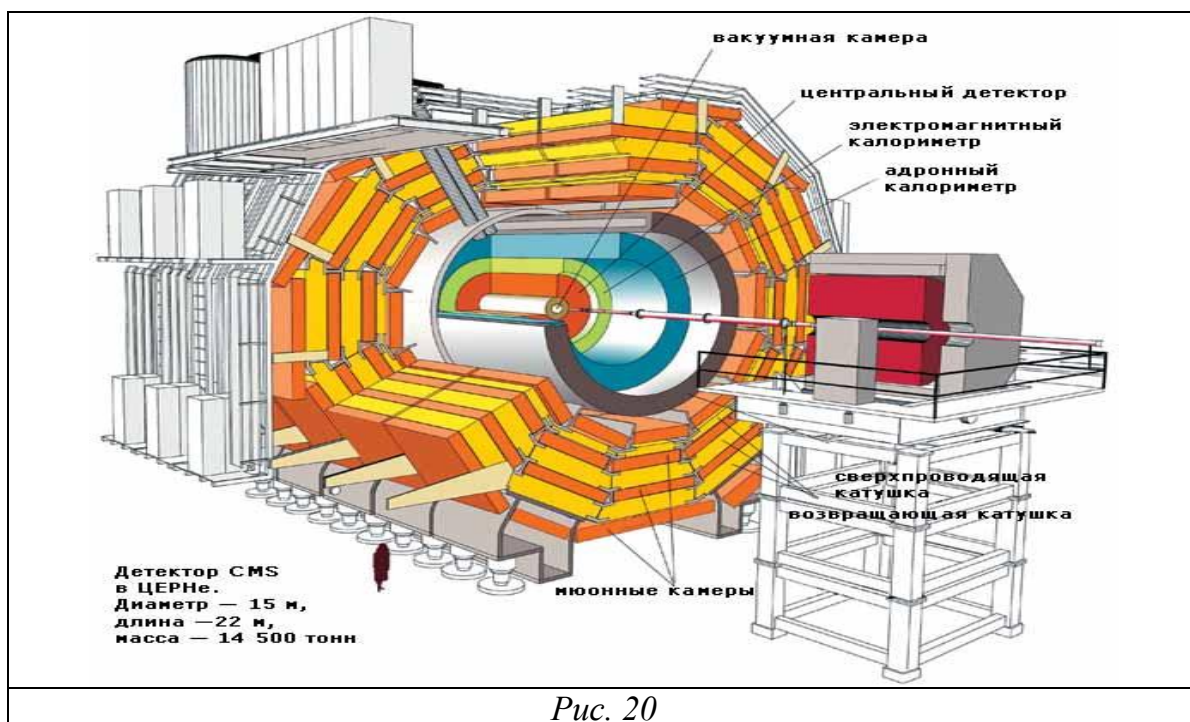


Рис. 20

Все это может помочь взглянуть на проблему возникновения нашей вселенной и понять, как она развивается, что происходит с ней сейчас и что ожидает ее в будущем.

## Поставленные задачи

В начале XX века в физике появились две основополагающие теории - общая теория относительности (ОТО) Альберта Эйнштейна, которая описывает Вселенную на макроуровне, и квантовая теория поля, которая описывает Вселенную на микроуровне. Проблема в том, что эти теории несовместимы друг с другом. Например, для адекватного описания происходящего в чёрных дырах нужны обе теории, а они вступают в противоречие.

Эйнштейн многие годы пытался разработать единую теорию поля, но безуспешно, поскольку игнорировал квантовую механику. В конце 1960-х физикам удалось разработать Стандартную модель (СМ), которая объединяет три из четырёх фундаментальных взаимодействий - сильное, слабое и электромагнитное. Гравитационное взаимодействие по-прежнему описывают в терминах ОТО. Таким образом, в настоящее время фундаментальные взаимодействия описываются двумя общепринятыми теориями: ОТО и СМ. Их объединения пока достичь не удалось из-за трудностей создания теории квантовой гравитации.



Для дальнейшего объединения фундаментальных взаимодействий в одной теории используются различные подходы: теория струн, получившая своё развитие в М-теории (теории бран), теория супергравитации, петлевая квантовая гравитация и др. Некоторые из них имеют внутренние проблемы, и ни у одной из них нет экспериментального подтверждения. Проблема в том, что для проведения соответствующих экспериментов нужны энергии, недостижимые на современных ускорителях заряженных частиц.

БАК позволит провести эксперименты, которые ранее было невозможно провести и, вероятно, подтвердит или опровергнет часть этих теорий. Так, существует целый спектр физических теорий с размерностями больше четырёх, которые предполагают существование «суперсимметрии» - например, теория струн, которую иногда называют теорией суперструн именно из-за того, что без суперсимметрии она утрачивает физический смысл. Подтверждение существования суперсимметрии, таким образом, будет косвенным подтверждением истинности этих теорий.

#### **Поставленные задачи**

- Изучение топ-кварков
- Изучение механизма электрослабой симметрии
- Изучение глюонной плазмы
- Поиск суперсимметрии
- Изучение фотон-адронных и фотон-фотонных столкновений
- Проверка экзотических теорий.

### **Планы на ближайшие несколько лет 2011 год**

Предполагается, что столкновения протонных пучков возобновятся в середине марта 2011 года и будут происходить на суммарной энергии 7 ТэВ до конца 2011 года. Вопреки предварительным планам, советом директоров ЦЕРНа 31 января 2011 года было принято решение продолжить работу коллайдера в 2012 году. Это, возможно, позволит открыть бозон Хиггса, а также набрать статистику, необходимую для других исследований. Также в 2012 году возможно повышение энергии пучков до 4 ТэВ, окончательное решение об этом ещё не принято.

### **2013 год и далее**

После окончания сеанса работы в 2012 году коллайдер будет закрыт на долговременный ремонт. Ремонт предположительно будет длиться не менее полутора лет и займёт весь 2013 год. После ремонта

ожидается повышение энергии протонов до проектной энергии в 7 ТэВ на пучок.

### **Планы развития:**

После того, как LHC выйдет на проектную энергию и светимость, планируется провести модернизацию каскада предварительных ускорителей, в первую очередь SPS, что позволит заметно повысить светимость коллайдера (проект Super-LHC)

Также обсуждается возможность проведения столкновений протонов и электронов (проект LHeC). Для этого потребуется пристроить линию ускорения электронов. Обсуждаются два варианта: пристройка линейного ускорителя электронов и размещение кольцевого ускорителя в том же тоннеле, что и LHC. Отмечается, что в отличие от протон-протонных столкновений, рассеяние электрона на протоне - это очень «чистый» процесс, позволяющий изучать *партонную* структуру протона намного внимательнее и аккуратнее.

Каким будет следующее поколение ускорителей? Удастся ли найти новые принципы увеличения темпа роста энергии?

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ. УПРАЖНЕНИЯ

1. Как будет двигаться заряженная частица, влетевшая в однородное магнитное поле, к вектору  $\vec{B}$  под углом  $\pi/2$  ?

2. Когда заряженная частица движется в магнитном поле по спирали? От чего зависит шаг спирали? Ответы подтвердите выводами формул.

3. Что такое ускорители заряженных частиц? Какие они бывают и чем характеризуются?

1. Почему для ускорения электронов не применяются циклотроны?

2. В чем заключается принцип автофазировки? Где он используется?

3. Чем отличается синхротрон от синхрофазотрона?

4. На какую величину увеличивается энергия электронов при каждом обходе контура в бетатроне.

5. Какая достигнута максимальная энергия протонов?

## МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Одна из возможностей значительного увеличения энергии соударяющихся частиц заключается в использовании встречных пучков этих частиц. Какую кинетическую энергию следовало бы сообщить протону, налетающему на покоящийся протон, чтобы их суммарная кинетическая энергия  $K_{\text{экв}}$  в системе центра инерции была бы такой же, как у двух протонов, движущихся навстречу друг другу с кинетическими энергиями  $K_1 = 10$  ГэВ?

**Дано:**

$$K_1 = 10 \text{ ГэВ}$$

$$W_0 = 0,938 \text{ ГэВ}$$

$$K_{\text{экв}} = ?$$

**Решение:** Если осуществить столкновение встречных пучков частиц, то эффект будет такой же, как при столкновении с неподвижным протоном с эквивалентной энергией  $K_{\text{экв}}$ .

По теории относительности связь полной энергии  $W$  с импульсом релятивистской частицы:

$$W^2 - p^2 c^2 = m_0^2 c^4, \quad (1)$$

учитывая, что масса покоя частицы  $m_0$  и скорость света  $c$  в вакууме не зависят от выбора инерциальной системы отсчета, следовательно, (1) можно записать:

$$\frac{W^2}{c^2} - p^2 = m_0^2 c^2 = \text{inv}, \quad (2)$$

т.е. разность квадрата полной энергии  $W$ , деленной на квадрат скорости света  $c$  в вакууме, и квадрат импульса этой частицы не зависят от выбора инерциальной системы отсчета.

Учитывая, что полная энергия  $W$  равна сумме кинетической энергии  $K$  и энергии покоя  $W_0$  частицы

$$W = K + W_0, \quad (3)$$

уравнение (2) в системе отсчета, связанной с центром инерции протонов, запишется

$$\frac{(K_{\text{экв}} + 2W_0)^2}{c^2} - p^2 = \frac{[2(K_1 + W_0)]^2}{c^2}, \quad (4)$$

где  $p$  – релятивистский импульс протона, налетающего на неподвижный протон

$$p^2 = \frac{K_{\text{экв}}(K_{\text{экв}} + 2W_0)}{c^2}. \quad (5)$$

Подставив правую часть (5) в (4), после преобразований получим

$$K_{\text{экв}} = \frac{2K_1(K_1 + 2W_0)}{W_0};$$

$$K_{\text{экв}} = \frac{2 \cdot 10(10 + 2 \cdot 0,938)}{0,938} = 250 \text{ ГэВ}.$$

Таким образом, способом встречных пучков теоретически можно получить энергию, в 25 раз превышающую кинетическую энергию движущихся протонов.

Ответ:  $K_{\text{экв}} = 250 \text{ ГэВ}$ .

2. Однократно ионизованный ион гелия  $\text{He}^+$  ускоряется в циклотроне так, что максимальный радиус кривизны его траектории  $R = 0,5$  м. Определите кинетическую энергию  $K$  ионов гелия в конце ускорения, если индукция магнитного поля внутри циклотрона  $B = 1$  Тл.

**Дано:**

$$R = 0,5 \text{ м}$$

$$B = 1 \text{ Тл}$$

$$m_0 = 6,4 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$K = ?$$

**Решение:** Кинетическая энергия ионов ( $K \propto$

$$m_0 c^2) \quad K = \frac{m_0 v^2}{2}; \quad (1)$$

радиус  $R$  кривизны траектории частицы в циклотроне

$$R = \frac{m_0 v}{qB}. \quad (2)$$

Решая систему (1), (2), получим искомое выражение в алгебраическом виде

$$K = (qBR)^2 / 2m_0.$$

Анализ полученной зависимости показывает, что для увеличения энергии заряженных частиц в циклотроне необходимо повышать индукцию магнитного поля и увеличивать радиус полюсов электромагнита.

Вычисляя, получим

$$K = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 0,5)^2}{2 \cdot 6,4 \cdot 10^{-27}} = 5 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = 3,125 \text{ МэВ}.$$

Ответ:  $K = 3,125 \text{ МэВ}$ .

**3.** Найти амплитудное значение  $U_0$  ускоряющего напряжения на дуантах циклотрона, при котором расстояние между соседними траекториями протонов с радиусом  $R = 0,6 \text{ м}$  равно  $\Delta R = 1 \text{ см}$ . Частота генератора циклотрона  $\nu = 10 \text{ МГц}$ .

**Дано:**

$$R = 0,6 \text{ м}$$

$$\Delta R = 10^{-2} \text{ м}$$

$$\nu = 10^7 \text{ Гц}$$

$$m_0 = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$U_0 = ?$$

**Решение:** Запишем скорость  $v_1$  протонов на траектории радиусом кривизны  $R_1 = R$

$$v_1 = 2\pi R\nu, \quad (1)$$

и скорость  $v_2$  протонов на траектории радиусом кривизны  $R_2 = R + \Delta R$

$$v_2 = 2\pi (R + \Delta R)\nu. \quad (2)$$

Кинетическая энергия  $\Delta K$ , которую получает протон за один период,

$$\Delta K = 2qU_0 = \frac{m_0 v_2^2}{2} - \frac{m_0 v_1^2}{2}. \quad (3)$$

Решая систему (1) – (3), получим

$$U_0 = \frac{\pi^2 \nu^2 m_0 (2R\Delta R + \Delta R^2)}{q}. \quad (4)$$

Учитывая, что  $(\Delta R \ll R)$ , выражение (4) можно упростить:

$$U_0 \approx \frac{2\pi^2 \nu^2 R \Delta R m_0}{q}.$$

Подставляя числовые значения, получим

$$U_0 = \frac{2 \cdot 3,14^2 \cdot 0,6 \cdot 10^{-2} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,2 \cdot 10^5 \text{ В}.$$

Ответ:  $U_0 = 0,12 \text{ МВ}$ .

**4.** Кинетическая энергия  $K$  протонов в Серпуховском синхрофазотроне достигает  $76 \text{ ГэВ}$ . Вычислите, пренебрегая действием вихревого электрического поля, максимальный импульс протона и максимальный радиус его орбиты, если индукция магнитного поля  $B$  в синхрофазотроне равна  $1,07 \text{ Тл}$ .

**Дано:**

$$K = 76 \text{ ГэВ} = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}$$

$$m_0 = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$W_0 = 0,938 \text{ ГэВ} = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}$$

**Решение:** Кинетическая энергия  $K$  протона больше энергии покоя  $W_0 = m_0 c^2$ , следовательно, необходимо учитывать релятивистские эффекты.

Из соотношения между

$B = 1,07 \text{ Тл}$ $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ $p = ? \quad R_{\max} = ?$	энергией и импульсом частицы $p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{1}{c} \sqrt{W^2 - W_0^2},$
--	--

где  $W$  – полная энергия протона, учитывая, что кинетическая энергия протона  $K = W - W_0$ , получим  $p = \frac{1}{c} \sqrt{K(K + 2m_0 c^2)}$ .

Если учесть, что  $K \gg m_0 c^2$ , то импульс протона  $p \approx K/c$ .

Подставив числовые значения, определим

$$p = 1,2 \cdot 10^{-8} / 3 \cdot 10^8 = 4 \cdot 10^{-17} \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$$

Максимальный радиус орбиты протона

$$R_{\max} = \frac{m v_{\max}}{q B} = \frac{p_{\max}}{q B} = \frac{\sqrt{K(K + 2m_0 c^2)}}{q B c} \approx \frac{K}{q B c}.$$

$$R_{\max} = 1,2 \cdot 10^{-8} / (1,6 \cdot 10^{19} \cdot 1,07 \cdot 3 \cdot 10^8) \approx 236 \text{ м}.$$

Создание сплошного электромагнита с диаметром около полукилометра представляет практически невыполнимую задачу. Поэтому в синхрофазотроне частицы движутся по окружности практически постоянного радиуса в узкой кольцевой вакуумной камере.

Ответ:  $p = 4 \cdot 10^{-17} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ ;  $R_{\max} \approx 236 \text{ м}$ .

**5.** В бетатроне индукция магнитного поля  $B$  внутри равновесной орбиты радиуса  $r_0 = 25 \text{ см}$  возрастает за время ускорения электрона практически с постоянной скоростью  $(\Delta B / \Delta t) = 25,5 \text{ Тл/с} \approx \text{const}$ . При этом электроны приобретают кинетическую энергию  $K = 25 \text{ МэВ}$ . Найти число оборотов  $N$ , совершаемых электроном за время ускорения, и соответствующее значение пройденного им пути  $S$ .

**Дано:**

$$K = 25 \text{ МэВ} = 4 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}$$

$$r_0 = 0,25 \text{ м}$$

$$(\Delta B / \Delta t) = 25,5 \text{ Тл/с}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$N = ? \quad S = ?$$

**Решение:** Ускорение электронов в бетатроне осуществляется вихревым электрическим полем в нарастающем во времени магнитном поле.

На рисунке изображена камера с

ускоряемыми электронами в переменном магнитном поле, где  $E_t$  – тангенциальная составляющая вихревого электрического поля равна модулю напряженности вихревого электрического поля на равновесной орбите

$$E_t = E.$$

Работа  $A$  сил электрического вихревого поля приводит к увеличению кинетической энергии  $\Delta K$  электрона за время одного оборота

$$A = \Delta K. \quad (1)$$

Работа сил электрического вихревого поля:

$$A = e \oint_L \mathbf{E} d\mathbf{l} = e \oint_L E dl = e \mathcal{E}, \quad (2)$$

где  $E$  – ЭДС индукции, определяемая по закону Фарадея

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (3)$$

где  $\Phi$  – поток магнитной индукции, пронизывающий область в пределах площади  $S$  орбиты электрона в момент времени  $t$ .

$$\Phi = \pi r_0^2 \langle B \rangle. \quad (4)$$

Электрон движется по орбите постоянного радиуса, уравнение (3) примет вид

$$\mathcal{E} = -\pi r_0^2 \frac{\Delta \langle B \rangle}{\Delta t}. \quad (5)$$

Учитывая бетатронное условие  $\langle B \rangle = 2B$ , формулу (5) можно записать

$$\mathcal{E} = -2\pi r_0^2 \frac{\Delta B}{\Delta t}. \quad (6)$$

Решая систему уравнений (1), (2) и (6), получим, что энергия, приобретаемая электроном за один период,

$$\Delta K = -2e\pi r_0^2 \frac{\Delta B}{\Delta t} = 2|e|\pi r_0^2 \frac{\Delta B}{\Delta t}.$$

Полная энергия, приобретаемая электроном за  $N$  оборотов,

$$K = N \cdot \Delta K.$$

Таким образом, число оборотов электрона за время ускорения до энергии  $K$

$$N = \frac{K}{2|e|\pi r_0^2 (\Delta B / \Delta t)}. \quad (7)$$

Электроны вращаются по орбите постоянного радиуса  $r_0$ , следовательно, путь  $S$ , пройденный электроном,

$$S = 2\pi r_0 \cdot N. \quad (8)$$

Подставив в (7) числовые значения, найдем число оборотов электрона  $N = \frac{4 \cdot 10^{-12}}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3,14 \cdot 0,25^2 \cdot 25,5} = 2,5 \cdot 10^6$ .

По формуле (8)

$$S = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,25 \cdot 2,5 \cdot 10^6 = 7,85 \cdot 10^6 \text{ м.}$$

Ответ:  $N = 5 \cdot 10^6$  оборотов,  $S = 7,85 \cdot 10^6$  м.

6. Электрон в бетатроне за один оборот приобретает кинетическую энергию  $\Delta K = 15$  эВ, двигаясь по орбите радиусом  $r_0 = 0,3$  м. Вычислить скорость изменения магнитной индукции  $d\langle B \rangle / dt$ , считая эту скорость в течение интересующего нас промежутка времени постоянной.

**Дано:**

$$r_0 = 0,3 \text{ м}$$

$$\Delta K = 15 \text{ эВ} = 2,4 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$$

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$d\langle B \rangle / dt = ?$$

**Решение:** Ускорение электронов в бетатроне осуществляется вихревым электрическим полем в нарастающем во времени магнитном поле.

Электрон в бетатроне за один оборот приобретает кинетическую энергию  $\Delta K$ , равную работе  $A$  сил электрического вихревого поля  $\Delta K = A$

$$\Delta K = e \oint_L E dl = 2\pi r_0 e E = e \mathcal{E},$$

или

$$E = \Delta K / e, \quad (1)$$

где  $E$  – ЭДС индукции, определяемая по закону Фарадея

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} = -\pi r_0^2 \frac{d\langle B \rangle}{dt}, \quad (2)$$

где  $\Phi = \pi r_0^2 \langle B \rangle$  – поток магнитной индукции, пронизывающий область в пределах площади  $S = \pi r_0^2$  орбиты электрона в момент времени  $t$ .

Приравняв левые части выражений (1) и (2), получим

$$\frac{d\langle B \rangle}{dt} = -\frac{\Delta K}{e\pi r_0^2}.$$

$$\frac{d\langle B \rangle}{dt} = -\frac{2,4 \cdot 10^{-18}}{-1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3,14 \cdot 0,3^2} \approx 53 \text{ Тл/с}.$$

Ответ:  $d\langle B \rangle / dt = 53 \text{ Тл/с}$ .





## ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

1. Внутренний диаметр дуантов циклотрона  $d = 1$  м. Индукция магнитного поля  $B = 1,20$  Тл. Ускоряющее напряжение  $U_m = 100$  кВ. Найти максимальную энергию  $K$ , до которой могут быть ускорены в этом циклотроне протоны, и скорость  $v$ , приобретаемую протонами к концу ускорения.

Ответ:  $K = 17$  МэВ;  $v = 5,8 \cdot 10^7$  м/с.

2. Внутренний диаметр дуантов циклотрона  $d = 1$  м. Индукция магнитного поля  $B = 1,20$  Тл. Ускоряющее напряжение  $U_m = 100$  кВ. Найти время  $\tau$ , в течение которого длится процесс ускорения.

Ответ:  $\tau = 4,7 \cdot 10^{-6}$  с.

3. Частота генератора циклотрона  $\nu = 10$  МГц. Найти амплитудное  $U_m$  ускоряющее напряжение на дуантах этого циклотрона, при котором расстояние между соседними траекториями протонов с радиусом  $r_0 = 0,5$  м не меньше чем  $\Delta r = 0,1$  м.

Ответ:  $U_m = 0,1$  МВ.

4. Протоны ускоряются в циклотроне так, что максимальный радиус кривизны их траектории  $r_0 = 50$  см. Найти кинетическую энергию  $K$  протонов в конце ускорения, если индукция магнитного поля в циклотроне  $B = 1,0$  Тл.

Ответ:  $K = 12$  МэВ.

5. Протоны ускоряются в циклотроне так, что максимальный радиус кривизны их траектории  $r_0 = 50$  см. Найти минимальную частоту  $\nu_{\min}$  генератора циклотрона, при которой в конце ускорения протоны будут иметь кинетическую энергию  $K = 20$  МэВ.

Ответ:  $\nu_{\min} = 20$  МГц.

6. Индукция  $B$  магнитного поля циклотрона равна 1 Тл. Какова частота  $\nu$  ускоряющего поля между дуантами, если в циклотроне ускоряются дейтроны  ${}^2_1D$ ?

Ответ:  $\nu = 7,7$  МГц.

7. В циклотроне требуется ускорять ионы гелия ( $He^{++}$ ). Частота  $\nu$  переменной разности потенциалов, приложенной к дуантам, равна 10 МГц. Какова должна быть индукция  $B$  магнитного поля циклотрона, чтобы период  $T$  обращения ионов совпал с периодом изменения разности потенциалов?

Ответ:  $B = 1,3$  Тл.

8. Чтобы в циклотроне не возникала расстройка в процессе ускорения частицы, связанная с изменением ее периода обращения при возрастании энергии, медленно изменяют частоту ускоряющего поля. Такой ускоритель называется *фазотроном*. На сколько процентов следует изменять частоту ускоряющего поля фазотрона, чтобы ускорить протоны и  $\alpha$ -частицы до энергии  $K = 500 \text{ МэВ}$ ?

Ответ:  $(\Delta\nu/\nu) \cdot 100 \% = 35 \%$ .

9. Определить число  $N$  оборотов, которое должен сделать протон в магнитном поле циклотрона, чтобы приобрести кинетическую энергию  $K = 10 \text{ МэВ}$ , если при каждом обороте протон проходит между дуантами разность потенциалов  $U_m = 30 \text{ кВ}$ .

Ответ:  $N = 167$  оборотов.

10. Протоны ускоряются в циклотроне в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 1,2 \text{ Тл}$ . Максимальный радиус кривизны траектории протонов составляет  $r_0 = 40 \text{ см}$ . Определить минимальную частоту ускоряющего напряжения  $\nu_{\min}$ , при которой протоны ускоряются до энергий  $K = 20 \text{ МэВ}$ .

Ответ:  $\nu_{\min} = 24,6 \text{ МГц}$ .

11. При каких значениях кинетической энергии  $K$  период  $T$  обращения электронов, протонов и  $\alpha$ -частиц в однородном магнитном поле на  $1 \%$  больше периода обращения при нерелятивистских скоростях?

Ответ:  $K_e = 5,1 \text{ кэВ}$ ;  $K_p = 9,4 \text{ МэВ}$ ;  $K_\alpha = 37,3 \text{ МэВ}$ .

12. Определить удельный заряд  $q/m$  частиц, ускоренных в циклотроне в однородном магнитном поле с индукцией  $B = \quad = 1,7 \text{ Тл}$  при частоте ускоряющего напряжения  $\nu = 25,9 \text{ МГц}$ .

Ответ:  $q/m = 9,57 \cdot 10^8 \text{ Кл/кг}$ .

13. В бетатроне индукция магнитного поля на равновесной орбите радиуса  $r_0 = 20 \text{ см}$  изменяется за время  $\Delta t = 1 \text{ мс}$  практически с постоянной скоростью от нуля до  $B = 0,40 \text{ Тл}$ . Найти энергию  $K$ , приобретаемую электроном за каждый оборот.

Ответ:  $K = 100 \text{ эВ}$ .

14. Средняя скорость изменения магнитного потока  $\langle d\Phi/dt \rangle$  в бетатроне, рассчитанном на энергию  $K = 60 \text{ МэВ}$ , составляет  $50 \text{ Вб/с}$ . Определить число  $N$  оборотов электрона на орбите за время ускоренного движения и путь  $l$ , пройденный электроном, если радиус  $r_0$  орбиты равен  $20 \text{ см}$ .

Ответ:  $N = 1,2 \cdot 10^6$  оборотов;  $l = 1,51 \cdot 10^6 \text{ м}$ .

**15.** . Среднее значение магнитной индукции  $\langle B \rangle$  поля, создаваемого магнитом бетатрона, изменяясь приблизительно по линейному закону, возрастает за время  $\tau = 1,00$  мс от нуля до значения  $B_m = 200$  мТл. Радиус орбиты электронов  $r_0 = 300$  мм. За время ускорения электроны прошли путь  $S = 1,7 \cdot 10^6$  м. Найти скорость  $v$  электронов в конце ускорения.

Ответ:  $v = 0,99995c$ .

**16.** В бетатроне магнитный поток внутри равновесной орбиты радиуса  $r_0 = 25$  см возрастает за время ускорения практически с постоянной скоростью  $d\Phi/dt = 5$  Вб/с. При этом электроны приобретают энергию  $K = 25$  МэВ. Найти число оборотов  $N$ , совершенных электроном за время ускорения, и соответствующее значение пройденного им пути  $S$ .

Ответ:  $N = 5 \cdot 10^6$  оборотов;  $S = 8 \cdot 10^6$  м.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### Основная

1. Тюрин Ю.И., Чернов И.П., Крючков Ю.Ю. Физика. Ч. 2. Электричество и магнетизм: учебное пособие для технических университетов. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2003. – 738 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: в 3-х т. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика: учебное пособие. – 7-е изд., стер. – СПб.: Изд-во «Лань», 2007. – 496 с.: ил. – (Учебники для вузов. Специальная литература).
3. Бондарев, Б.В. Курс общей физики: в 3 кн. Кн. 2. Электромагнетизм. Волновая оптика. Квантовая физика: учебное пособие / Б.В. Бондарев, Н.П. Калашников, Г.Г. Спирин. – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2005. – 438 с.
4. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: учебное пособие для вузов. – 4-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2002. – 718 с.
5. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. – 14-е изд., перераб. и доп. – М.: Издат. центр «Академия», 2007. – 560 с.
6. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. – 5-е изд. – М.: БИНОМ; Лаборатория знаний, 2006. – 319 с.: ил.
7. Сивухин Д.В. Общий курс физики: в 5 т. Т. 3. Электричество: учебное пособие для вузов. – 3-е изд., стер. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 656 с.
8. Рябчиков А. И. Ускорители заряженных частиц излучательные установки НИИЯФ и их использование в науке и технологиях / А. И. Рябчиков // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ] / Томский политехнический университет (ТПУ) . — Томск : Изд-во НТЛ: , 2000 . — Т. 303
9. Москалев, В. А. Безжелезный электронный синхротрон со слабой фокусировкой [Электронный ресурс] / В. А. Москалев // Известия Томского политехнического университета / Томский политехнический университет (ТПУ) . — 2007 . — Т. 310, № 1 . — [С. 68-70] .

### Дополнительная

1. Джанколли Д. Физика. – М.: Мир, 1989. – 342 с.
2. Чернов И.П., Ларионов В.В., Тюрин Ю.И. Физика: сборник задач. Ч. 2. Электричество и магнетизм: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2004. – 448 с.
3. Кузнецов С.И. Электростатика. Постоянный ток: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 132 с.
4. Кузнецов С.И. Электромагнетизм: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 92 с.
5. Кузнецов С. И. Колебания и волны. Геометрическая и волновая оптика: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 170 с.

## ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ

- ♦ Кинетическая энергия  $K$ , приобретаемая частицей при прохождении ускоряющего зазора в линейных и циклических ускорителях

$$K = Z |e| U_m,$$

где  $U_m$  – амплитудное значение ускоряющего напряжения в зазоре;  $Z$  – число элементарных зарядов  $|e|$  в заряде  $q$  ускоряемой частицы.

- ♦ В циклических ускорителях заряженная частица с зарядом  $q$  и массой  $m$  ускоряется до скоростей, при которых релятивистский эффект увеличения массы частицы практически не проявляется.

- ♦ Период обращения нерелятивистской частицы  $T = \frac{2\pi m}{qB}$ .

- ♦ Если заряженная частица в циклических ускорителях ускоряется до скоростей при которых проявляется релятивистский эффект, необходимо учитывать увеличение массы частицы

- ♦ Импульс релятивистской частицы  $p = \frac{1}{c} \sqrt{K(K + 2m_0c^2)}$ .

- ♦ Кинетическая энергия частицы  $K = W - W_0 = mc^2 - m_0c^2$ .

- ♦ Шаг винтовой линии траектории  $h = vT \cos \alpha$ .

- ♦ Период обращения релятивистской частицы

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

- ♦ Радиус окружности траектории релятивистской частицы

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

- ♦ Энергия, передаваемая вихревым электрическим полем единичному

заряду  $\frac{mv^2}{2} = \oint_L q \vec{E}' d\vec{l} = q \mathcal{E}_i$ .

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Значения фундаментальных констант

Гравитационная постоянная	$G = 6,6720 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Скорость света в вакууме	$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 12,5663706144 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Электрическая постоянная	$\varepsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Постоянная Планка	$h = 6,626176 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,6726485 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,6749543 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Отношение массы протона к массе электрона	$m_p/m_e = 1836,15152$
Элементарный заряд	$e^- = 1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Отношение заряда электрона к его массе	$e^- / m_e = 1,7588047 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$
Атомная единица массы	$1 \text{ а.е.м.} = 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

### Греческий алфавит

А $\alpha$ – альфа	Н $\eta$ – эта	Ν $\nu$ – ню	Τ $\tau$ – тау
Β $\beta$ – бета	Θ $\theta$ – тэта	Ξ $\xi$ – кси	Υ $\upsilon$ – ипсилон
Γ $\gamma$ – гамма	Ι $\iota$ – йота	Ο $\omicron$ – омикрон	Φ $\phi$ – фи
Δ $\delta$ – дельта	Κ $\kappa$ – каппа	Π $\pi$ – пи	Χ $\chi$ – хи
Ε $\epsilon$ – эпсилон	Λ $\lambda$ – ламбда	Ρ $\rho$ – ро	Ψ $\psi$ – пси
Ζ $\zeta$ – дзета	Μ $\mu$ – мю	Σ $\sigma$ – сигма	Ω $\omega$ – омега

### Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований

Множитель	Приставка	Обозначение
1 000 000 000 000 = $10^{12}$	тера	Т
1 000 000 000 = $10^9$	гига	Г
1 000 000 = $10^6$	мага	М
1 000 = $10^3$	кило	к
100 = $10^2$	гекто	г
10 = $10^1$	дека	да
0,1 = $10^{-1}$	деци	д
0,01 = $10^{-2}$	санتي	с
0,001 = $10^{-3}$	милли	м
0,000001 = $10^{-6}$	микро	мк
0,000000001 = $10^{-9}$	нано	н
0,0000000000001 = $10^{-12}$	пико	п
0,000000000000001 = $10^{-15}$	фемто	ф
0,00000000000000001 = $10^{-18}$	атто	а



**Производные единицы СИ,  
имеющие собственные наименования**

Величина	Единица		Выражение производной единицы	
	Наименование	Обозначение	Через другие единицы СИ	Через основные единицы СИ
Частота	герц	Гц		$\text{с}^{-1}$
Сила	ньютон	Н		$\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Энергия, работа, кол-во теплоты	джоуль	Дж	Н/м	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Мощность, поток энергии	ватт	Вт	Дж/с	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}$
Кол-во электричества, электрический заряд	кулон	Кл	$\text{А} \cdot \text{с}$	$\text{с} \cdot \text{А}$
Электрическое напряжение, электрический потенциал	вольт	В	Вт/А	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-1}$
Электрическая ёмкость	фарада	Ф	Кл/В	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^4 \cdot \text{А}^2$
Электрическое сопротивление	ом	Ом	В/А	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-2}$
Электрическая проводимость	сименс	См	А/В	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^3 \cdot \text{А}^2$
Освещенность	люкс	лк		$\text{м}^{-2} \cdot \text{кд} \cdot \text{ср}$

**Диэлектрические проницаемости**

Диэлектрик	$\epsilon$	Диэлектрик	$\epsilon$
Вода	81	Керосин	2,0
Полиэтилен	2,3	Стекло	6,0
Воздух	1,00058	Парафин	2,0
Слюда	7,5	Фарфор	6,0
Воск	7,8	Плексиглас	3,5
Спирт	26	Эбонит	2,7

**Удельное электросопротивление  
некоторых материалов, Ом·м·10<sup>6</sup>**

Серебро	0,016	Константан	0,4–0,51
Медь	0,017	Нихром	1,1
Алюминий	0,029	Фехраль	1,2