

* Электромагнетизм

Кузнецов Сергей Иванович — доцент кафедры ОФ ЕНМФ ТПУ

Сегодня: четверг, 21 декабря 2006 г.

Тема 4. УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

4.1. Классификация ускорителей

4.2. Линейные ускорители

4.3. Циклические ускорители

Кузнецов Сергей Иванович
доцент кафедры ОФ ЕНМФ ТПУ

4.1. 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,
- интенсивностью пучка.

Ускорители подразделяются на

- **непрерывные** (*равномерный во времени пучок*)
- **импульсные** (*в них частицы ускоряются порциями – импульсами*).
Последние характеризуются длительностью импульса.

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

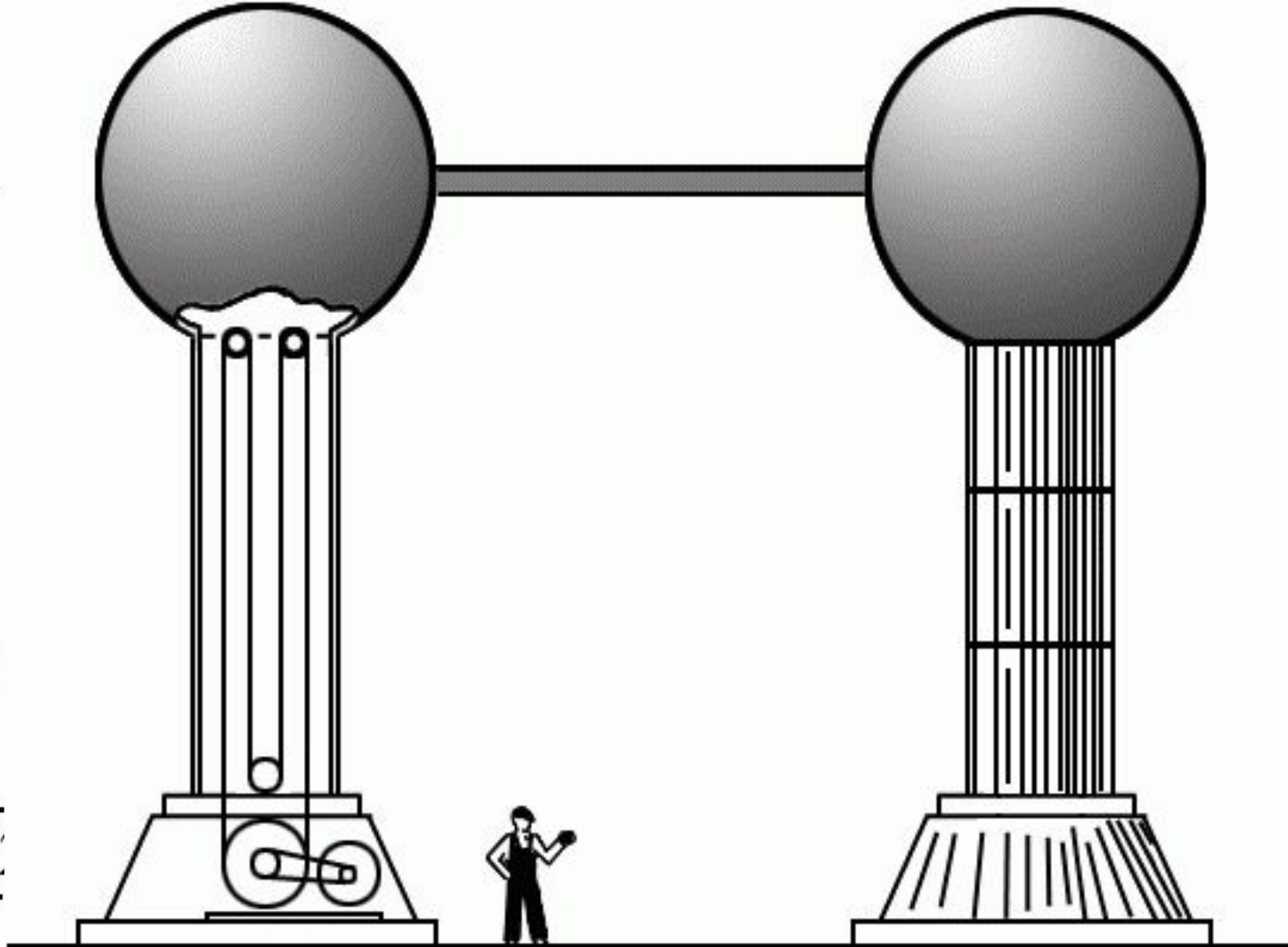
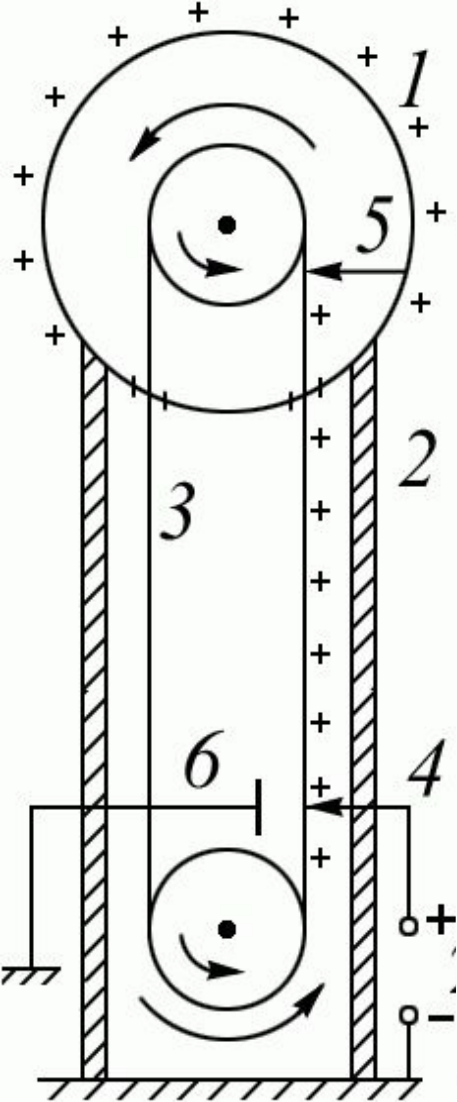
Рассмотрим некоторые типы ускорителей
заряженных частиц.



4.2. Линейные ускорители

1. Линейный ускоритель.

Ускорение частиц осуществляется **электростатическим полем**, создаваемым, например, высоковольтным генератором Ван-де-Граафа



Высоковольтный генератор

Ван-де-Граафа

- Заряженная частица проходит ускоряющее 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 ≈ 10 МэВ.**
- Их дальнейшее ускорение с помощью источников постоянного напряжения невозможно из-за утечки зарядов и пробоев.

Ускорительная установка электростатического генератора Ван-де-Граафа (ЭГ-8)



- Предназначена для получения выведенных в экспериментальный зал пучков положительно заряженных ионов ядер (протонов, альфа-частиц, ионов азота и др.) с максимальной теоретически возможной для данной установки энергией до 4 МэВ/заряд и максимальным током $I = 10$ мкА. Практически, максимальная энергия, достигнутая на этом ускорителе для протонов, составила 3 МэВ. Ускоритель был в существенной степени модернизирован в 80-е годы доктором техн. наук Александром Владимировичем [Алмазовым](#), который работал в НИИЯФ МГУ с 1980 по 1985 гг. в должности старшего научного сотрудника Отдела физики атомного ядра. В настоящее время ускоритель активно используется для исследований металлических, полупроводниковых и диэлектрических материалов в поли- и монокристаллических фазах методами ионно-пучкового анализа.

Горизонтальный электростатический ускоритель Ван-де-Граафа (AN-2500)



На фотографии ускоритель AN-2500 (слева) и ЭГ-8 (видна часть котла высокого давления)

В настоящее время вводится в эксплуатацию **горизонтальный электростатический ускоритель Ван-де-Граафа (AN-2500)** С максимальной разностью потенциала 2,5 МВ производства HVEE (Голландия). Ускоритель получен на основании Соглашения между Центром науки о материалах университета провинции Гронинген (Нидерланды) и НИИ ядерной физики им. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (Россия) в качестве безвозмездной передачи для проведения научных исследований и обучения студентов.

В настоящее время вводится в эксплуатацию **горизонтальный электростатический ускоритель Ван-де-Граафа (AN-2500)** С максимальной разностью потенциала 2,5 МВ производства HVEE (Голландия). Ускоритель получен на основании Соглашения между Центром науки о материалах университета провинции Гронинген (Нидерланды) и НИИ ядерной физики им. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (Россия) в качестве безвозмездной передачи для проведения научных исследований и обучения студентов.

Ускоритель КГ-500



Основные параметры ускоренных ионов (для водорода):

- а) максимальная энергия - 500 кэВ;
- б) стабильность энергии - 0,1 %;
- в) пределы регулировки энергии 50 - 500 кэВ;
- г) ток прямого пучка (на входе в магнитный анализатор) - 1 мА;
- д) плотность тока в прямом пучке - 25 мА/мм²;
- е) ток одноатомных ионов в пучке, отклоненном на 90° - 0,2 мА.

- Является высоковольтным каскадным генератором Кокрофта-Уолтона с воздушной изоляцией и предназначен для ускорения положительно заряженных ионов в электростатическом поле.
- Вертикально направленный пучок ионов ускорителя поворачивается двумя магнитными анализаторами в горизонтальные плоскости и вводится для использования в 5 вакуумных экспериментальных камерах, а также в установке MEIS (Medium Energy Ion Scattering) с энергетическим разрешением $\sim 10^{-3} E_0$.

2. Линейный резонансный ускоритель.

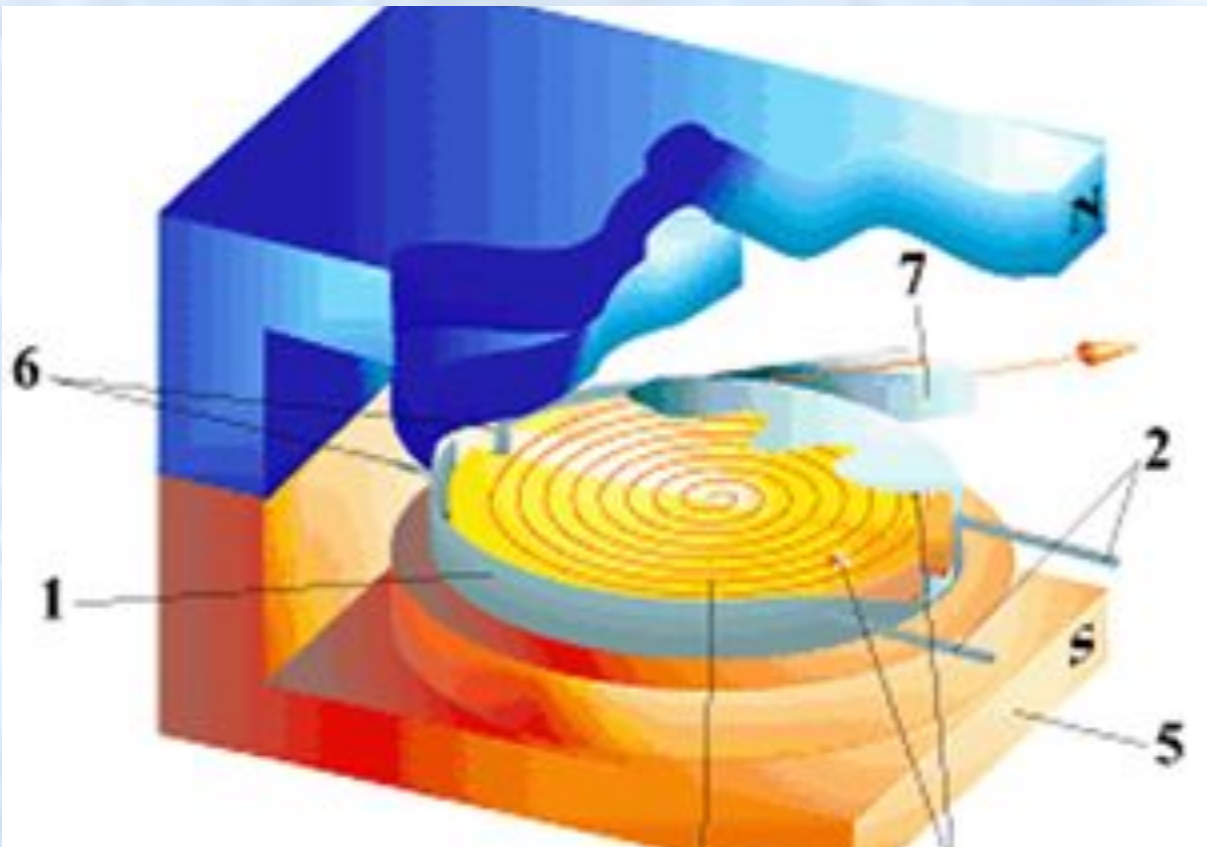
Ускорение заряженных частиц осуществляется переменным электрическим полем сверхвысокой частоты, синхронно изменяющимся с движением частиц.

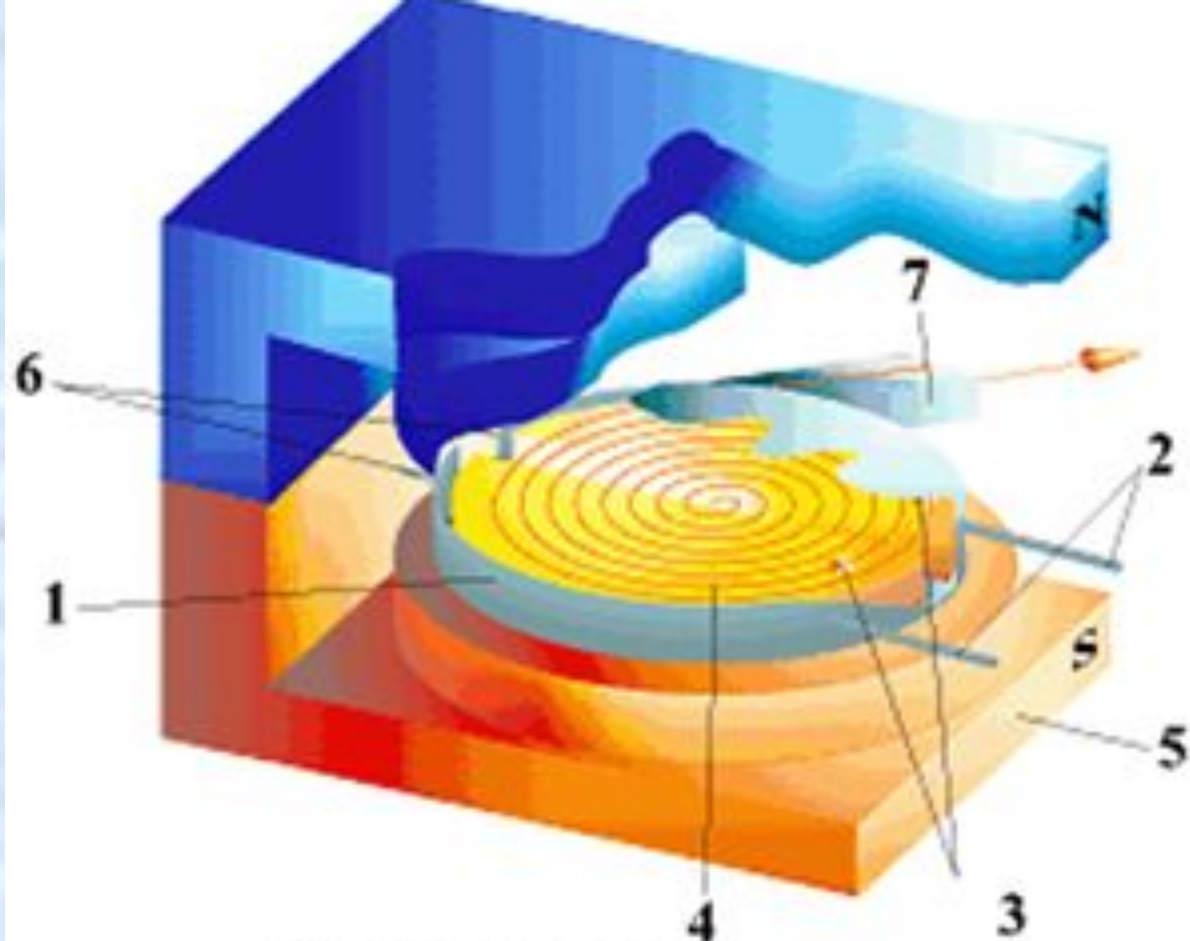
- Таким образом частицы **множественно** проходят ускоряющий промежуток:
- **протоны** ускоряются до энергий порядка **десятков мегаэлектронвольт,**
- **электроны** – до **десятков гигаэлектронвольт.**



4.3. Циклические ускорители

1. **Циклотрон** – циклический резонансный ускоритель тяжелых частиц (протонов, ионов).



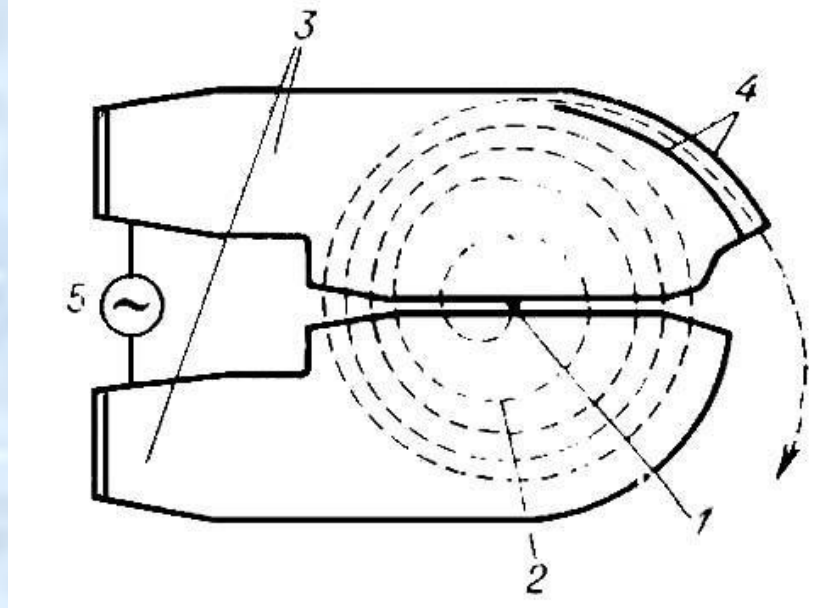


1. Вакуумная камера
2. Труба вакуумного насоса
3. Дуанты
4. Траектория ускоряемой частицы
5. Полюс магнита
6. Выводы к генератору переменного напряжения
7. Вывод электронов

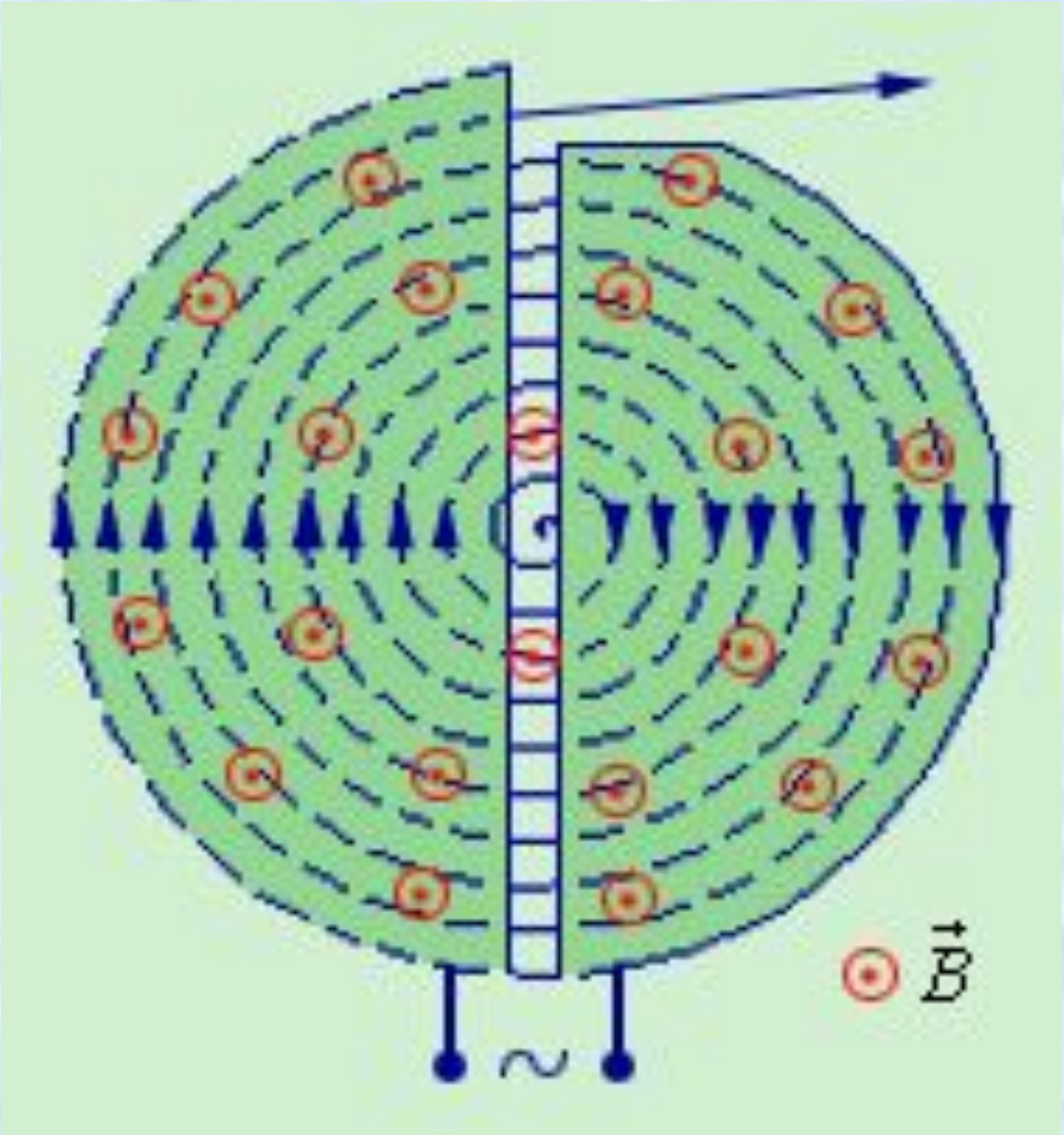
В циклотроне заряженная частица разгоняется

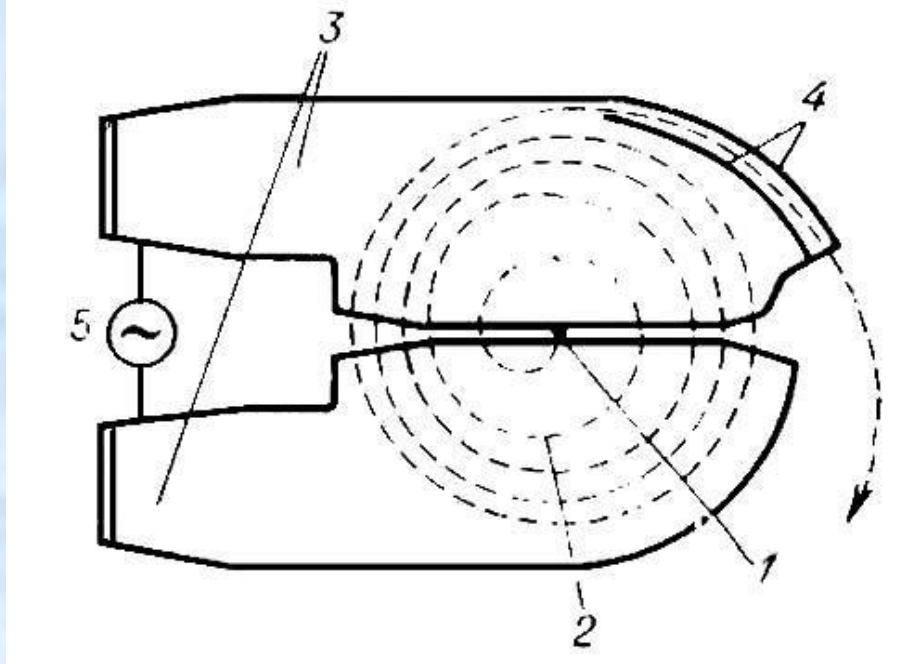


- Между полюсами сильного электромагнита помещается вакуумная камера, в которой находятся два электрода в виде полых металлических полуцилиндров, или **дуантов**.
- К **дуантам** приложено переменное электрическое поле.
- Магнитное поле, создаваемое электромагнитом, однородно и перпендикулярно плоскости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

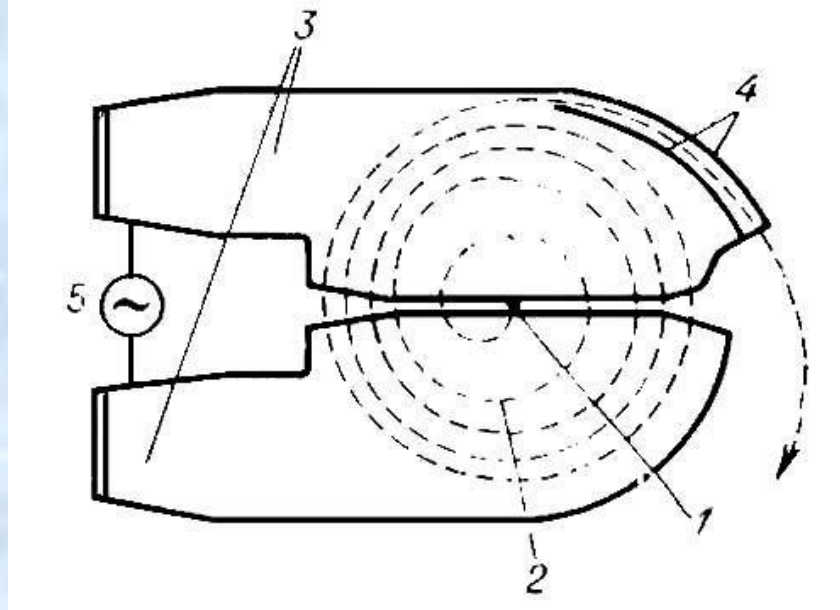


- Если заряженную частицу ввести в центр зазора (1) между дуантами, то она, ускоряемая электрическим и отклоняемая магнитными полями, войдет в дуант (3) и опишет полуокружность, радиус которой пропорционален скорости частицы.
- К моменту ее выхода из первого дуанта полярность напряжения изменяется, поэтому частица вновь ускорится 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 $E = 0,5 \text{ МэВ}$, масса возрастает до $m = 2m_0$,
 - при $E = 10 \text{ МэВ}$ $m = 28m_0$

- Ускорение релятивистских частиц в циклических ускорителях можно осуществить, если применять предложенный:
- в 1944 г. советским физиком В. И. Векслером и
- в 1945 г. американским физиком Э. Мак-Милланом

принцип автофазировки.

Идея принципа автофазировки заключается в том, что **для компенсации увеличения периода вращения частиц, ведущего к нарушению синхронизма, изменяют**

- **либо частоту** ускоряющего электрического поля,
- **либо индукцию** магнитного поля,
- **либо то и другое.**

Принцип автофазировки используется в

- фазотроне,
- синхротроне и
- синхрофазотроне.

В 1930 году Э. Лоуренсом (США) был создан и первый циклический ускоритель – **циклотрон** на энергию протонов 1 МэВ (его диаметр был 25 см). На рис.1 показана первая работающая модель циклотрона. На рис.2 циклотрон следующего поколения, который позволял ускорять протоны и дейтроны до энергий в несколько МэВ.

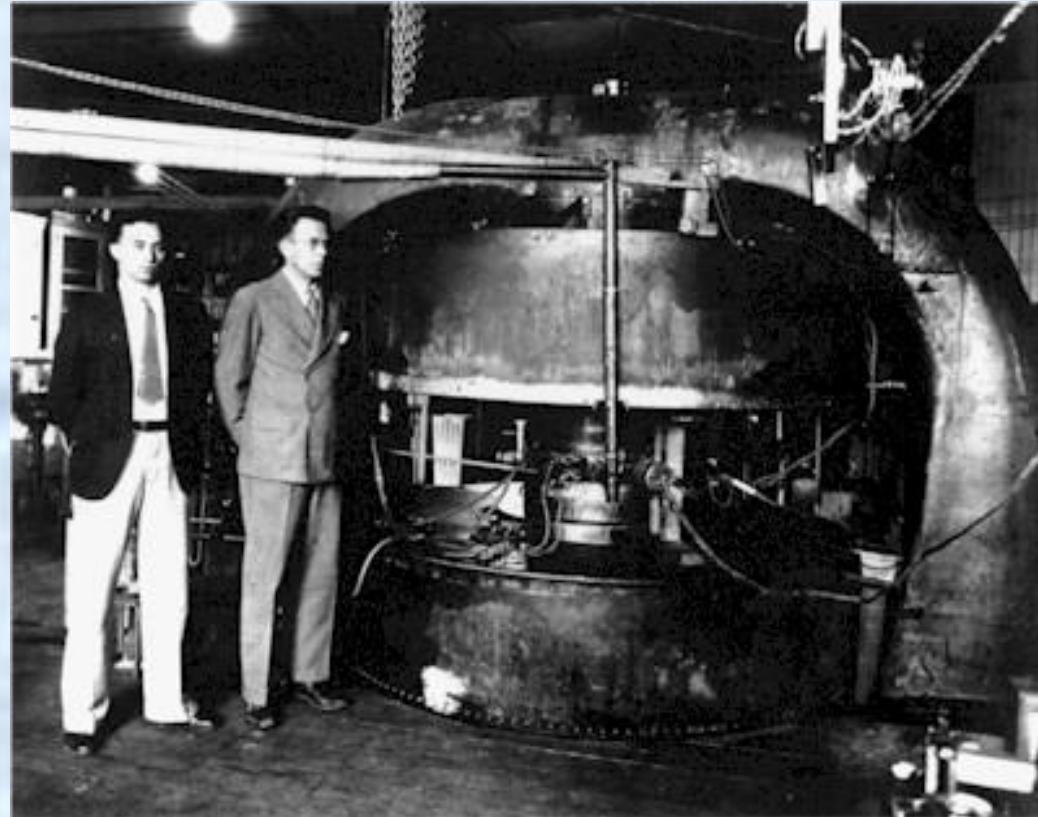


Рис. 1. Первая работающая модель циклотрона

Рис. 2. С. Ливингстоун и Э. Лоуренс у 27-дюймового циклотрона, который широко использовался в экспериментальных исследованиях ядерных реакций и искусственной радиоактивности

- 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 сохраняется за счёт **изменения**
кратности ускорения .

- 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 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,*
- 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.

- 3. **Фазотрон** (*синхроциклотрон*) – **циклический резонансный ускоритель тяжелых заряженных частиц** (например, протонов, ионов, α -частиц),
- управляющее магнитное поле постоянно,
- частота ускоряющего электрического поля медленно изменяется с периодом.



ИМ. С.М.КИРОВА

ЭЛЕКТРОСТАА

ИЗУЧЕНИЕ РЕАКТОРА

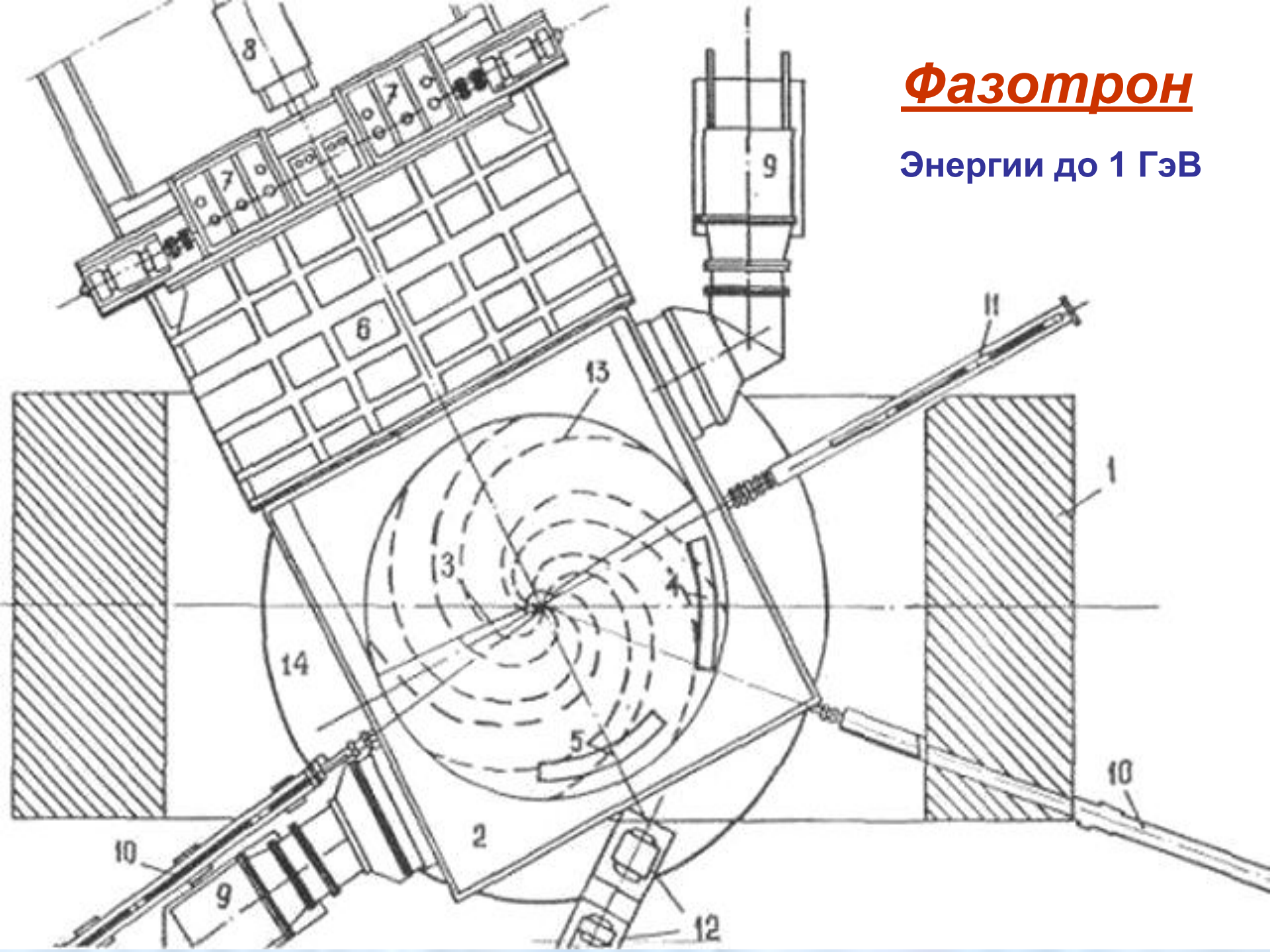
234



- **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 растёт радиус их орбиты.

Фазотрон

Энергии до 1 ГэВ



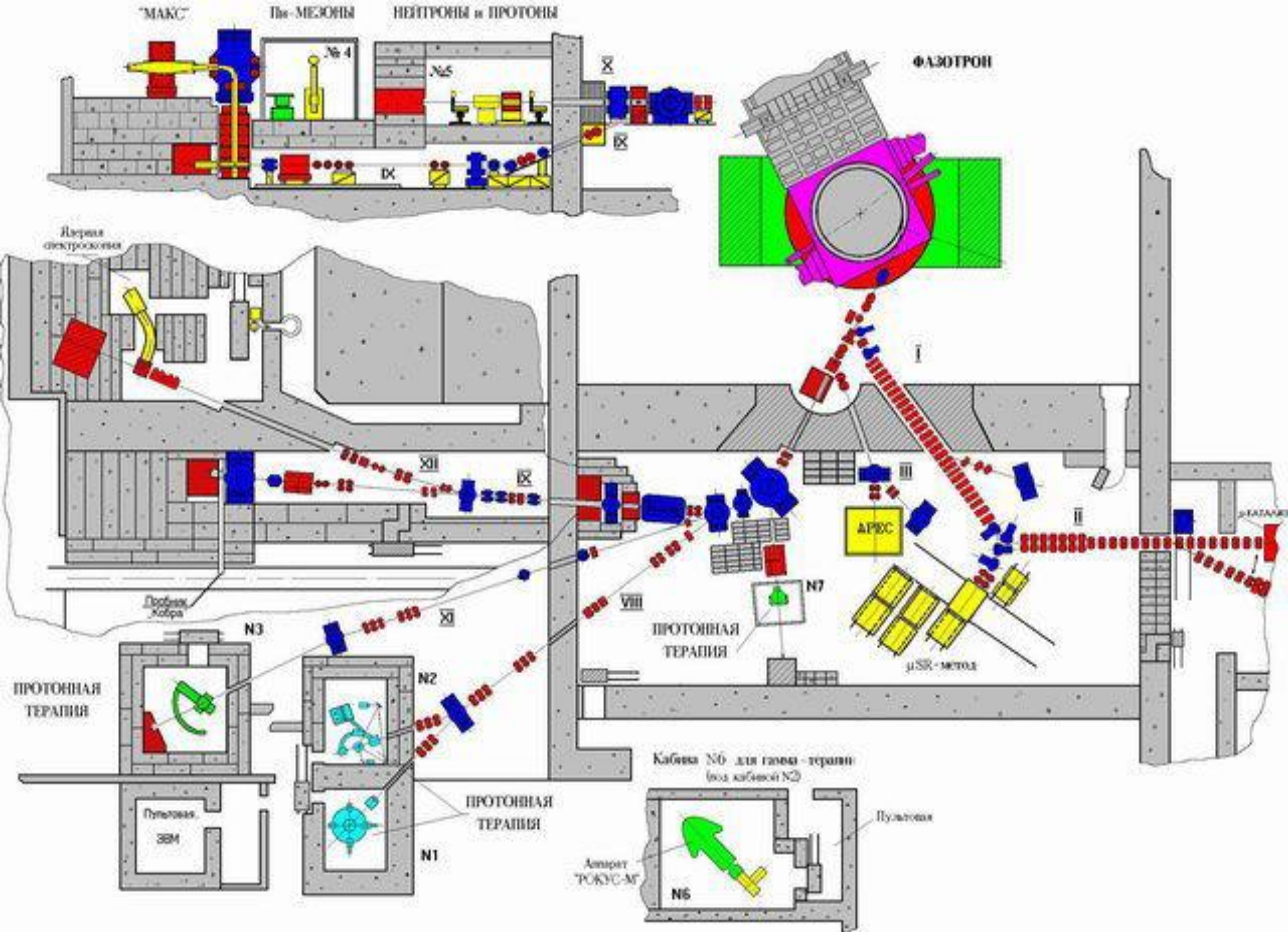


СХЕМА ПУЧКОВ ФАЗОТРОНА ДЛЯ ОИИИ

- 4. **Синхротрон** –
циклический резонансный
ускоритель ультрарелятивистских
электронов, в котором управляющее
магнитное поле изменяется во времени,
а частота ускоряющего электрического
поля постоянна.

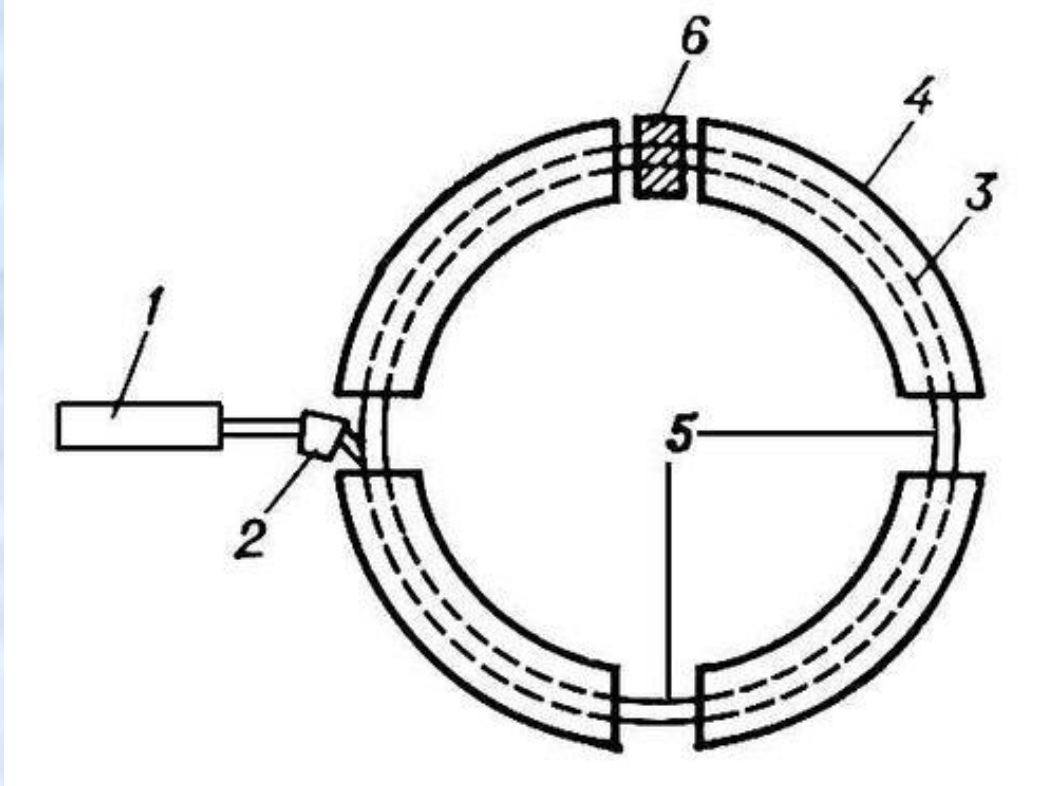
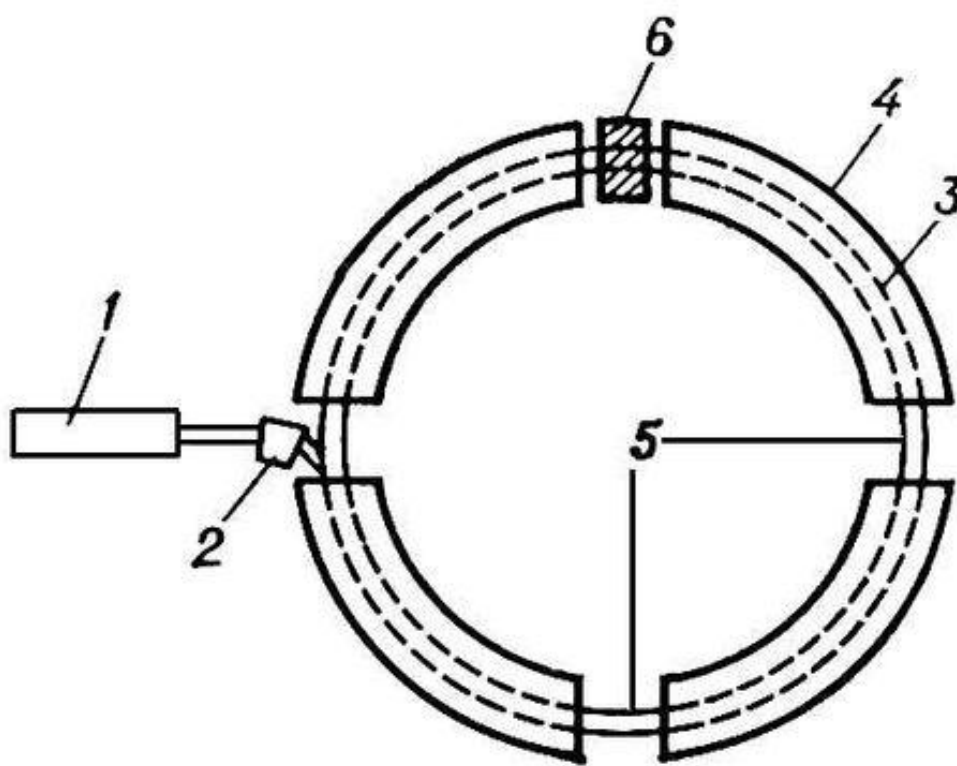


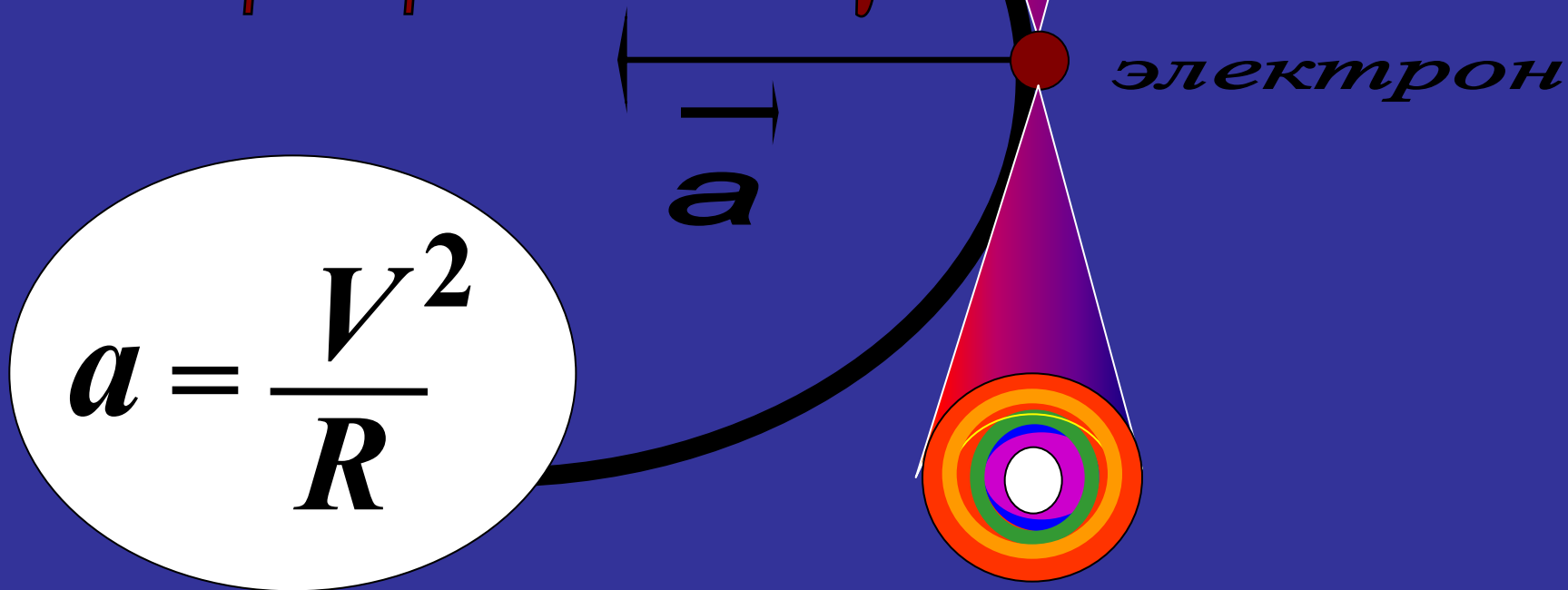
Схема строения синхротрона:

- 1 – инжектор электронов;
- 2 – поворотный магнит;
- 3 – пучок электронов;
- 4 – управляющий электромагнит;
- 5 – вакуумная тороидальная камера;
- 6 – ускоряющий промежуток.



- **Электроны в разных синхротронах ускоряются до энергий 1 – 10 ГэВ.**

Синхротронное излучение

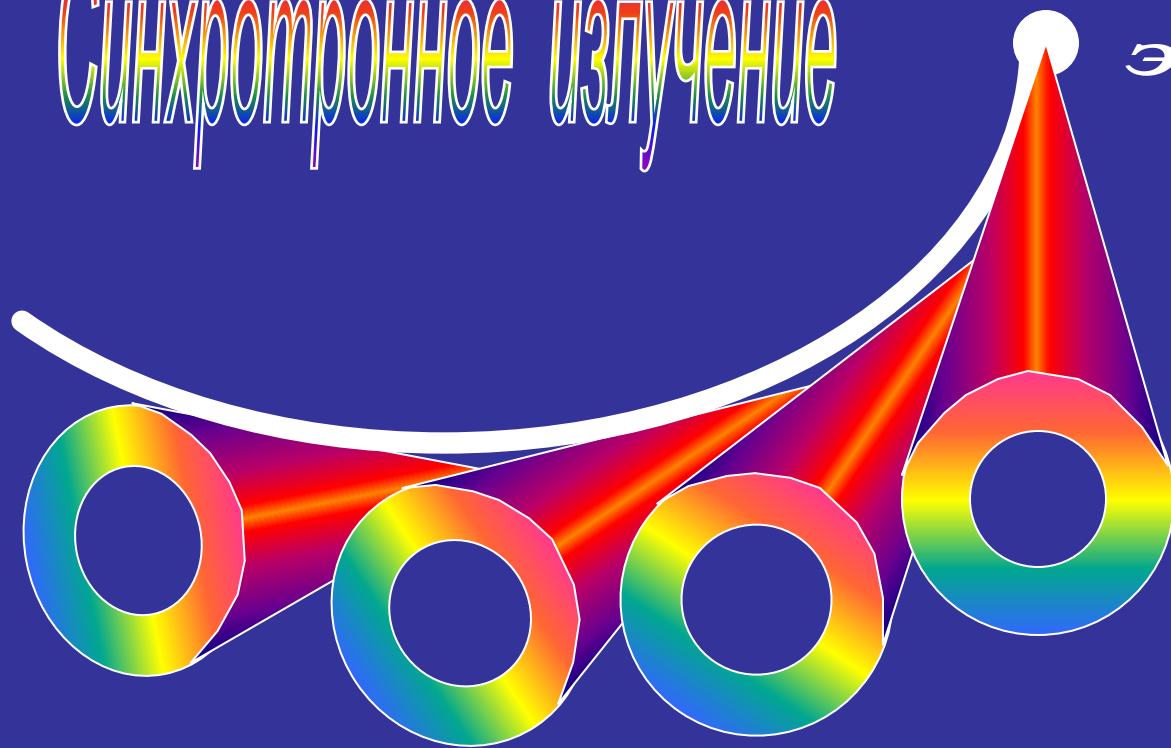


$$a = \frac{v^2}{R}$$

конус синхротронного излучения

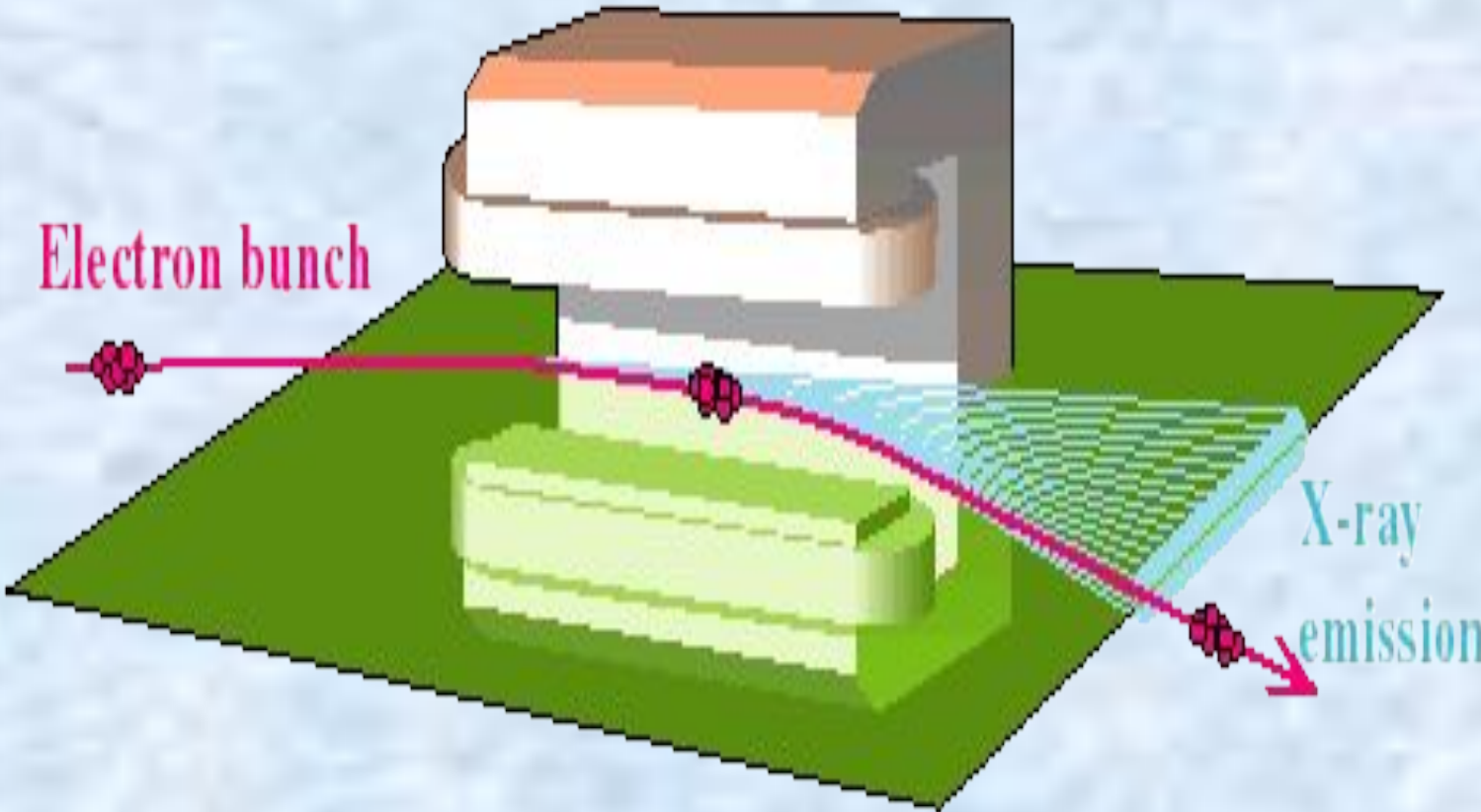
Синхротронное излучение

электрон



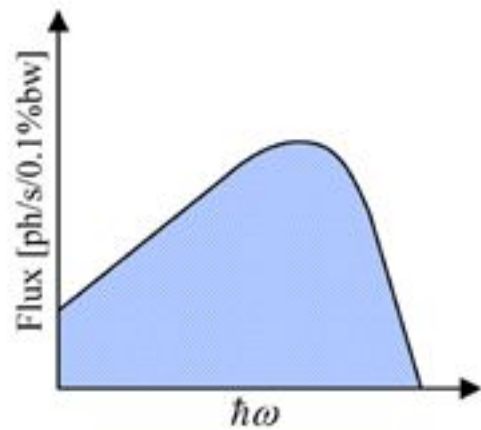
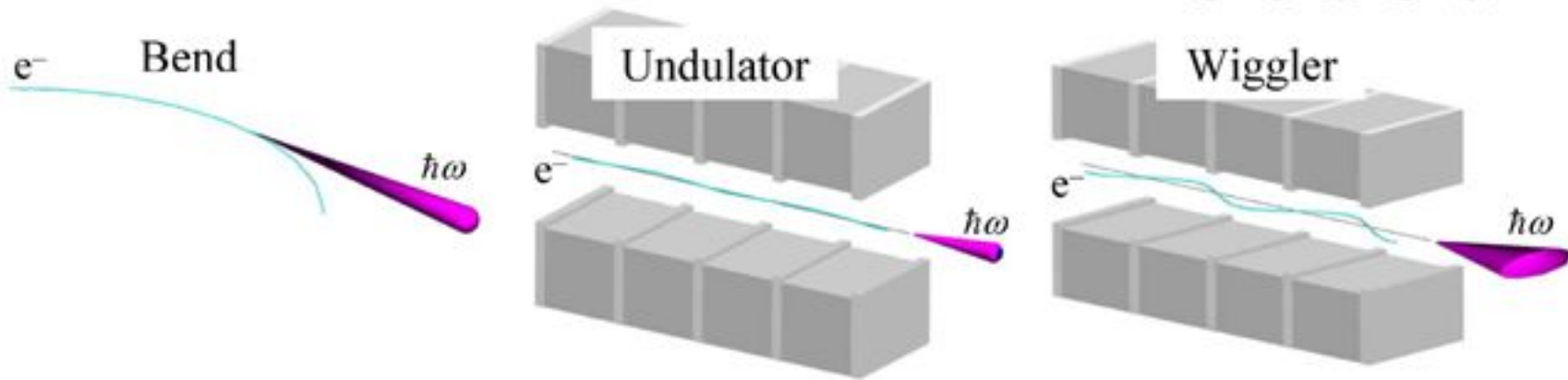
ВЕРТОННОЕ ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Bending Magnet

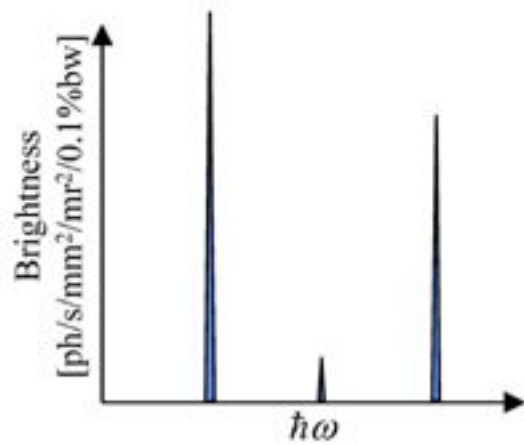


Undulator radiation

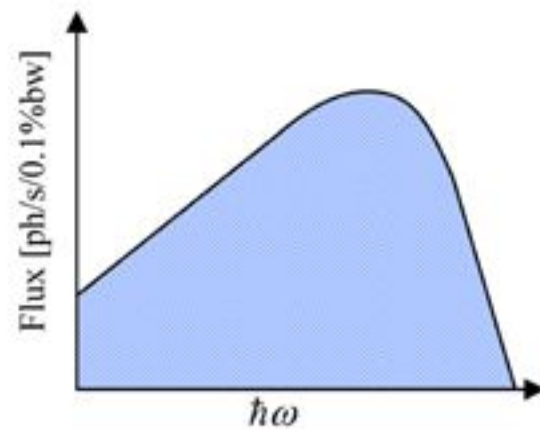




white source



partially coherent source



powerful white source

Внешний вид Томского синхротрона «Сириус» на 1,5 ГэВ







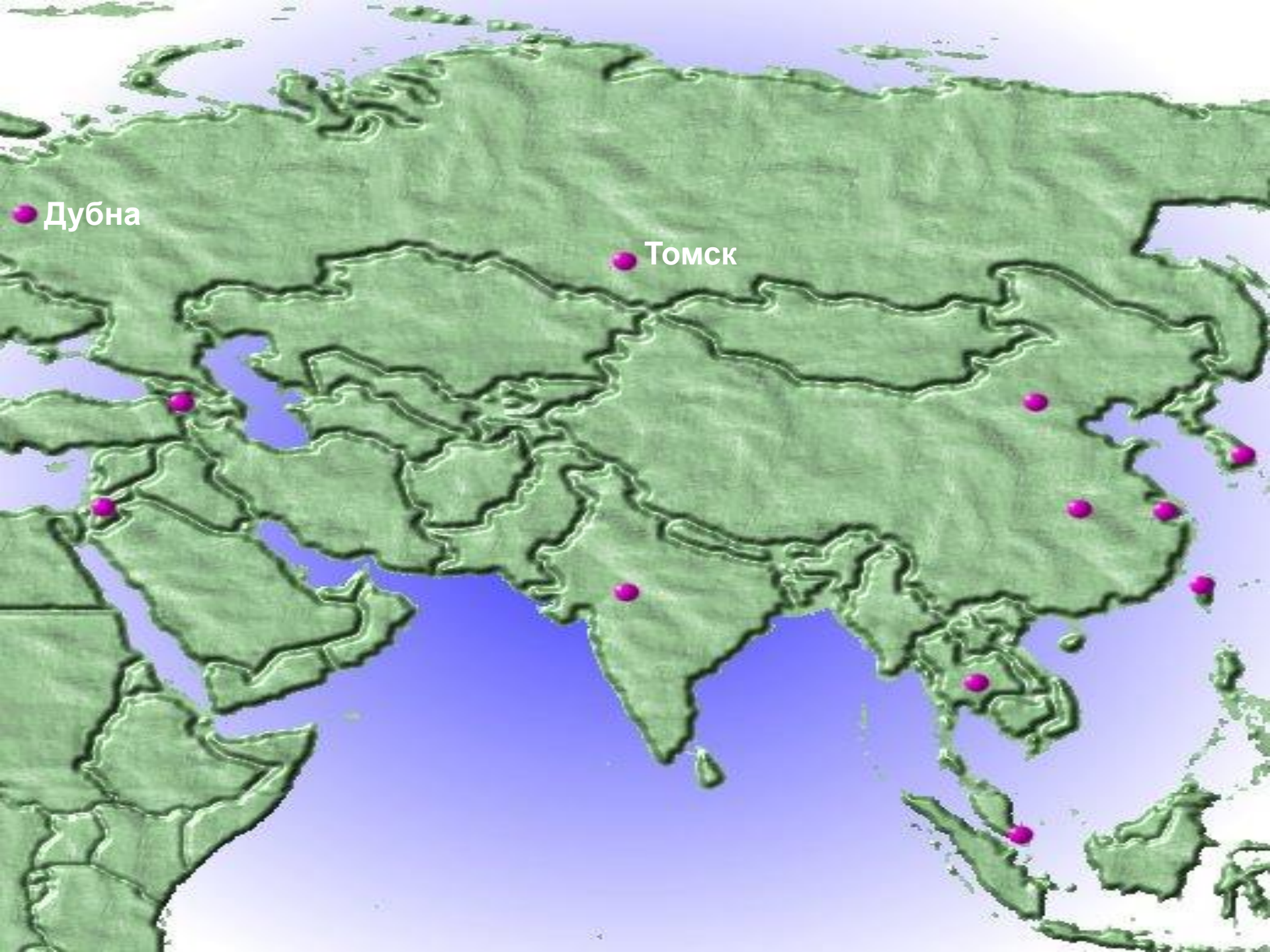
а



б

Устройство протонного синхротрона





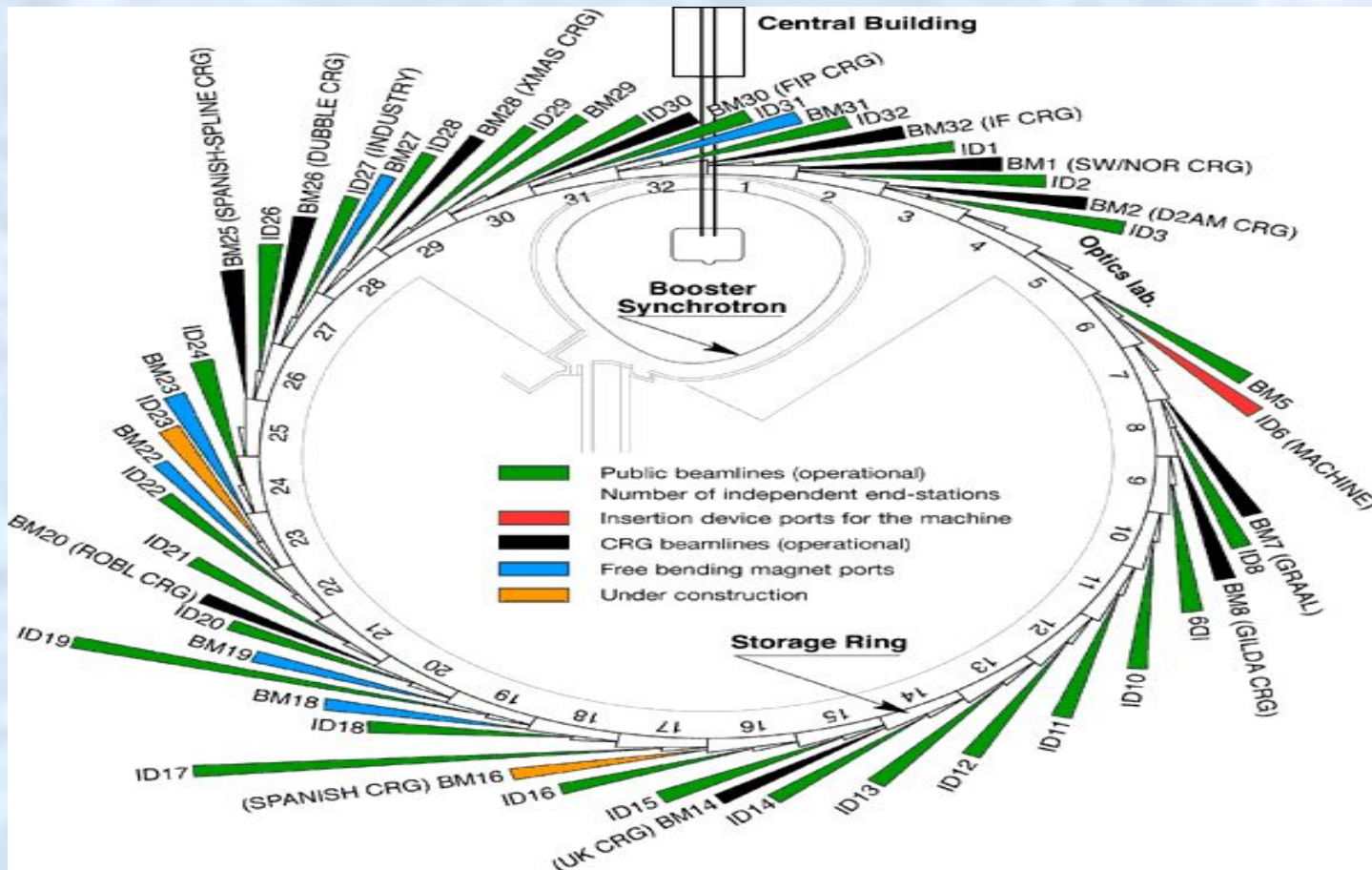
● Дубна

● Томск

The **6 GeV ESRF** is an outstanding example of European cooperation in science. **18** nations work together to use the extremely bright beams of light produced by the ESRF's high-performance storage ring to study a remarkably wide range of materials.



Plan of the Experimental Hall and Links to All Beamlines

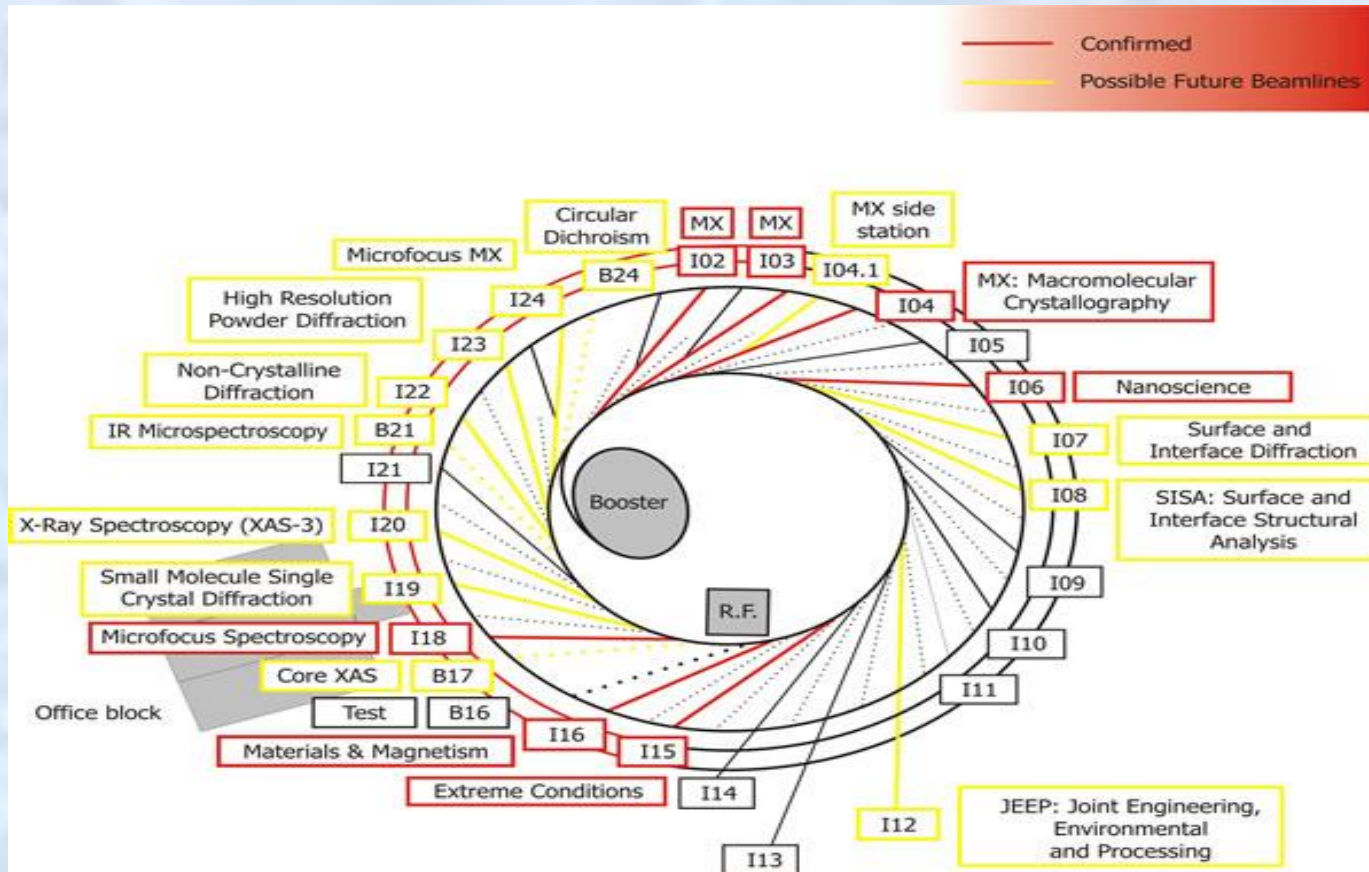


3.0 GeV Electron Storage ring **Diamond**

Harwell/Chilton Science Campus, UK.

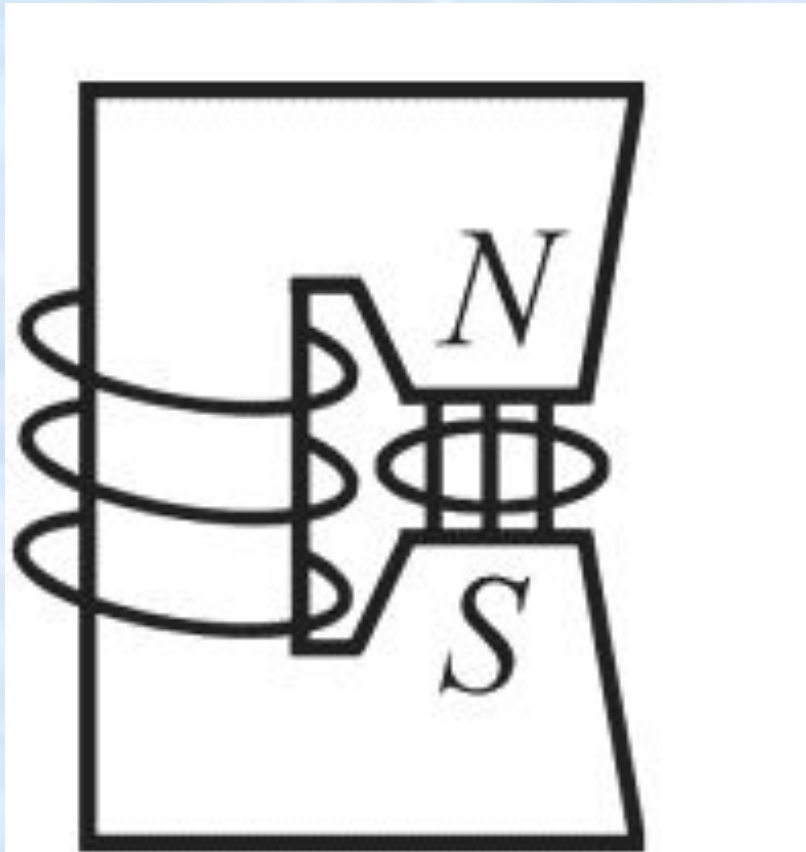
Circumference 561.6 m;
Electron beam current 300 mA;
Emittance – horizontal 2.7 nm-rad;
of Insertion Devices (IDs) Up to 22;
18x5 m, 6x8; *gap* 10 mm;

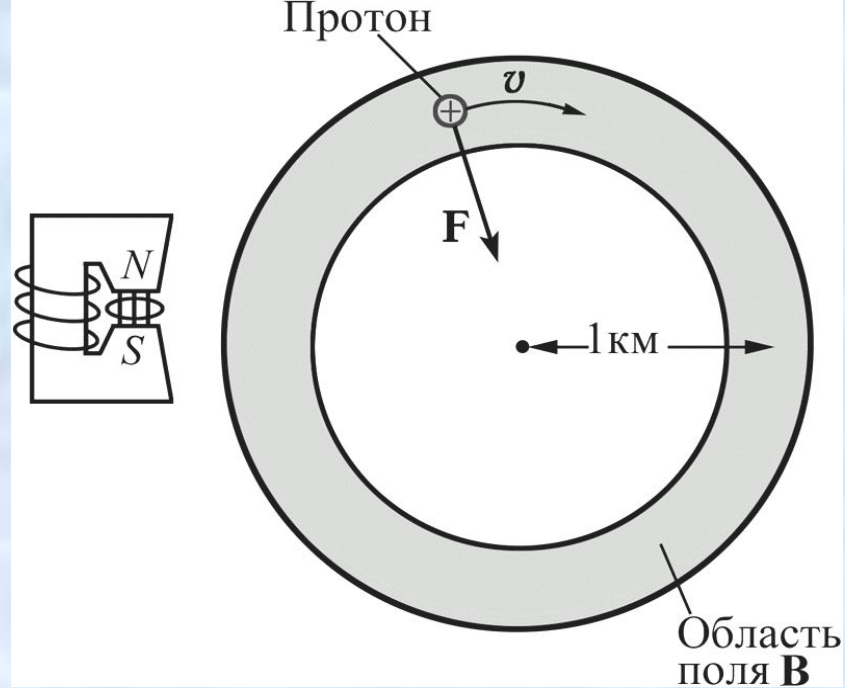
No. of cells 24 (6 fold symmetry)
Minimum beam lifetime 10 hours;
Emittance - vertical 0.03 nm-rad; *No.*
Free straight lengths for IDs:
Building diameter 235 m



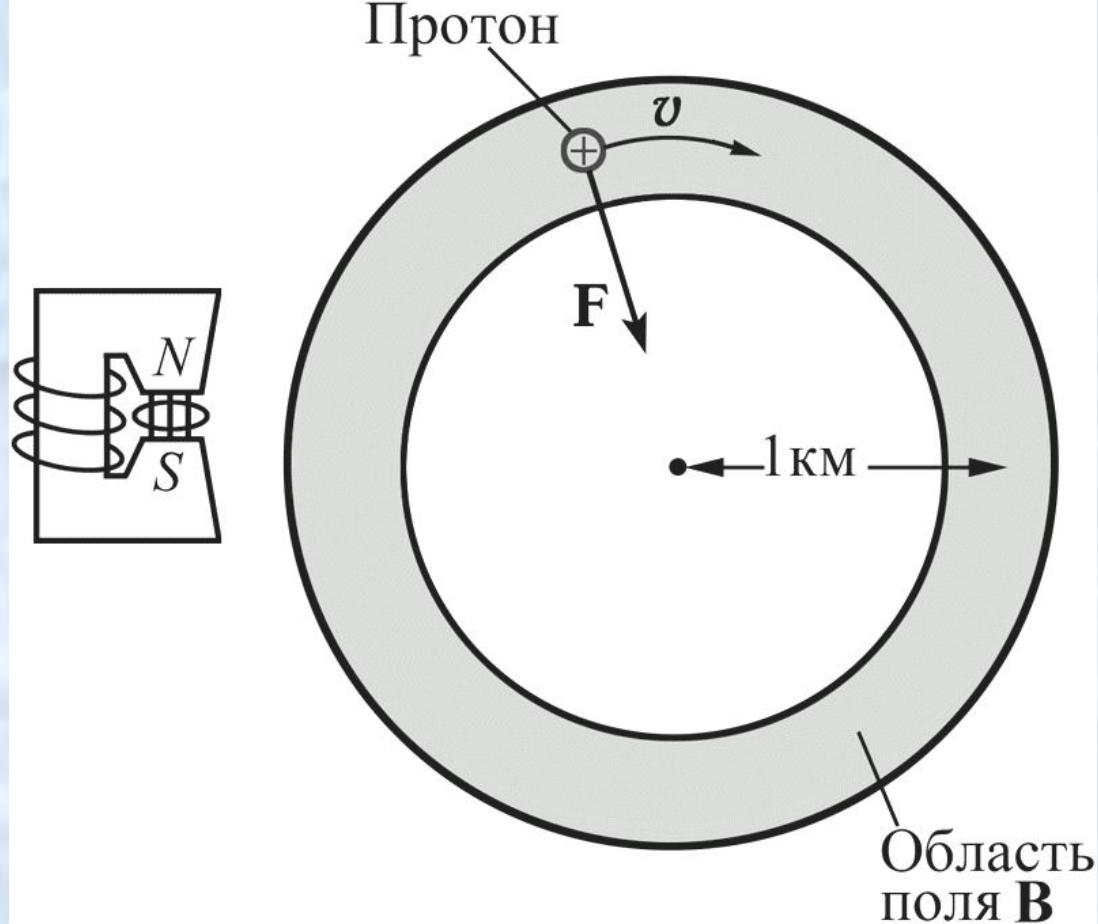
- 5. **Синхрофазотрон** – циклический резонансный ускоритель тяжелых заряженных частиц (протонов, ионов), в котором объединяются свойства фазотрона и синхротрона.

- Здесь управляющее магнитное поле и частота ускоряющего электрического поля одновременно изменяются во времени так, чтобы радиус равновесной орбиты частиц оставался постоянным.





- Между полюсами этого магнита расположена тороидальная вакуумная камера, в которую инжектирован пучок протонов. Если смотреть на ускоритель сверху, то пучок протонов движется по часовой стрелке со скоростью V , близкой к скорости света c .



- Рассмотрим действие лоренцевой силы и рассчитаем энергию протонного ускорителя, представляющего собой кольцевой магнит диаметром 2 км.

- 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 силе Лоренца

$$F = evB$$

- Тогда:

$$m_r v^2 / R = evB.$$

- Поскольку $v \approx c$, то можно записать

$$m_r c^2 = e c B R$$

- 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.

- В фазотронах, микротронах, синхротронах и синхрофазотронах частицы **ускоряются до релятивистских скоростей.**
- Масса частицы m зависит от ее скорости :

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

где m_0 – масса покоя частицы.

- Кинетическая энергия частицы K :

$$K = W - W_0$$

где $W = mc^2$ – полная энергия частицы

$W_0 = m_0c^2$ – 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

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



•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 – в вакууме

- Кинетическая энергия K , передаваемая вихревым электрическим полем единичному положительному заряду, равна интегралу по замкнутому контуру L :

$$K = \oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Согласно закону Фарадея, этот интеграл равен изменению магнитного потока через замкнутый контур L .

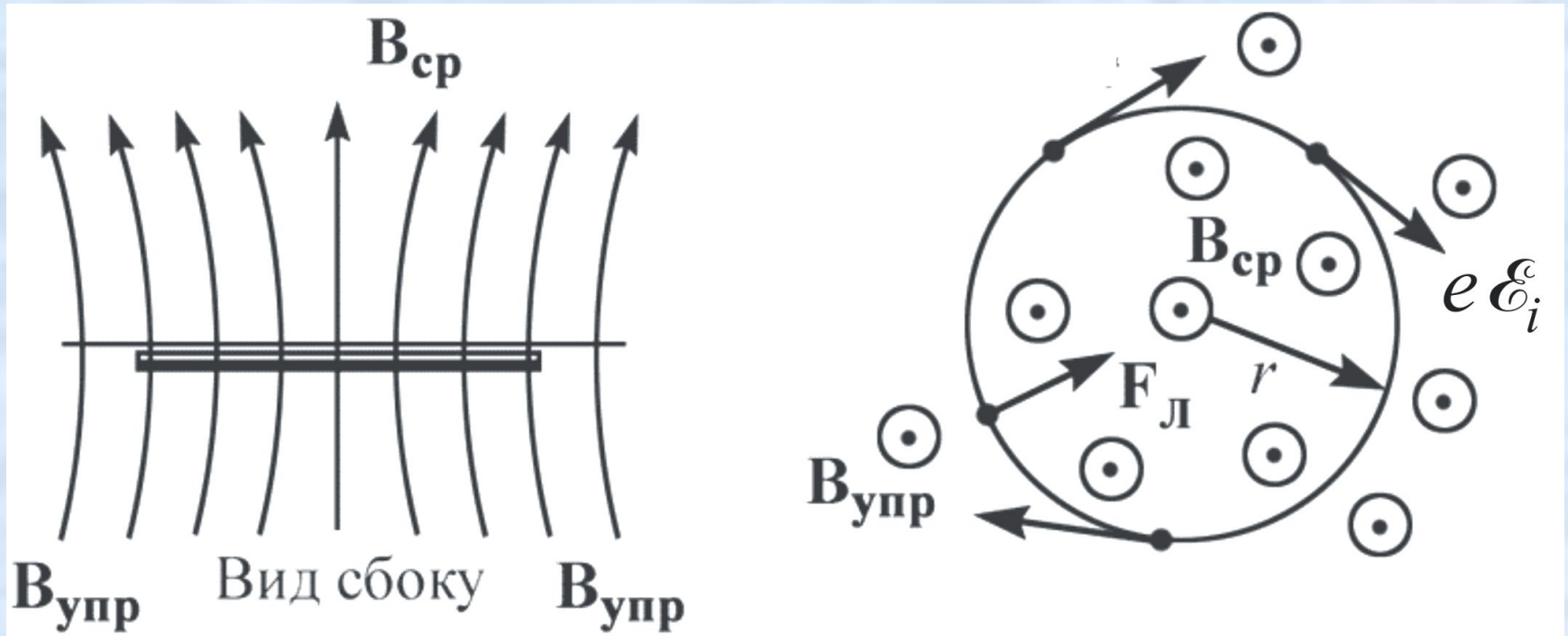
- Таким образом, ***вихревое электрическое поле может действовать на сгусток электронов, двигающихся в магнитном поле, и ускорять их.***

Переменный центральный магнитный поток $B_{\text{ср}}$ создает в бетатроне вихревую ЭДС индукции, ускоряющую электроны:

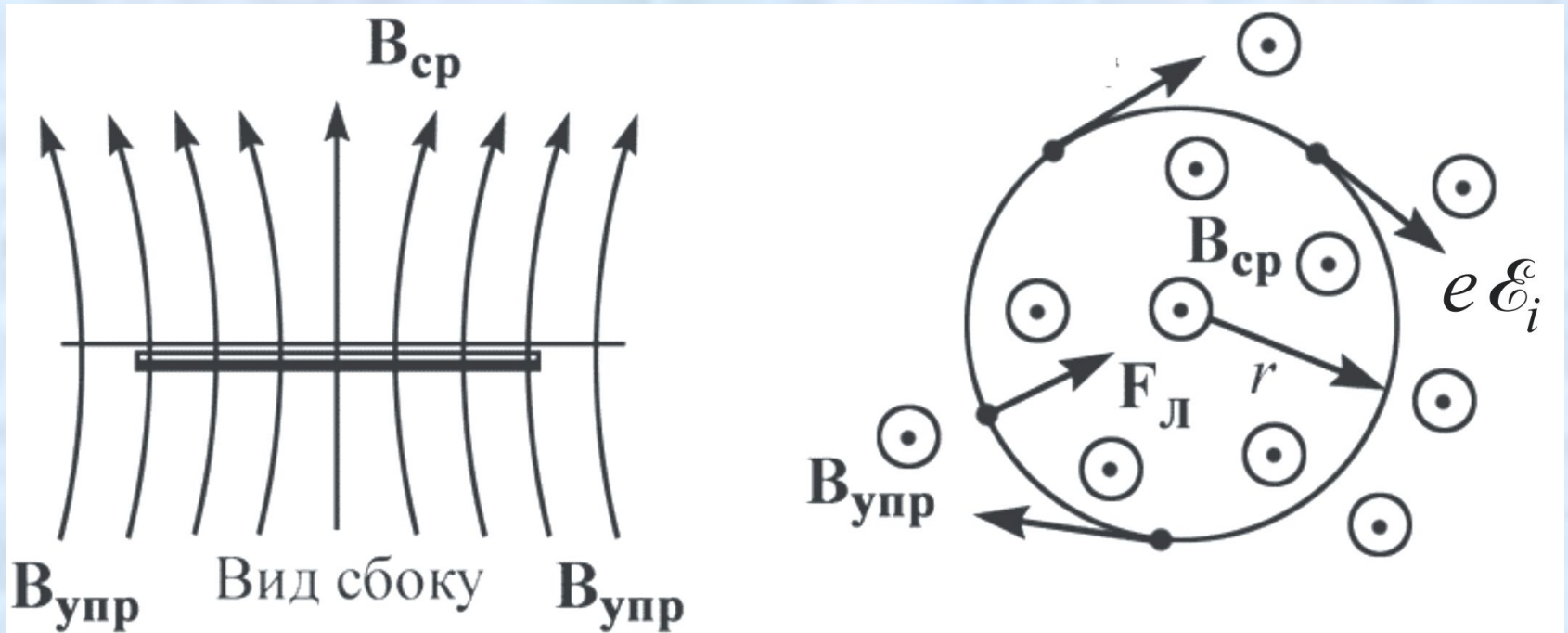
при каждом обходе контура энергия qE_i электронов увеличивается на величину

$$\frac{mv^2}{2} = qE_i$$

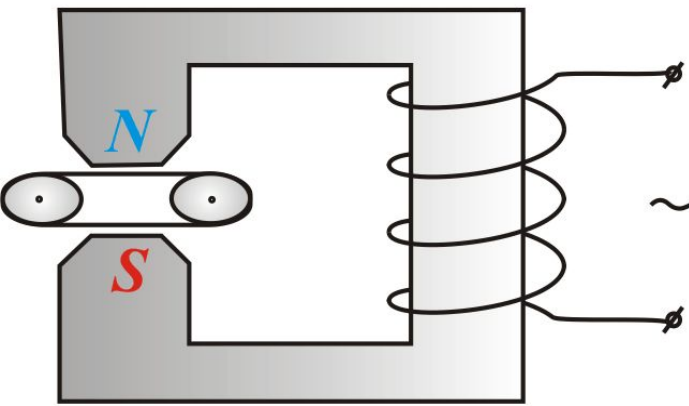
- Циклический индукционный ускоритель электронов данного типа называется **бетатроном**.



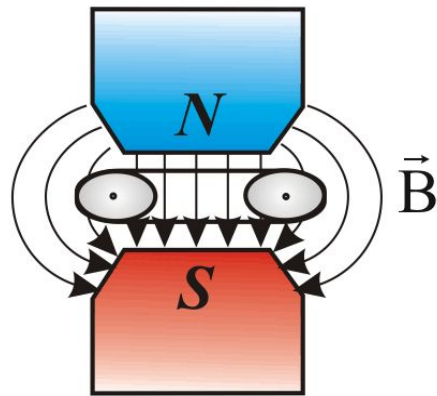
- Удержание электронов на стационарной круговой орбите осуществляется управляющим магнитным полем $B_{упр}$, определенным образом, изменяющимся во времени.



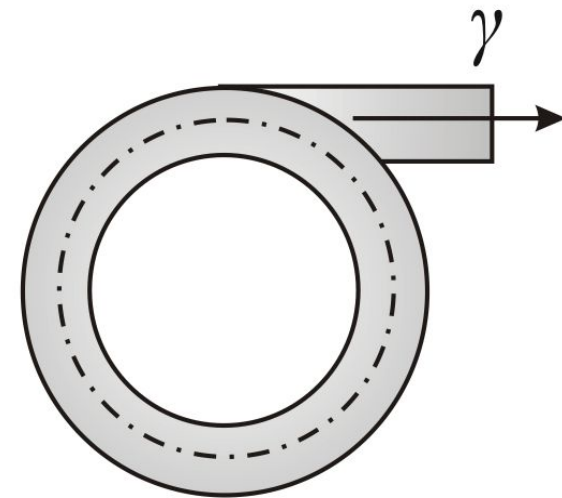
- Бетатрон (рис. а) состоит из тороидальной вакуумной камеры (рис. в),
- помещающейся между полюсами электромагнита специальной формы (рис. б).
- Обмотка электромагнита питается переменным током с частотой $\nu \approx 100 \text{ Гц}$.



• а



б



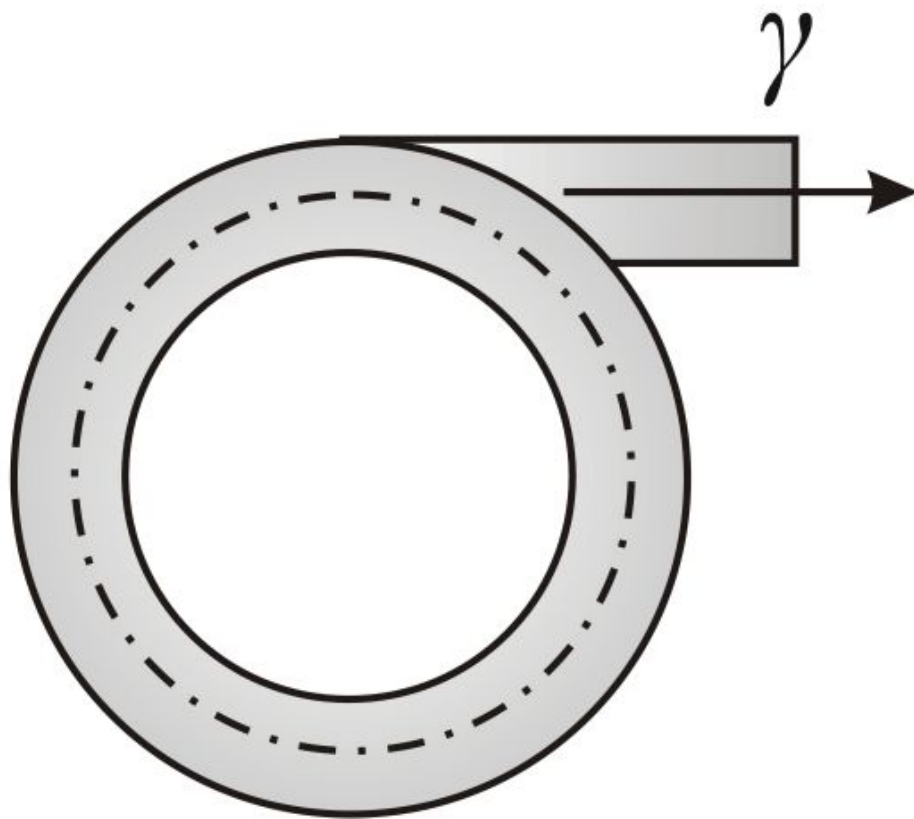
в

- 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).

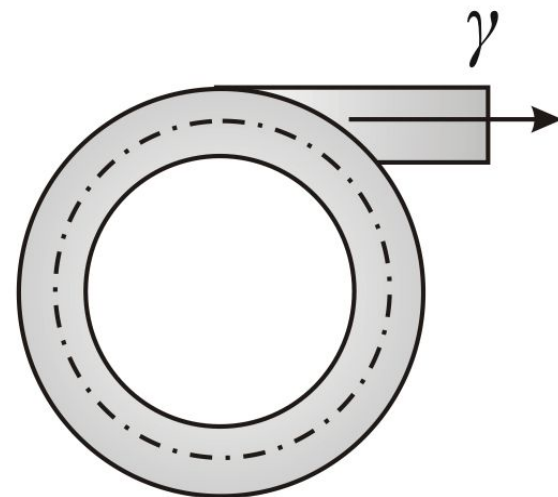
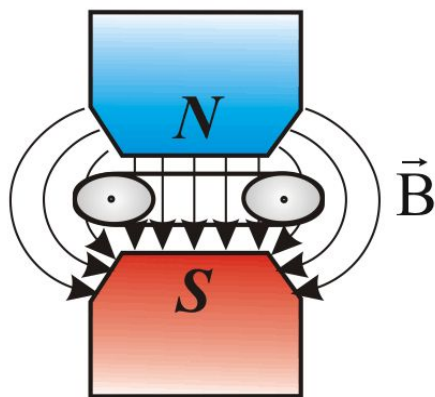
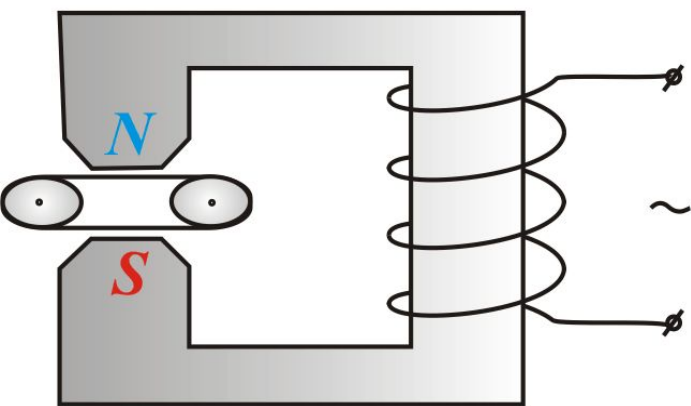
- **За время порядка 10^{-3} с электроны успевают сделать до 10^6 оборотов и приобрести энергию до 500 МэВ (сотни МэВ в разных ускорителях).**
- При такой энергии **скорость электронов близка к скорости света ($v \approx c$).**

- 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 γ -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. Видероэ** сформулировал условие существования равновесной орбиты – орбиты постоянного радиуса «условие 2:1».
- **Первый** действующий бетатрон был создан в 1940 г. **Д. Керстом.**

Первый действующий бетатрон Д. Керста.



- В СССР первые бетатроны были разработаны и созданы учеными Томского политехнического института 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 (МИБ)**, применяемые в медицине, дефектоскопии и других прикладных и научных исследованиях.

МИБ

1 -10 МэВ



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

Создание бетатронов на более высокие энергии сопряжено с необходимостью использования электромагнитов слишком большого размера и веса (магнитное поле приходится создавать не только на орбите, но и внутри неё).

1 ЛИУ

2 Бустер

3 Протонный
синхротрон

5 БАК

4 Супер протонный
синхротрон

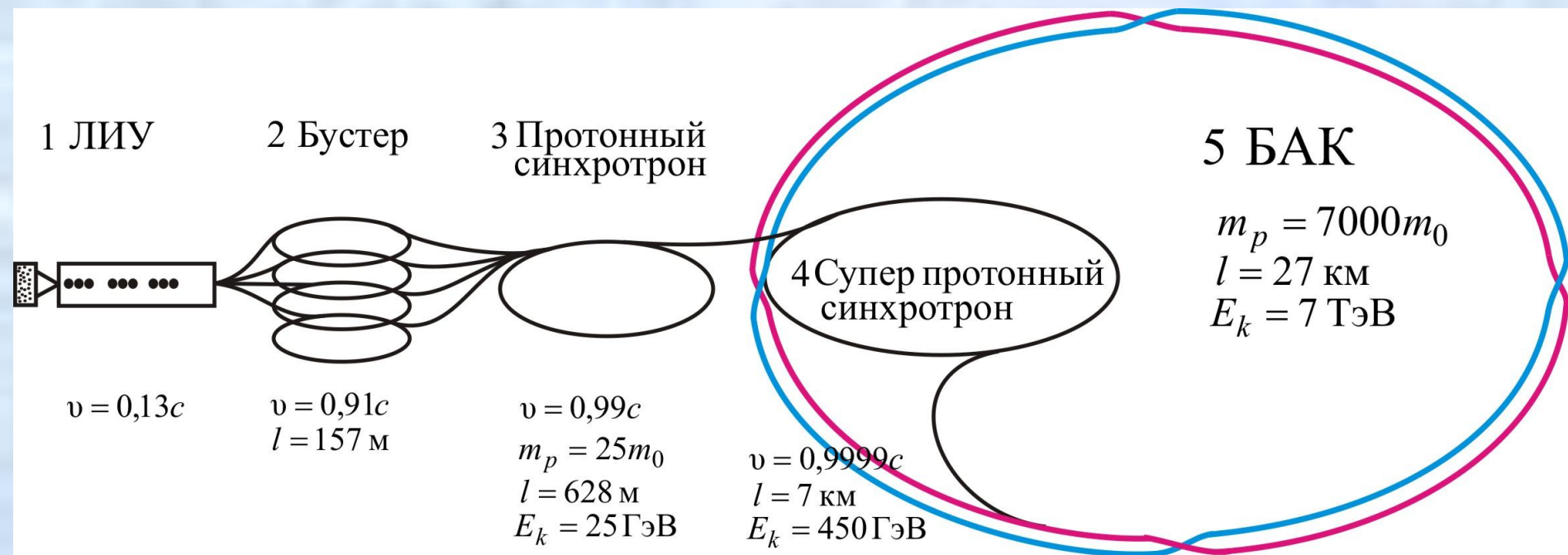
$$v = 0,13c$$

$$v = 0,91c$$
$$l = 157 \text{ м}$$

$$v = 0,99c$$
$$m_p = 25m_0$$
$$l = 628 \text{ м}$$
$$E_k = 25 \text{ ТэВ}$$

$$v = 0,9999c$$
$$l = 7 \text{ км}$$
$$E_k = 450 \text{ ТэВ}$$

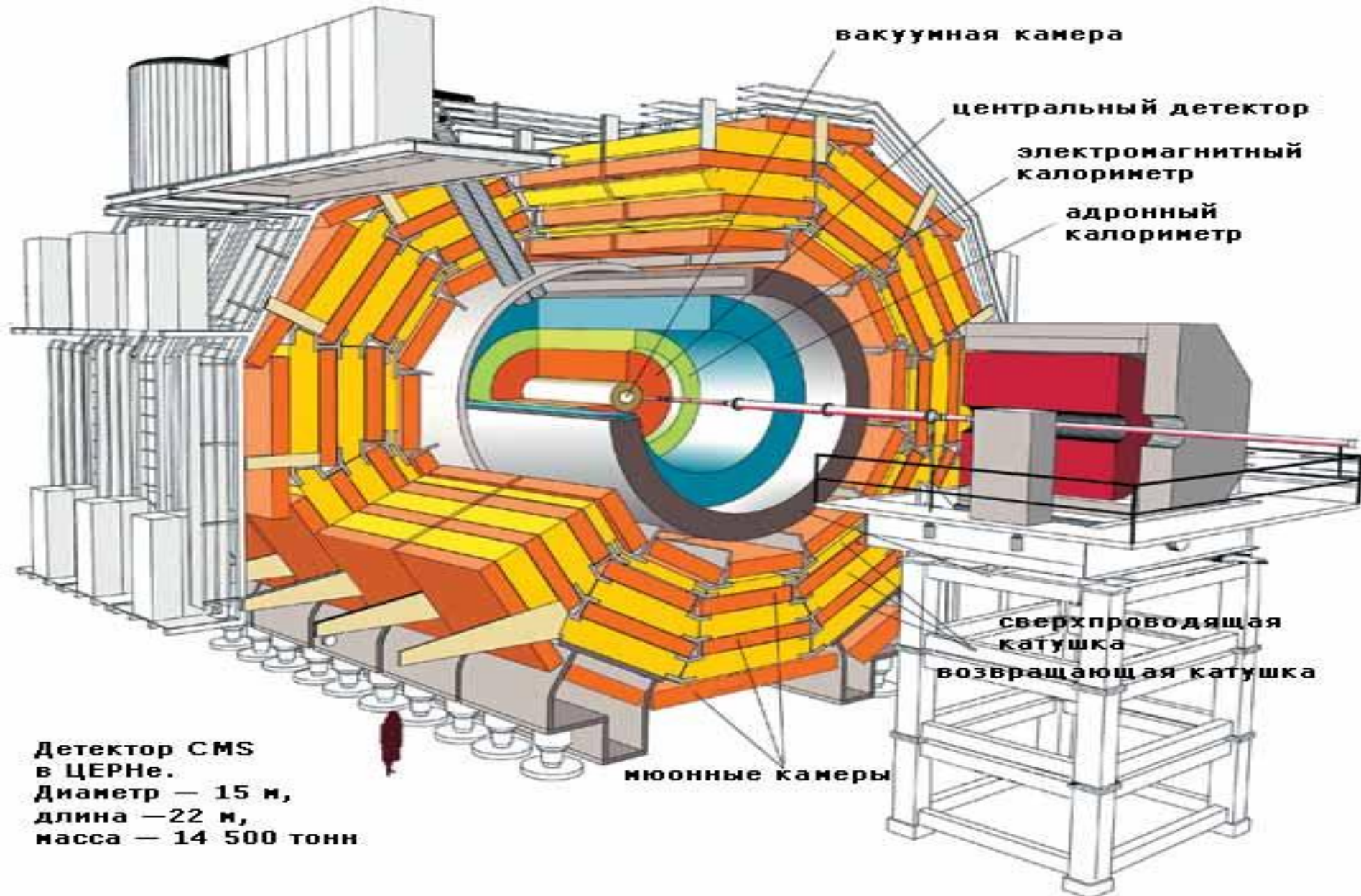
$$m_p = 7000m_0$$
$$l = 27 \text{ км}$$
$$E_k = 7 \text{ ТэВ}$$





Строение

БАКа

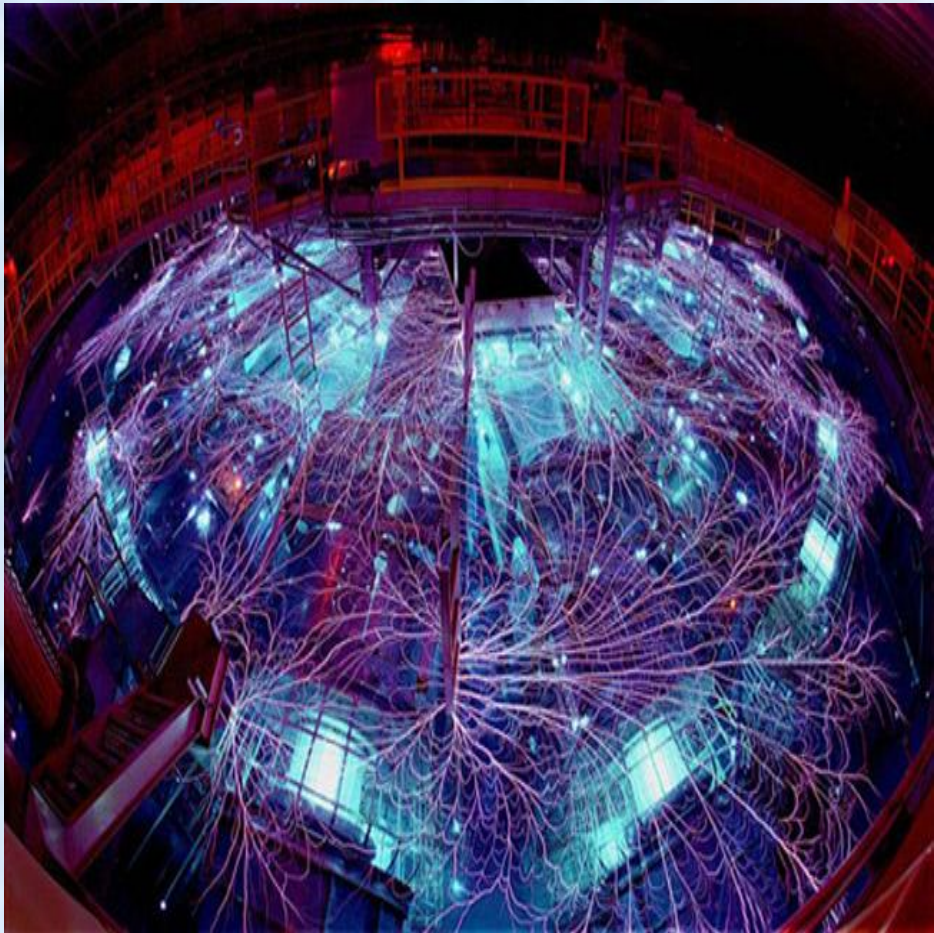


ТЕВАТРОН

- Теватрон ([англ. Tevatron](#)) — кольцевой ускоритель-[коллайдер](#), расположенный в [национальной ускорительной лаборатории им. Энрико Ферми](#) в городке Батавия штата [Иллинойс](#), недалеко от [Чикаго](#). В настоящее время он имеет самую высокую в мире энергию пучков частиц. Теватрон — [синхротрон](#), ускоряющий заряженные частицы — [протоны](#) и [антипротоны](#) в подземном кольце длиной 6.3 км до энергии 980 [ГэВ](#) (~ 1 [ТэВ](#)), отсюда машина получила свое имя - Теватрон^[1]. Строительство Теватрона было закончено в 1983 г., стоимость постройки — около 120 млн долл., с тех пор Теватрон претерпел несколько модернизаций. Наиболее крупной было строительство *Главного Инжектора*, проводившееся в течение 5 лет (1994-1999). До 1994 г. каждый пучок ускорителя имел энергию 900 ГэВ.



Состав ускорительного комплекса Теватрона



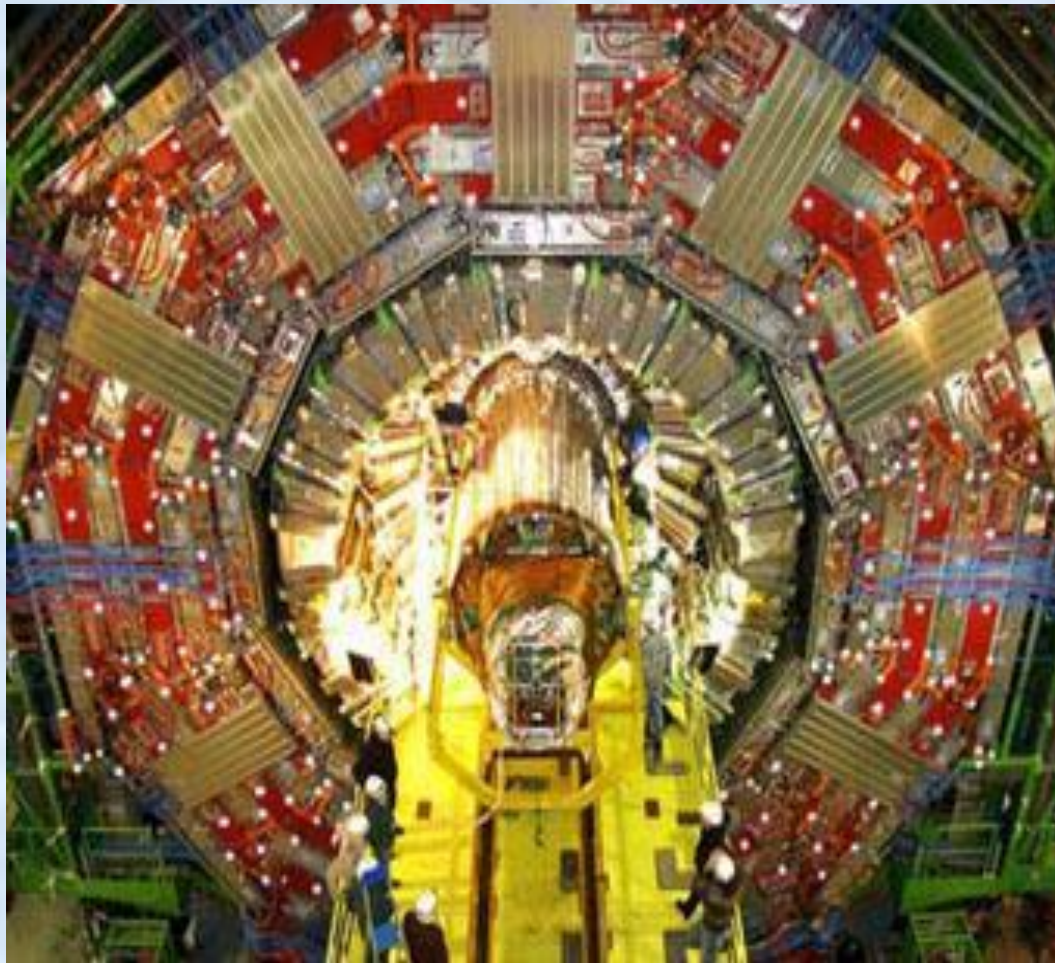
Ускорение частиц в Теватроне происходит в несколько этапов. На первой стадии 750 [кэВ](#) преускоритель - [генератор Кокрофта-Волтона](#) ускоряет отрицательно заряженные ионы водорода. Ионы пролетают 150-метровый [линейный ускоритель](#) (линак), ускоряющий частицы с помощью переменного электрического поля до энергии 400 [МэВ](#). Затем ионы проходят через углеродную фольгу, теряют электроны и уже протоны влетают в Бустер.

Теватрон ускоряет протоны и антипротоны до энергии 980 ГэВ, это означает, что кинетическая энергия частиц в 1000 раз больше, чем их масса, а скорость практически равна максимальной в Природе - скорости света. Всего в туннеле Теватрона установлено 2 детектора - [CDF](#) и [D0](#). Для того, чтобы удержать частицы в канале ускорителя используются

[сверхпроводящие](#) дипольные [магниты](#),

содержащиеся в жидком

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.

Ещё Эйнштейн в последние годы жизни хотел разработать Единую теорию поля, но количество эмпирического материала было тогда недостаточно. Во второй трети XX века физикам удалось разработать Стандартную Модель (СМ), которая объединяла три из четырёх фундаментальных взаимодействий — сильное, слабое и электромагнитное.



В конце XX века физики начали разрабатывать теорию, которая смогла бы объединить все четыре взаимодействия. Оказалось, однако, что добавить в СМ гравитационное взаимодействие чрезвычайно трудно. 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, теория бран, а также перспективная М-теория.

Этот ускоритель 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 суперструн. Подтверждение существования суперсимметрии, таким образом, будет

- **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 фермионского коллайдера.
- В то же время теоретические расчеты показывают, что даже небольшое увеличение массы t -кварка должно весьма значительно повышать массу хиггсовского бозона.

- 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.

- Сейчас ЦЕРН строит самый мощный ускоритель, **LHC** (Large Hadron Collider) – **Большой адронный коллайдер (БАК)**
- **Диаметр кольца ускорителя 20 км.**
- Его энергии должно хватить и для долгожданной поимки хиггсовского бозона.
- Новый суперускоритель ЦЕРНа будет запущен в 2007 году, так что ждать осталось уже недолго.

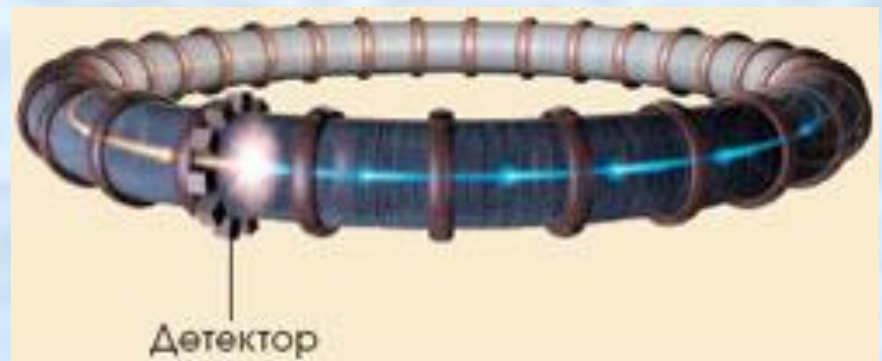
Поворачивающий
магнит

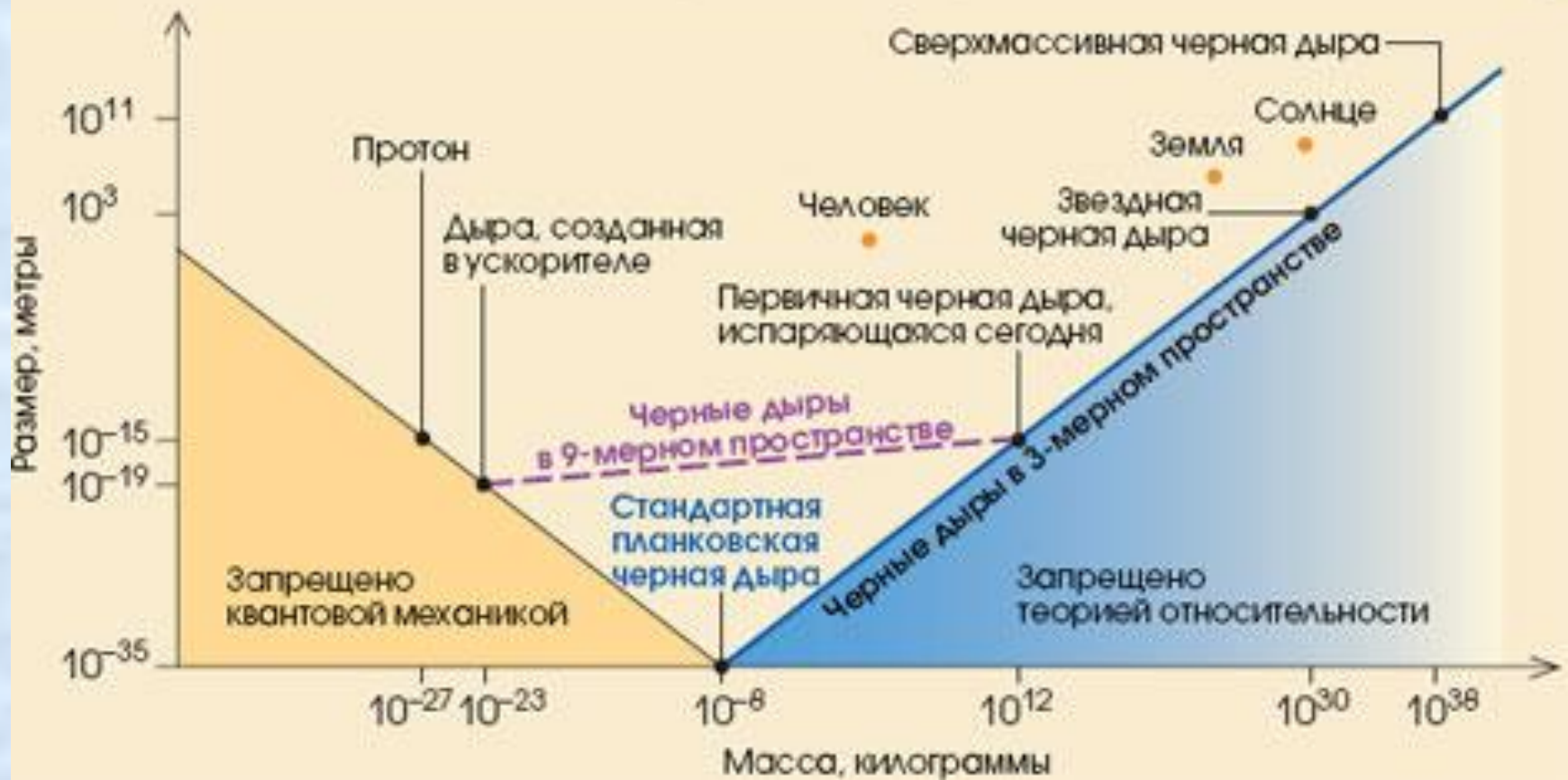




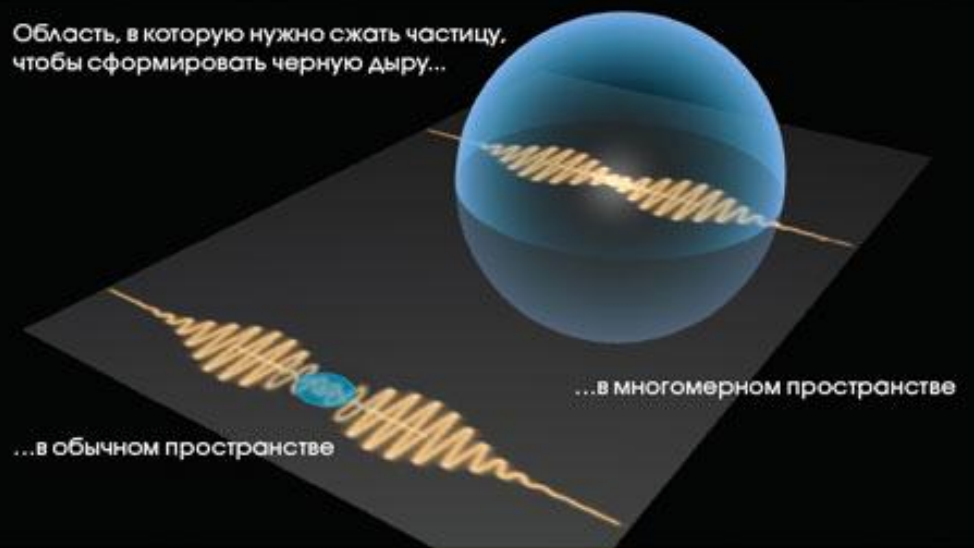
Космические лучи, частицы высокой энергии от космических источников, попадая в атмосферу Земли, могут рождать черные дыры. Взрываясь, последние будут излучать кванты и вторичные частицы, которые можно зарегистрировать у поверхности Земли.

Ускоритель типа БАК сможет столкнуть две частицы с такой силой, что они, возможно, сколлапсируют в черную дыру. Датчики могли бы зарегистрировать последующий распад дыры.



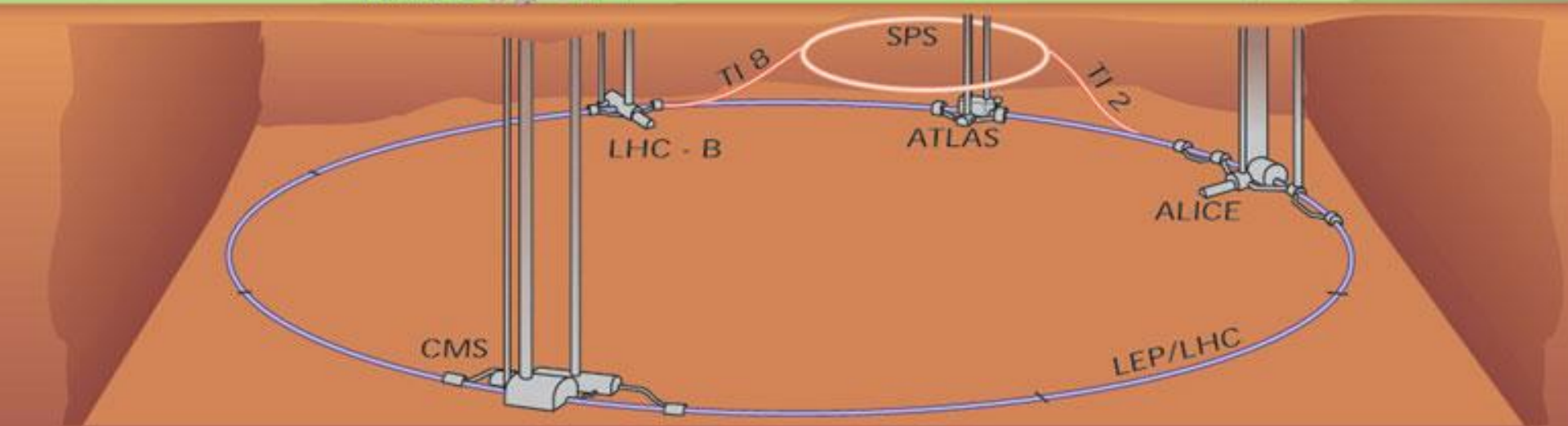
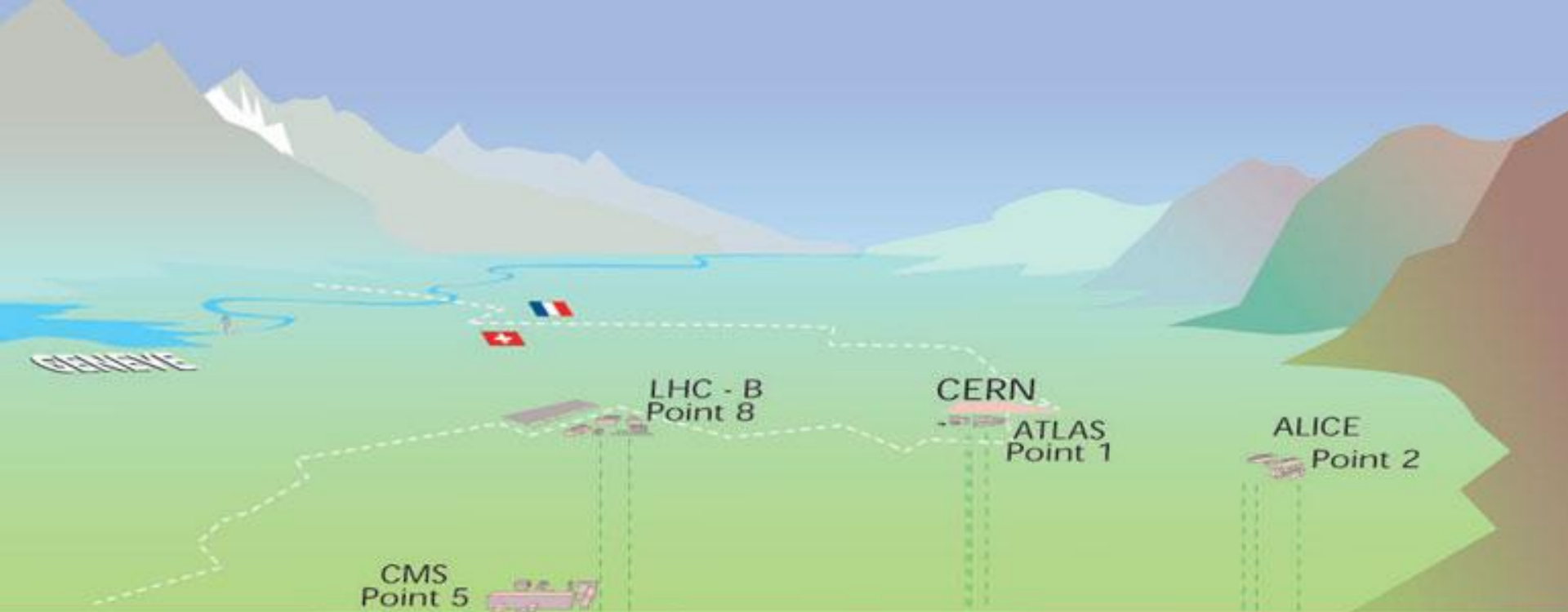


Область, в которую нужно сжать частицу, чтобы сформировать черную дыру...

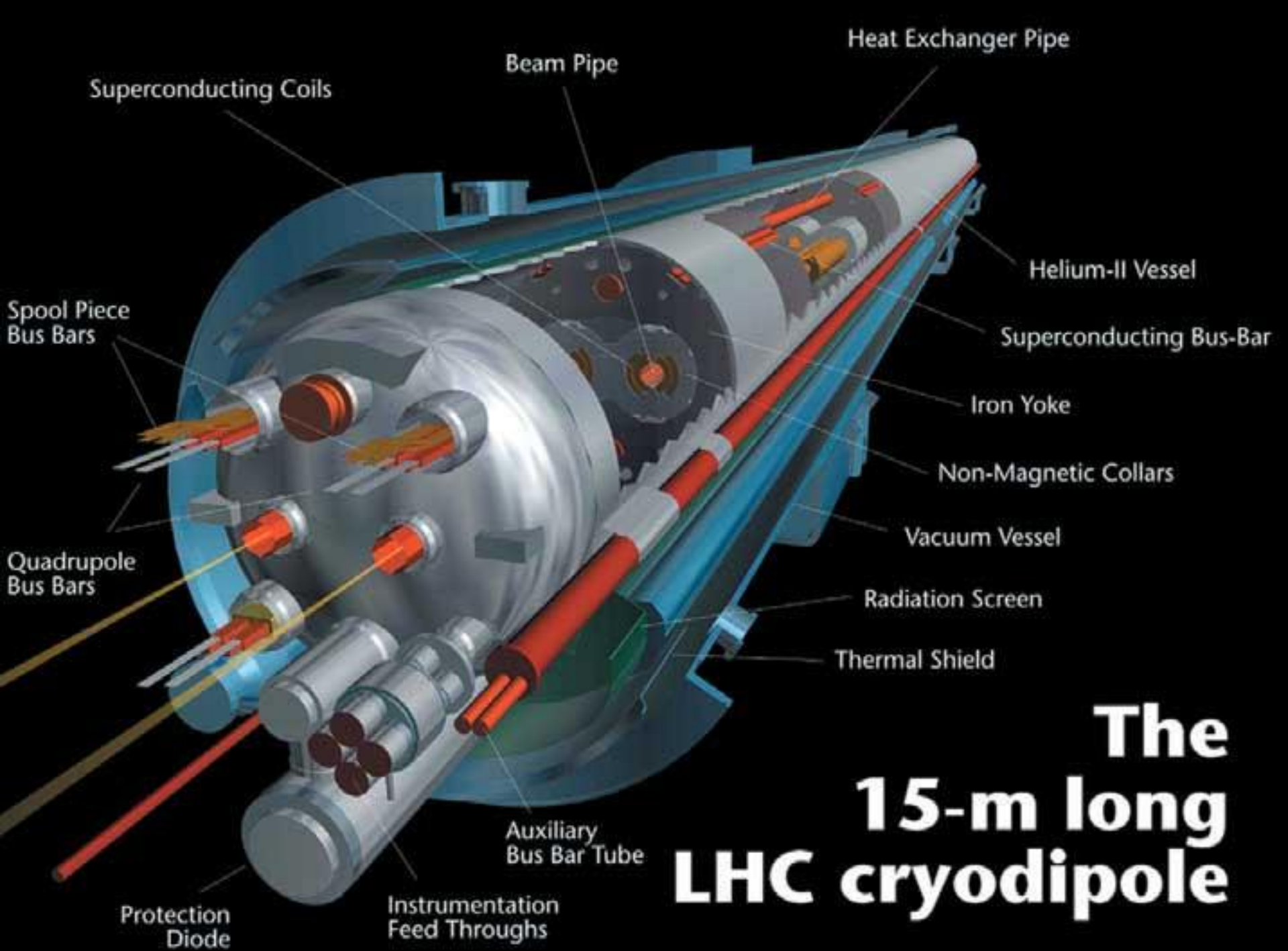


...в многомерном пространстве

...в обычном пространстве

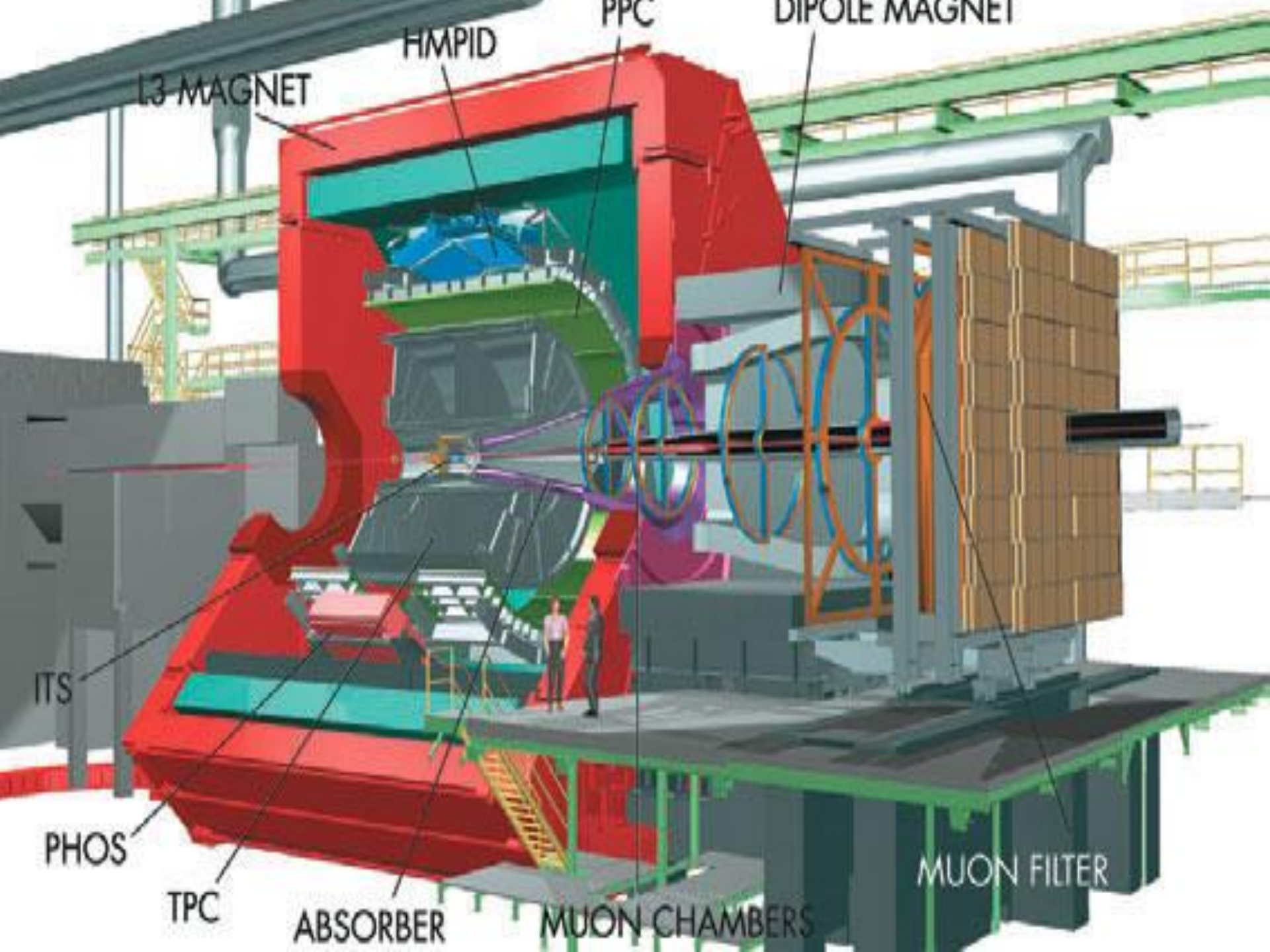


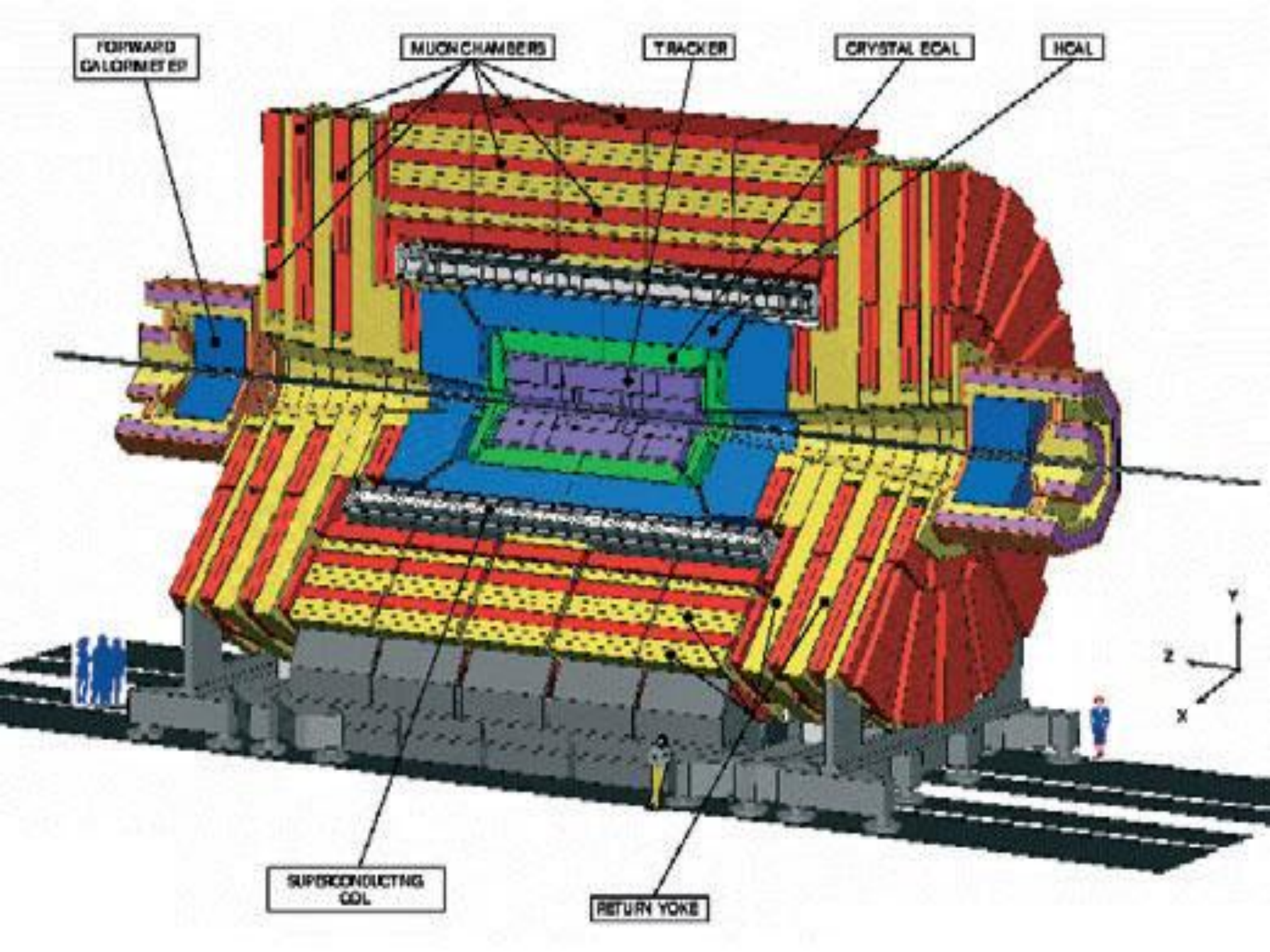
Большой андронный коллайдер

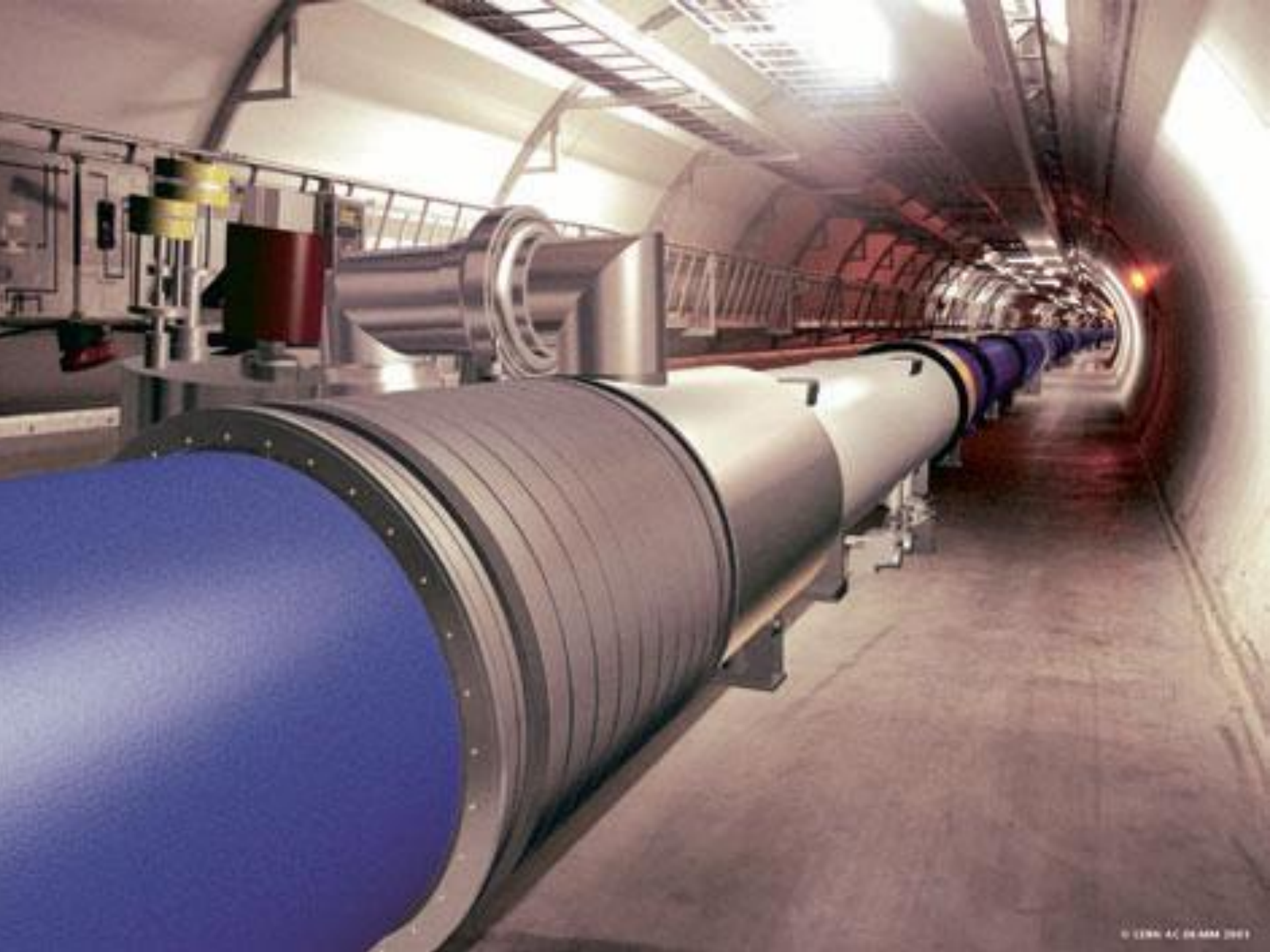


The 15-m long LHC cryodipole









Лекция окончена!