

Действие магнитного поля на заряженные частицы.

Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, обусловлена действием сил на отдельные движущиеся заряды (носители тока – электроны), а уже от них действие передается проводнику, по которому они перемещаются. Этот вывод подтверждается целым рядом опытных фактов и в частности тем, что пучок свободно летящих электронов, отклоняется магнитным полем.

Действие магнитного поля на заряженные частицы.

Сила Лоренца

Закон Ампера: на элемент dl проводника с током I действует сила

$$d\vec{F} = I[d\vec{l}, \vec{B}] \quad Id\vec{l} = \vec{j}Sdl$$

⇓

$$d\vec{F} = Sdl[\vec{j}, \vec{B}] = dV[\vec{j}, \vec{B}]$$

⇓

$$\vec{j}' = \frac{d\vec{F}}{dV} = [\vec{j}, \vec{B}] -$$

“плотность” силы, т.е. сила, действующая на единицу объема проводника

Действие магнитного поля на заряженные частицы. Сила Лоренца

Поскольку $\vec{j} = nq\vec{v}$,

то из $\vec{f}' = \frac{d\vec{F}}{dV} = [\vec{j}, \vec{B}]$ следует, что

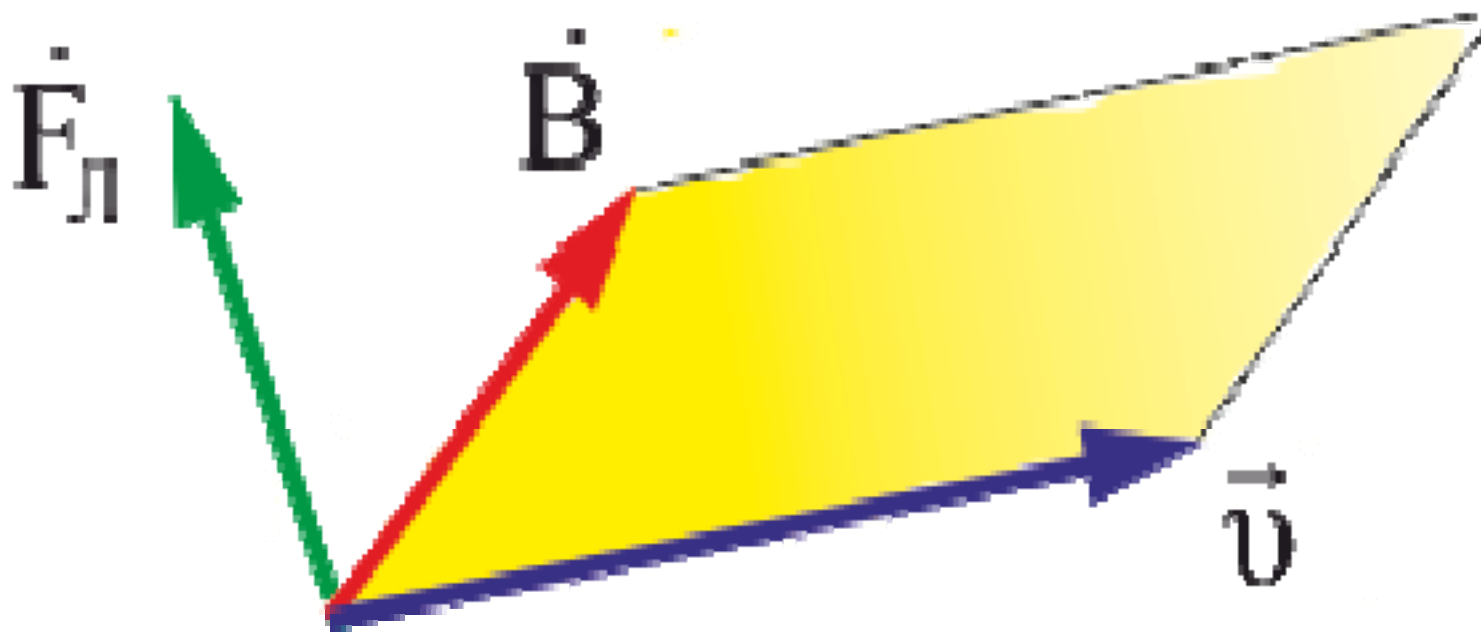
$$\vec{f}' = nq[\vec{v}, \vec{B}],$$

Где n - плотность зарядов в единице объема.

Отсюда $\vec{F}_{л.} = \frac{\vec{f}'}{n} = q[\vec{v}, \vec{B}]$ сила,

действующая на заряд, движущийся в
магнитном поле – **сила (магнитная) Лоренца**

$$\vec{F}_{\text{Л}} = q[\vec{v}, \vec{B}]$$



$$F_{\text{Л}} = |q|vB \sin \alpha.$$

Сила Лоренца $\vec{F}_L = q[\vec{v}, \vec{B}]$

Так как сила Лоренца направлена перпендикулярно движущемуся заряду, т.е. перпендикулярно \vec{v} , работа этой силы всегда равна нулю. Следовательно, действуя на заряженную частицу, сила Лоренца не может изменить кинетическую энергию частицы.

Постоянное магнитное поле изменяет направление движения частицы, но не величину скорости.

Сила Лоренца

Если есть и электрическое поле, то на заряд действуют две силы:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}] \quad - \text{ формула Лоренца.}$$

здесь электрическая сила $q\vec{E}$ ускоряет частицу и изменяет ее энергию.

Часто лоренцевой силой называют эту сумму электрических и магнитных сил

Сила Лоренца

Сила, действующая на электрический заряд q во внешнем электромагнитном поле, зависит не только от его местоположения и напряженности электрического поля $\mathbf{E}(x,y,z)$ в этой точке: $q\mathbf{E}(x,y,z)$, но, в общем случае, и от скорости его движения \mathbf{v} и величины индукции магнитного поля $\mathbf{B}(x,y,z)$.

Магнитная часть силы Лоренца оставляет неизменной энергию заряда, а меняет лишь направление импульса.

Формула Лоренца позволяет связать уравнения электромагнитного поля с уравнениями движения заряженных частиц:

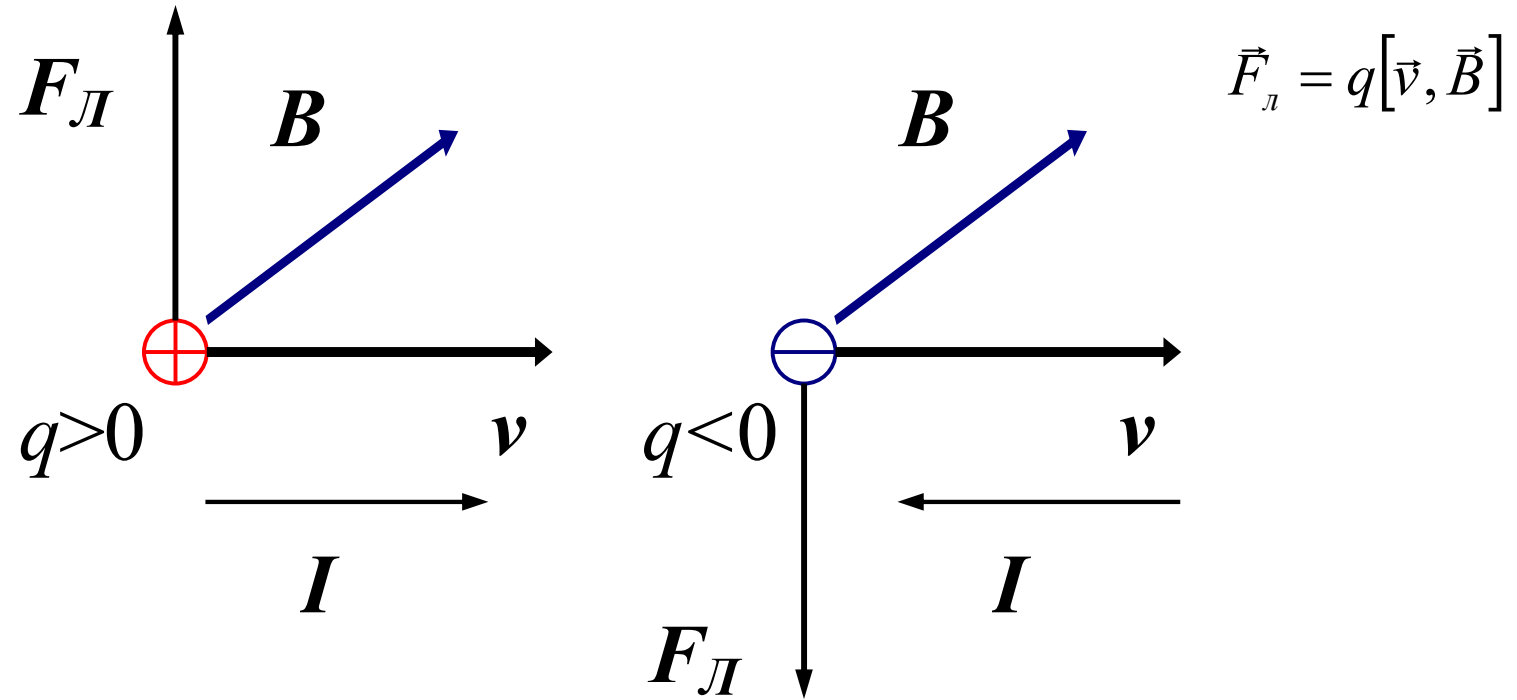
$$\vec{F} = \vec{F}_K + \vec{F}_L \qquad \vec{F} = m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}$$

⇓

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}]$$

Действуют оба поля - электрическое E и магнитное B .

Сила Лоренца



Сила Лоренца, действующая в магнитном поле на движущиеся в одном направлении положительные и отрицательные заряды, имеет противоположное направление.

Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле

- $\alpha = 0^0$. $\vec{F}_L = q[\vec{v}, \vec{B}]$

$$F_L = |q|vB \sin \alpha = 0$$

Траектория движения – прямая линия.

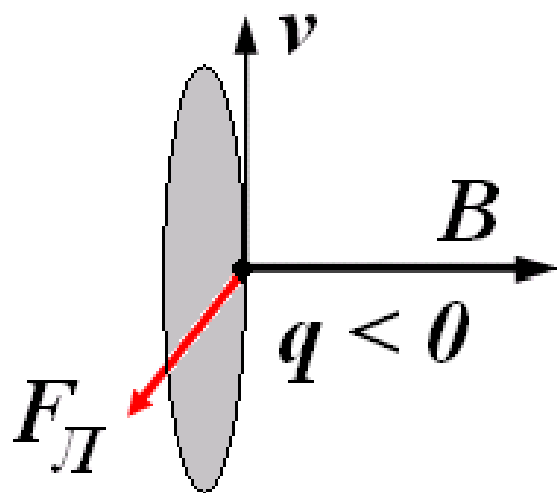


Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле

• $\alpha = 90^\circ$. $\vec{F}_L = q[\vec{v}, \vec{B}]$ $F_L = |q|vB \sin \alpha = |q|vB$

$$F_L = |q|vB = ma_{\text{ц}} = \frac{mv^2}{R} \quad \Rightarrow \quad |q|B = \frac{mv}{R}; \quad v = \frac{|q|BR}{m}$$

$$T = \frac{2\pi R}{v}$$



$$T = 2\pi \left| \frac{m}{q} \right| \cdot \frac{1}{B} \quad - \quad \text{период обращения частицы}$$

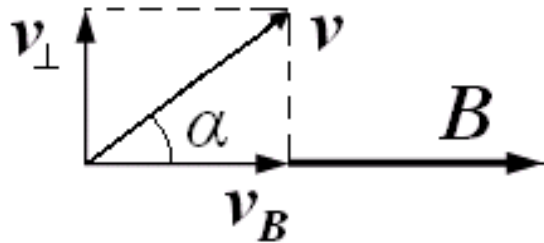
не зависит от её скорости v .

Траектория движения – **окружность**.

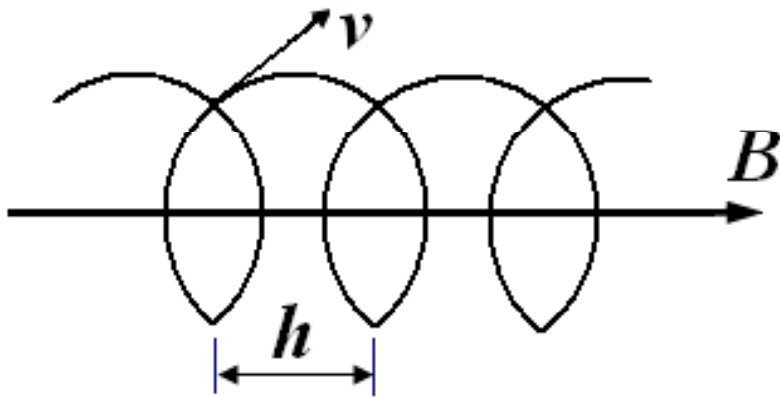
Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле

- $0^\circ < \alpha < 90^\circ$. $\vec{F}_L = q[\vec{v}, \vec{B}]$

$$F_L = qv_\perp B = \frac{mv_\perp^2}{R} \Rightarrow qB = \frac{mv \sin \alpha}{R}; \quad v \sin \alpha = \frac{qBR}{m}.$$



$$T = \frac{2\pi R}{v \sin \alpha} = \frac{2\pi R \cdot m}{qBR} = 2\pi \left| \frac{m}{q} \right| \frac{1}{B}.$$



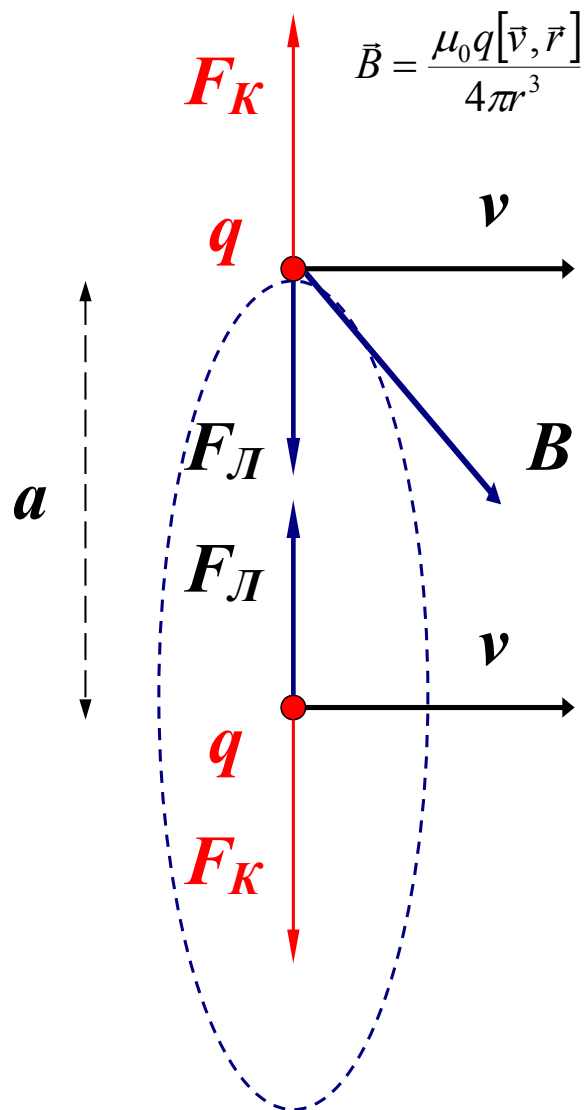
Шаг спирали:

$$h = v_B T = \frac{2\pi}{B} \left| \frac{m}{q} \right| v \cos \alpha.$$

Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле

$$T = 2\pi \left| \frac{m}{q} \right| \frac{1}{B}. \quad h = \frac{2\pi}{B} \left| \frac{m}{q} \right| v \cos \alpha.$$

Параллельное движение двух заряженных частиц



$$F_K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{a^2}$$

$$\vec{F}_L = q[\vec{v}, \vec{B}]; \quad F_L = qvB.$$

v – скорость заряженной частицы q ;
 B – магнитное поле, создаваемое в точке расположения первой заряженной частицы, другой движущейся заряженной частицей.

Параллельное движение двух заряженных частиц

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 q [\vec{v}, \vec{r}]}{4\pi r^3}; \quad |\vec{r}| = a; \quad \angle \vec{v}, \vec{r} = 90^\circ. \quad \Rightarrow$$

$$B = \frac{\mu_0 q v}{4\pi a^2} \quad \begin{matrix} F_L = q v B \\ \Rightarrow \end{matrix} \quad F_L = \frac{\mu_0 q^2 v^2}{4\pi a^2}. \quad F_K = \frac{1}{4\pi \varepsilon_0} \frac{q^2}{a^2}$$

$$\frac{F_L}{F_K} = \varepsilon_0 \mu_0 v^2 = \frac{v^2}{c^2}.$$

$$\varepsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2} = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \approx \frac{1}{9 \cdot 10^{16}} \frac{\text{с}^2}{\text{м}^2}.$$

Параллельное движение двух заряженных частиц

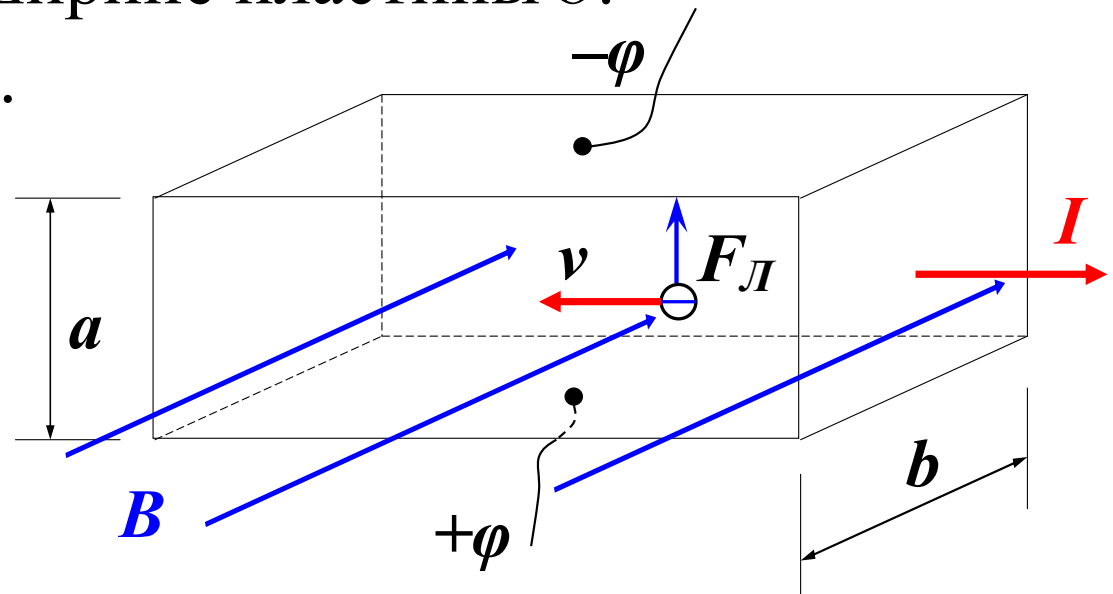
- Модуль силы Лоренца F_L всегда меньше модуля кулоновской силы F_K .
- F_L стремится к F_K при $v \rightarrow c$, поэтому магнитные силы называют релятивистской добавкой к кулоновским силам.

Эффект Холла 1880 г.

Через золотую пластину пропускался ток I ; перпендикулярно боковым граням было направлено магнитное поле индукцией B ; между верхней и нижней гранями возникала разность потенциалов $\Delta\varphi$, величина которой была пропорциональна I, B и обратно пропорциональна ширине пластины b .

Если $B = 0$, то $\Delta\varphi = 0$.

$$\vec{F}_Л = q[\vec{v}, \vec{B}]$$

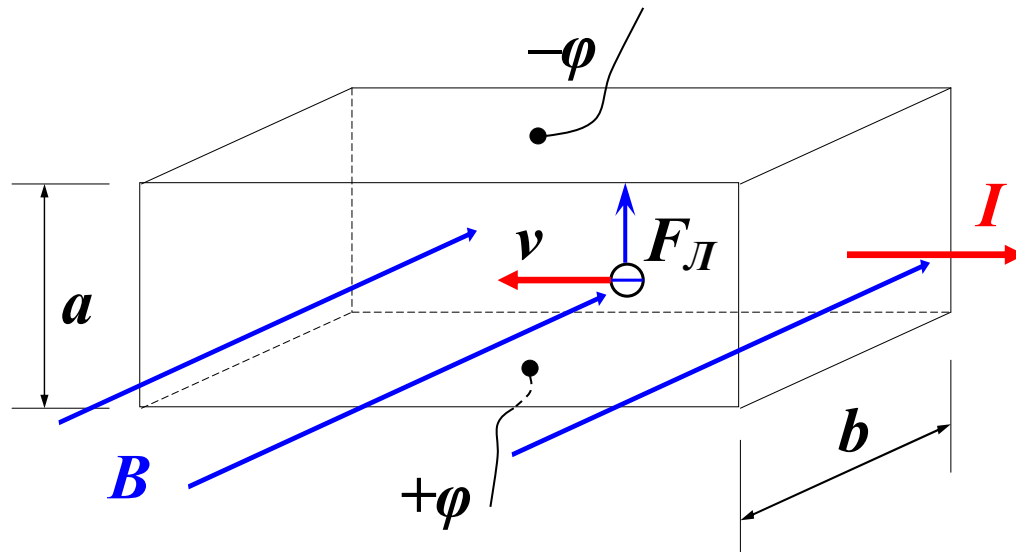


Эффект Холла

– в металле или полупроводнике с током, помещенном в магнитное поле, перпендикулярное к вектору плотности тока j , возникает поперечное электрическое поле и разность потенциалов $\Delta\varphi$.

Причина – сила Лоренца.

Эффект Холла



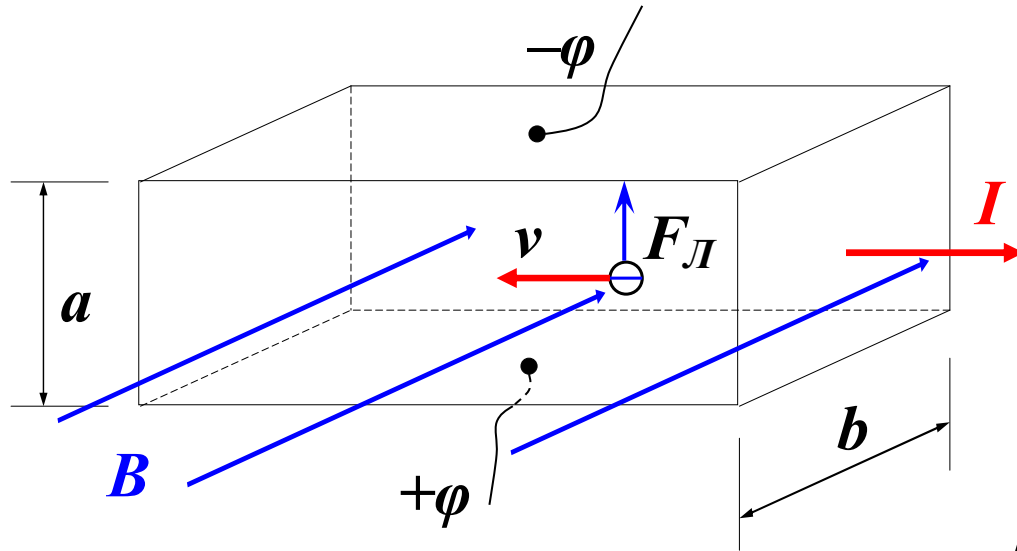
Пусть E напряженность электрического поля, обусловленного ЭДС Холла. Тогда

$$U = E a$$

Перераспределение зарядов под действием магнитного поля прекратится, когда сила “поля” Холла уравновесит лоренцеву силу, то есть

$$qE = qvB \quad \text{или} \quad E = vB$$

Эффект Холла



Плотность тока

$$j = nvq.$$

Тогда

$$v = \frac{j}{nq} \quad \text{и} \quad E = B \frac{j}{nq}$$

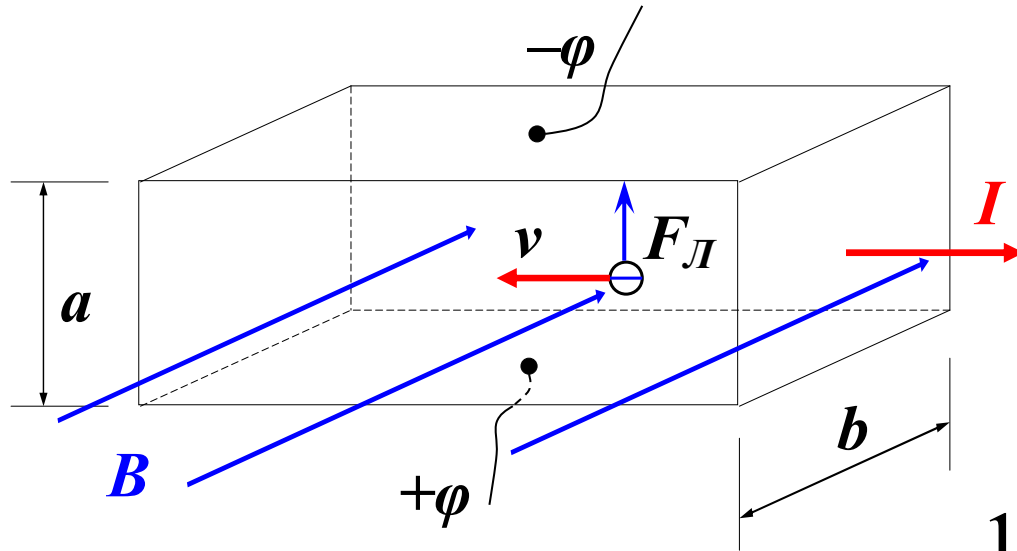
$$E = vB$$

$$U = Ea$$



$$U = B \frac{j}{nq} a = B \frac{I}{nqS} a = B \frac{Ia}{nqab} = B \frac{I}{nqb}$$

Эффект Холла



$$U = \frac{1}{nq} \frac{BI}{b}$$

$$U = R \frac{BI}{b}$$

$$R = \frac{1}{qn} \text{ — коэффициент Холла}$$

$$n = \frac{IB}{qbU} \text{ — число носителей заряда}$$

С помощью эффекта Холла можно определить тип проводимости полупроводника и концентрацию носителей тока в проводнике (если известен заряд носителей).

- $R_H < 0$, проводимость n -типа (электронный полупроводник).
- $R_H > 0$, проводимость p -типа (дырочный полупроводник).

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Классификация ускорителей

Линейные ускорители

Циклические ускорители

Классификация ускорителей

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



Любой ускоритель характеризуется:

- типом ускоряемых частиц,
- разбросом частиц по энергиям,
- интенсивностью пучка.

Ускорители подразделяются на

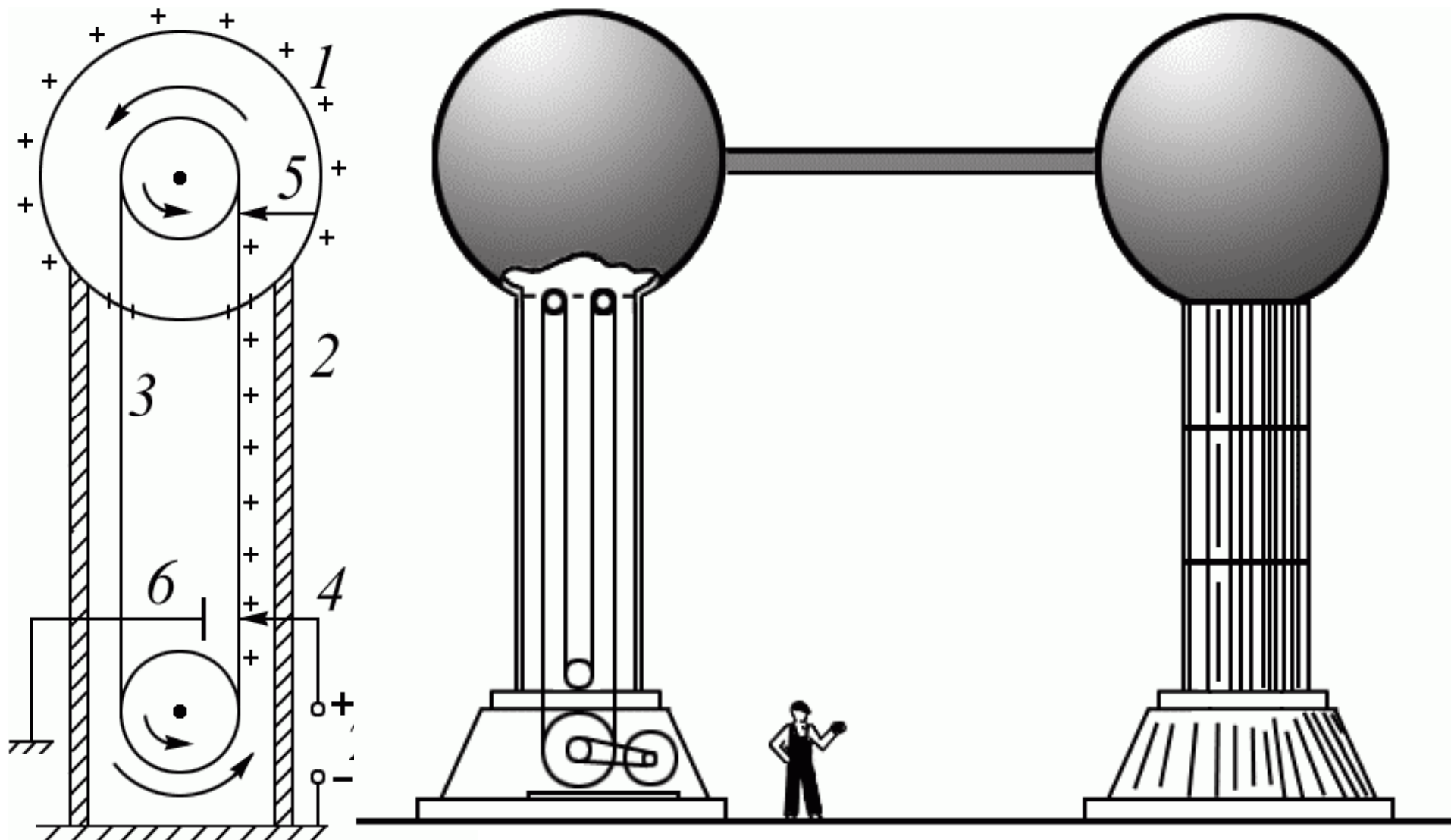
- **непрерывные** (*равномерный во времени пучок*)
- **импульсные** (*в них частицы ускоряются порциями – импульсами*).
Последние характеризуются длительностью импульса.

- 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.**

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) , Москва



- 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.

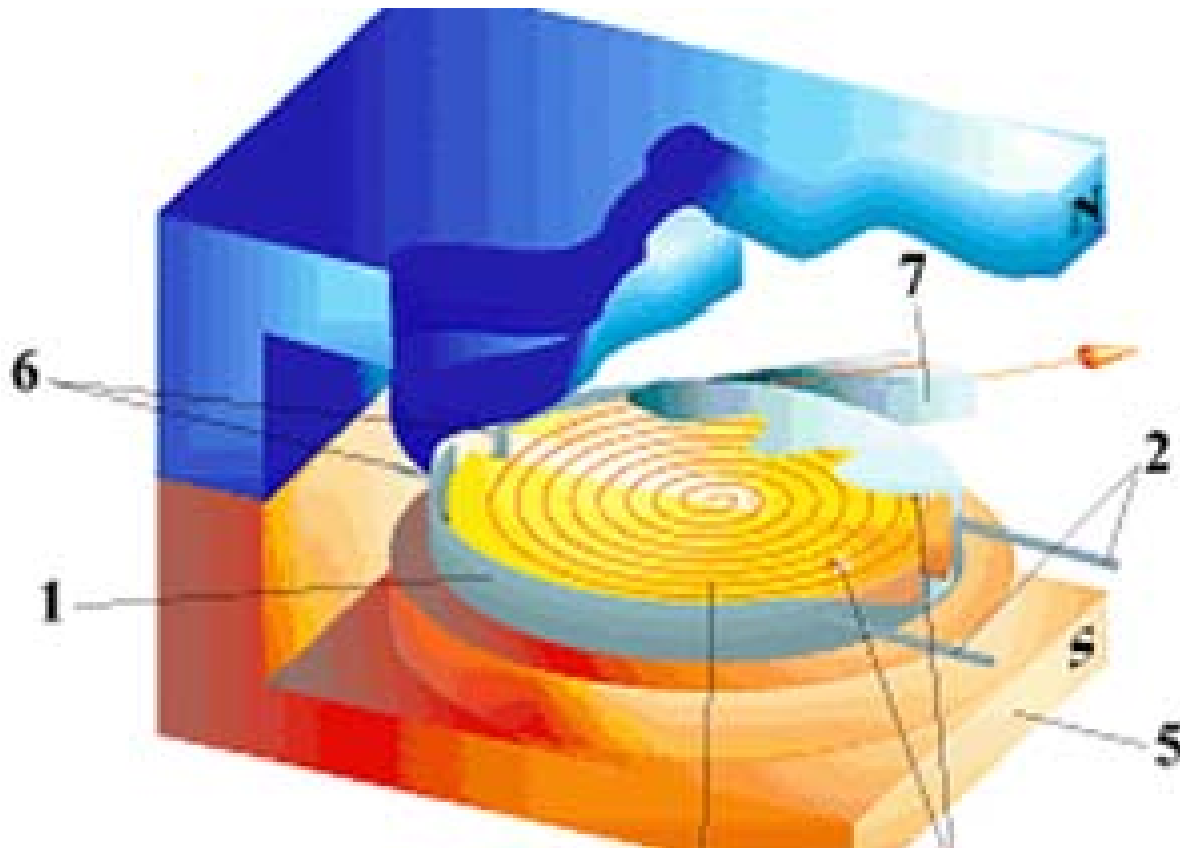
Горизонтальный электростатический ускоритель Ван-де-Граафа (AN-2500)



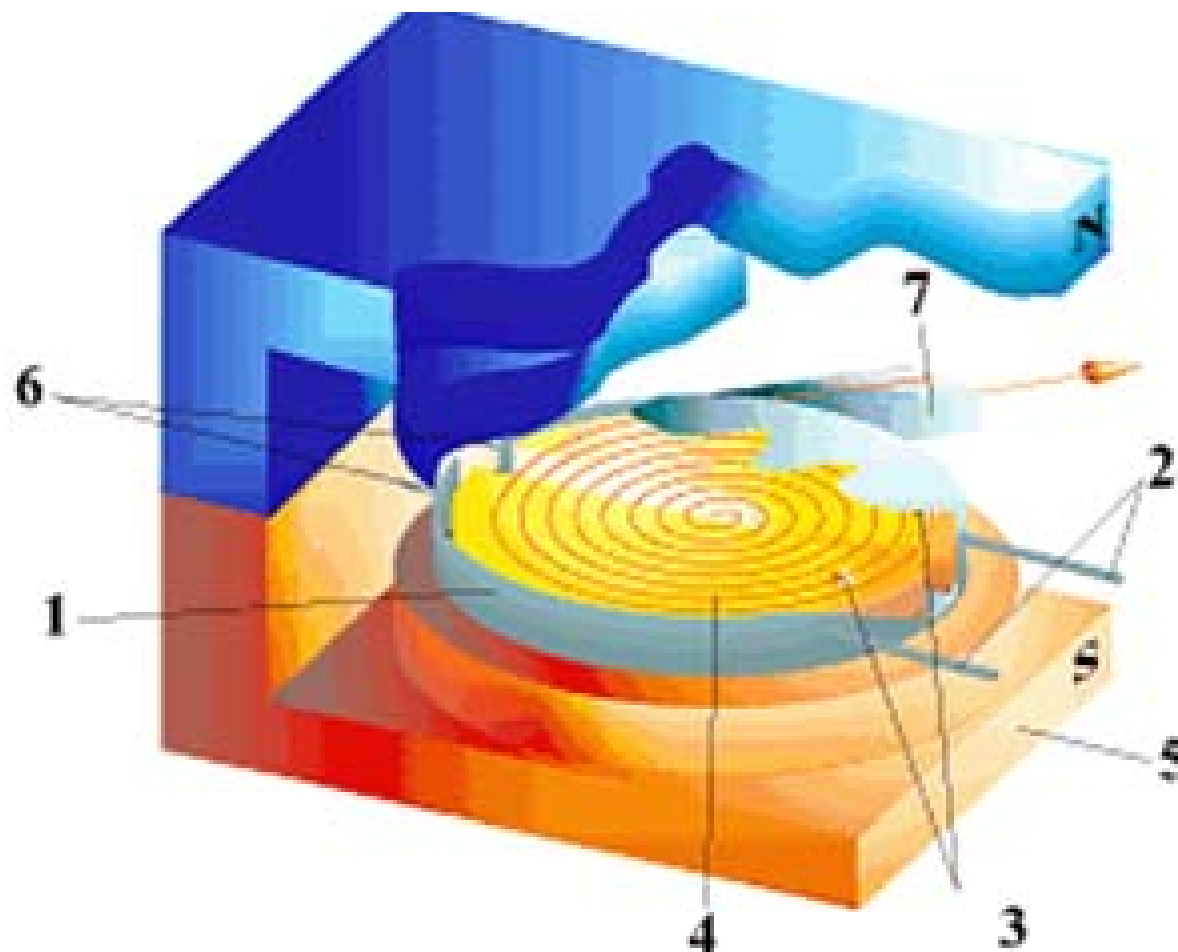
Горизонтальный электростатический ускоритель Ван-де-Граафа (AN-2500) с максимальной разностью потенциалов 2,5 МВ производства HVEE (Голландия). Ускоритель получен на основании Соглашения между Центром науки о материалах университета провинции Гронинген (Нидерланды) и НИИ ядерной физики им. Скобелева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

Циклические ускорители

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



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



- 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

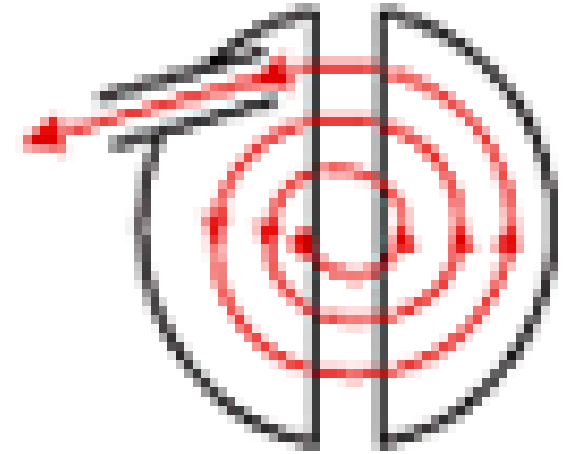
$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

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

В циклотроне заряженная частица разгоняется



Циклотрон

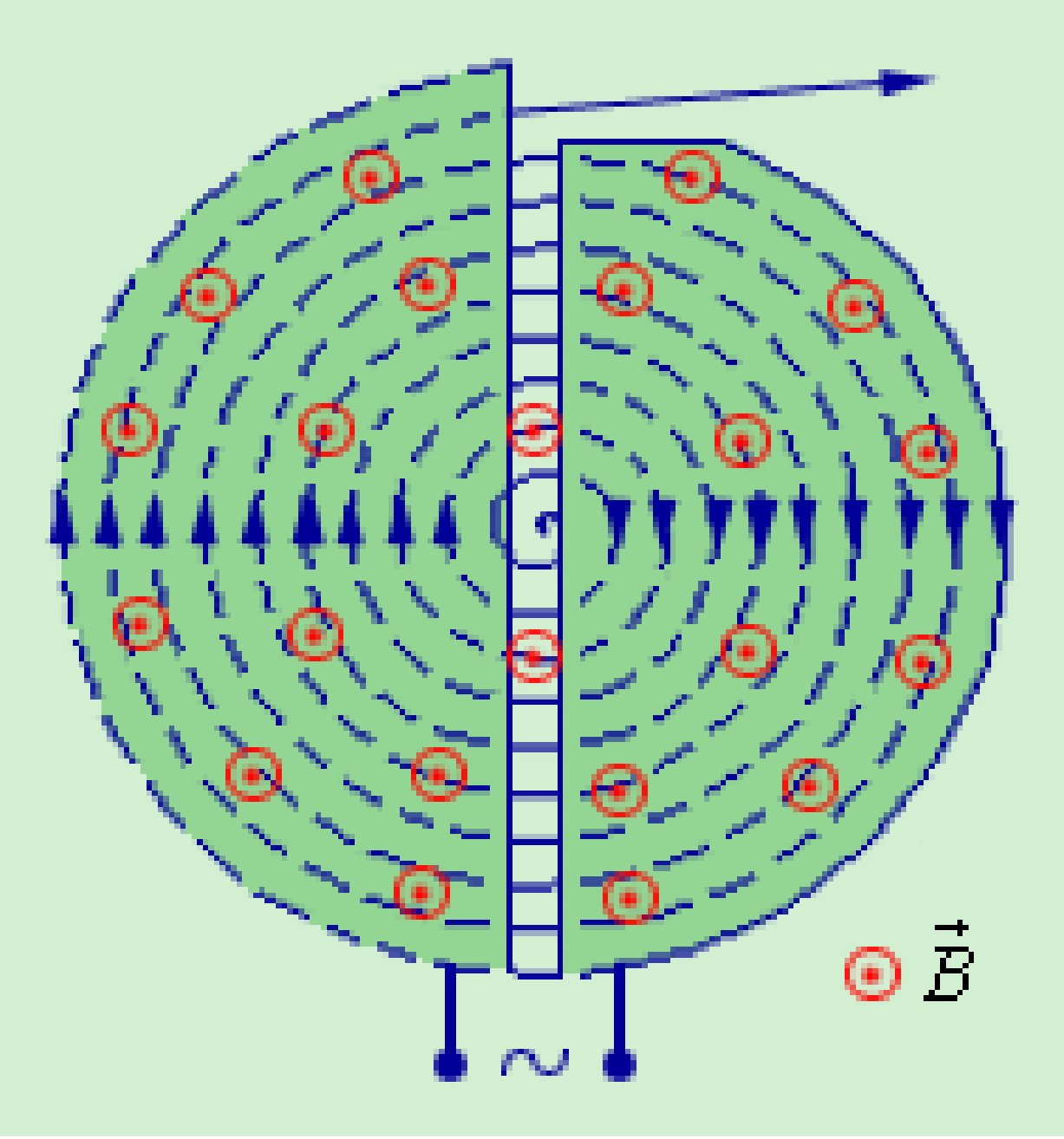


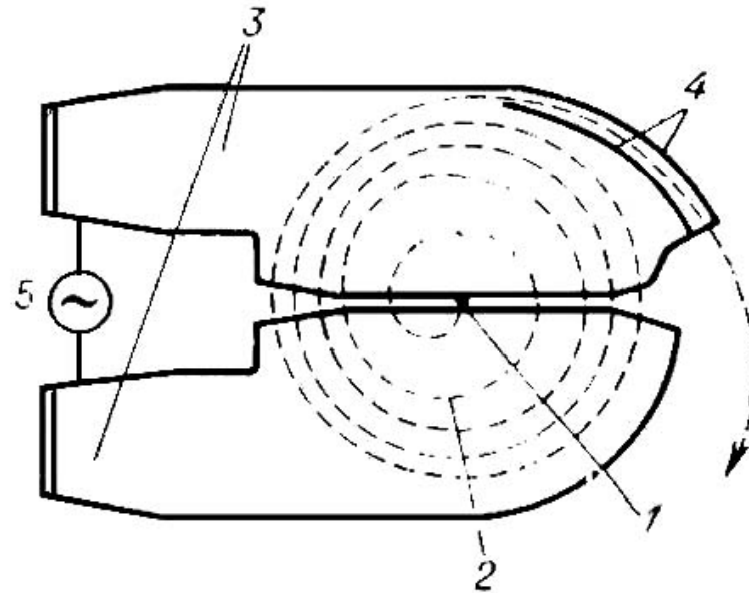
$$\vec{F}_L = q[\vec{v}, \vec{B}]$$

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

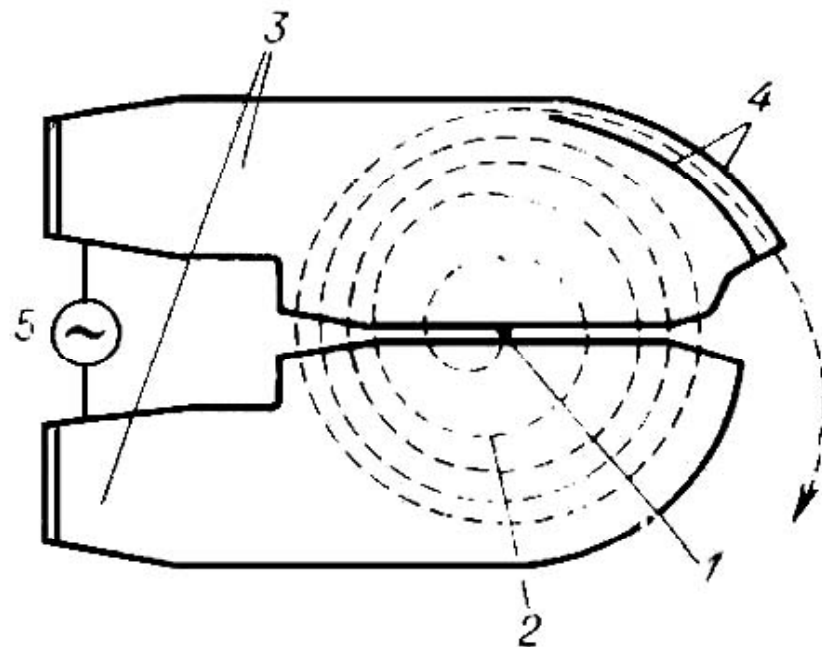
$$qB = \frac{mv}{R}$$

- 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.



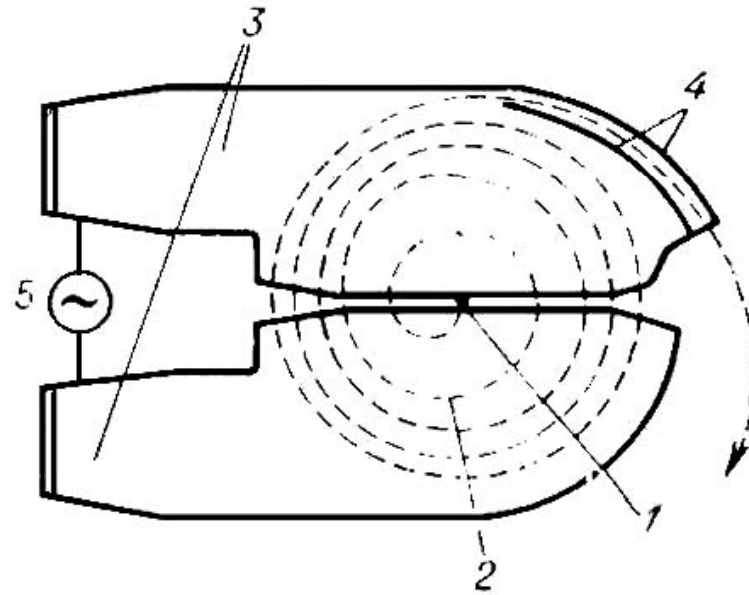


- Если заряженную частицу ввести в центр зазора (1) между дуантами, то она, ускоряемая электрическим и отклоняемая магнитным полями, войдет в дуант(3) и опишет полуокружность, радиус которой пропорционален скорости частицы.
- К моменту ее выхода из первого дуанта полярность напряжения изменяется, поэтому частица вновь ускорится и, переходя во второй дуант, описывает там полуокружность уже большего радиуса (2) и т.д.



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

- 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.

$$T = 2\pi \left| \frac{m}{q} \right| \frac{1}{B}.$$

- Период обращения частицы

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

- Радиус траектории частицы

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

$$F_{Л} = qvB = ma_{ц} = \frac{mv^2}{R} \quad \Rightarrow \quad qB = \frac{mv}{R}$$

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

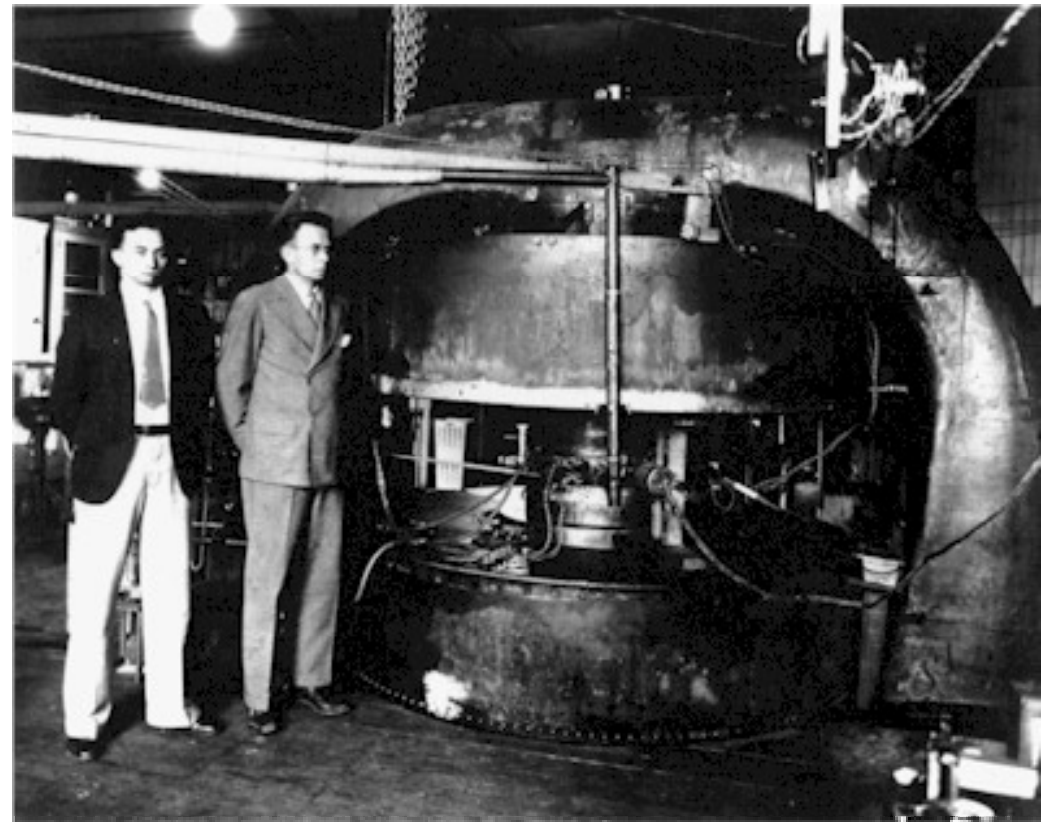


Рис. 2. С. Ливингстоун и Э. Лоуренс у 27-дюймового циклотрона, который широко использовался в экспериментальных исследованиях ядерных реакций и искусственной радиоактивности

- 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.

- **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.

$$T = 2\pi \left(\frac{m}{q} \right) \frac{1}{B}$$

- 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.
-

- *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.

- **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.

$$T = 2\pi \left(\frac{m}{q} \right) \frac{1}{B}$$

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

- **Движение частиц в фазотроне, как и в циклотроне, происходит по раскручивающейся спирали.**
- Частицы в фазотроне ускоряются **до энергий** примерно равных **1 ГэВ**
- ограничения здесь определяются размерами фазотрона, так как с ростом скорости частиц растет радиус их орбиты.

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



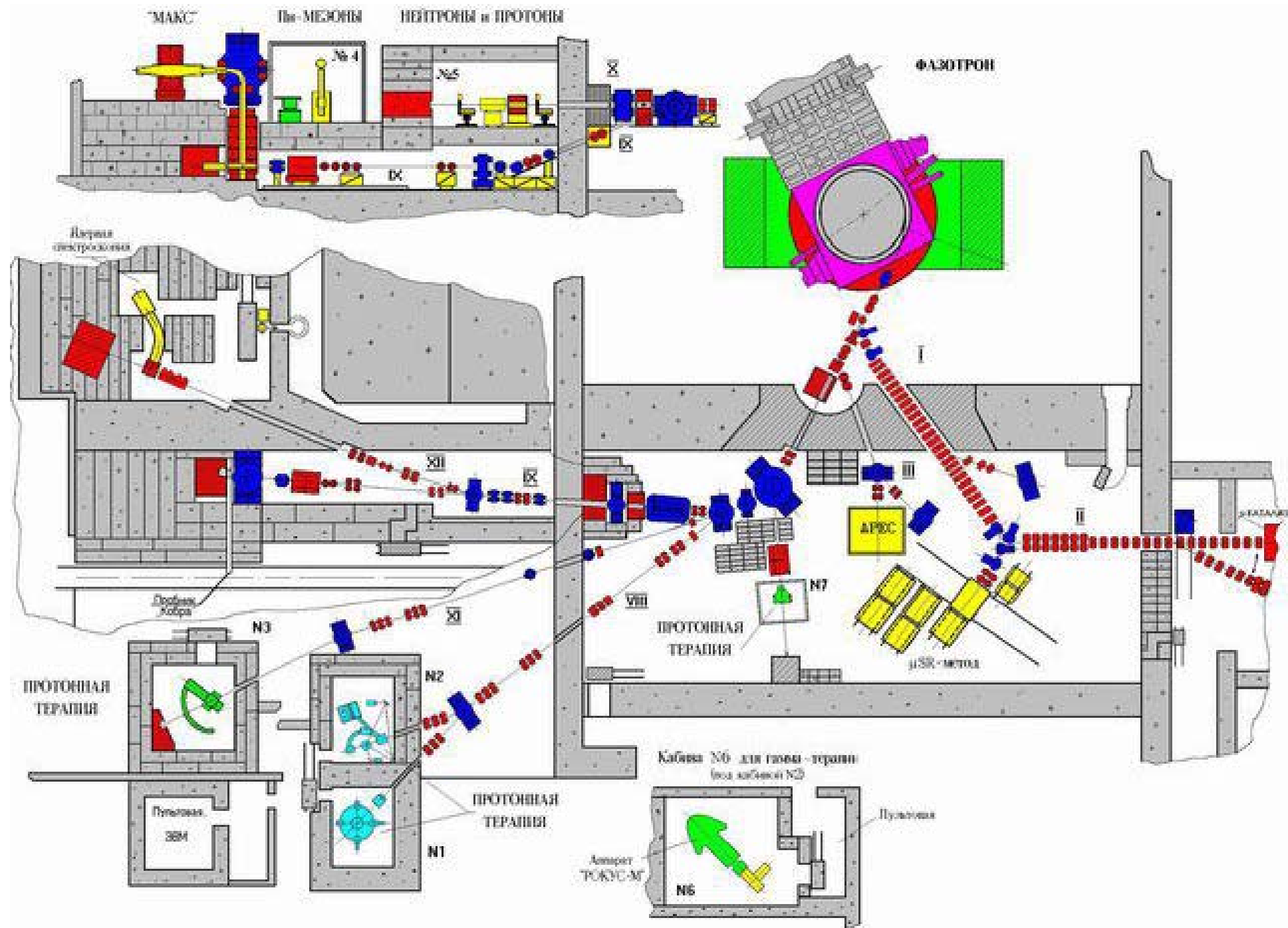


СХЕМА ПУЧКОВ ФАЗОТРОНА ЛИН ОИИИ

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

$$T = 2\pi \left(\frac{m}{q} \right) \frac{1}{B}$$

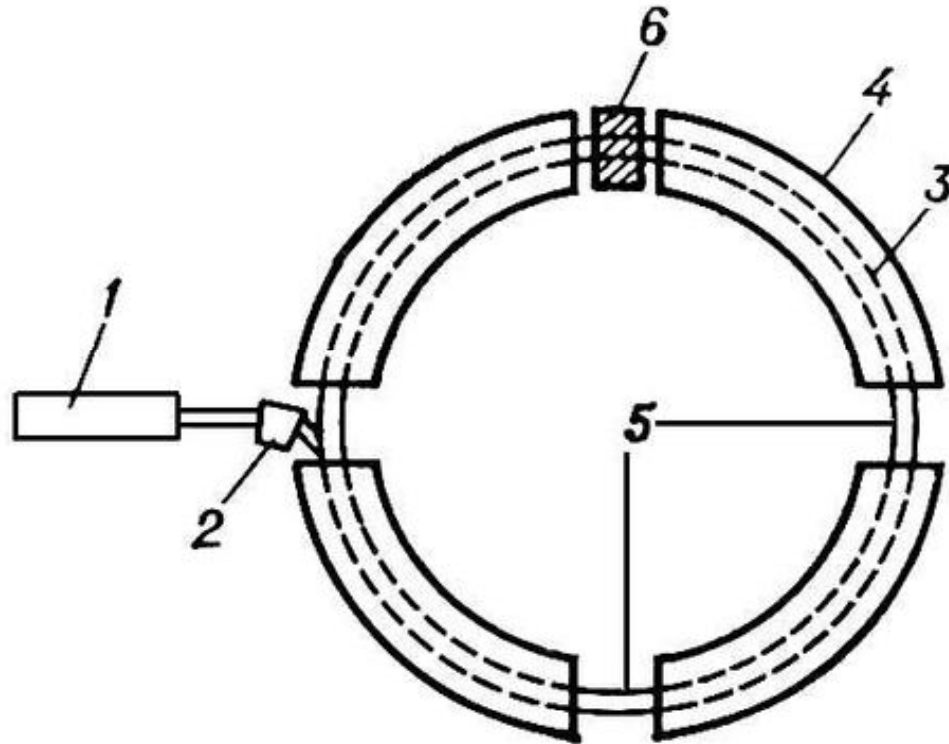
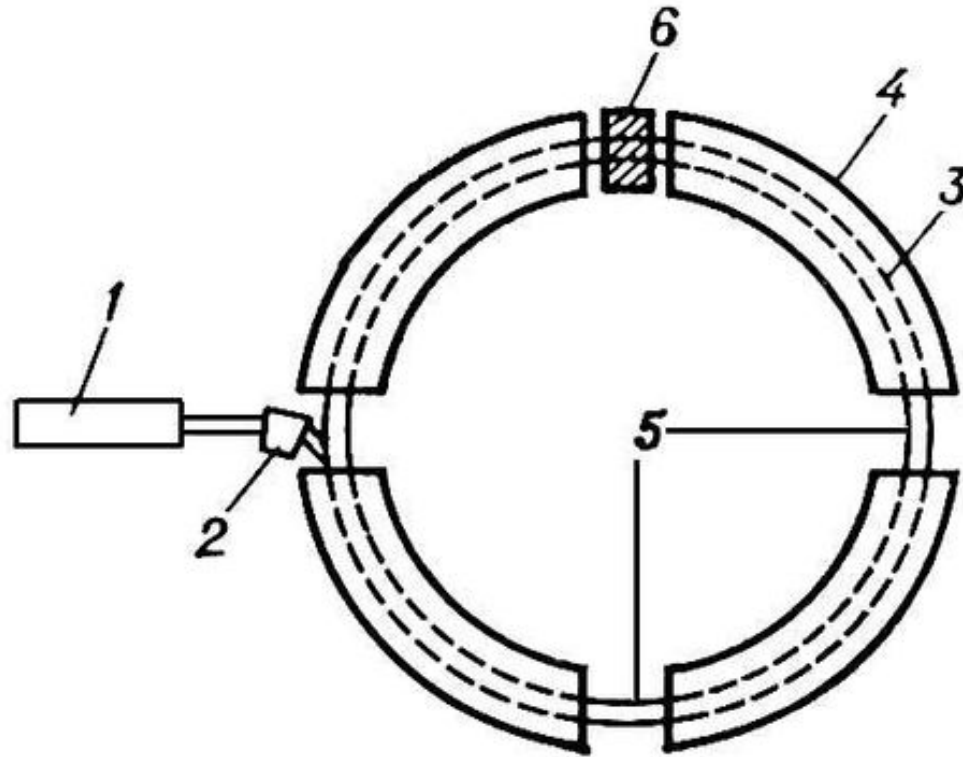


Схема строения синхротрона:

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



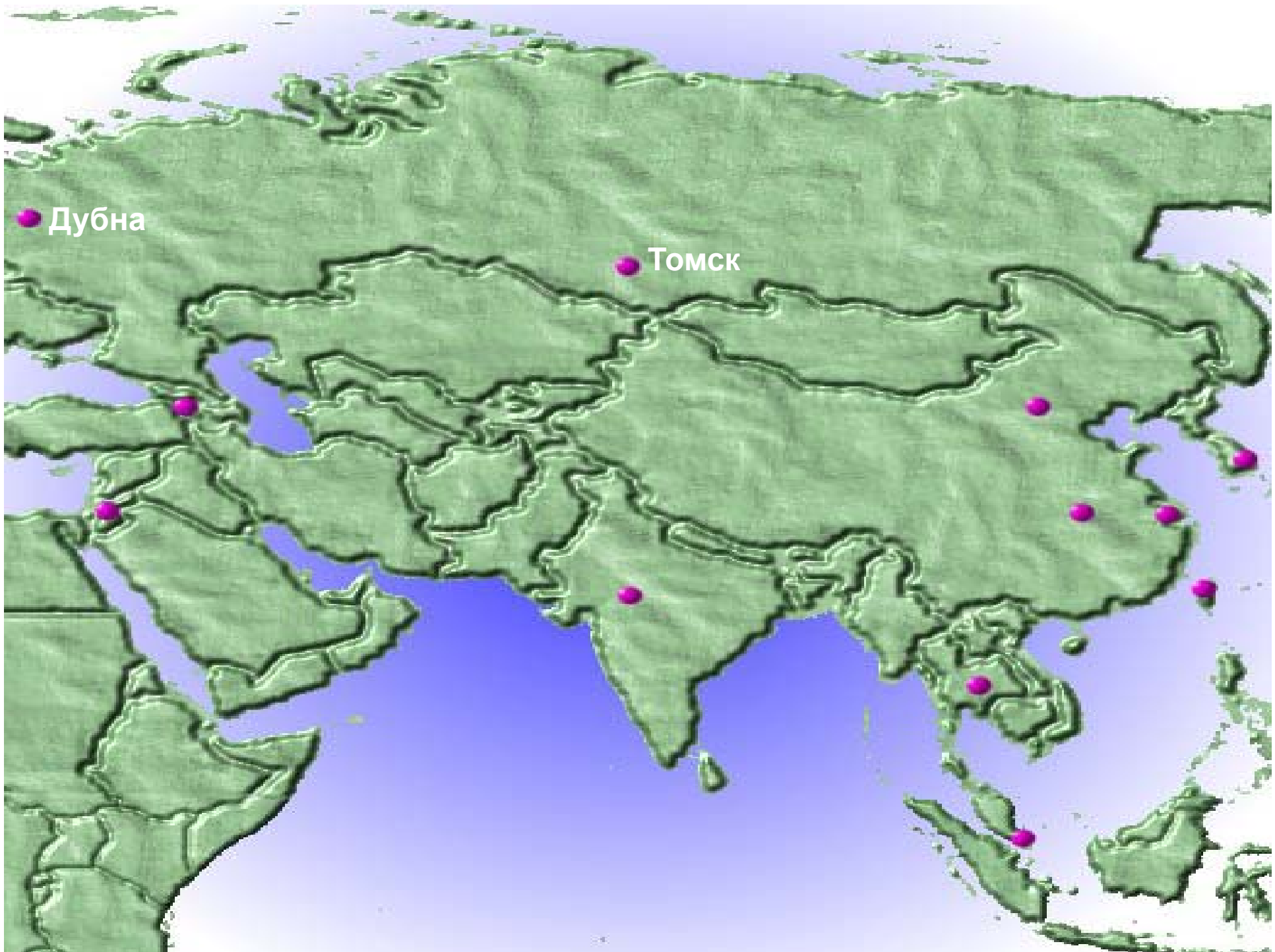
- **Электроны в разных синхротронах ускоряются до энергий 1 – 10 ГэВ.**

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









● Дубна

● Томск

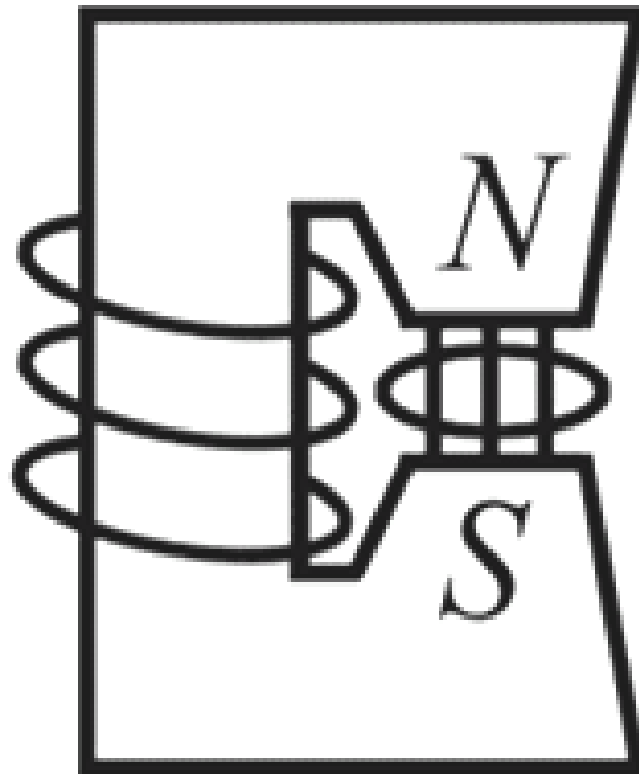
The **6 GeV ESRF** is an outstanding example of European cooperation in science. **18** nations work together to use the extremely bright beams of light produced by the ESRF's high-performance storage ring to study a remarkably wide range of materials.

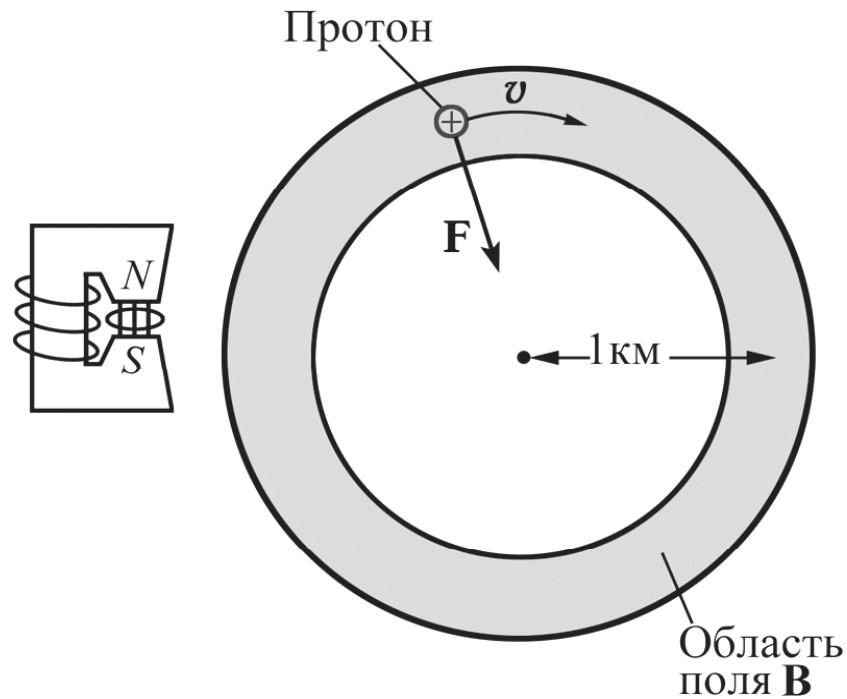


- **Синхрофазотрон** – циклический резонансный ускоритель тяжелых заряженных частиц (протонов, ионов), в котором объединяются свойства фазотрона и синхротрона.

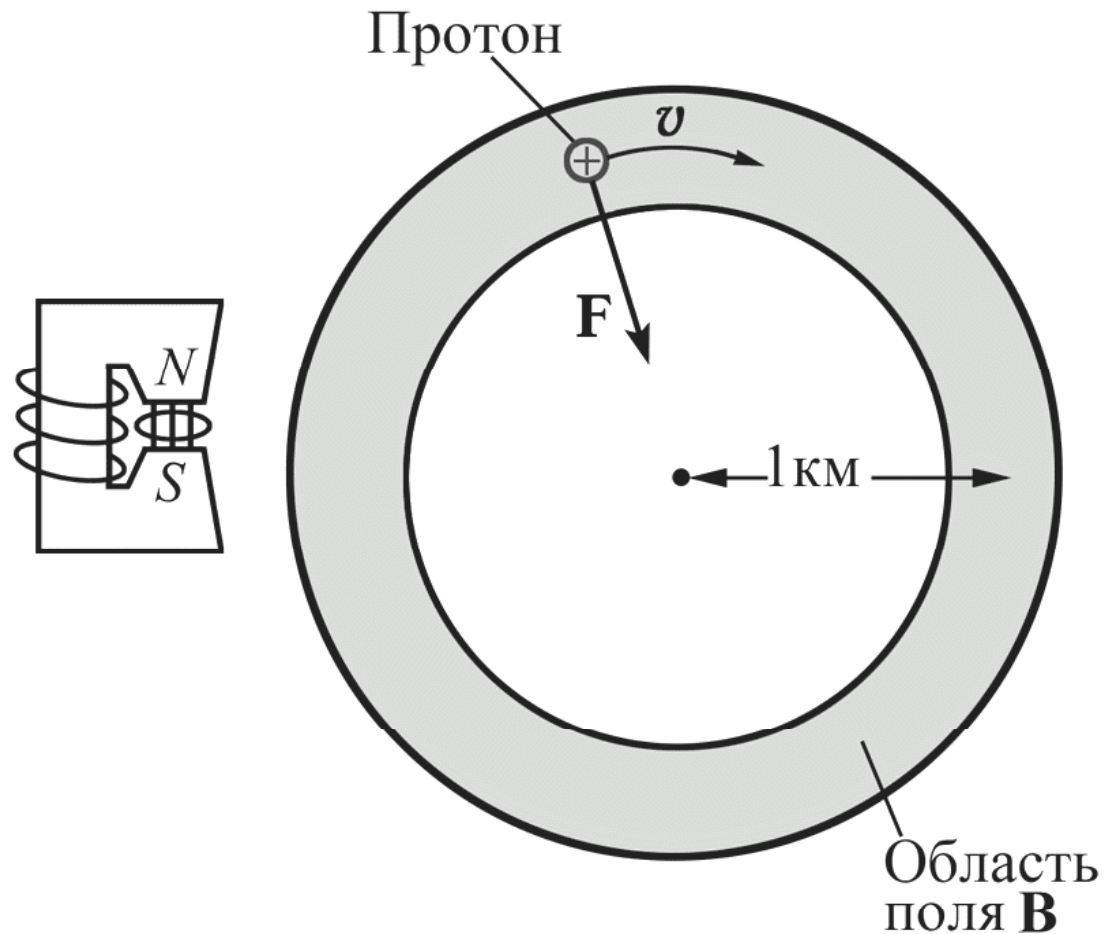
$$T = 2\pi \left(\frac{m}{q} \right) \frac{1}{B}$$

- Здесь управляющее магнитное поле и частота ускоряющего электрического поля одновременно изменяются во времени.





- Между полюсами магнита расположена тороидальная вакуумная камера, в которую вводят 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:

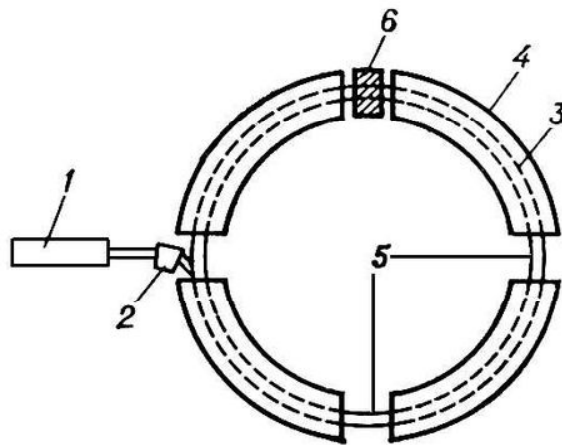
$$m_r v^2 / R = evB.$$

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

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

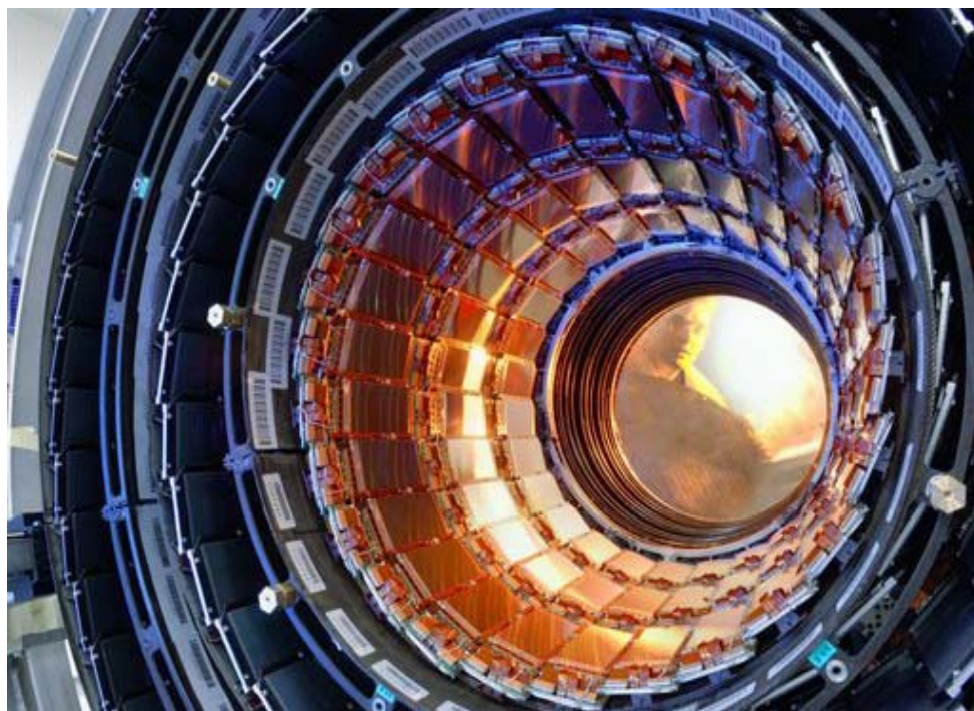
- так можно рассчитать ***полную релятивистскую энергию протонов***

- 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.





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.

Большой адронный коллайдер (БАК).

