

Ускорители заряженных частиц

1

В основе работы ускорителей заложено взаимодействие **заряженных частиц** с **электрическим** и **магнитным** полями.

Электрическое поле действует на заряженную частицу с силой

$$F_E = q E \quad (1)$$

Электрическая сила совершает **работу** над частицей, увеличивая её **энергию**.

$$\Delta K = q \int_T E dr \quad (2)$$

Магнитное поле, создает силу Лоренца:

$$F_L = q [\mathbf{v}B] \quad (3)$$

Сила Лоренца отклоняет вектор скорости частицы, не меняя её кинетическую энергию, и задаёт траекторию, по которой движется частица.

Линейные высоковольтные ускорители

Частицы ускоряются **постоянным электрическим полем** и движутся **прямолинейно** в вакуумной камере, вдоль которой расположены ускоряющие электроды.

$$\Delta K = q U \quad (4)$$

Приращение кинетической энергии заряженной частицы равно работе электрического поля над этой частицей.

U – разность потенциалов, пройденная частицей.

Положительные частицы движутся к катоду, отрицательные – к аноду.

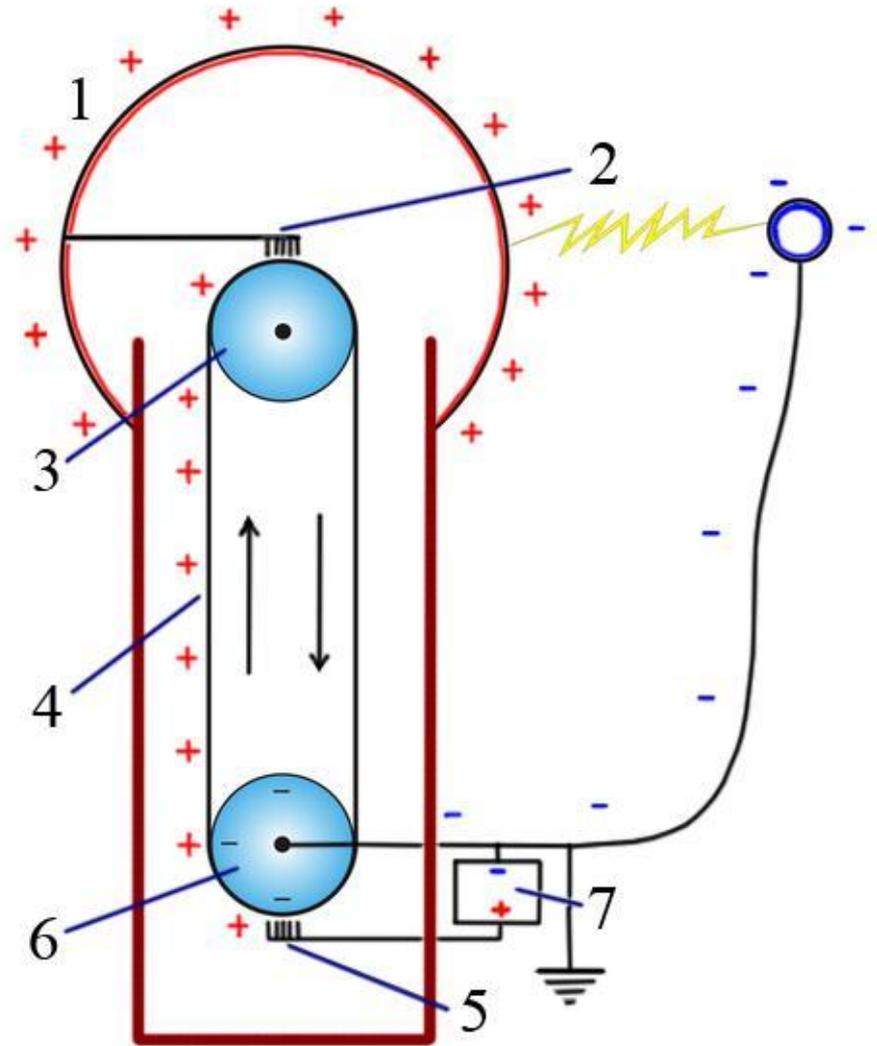


**Схема
ускорительной
трубки**

Генератор Ван де Граафа

Принцип действия:
электризация
движущейся
диэлектрической ленты

- 1 – металлическая сфера
- 2 и 5 – электроды (щетки)
- 3 и 6 – ролики
- 4 – диэлектрическая лента
- 7 – источник напряжения



Генератор Ван де Граафа состоит из диэлектрической ленты 4, вращающейся на роликах 3 и 6.

Верхний ролик диэлектрический, нижний металлический и заземлён.

Один конец ленты заключён в металлическую сферу 1.

Электроды 2 и 5 в форме щёток находятся на небольшом расстоянии от ленты сверху и снизу, причём электрод 2 соединён с внутренней поверхностью сферы 1.

Через щетку 5 воздух ионизируется от источника напряжения 7. Положительные ионы под действием электрического поля движутся к заземлённому 6 ролику и оседают на ленте. Движущаяся лента переносит заряд внутрь сферы 1, где он снимается щёткой 2.

Заряды выталкиваются на поверхность сферы и поле внутри сферы создается только дополнительным зарядом на ленте. Таким образом на внешней поверхности сферы накапливается **электрический заряд.**

Первый генератор был разработан американским физиком Робертом Ван де Граафом в **1929** г. и позволял получать разность потенциалов до **80 киловольт**.

Затем были построены более генераторы, дающие напряжение до **7 миллионов вольт**.

Возможность получения высокого напряжения ограничена коронным разрядом, возникающим при ионизации воздуха вокруг сферы.



**Миниатюрный
генератор
Ван де Граафа**

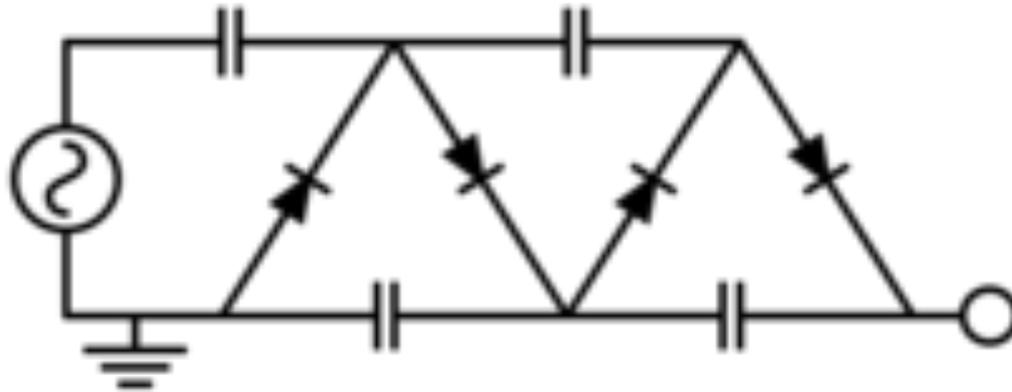


Генератор Ван де Граафа (1952 г.)

Генератор Кокрофта-Уолтона

Умножитель напряжения, преобразующий **переменное** или **пульсирующее постоянное напряжение** в **высокое постоянное напряжение**.

Генератор строится из лестницы конденсаторов и диодов.



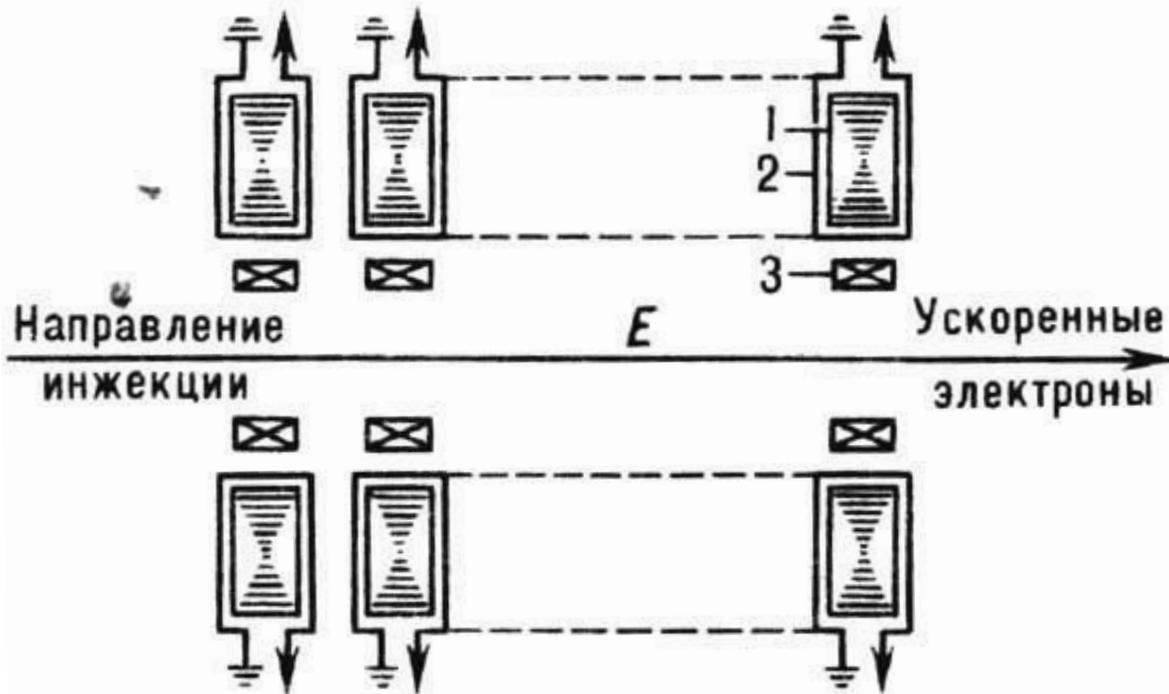
Умножитель Кокрофта-Уолтона из двух секций



Существуют
умножители
Кокрофта-Уолтона
на напряжения до
нескольких
мегаВольт

Умножитель,
построенный в **1937 г.**
компанией Philips

Линейный индукционный ускоритель



1-сердечник
индуктора;

2-возбуждающая
обмотка;

3-фокусирующая
катушка

Ускорение происходит **вихревым электрическим полем**, которое создают ферромагнитные кольца с обмотками, установленные вдоль оси пучка.

Вихревое электрическое поле, порождается переменным магнитным полем.

$$\oint_L \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\frac{1}{c} \int_S \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \mathbf{n} \right) ds \quad (\text{M})$$

Слева – циркуляция электрического поля по замкнутому контуру L .

Интеграл справа берется по поверхности S , натянутом на этот контур. \mathbf{n} – нормаль к плоскости контура.

Электрическое поле индуцируется изменяющимся во времени **магнитным потоком**, проходящим через расположенные друг за другом кольцевые ферритовые индукторы 1. Вектор **электрического поля** направлен вдоль оси ускорителя.

Магнитный поток возбуждается в них короткими импульсами тока, пропускаемыми через одновитковые обмотки 2, охватывающие индукторы.

Фокусировка производится продольным **магнитным полем**, которое создаётся катушками 3, расположенными внутри индукторов.

Ускоритель АТА (США) дает электроны с энергией **43 МэВ** при токе 10 кА. Длительность токовых импульсов 50 нс.

Линейный резонансный ускоритель (линак)

Ускорение происходит **продольным электрическим полем** высокочастотных резонаторов.

Ускорение возможно если:

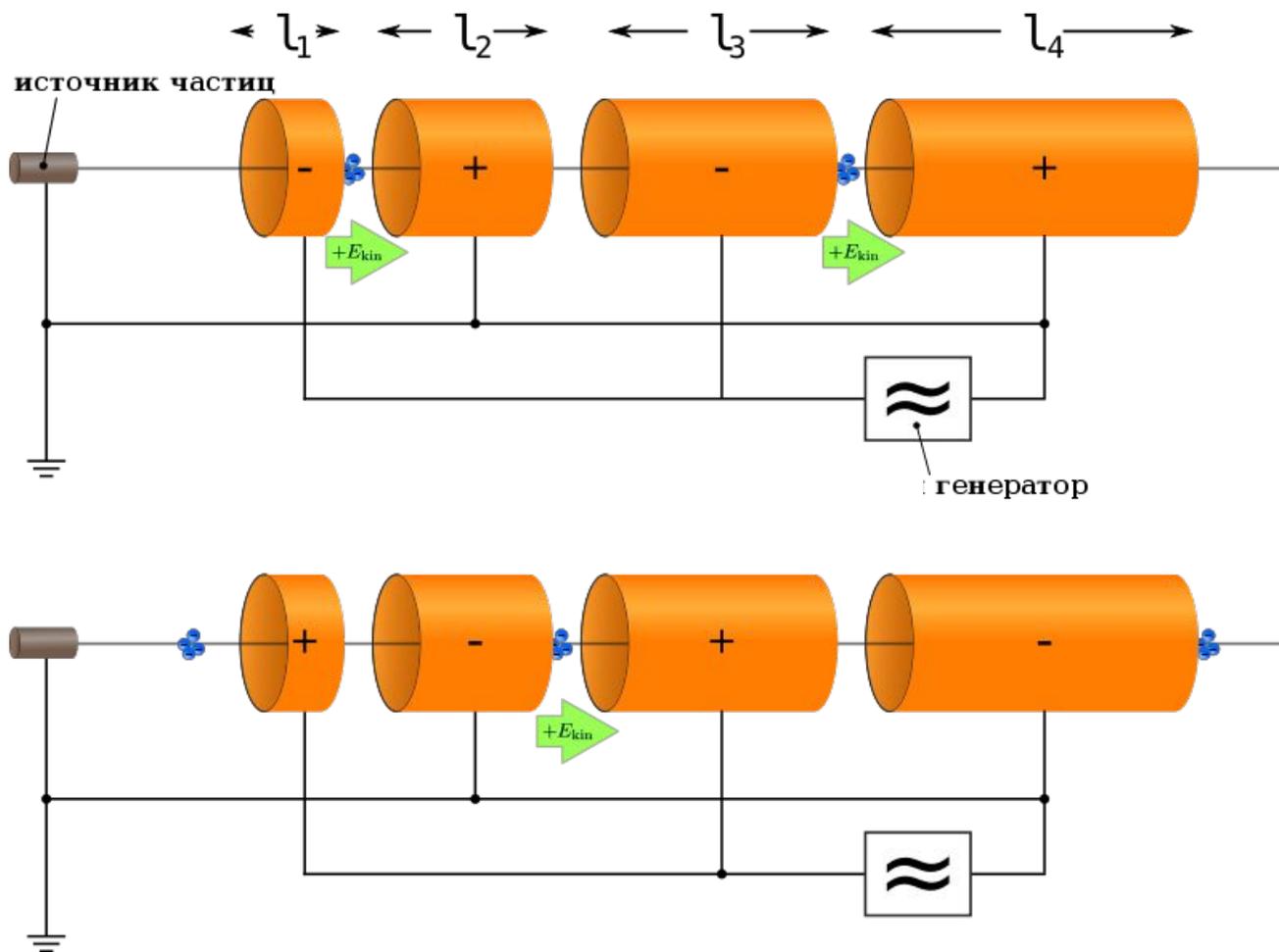
либо ускоряемые частицы должны двигаться вместе с электромагнитной волной (**ускорители с бегущей волной**),

либо они должны взаимодействовать с ней только в такие моменты времени, когда электрическое поле имеет нужное (ускоряющее) направление.

Участки, на которых происходит взаимодействие частиц с ускоряющим полем, называются **ускоряющими зазорами**.

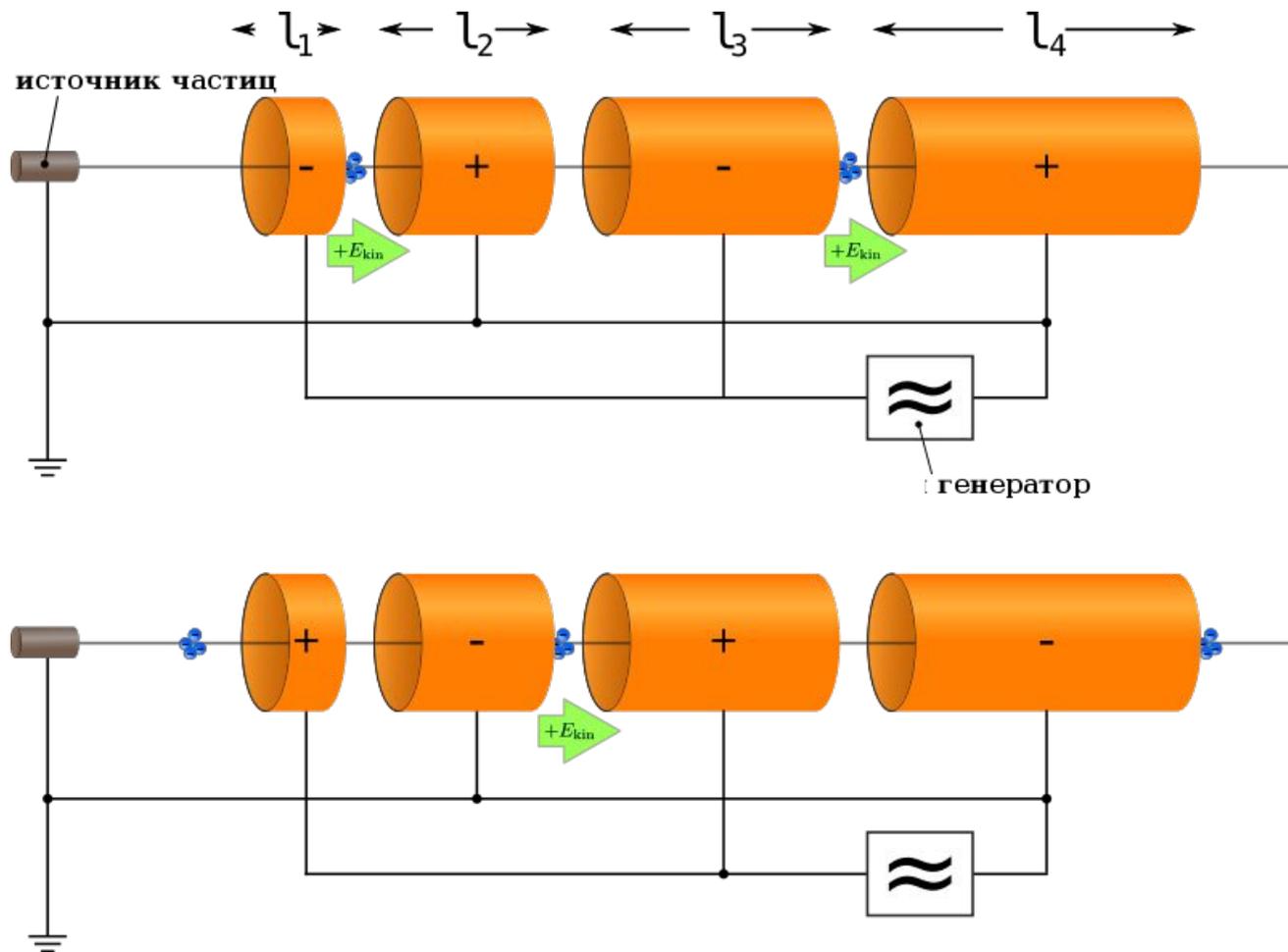
Ускоритель Видероз

Металлические пролётные трубки присоединяются (через одну) к полюсам ВЧ-генератора. В ускоряющих зазорах создаётся продольное электрическое ВЧ-поле с напряжением **~100 кВ**.



Частицы, подходящие к ускоряющему зазору в нужный момент времени, ускоряются электрическим полем. Внутри трубок поле равно нулю.

Длины пролётных трубок согласованы со скоростью частицы так, что к очередному зазору частицы подходят в тот момент времени, когда электрическое поле имеет ту же фазу, что и в предыдущем ускоряющем зазоре.



Необходимое условие ускорения:

$$L = \left(n + \frac{1}{2} \right) \frac{v}{c} \lambda \quad (5)$$

где L - длина трубки и ускоряющего промежутка;

v - скорость частицы, c - скорость света;

λ - длина электромагнитной волны;

n - целое число.

Линейный ускоритель (Стэнфорд, США).

Длина около 3 км.

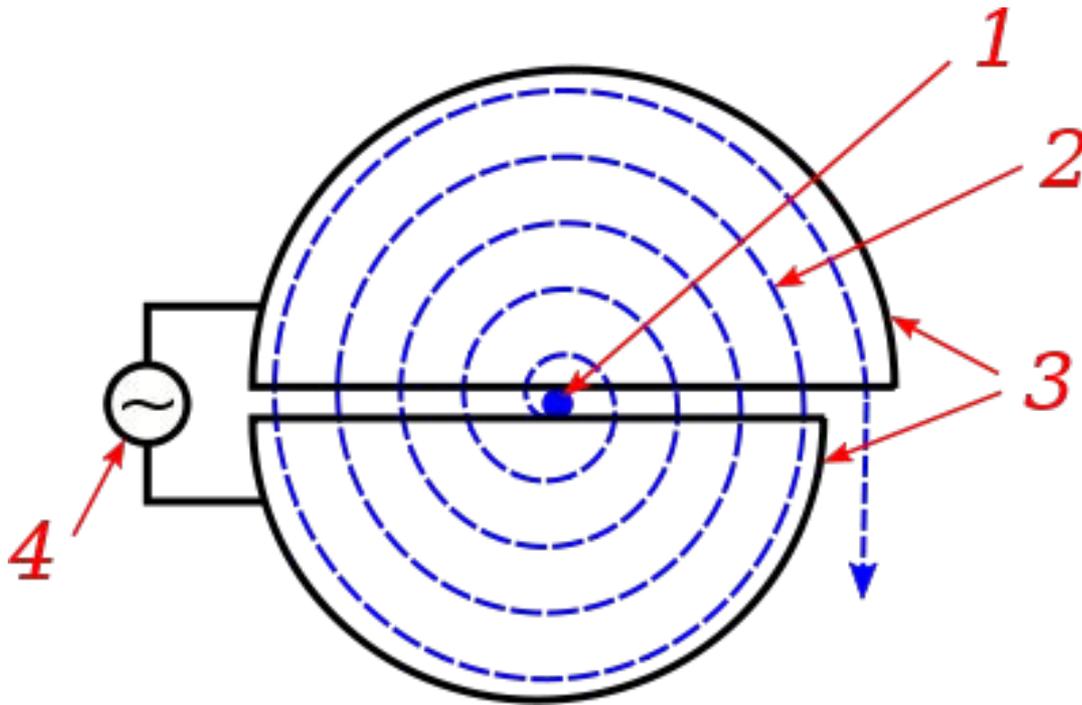
Ускорение электронов (или позитронов) до энергии **50 ГэВ**.
При этом частицы испытывают около 80000 актов ускорения.

Работал в течение 1989 - 1998 гг.

В частности, на нём были проведены точные измерения **размеров атомных ядер** путем рассеяния быстрых (ультрарелятивистских) **электронов**

Циклотрон

Циклический ускоритель нерелятивистских тяжёлых заряженных частиц.



1 — место
поступления частиц,
2 — траектория их
движения,
3 — дуанты
(электроды),
4 — источник
переменного
напряжения.

Магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости рисунка.

Частицы двигаются в **постоянном однородном магнитном поле** и ускоряются **высокочастотным электрическим полем** постоянной частоты

Частицы инжектируются в камеру вблизи её центра. Они движутся внутри двух **дуантов** (раздвинутых полуцилиндров), помещенных в вакуумную камеру между полюсами сильного **электромагнита**.

Магнитное поле электромагнита искривляет траекторию частиц. Ускорение движущихся частиц происходит в моменты, когда они оказываются в зазоре между дуантами.

Ускоряющее электрическое поле создается генератором частоты, совпадающей с **циклотронной** (частотой обращения частиц).

Нерелятивистская частица под действием постоянного магнитного поля \mathbf{B} при скорости $\mathbf{v} \perp \mathbf{B}$ движется по окружности радиуса

$$R = \frac{mc}{qB} v \quad (6)$$

с постоянным периодом

$$T = \frac{2\pi mc}{qB} \quad (7)$$

$$\omega = \frac{qB}{mc} \quad \text{циклотронная частота}$$

Радиус траектории растет пропорционально скорости частицы

Первый циклотрон был создан в 1930 г. американскими физиками **Э. Лоуренсом** и С. Ливингстоном.

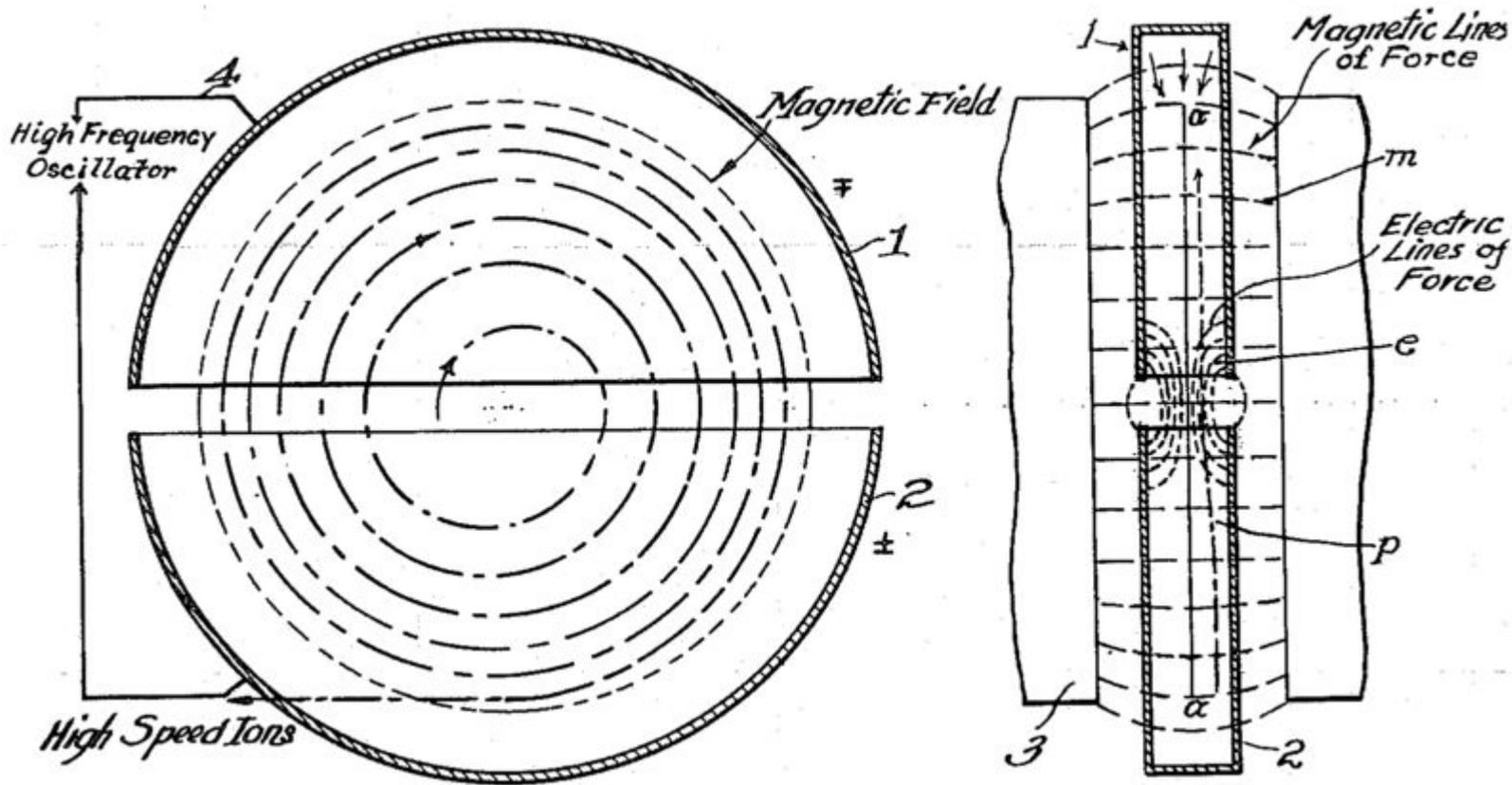


Схема циклотрона из патента Э. Лоуренса

Диаметр 4 дюйма, максимальная энергия 80 КэВ.



Эрнест О. Лоуренс (1901 — 1958)
американский физик,
лауреат Нобелевской премии по физике 1939.

В 1961 году **103-й** химический элемент, открытый в лаборатории LBNL (Беркли, Калифорния), был назван **лоуренсием**.



Циклотрон 1937 года. Франция.



27-дюймовый циклотрон

Циклотрон лаборатории TRIUMF в Университете Британской Колумбии (Ванкувере, Канада).

Ускоритель протонов до энергии **500 МэВ**.

Магнит создаёт поле 4,6 кГс и весит 4000 тонн,.

Ускоряющее электрическое поле имеет частоту 23 МГц и амплитуду напряжения 96 кВ.

Выходной ток 300 μA .

Фазотрон (синхроциклотрон)

Циклический ускоритель тяжёлых заряженных релятивистских частиц в **однородном и постоянном магнитном поле**.

Ускорение **высокочастотным электрическим полем переменной** частоты.

Релятивистская частица в постоянном магнитном поле B движется по окружности с периодом

$$T = \frac{2\pi ct}{qB\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad (8)$$

Рост периода компенсируется путём соответствующего снижения частоты ускоряющего поля.



Медицинский
синхроциклотрон

Синхрофазотрон

Циклический ускоритель тяжёлых заряженных **релятивистских** частиц с неизменной равновесной орбитой.

Для удержания частицы на заданной орбите в процессе ускорения изменяется **магнитное поле** и частота ускоряющего **электрического поля**.

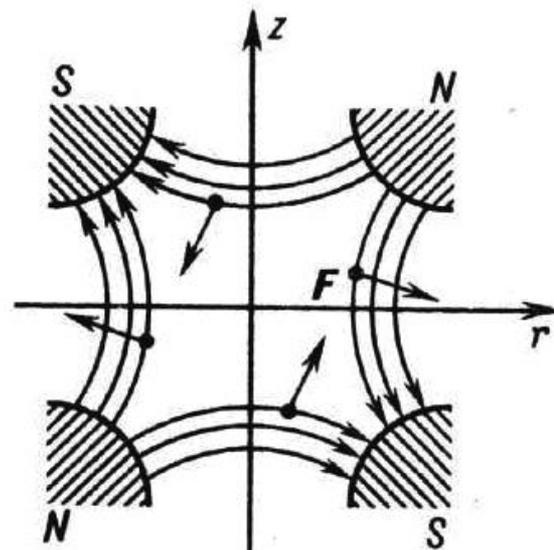
Фокусировка пучка частиц по двум поперечным координатам.



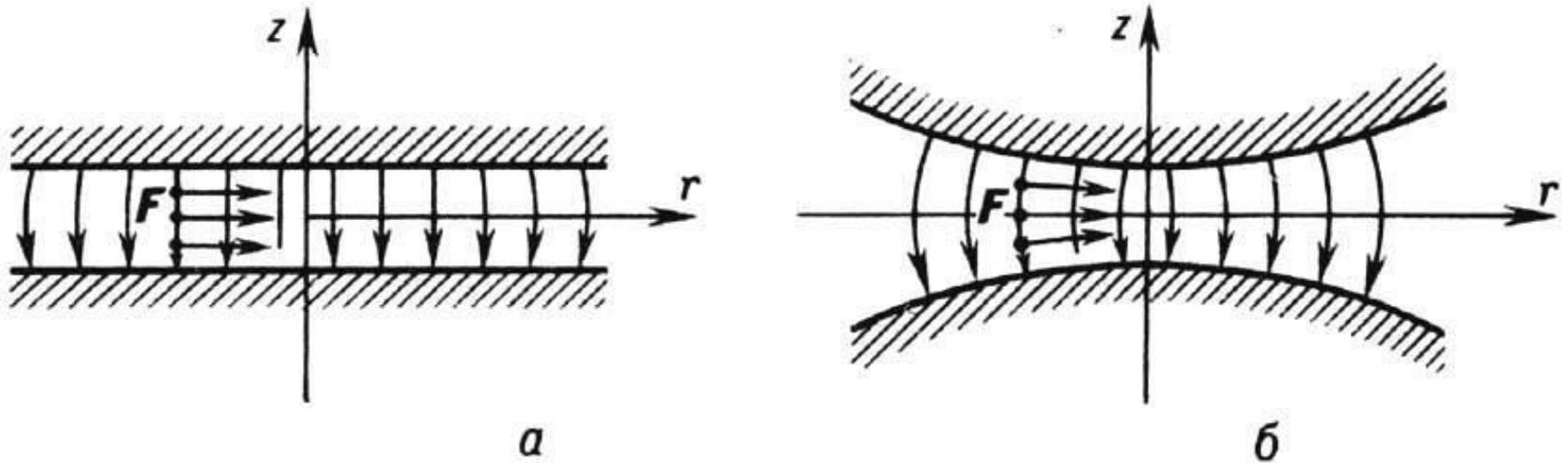
Weak focusing accelerator

Траектория частицы, совершающей горизонтальные колебания в фокусирующем кольце

Фокусировка производится магнитными линзами, формирующими неоднородные магнитные поля.



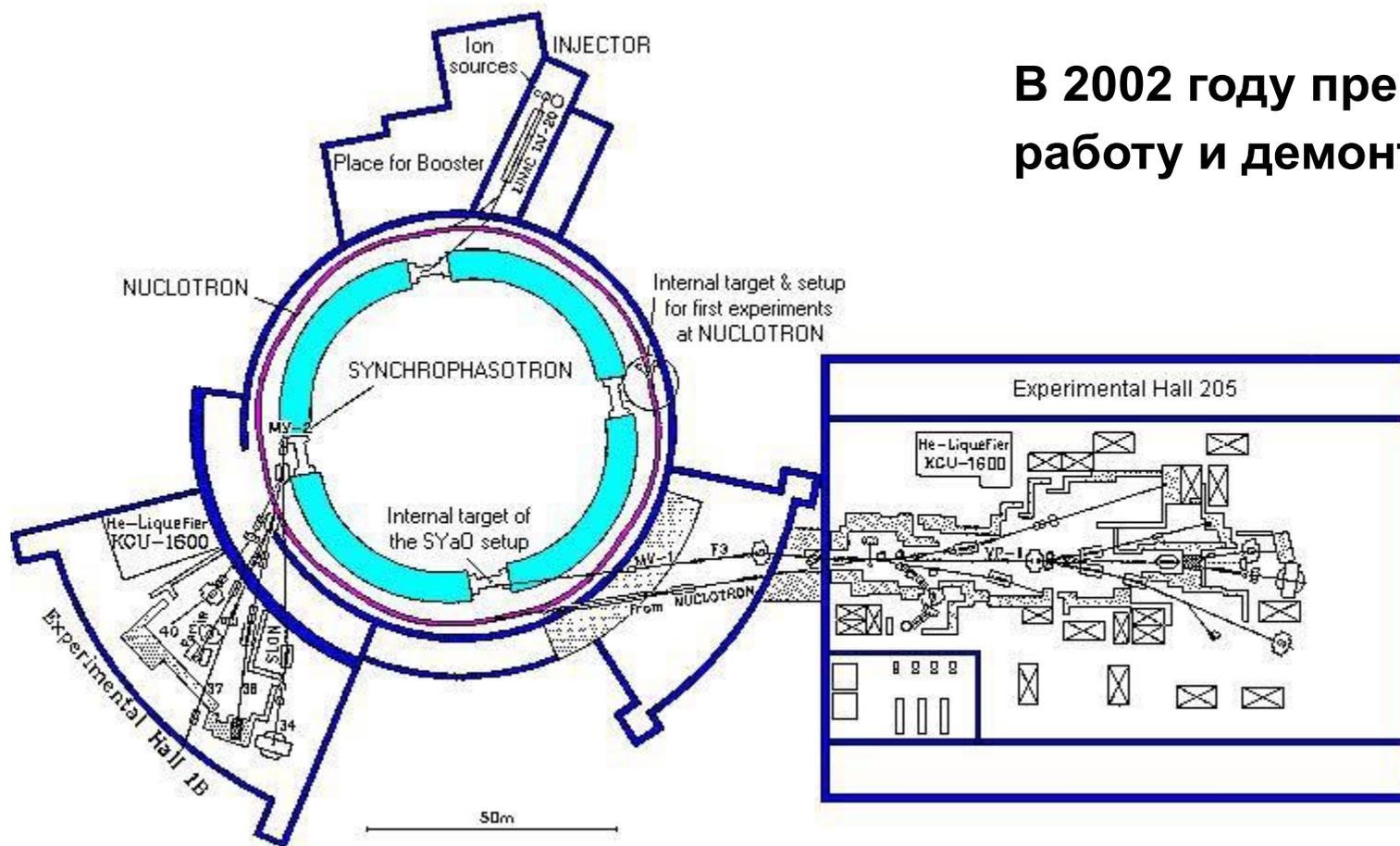
Вертикальная фокусировка



Полюсные наконечники, имеющие форму фигуры вращения (вокруг оси z).

На рис. б зазор между полюсами, расширяющийся к периферии. Сила Лоренца имеет фокусирующую (возвращающую к центральной плоскости) осевую составляющую.

Синхрофазотрон ОИЯИ - протонный ускоритель на энергию до 10 ГэВ в Объединённом институте ядерных исследований (г. Дубна, Московская область). Диаметр магнита 60 м, вес 36000 т.



В 2002 году прекратил работу и демонтирован.

Синхротрон

Циклический ускоритель.

Ускорение частиц на орбите постоянного радиуса R .

Ведущее магнитное поле (поле поворотных магнитов) создаётся только вдоль узкой дорожки, охватывающей кольцевую вакуумную камеру, в которой движутся частицы.

Частота ускоряющего электрического поля:

$$\omega = \frac{c}{R} \frac{p}{\sqrt{p^2 + (mc)^2}} \quad (9)$$

p – импульс частицы, m – масса частицы, c – скорость света

Циркулирующий сгусток частиц попадает в ускоряющее поле ВЧ-резонатора всегда в одной и той же фазе, и частицы получают порцию энергии, много меньшую, чем уже имеющаяся у них кинетическая энергия.

Ускорение частиц происходит за счёт многократного пролёта ($\sim 10^6$ раз в секунду) через ускоряющую секцию.

Удержание частиц на орбите постоянного радиуса R ведущее магнитное поле увеличивается в процессе ускорения.

Частицы ускоряются до скорости, близкой к скорости света, точнее до **ультрарелятивистских энергий**.

При ультрарелятивистских энергиях период обращения в магнитном поле частицы становится равным

$$T = 2\pi R/c \quad (10)$$

Ускорение частиц проводится постоянной частотой электрического поля.

.

Электронные синхротроны используются для ускорения электронов от энергии **10 МэВ** до **100 МэВ – 10 ГэВ**.

При больших энергиях становятся существенными потери на **магнитотормозное** излучение.

Протонные синхротроны требуют предварительного ускорения до ультрарелятивистских энергий **> 10 ГэВ** в ускорителях типа фазотрона.

Тэватрон (Иллинойс, США) ускорял протоны и антипротоны до энергии **980 ГэВ**.

Теватрон

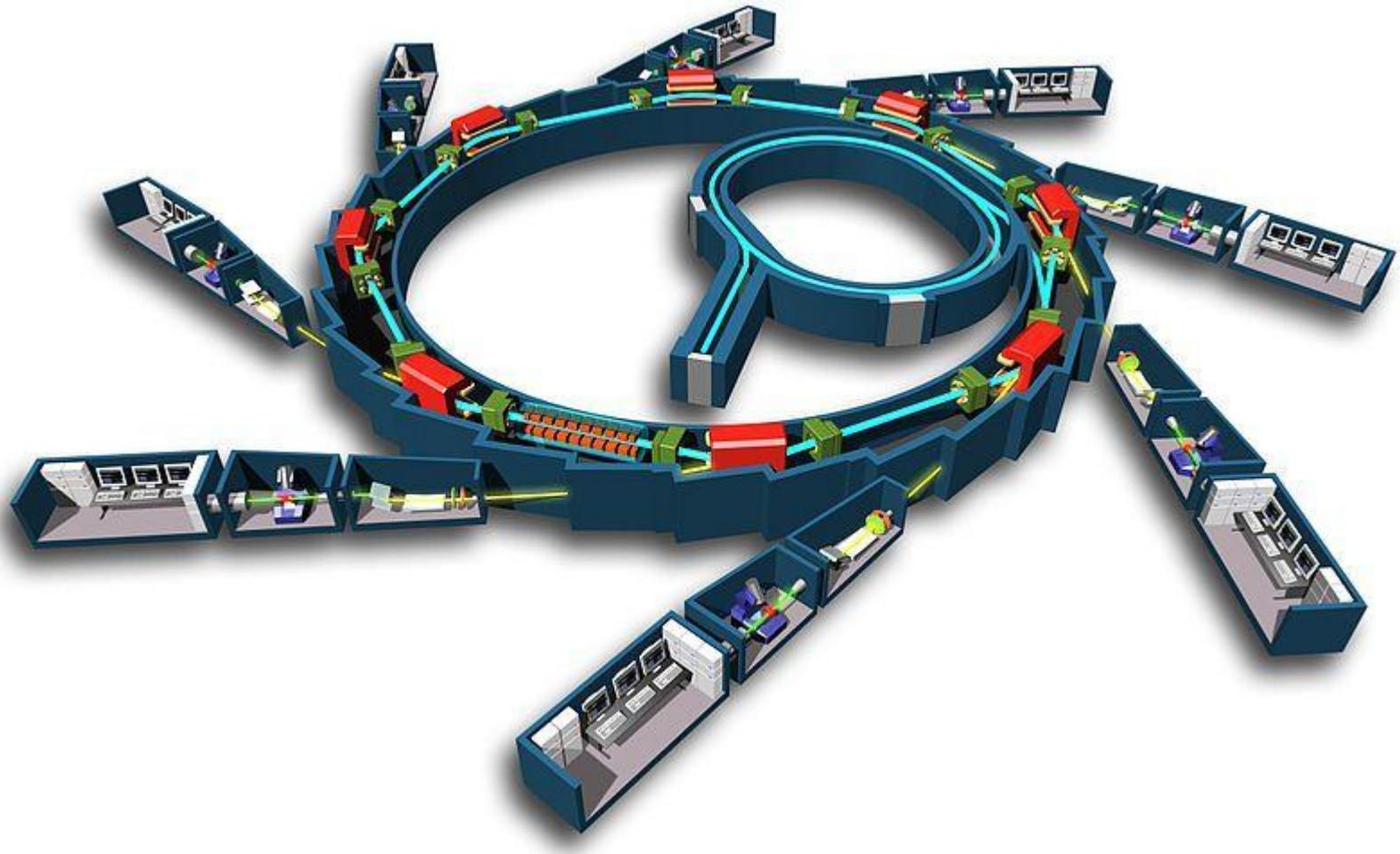


На переднем плане – главный инжектор

Электронный синхротрон SOLEIL. Франция. 2005 г.

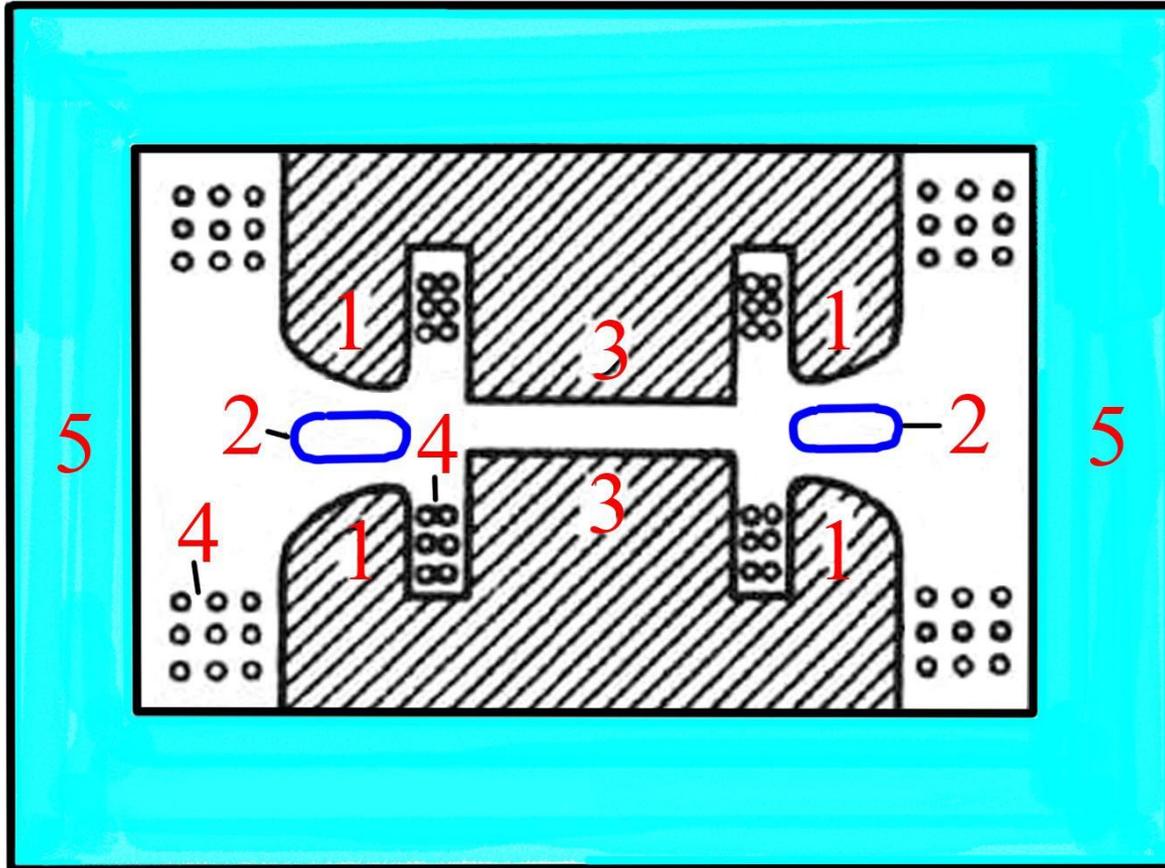


Электронный синхротрон SOLEIL.

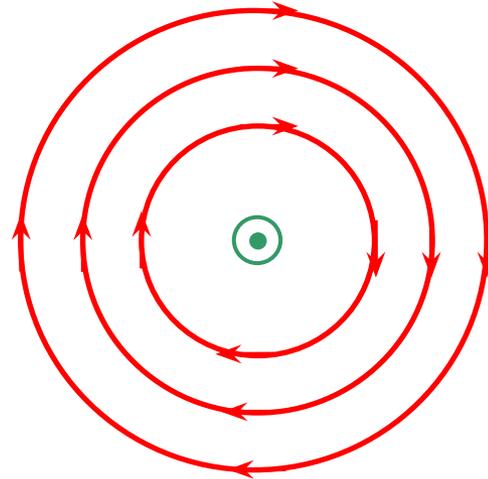
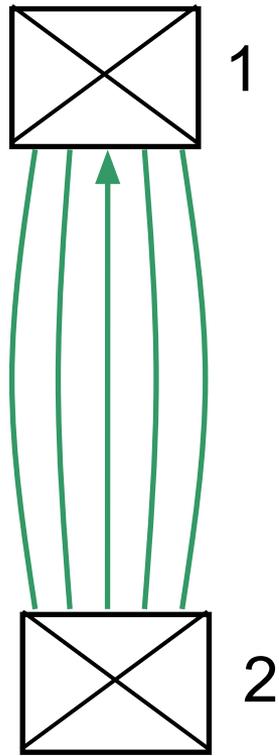


Линейный ускоритель на 100 МэВ, бустерный синхротрон и основной синхротрон на 2.75 ГэВ

Бетатрон



Схематический разрез бетатрона: 1 - полюсы магнита; 2 - сечение кольцевой вакуумной камеры; 3 - сердечник; 4 - обмотки электромагнита; 5 - ярмо магнита.



1 и 2 – токонесущие соленоиды;

зеленые стрелки – линии магнитной индукции
возрастающего **магнитного поля**;

красные окружности – силовые линии вихревого
электрического поля.

Бетатрон – циклический ускоритель электронов с постоянной равновесной орбитой

Ускорение частиц осуществляется **вихревым электрическим полем**, которое индуцируется **изменением магнитного потока** Φ , охватываемого орбитой пучка.

Приращение импульса частицы $\frac{dp}{dt} = \frac{e}{2\pi R c} \frac{d\Phi}{dt}$

где R – радиус орбиты.

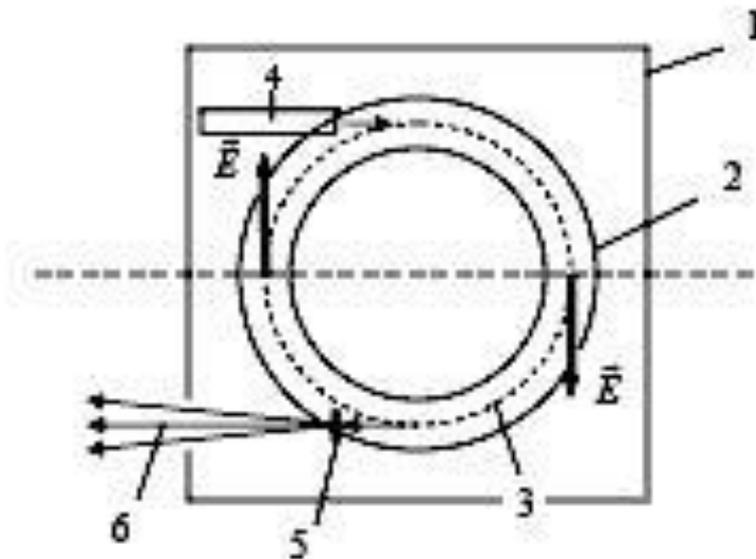
Удержание электронов на орбите постоянного радиуса обеспечивается величиной ведущего магнитного поля.

Магнитное поле меняется со временем по синусоиде с частотой 50 Гц.

В вакуумную камеру электроны впрыскиваются с помощью инжектора (электронной пушки) в начале каждого периода нарастания магнитного поля.

Рабочий цикл – первая (нарастающая) четверть периода магнитного поля.

Электроны, достигшие наибольшей энергии, смещаются с равновесной орбиты и либо выводятся из камеры, либо направляются на специальную мишень внутри камеры.



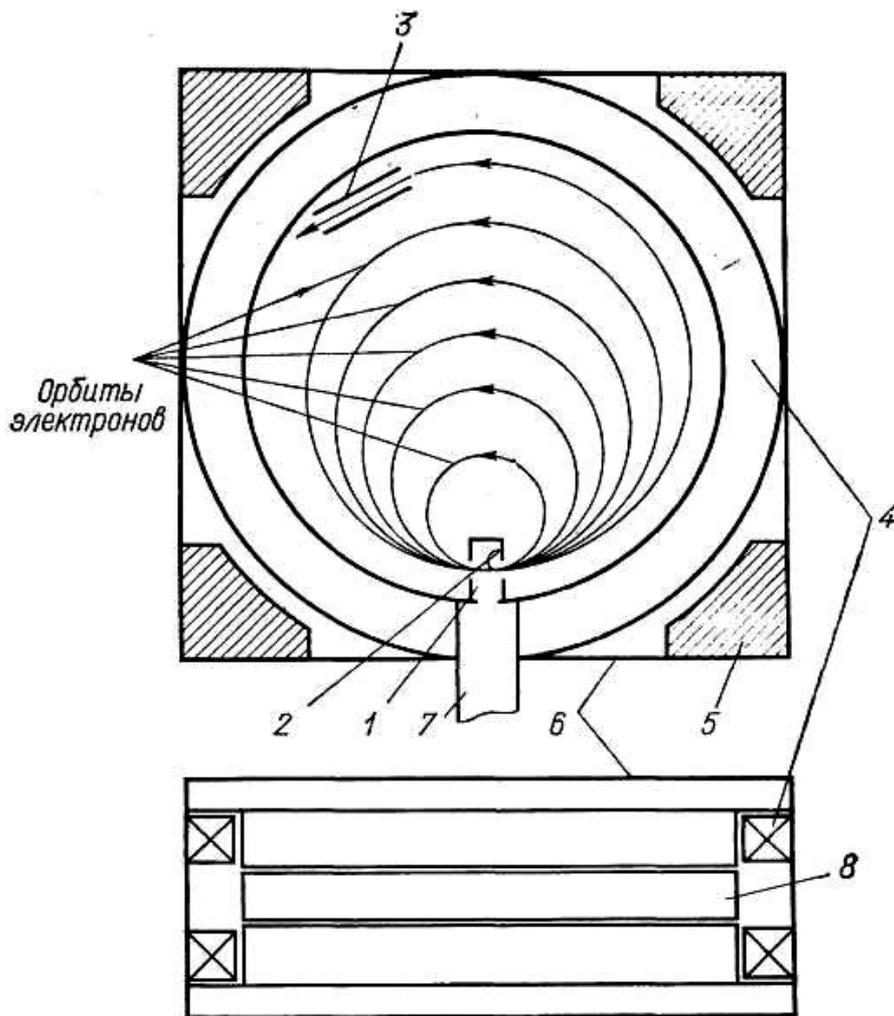


Бетатрон на энергию 6 МэВ, 1942 год.

Так как магнитные поля в несверхпроводящих установках ограничены насыщением железа на уровне **~20 кГс**, энергия ускоренных электронов ограничена обычно величиной **10—100 МэВ**.

Максимальная энергия электронов, достигнутая в бетатроне, = **300 МэВ** (США, университет Иллинойса, вес бетатрона **300 тонн**)

Микротрон



Циклический ускоритель электронов.

Содержит круглый дипольный магнит.

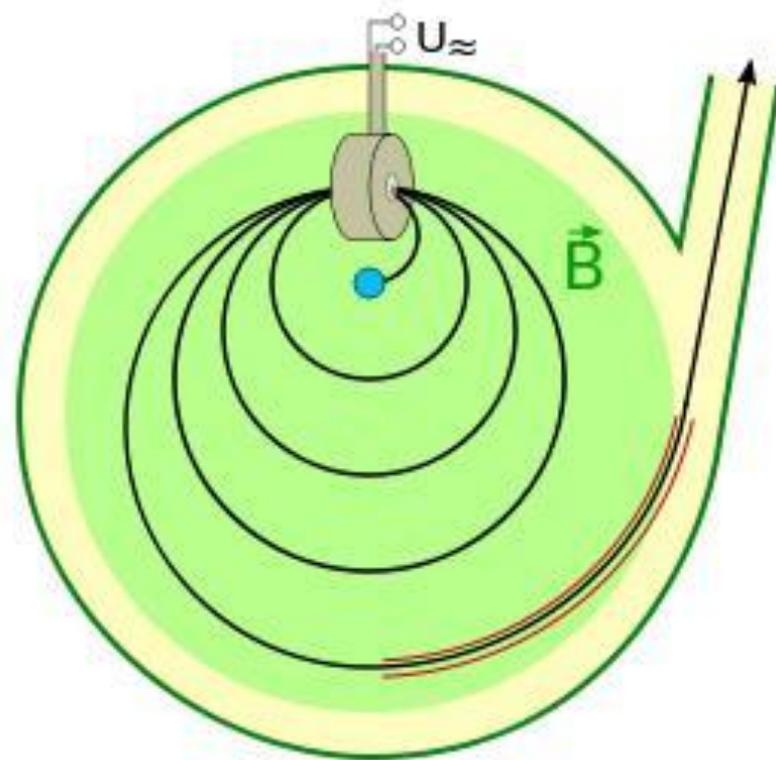
Частицы инжектируются с краю вакуумной камеры, где установлены полые ускоряющие электроды.

Ведущее магнитное поле и частота ускоряющего поля постоянны.

Схема микротрона

Период обращения сгустка на каждом обороте изменяется, но каждый раз частицы приходят в ускоряющий зазор в правильной фазе высокочастотного электрического поля.

Частицы движутся по окружностям возрастающего радиуса, получая на каждом обороте приращение энергии такое, чтобы новая частота обращения вновь была кратна частоте ВЧ-системы.



Ускорительный комплекс
MAMI, Майнц, Германия.

Состоит из инжектора и
каскада четырёх
микротронов.

Выходная энергия = 1.5 ГэВ

