

**Энергия, импульс и масса в  
релятивистской динамике. Закон  
взаимосвязи массы и энергии для  
материальных тел**

**Цель**

**урока:**

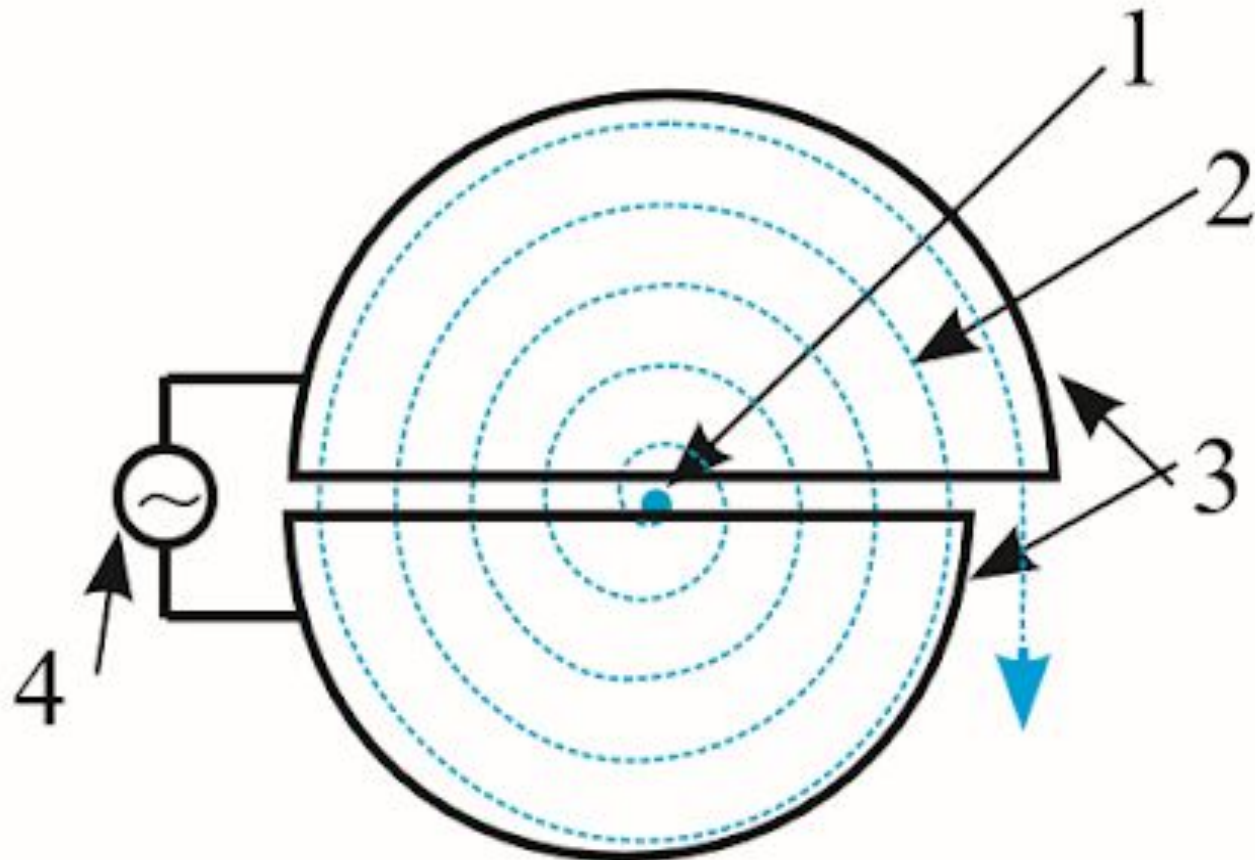
**11.7.1.3 - объяснять принцип действия  
ускорителей заряженных частиц, с учетом  
имеющих место в них релятивистских  
эффектов**

# **Ускоритель – установка для получения пучков заряженных частиц**

Ускорители применяются:

- В научных исследованиях (элементарные частицы, ядерная физика, физика твердого тела, получение не встречающихся в природе нуклидов)
- В прикладных исследованиях (источники синхротронного излучения)
- В медицине (радиационная диагностика и терапия, стерилизация аппаратуры), биологии
- В промышленности (имплантация ионов, дефектоскопия, стерилизация пищевых продуктов, искусственная полимеризация лаков, модификация свойств материалов, напр. резины, радиационная обработка материалов, изготовление элементов микроэлектроники)

# Принципиальная схема циклотрона



*1 – место поступления (протонов, ионов); 2 – траектория ускоряемой частицы; 3 – ускоряющие электроды (дуанты); 4 – генератор переменного напряжения. Магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости рисунка.*

## Ускорители различаются:

- По назначению
- По составу поставляемых частиц: легкие (электроны, позитроны), промежуточные (мезоны) и тяжелые частицы (протоны), ионы самых разнообразных масс и зарядностей, античастицы (антипротоны)
- По энергии частиц, от самых низких до нескольких ТэВ ( $10^{12}$  эВ,  $1\text{эВ}=1.6\cdot 10^{-19}$  Дж)
- По геометрии (кольцевые и линейные)
- По интенсивности пучков

# Происхождение ускорителей

- Первая задача – изучение строения атомного ядра
- 1932г., Кокрофт и Уолтон (Англия, Кэвендишская лаборатория) - бомбардировка ядер лития протонами
- первое в мире успешное искусственное превращение химических элементов (литий в гелий)
- впервые была проверена формула Эйнштейна об эквивалентности массы и энергии (кинетическая энергия образовавшихся ядер была больше кинетической энергии исходных ядер)
- Нобелевская премия по физике за 1951г.

# Изохронный циклотрон У-150М в институте ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан



# Групповая

## работа

**Задание:** объяснить устройство и принцип работы, а также применение

**1 группа** – циклотрон

**2 группа** – бетатрон

**3 группа** – синхротрон

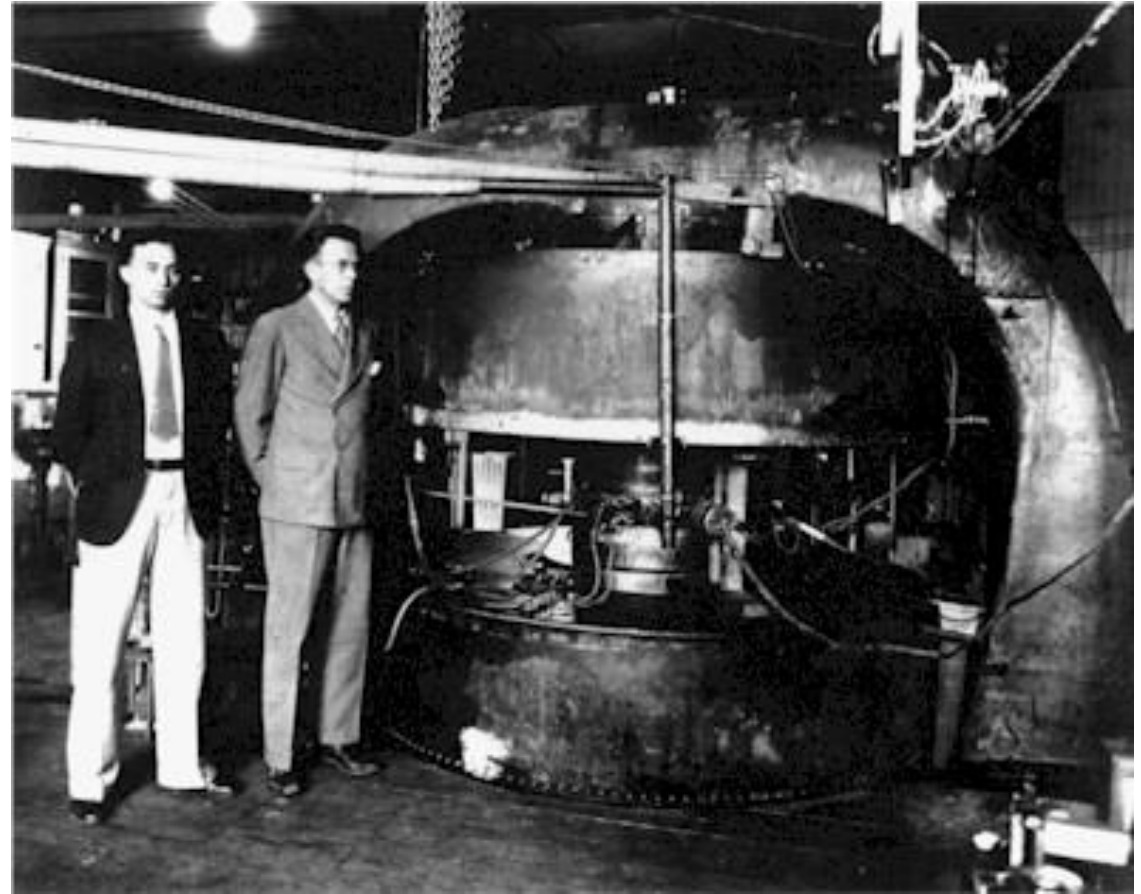
**1 группа –**  
**ЦИКЛОТРОН**



# Циклотрон (предложен Лоуренсом в 1932 г., Нобелевская премия 1939 г.)



**Первая работающая модель циклотрона**

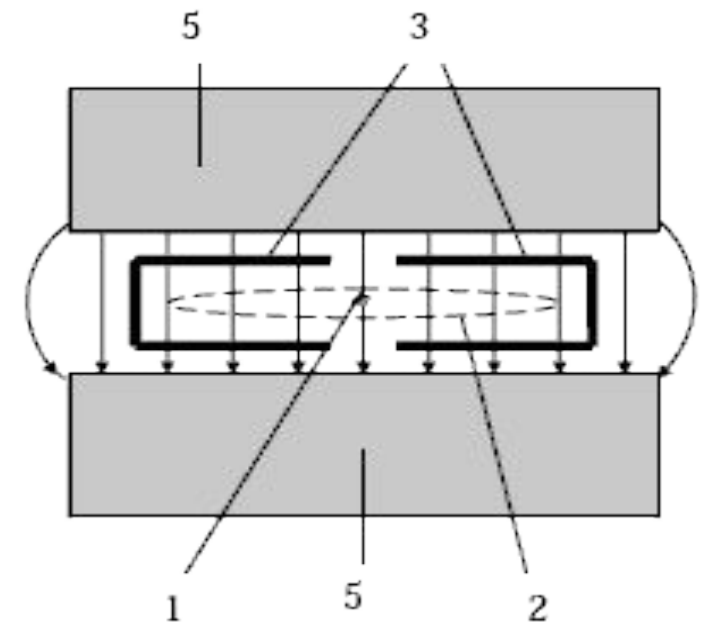
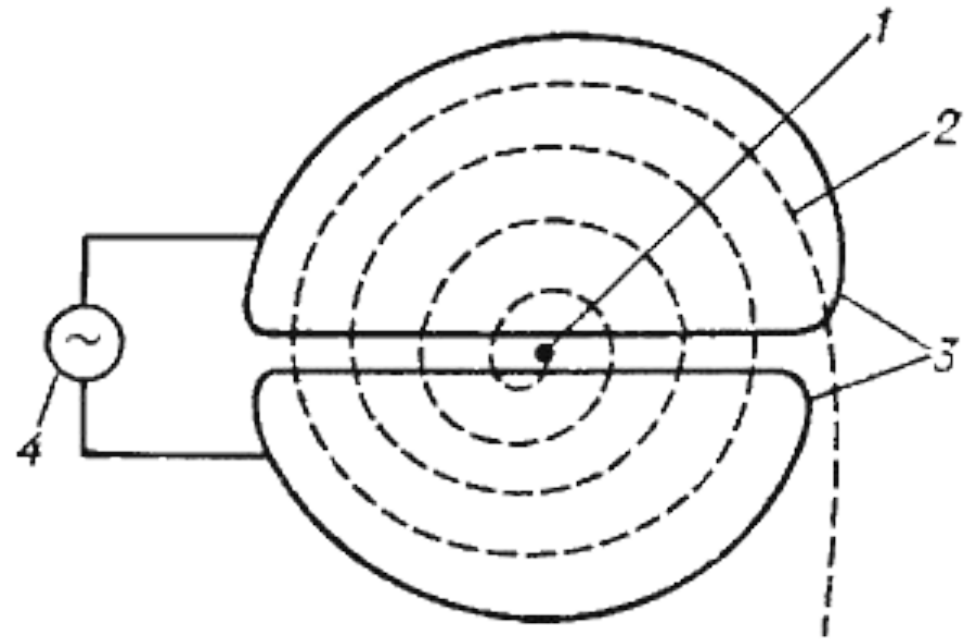


**С. Ливингстоун и Э. Лоуренс у 27-дюймового циклотрона, который широко использовался в экспериментальных исследованиях ядерных реакций и искусственной радиоактивности**

# Циклотрон

Принцип работы:

- Для нерелятивистских частиц ( $v \ll c$ ) частота обращения в постоянном магнитном поле (дуанты) не зависит от скорости  $\omega = eB/mc$
- ВЧ напряжение прикладывается к зазору между дуантами
- С ростом энергии частицы увеличивается ее радиус обращения
- Ограничение – при релятивистских скоростях теряется синхронизм с ВЧ системой  $\omega = eB/m\gamma c$  ( $\gamma = 1/(1-v^2/c^2)^{1/2}$ )
- Максимальная энергия 20-25 МэВ
- Применение: радиационная терапия, получение изотопов



# Просмотр видеоролика о циклотроне

<https://www.youtube.com/watch?v=CXOY-CKbWbY>

**2 группа –  
бетатрон**

# Бетатрон



**Д. Керст возле своих бетатронов, маленький - на 2.3 МэВ, большой - на 25 МэВ**

# Бетатрон

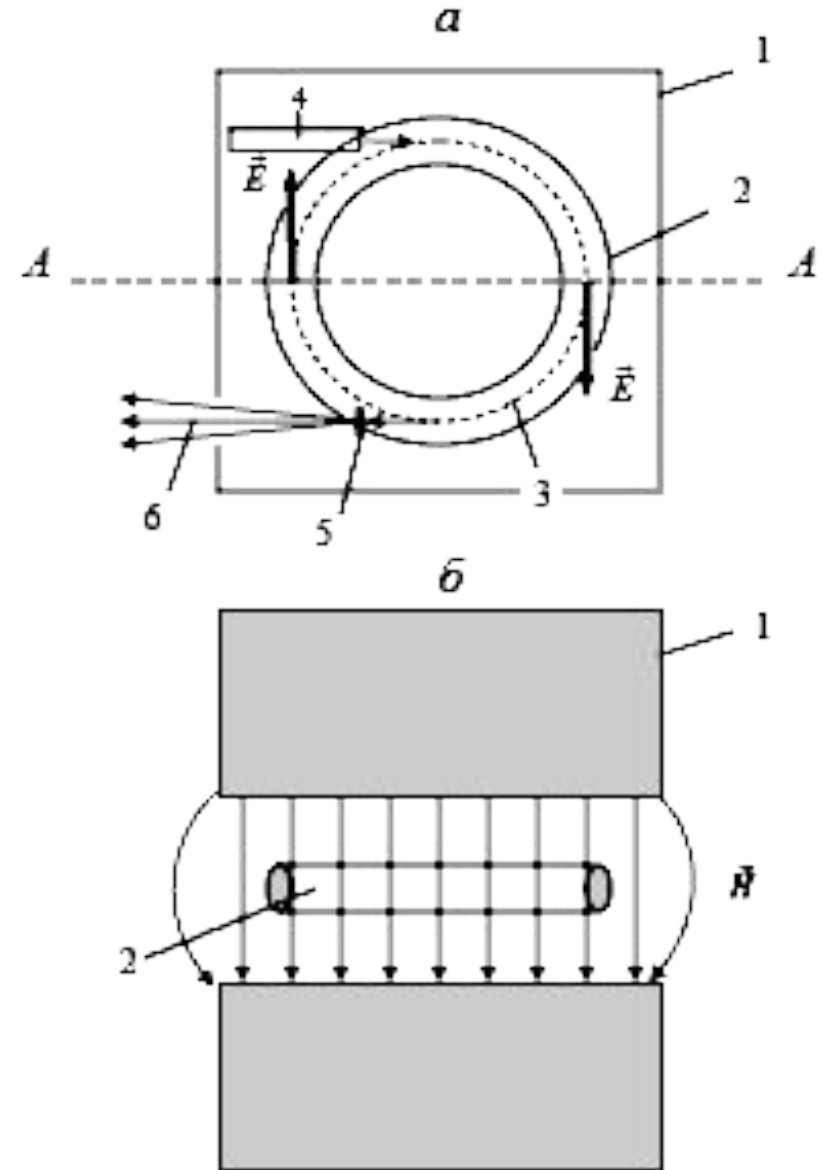
Теоретическая основа заложена Видероз, впервые построен Керстом в 1940 г.).

Основные элементы:

- Обмотки переменного тока, генерирующего переменное магнитное поле
- Железный сердечник для формирования потока магнитного поля через охватываемую пучком область
- Условие постоянства орбиты

$$d\bar{V}/dt = 2dB_o/dt$$

- Условие устойчивости поперечных (бетатронных) колебаний - слабая радиальная вариация магнитного поля (достигается профилированием магнитного полюса)
- Максимальная энергия 300 МэВ

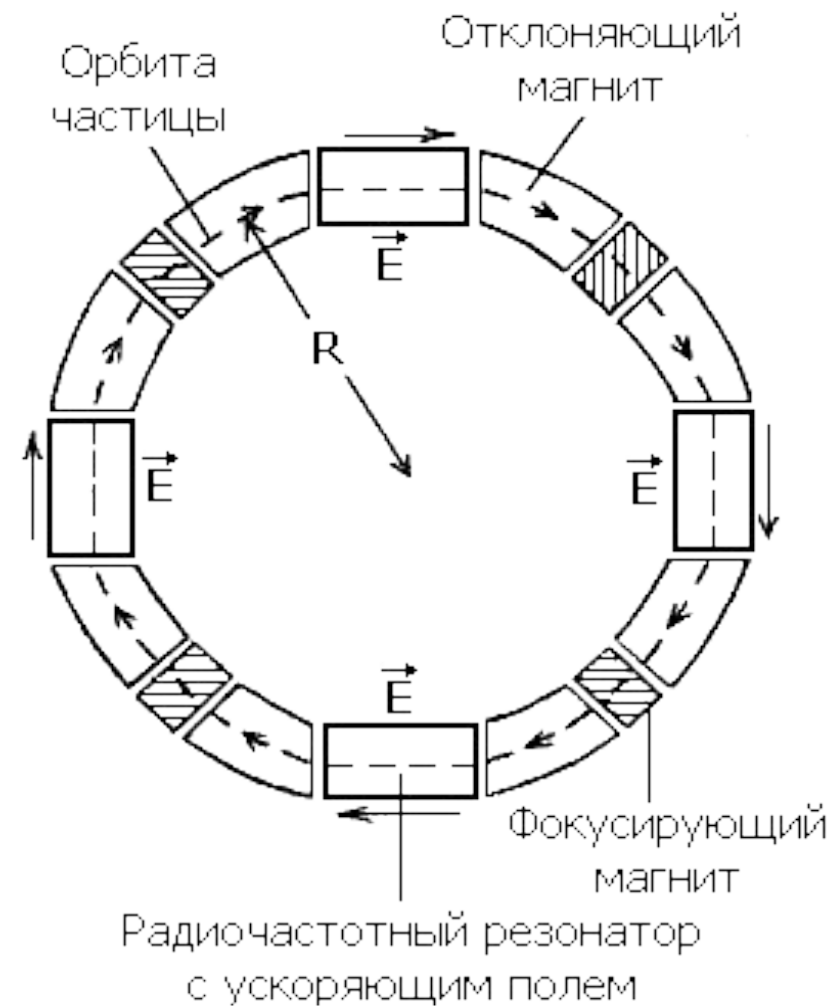


**3 группа –  
синхротрон**

# Синхротрон

Принцип действия:

- ведущее поле с радиальной фокусировкой растет по мере роста энергии частицы
- условие 2:1 не нужно, вместо этого частота ВЧ подстраивается под частоту обращения
- Принцип автофазировки (Векслер (1944) и Макмиллан (1945))
- Ограничение слабой фокусировки – очень большие поперечные размеры пучка -> очень громоздкие магниты (синхрофазотрон в Дубне, 1956г., вес магнитов 6000 тонн)
- Изобретение принципа сильной фокусировки, Кристофилос (1950, неопубликовано) и независимо Курант, Ливингстон и Снайдерс (1952)







**Рис. 2. Фрагмент ускорительного кольца протонного синхротрона на энергию 7 ТэВ (ЦЕРН, Швейцария)**