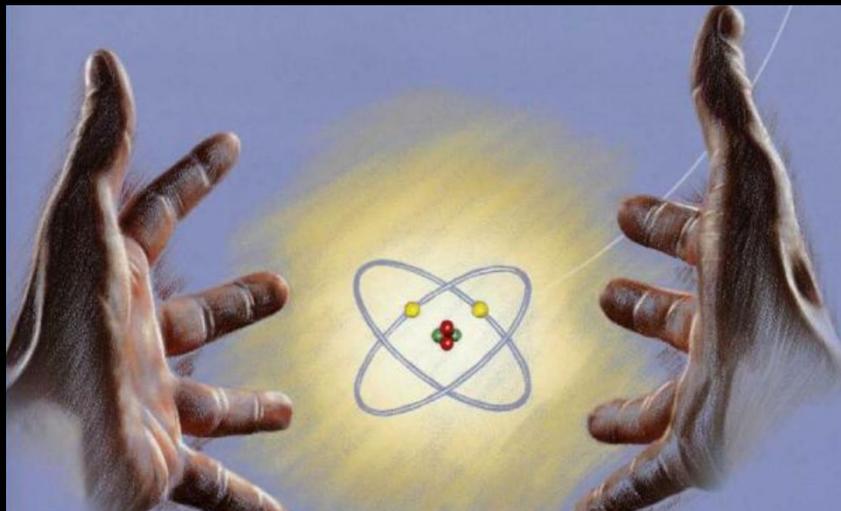


# Получение и применение радиоактивных изотопов

## Лекция (часть II)



# Получение радиоактивных ИЗОТОПОВ



- Радиоактивные изотопы получают в атомных реакторах и на ускорителях элементарных частиц

## Обзор различных методов активации

Налетающая частица и источник	Режим получения частицы	Энергия частицы	Типичная аналитическая реакция	Поток частицы см <sup>-2</sup> •с <sup>-1</sup>
<b>Нейтроны</b>				
Ядерный реактор	Деление	Спектр деления	(n, γ)	Высокий 10 <sup>12</sup> -10 <sup>15</sup>
Генератор нейтронов	<sup>3</sup> T(d,n) <sup>4</sup> He	14 МэВ	(n,p), (n,α), (n,2n)	Средний 10 <sup>8</sup> -10 <sup>10</sup>
Циклотрон	d + Be → n	Переменный спектр	(n,p), (n,α), (n,2n)	Высокий 10 <sup>10</sup> -10 <sup>12</sup>
<b>Заряженные частицы</b>				
τ = p, d, t, <sup>3</sup> He, α				
Циклотрон	Ускорение	Переменный спектр	(τ, n), (τ, 2n) (τ, p), (τ, α),	Высокий 10 <sup>13</sup> -10 <sup>14</sup>
Линейный ускоритель				
<b>ФОТОНЫ</b>				
Электронный ускоритель	Образование тормозного излучения	Переменный спектр	(γ,n) , (γ,p)	Высокий 10 <sup>13</sup>



# Получение радиоактивных изотопов

## Применение радиоактивных изотопов

### Радиоактивные изотопы получают в атомных реакторах и на ускорителях элементарных частиц

Образование радиоактивных ядер происходит в результате взаимодействий стабильных ядер с ядерными частицами: нейтронами, протонами, ядрами других атомов, реже с квантами  $\gamma$ -излучения, называемых ядерными реакциями.

В результате таких взаимодействий во вновь образующихся ядрах происходит изменение соотношения  $Z/N$  и в зависимости от природы ядерных частиц они попадают в область нейтроноизбыточных, стабильных или нейтронодефицитных ядер атомов того же или другого элемента.

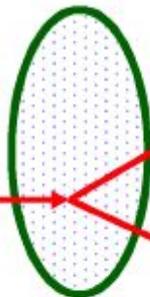
«Пушка со снарядами»

Частицы высоких  
энергий  
(Снаряды)



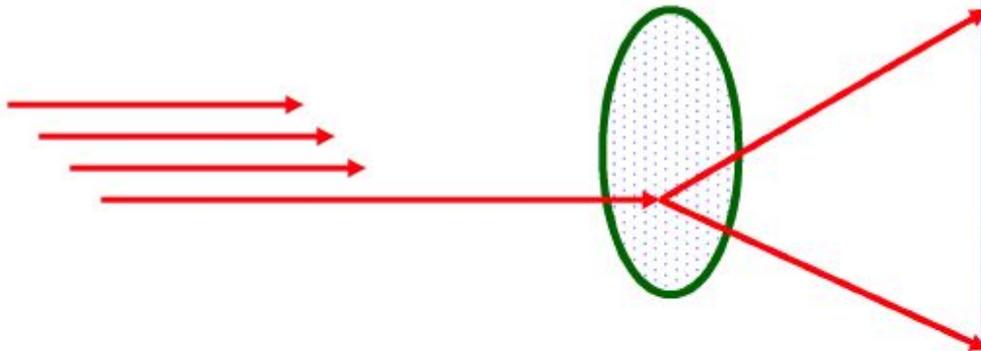
«Крепость»

Исследуемый  
объект  
(Мишень)

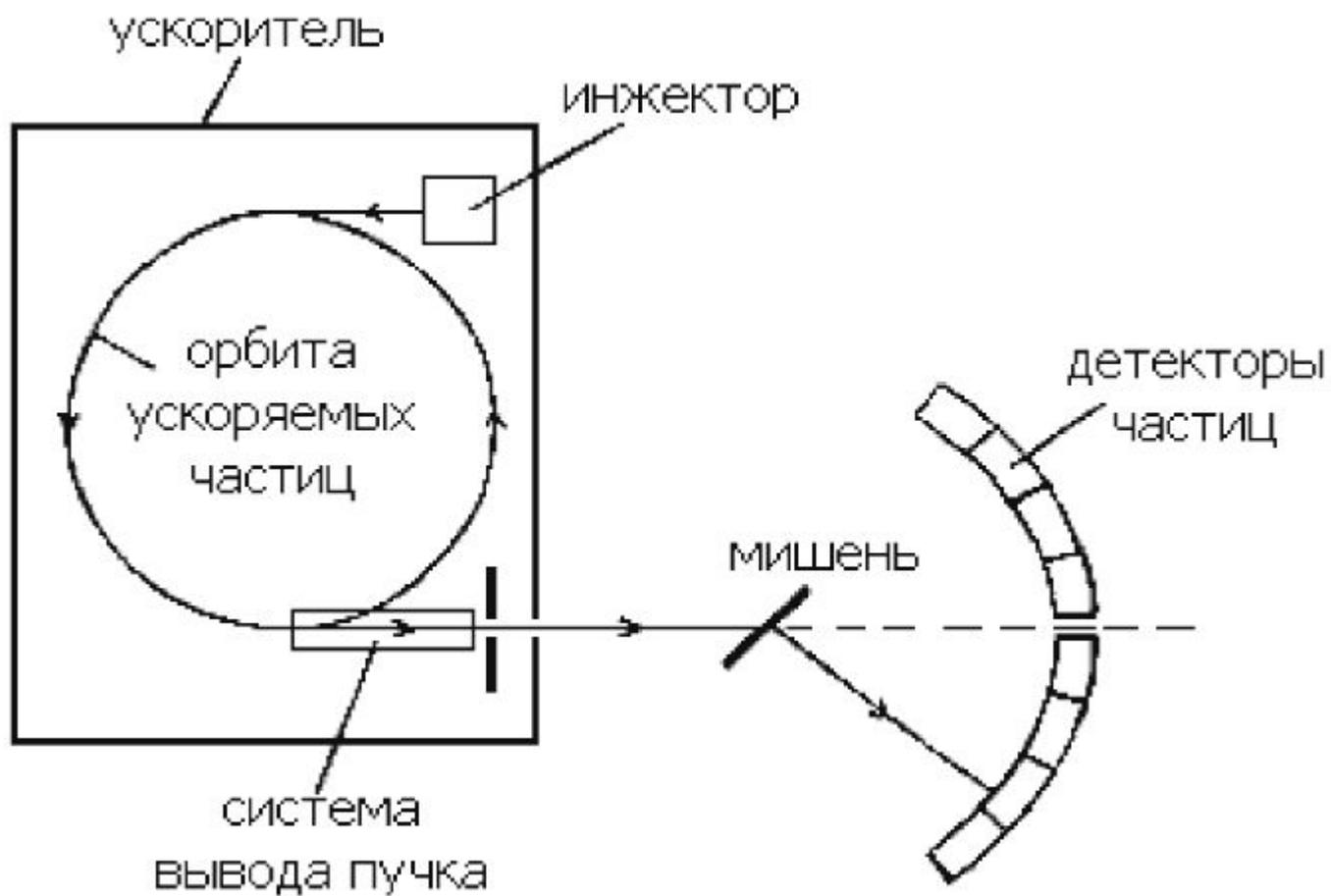


«Подзорная труба»

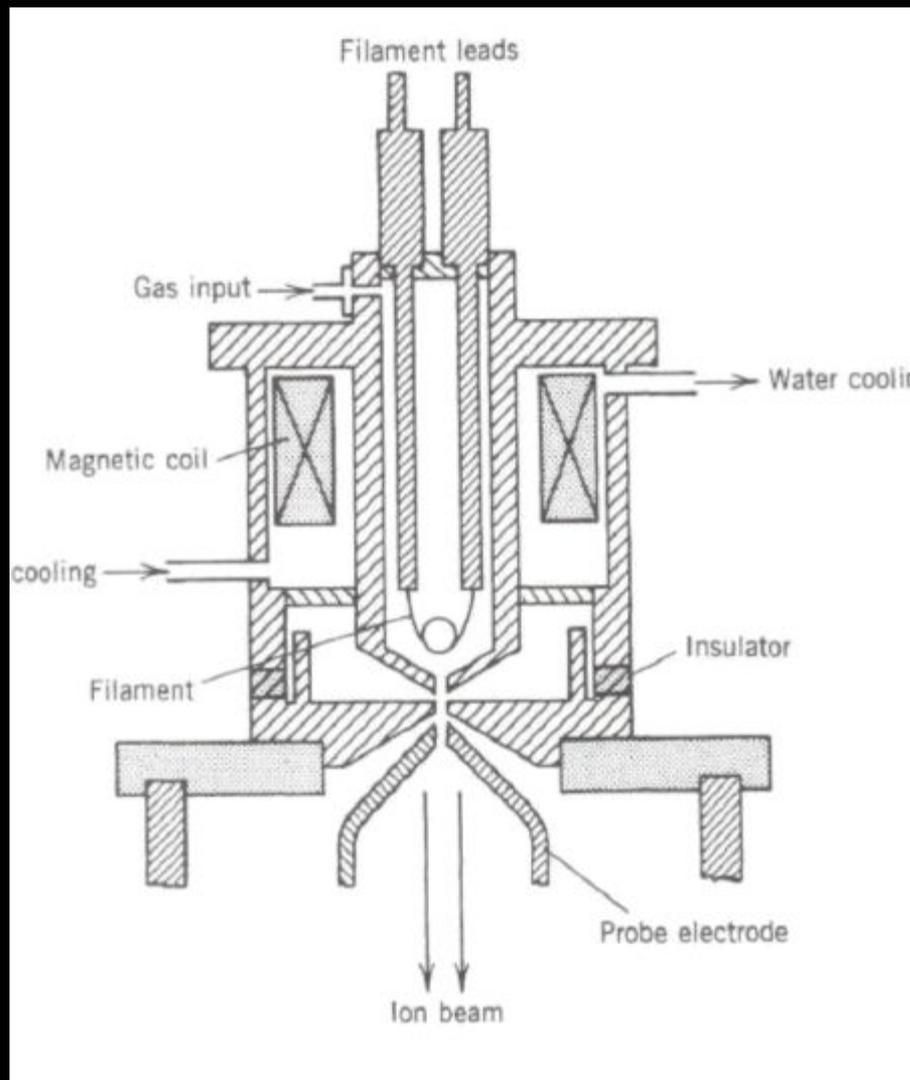
Устройства для  
регистрации  
результатов  
эксперимента  
(Детекторы)



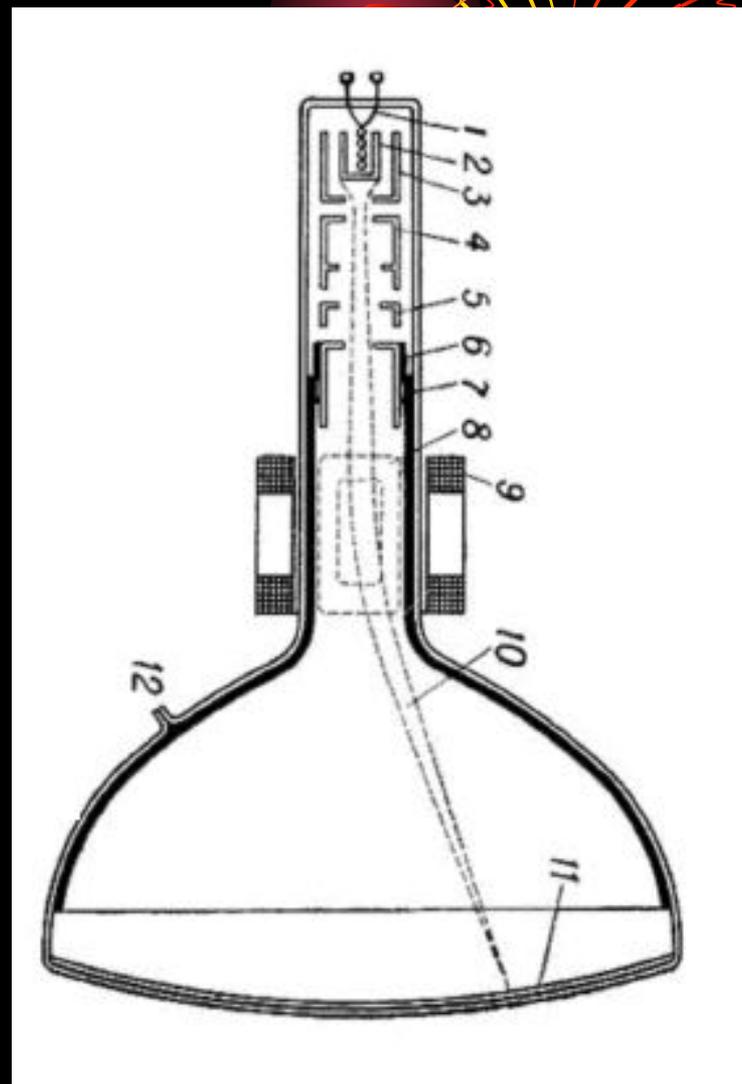
**Ускорительный эксперимент**



## Ускорительный эксперимент

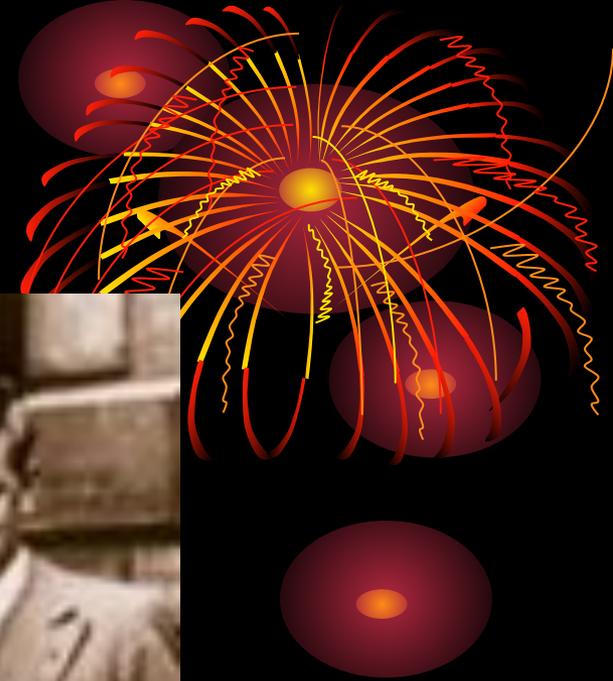


«Завод по производству снарядов»  
-ионный источник или инжектор

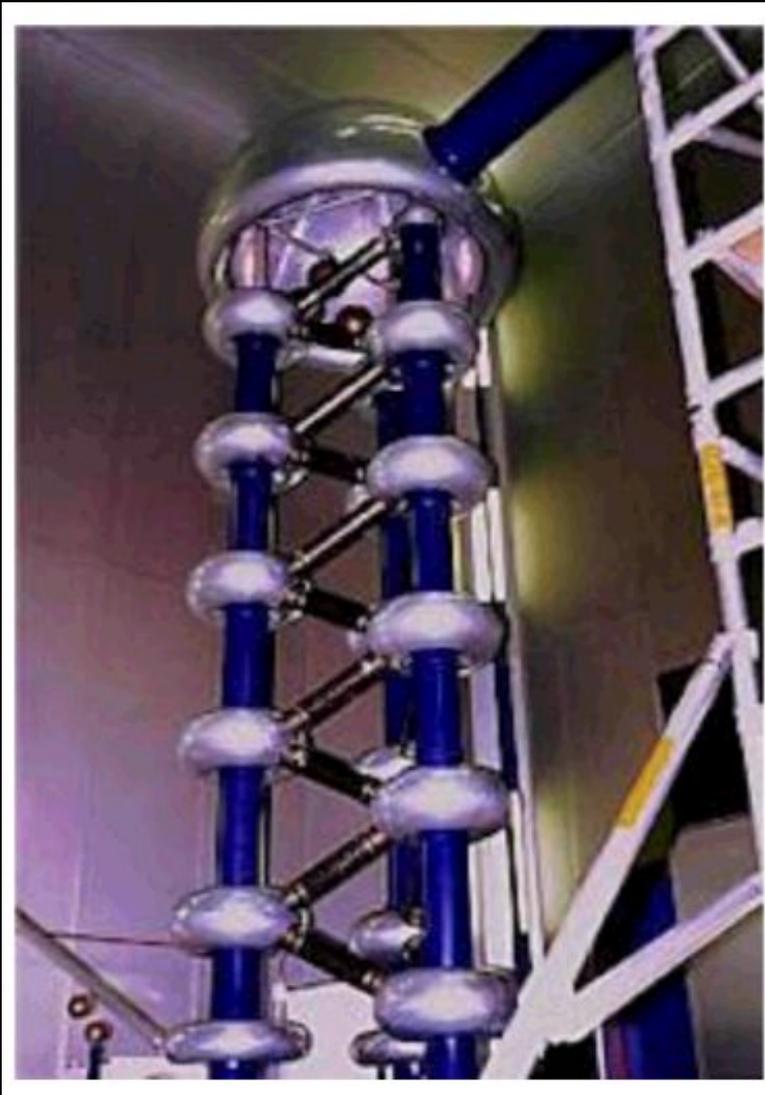


Кинескоп - аналог ускорителя

# Линейные ускорители



Создатели первого Дж.Кокрофт и Э.Уолтон получили Нобелевскую премию по физике 1951 года за «Трансмутацию атомных ядер с помощью искусственно ускоренных атомных частиц».



Каскадный генератор –  
ускоритель прямого действия (до ~1 МэВ)

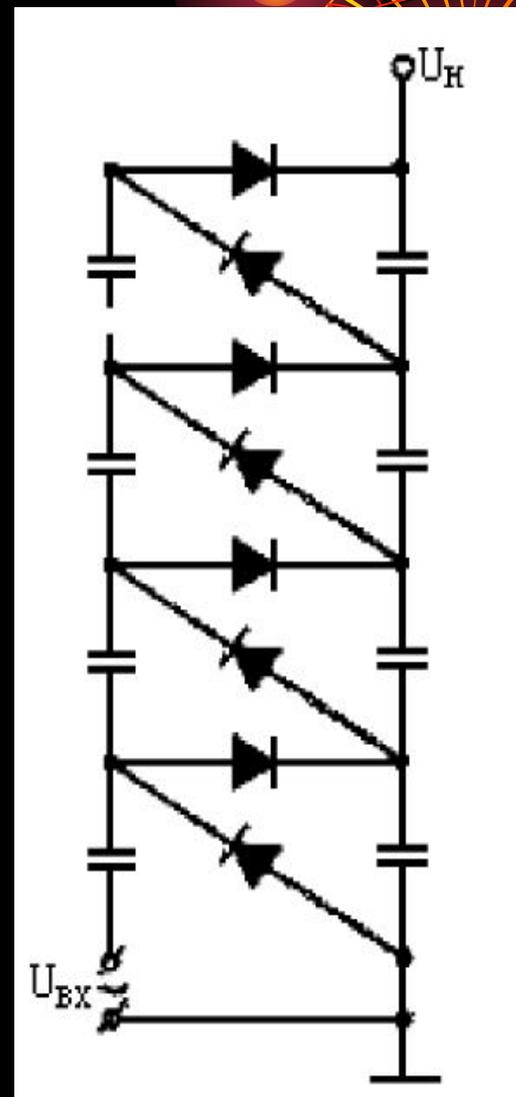
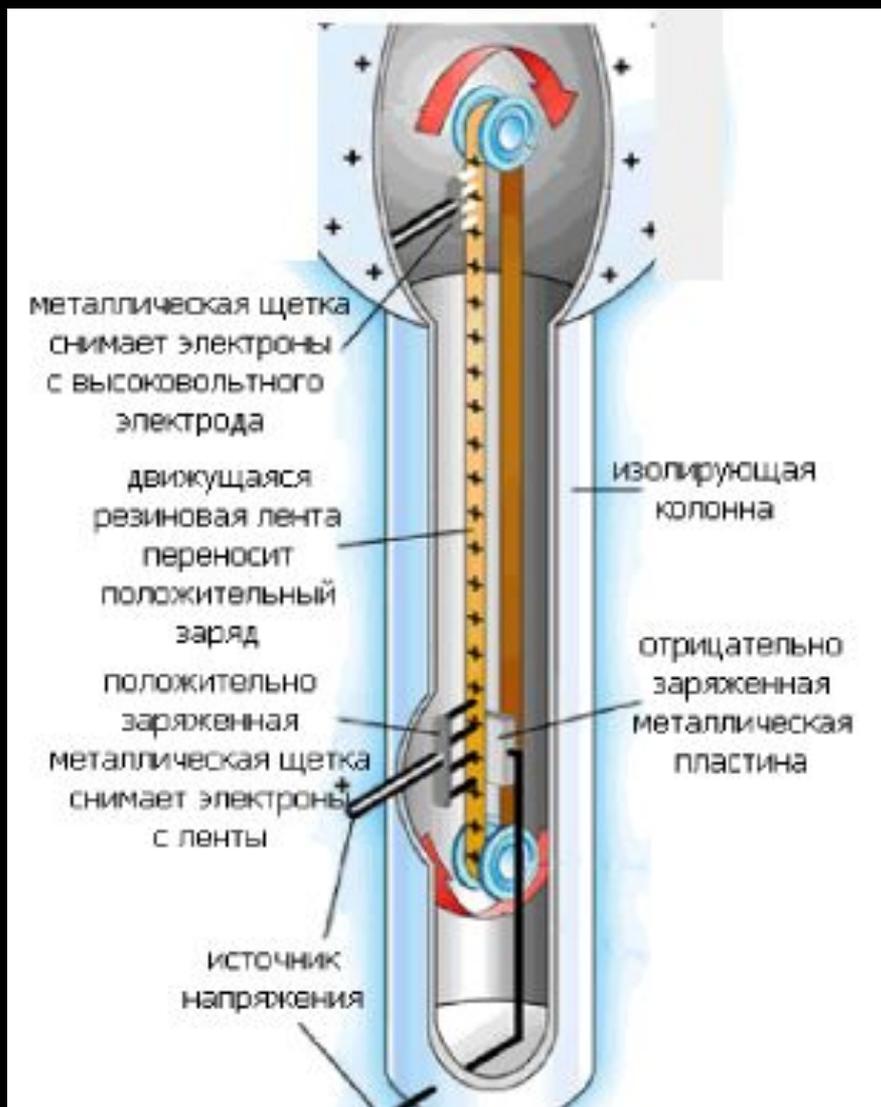
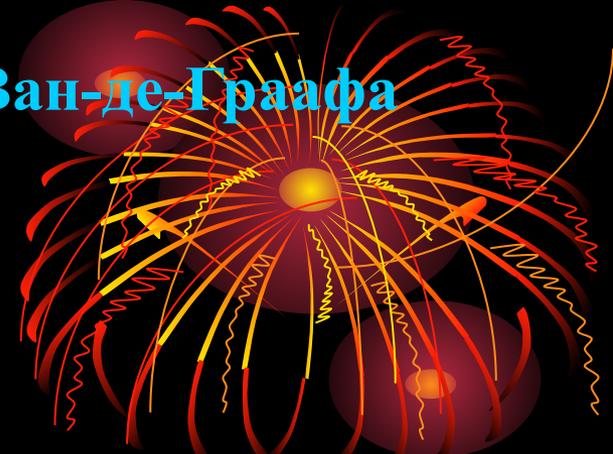


Схема умножителя напряжения  
(изобретен Г. Грейнахером в 1919)

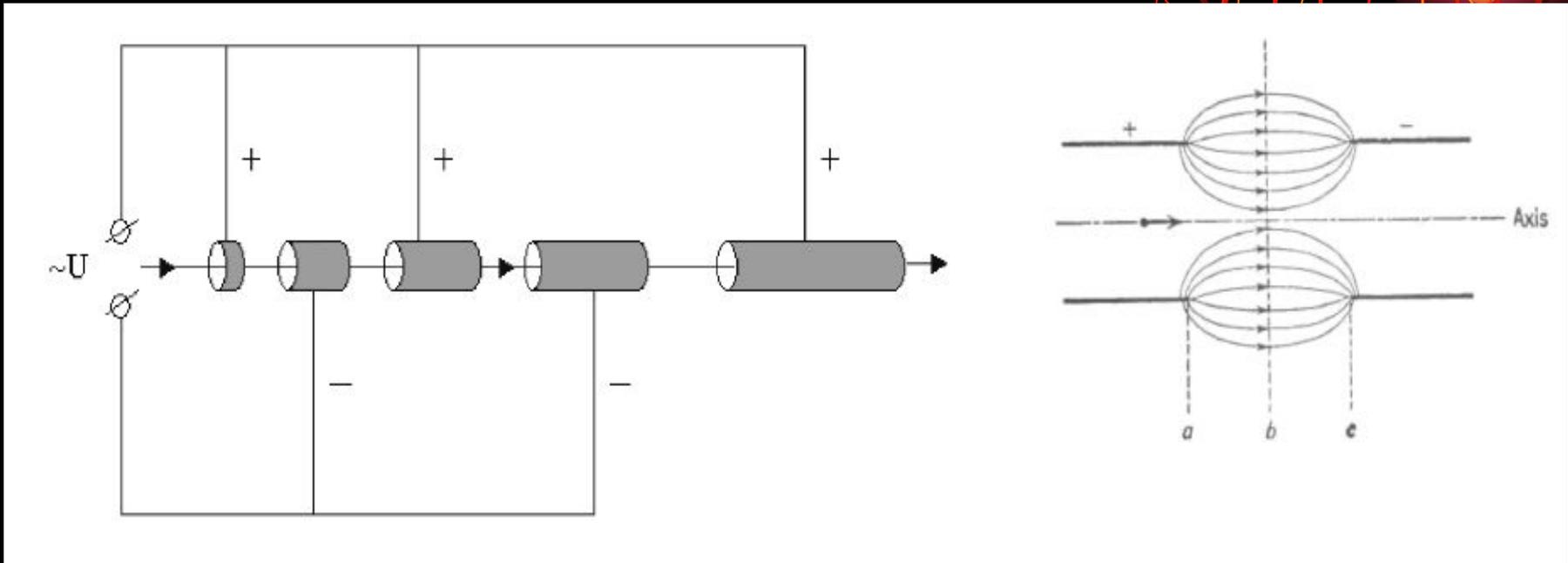
# Электростатический ускоритель Ван-де-Граафа



Генератор высокого напряжения  
Ван-де-Граафа (до-20МэВ)

# Линейный резонансный ускоритель

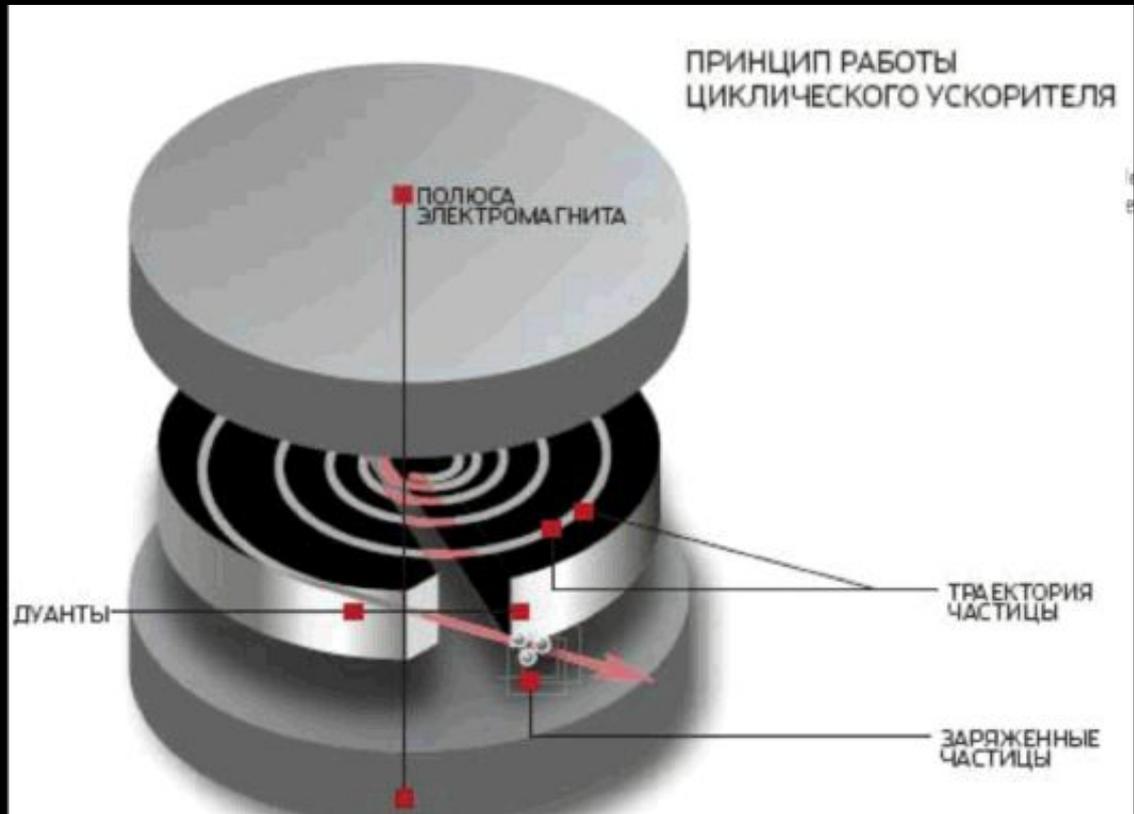
ускорение заряженных частиц осуществляется переменным электрическим полем высокой частоты



Длина трубки  $l_D$  скорость частицы  $U_n$  и частота ускоряющего поля  $f$  связаны соотношением

$$l_n = U_n (2f)$$

# Циклические ускорители

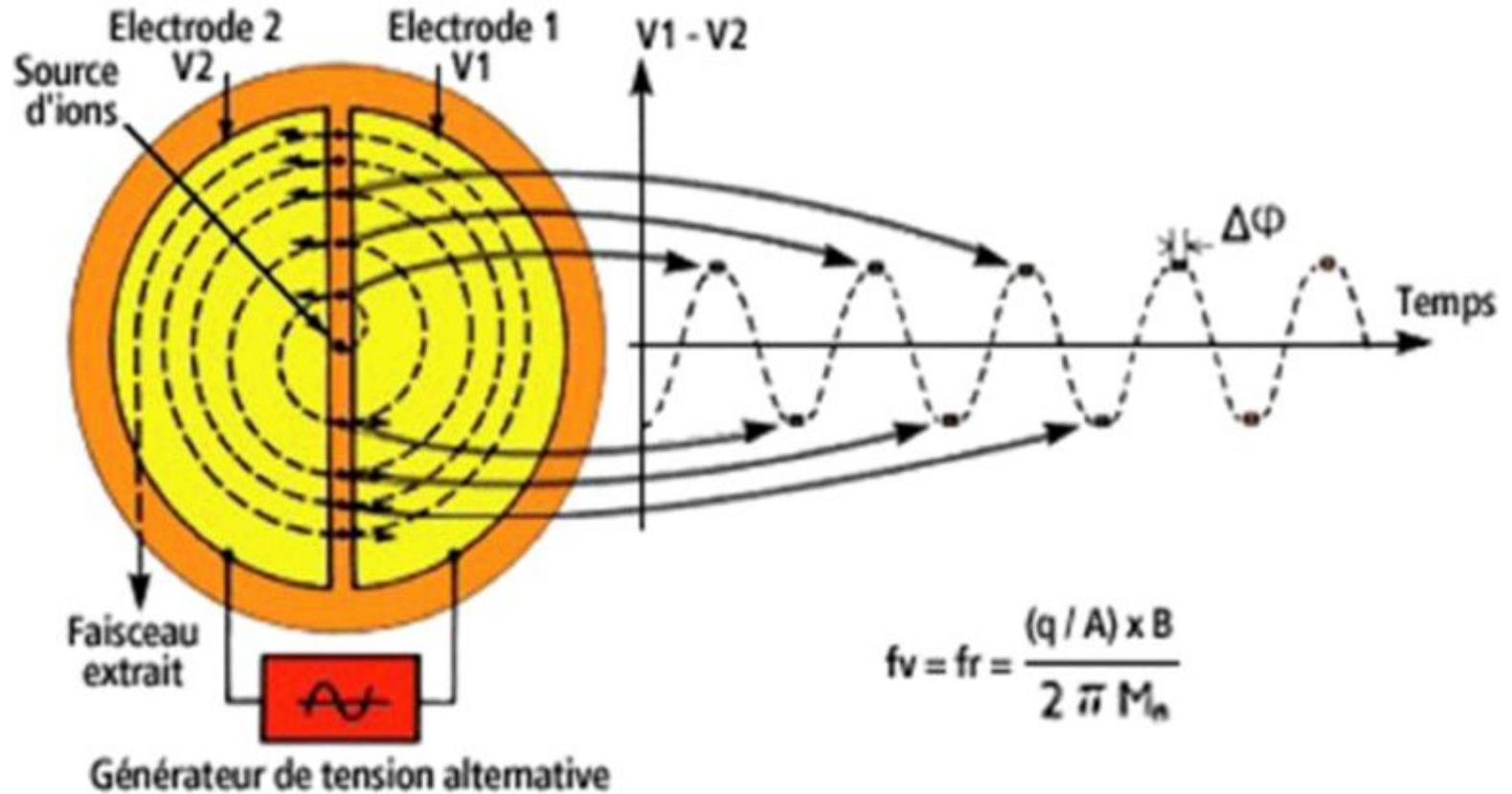


$$R = \frac{mv}{ZeB} \gamma \quad \gamma = [1 - (v/c)^2]^{-1/2}$$

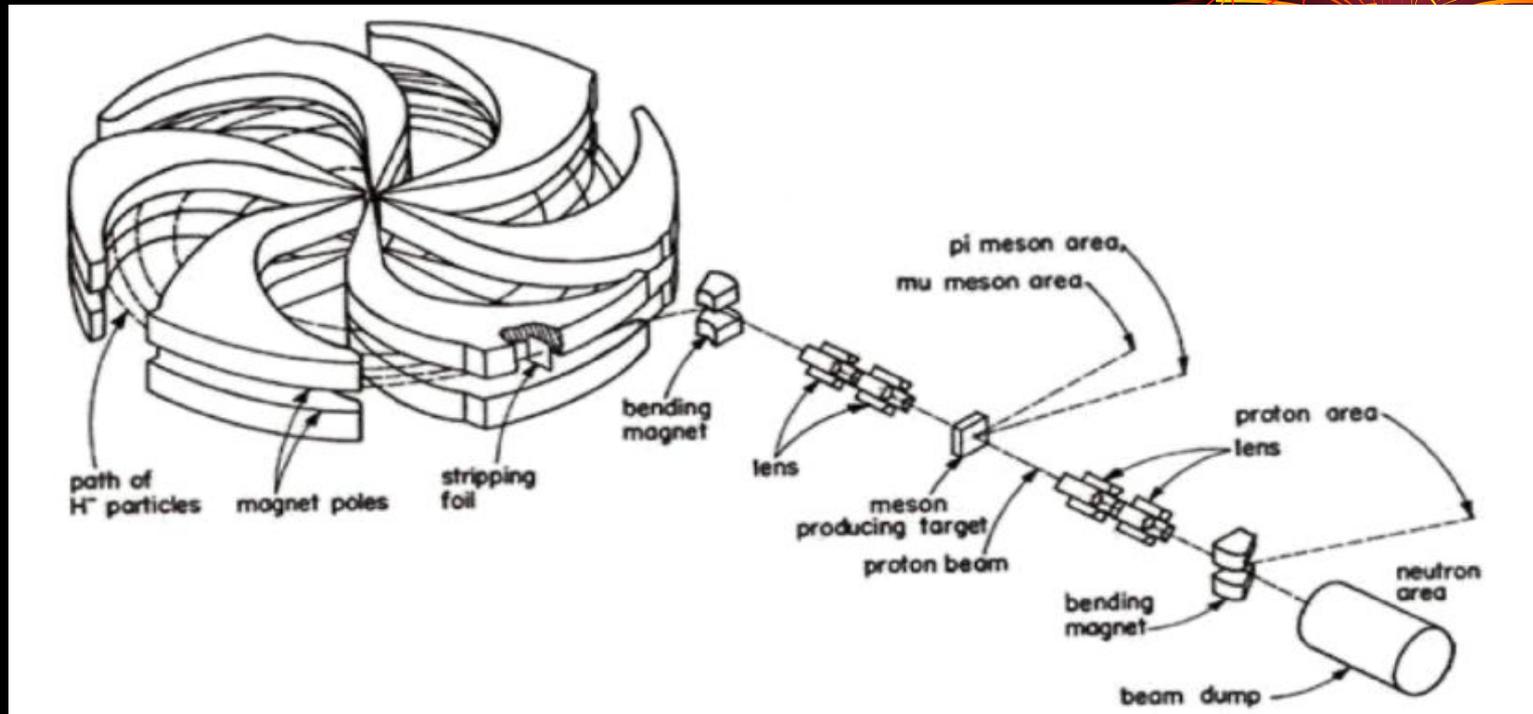
$$f = \frac{v}{2\pi R} = \frac{ZeB}{2\pi m}$$

$$E = mv^2/2 = (Ze)^2 B^2 R^2 / (2m)$$

# Циклические ускорители



# Синхроциклотрон (фазотрон)





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

## Синхротрон –

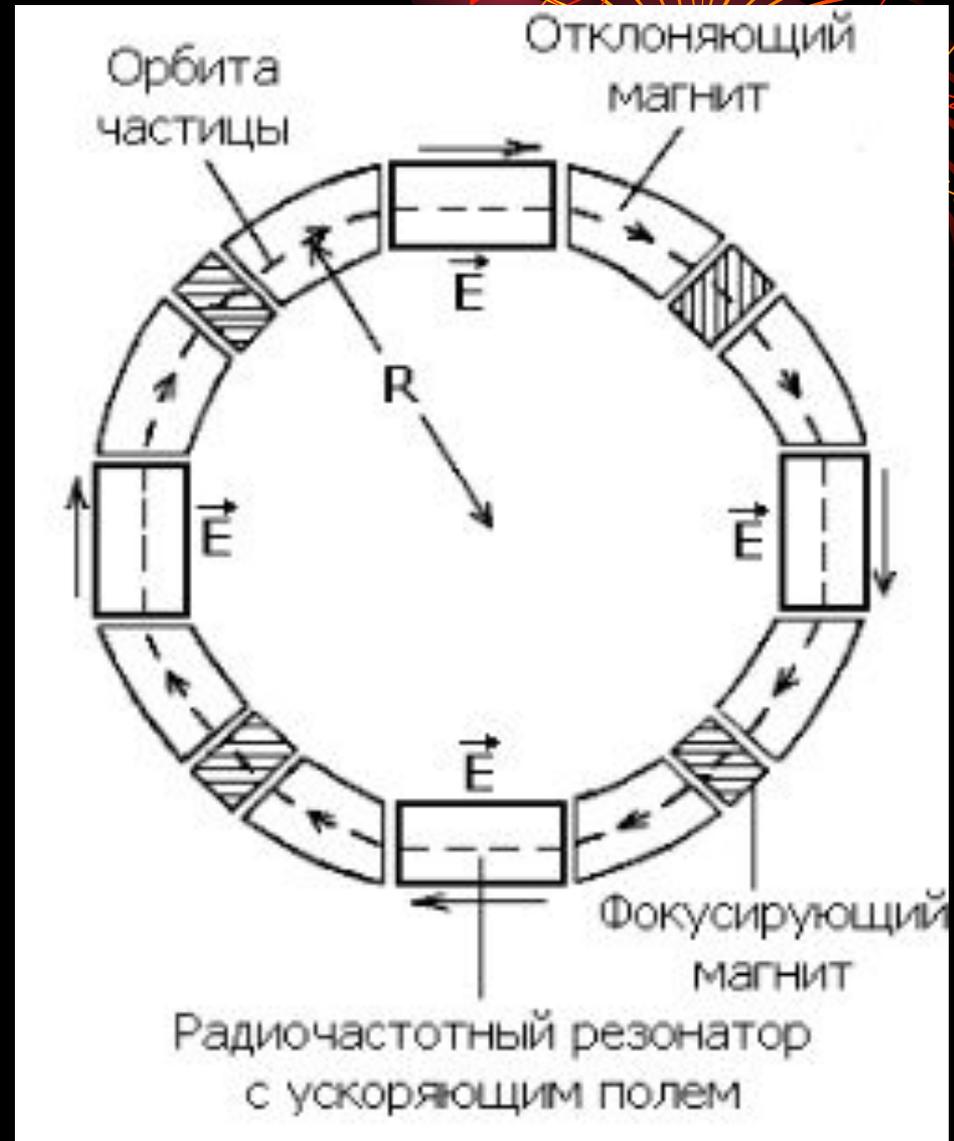
кольцевой циклический ускоритель заряженных частиц, в котором частицы двигаются по орбите неизменного радиуса за счёт того, что темп нарастания их энергии в ускоряющих промежутках синхронизован со скоростью нарастания магнитного поля на орбите.

Он позволяет ускорять как лёгкие заряженные частицы (электроны, позитроны), так и тяжёлые (протоны, антипротоны, ионы) до самых больших энергий.

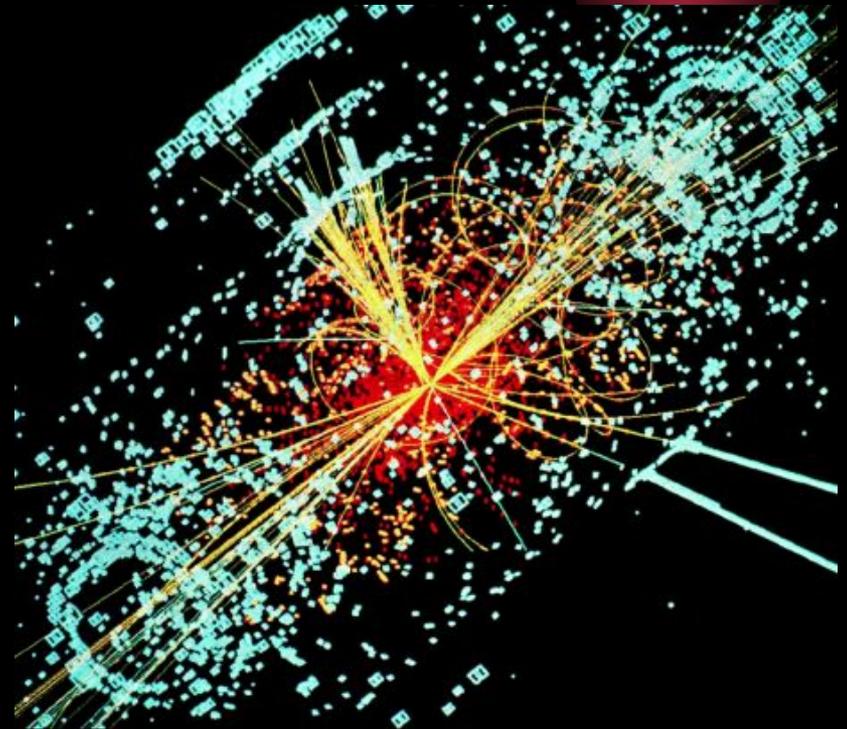
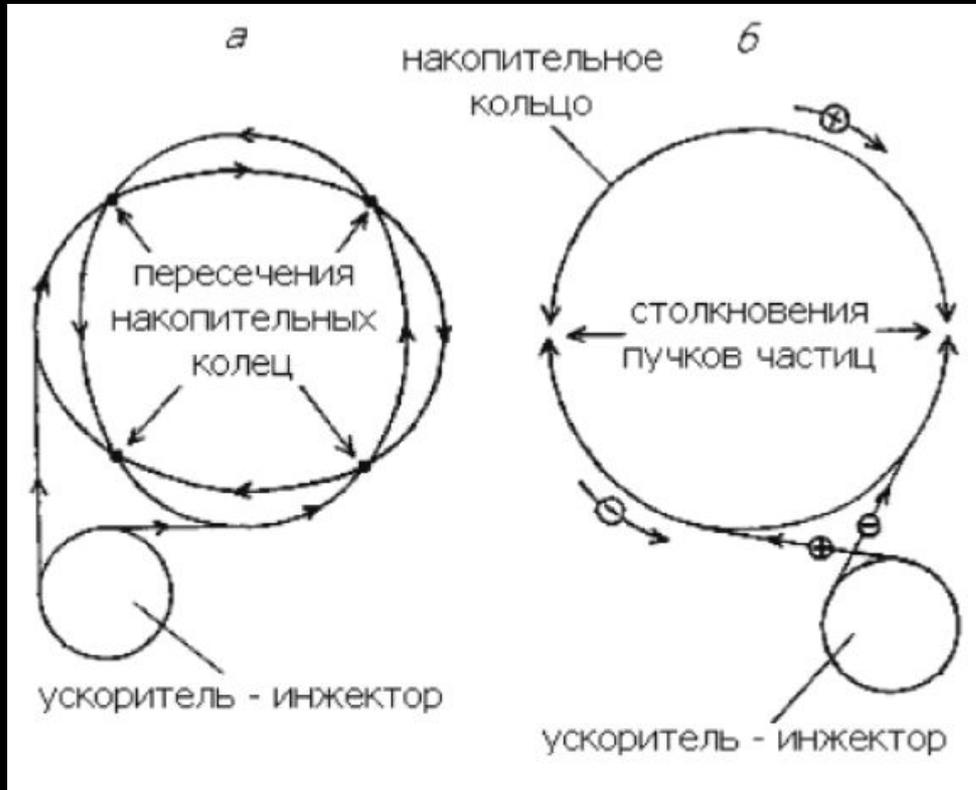
В настоящее время все циклические ускорители на максимальные энергии - это ускорители синхротронного типа (их принцип предложен в 1944 г. В. Векслером (СССР) и независимо в 1945 г. Э. Макмилланом (США)).

В синхротронах магнитное поле переменное и частицы двигаются по одной и той же замкнутой траектории, многократно проходя прямолинейные промежутки с ускоряющим электрическим полем радиочастотного диапазона.

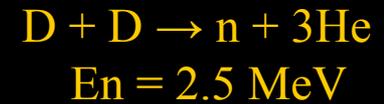
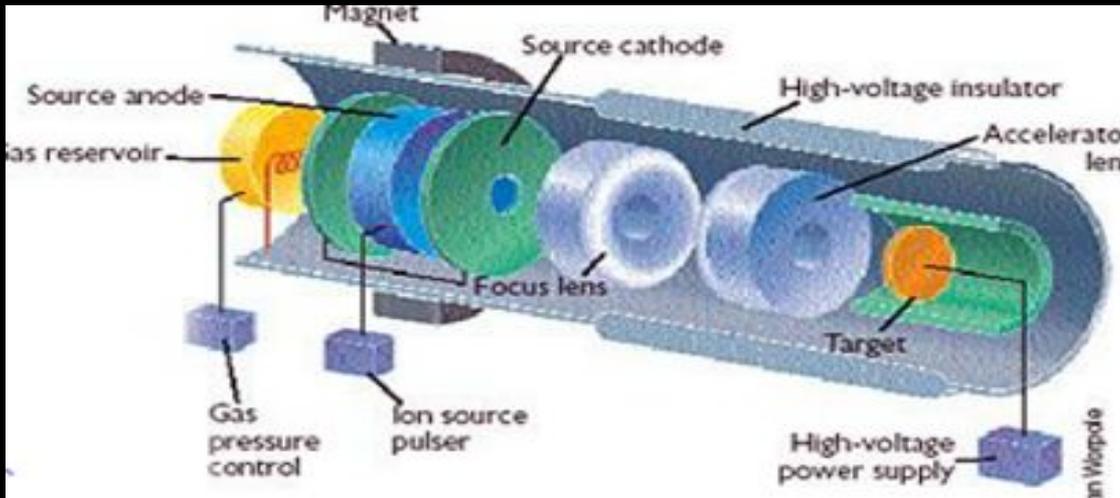
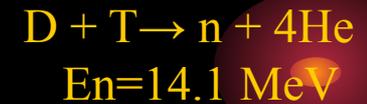
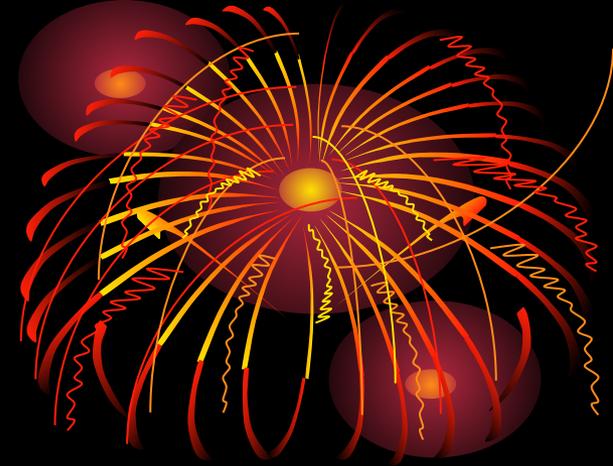
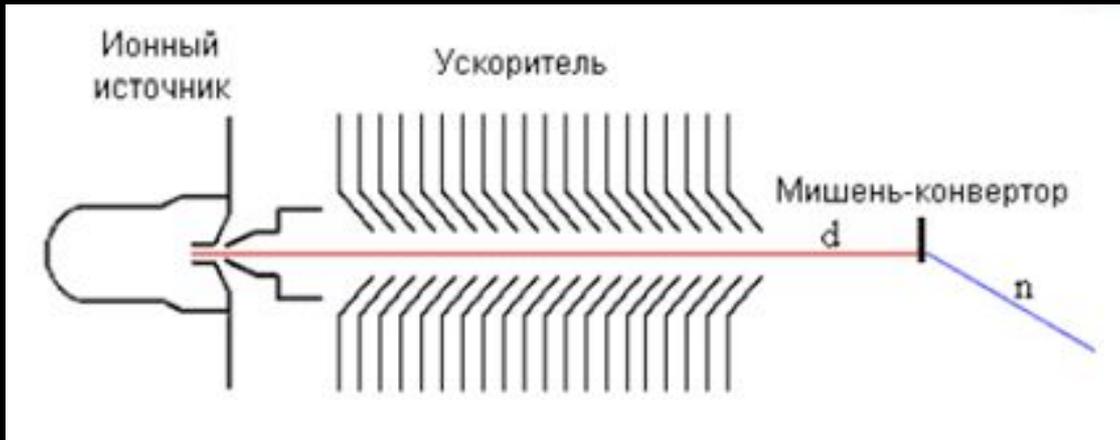
Частицы, увеличивающие свою энергию, удерживаются на фиксированной орбите с помощью нарастающего поля мощных отклоняющих (в том числе и сверхпроводящих) кольцевых магнитов.



# Коллайдеры



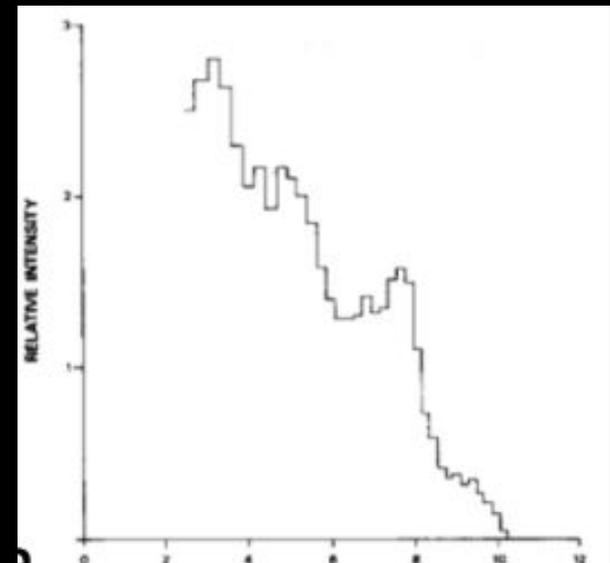
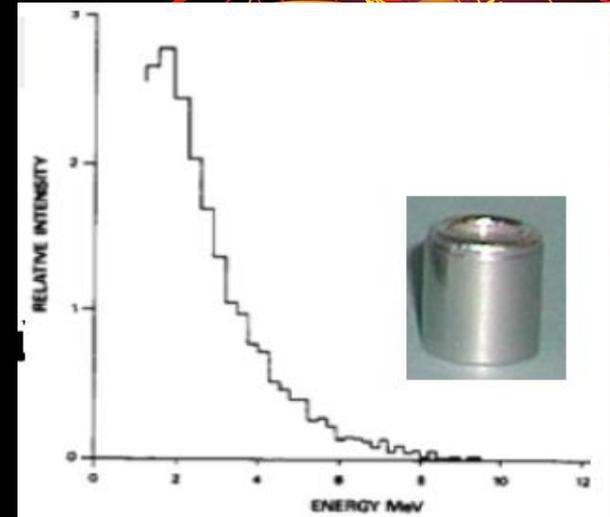
# Нейтронные генераторы



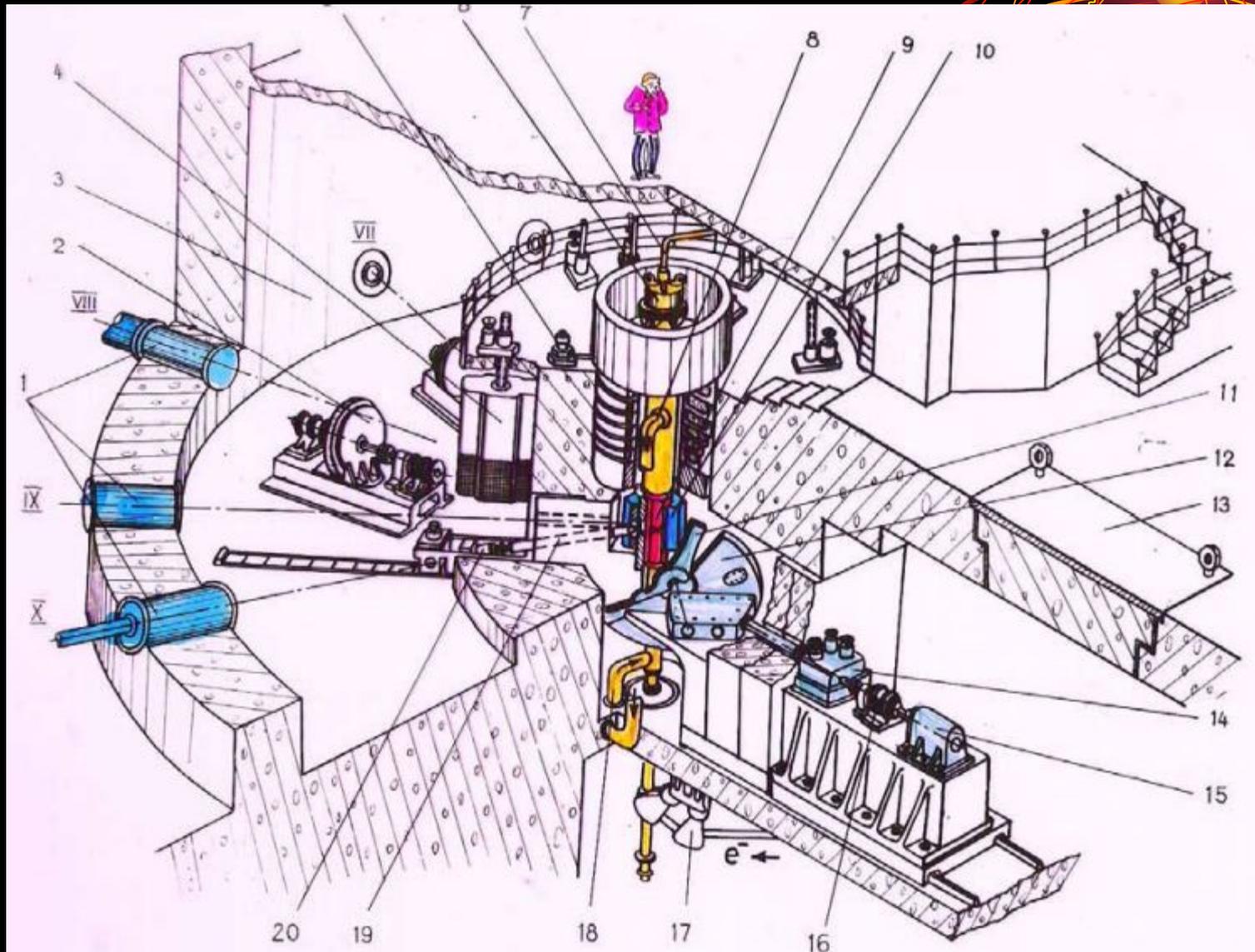
# Источники нейтронов

Тяжёлые радиоактивные изотопы со спонтанной нейтронной эмиссией, как например  $^{252}\text{Cf}$ ,  $^{238}\text{Pu}$

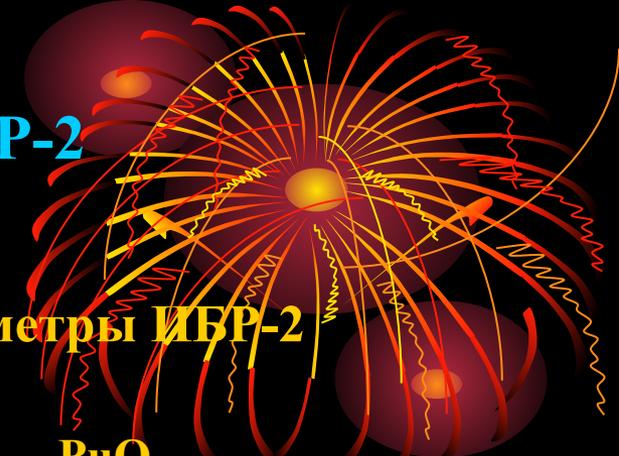
Альфа-активные изотопы, окружённые лёгкими элементами; PuBe, RaBe, AmLi за счет ядерных реакций типа  $^4\text{He} + ^9\text{Be} \rightarrow ^{12}\text{C} + n$



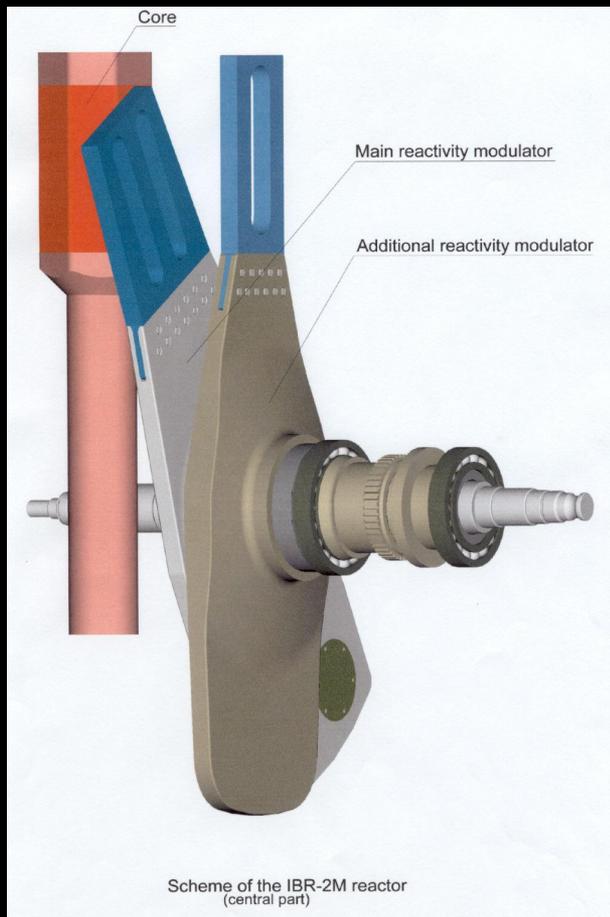
# Импульсный реактор ИБР-2



# Импульсный реактор ИБР-2



## Активная зона и подвижный отражатель ИБР-2



## Параметры ИБР-2

Топливо	$\text{PuO}_2$
Объем активной зоны	22 л
Охлаждение	жидкий Na
Средняя мощность	2 МВатт
Импульсная мощность	1500 МВатт
Частота повторения	$5 \text{ с}^{-1}$
Средний поток	$8 \cdot 10^{12} \text{ н/см}^2/\text{с}$
Поток в импульсе	$5 \cdot 10^{15} \text{ н/см}^2/\text{с}$
Ширина импульса	215 / 320 мкс
Число каналов	14

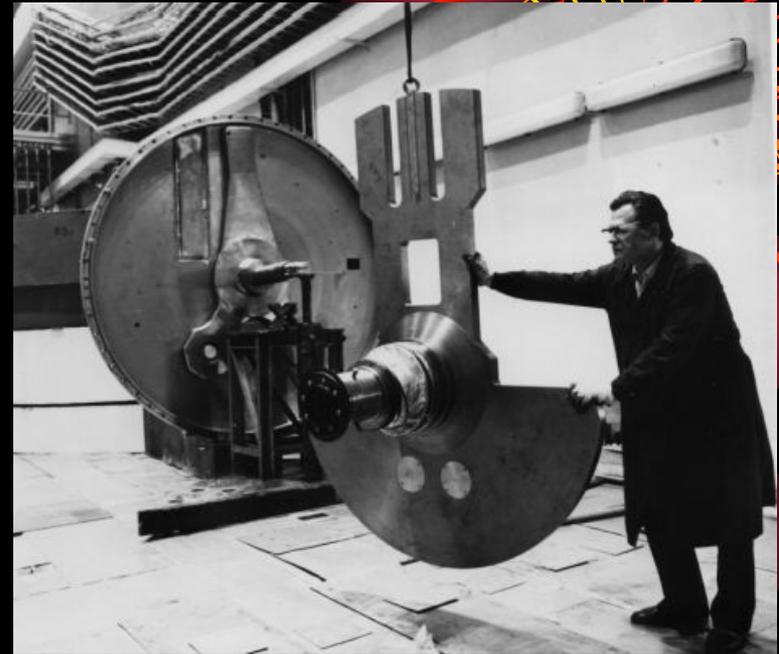
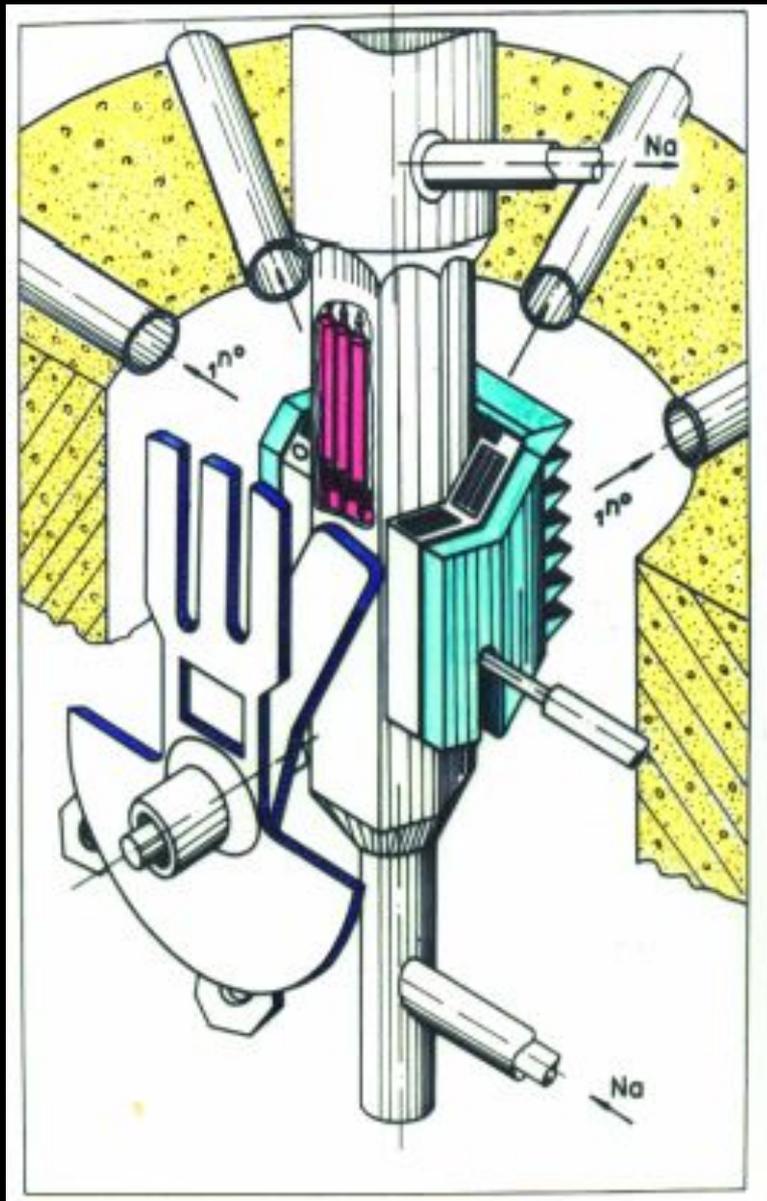
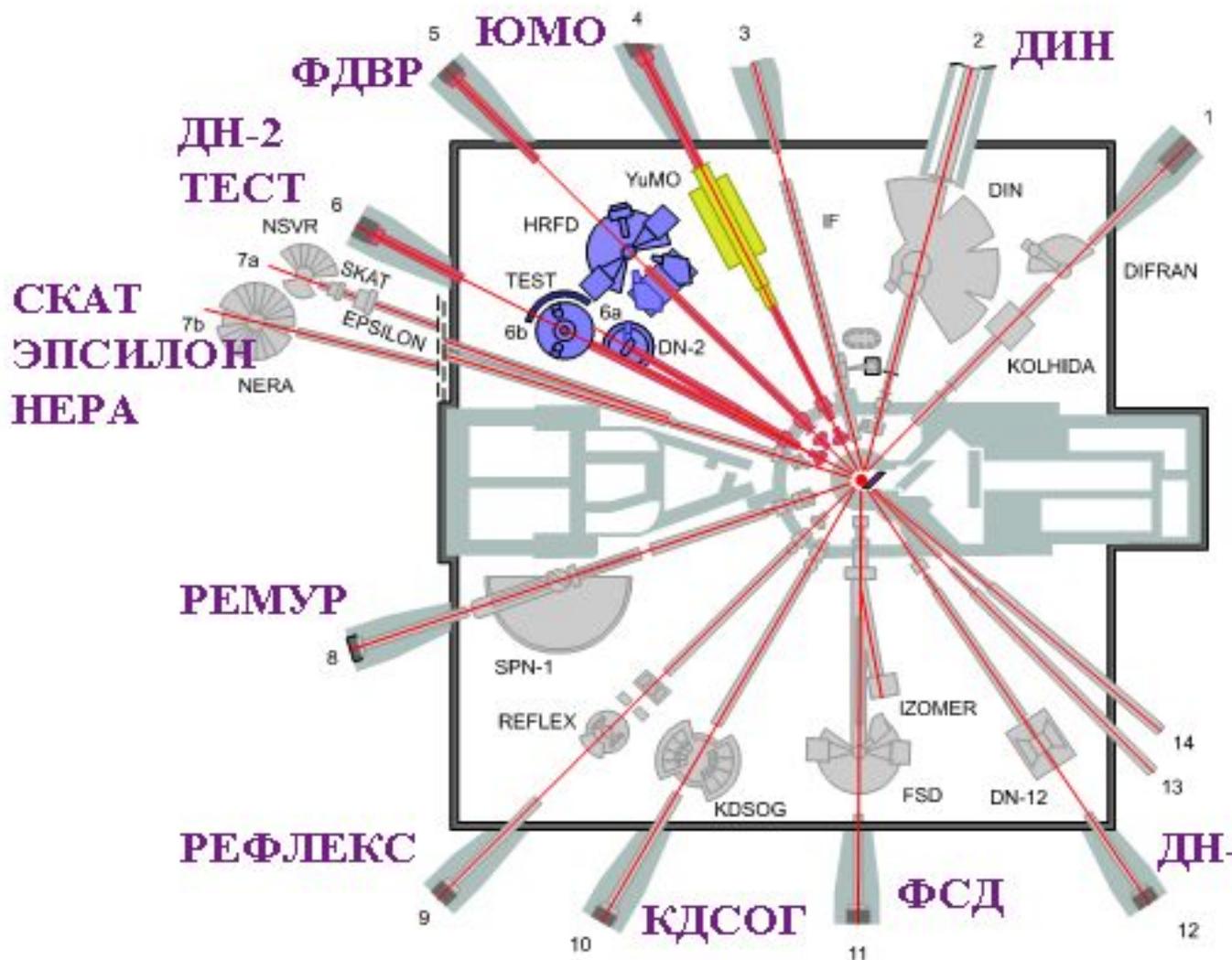


Схема реактора ИБР-2 с модулятором реактивности в виде двух подвижных отражателей: основного (ближний к активной зоне реактора) и дополнительного «трезубца».

# Спектрометры на реакторе ИБР-2



дифрактометры: 6  
МУРН: 2  
рефлектометры: 2  
НУ рассеяние: 3  
Действуют в  
режиме  
пользователей!

## Ультрахолодные нейтроны

Медленные нейтроны со скоростями  $5 \text{ м/с}$  или кинетической энергией  $E = 10^{-7} \text{ эВ}$  способны к полному отражению от поверхности материалов при любых углах падения.

Полное отражение таких **УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ** от стенок позволяет хранить их в течение нескольких минут внутри замкнутых вакуумированных камер в виде своеобразного нейтронного газа.

Термин "**УХН**" объясняется тем, что примерно такой же энергией обладают молекулы газа при температуре  $T \sim 10^{-3} \text{ К}$ .

**Время хранения УХН** в замкнутых сосудах ограничено временем жизни свободного нейтрона до бета-распада (12 мин = 887 секунд), а также процессами радиационного захвата и неупругого рассеяния нейтронов при отражении от стенок сосуда.

Практически в сосуде объёмом 50 л можно накопить 105 нейтронов и получить время хранения -500-800 с.

**УХН** получают путём выделения медленной компоненты Максвелловского спектра тепловых нейтронов, выходящих из замедлителя *ядерного реактора*. Впервые **УХН** были выделены А.Стрелковым в 1968 году время-пролётным методом на ИБР-2 ЛНФ им. И.М. Франка (ОИЯИ)



