

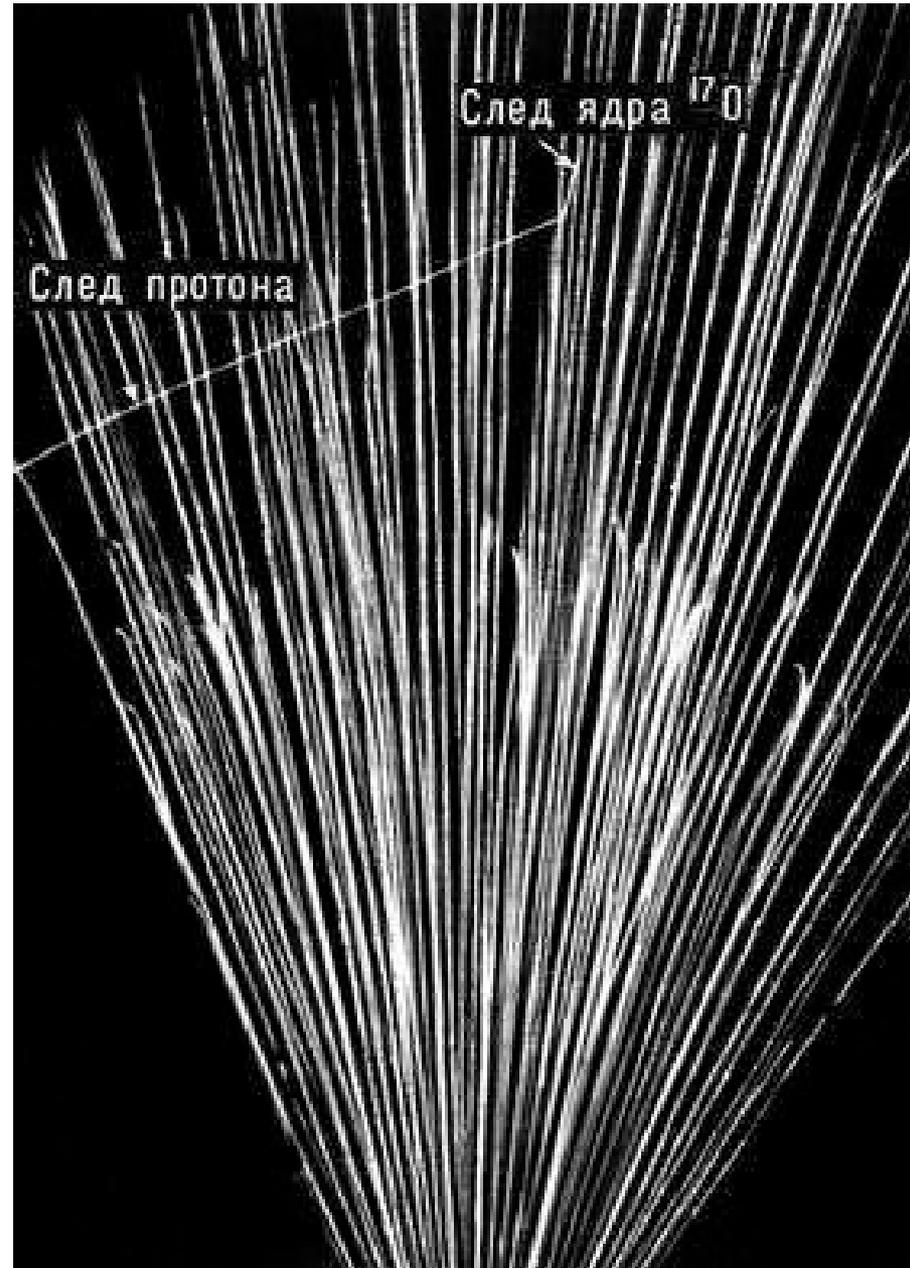


# Человек в мире атомных ядер

# ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

# 1919 г.

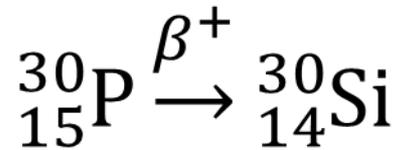
Э. Резерфорд осуществил первую искусственную ядерную реакцию  $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$  и доказал наличие в атомном ядре протонов.



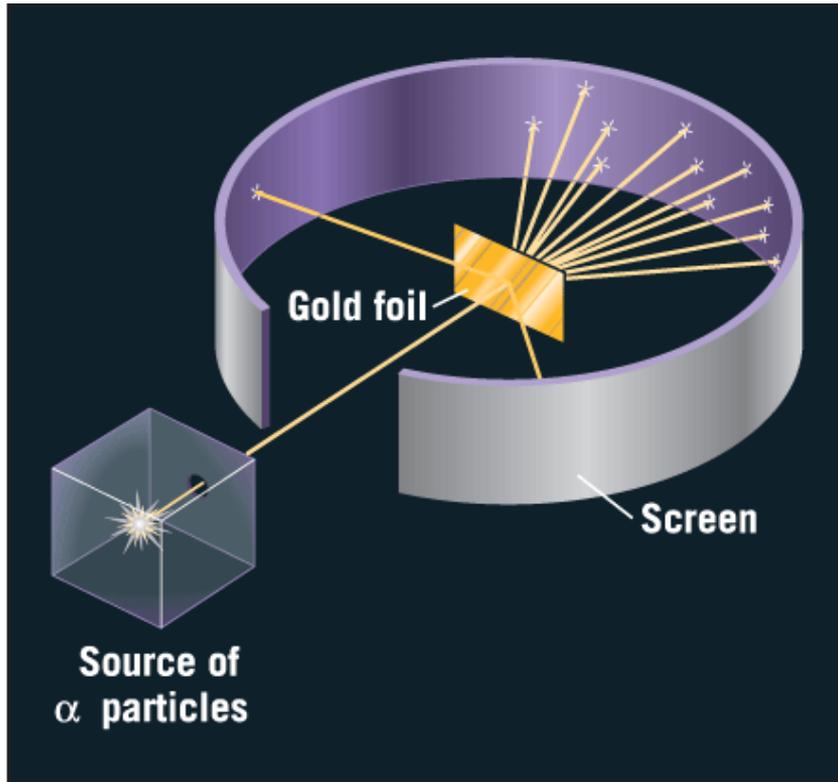
Любой процесс столкновения элементарной частицы с ядром или ядра с ядром называется **ядерной реакцией**.

**Ядерные реакции** – основной метод изучения структуры и свойств атомных ядер. В ядерных реакциях изучаются механизмы взаимодействия частиц и атомных ядер с атомными ядрами. В результате ядерных реакций получают новые не встречающиеся в естественных условиях изотопы и химические элементы.

### Обозначения



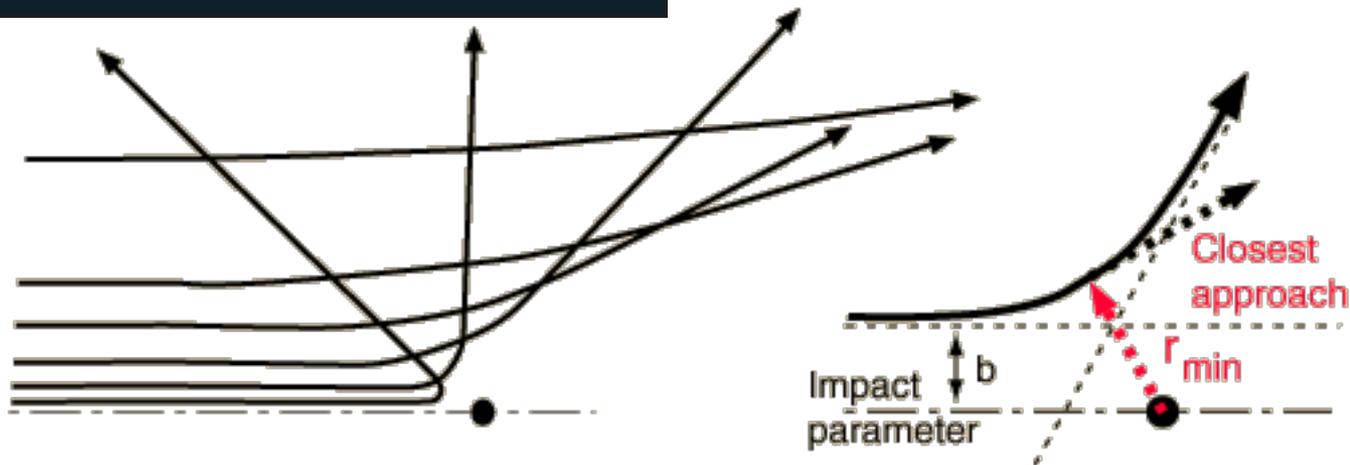
# 1911 г. Опыты по рассеянию $\alpha$ -частиц



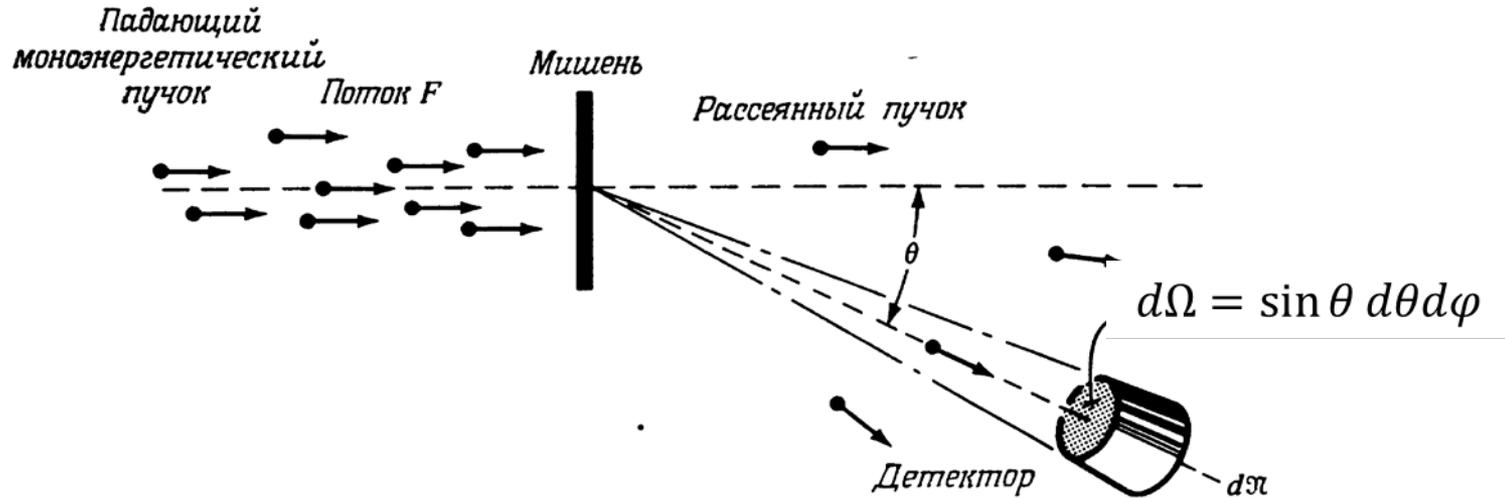
Упругое рассеяние альфа-частиц



$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4T} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$



# Сечение реакции $\sigma$



**Сечение реакции** – величина, определяющая вероятность перехода системы взаимодействующих частиц в определенное конечное состояние.

Сечение реакции под определенным углом называется **дифференциальным эффективным сечением**  $\frac{d\sigma(\theta, \varphi)}{d\Omega}$

**(Интегральное) эффективное сечение  $\sigma$**  – дифференциальное сечение, проинтегрированное по всем углам

$$\sigma = \int \frac{d\sigma(\theta, \varphi)}{d\Omega} \sin \theta d\theta d\varphi$$

# Сечение реакции и число событий N

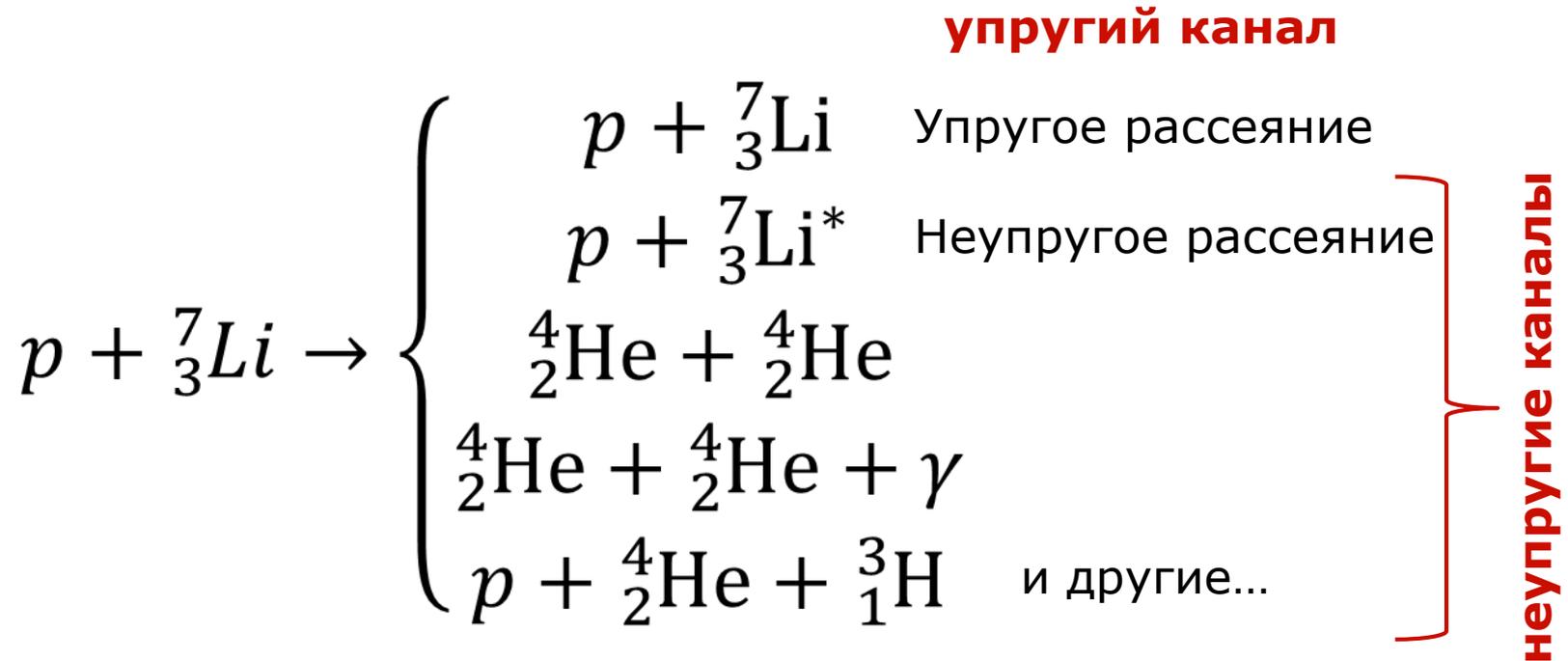
$$\frac{dN(\theta, \varphi)}{d\Omega} = j \cdot n \cdot l \cdot s \cdot \frac{d\sigma(\theta, \varphi)}{d\Omega}$$

$$N = j \cdot n \cdot l \cdot s \cdot \sigma$$

- $N$  – число событий в секунду,
- $j$  – поток частиц  $a$  через  $1 \text{ см}^2$  поверхности мишени,
- $n$  – число частиц в  $1 \text{ см}^3$  мишени,
- $s$  – площадь мишени в  $\text{см}^2$ ,
- $l$  – толщина мишени в см,
- $\sigma$  – сечение реакции.

$$\begin{array}{c} N \\ \left| \frac{\text{события}}{\text{сек}} \right| = \left| \frac{j}{\text{сек} \times \text{см}^2} \right| \left| \frac{n}{\text{см}^3} \right| \left| \frac{l}{\text{см}} \right| \left| \frac{s}{\text{см}^2} \right| \left| \frac{\sigma}{\text{см}^2} \right| \\ \begin{array}{c} j \\ n \\ l \\ s \\ \sigma \end{array} \end{array}$$

# Каналы ядерной реакции



**Полное сечение:** сумма сечений по всем неупругим каналам и сечения упругого рассеяния

$$\sigma_{\text{полн}} = \sigma_{\text{упр}} + \sigma_{\text{неупр}}$$

# **Законы сохранения в ядерных реакциях**

# Законы сохранения в ядерных реакциях



1. Закон сохранения энергии
2. Закон сохранения импульса

## Энергия реакции $Q$

$$Q = \sum m_i c^2 - \sum m_f c^2$$

$$Q = (m_a + m_A - m_b - m_B)c^2$$

$Q > 0$  – экзотермические реакции

$Q < 0$  – эндотермические реакции

Упругое рассеяние:  $Q = 0$

Распад:  $Q > 0$

# Законы сохранения в ядерных реакциях

Порог эндотермической реакции  $Q < 0$  —

минимальная кинетическая энергия, при которой возможно протекание эндотермической реакции

Лабораторная система отсчета

$$|p_A| = 0$$



$$T_a = |Q| \left( 1 + \frac{m_a}{m_A} + \frac{|Q|}{2m_A c^2} \right)$$

При  $Q \ll m_A$

$$T_a \approx |Q| \left( 1 + \frac{m_a}{m_A} \right)$$

Система центра инерции

$$|p_a| = |p_A|$$



$$T_b^* = T_B^* = 0$$

$$T_a^* + T_A^* = -Q$$

# Законы сохранения в ядерных реакциях



Число нуклонов (барионный заряд  $B$ )

$$A(a) + A(A) = A(b) + A(B)$$

Электрический заряд  $Q$

$$Z(a) + Z(A) = Z(b) + Z(B)$$

Момент количества движения  $J$

$$\vec{J}_a + \vec{J}_A + \vec{l}_{aA} = \vec{J}_b + \vec{J}_B + \vec{l}_{bB}$$

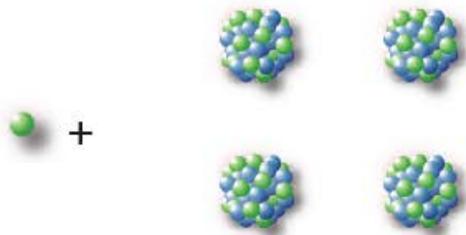
Четность  $P$

$$P_a P_A (-1)^{l_{aA}} = P_b P_B (-1)^{l_{bB}}$$

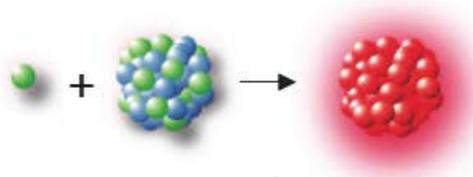
# Механизмы ядерных реакций

# Реакции под действием нейтронов

Рассеяние в конденсированных средах

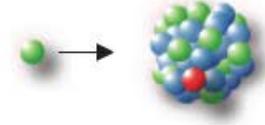


Реакции с образованием составного ядра



$$\tau \sim 10^{-16}$$
$$E_n < 10 \text{ MeV}$$

Прямые ядерные реакции



$$\tau \sim 10^{-22}$$
$$E_n > 10 \text{ MeV}$$



# Классификация ядерных реакций

При классификации ядерных реакций по времени протекания в качестве временного масштаба используют ядерное время – время пролёта частицы через ядро:

$$\tau_{\text{я}} = \frac{2R}{v} \approx 10^{-22} \text{ с}$$

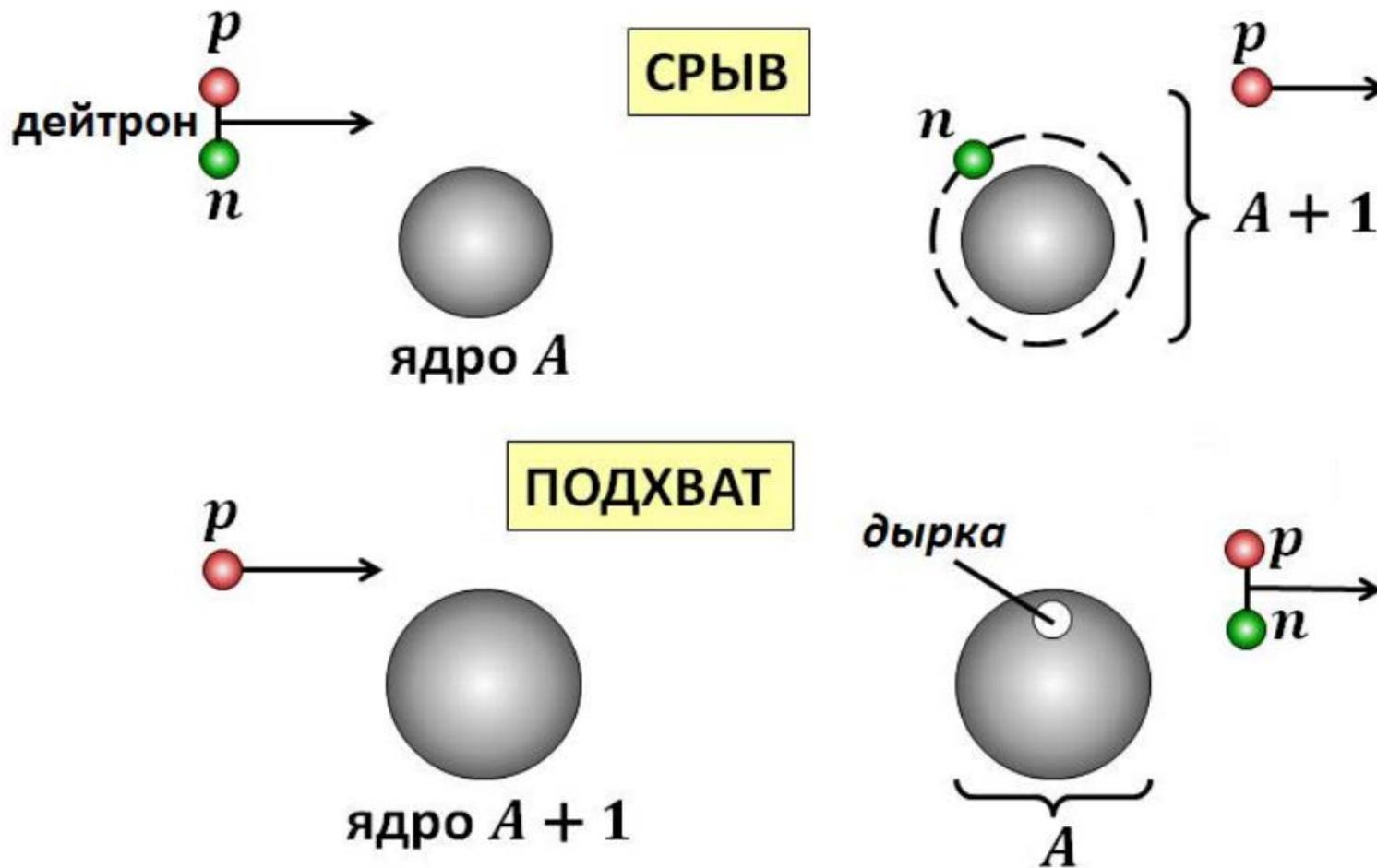
1. Если время реакции  $t_p \approx \tau_{\text{я}}$ , то это **прямая реакция**.

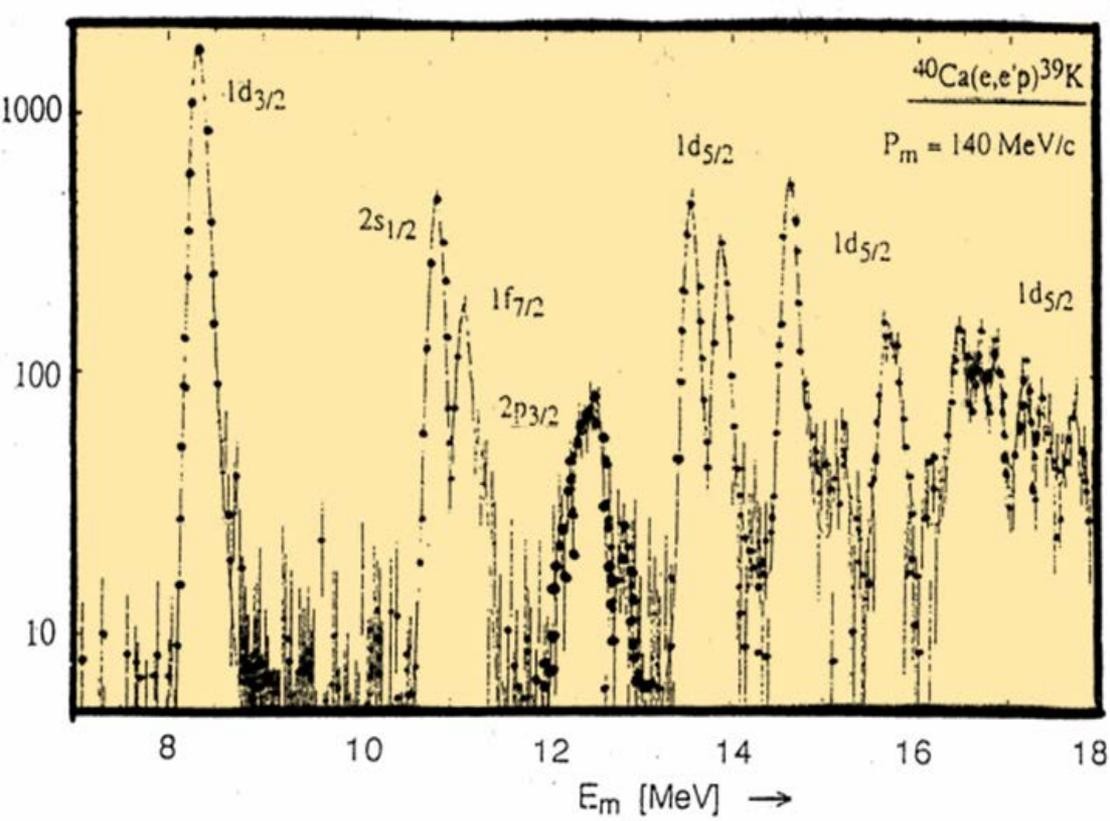
Налетающая частица  $A$  передаёт энергию одному-двум нуклонами ядра, не затрагивая остальных, и они сразу покидают ядро, не успев обменяться энергией с остальными нуклонами. Например, реакция (p, n) может произойти в результате столкновения протона с одним нейтроном ядра. К прямым процессам относятся реакции срыва (d,p), (d,n) и реакции подхвата (p,d), (n,d), реакции фрагментации, при которых нуклон высокой энергии, сталкиваясь с ядром, выбивает из него фрагмент, состоящий из нескольких нуклонов.

2. Если  $t_p \gg \tau_{\text{я}}$ , то реакция идёт через **составное ядро**. Налетающая частица  $A$  и нуклон, которому она передала энергию, «запутываются» в ядре. Энергия распределяется среди многих нуклонов, и у каждого нуклона энергия недостаточна для вылета из ядра. Лишь через сравнительно большое время в результате случайных перераспределений она концентрируется на одном из нуклонов или нескольких связанных нуклонах, и они покидают ядро. Механизм составного ядра предложен Нильсом Бором в 1936 г.

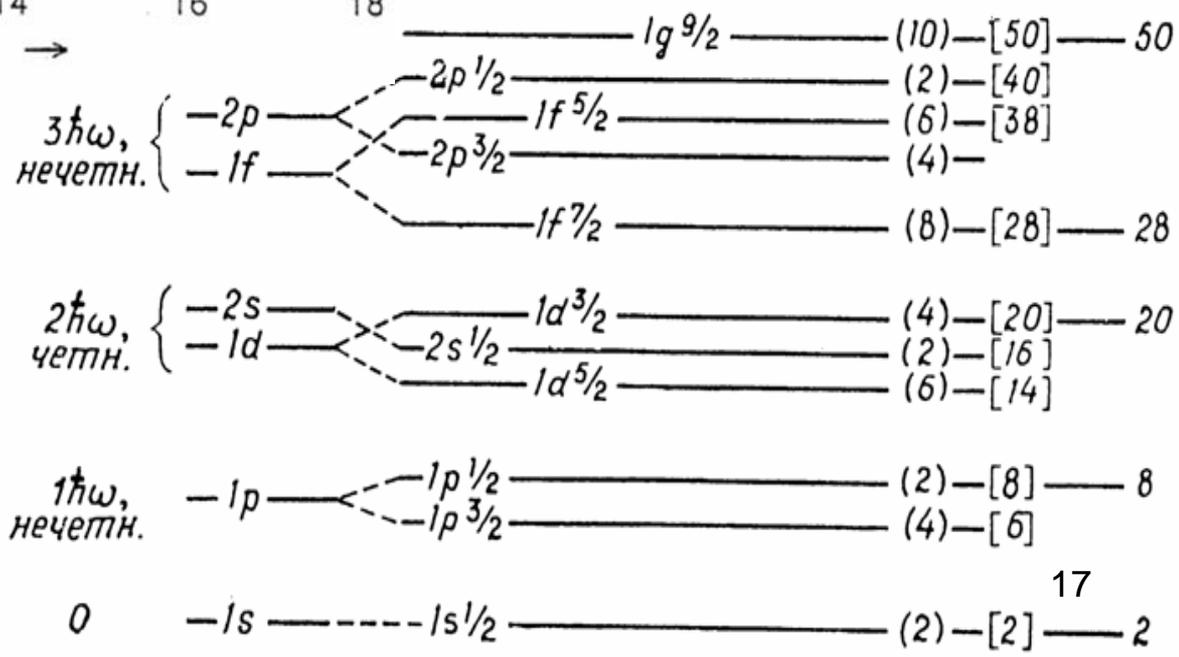
# Прямые ядерные реакции срыва и подхвата

**Пример:** реакции однонуклонной передачи (срыва и подхвата нуклона)



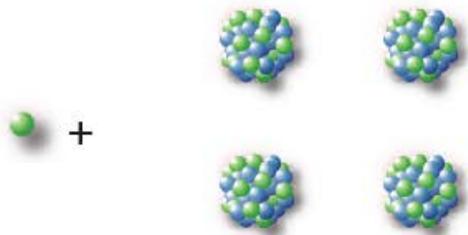


# $^{40}\text{Ca}(e,e'p)^{39}\text{K}$

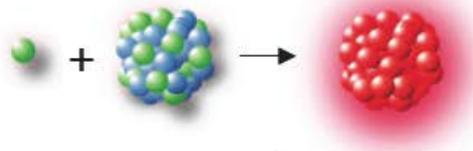


# Реакции под действием нейтронов

Рассеяние в конденсированных средах



Реакции с образованием составного ядра



$$\tau \sim 10^{-16}$$
$$E_n < 10 \text{ MeV}$$

Прямые ядерные реакции



$$\tau \sim 10^{-22}$$
$$E_n > 10 \text{ MeV}$$



# Реакции с образованием составного ядра



Оболочечная модель:  
Состояния нуклонов в  
потенциальной яме

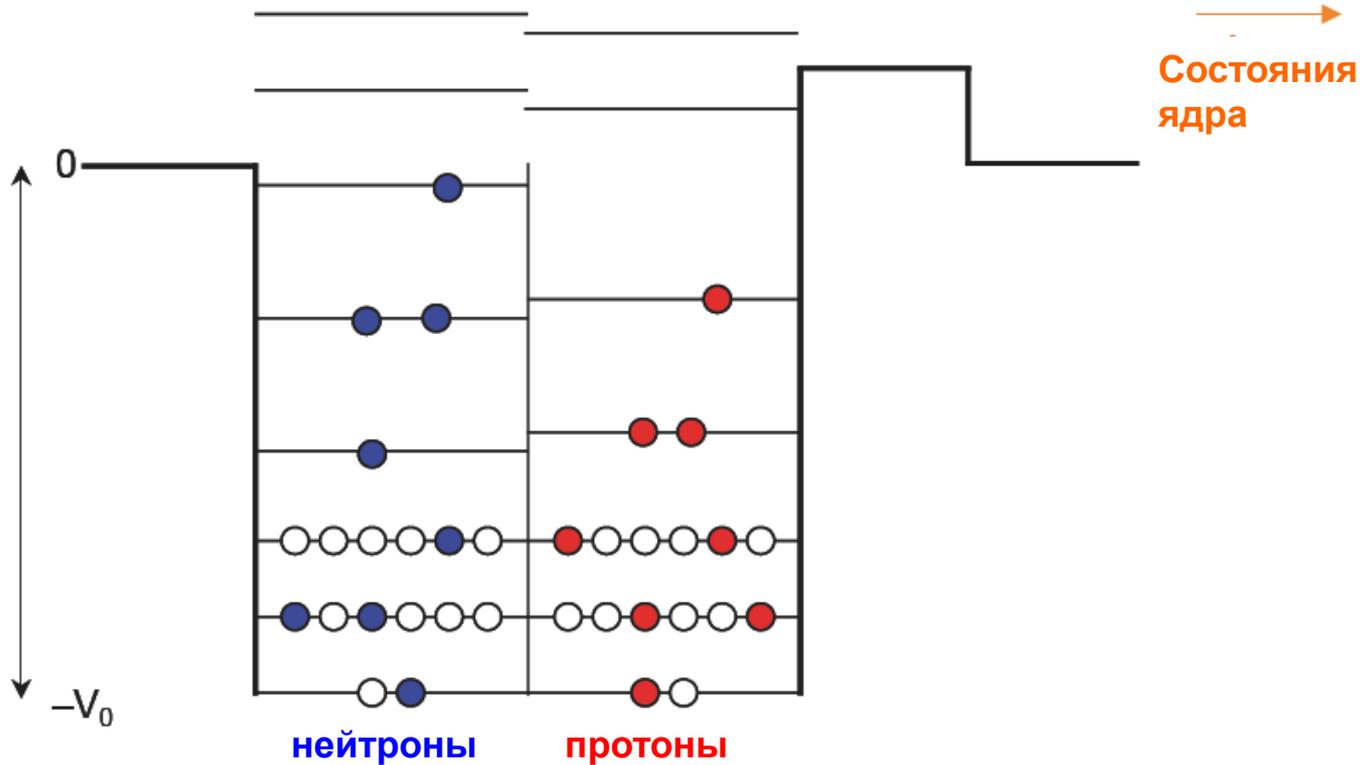
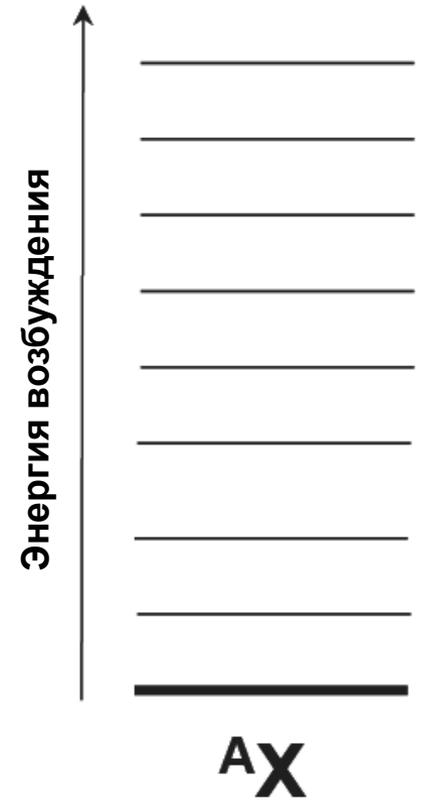
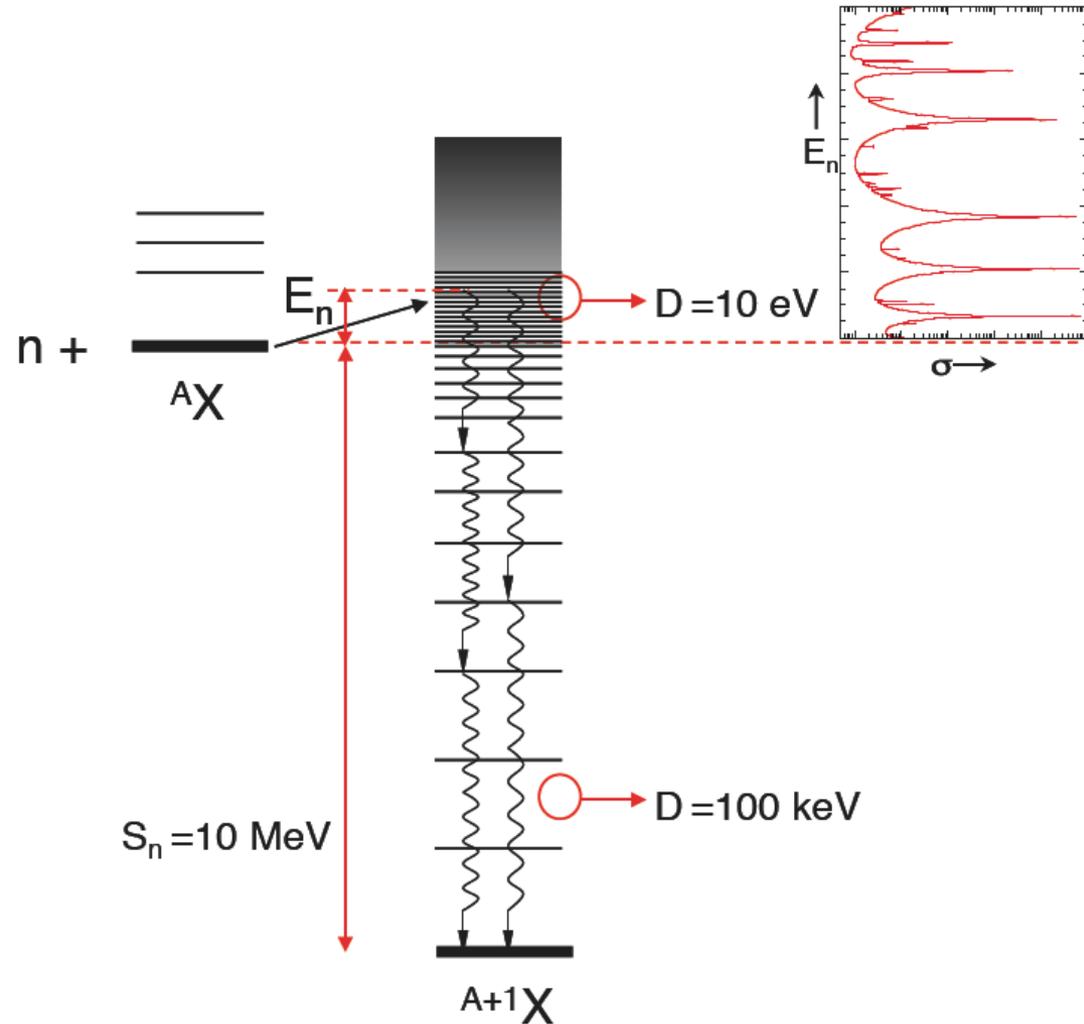
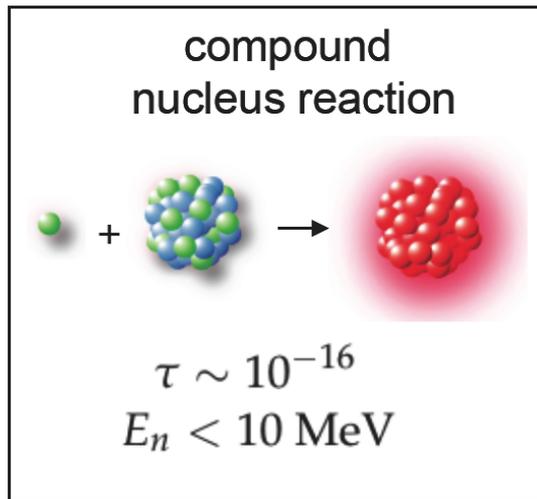


Схема уровней:  
Возбужденные  
состояния ядра



# Реакции с образованием составного ядра

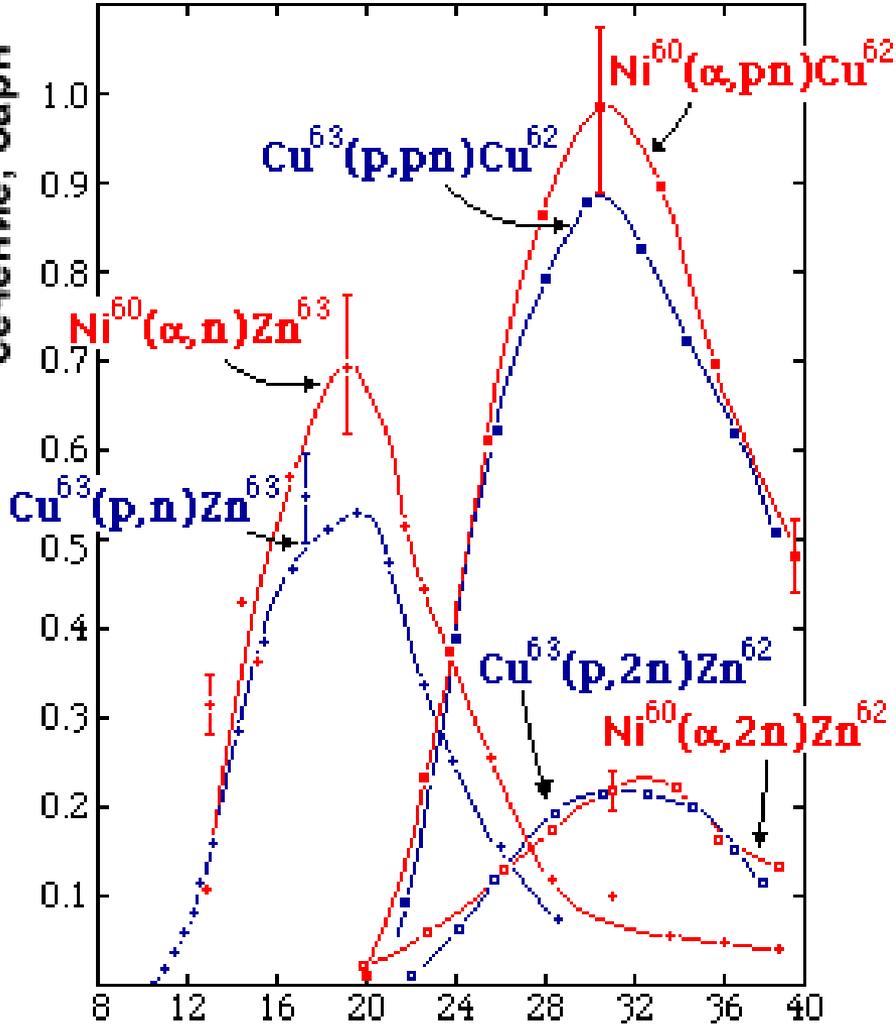


# Составное ядро $^{64}\text{Zn}$

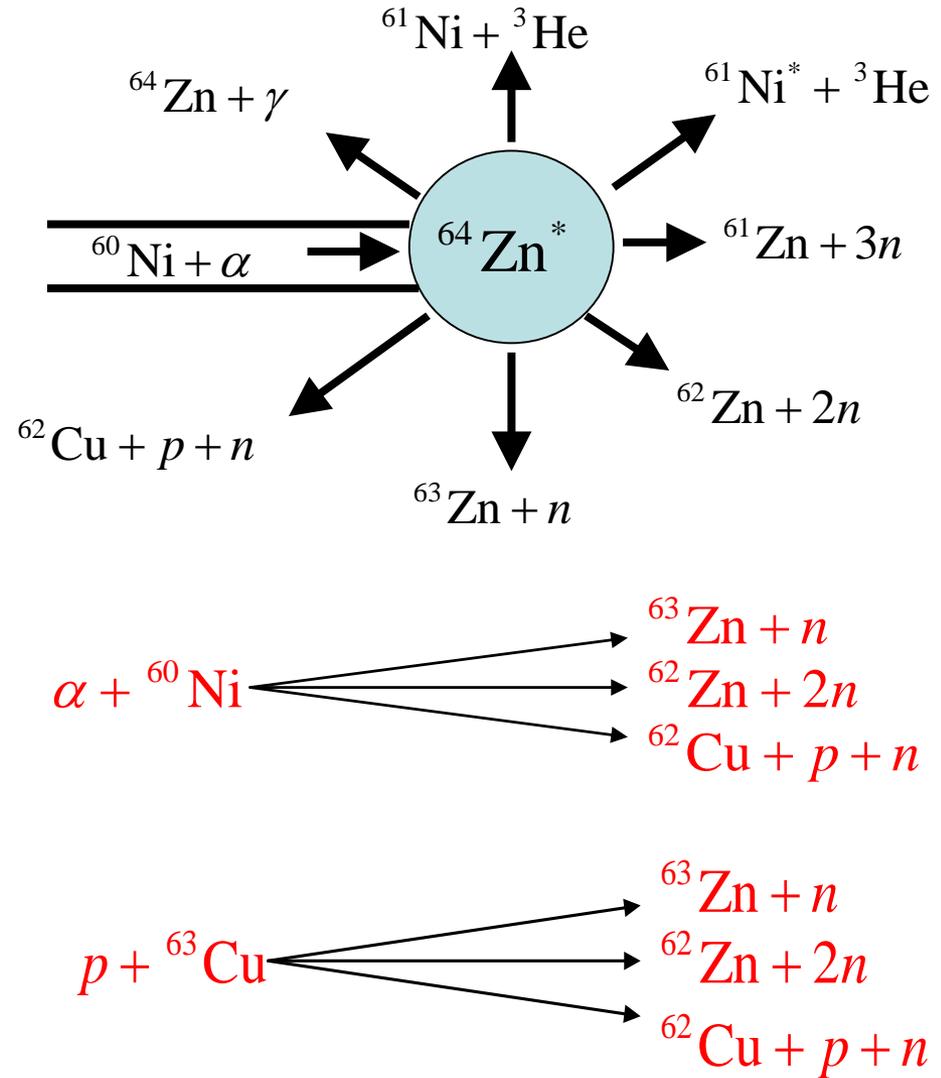
энергия протона, МэВ

5 9 13 17 21 25 29 33

сечение, барн



энергия  $\alpha$ -частицы, МэВ



# 1924 г. Де Бройль

## Корпускулярно-волновой дуализм

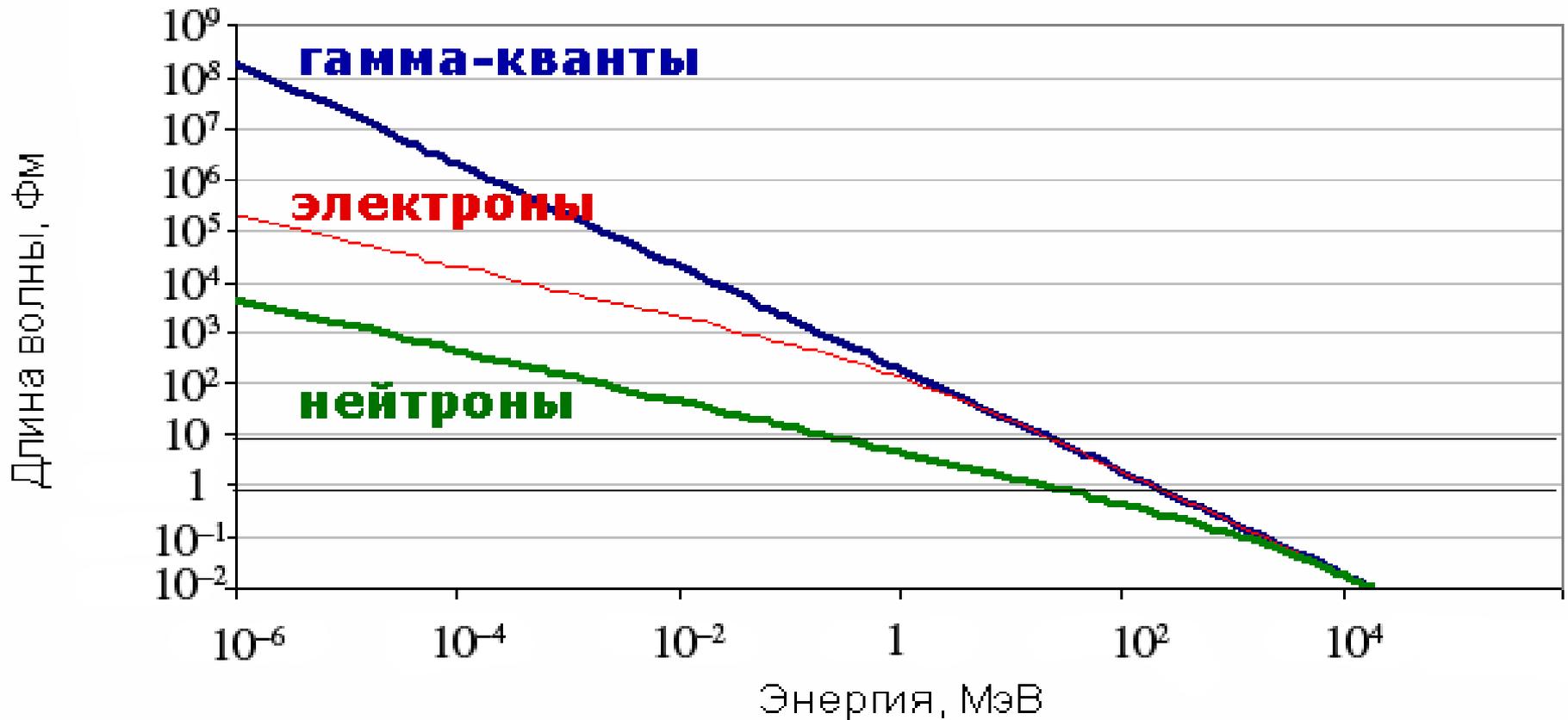
фотоны

$$E = cp = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Соотношения де Бройля

$$E = h\nu$$

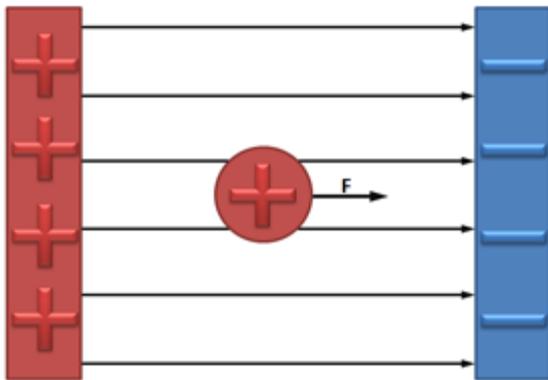
$$\lambda p = h$$



# Ускорители

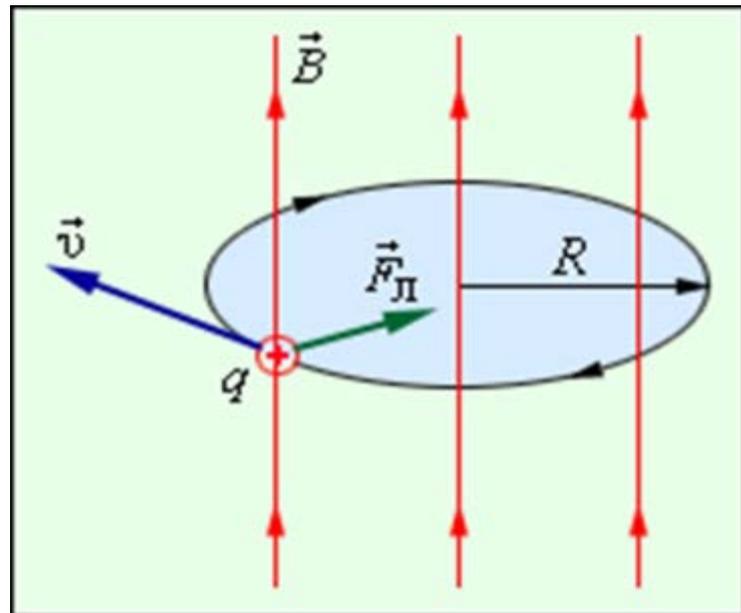
# Движение частиц в электромагнитном поле

Электрическое поле



$$E_{\text{кин}} = q(\varphi_2 - \varphi_1)$$

Магнитное поле



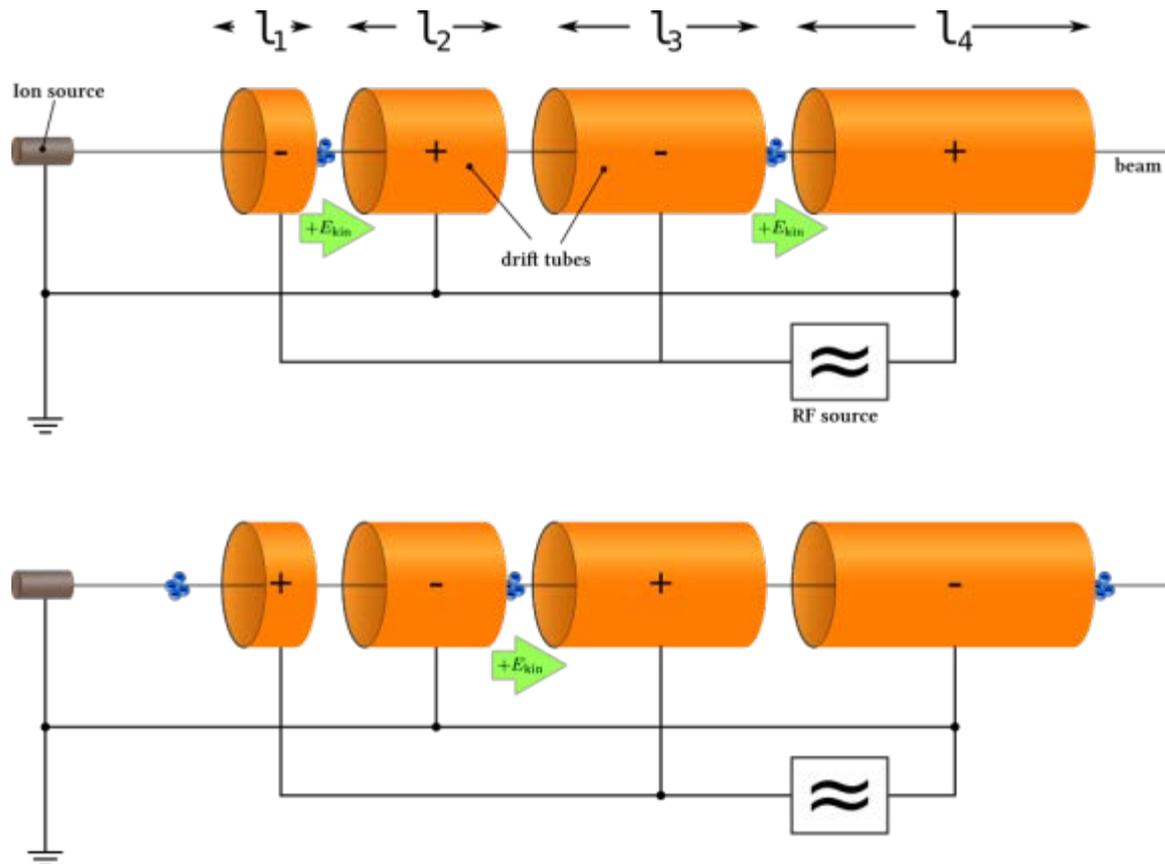
$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$

# Линейный ускоритель

1925 г. Г. Изинг Схема линейного ускорителя

1928 г. Р. Видероз Дрейфовая трубка

1946 г. Л. Альварец, В. Панофски Беркли, США ( $E_{кин} (p) = 32$  МэВ)



# Циклотрон

1929 г. Э. Лоуренс предложил идею циклотрона

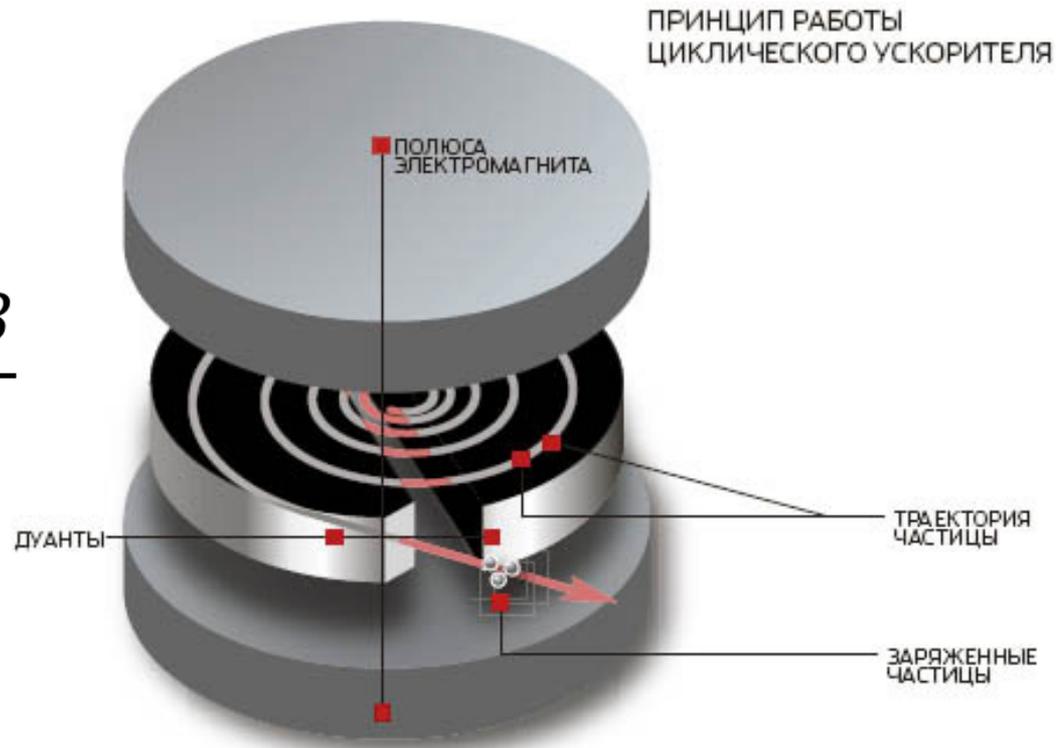
1932 г.  $E_{кин}(\rho) = 1,2 \text{ МэВ}$  ( $D = 25 \text{ см}$ )



$$\omega = \frac{v}{R} = v \frac{qB}{mv} = \frac{qB}{m}$$

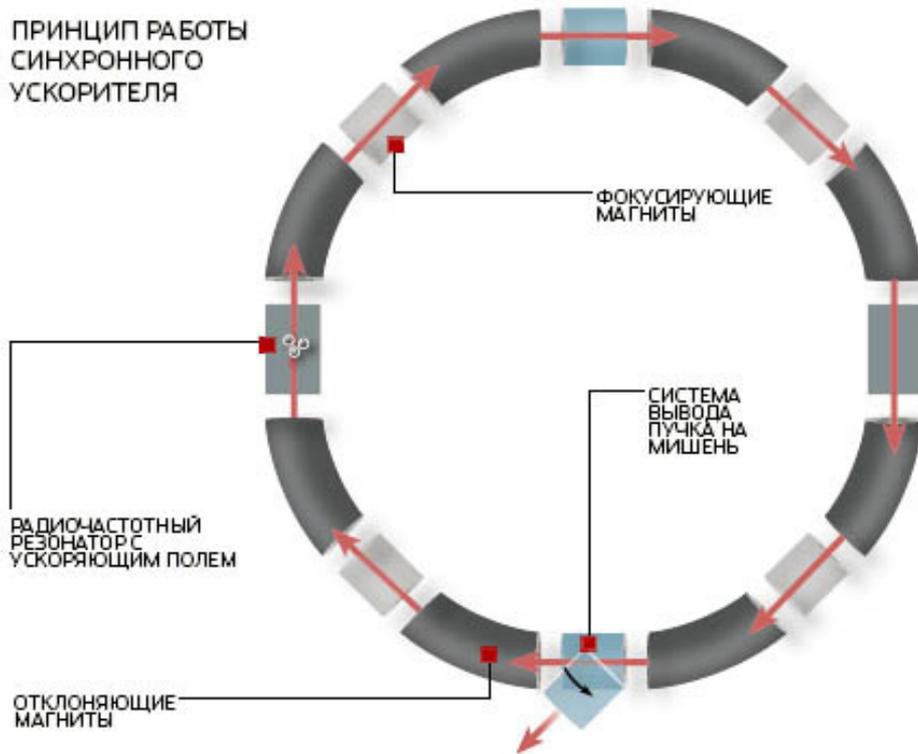
Максимальная кинетическая энергия протонов

$E_{кин}(\rho) = 22 \text{ МэВ}$  (1939 г.)



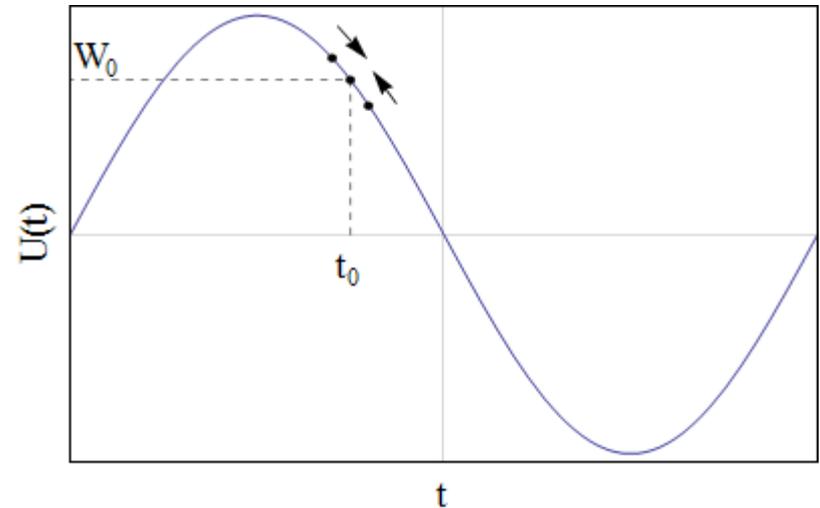
# Синхроциклотрон

ПРИНЦИП РАБОТЫ  
СИНХРОННОГО  
УСКОРИТЕЛЯ

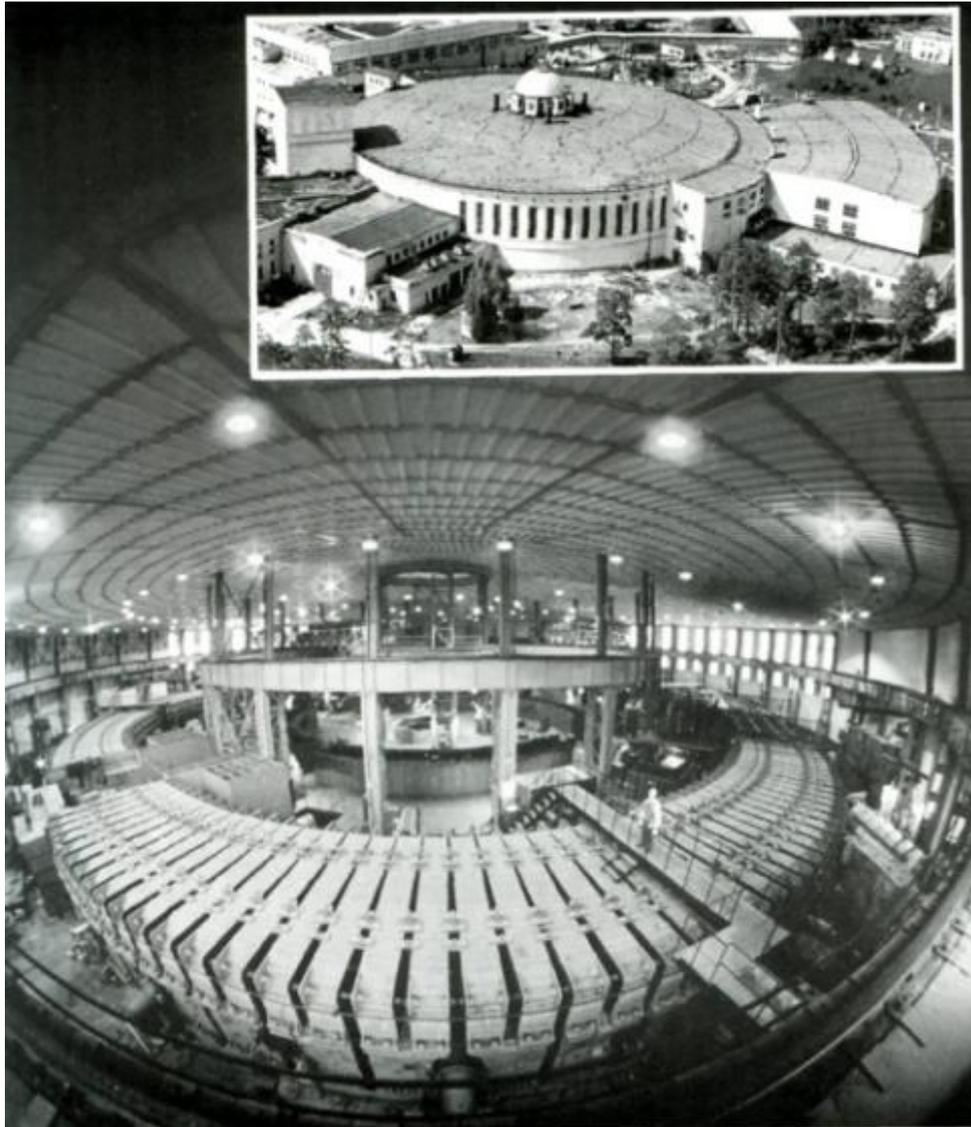


**1944 г.** В. Векслер ,  
Принцип автофазировки

**1945 г.** US patent 2615129,  
Edwin McMillan,  
«Synchro-Cyclotron»,  
issued 1952-10-21



# Синхрофазотрон



Объединенный институт  
ядерных исследований,  
Дубна, СССР  
1957 г.

$$E(p) = 10 \text{ ГэВ} = 10^{10} \text{ эВ}$$

Диаметр магнита	60 м
вес магнита	36 000 т

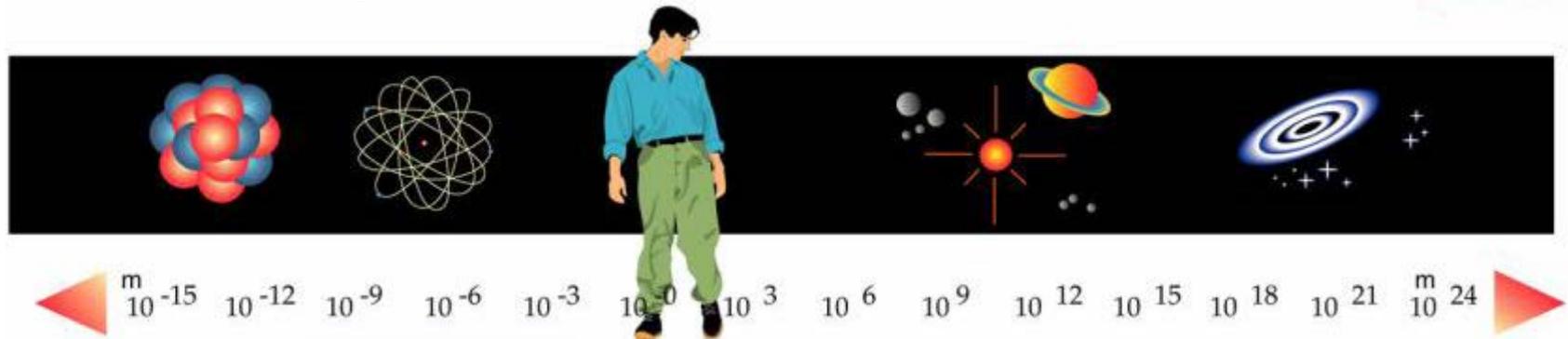
	<b>E (p) макс</b>	<b>Диаметр</b>	<b>Вес магн.</b>	<b>Ток</b>	<b>Частота</b>
Циклотрон	~ 10 МэВ	1 – 1,5 м	10 – 100 т	100 мА	10 <sup>7</sup> имп/сек
Фазотрон	~900 МэВ	5 – 7 м	1 000 т	1 мкА	100 имп/сек
Синхрофазотрон	10 ГэВ	60 м	36 000 т	10 <sup>-3</sup> мкА	1 имп в 12 сек

Э. Ферми: «При имеющемся соотношении между максимальной энергией частиц и размерами ускорителя для получения частиц с энергией 10<sup>16</sup> эВ придется построить ускоритель с диаметром, равным диаметру земного шара»

Э. Лоуренс: «И его интенсивность будет один протон в сутки»

В.И. Векслер Доклад на общем собрании АН СССР 27 марта 1958 г.

# Эра больших машин



## Соотношение де Бройля

$$\lambda p c = \hbar c = 200 \text{ МэВ} \cdot \text{фм}$$

Релятивистский предел

$$v \rightarrow c \quad E \approx pc$$

$$\text{Нуклон } \Delta x \sim 1 \text{ фм} \leftrightarrow E_e \sim 100 \text{ МэВ}$$

$$1 \text{ ТэВ} = 10^3 \text{ ГэВ} = 10^6 \text{ МэВ}$$

$$1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ}$$

$$E \sim 100 \text{ ГэВ} \leftrightarrow \Delta x \sim 10^{-3} \text{ фм} = 10^{-18} \text{ м}$$

$$E \sim 10 \text{ ТэВ} \leftrightarrow \Delta x \sim 10^{-5} \text{ фм} = 10^{-20} \text{ м}$$

# Встречные пучки

$$a + b \rightarrow M$$

$$(E_a + E_b)^2 - (\vec{p}_a + \vec{p}_b)^2 = M^2$$

$$E^2 - p^2 = M^2$$

Неподвижная мишень



$$(E_a + E_b)^2 - (\vec{p}_a)^2 = M^2$$
$$m_a^2 + m_b^2 + 2m_b E_a = M^2$$

Встречные пучки ( $m_a = m_b$ )

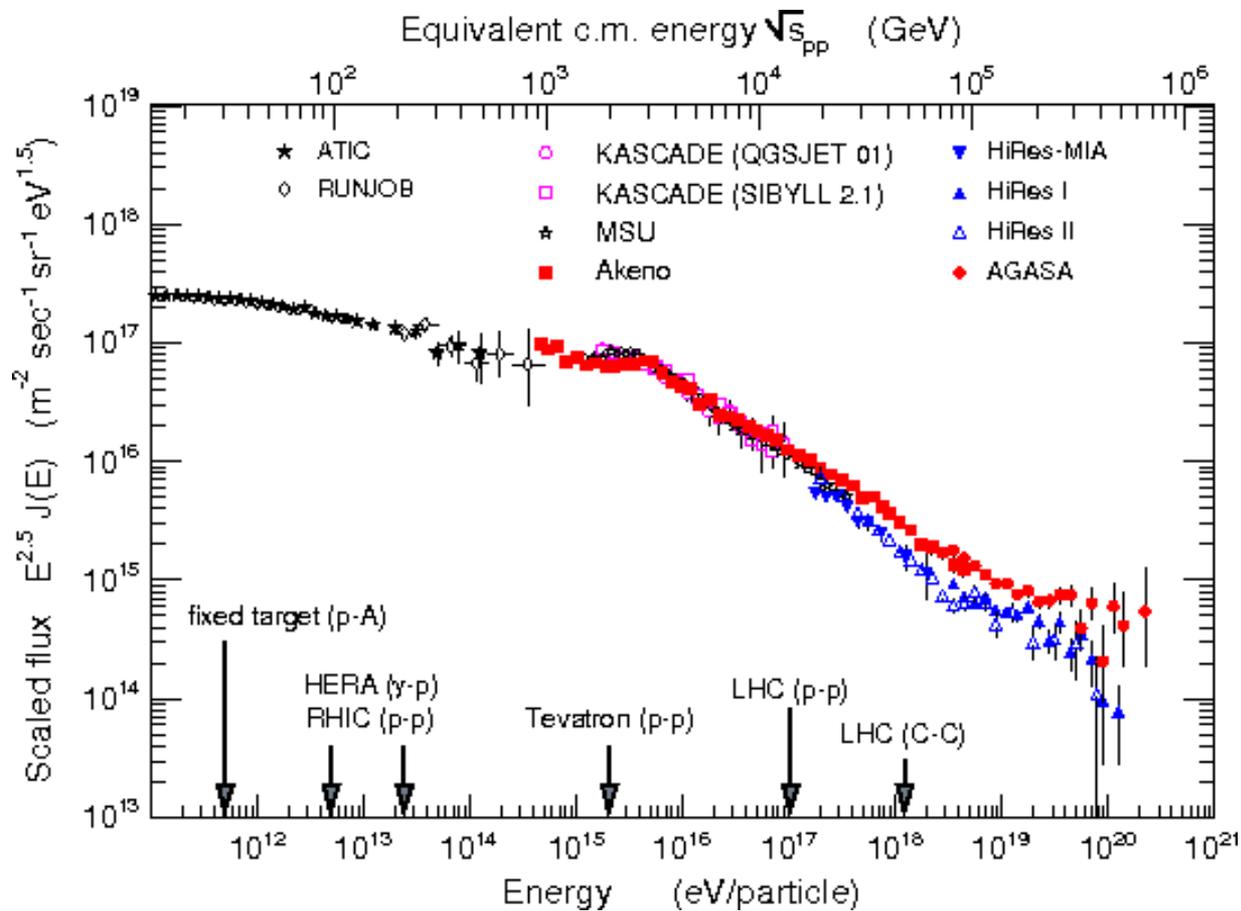


$$M^2 = (E_a^* + E_b^*)^2$$
$$M^2 = 4E^{*2}$$

$$E_a = \frac{2E^{*2}}{m} - m$$

Большой адронный коллайдер (LHC):  $\mathbf{p} + \mathbf{p}$ ,  $E^* = 7 \text{ ТэВ} \Rightarrow E_a = 10^5 \text{ ТэВ}$

# Встречные пучки Vs. Космические лучи

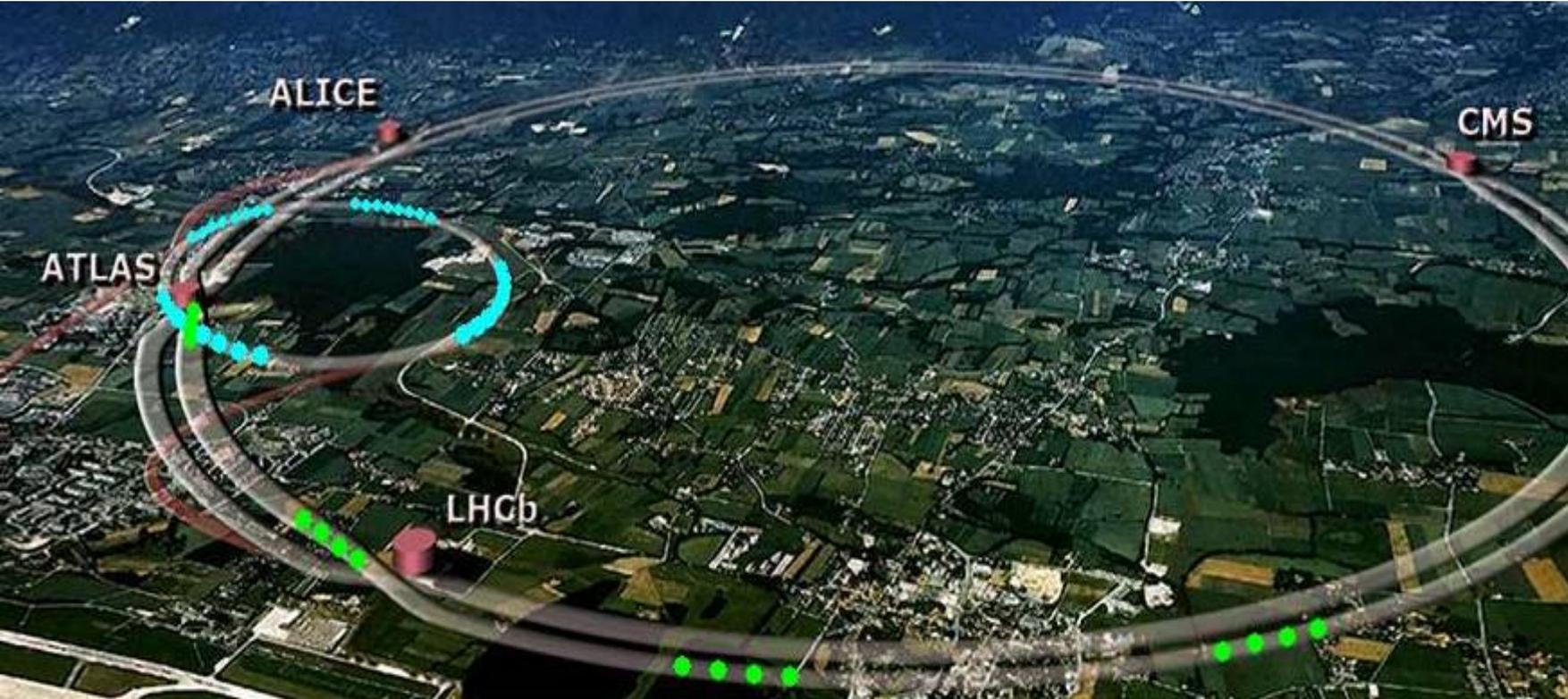


# Встречные пучки

Коллайдер	Лабор.	Пучки	Энергия (max)	Светимость, см <sup>-2</sup> сек <sup>-1</sup>	Периметр, км
LEP	CERN	$e^+ + e^-$	104,5 + 104,5 (ГэВ)	$10^{32}$	26,7
HERA	DESY	$e^- + p$	27,5 + 920 (ГэВ)	$0,75 \times 10^{32}$	6,3
RHIC	BNL	$p + p$ Au+Au	250 + 250 (ГэВ) 100 + 100 (ГэВ/и)	$1,6 \times 10^{32}$ $30 \times 10^{26}$	3,8
TEVATRON	FNL	$p + \bar{p}$	980 + 980 (ГэВ)	$4 \times 10^{32}$	6,86
LHC	CERN	$p + p$ Pb+Pb	7 + 7 (ТэВ) 2,8 + 2,8 (ТэВ/ и)	$10^{34}$	26,7
УНК	Протвино	$p + p$	3 + 3 (ТэВ)	Cancelled 1992	21
SSC	Texas	$p + p$	20 + 20 (ТэВ)	Cancelled 1993	80

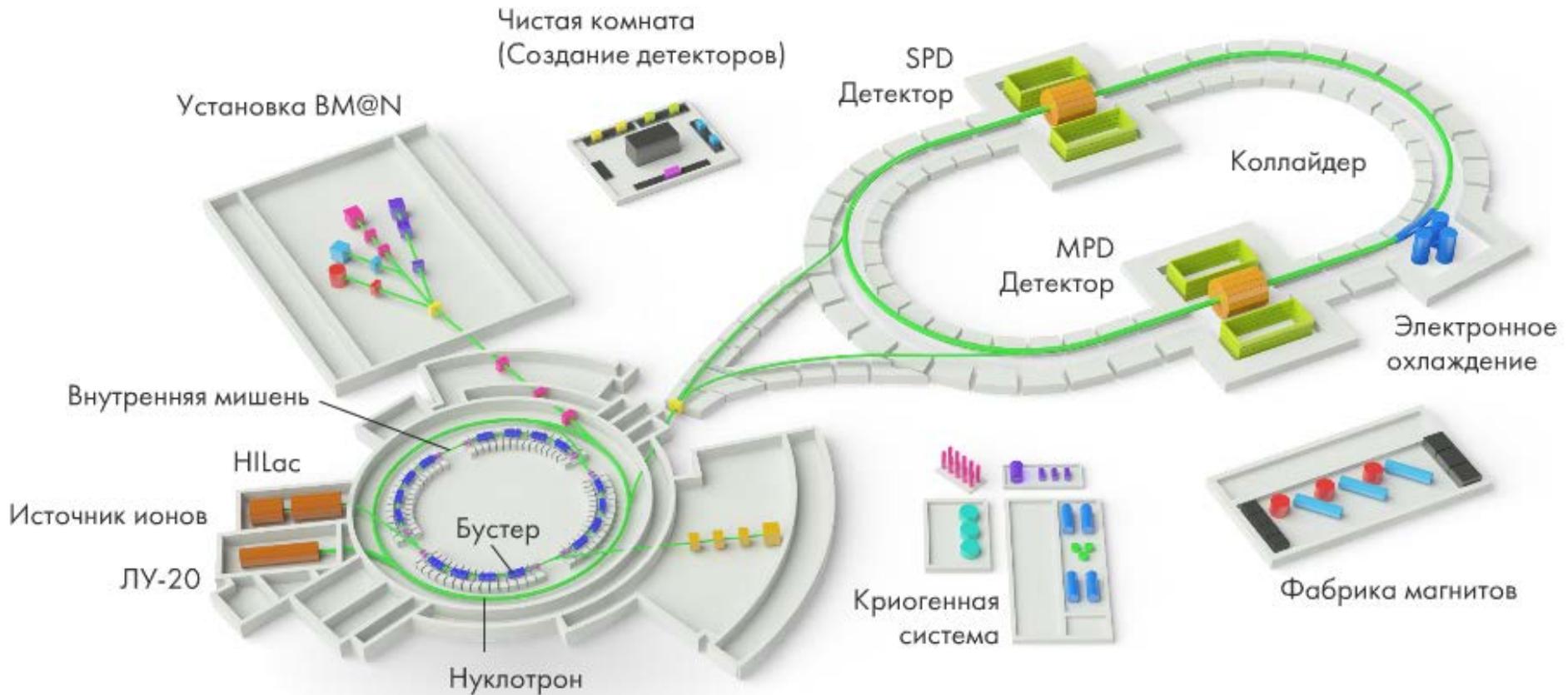
# Large Hadron Collider (LHC), CERN

Большой адронный коллайдер, ЦЕРН, Женева, Швейцария



# NICA (Nuclotron based Ion Collider facility)

Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), Дубна, Россия



$\text{Au} + \text{Au}$ ,  $\sqrt{s} = 11 \text{ A GeV}$



Открытый видеоролик  
«NICA — Вселенная в лаборатории»

<http://nica.jinr.ru/ru/open-lesson.php>

# Применение ускорителей

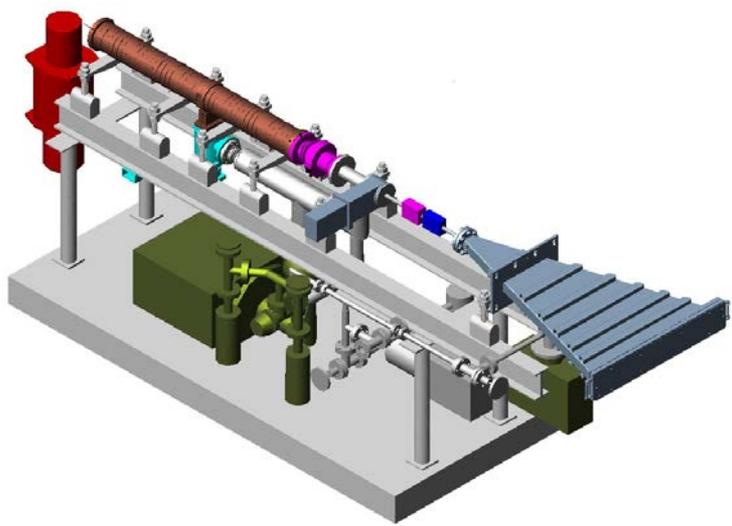
~ 100

- **НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ** (элементарные частицы, ядерная физика, физика твердого тела, получение не встречающихся в природе нуклидов)
- **ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ** (источники синхротронного излучения)

~ 17 000

- **МЕДИЦИНА** (радиационная диагностика и терапия, стерилизация аппаратуры), биологии
- **ПРОМЫШЛЕННОСТЬ** (имплантация ионов, дефектоскопия, стерилизация пищевых продуктов, искусственная полимеризация лаков, модификация свойств материалов, радиационная обработка материалов, изготовление элементов микроэлектроники)

# Инспекционно - досмотровый комплекс



6/3.5 МэВ линейный ускоритель  
электронов с поимпульсной модуляцией  
энергии с коллиматором

# Инспекционно - досмотровый комплекс

A603501 2014-05-28 12:57:52 0000022 0017

Изображение 28-05-2014 13:30:30

СКАНТРОНИК  
СИСТЕМС

Регулировка контрастности,  
выравнивание гистограммы,  
гамма-коррекция, сегментация,  
фильтрация, установка маркеров,  
**разделение групп материалов,**  
**определение атомного номера и веса,**  
определение энергии излучения,  
оценка веса составных частей груза.



Решение

Подозрений не выявлено  Подозрения выявлены

Повторная обработка

Обработка

Фильтры

Оконтуривание  Анализ сыпучих грузов

Темные области  Светлые области

Режимы

С Al Fe Pb

Инструментарий

Анализ области  Эксперт

Печать

Скрыть

Сброс