



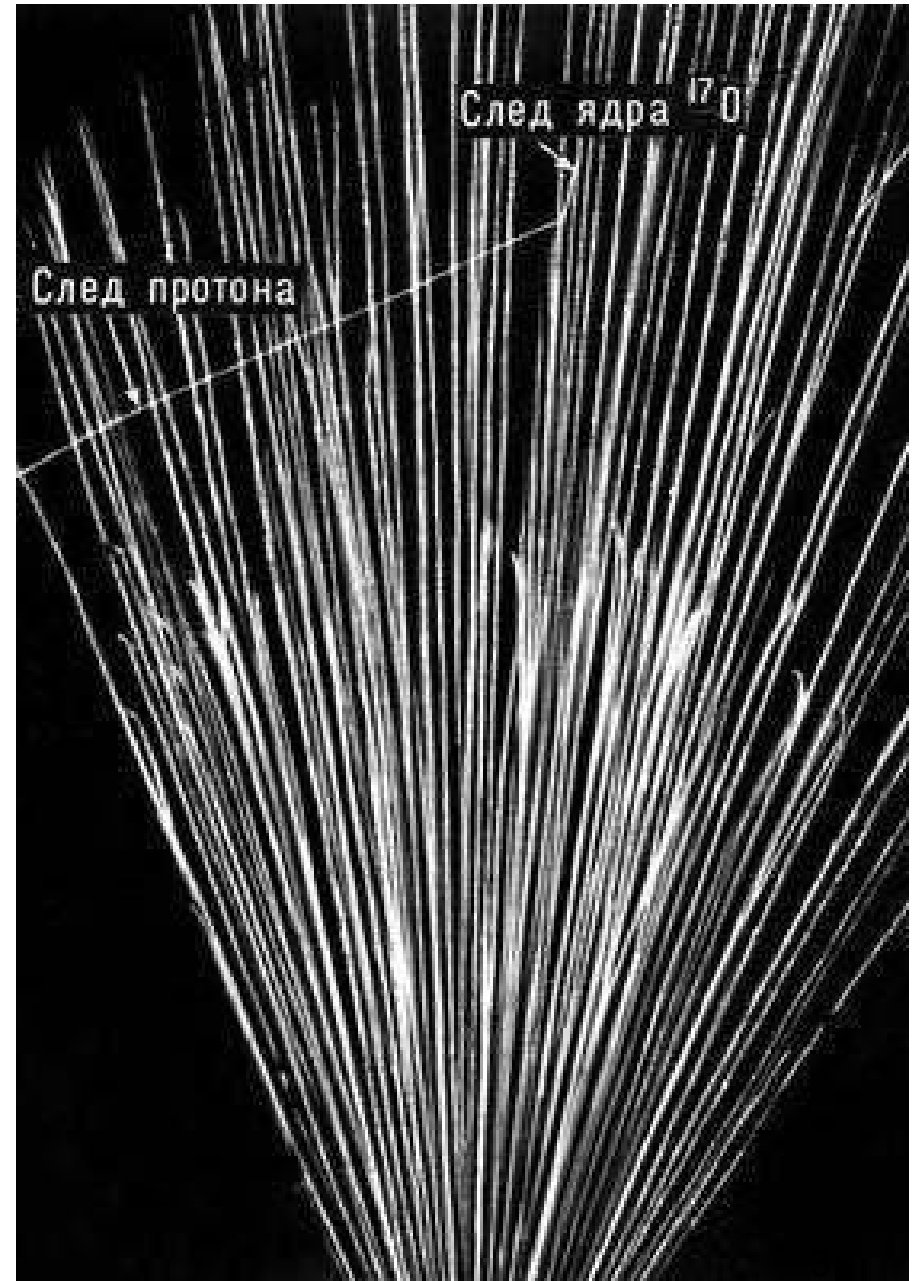
# Микромир и Вселенная

2018

# ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

1919 г.

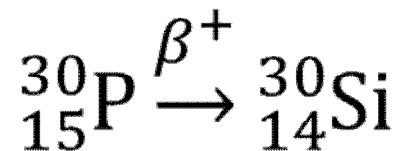
Э. Резерфорд осуществил первую искусственную ядерную реакцию  $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$  и доказал наличие в атомном ядре протонов.



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

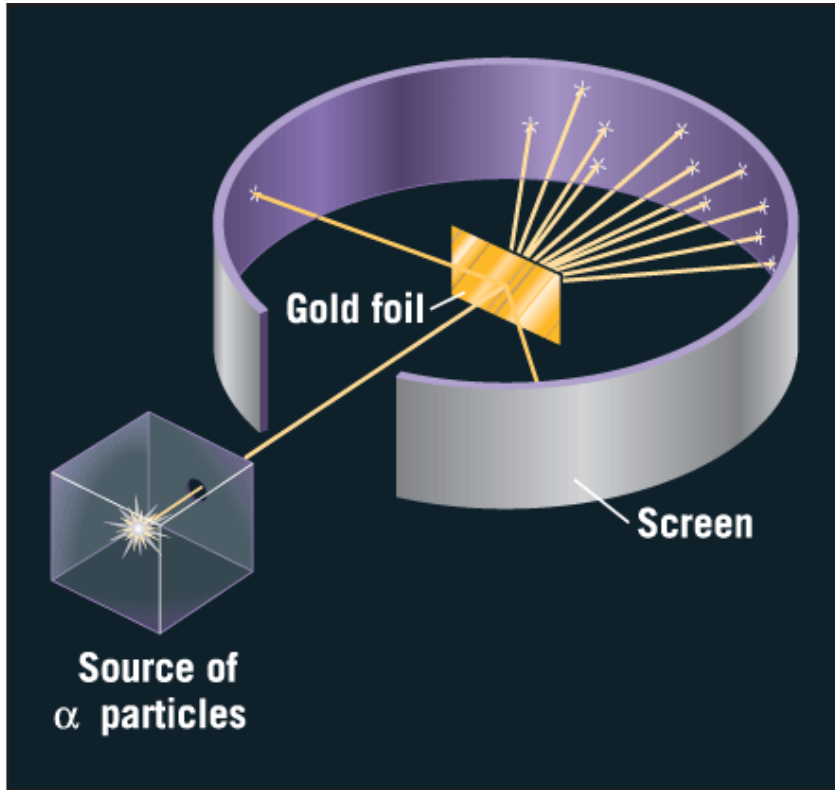
**Ядерные реакции** – основной метод изучения структуры и свойств атомных ядер. В ядерных реакциях изучаются механизмы взаимодействия частиц и атомных ядер с атомными ядрами. В результате ядерных реакций получают новые не встречающиеся в естественных условиях изотопы и химические элементы.

### Обозначения





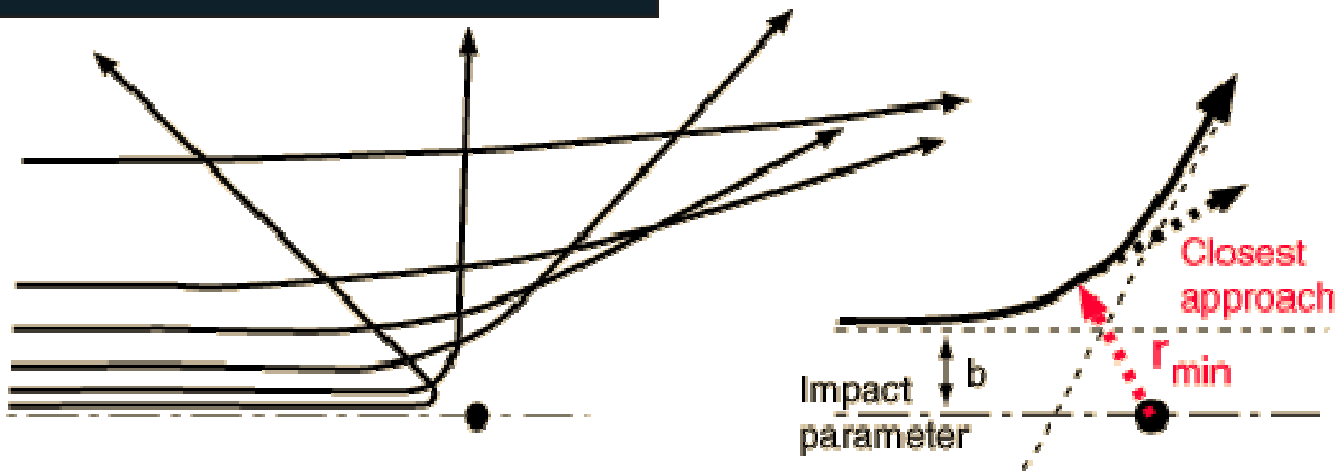
# 1911 г. Опыты по рассеянию $\alpha$ -частиц



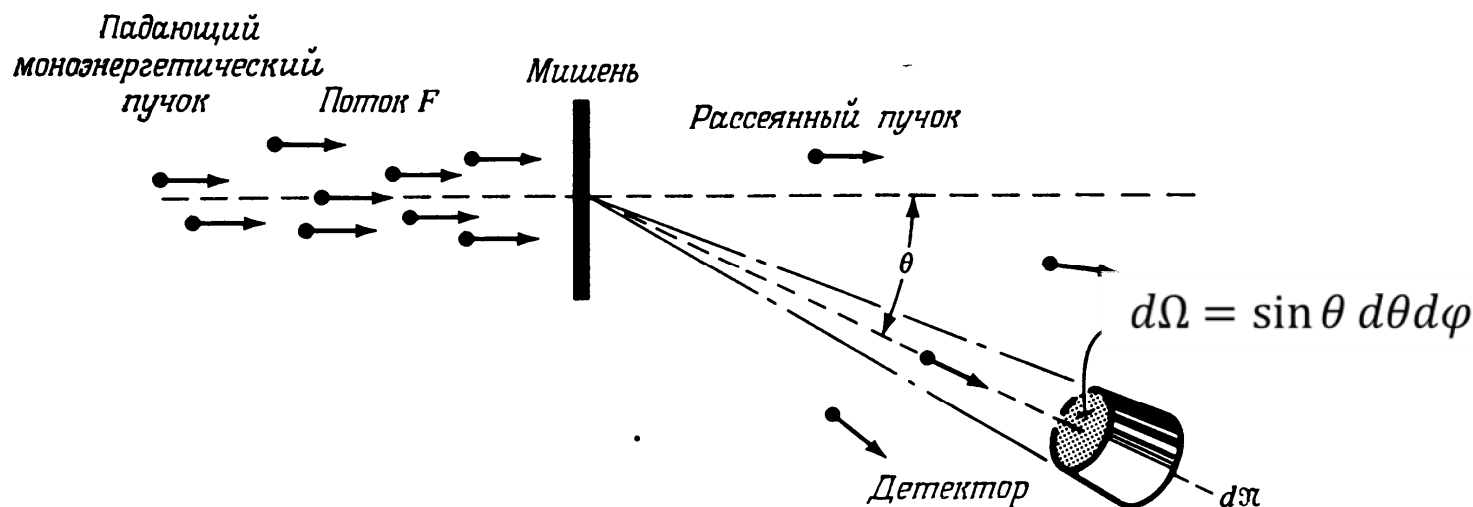
Упругое рассеяние альфа-частиц



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



# 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

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

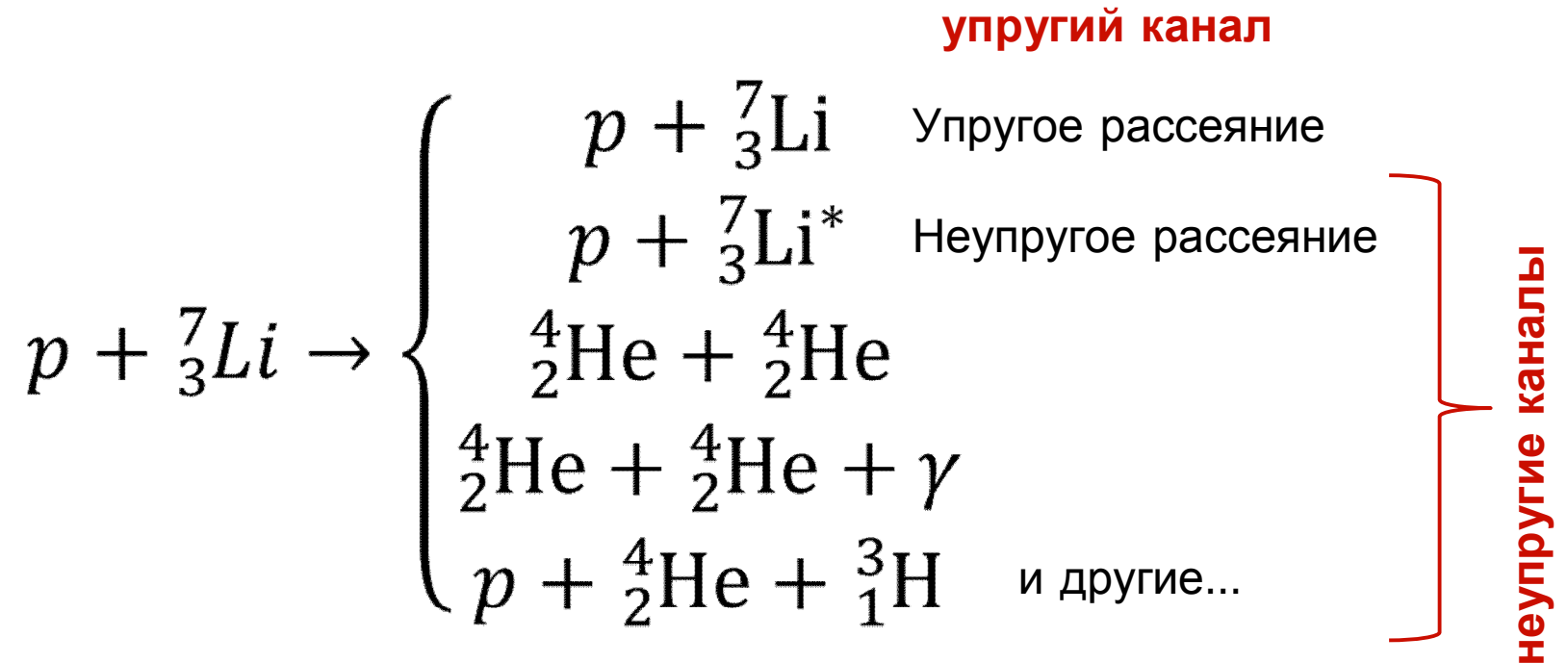
## Сечение реакции и число событий $N$

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

- $N$  – 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.

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

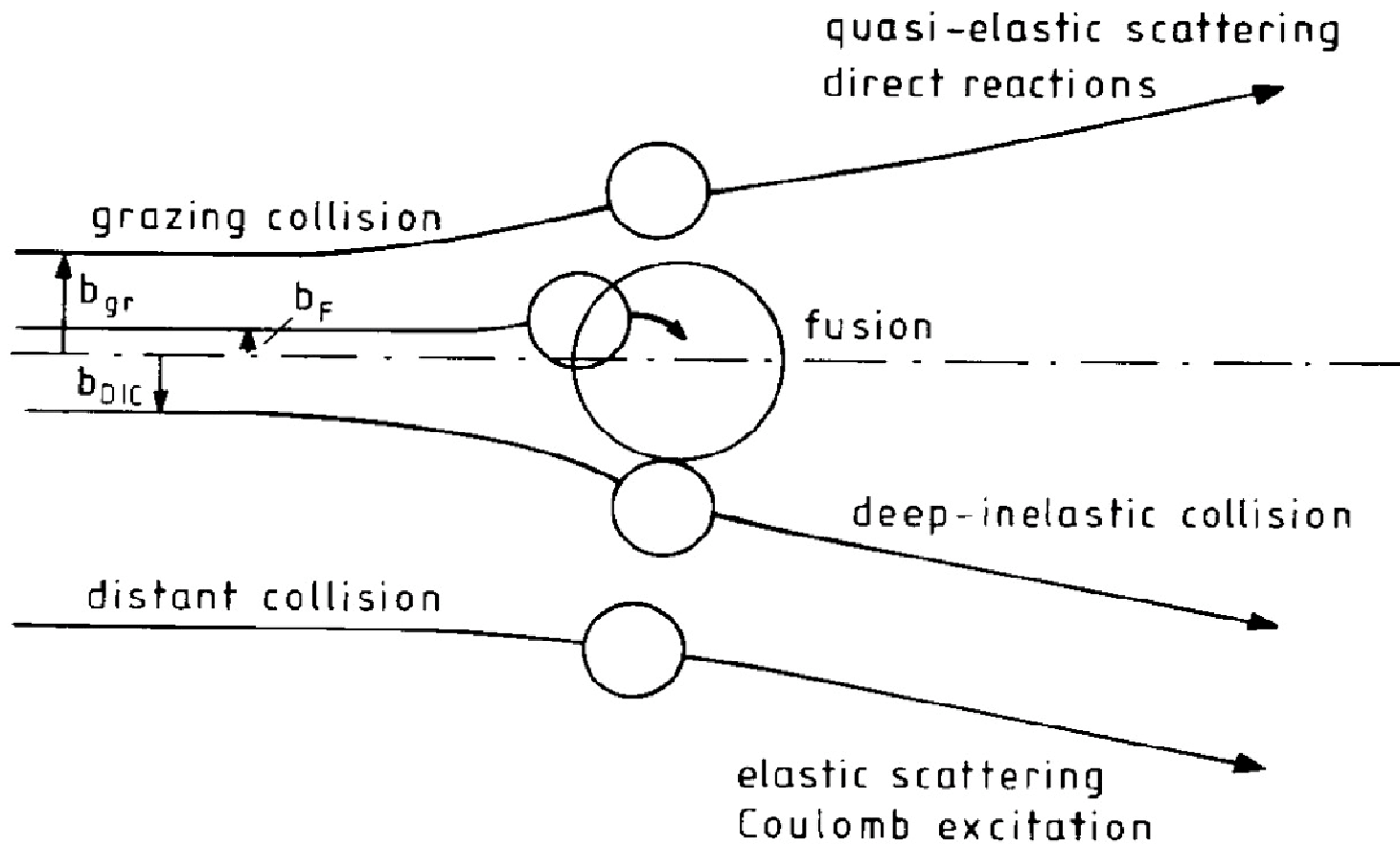
# Каналы ядерной реакции



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

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

# Прицельный параметр



impact parameter  $b=l/k$



# **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:  $Q = 0$

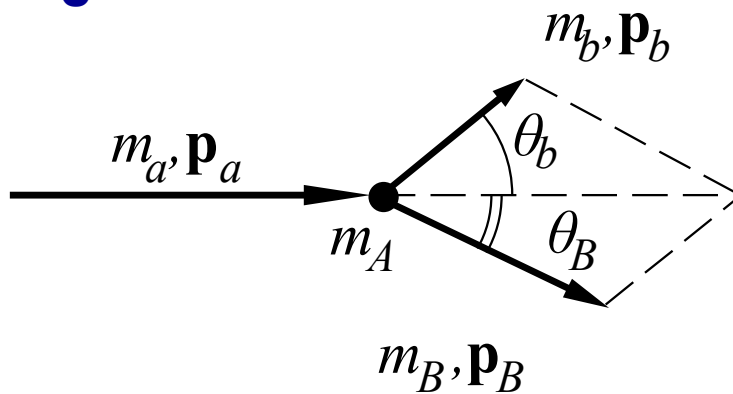
Распад:  $Q > 0$

# Законы сохранения в ядерных реакциях

Законы сохранения энергии и импульса

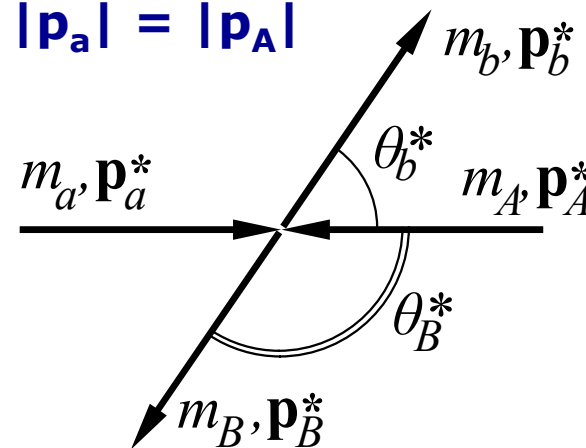
$$\left\{ \begin{array}{l} \sum T_i + \sum m_i c^2 = \sum T_f + \sum m_f c^2 \\ \sum \vec{p}_i = \sum \vec{p}_f \end{array} \right.$$

Лабораторная система отсчета  
 $|\mathbf{p}_A| = 0$



$$\left\{ \begin{array}{l} T_a + Q = T_b + T_B \\ \vec{p}_a = \vec{p}_b + \vec{p}_B \end{array} \right.$$

Система центра инерции  
 $|\mathbf{p}_a| = |\mathbf{p}_A|$



$$\left\{ \begin{array}{l} T_a^* + T_A^* + Q = T_b^* + T_B^* \\ \vec{p}_a^* + \vec{p}_A^* = \vec{p}_b^* + \vec{p}_B^* = 0 \end{array} \right.$$

# Законы сохранения в ядерных реакциях

Порог эндотермической реакции  $Q < 0$  —

минимальная кинетическая энергия, при которой возможно протекание эндотермической реакции

Лабораторная система отсчета  
 $|\mathbf{p}_A| = 0$

$$\begin{cases} T_a + Q = T_b + T_B \\ \vec{p}_a = \vec{p}_b + \vec{p}_B \end{cases}$$

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

При  $Q \ll m_A$

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

Система центра инерции  
 $|\mathbf{p}_a| = |\mathbf{p}_A|$

$$\begin{cases} T_a^* + T_A^* + Q = T_b^* + T_B^* \\ \vec{p}_a^* + \vec{p}_A^* = \vec{p}_b^* + \vec{p}_B^* = 0 \end{cases}$$

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

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

# 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**

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



# Принцип детального равновесия

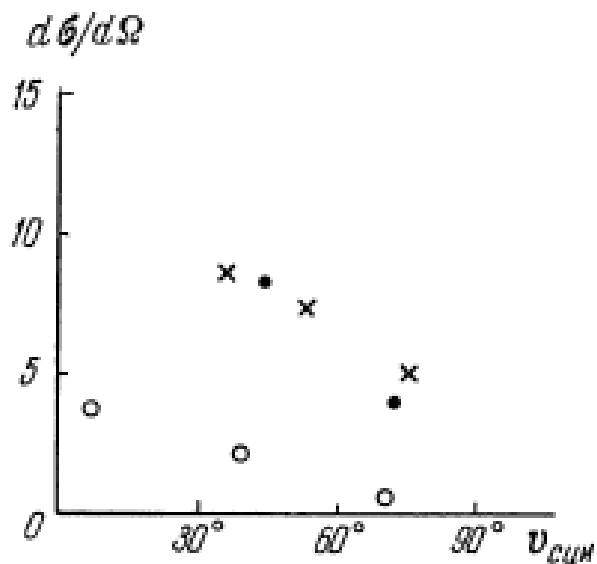
Прямая реакция



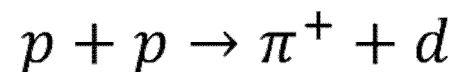
Обратная реакция



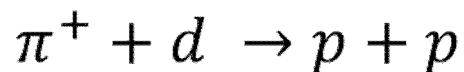
$$\frac{\sigma_{ab}}{\sigma_{ba}} = \frac{p_b^2 (2J_b + 1)(2J_B + 1)}{p_a^2 (2J_a + 1)(2J_A + 1)}$$



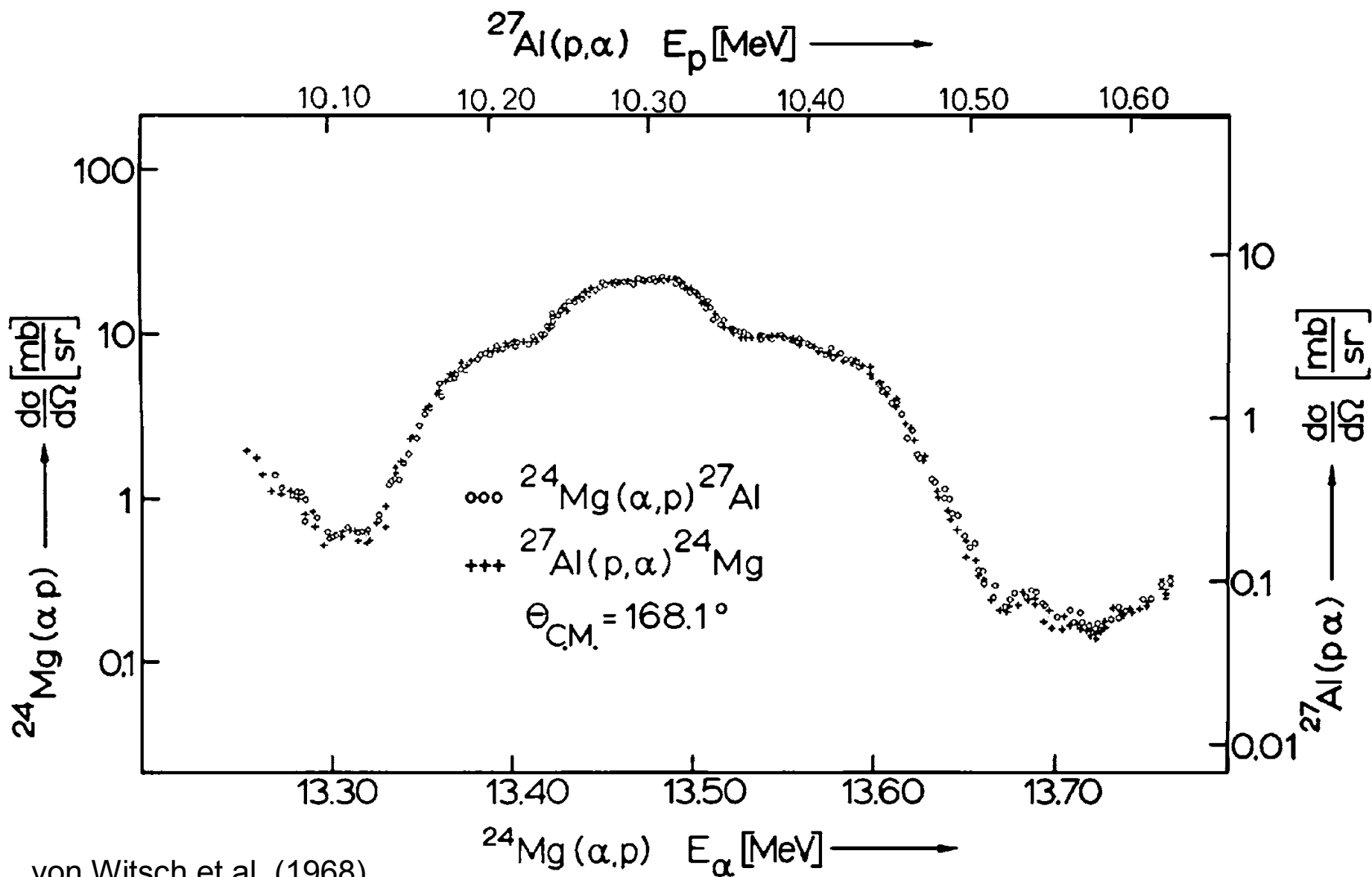
Расчет на основе данных реакции



- в предположении  $J(\pi) = 0$
- в предположении  $J(\pi) = 1$
- × эксперимент



# Принцип детального равновесия

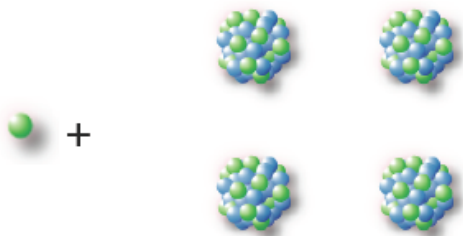


von Witsch et al. (1968)

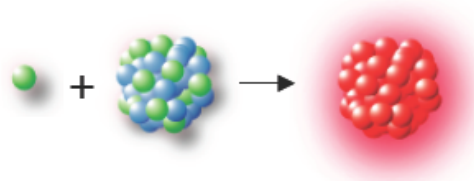
# Механизмы ядерных реакций

# Реакции под действием нейтронов

Рассеяние в  
конденсированных  
средах

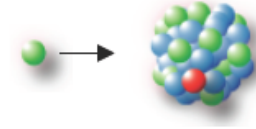


Реакции с  
образованием  
составного ядра

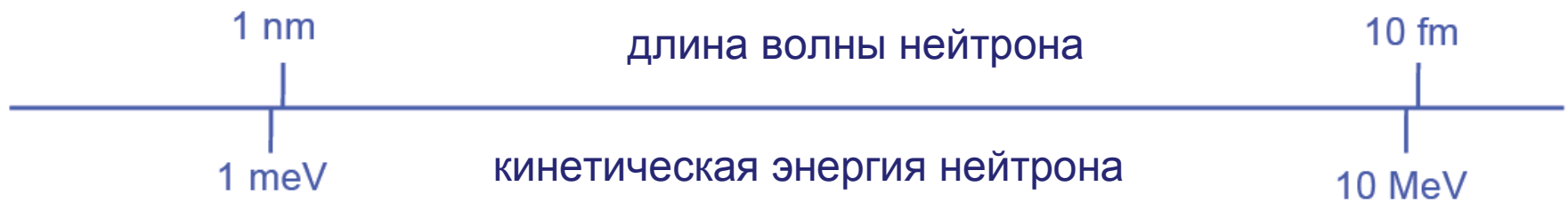


$$\tau \sim 10^{-16}$$
$$E_n < 10 \text{ MeV}$$

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**.

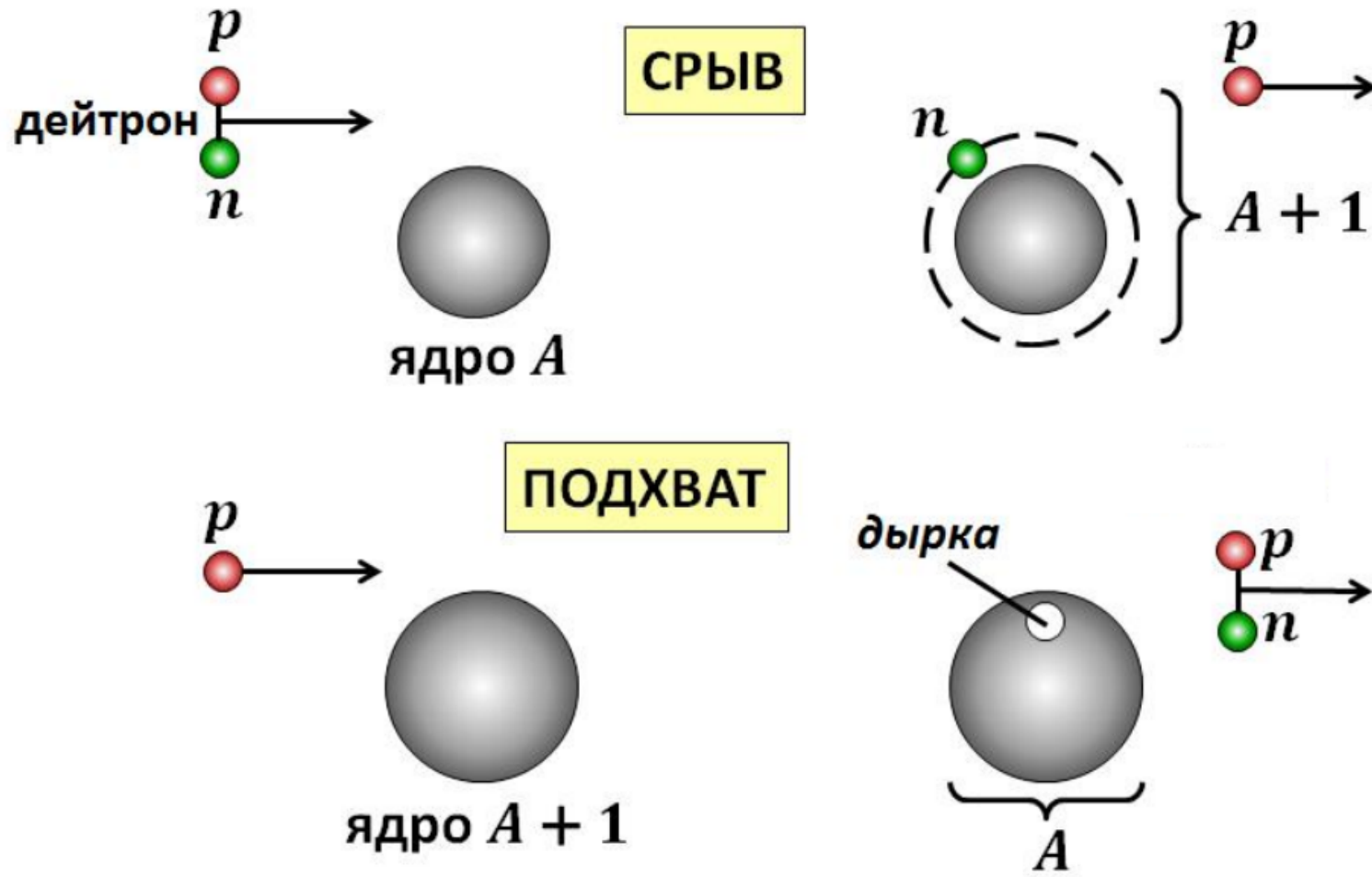
Налетающая частица  $a$  передаёт энергию одному-двум нуклонами ядра, не затрагивая остальных, и они сразу покидают ядро, не успев обменяться энергией с остальными нуклонами. Например, реакция (p, n) может произойти в результате столкновения протона с одним нейтроном ядра. К прямым процессам относятся 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.

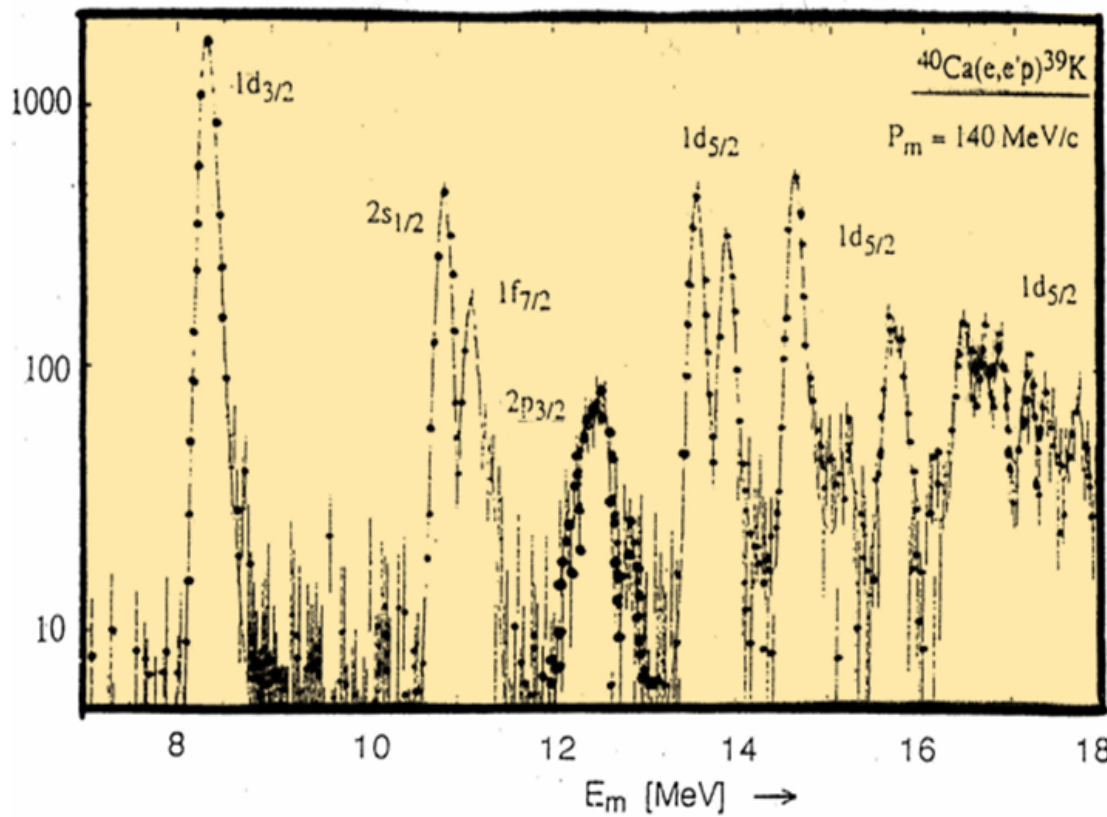
**2.** Если  $t_p \gg \tau_{\text{я}}$ , то реакция идёт через **составное ядро**. Налетающая частица  $a$  и нуклон, которому она передала энергию, «запутываются» в ядре. Энергия распределяется среди многих нуклонов, и у каждого нуклона энергия недостаточна для вылета из ядра. Лишь через сравнительно 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.



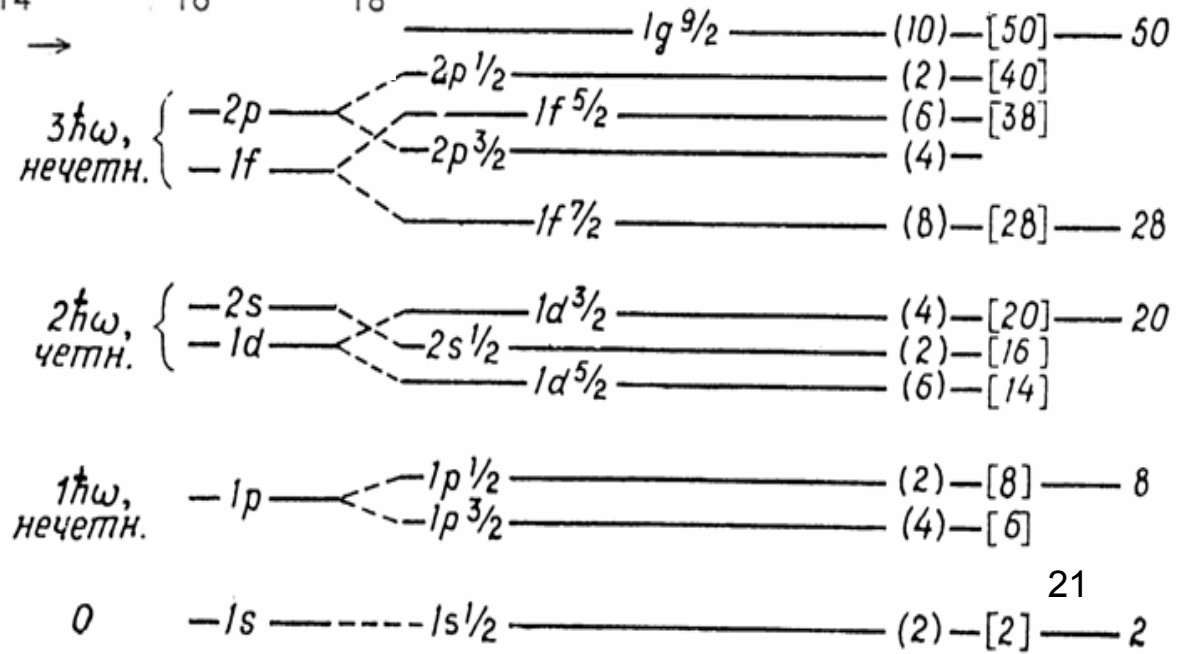
# Прямые ядерные реакции срыва и подхвата

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

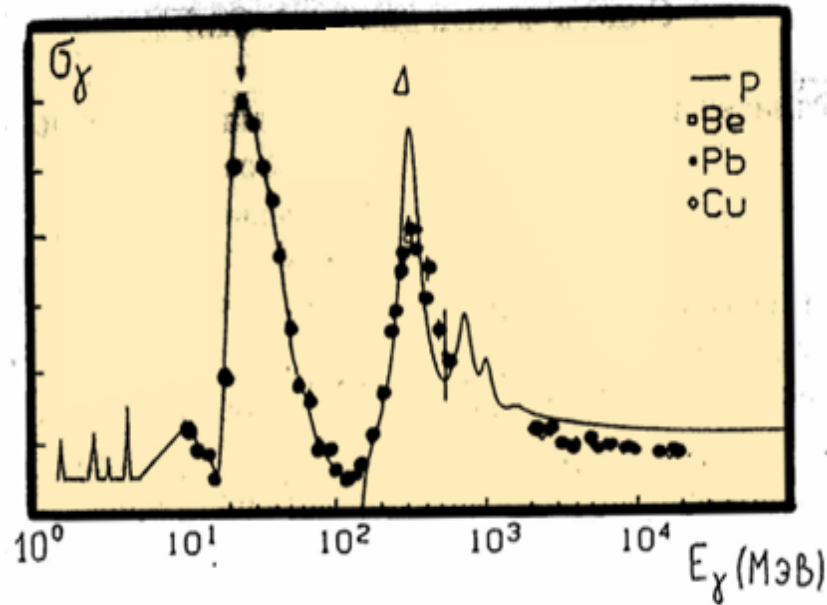




# $^{40}\text{Ca}(e,e'p)^{39}\text{K}$



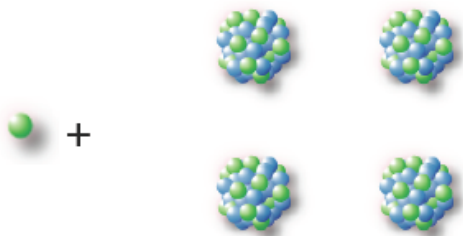
# Взаимодействие $\gamma$ -квантов с атомными ядрами



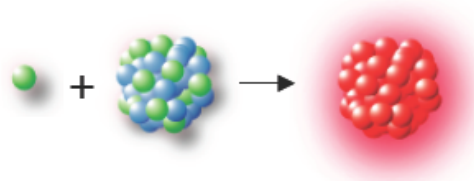
При небольших энергиях  $\gamma$ -квантов  $E_\gamma < 5 \times 10 \text{ МэВ}$  в сечении реакции наблюдаются чётко выраженные резонансы, соответствующие возбуждению отдельных уровней ядра. В области энергий  $E_\gamma \approx 10 \times 40 \text{ МэВ}$  в ядре возбуждается гигантский дипольный резонанс, который можно интерпретировать как колебания протонов относительно нейтронов под действием электромагнитной волны. В результате поглощения  $\gamma$ -кванта из возбужденного состояния ядра испускаются протоны и нейтроны. При энергиях  $E_\gamma > 100 \text{ МэВ}$   $\gamma$ -кванты взаимодействуют с отдельными нуклонами ядра. При этом образуются возбужденные состояния нуклона —  $\Delta$  и N-резонансы, распадающиеся с испусканием  $\pi$ -мезонов.

# Реакции под действием нейтронов

Рассеяние в конденсированных средах

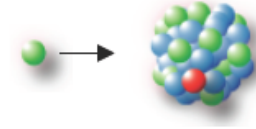


Реакции с образованием составного ядра

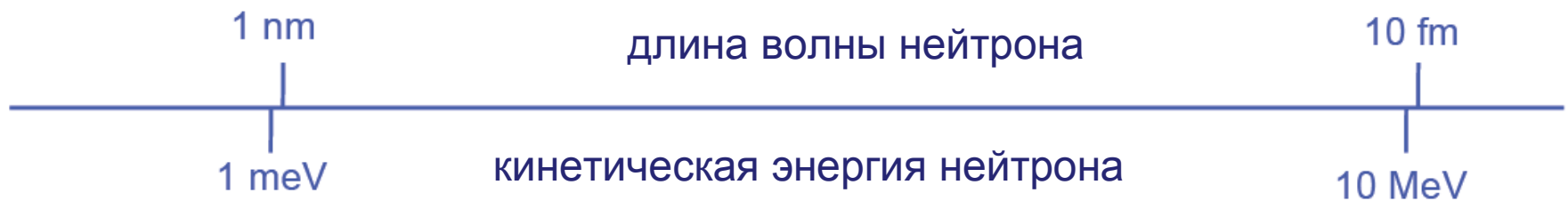


$$\tau \sim 10^{-16}$$
$$E_n < 10 \text{ MeV}$$

Прямые ядерные реакции



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

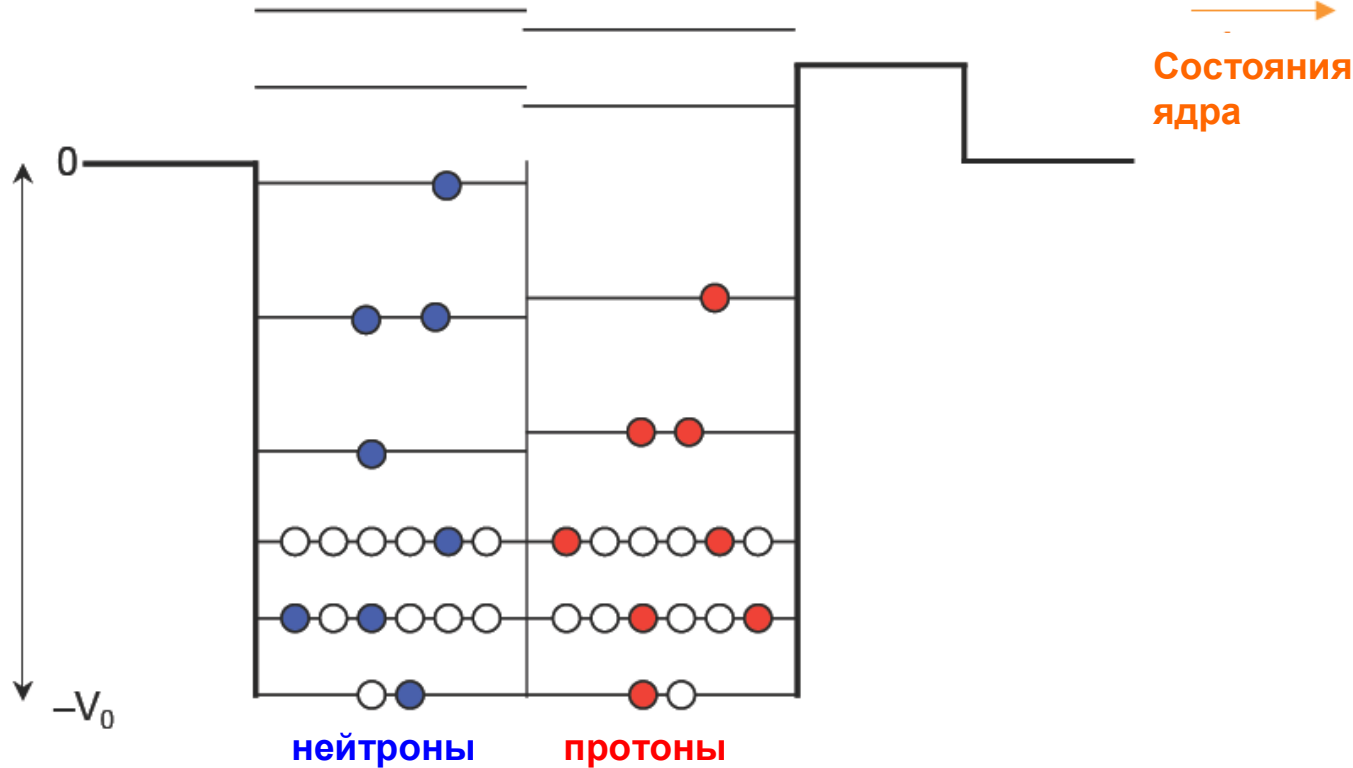


# Реакции с образованием составного ядра



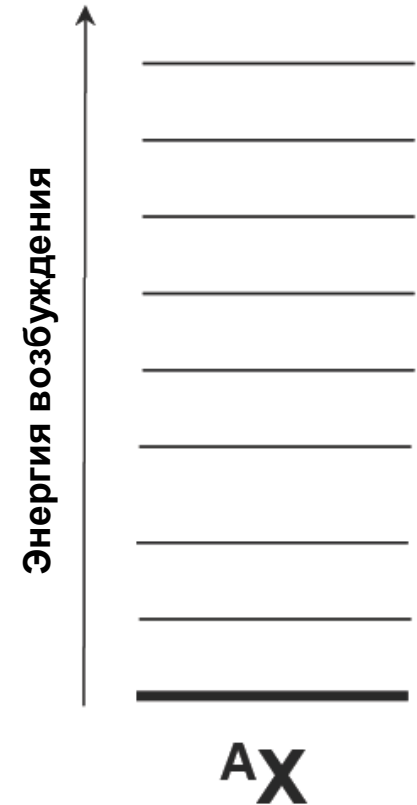
**Оболочечная модель:**

Состояния нуклонов в  
потенциальной яме



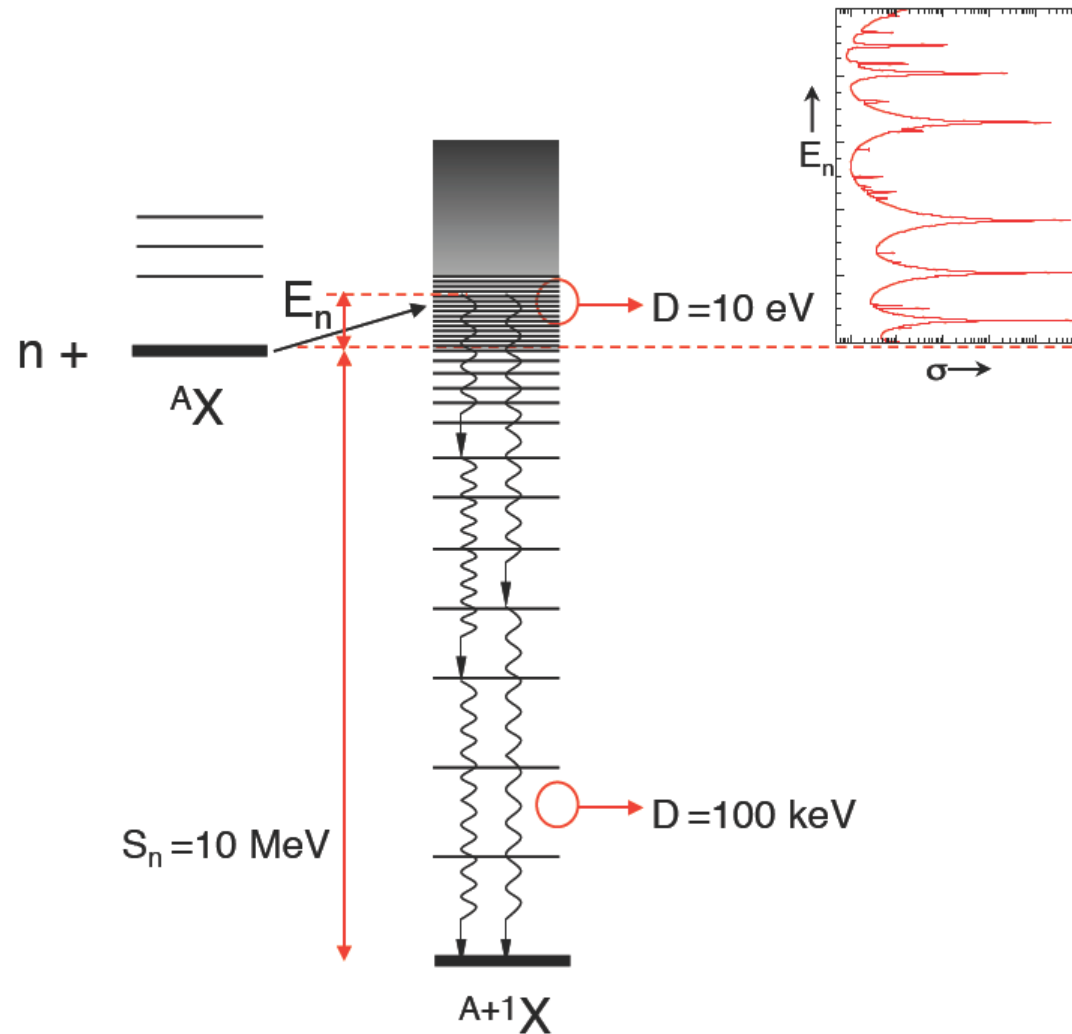
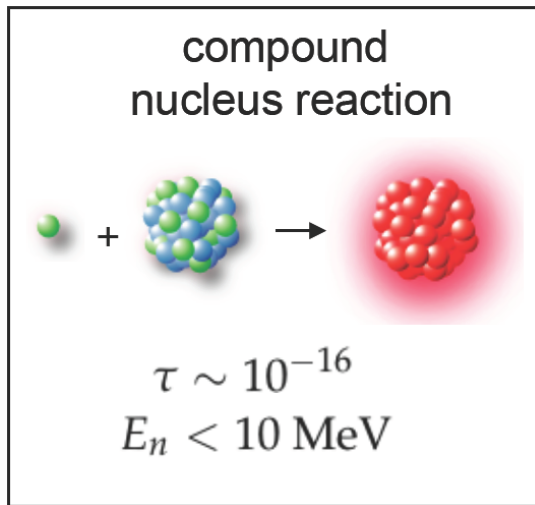
**Схема уровней :**

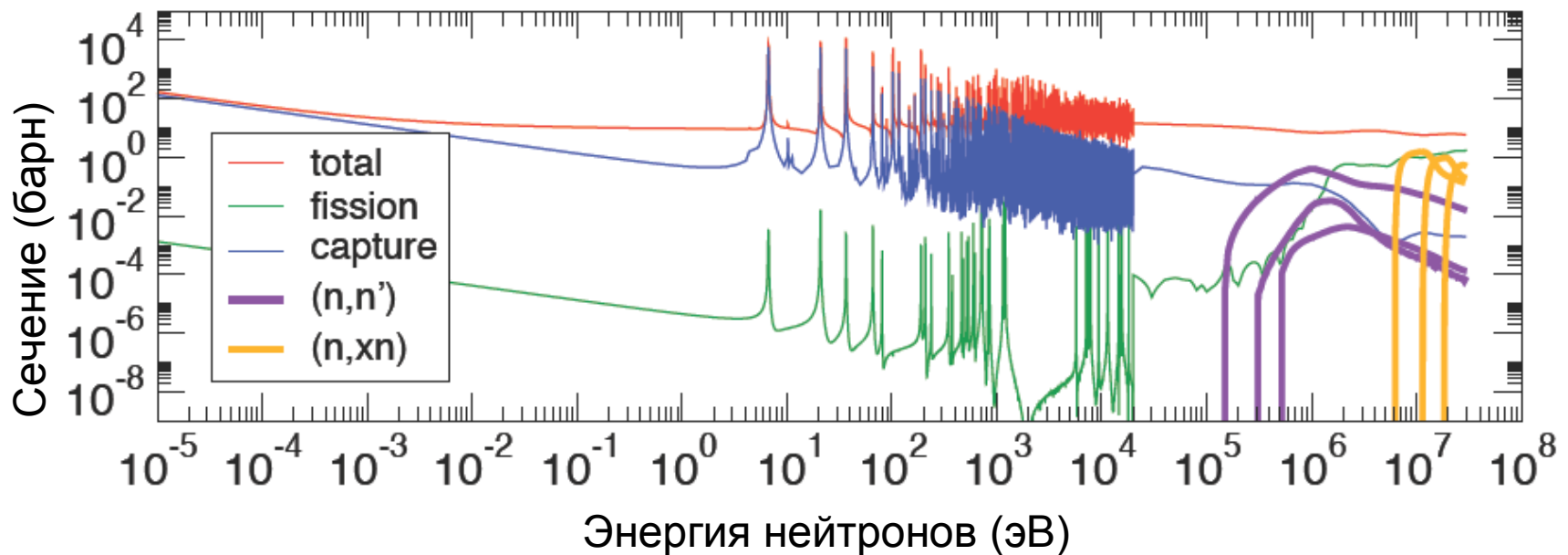
Возбужденные  
состояния ядра





# Реакции с образованием составного ядра





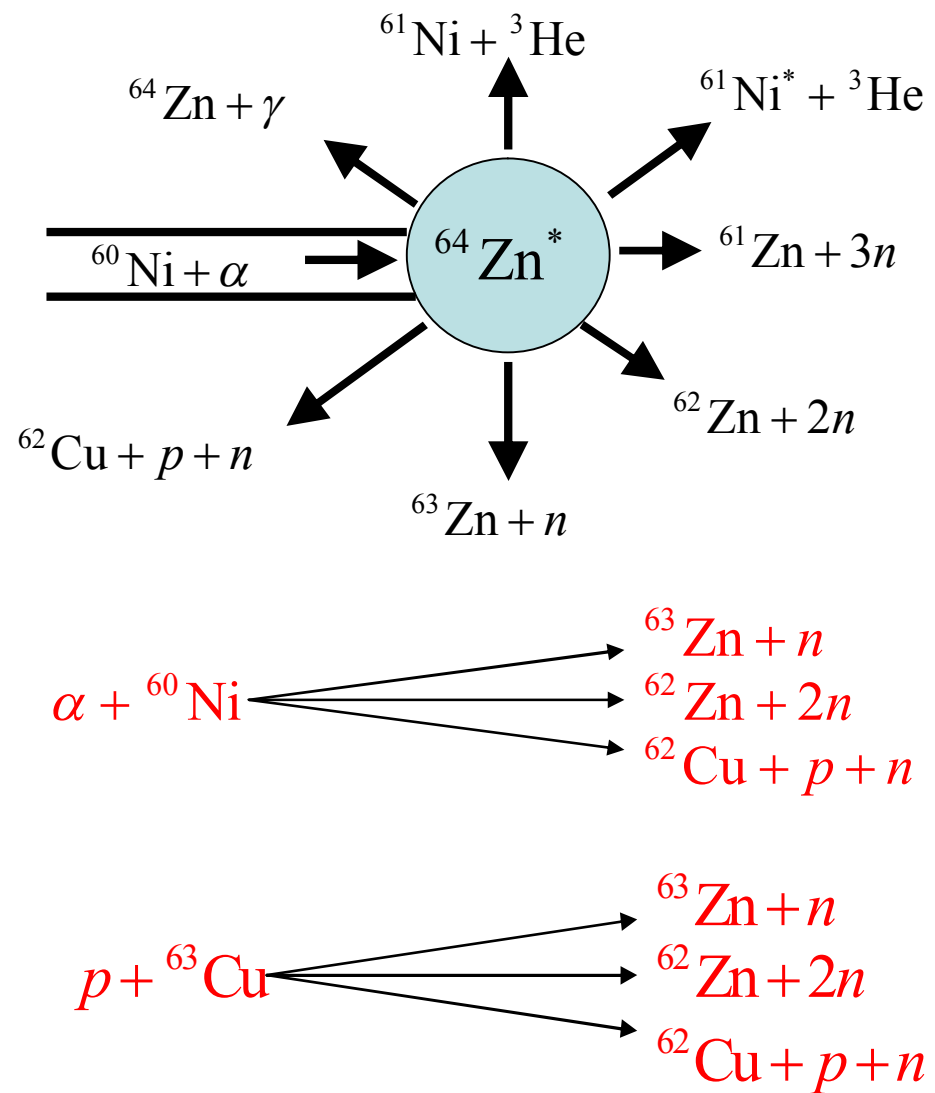
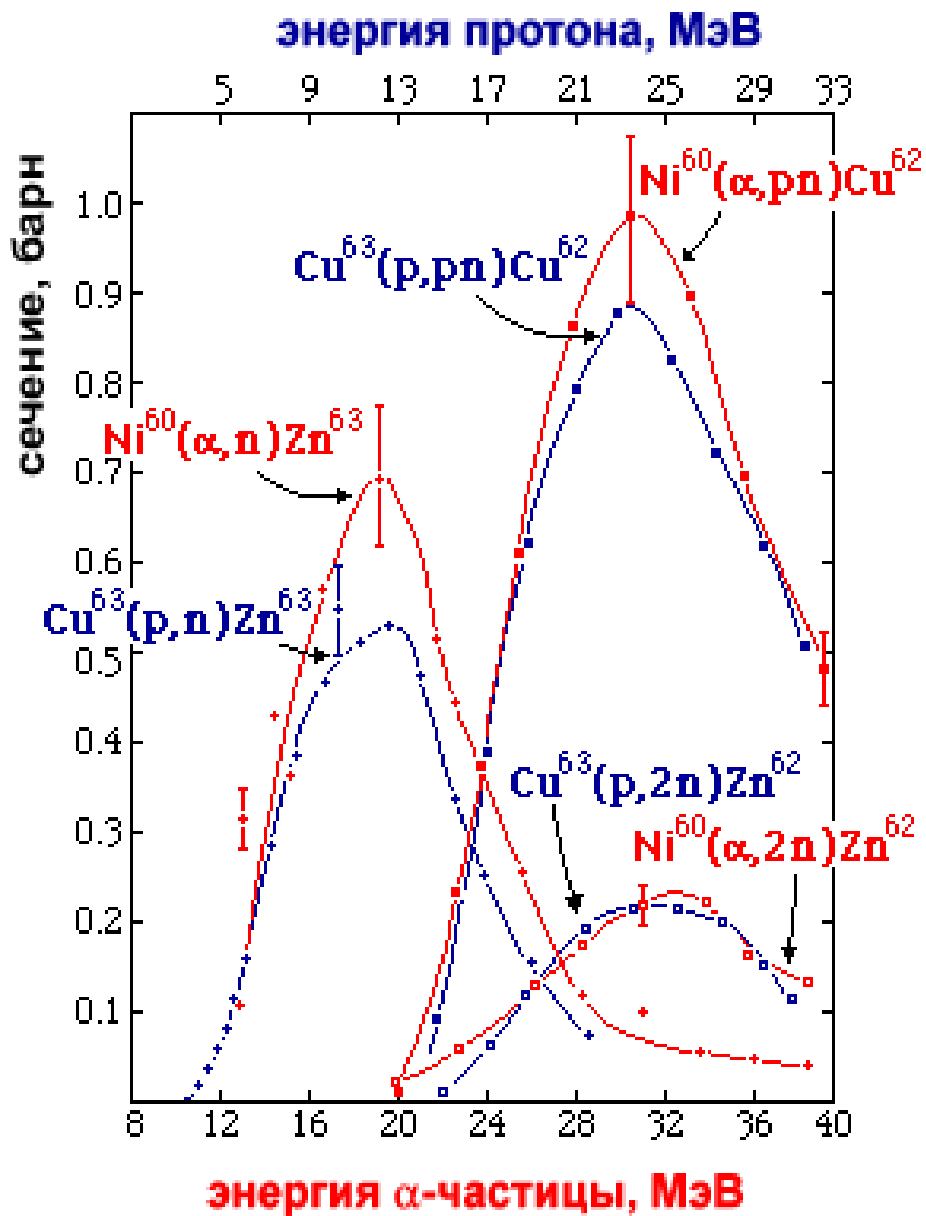
Холодные: большое сечение захвата  $\sigma \sim 1/v$ , выраженные волновые свойства

Тепловые:  $E = kT = 0,025$  эВ ( $T = 300\text{K}$ )

Резонансные:  $0.5$  эВ  $< E < 1$  кэВ

Быстрые:  $100$  кэВ  $< E < 14$  МэВ

# Составное ядро $^{64}\text{Zn}$



# Составное ядро

**Какие причины делают составное ядро долгоживущим?**

**Во-первых,** из-за короткодействия ядерных сил движение нуклонов в ядре может быть сильно запутанным. Вследствие этого энергия влетевшей в ядро частицы быстро перераспределяется между всеми частицами ядра. В результате часто оказывается, что ни одна частица уже не обладает энергией, достаточной для вылета из ядра. В этом случае ядро живет до флуктуации, при которой одна из частиц приобретает достаточную для вылета энергию.

**Во-вторых,** малая проницаемость потенциального барьера для заряженных частиц на несколько порядков уменьшает вероятность вылета протонов из средних и тяжелых ядер.

**В-третьих,** вылет частиц из составного ядра может затрудняться различными правилами отбора.

**В-четвертых,** в реакциях с испусканием  $\gamma$ -квантов, на средних и тяжелых ядрах в ядре происходит сильная перестройка структуры при испускании  $\gamma$ -кванта. Время перестройки значительно превышает характерное ядерное время  $10^{-22}$  с.

# Реакции на тяжелых ионах

## 1) Фрагментация, расщепление и деление

→ релятивистские энергии:  $v_{\text{beam}} \approx 0.9 c$ ,  $E \approx (300 - 1000) \text{ MeV/n}$

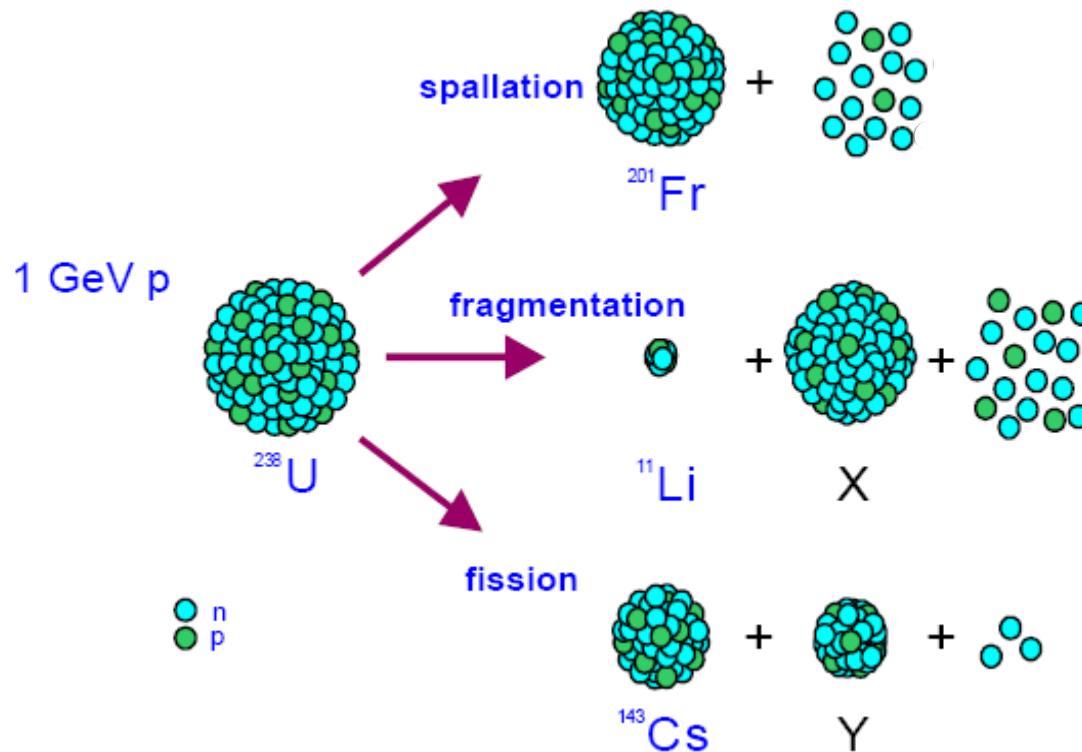
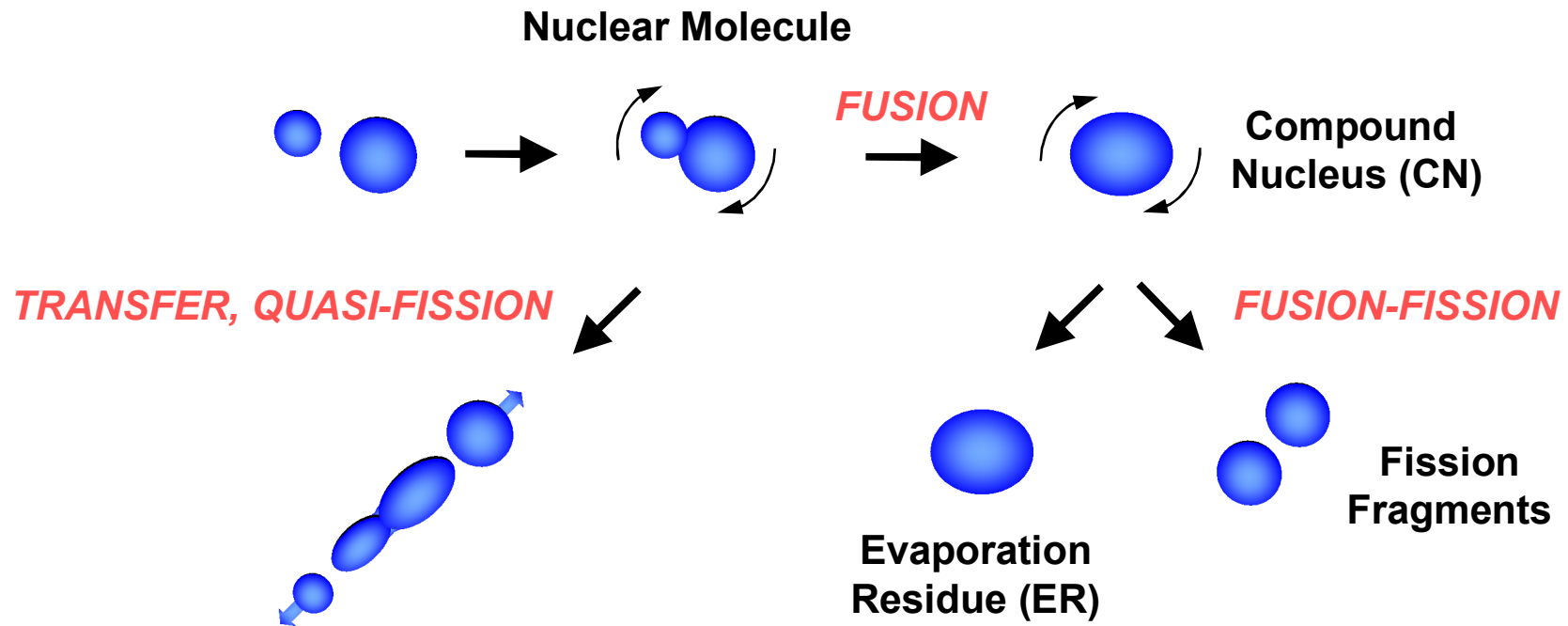


figure: CERN

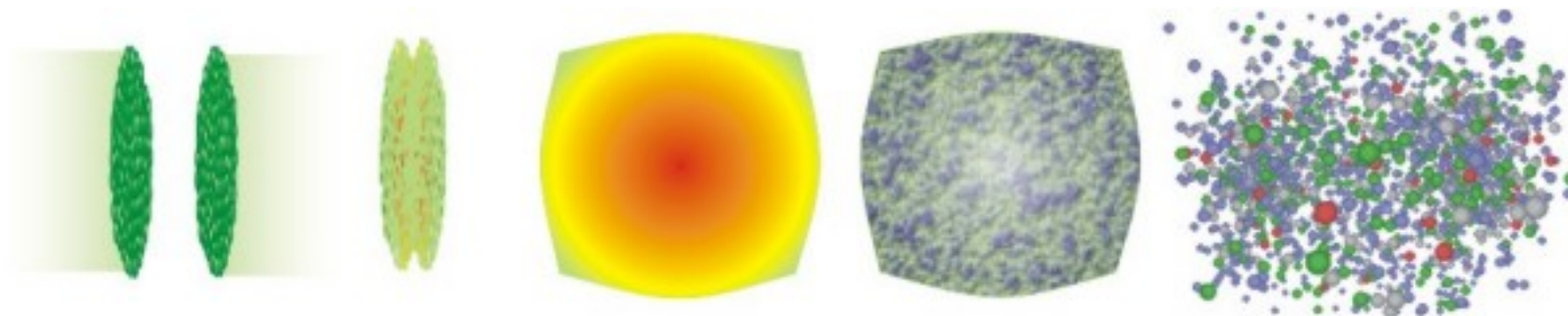
# Реакции на тяжелых ионах

## 2) Слияние

→ энергии у кулоновского барьера:  $v_{\text{beam}} \approx 0.1$  c,  $E \approx 5$  MeV / nucleon



# Столкновения релятивистских ядер

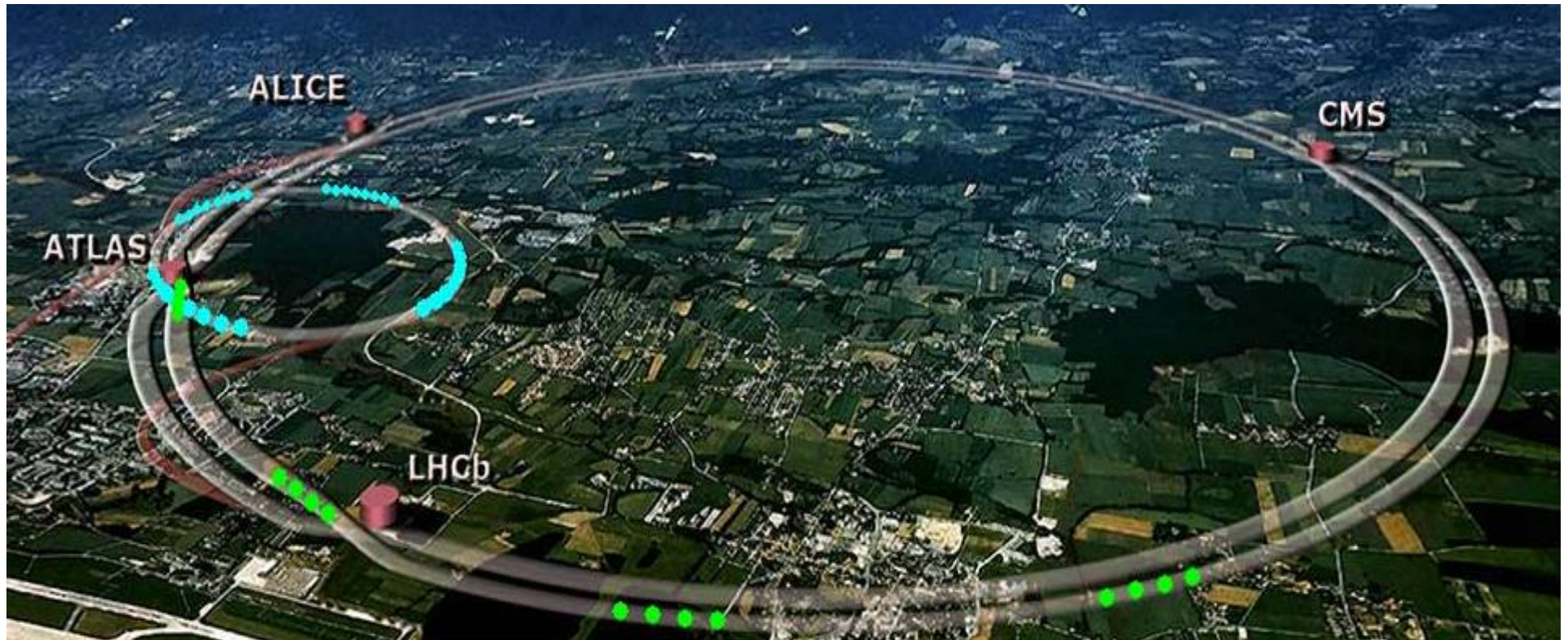


**Ультрарелятивистское столкновение тяжелых ионов.** Слева направо: два ядра сближаются, сталкиваются, формируется кварк-глюонная плазма, адронизация КГП, перерассеяние и охлаждение адронов



# Large Hadron Collider (LHC), CERN

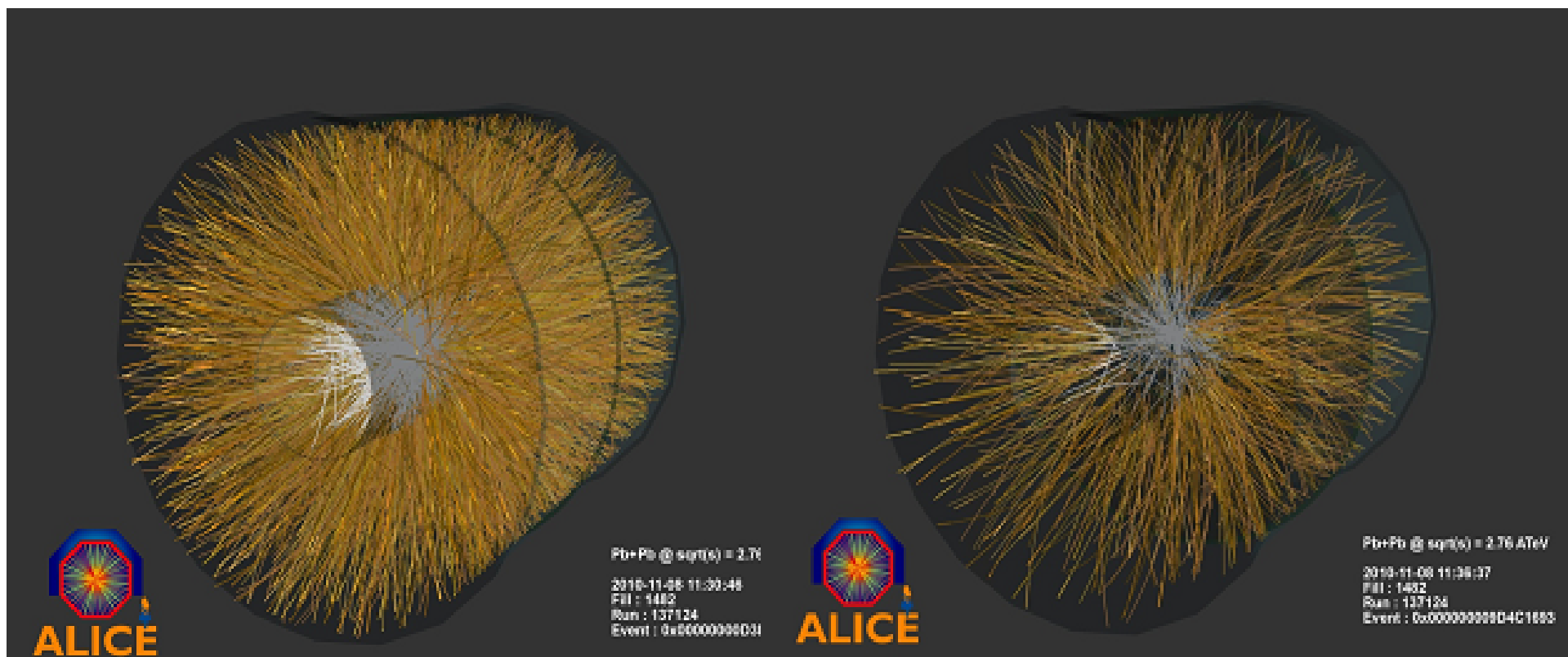
Большой адронный коллайдер, ЦЕРН, Женева, Швейцария





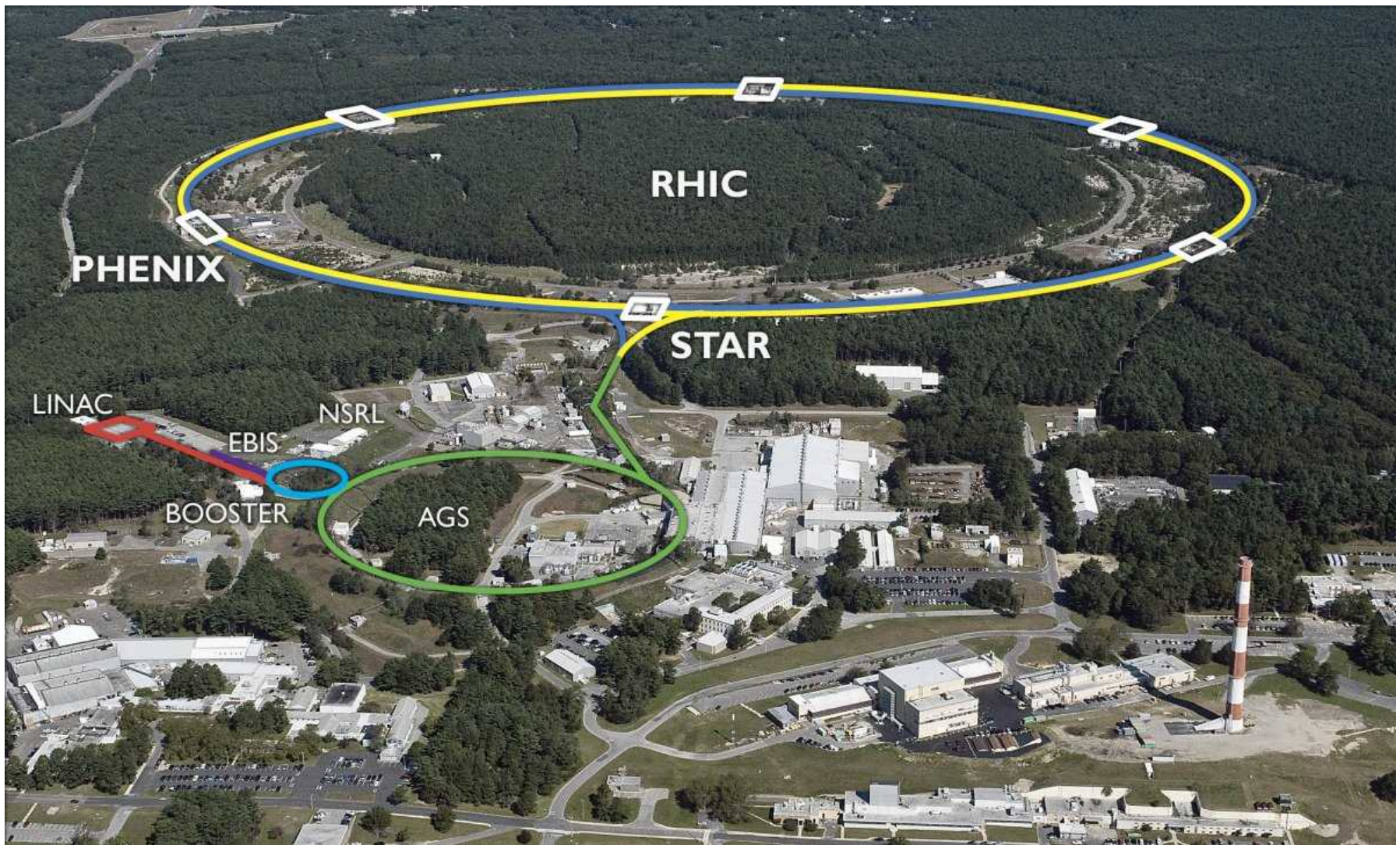
# Столкновения ионов свинца

Pb + Pb,  $\sqrt{s} = 2,36$  A TeV



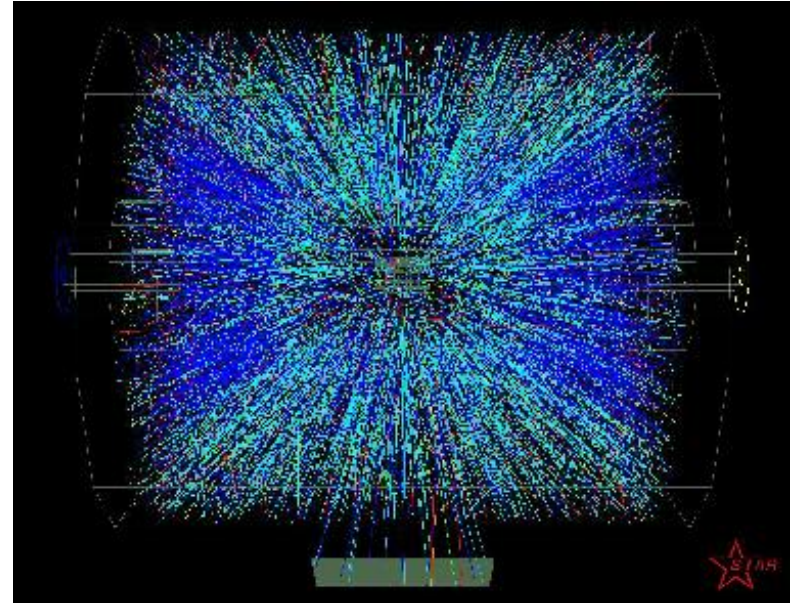
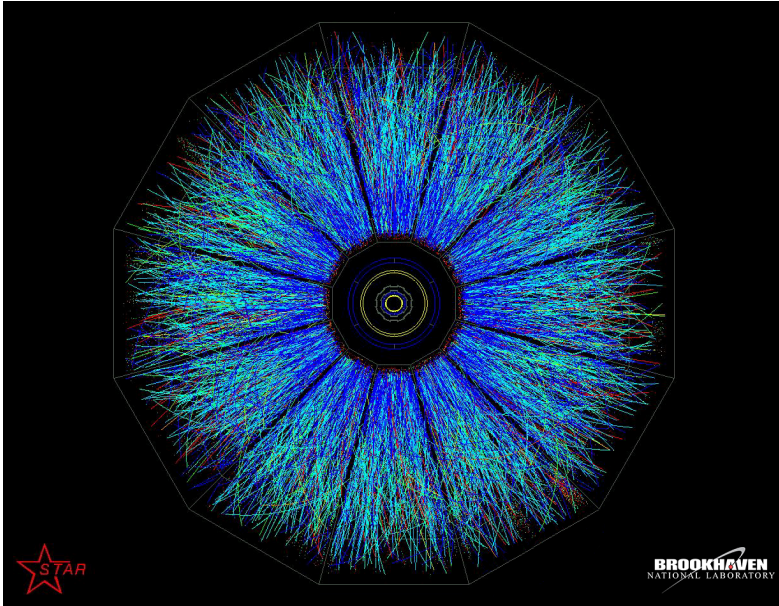
# Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)

Брукхейвенская национальная лаборатория (BNL), NY, USA

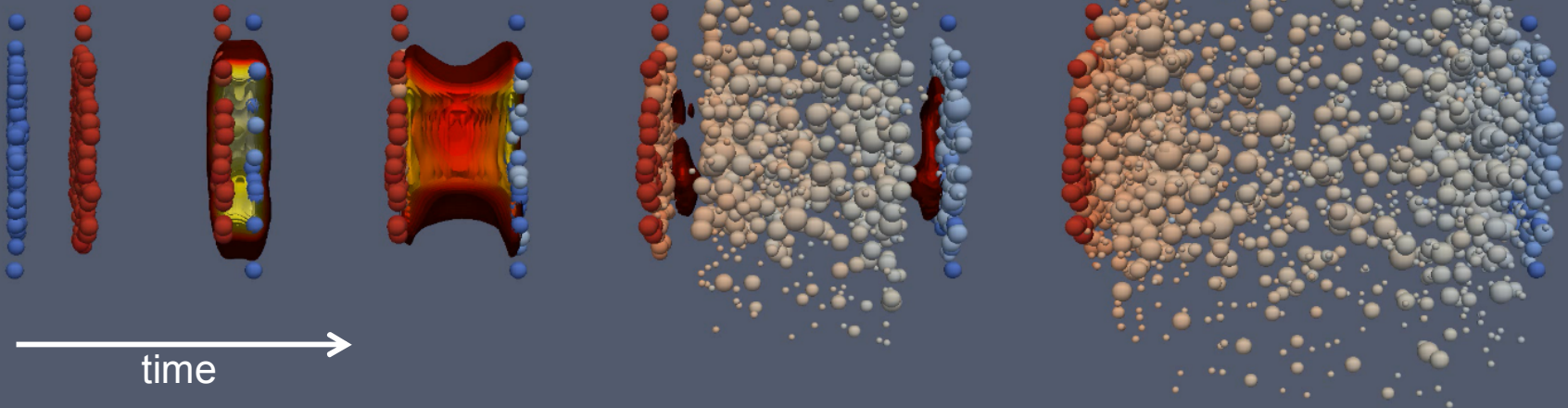




# Столкновения ионов золота

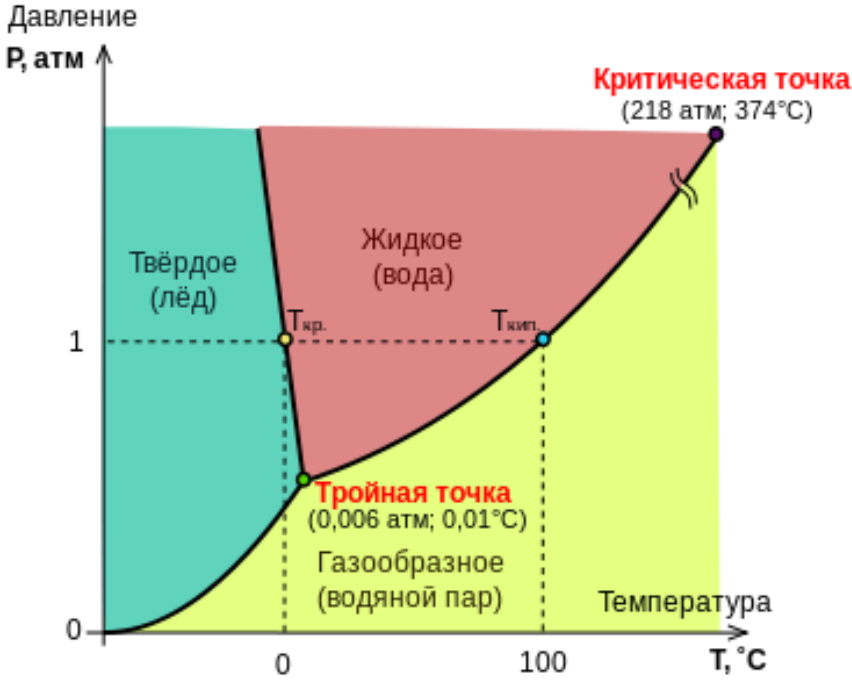


Au + Au,  $\sqrt{s} = 200$  A GeV

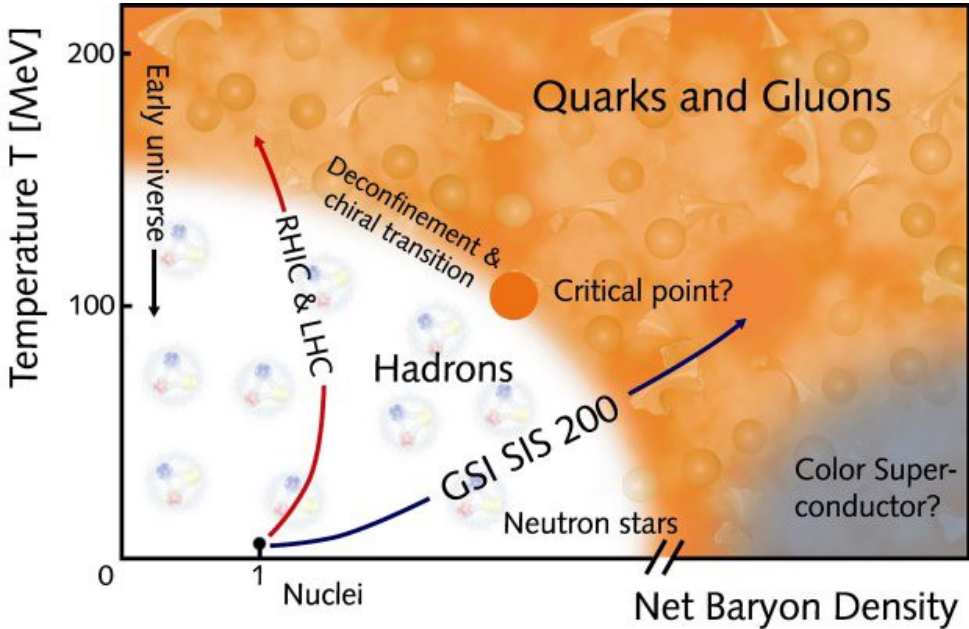


# Фазовая диаграмма

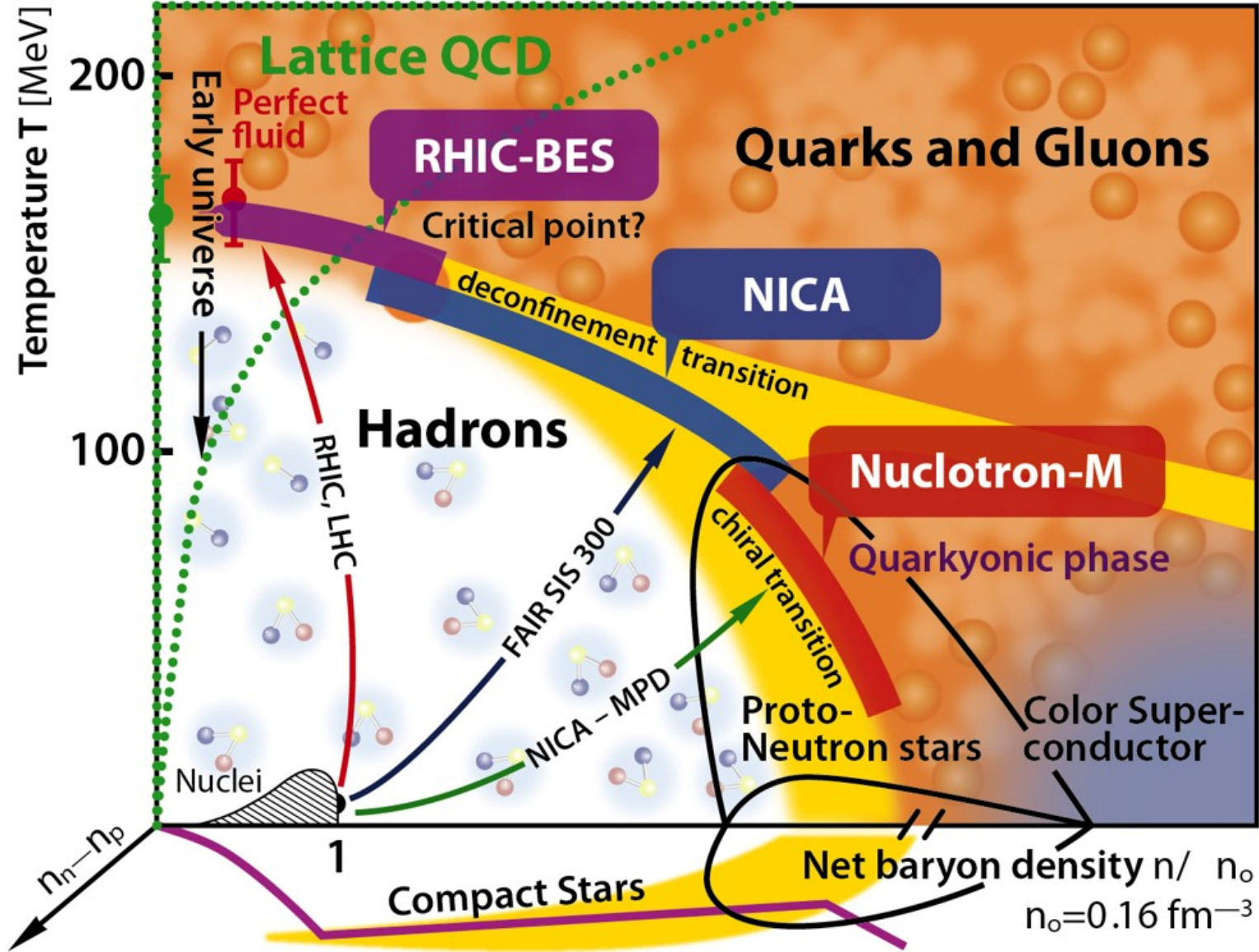
## ВОДЫ



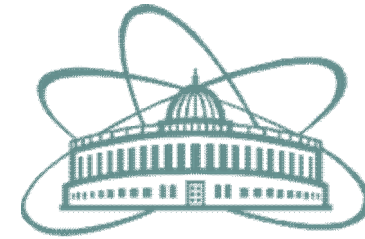
## ядерного вещества







# 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

# NICA (Nuclotron based Ion Collider Facility)

Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), Дубна, Россия



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



Открытый видеоурок  
«NICA — Вселенная в лаборатории»

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