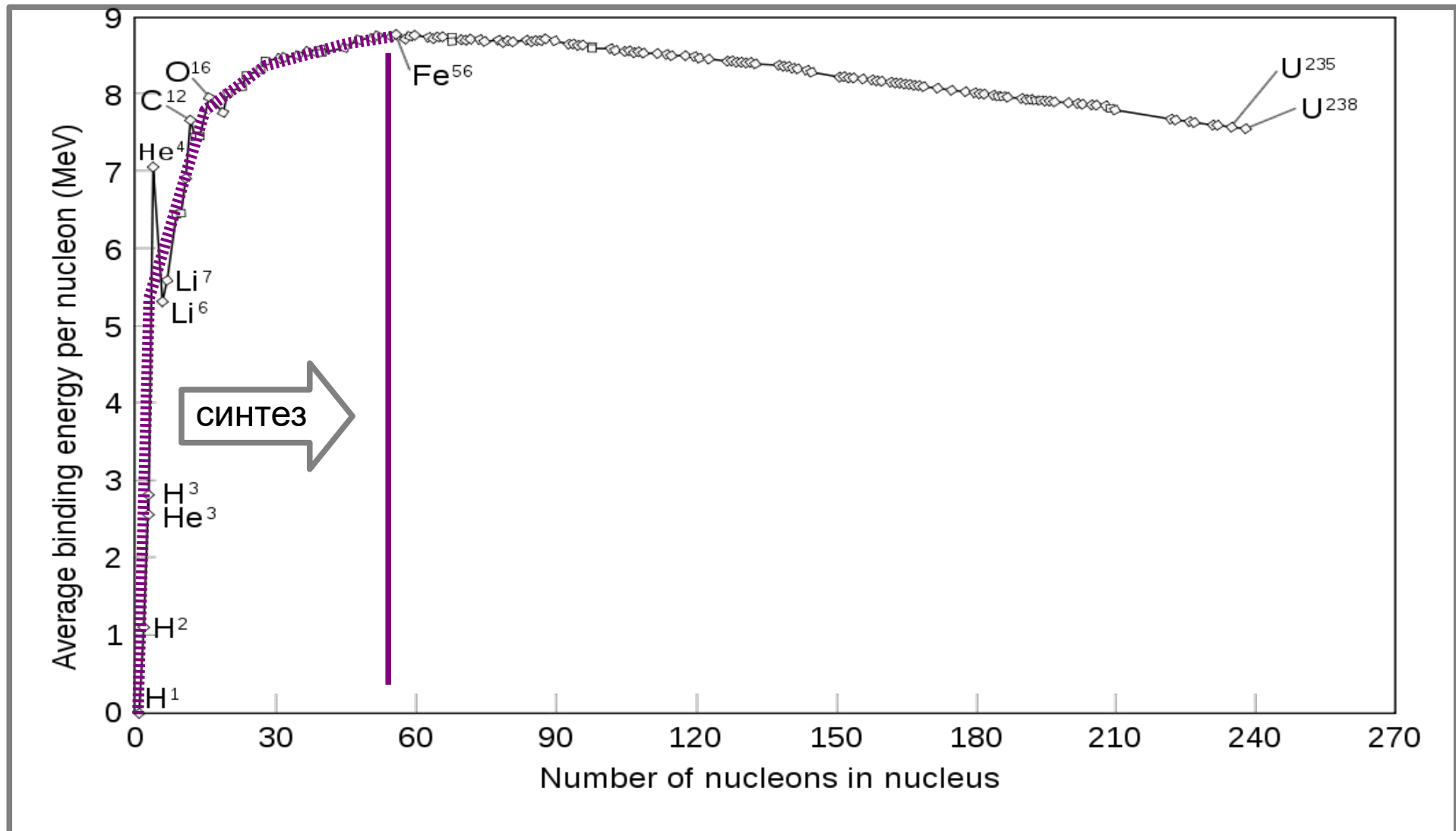


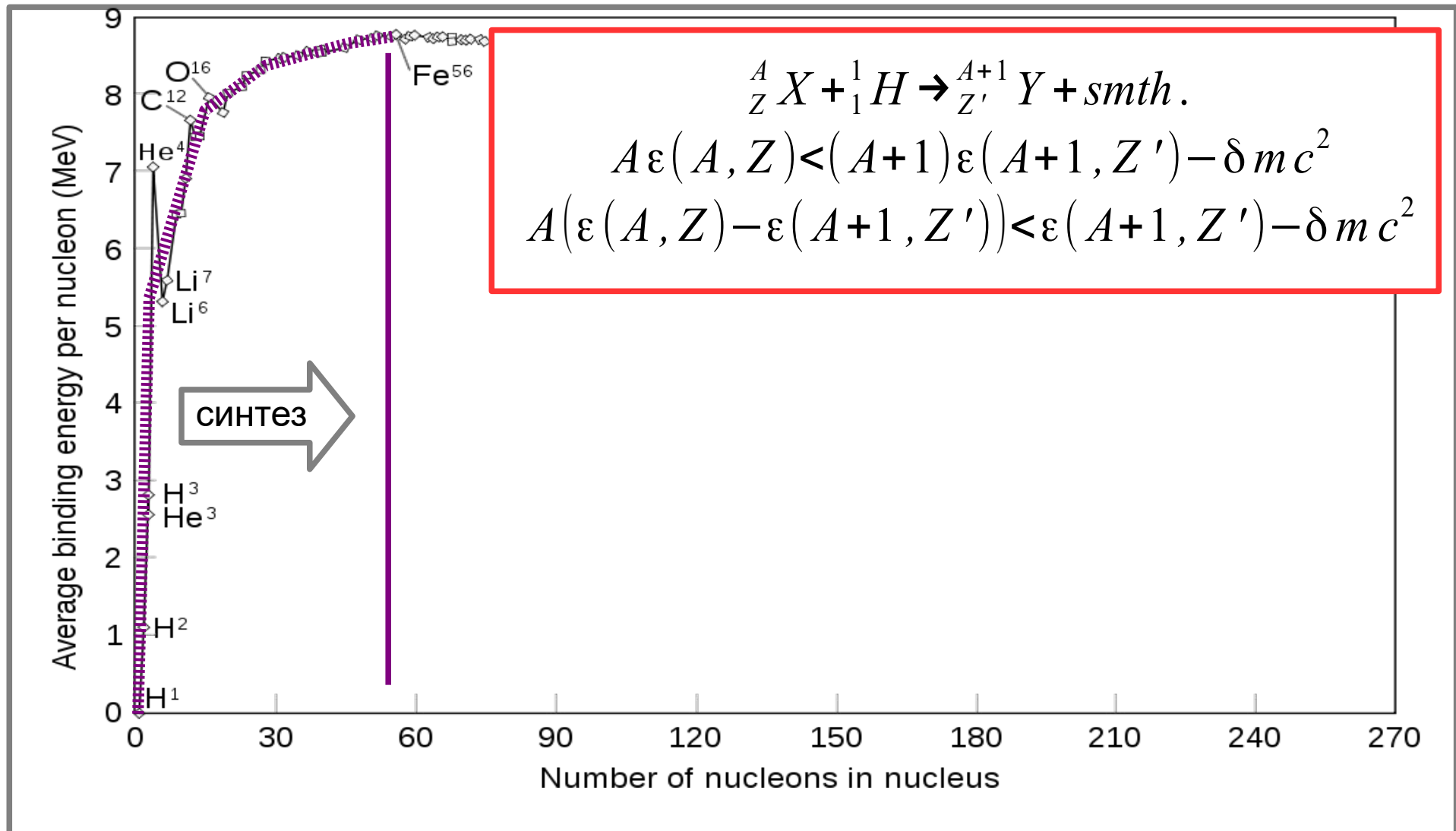
Лекция 12.
Ядерные реакции.
Синтез лёгких ядер.
Сечение реакции.

Часть 1. Реакции синтеза

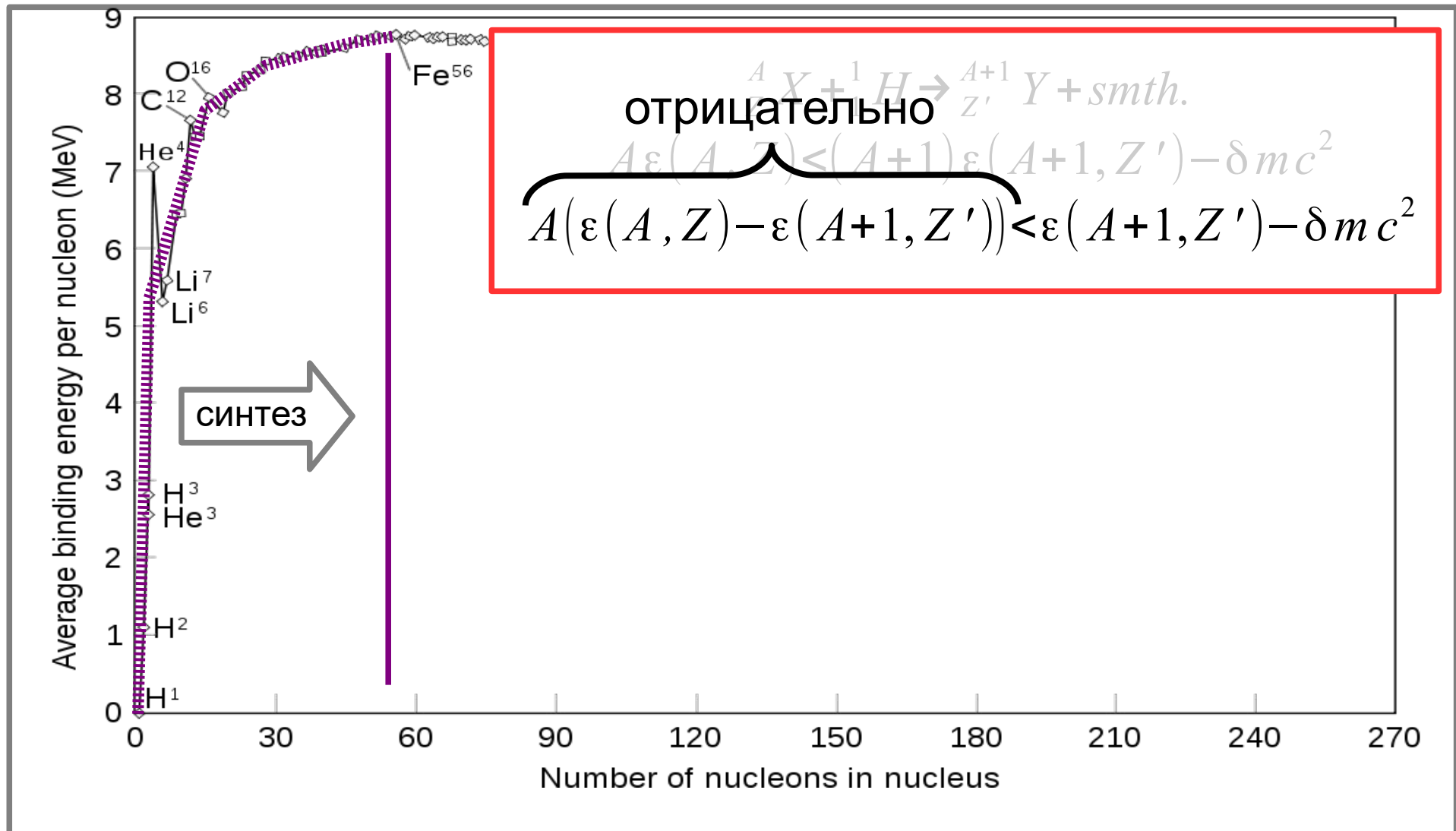
Синтез лёгких ядер



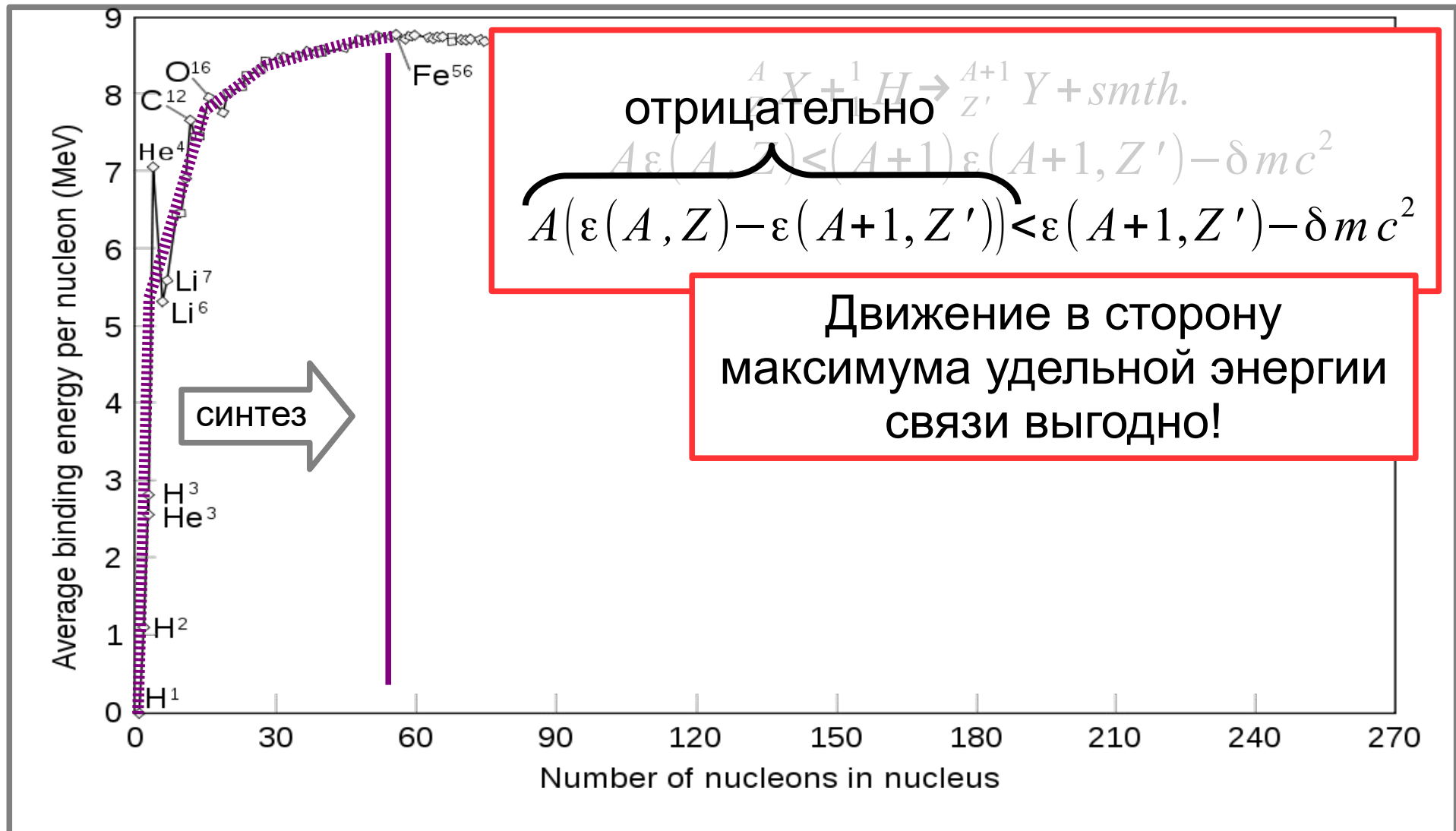
Синтез лёгких ядер



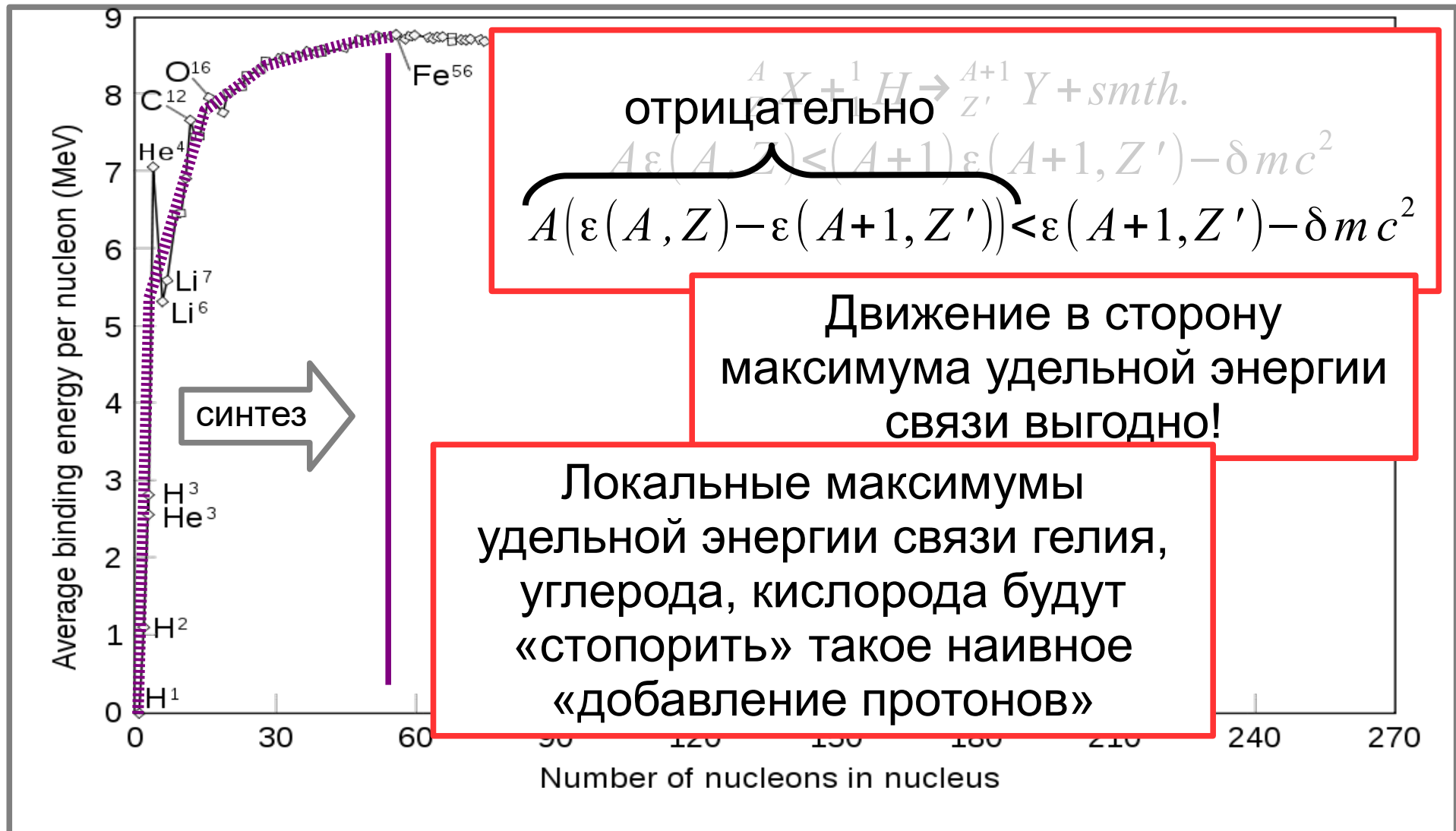
Синтез лёгких ядер



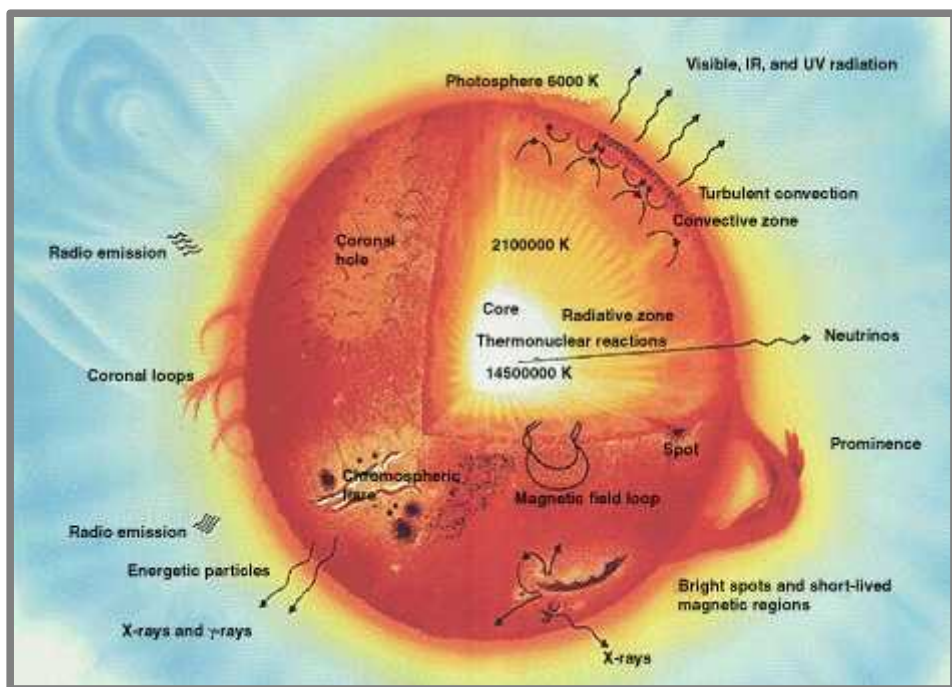
Синтез лёгких ядер



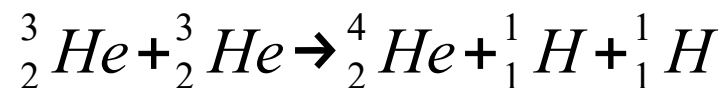
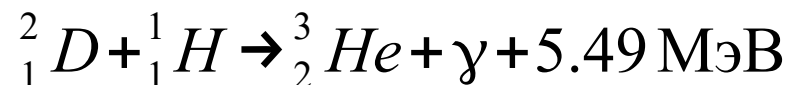
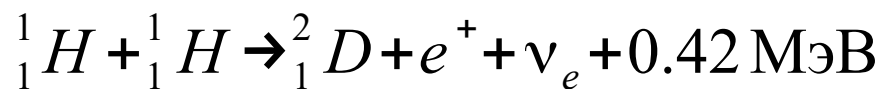
Синтез лёгких ядер



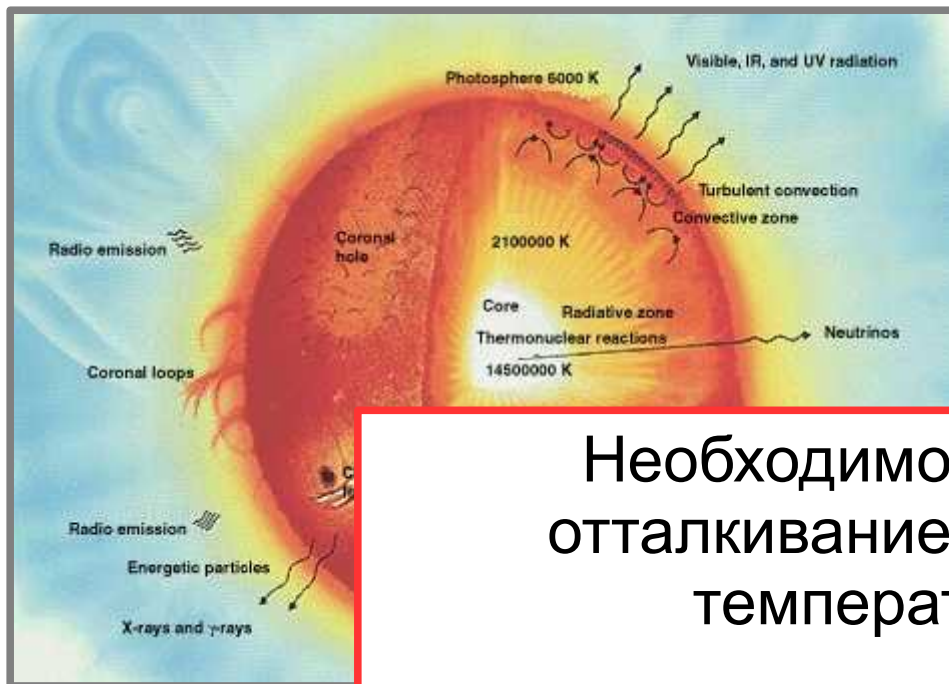
Реакции синтеза в звёздах



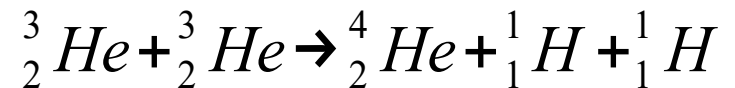
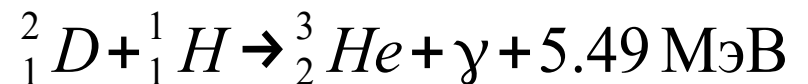
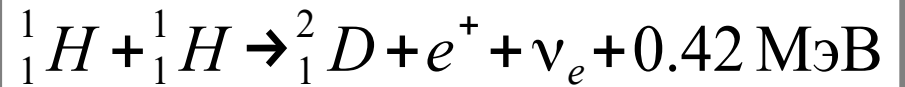
p-p chain



Реакции синтеза в звёздах

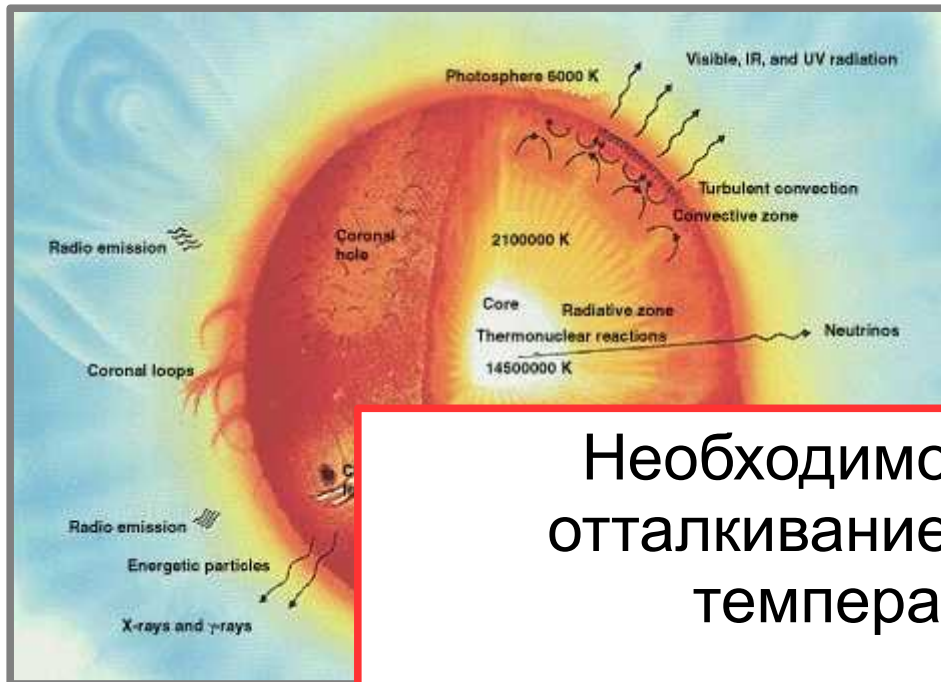


p-p chain

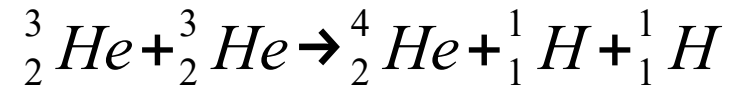
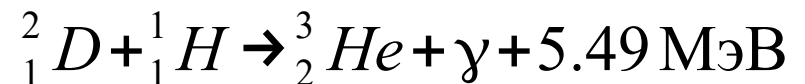
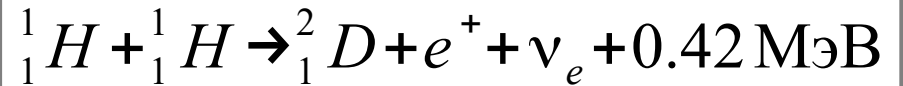


Необходимо преодолеть кулоновское отталкивание протонов! Нужна высокая температура и/или плотность.

Реакции синтеза в звёздах



p-p chain



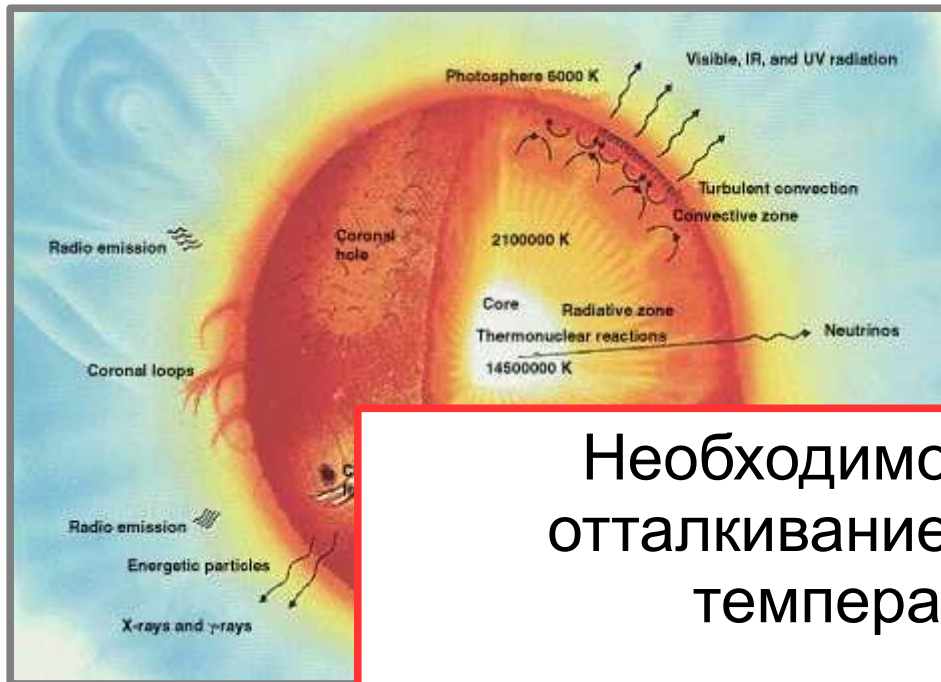
Необходимо преодолеть кулоновское отталкивание протонов! Нужна высокая температура и/или плотность.

Кулоновский барьер $\sim 1 \text{ МэВ}$ (10^{10} K).

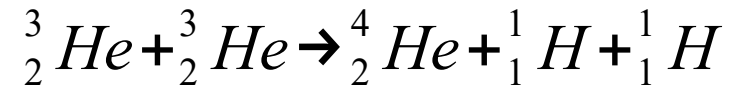
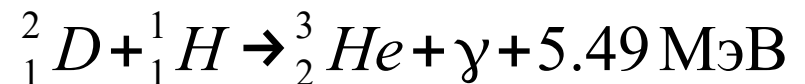
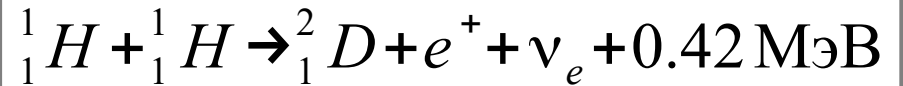
Плотность ядра 150 г/см^3 ($L \sim 5 \cdot 10^{-10} \text{ см}$)

В ядре Солнца 15 млн. K

Реакции синтеза в звёздах



p-p chain

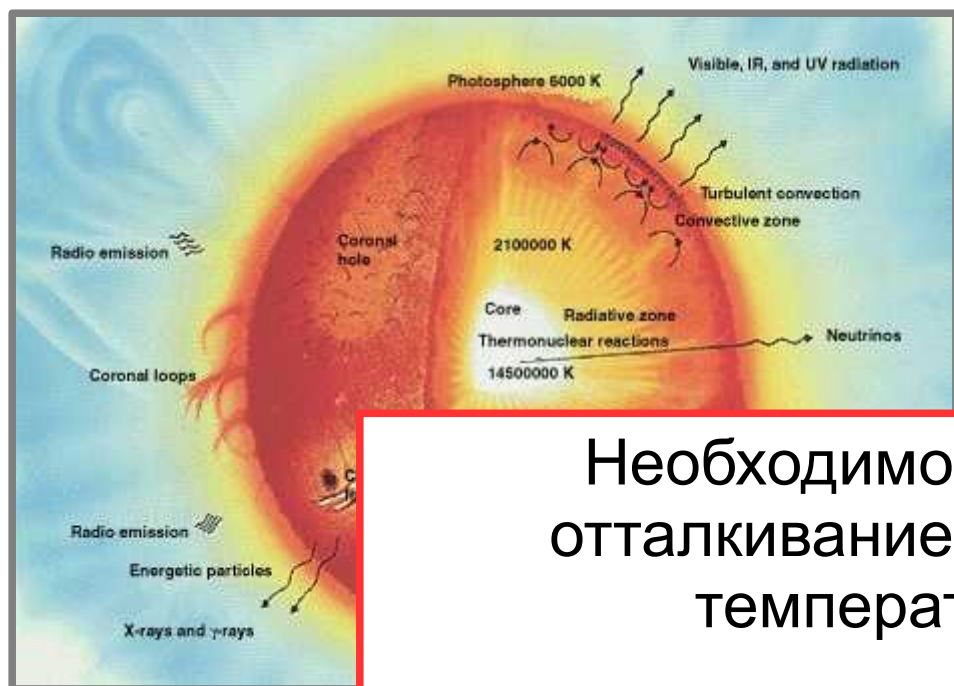


Необходимо преодолеть кулоновское отталкивание протонов! Нужна высокая температура и/или плотность.

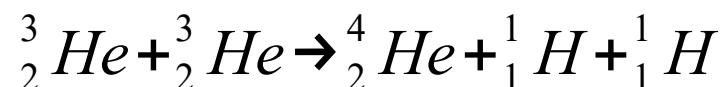
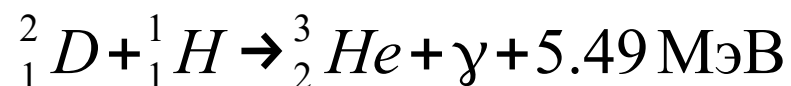
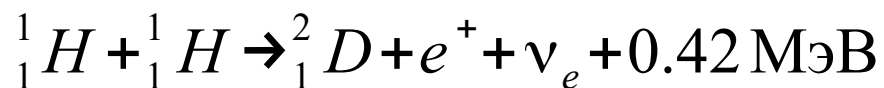
Кулоновский барьер $\sim 1 \text{ МэВ}$ (10^{10} эВ)
 Плотность ядра 150 г/см^3 ($L \sim 10^{-10} \text{ см}$)
 В ядре Солнца 15 млн. К

квантовое
туннелирование

Реакции синтеза в звёздах



p-p chain



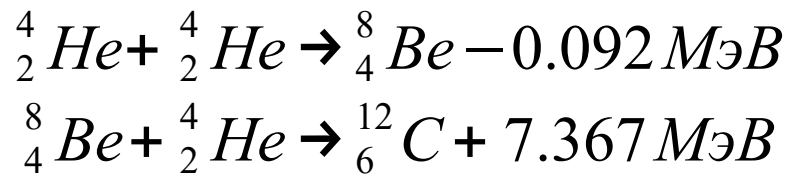
Необходимо преодолеть кулоновское отталкивание протонов! Нужна высокая температура и/или плотность.

Кулоновский барьер $\sim 1 \text{ МэВ}$ (10^{10} эВ)
 Плотность ядра 150 г/см^3 ($L \sim 10^{-10} \text{ см}$)
 В ядре Солнца 15 млн. К

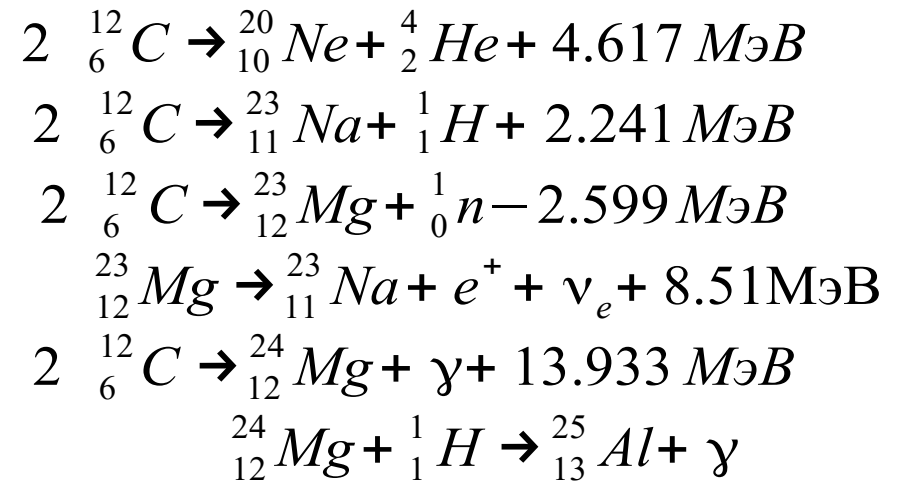
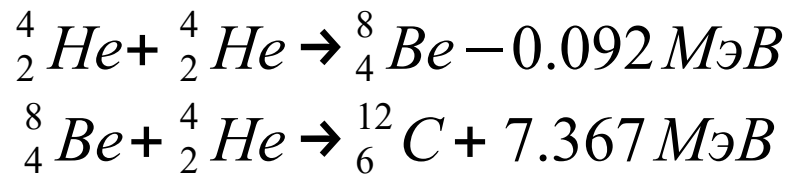
квантовое
туннелирование

Реакции $\text{H} + \text{H}$ по каналу слабого взаимодействия!

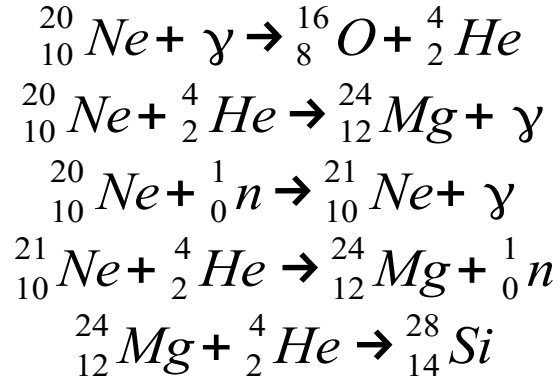
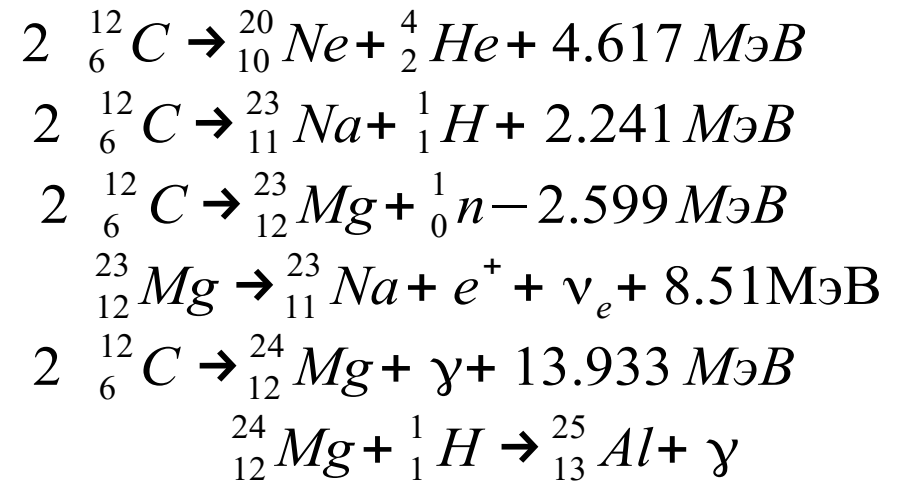
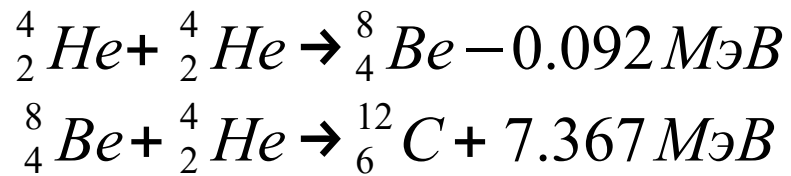
Дальнейший звёздный нуклеосинтез "ОДНИМ ГЛАЗКОМ"



Дальнейший звёздный нуклеосинтез "ОДНИМ ГЛАЗКОМ"

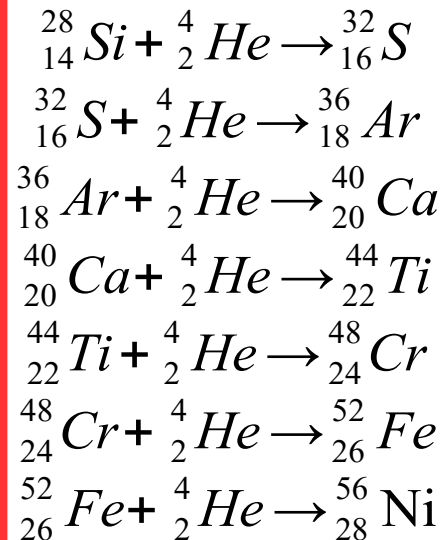
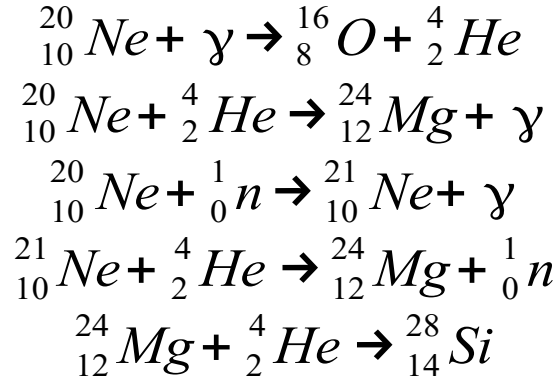
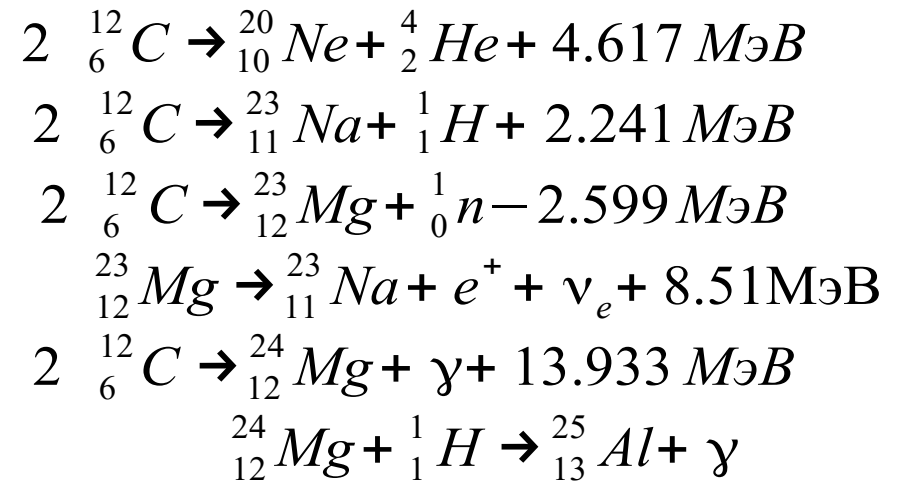
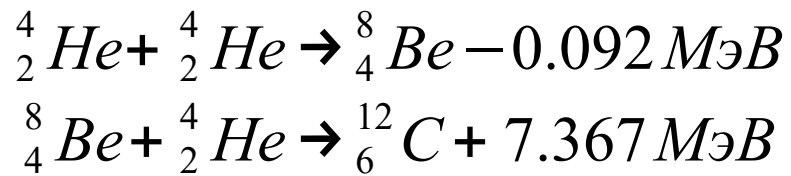


Дальнейший звёздный нуклеосинтез "ОДНИМ ГЛАЗКОМ"



Дальнейший звёздный нуклеосинтез

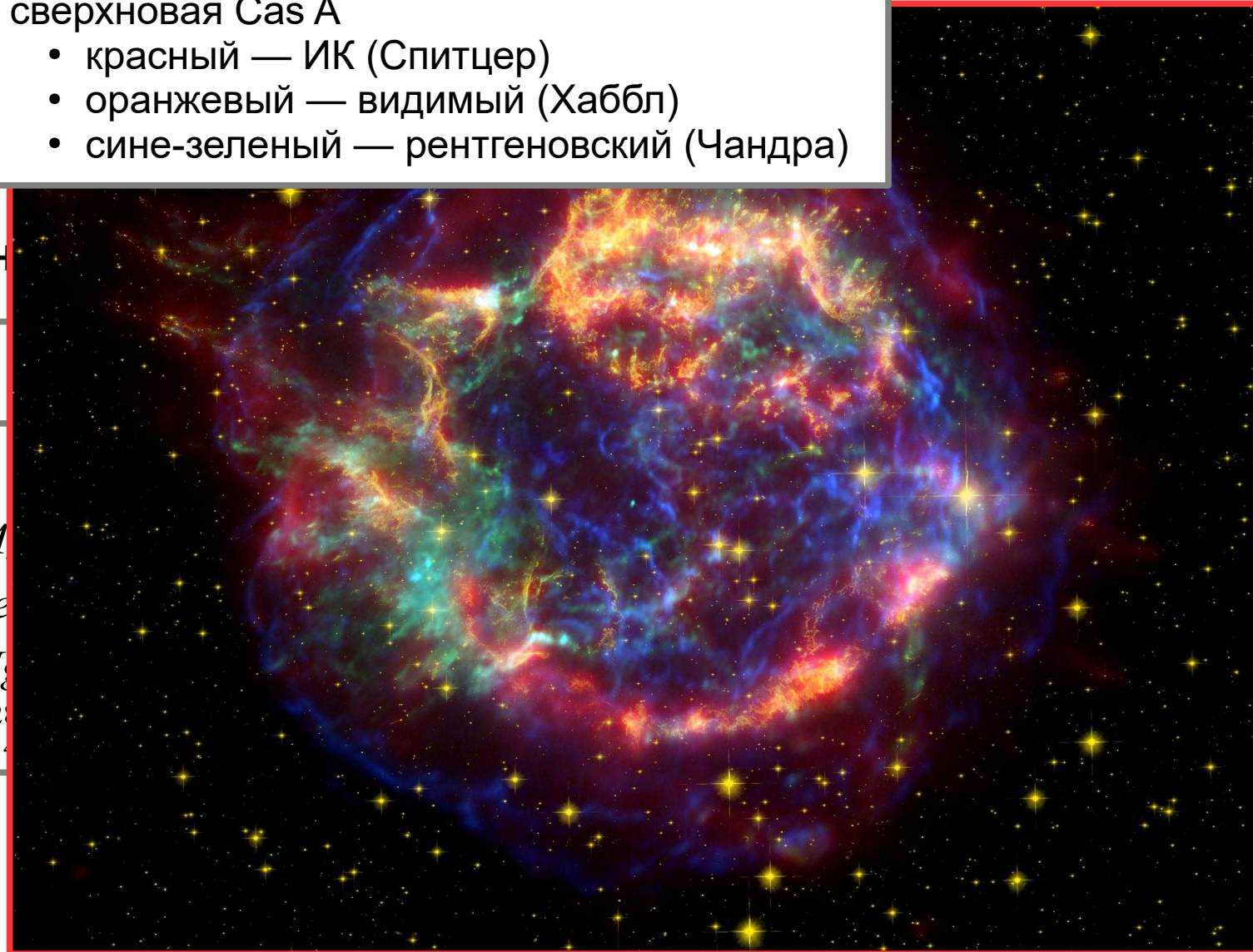
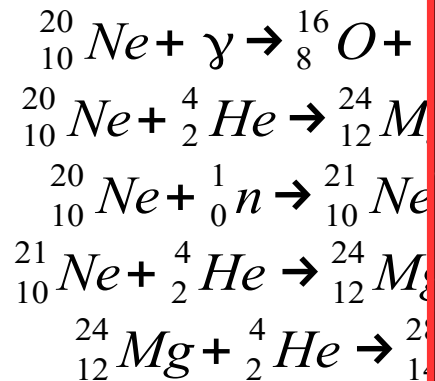
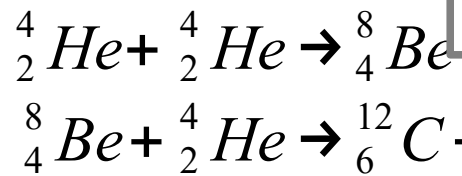
"ОДНИМ ГЛАЗКОМ"



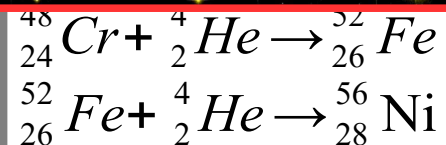
Дальнейший звёздный нуклеосинтез

сверхновая Cas A

- красный — ИК (Спитцер)
- оранжевый — видимый (Хаббл)
- сине-зеленый — рентгеновский (Чандра)



https://en.wikipedia.org/wiki/Cassiopeia_A



«Лабораторный» термоядерный синтез



Shot no. 11425
Time [ms]: 971.3

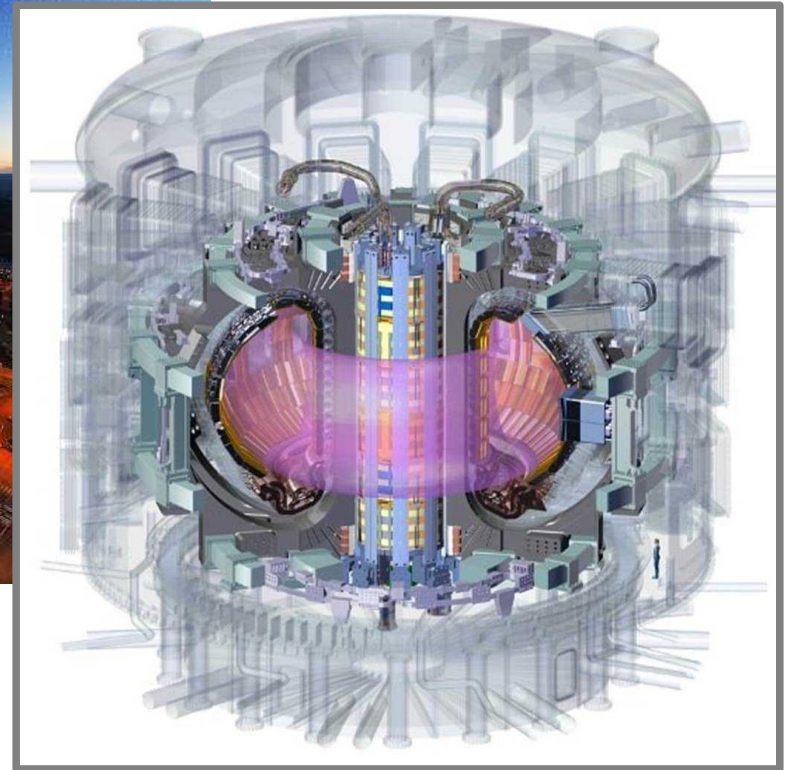
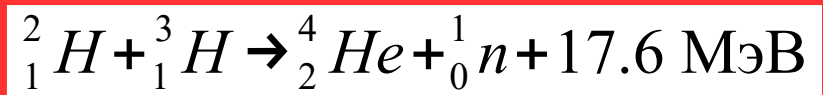
Плазма в токамаке COMPASS
(Калхэм 1989, Прага 2006-2021).



Видео 20.01.2016

<https://www.youtube.com/watch?v=IhHsOwLdCu4>

ITER



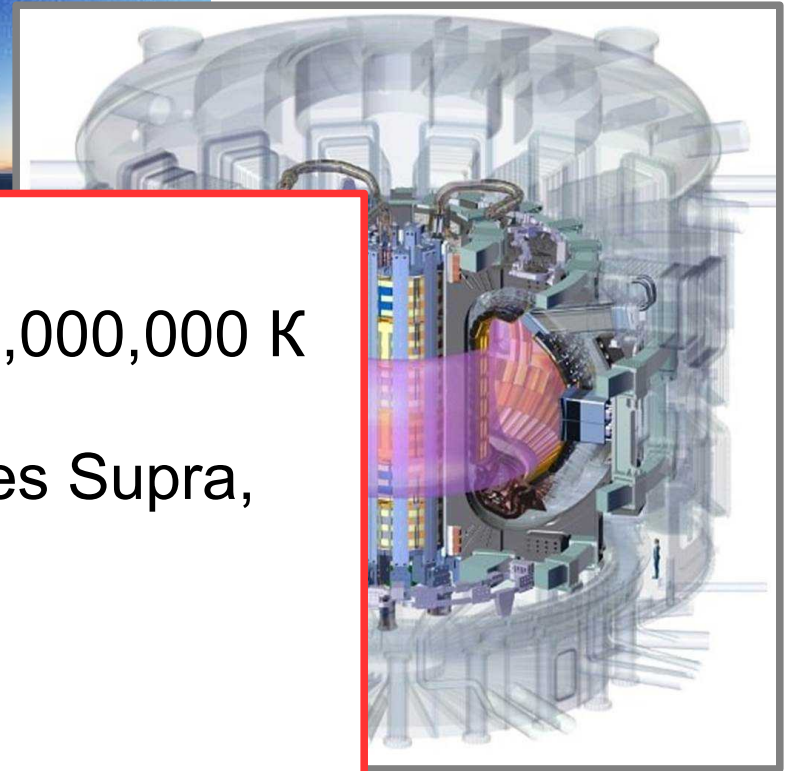
ITER

ТОКАМАК Milestones:

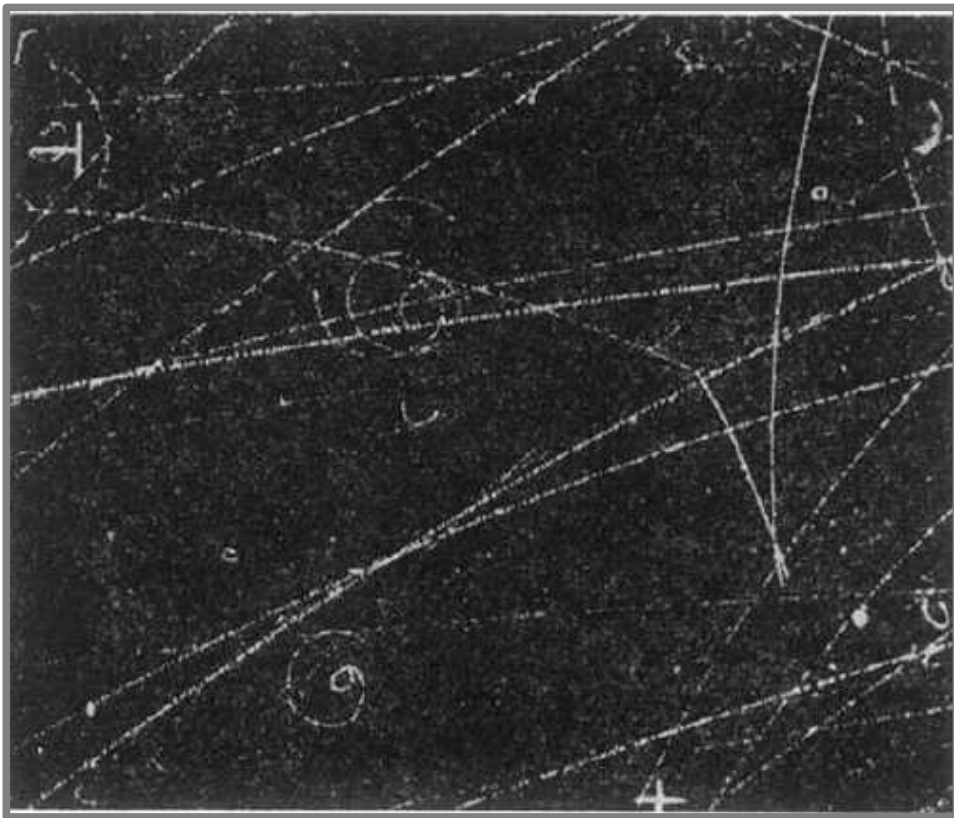
- максимальные температуры $\sim 200,000,000$ К (Princeton, USA)
- Удержание плазмы ~ 400 сек (Tores Supra, France)
- Выход энергии 16 МВт (на 24 МВт затраченной) (JET, UK)

Планы ITER: 500 МВт выхода на 50 МВт затраченной

<https://www.iter.org/sci/BeyondITER>

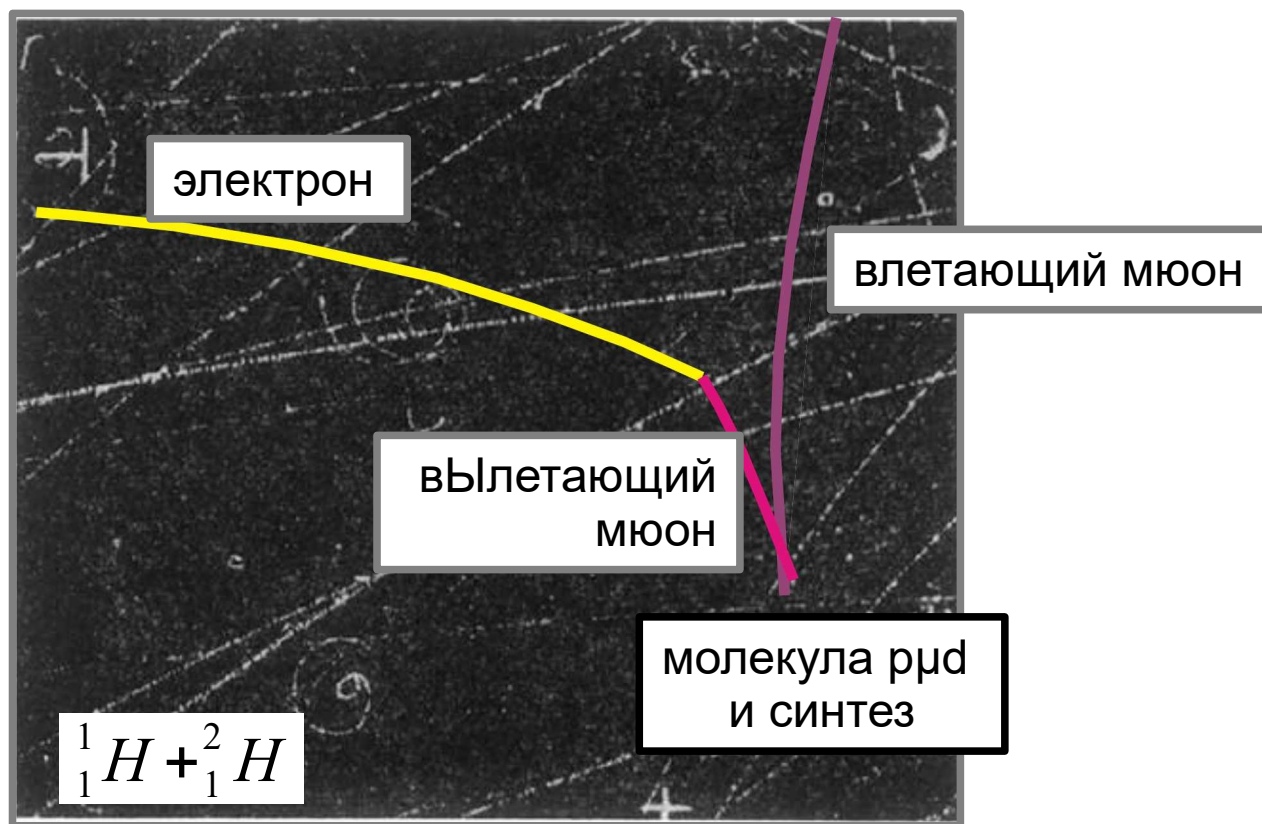


Курьёз: мюонный катализ



L.Alvarez, Nobel lecture, 1968

Курьёз: мюонный катализ



L.Alvarez, Nobel lecture, 1968

Курьёз: мюонный катализ

электрон

влетающий мюон

вылетающий мюон

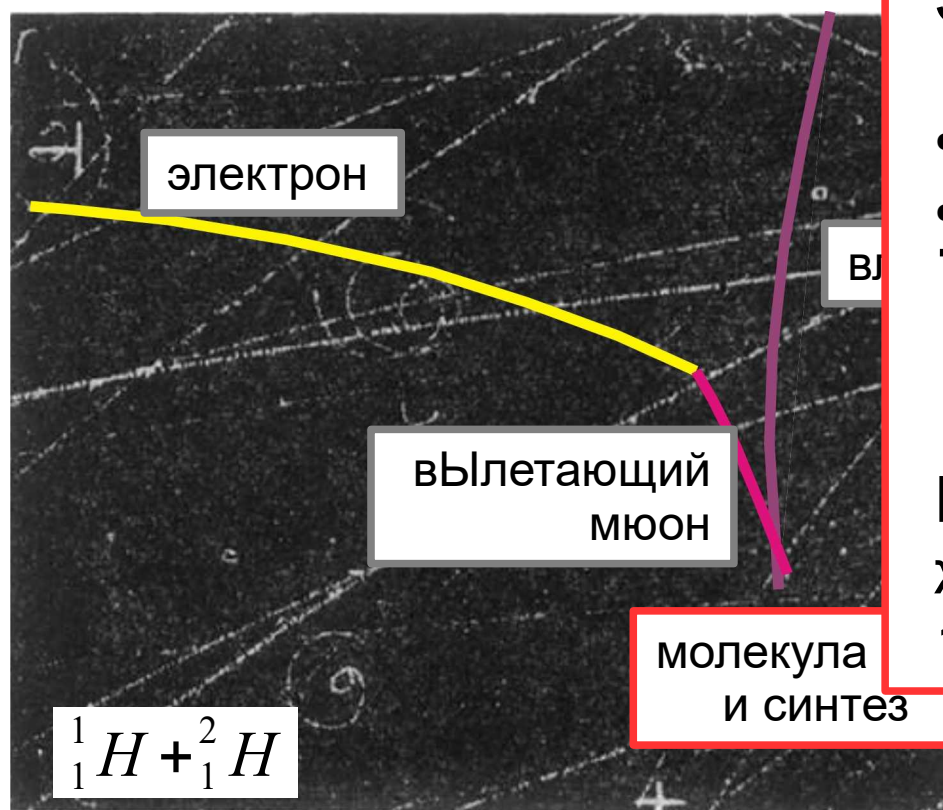
молекула $p\mu d$ и синтез

${}^1_1H + {}^2_1H$

$m_\mu = 208m_e$
 $R_{p\mu d} \approx r_0/200$
 $E_{кул} \approx 200 \text{ Ry} \approx 2 \text{ кэВ} \approx$
20 млн. К

L.Alvarez, Nobel lecture, 1968

Курьёз: мюонный катализ



Энергетический «бюджет»:

- выигрыш ~ 20 МэВ
- производство мюона ~ 10 ГэВ

ИТОГО:

нужно 500 реакции/мюон

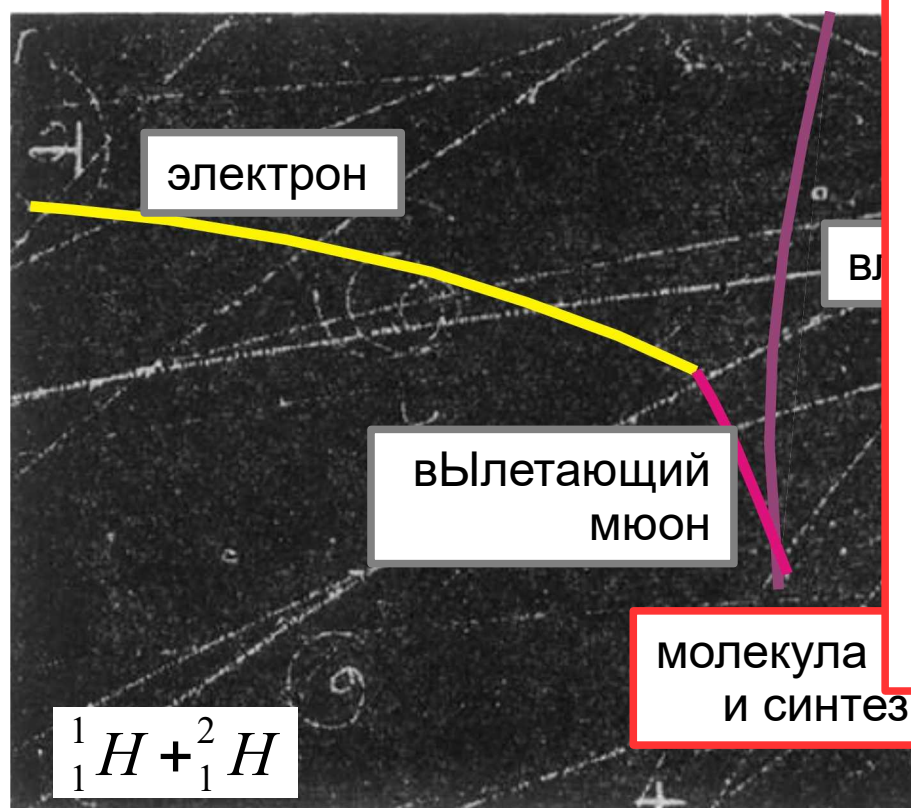
Конечность времени
жизни+удержание мюона = 100-
150 реакций max

$$R_{\text{руд}} \approx r_0/200$$

$$E_{\text{кул}} \approx 200 R_{\text{у}} \approx 2 \text{ кэВ} \approx$$

20 млн. К

Курьёз: мюонный катализ



Энергетический «бюджет»:

- выигрыш ~20 МэВ
- производство мюона ~10 ГэВ

ИТОГО:

нужно 500 реакции/мюон

Конечность времени
жизни+удержание мюона = 100-
150 реакций

TANSTAAFL

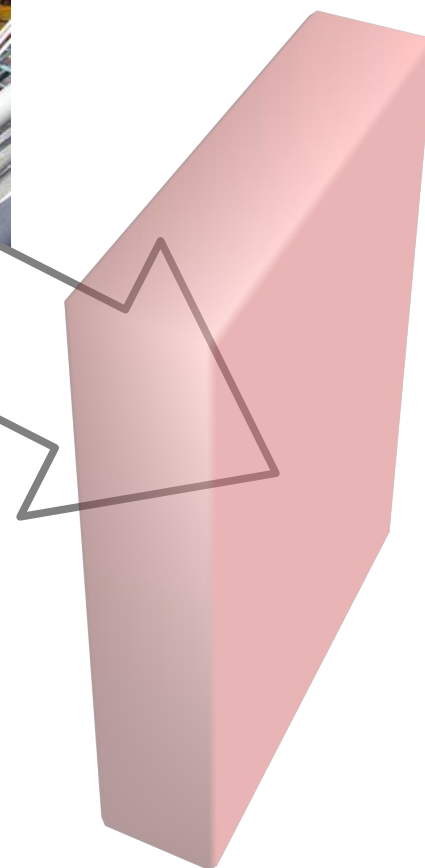
Часть 2. Понятие о сечении реакции

Сечение реакции

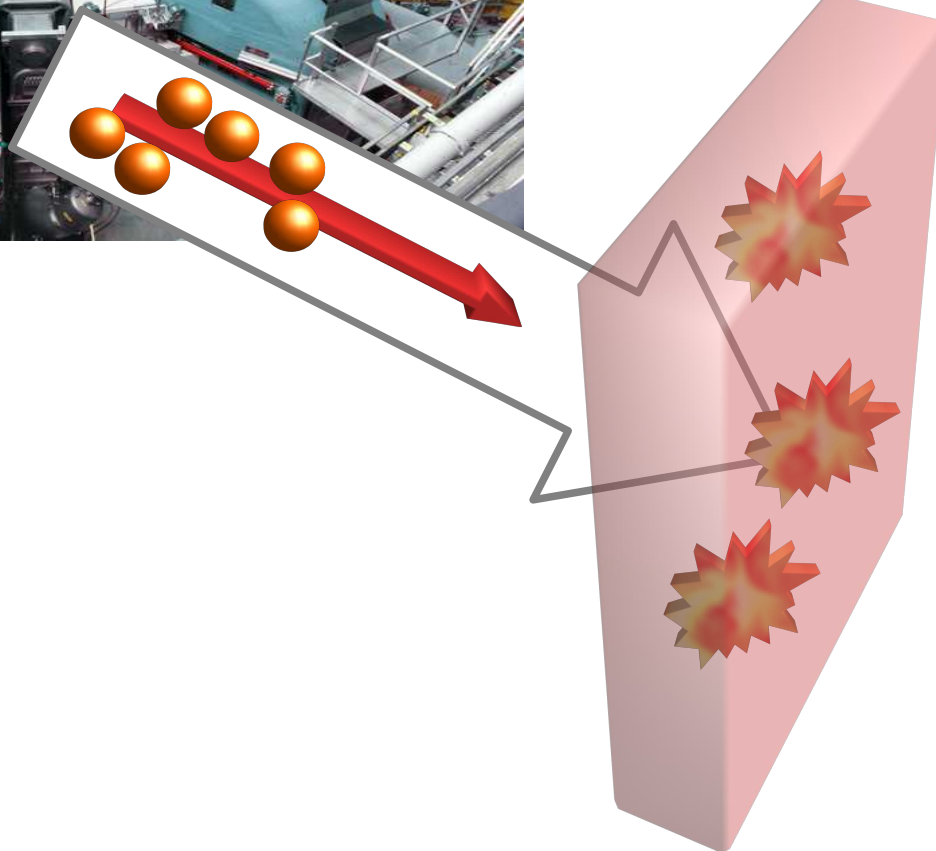


PSI Proton Cyclotron (590 MeV), <https://www.psi.ch/en/media/the-psi-proton-accelerator>

Сечение реакции



Сечение реакции

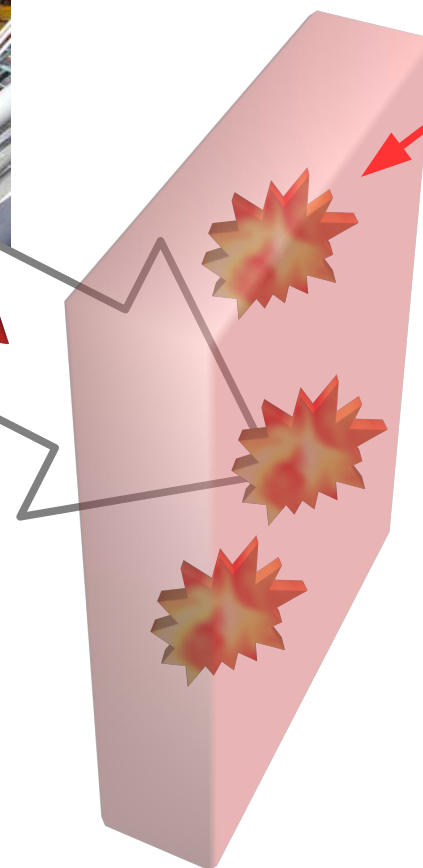


Сечение реакции



поток частиц j ,
 $1/(\text{см}^2 \text{ с})$

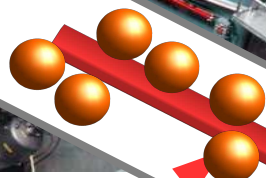
реакций в
секунду,
 dN/dt



Сечение реакции

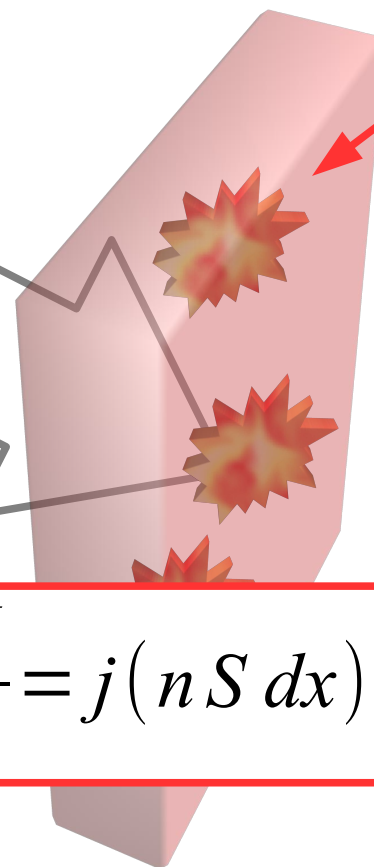


ПОТОК ЧАСТИЦ j ,
 $1/(\text{см}^2 \text{ с})$



реакций в
секунду,
 dN/dt

$$\frac{dN}{dt} = j(nS dx)\sigma$$

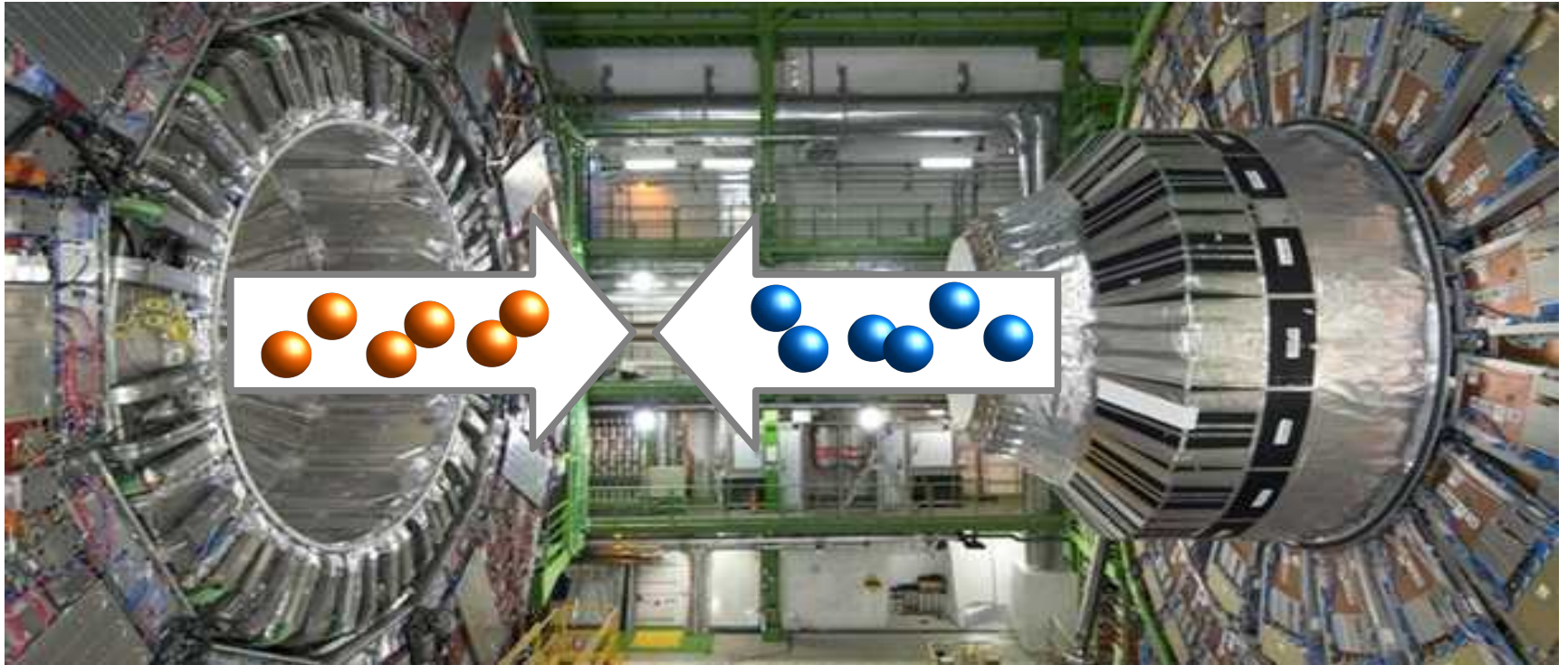


Сечение реакции

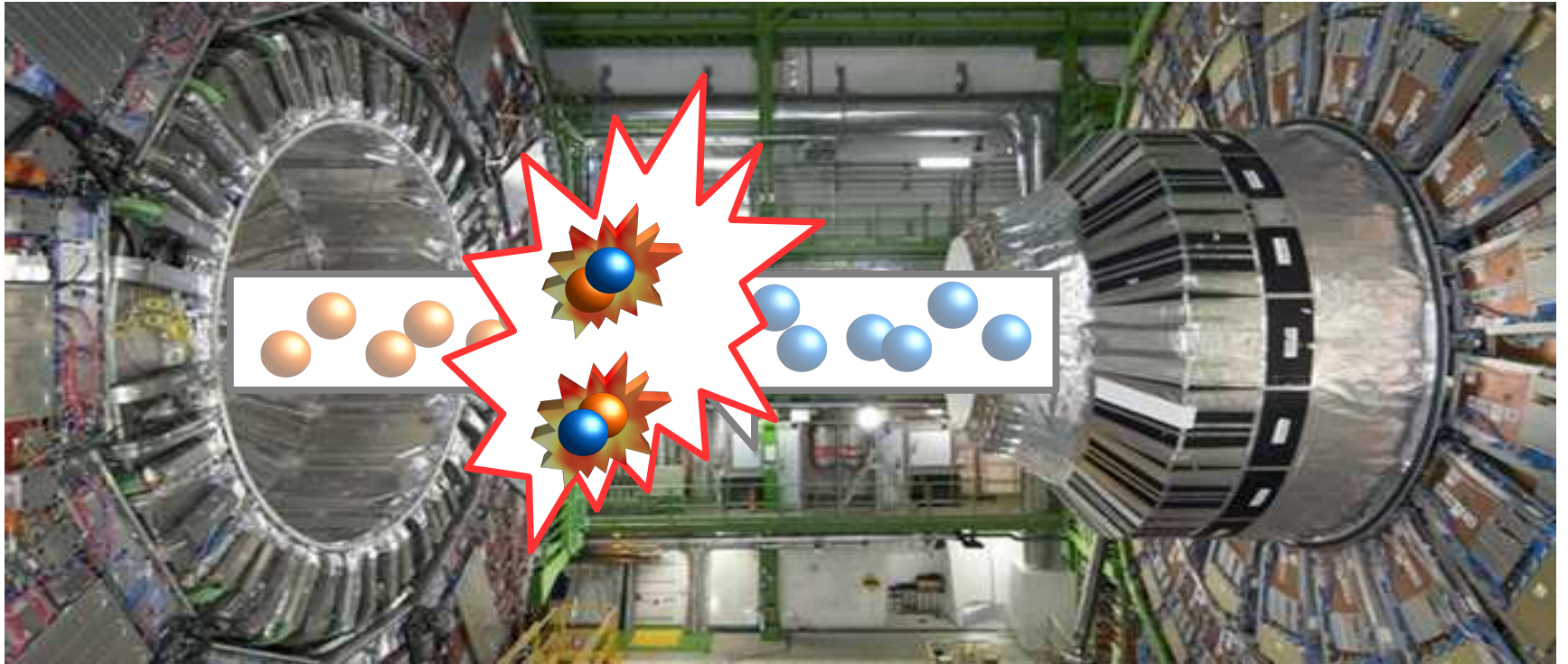


CMS Detector, LHC, CERN

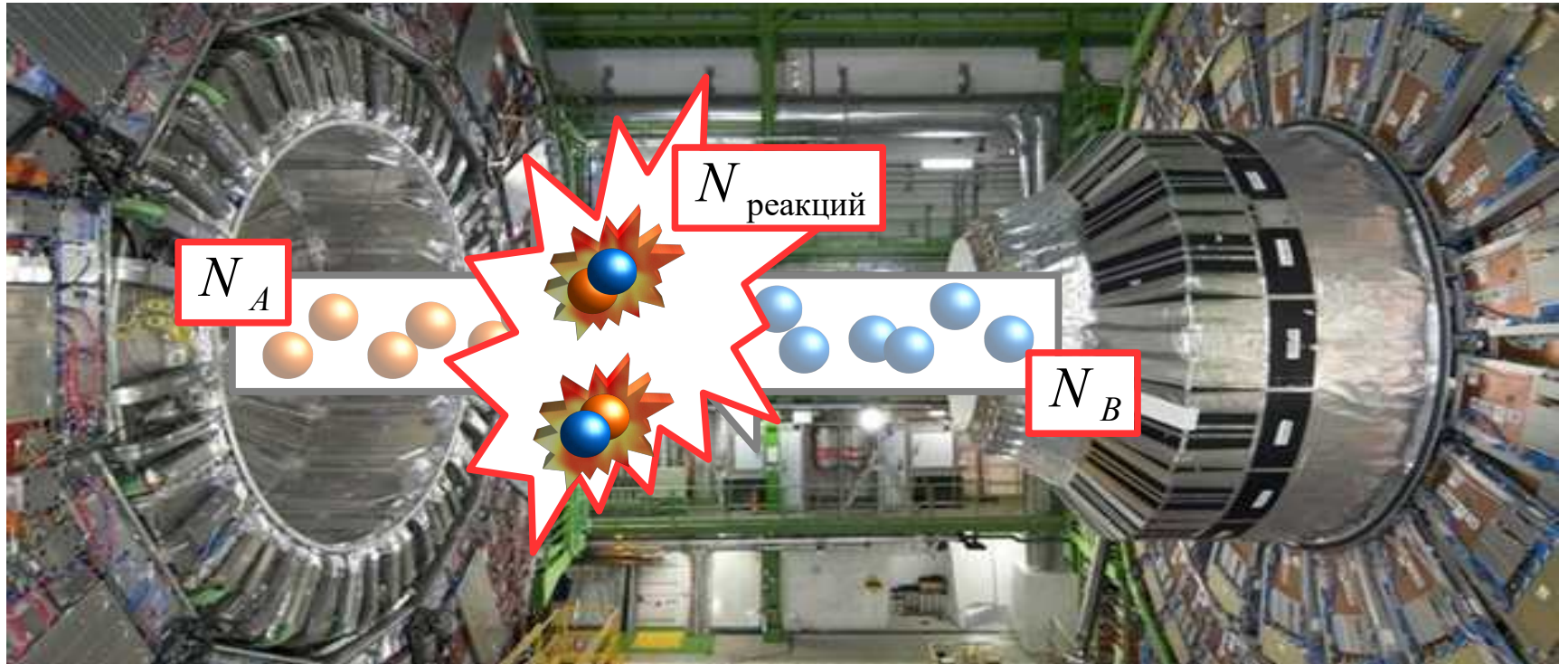
Сечение реакции



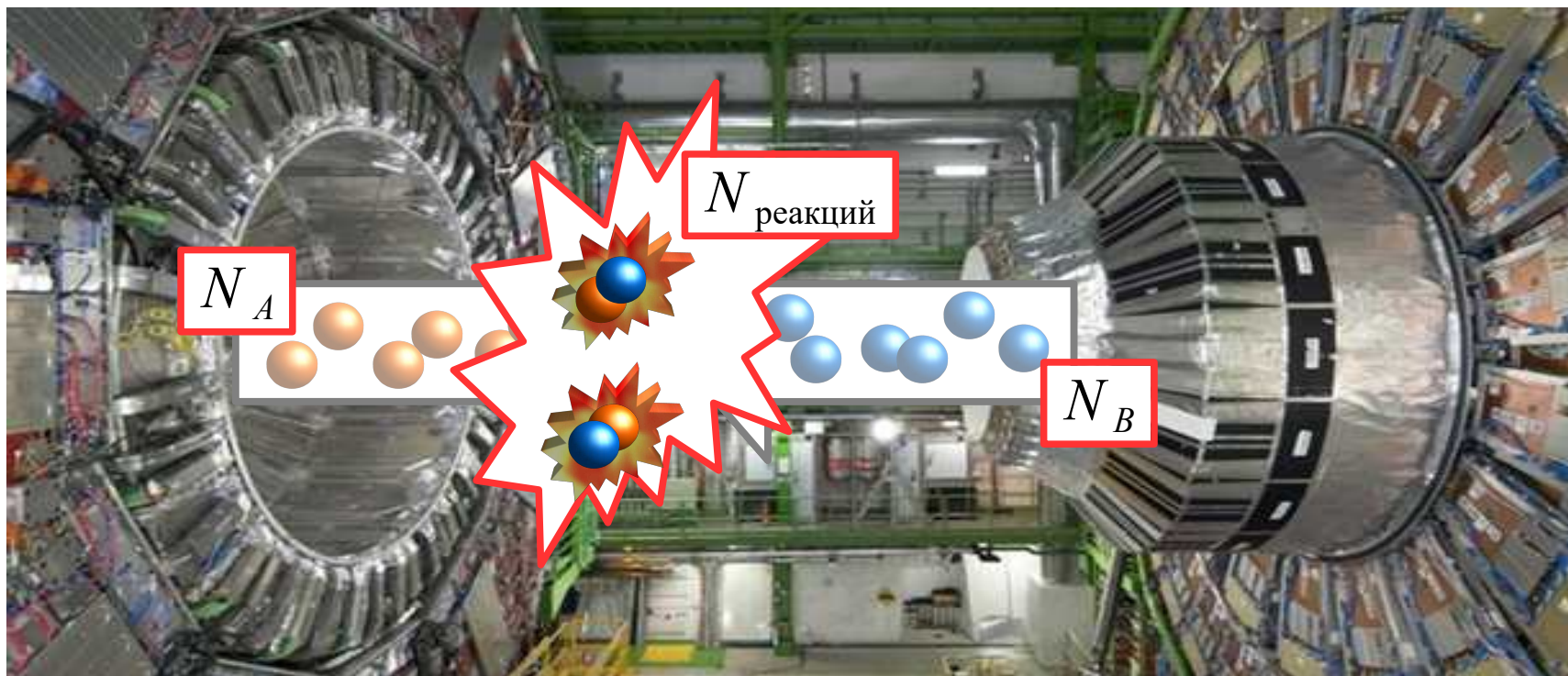
Сечение реакции



Сечение реакции

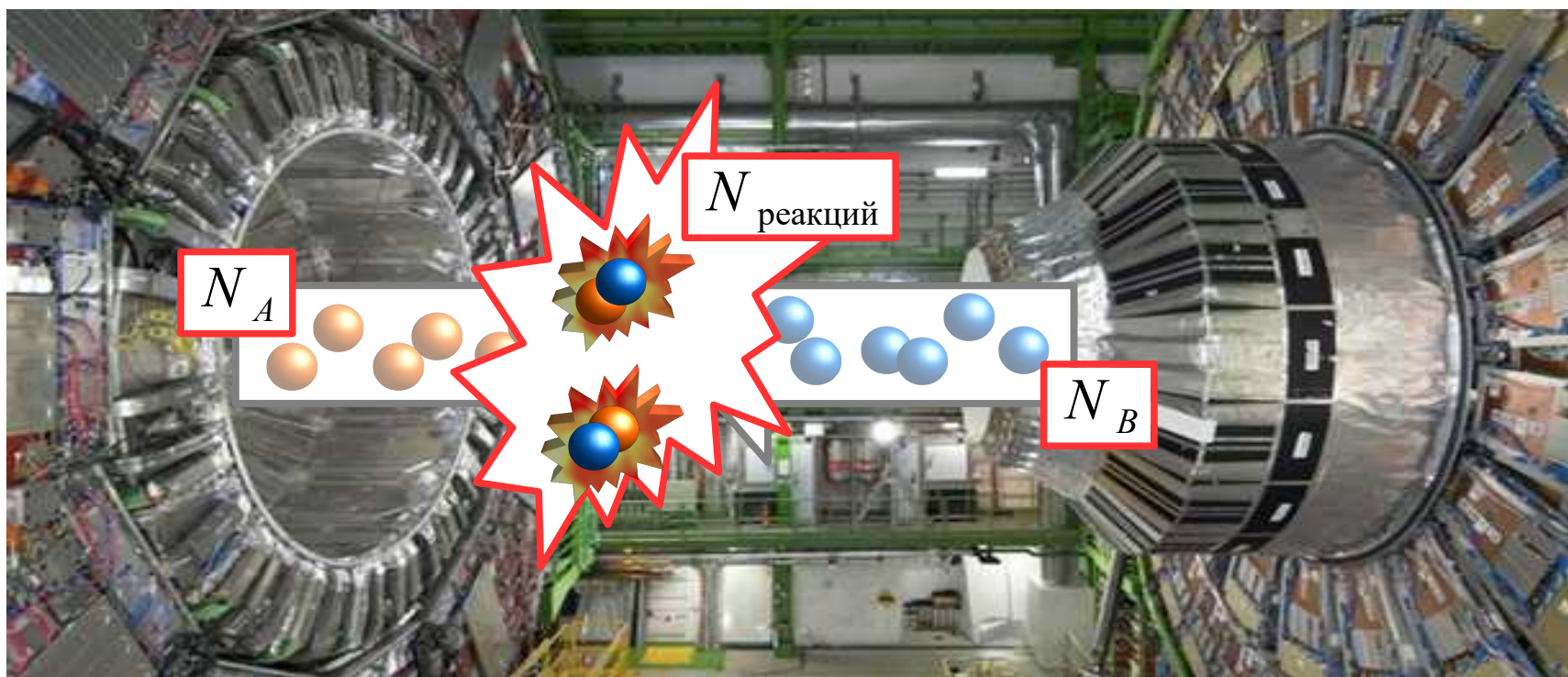


Сечение реакции



$$N_{\text{реакций}} = \frac{N_A \times N_B}{S_{\text{пучка}}} \sigma$$

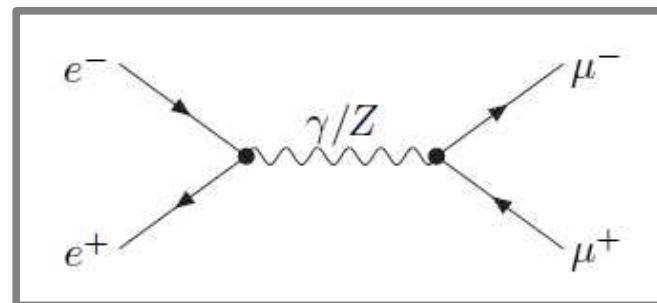
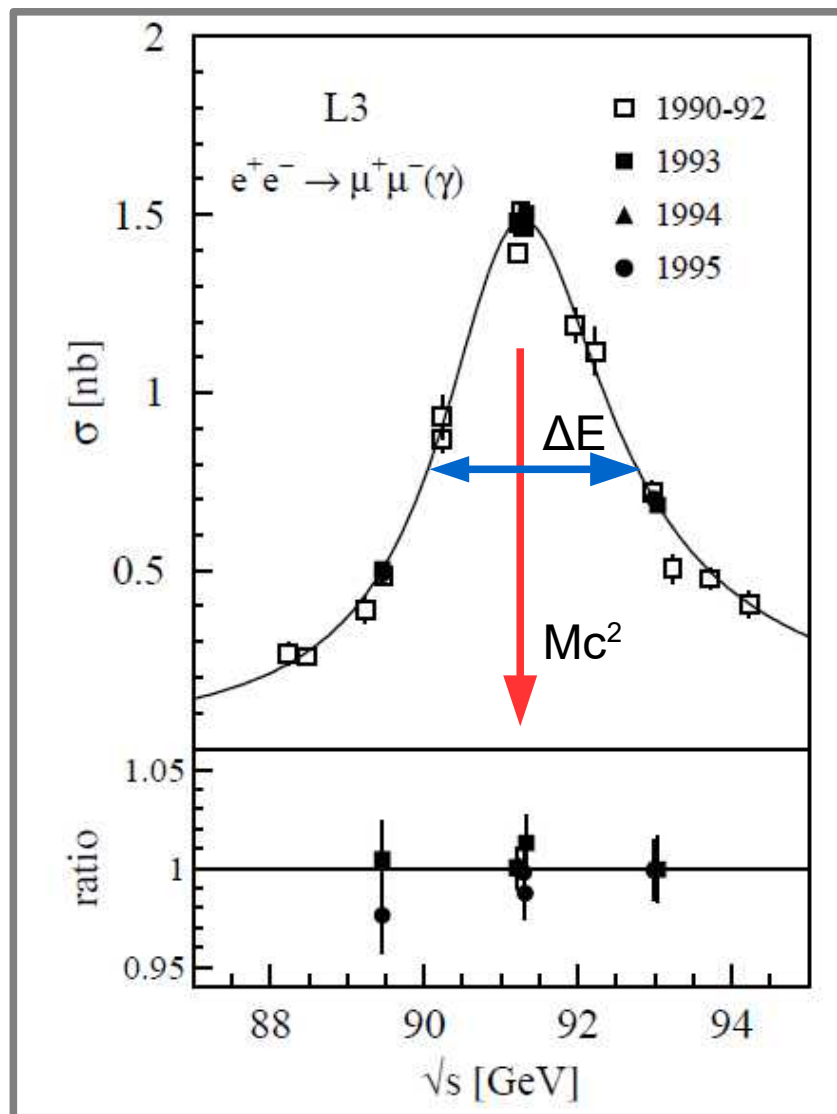
Полное и парциальное сечение реакции



парциальные сечения
конкретного типа
реакций:

$$N_{\text{реакций}}^{(i)} = \frac{N_A \times N_B}{S_{\text{пучка}}} \sigma^{(i)}$$
$$N_{\text{реакций}} = \sum N_{\text{реакций}}^{(i)} \rightarrow \sigma_{\Sigma} = \sum \sigma^{(i)}$$

Сечение реакции – фактически измеряемая величина в эксперименте



Образование промежуточной
частицы = “резонанс” сечения
рассеяния

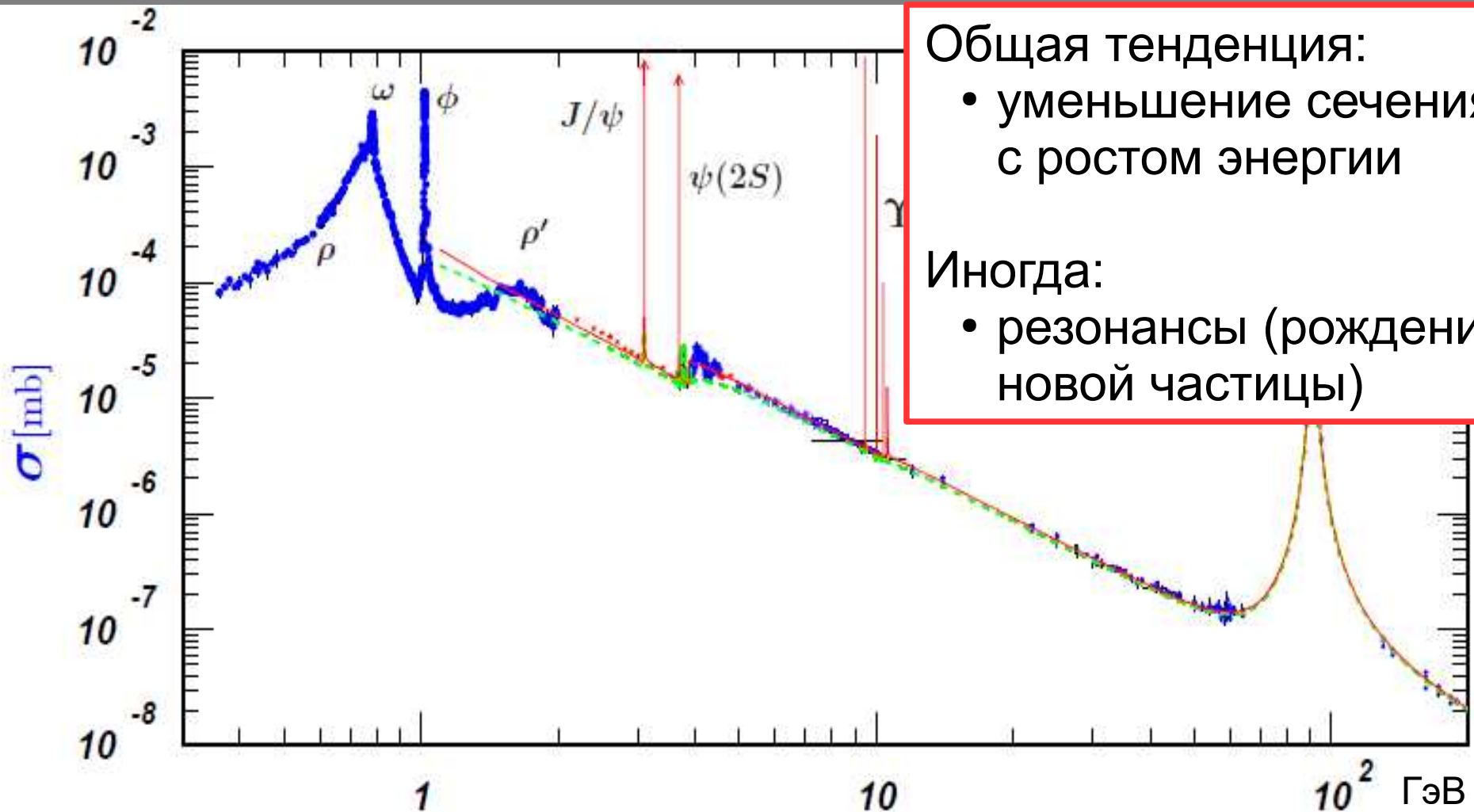
Ширина этого резонанса
обратно пропорциональна
времени жизни частицы

INTRODUCTION TO COLLIDER PHYSICS

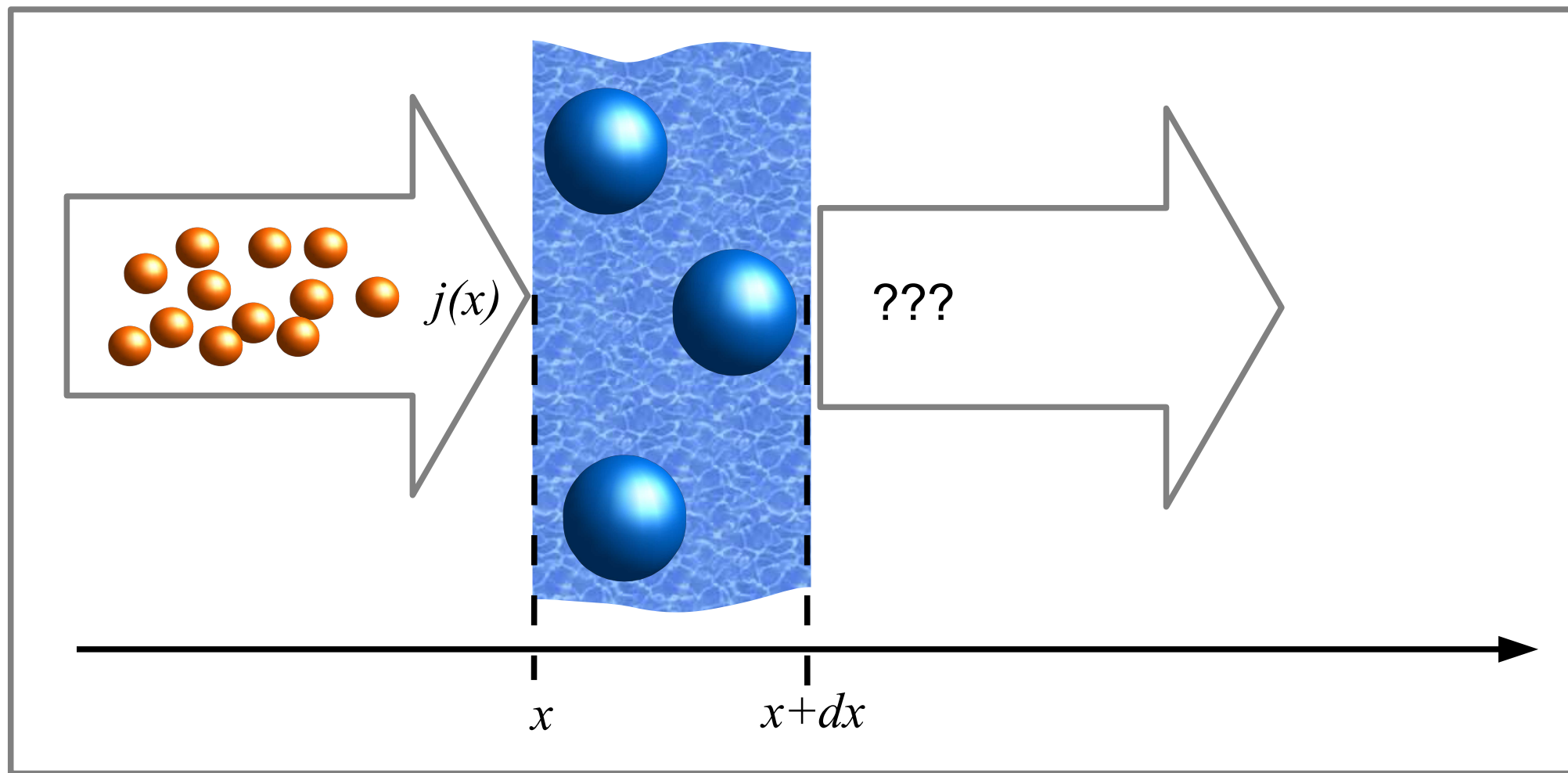
MAXIM PERELSTEIN*

<https://arxiv.org/pdf/1002.0274.pdf>

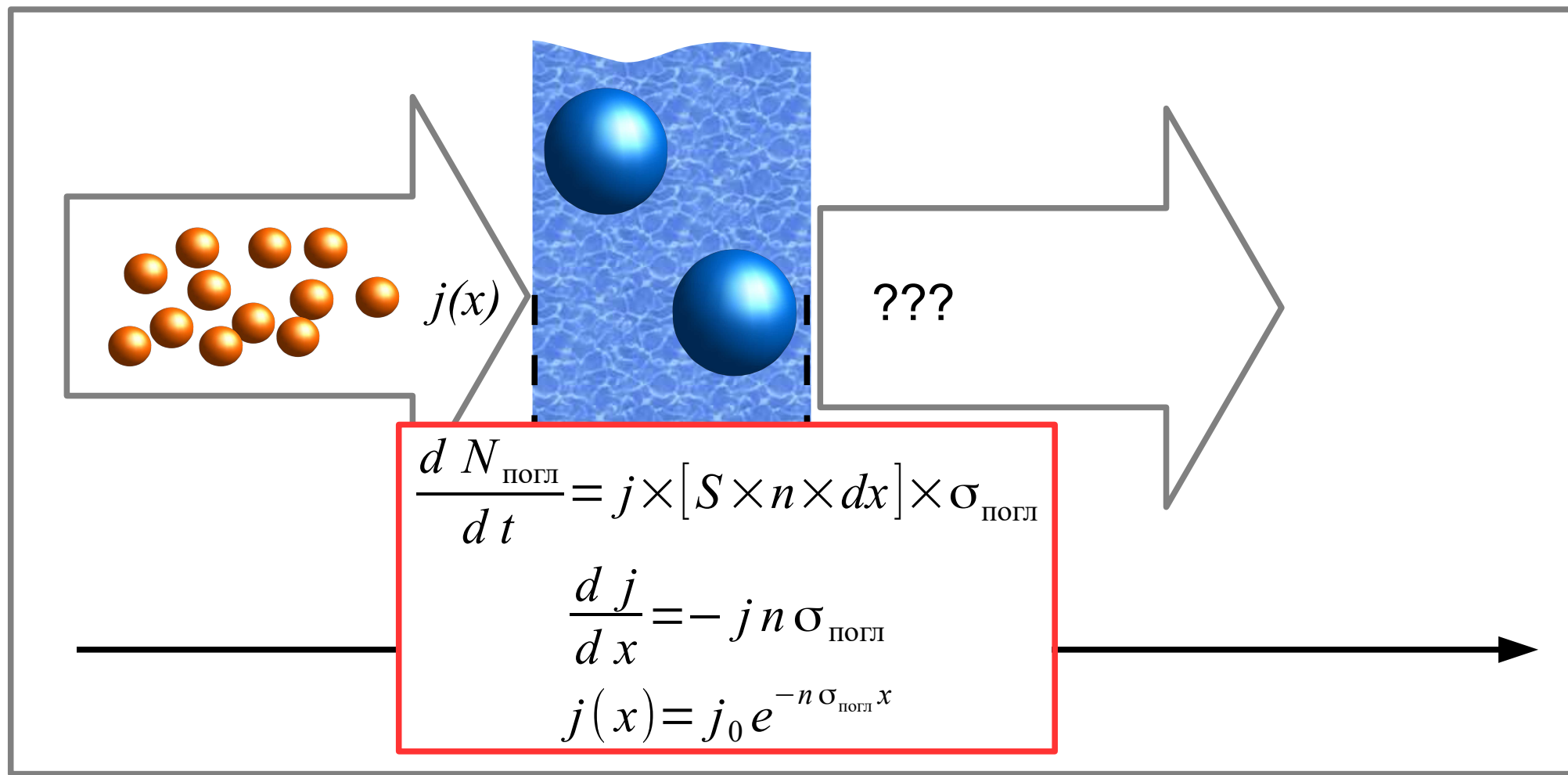
Полное сечение электрон-позитронных реакций



Сечение поглощения и ослабление пучка

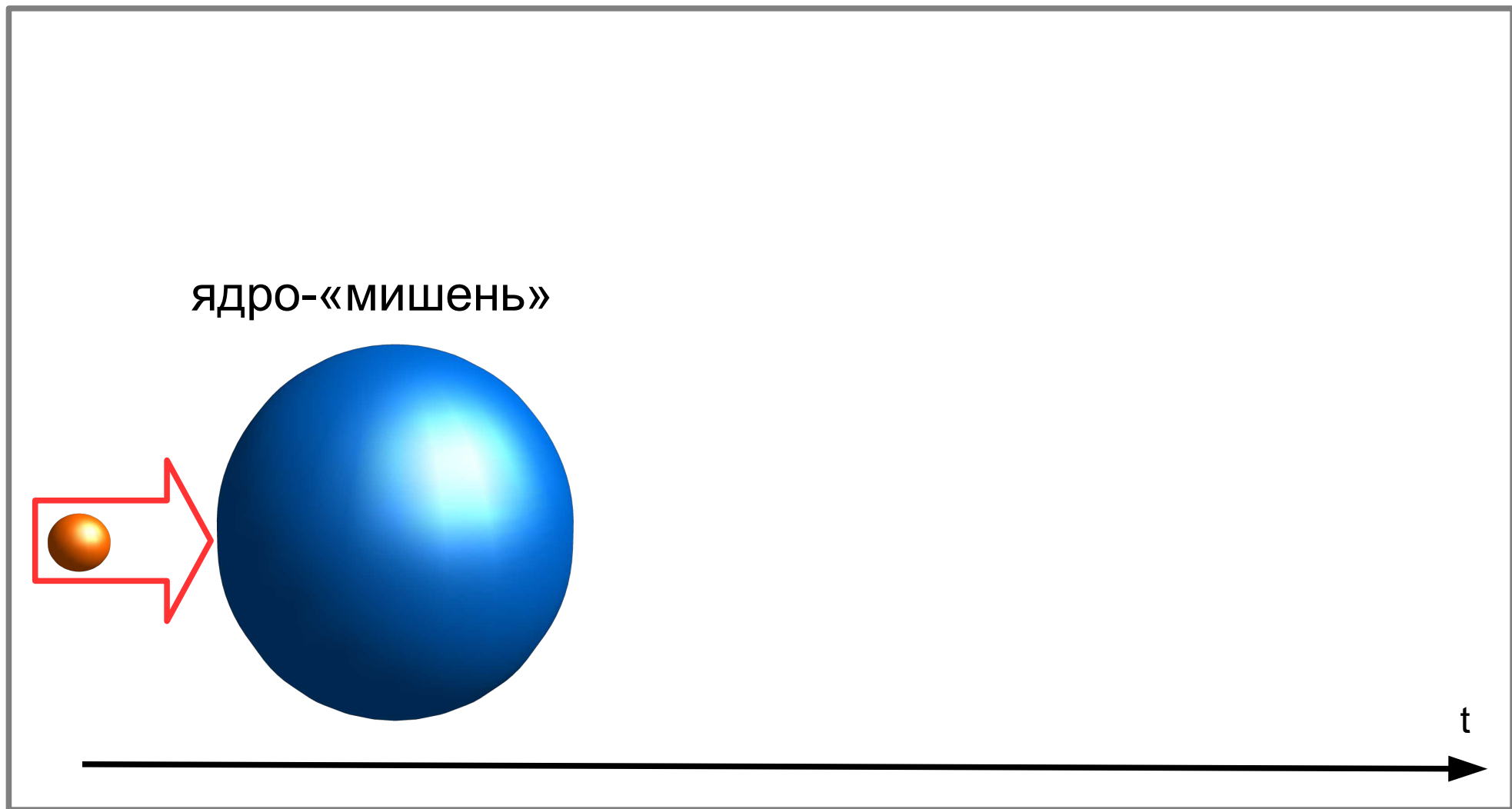


Сечение поглощения и ослабление пучка

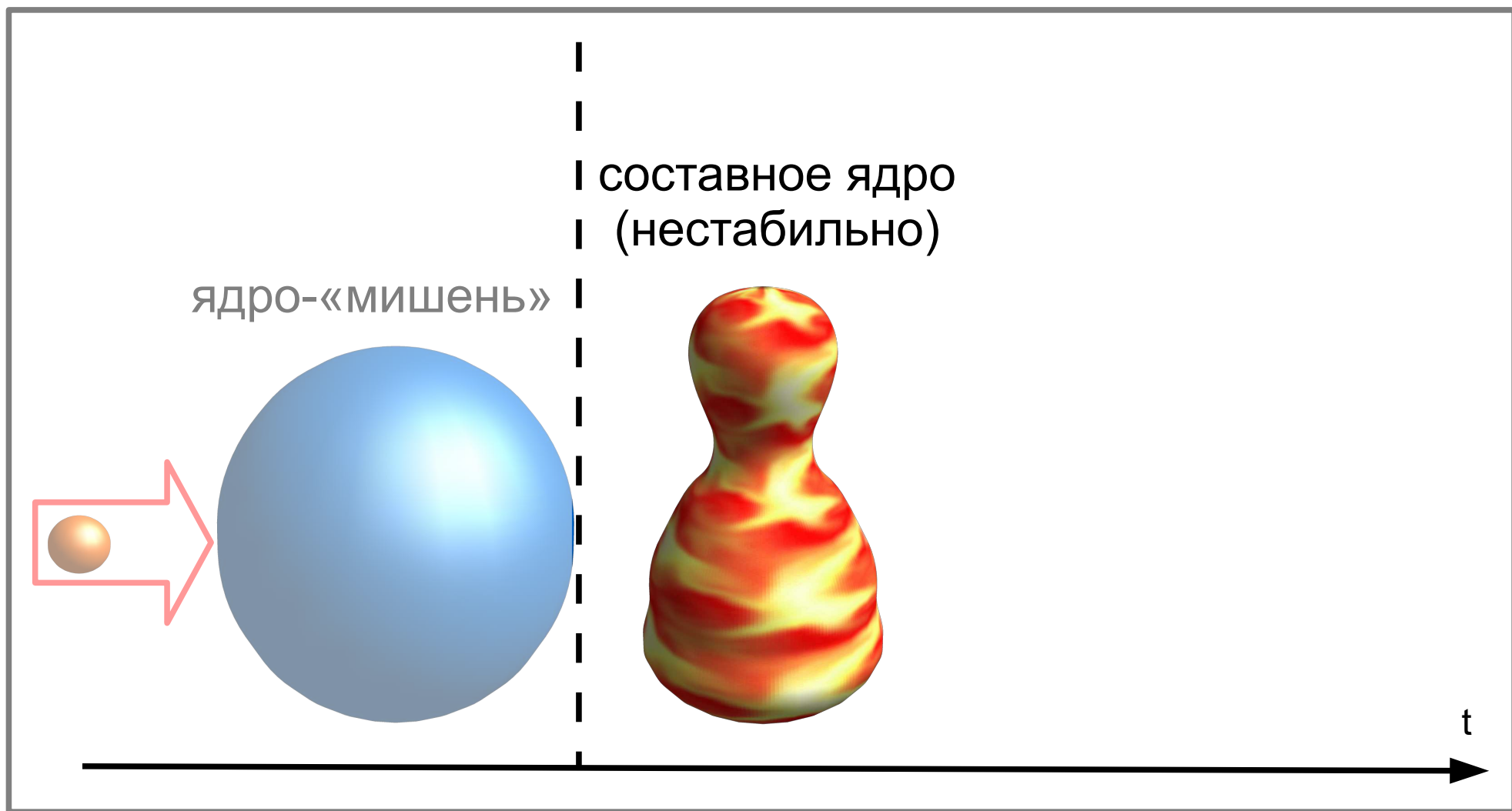


Часть 3. Простые модели для описания сечения реакции

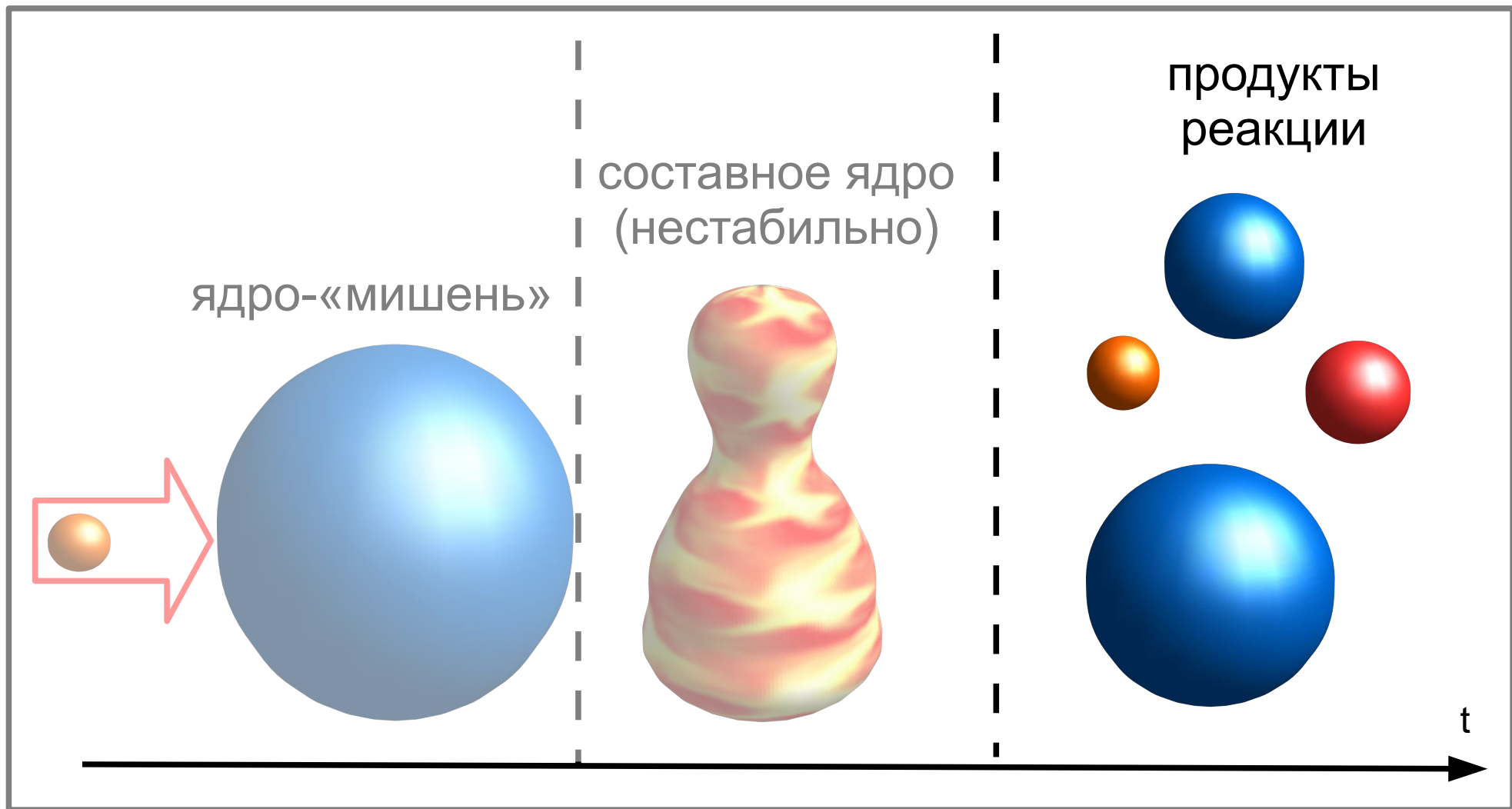
Модель составного ядра



Модель составного ядра

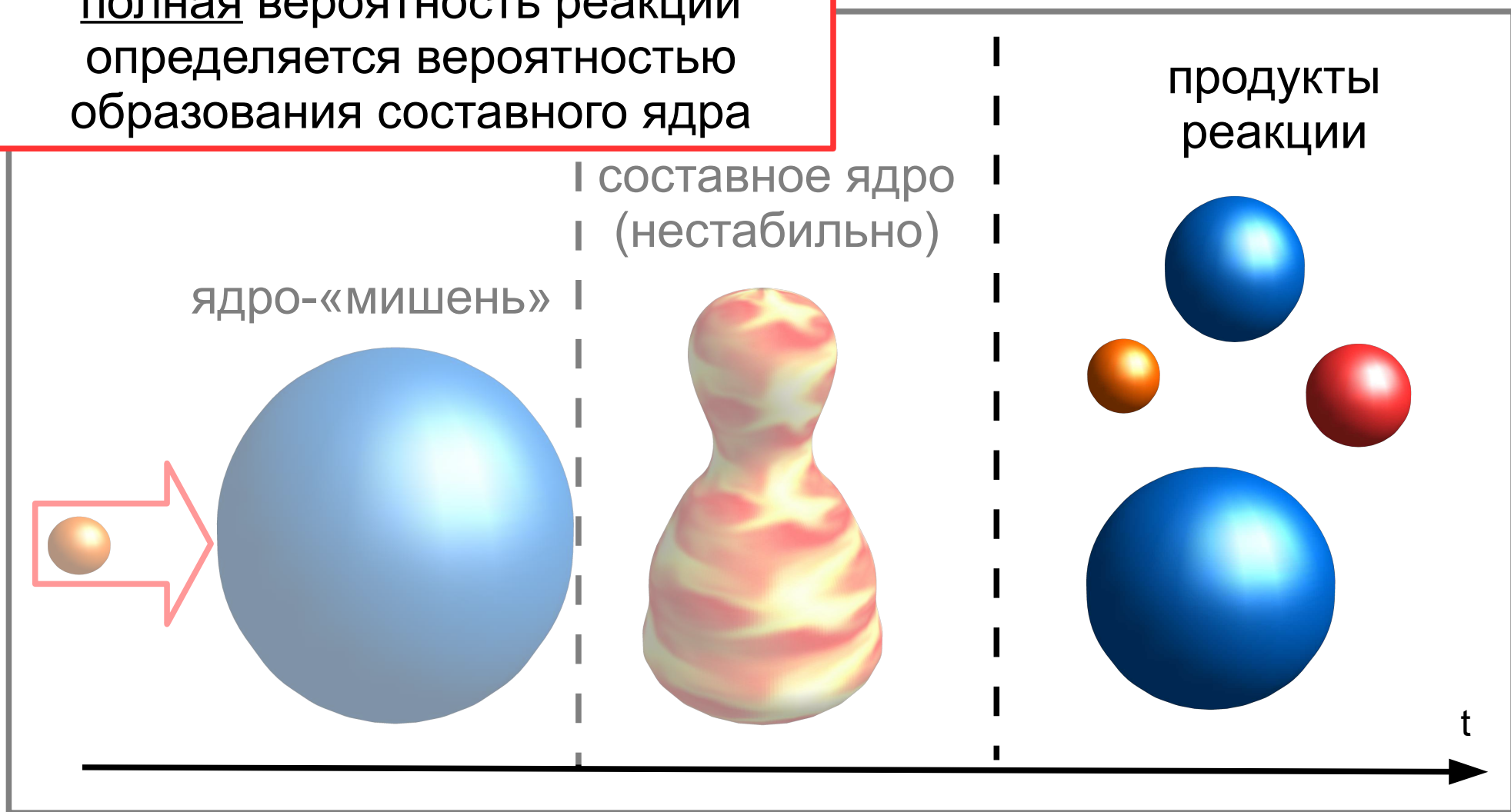


Модель составного ядра

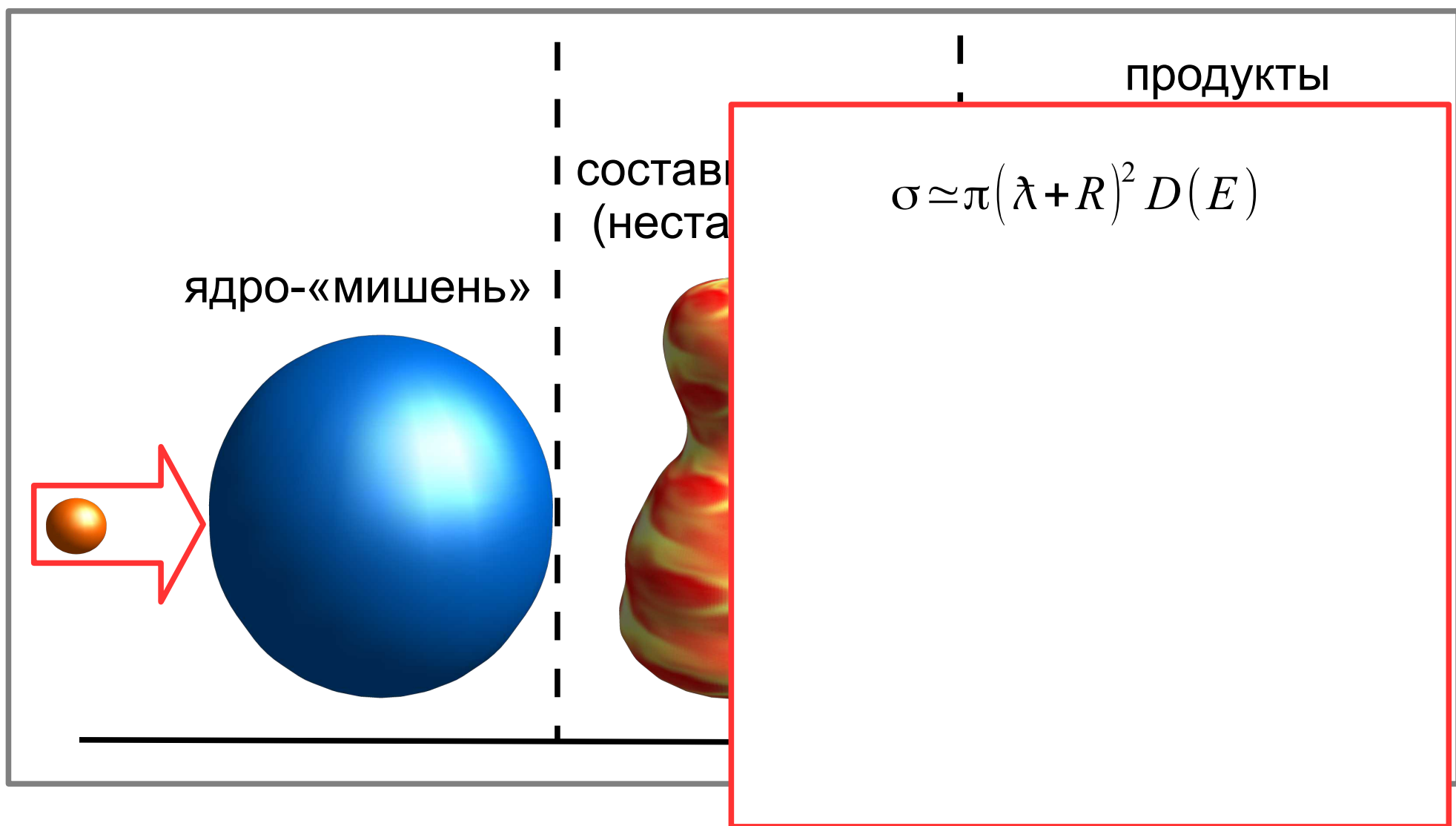


Модель составного ядра

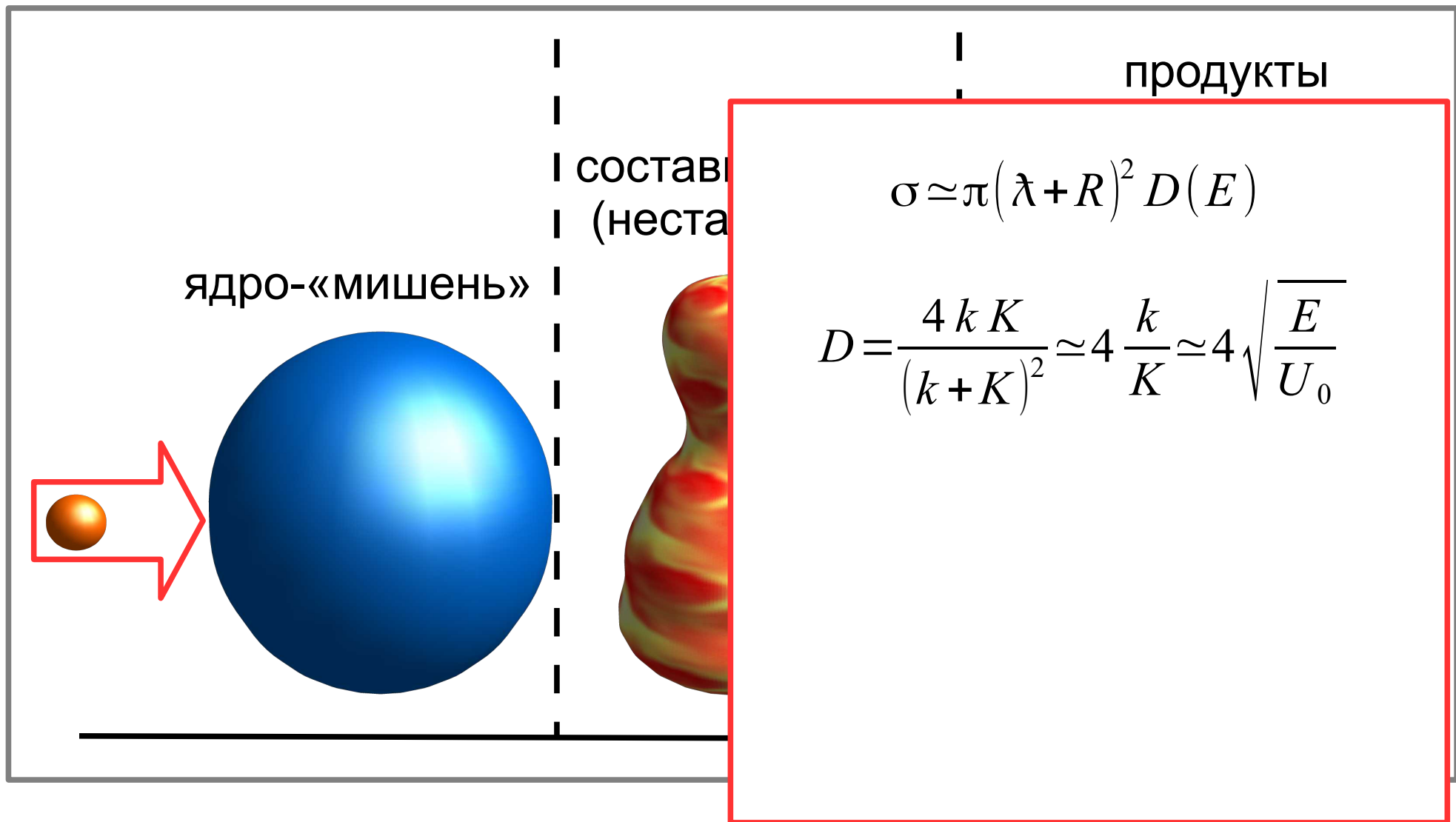
полная вероятность реакции
определяется вероятностью
образования составного ядра



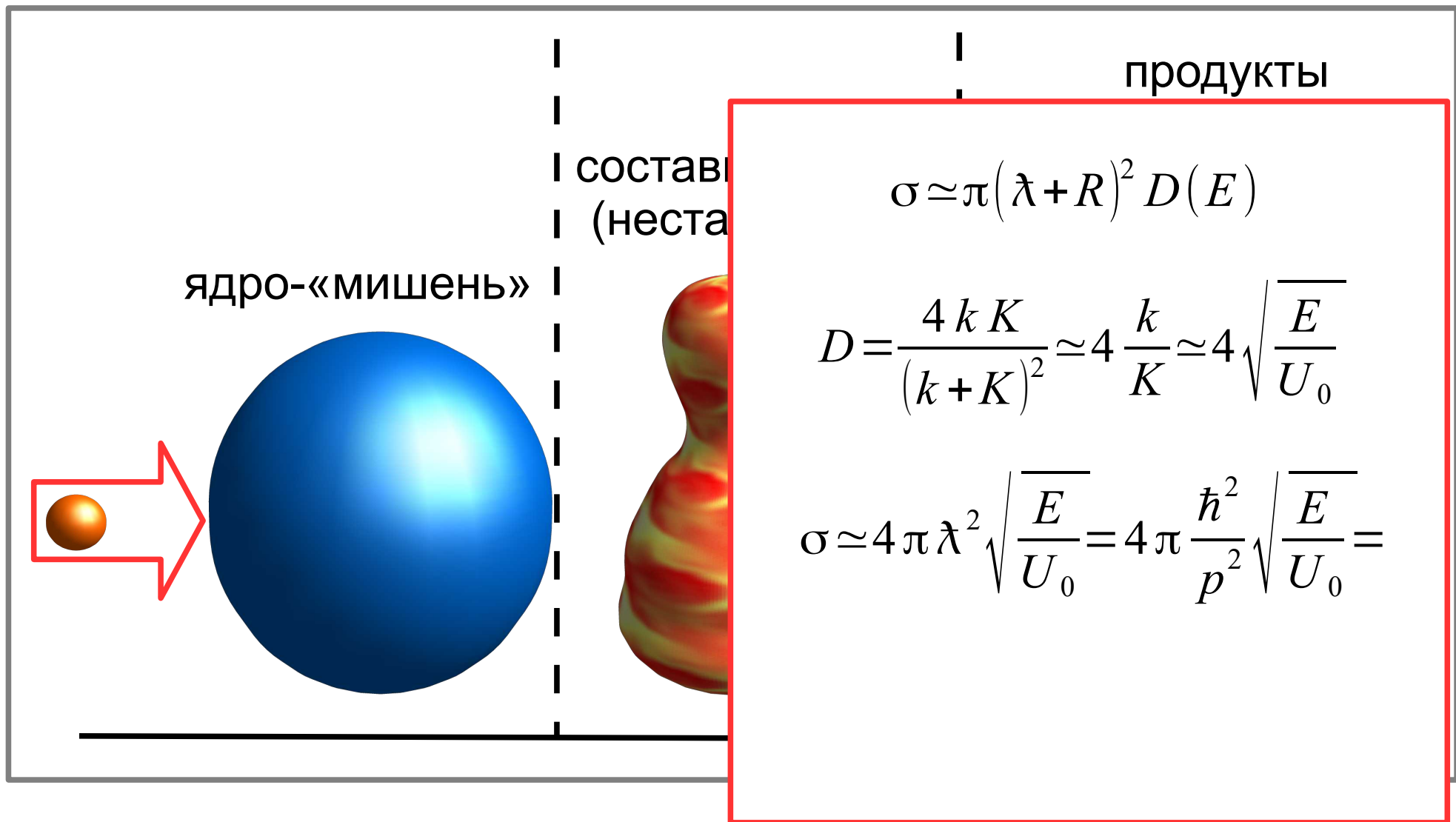
Закон Бете



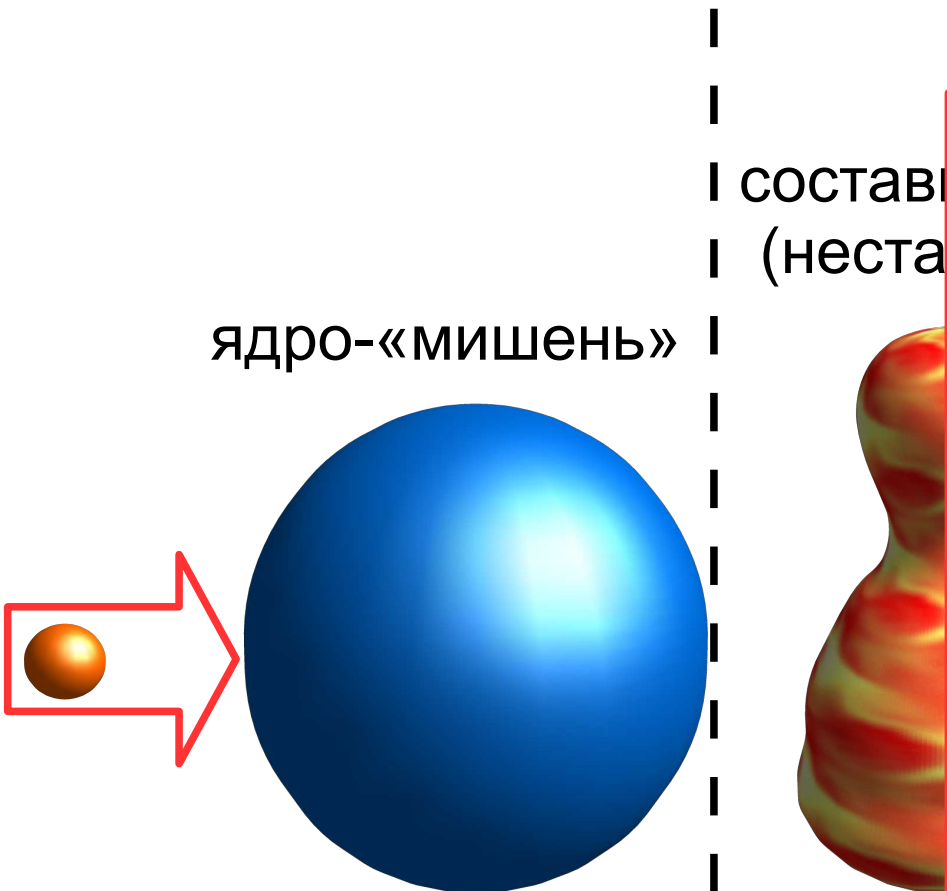
Закон Бете



Закон Бете



Закон Бете



ядро-«мишень»

продукты

состав (нестабильный)

$$\sigma \simeq \pi (\lambda + R)^2 D(E)$$

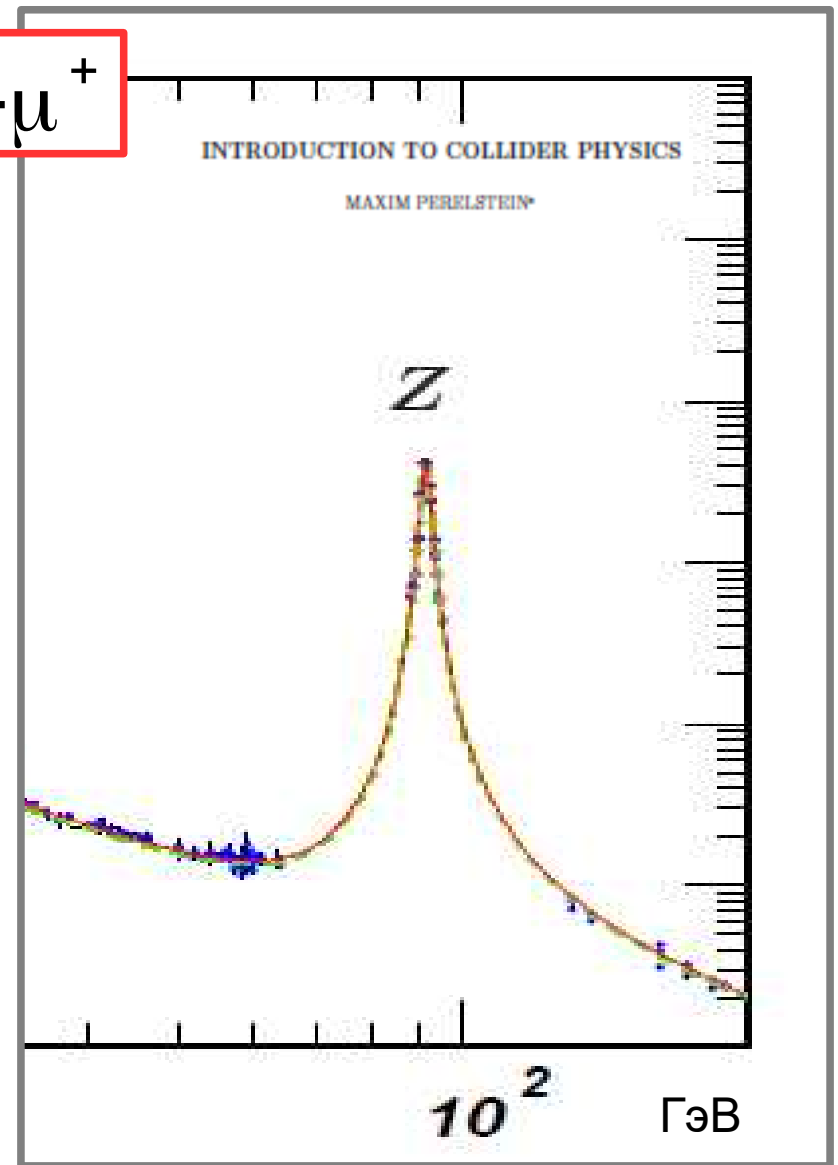
$$D = \frac{4 k K}{(k + K)^2} \simeq 4 \frac{k}{K} \simeq 4 \sqrt{\frac{E}{U_0}}$$

$$\sigma \simeq 4 \pi \lambda^2 \sqrt{\frac{E}{U_0}} = 4 \pi \frac{\hbar^2}{p^2} \sqrt{\frac{E}{U_0}} =$$

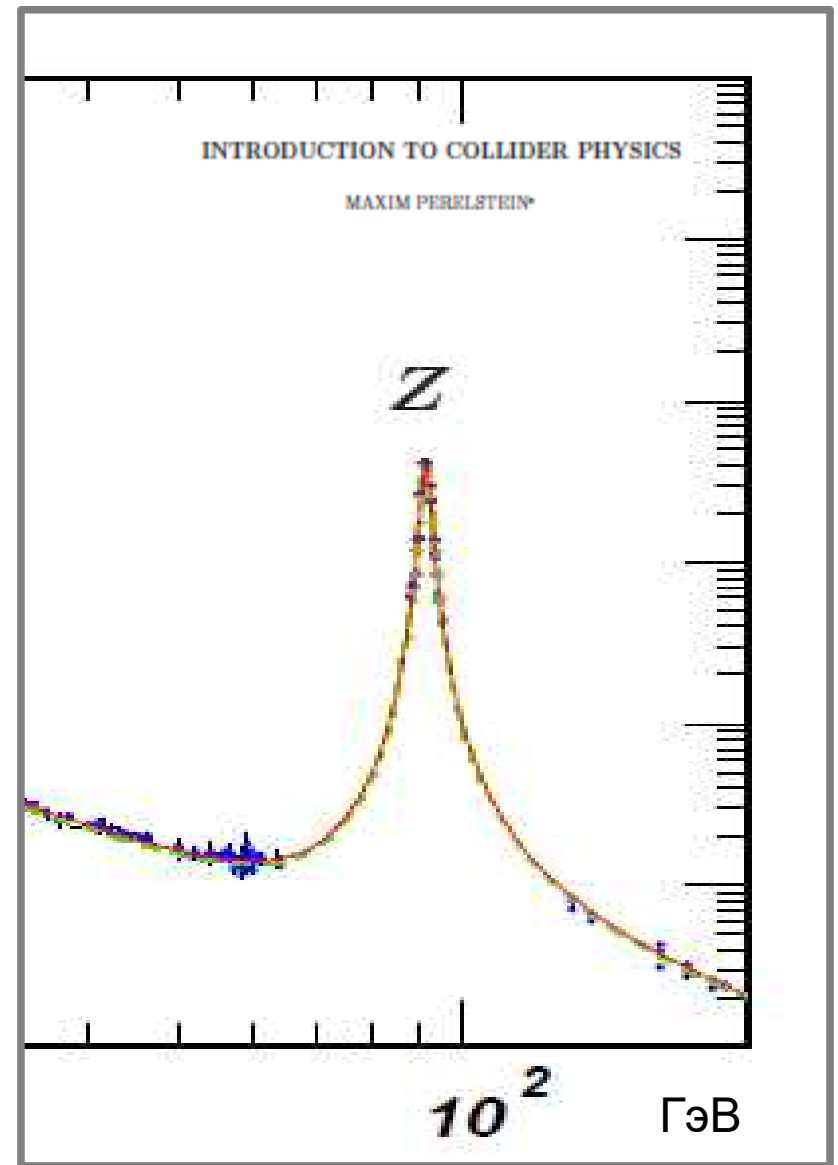
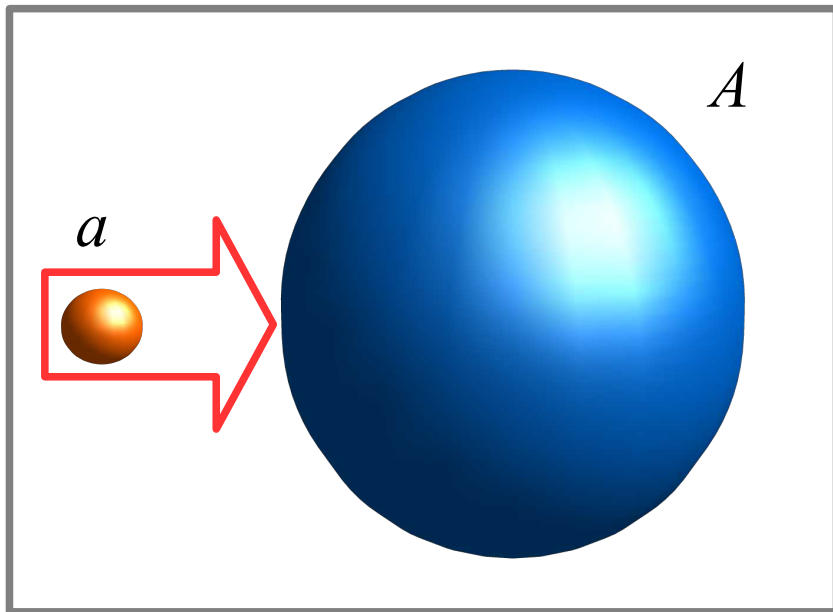
$$= \frac{2 \pi \hbar^2}{m} \frac{1}{\sqrt{E U_0}} \propto \frac{1}{V}$$

закон Бете

Резонансные реакции

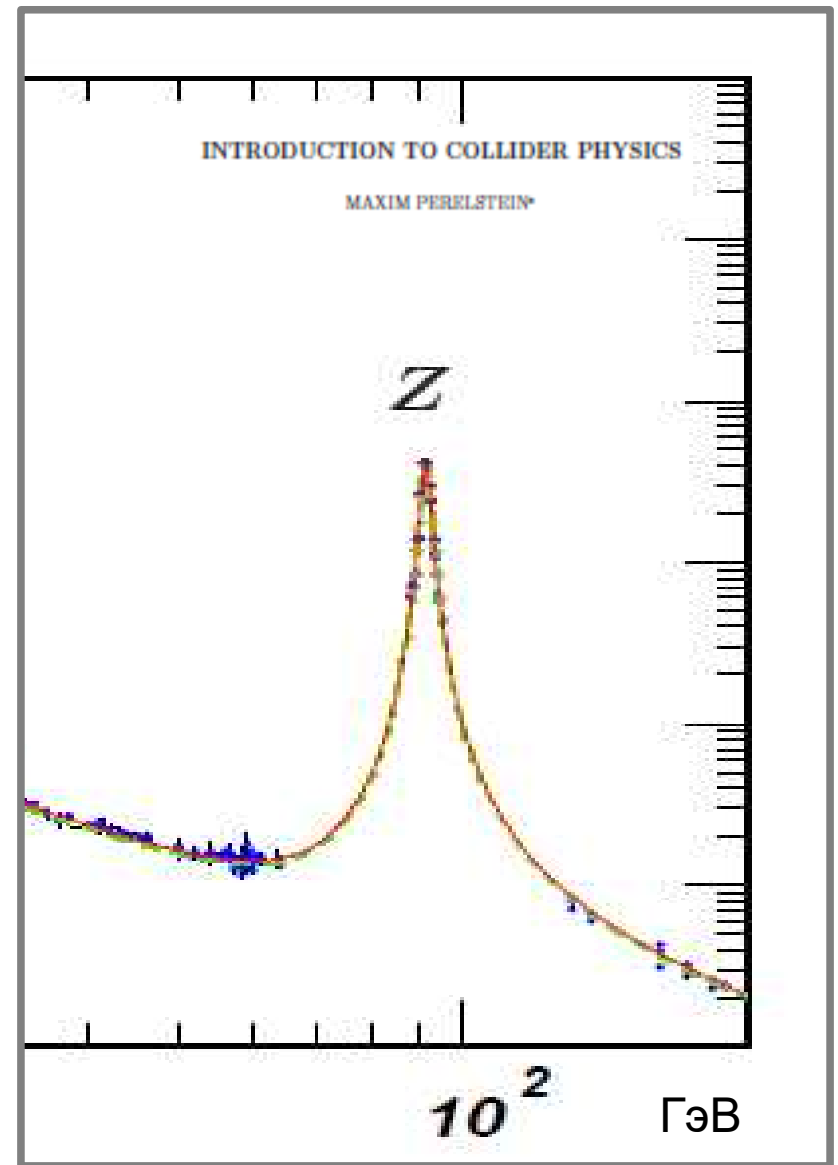
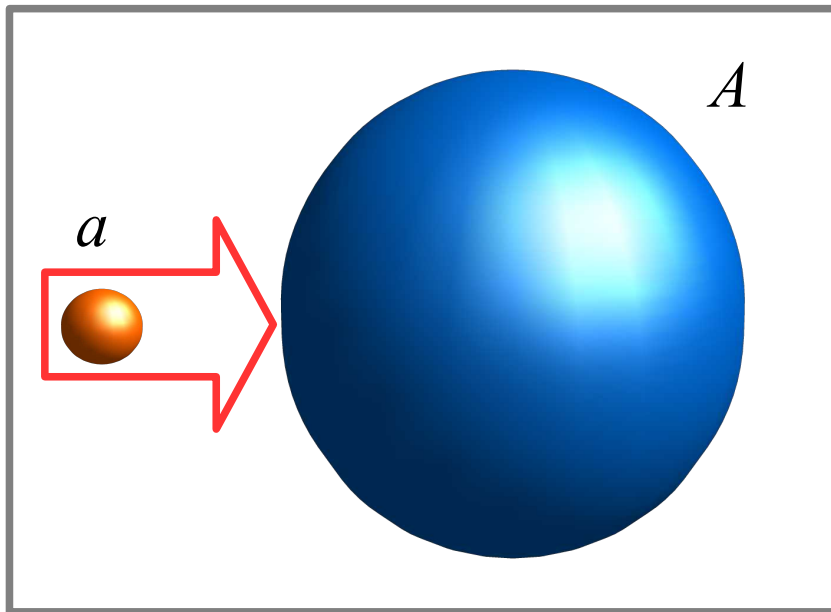


Резонансные реакции



Резонансные реакции

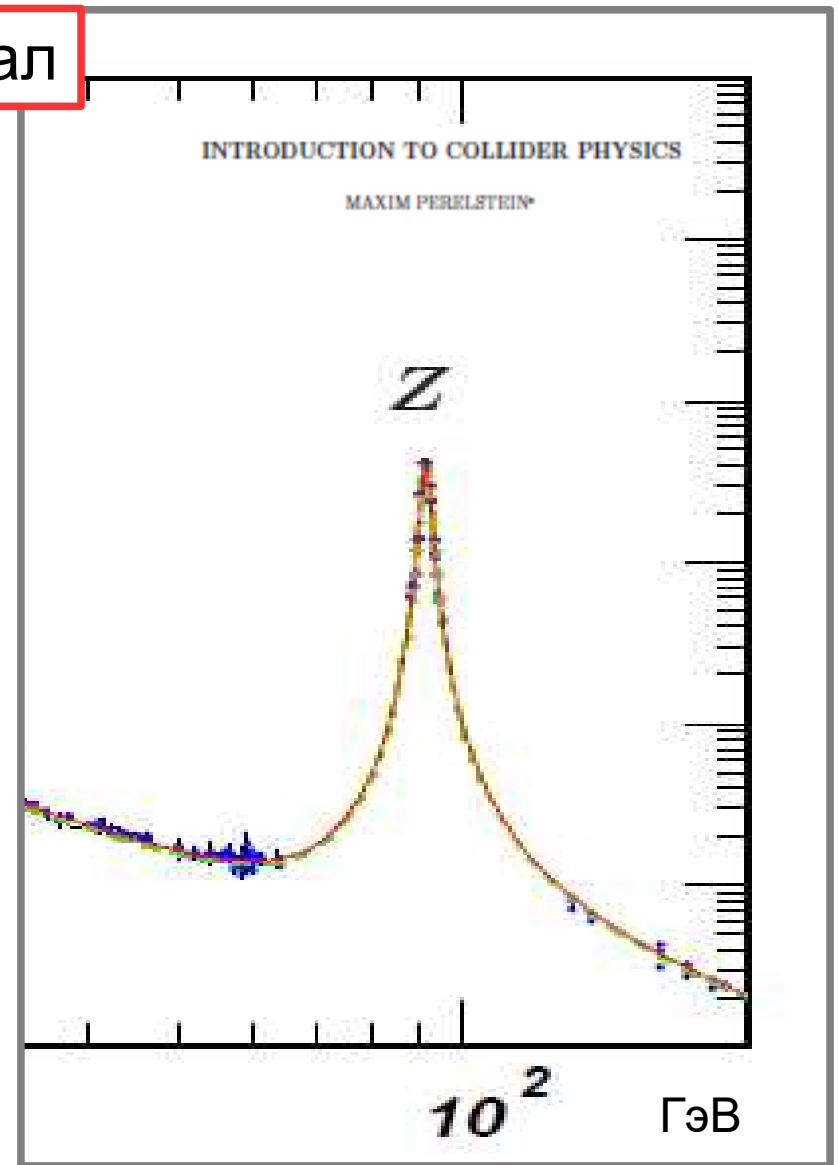
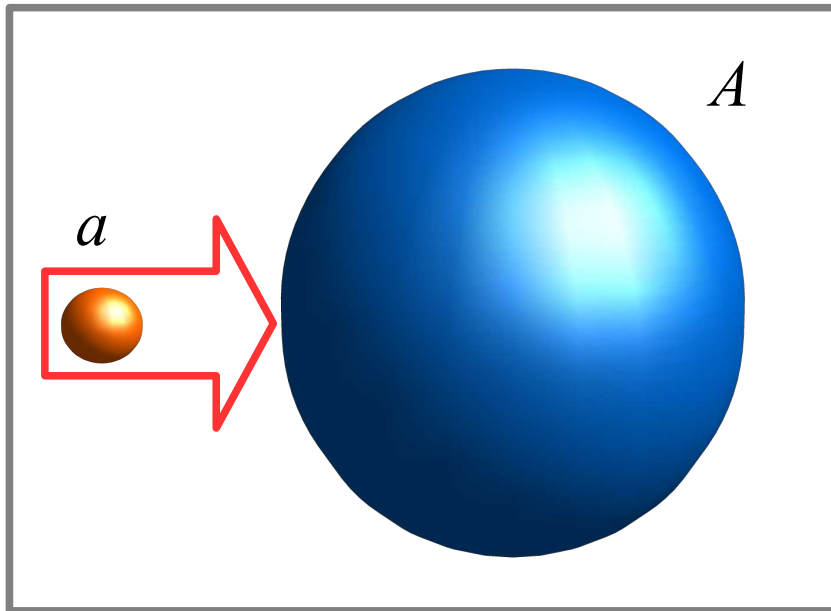
$$a + A = \dots = \begin{cases} a + A \\ b + B \\ c + C \\ \dots \end{cases}$$



Резонансные реакции

$$a + A = \dots = \begin{cases} a + A \\ b + B \\ c + C \\ \dots \end{cases}$$

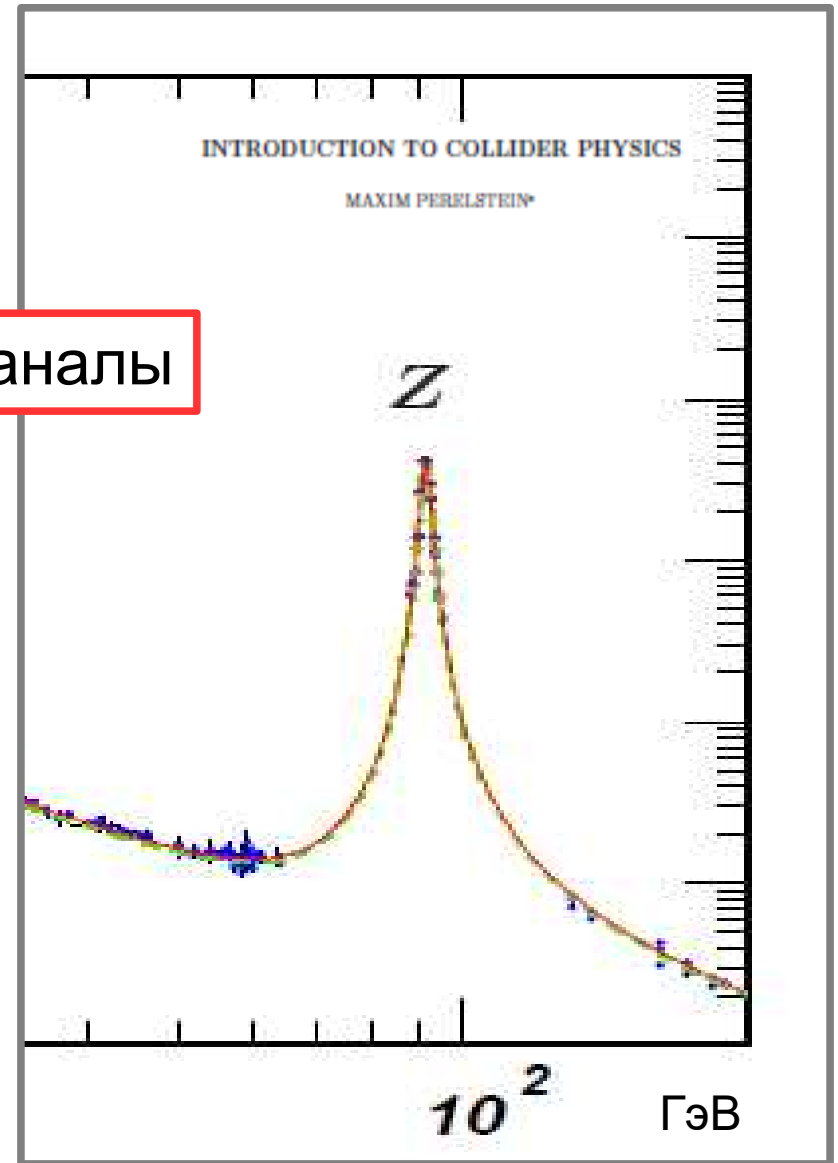
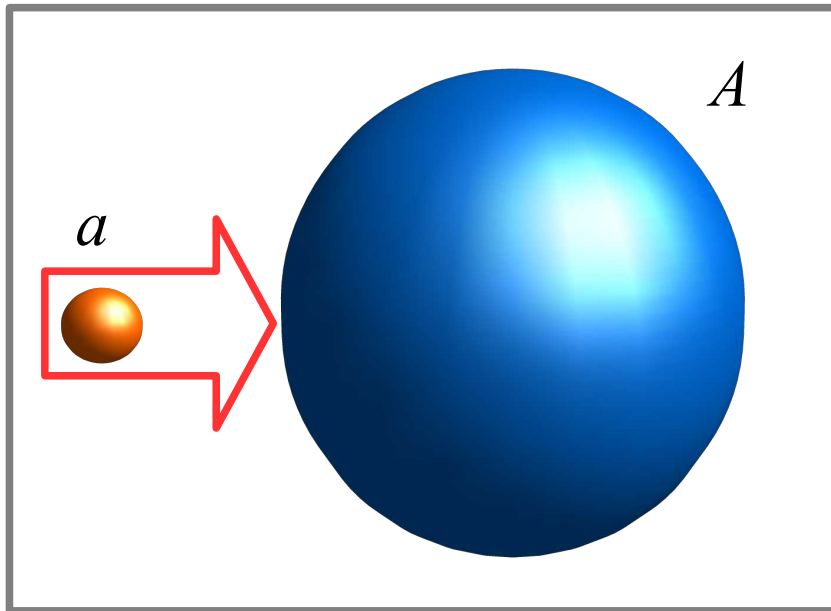
упругий канал



Резонансные реакции

$$a + A = \dots = \begin{cases} a + A \\ b + B \\ c + C \\ \dots \end{cases}$$

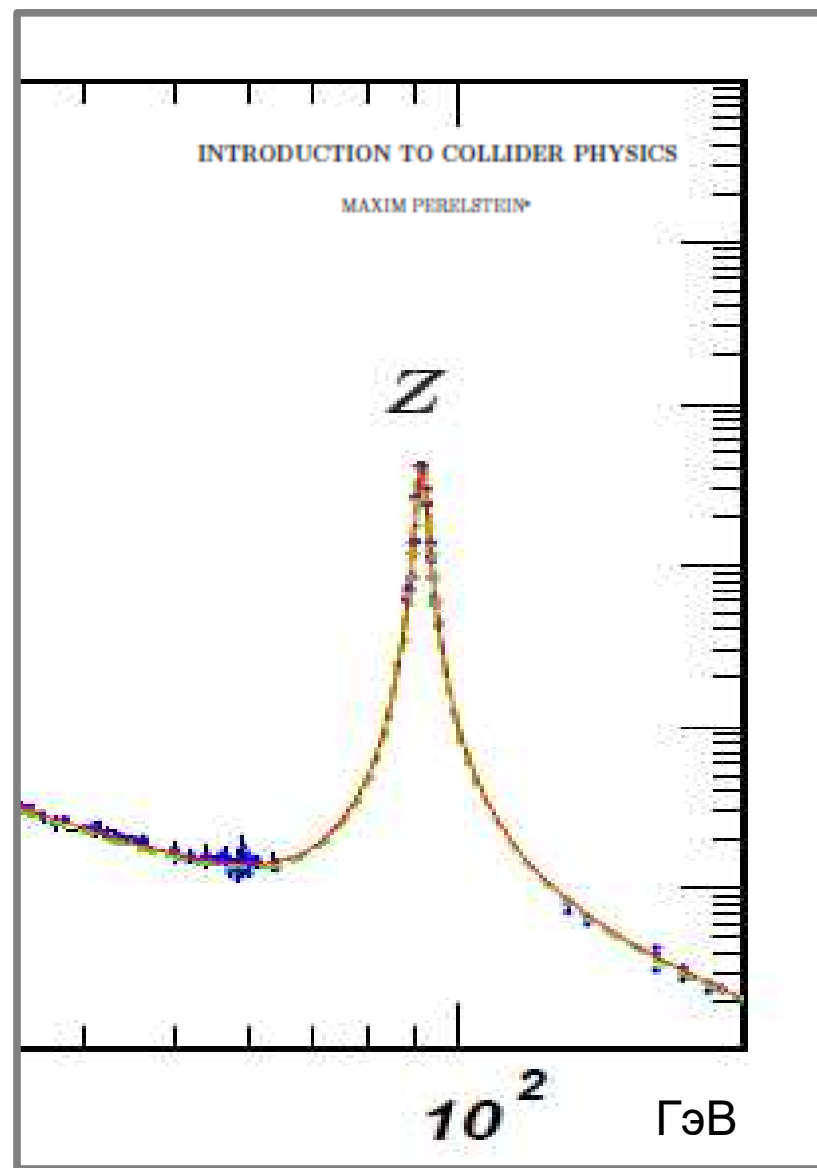
неупругие каналы



Формула Брейта-Вигнера

$$a + A = \dots = \begin{cases} a + A \\ b + B \\ c + C \\ \dots \end{cases}$$

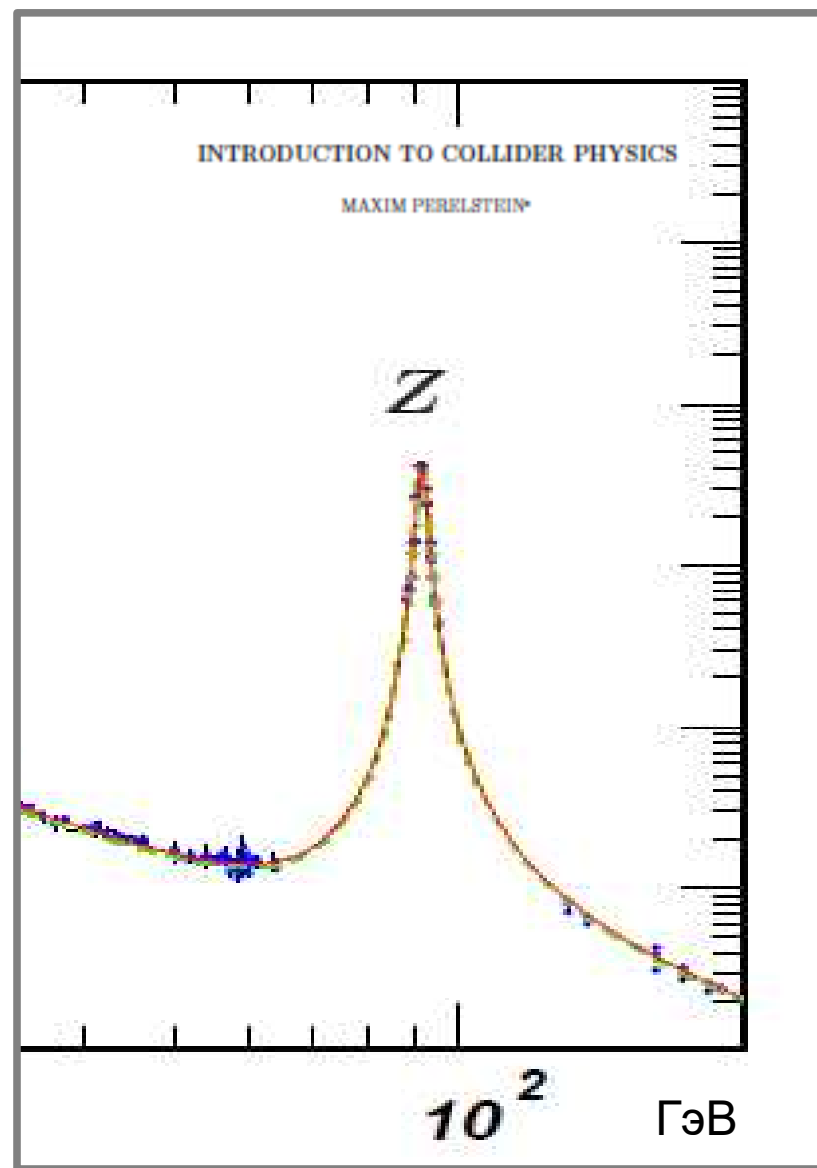
$$\sigma_{ab} = \pi \lambda^2 \frac{1}{(E - E_0)^2 + \Gamma^2/4}$$



Формула Брейта-Вигнера

$$a + A = \dots = \begin{cases} a + A \\ b + B \\ c + C \\ \dots \end{cases}$$

$$\sigma_{ab} = \pi \lambda^2 \frac{\Gamma_a \Gamma_b}{(E - E_0)^2 + \Gamma^2/4}$$

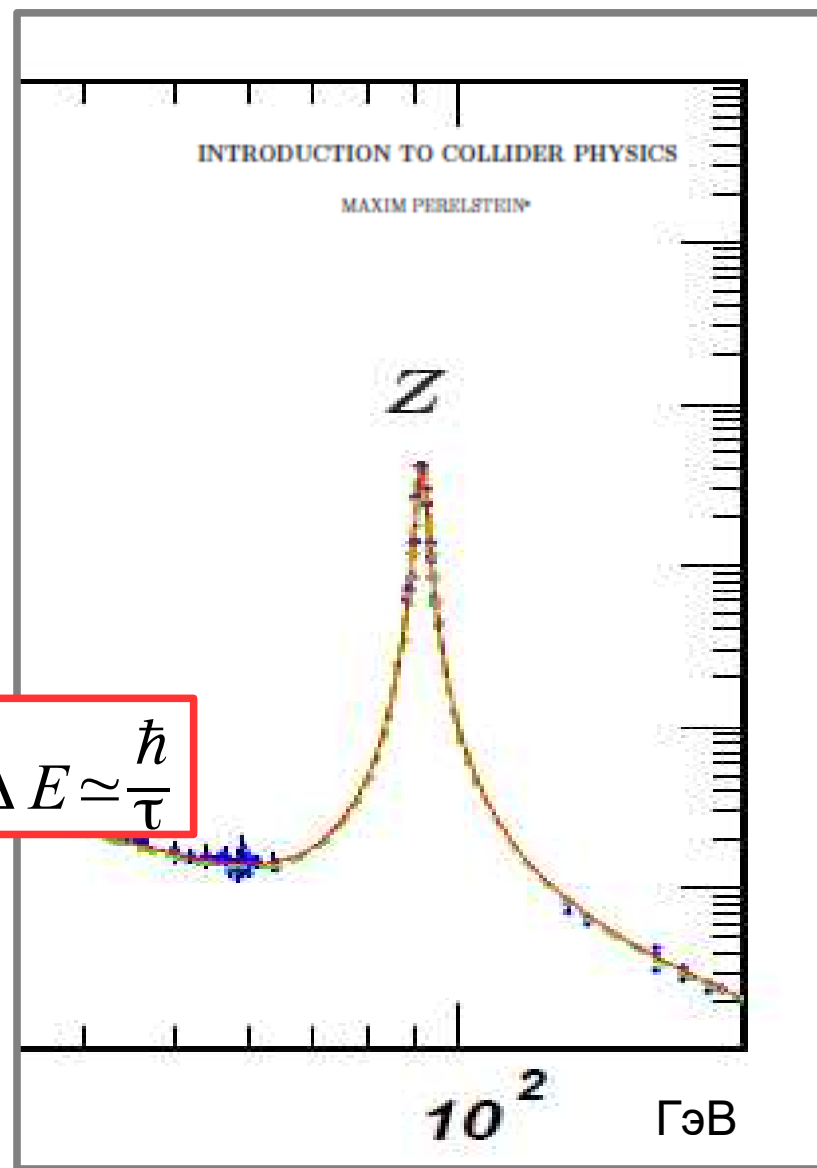


Формула Брейта-Вигнера

$$a + A = \dots = \begin{cases} a + A \\ b + B \\ c + C \\ \dots \end{cases}$$

$$\sigma_{ab} = \pi \lambda^2 \frac{\Gamma_a \Gamma_b}{(E - E_0)^2 + \Gamma^2/4}$$

$$\Gamma \simeq \Delta E \simeq \frac{\hbar}{\tau}$$



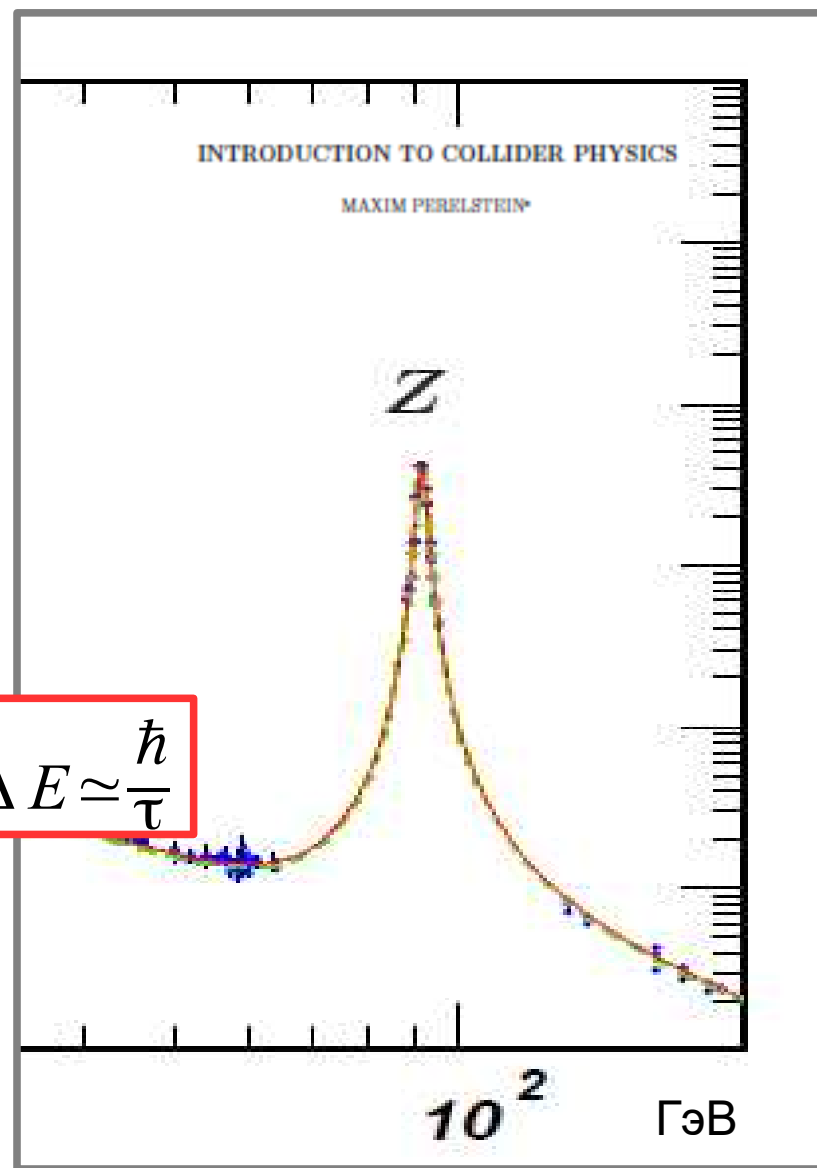
Формула Брейта-Вигнера

$$a + A = \dots = \begin{cases} a + A \\ b + B \\ c + C \\ \dots \end{cases}$$

$$\sigma_{ab} = \pi \lambda^2 \frac{\Gamma_a \Gamma_b}{(E - E_0)^2 + \Gamma^2/4}$$

$$\Gamma = \Gamma_a + \Gamma_b + \dots$$

$$\Gamma \simeq \Delta E \simeq \frac{\hbar}{\tau}$$



Формула Брейта-Вигнера

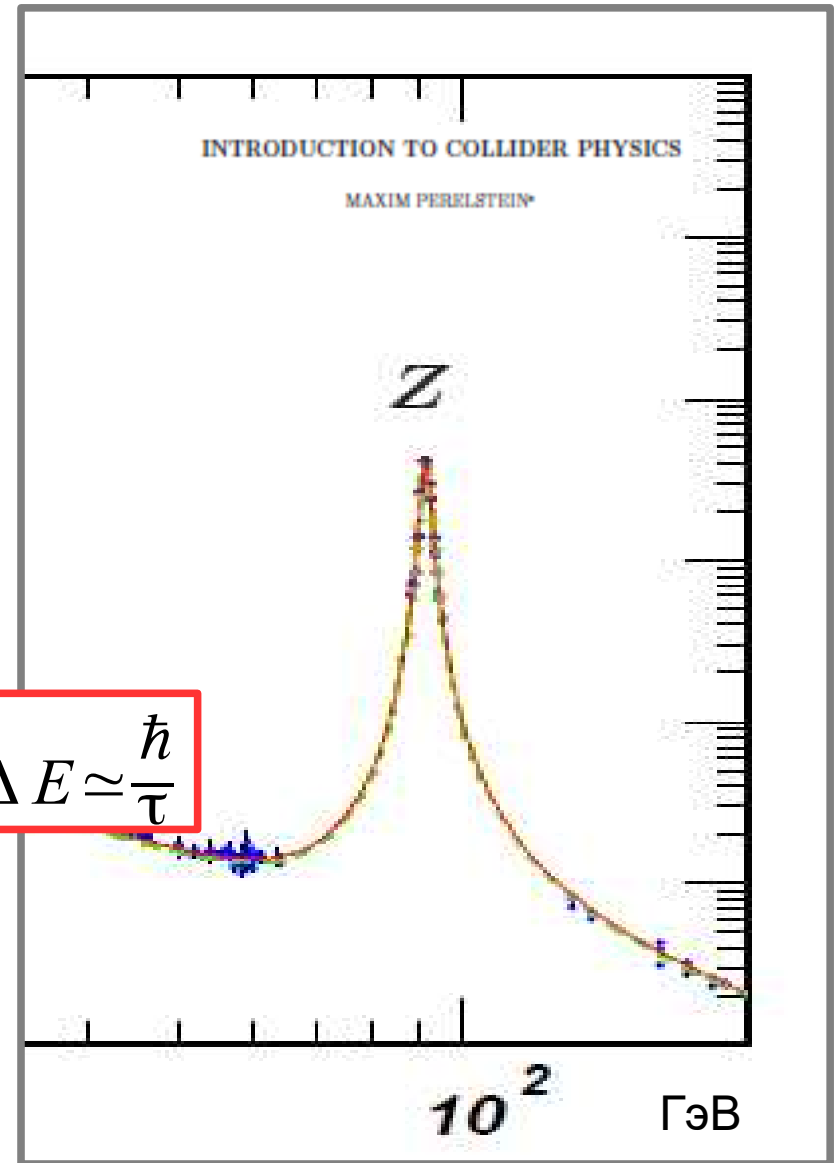
$$a + A = \dots = \begin{cases} a + A \\ b + B \\ c + C \\ \dots \end{cases}$$

$$\sigma_{ab} = \pi \lambda^2 \frac{\Gamma_a \Gamma_b}{(E - E_0)^2 + \Gamma^2/4}$$

$$\Gamma = \Gamma_a + \Gamma_b + \dots$$

$$\frac{\sigma_{aa}}{\sigma_{ab}} = \frac{\Gamma_a}{\Gamma_b} = \frac{\tau_b}{\tau_a}$$

$$\Gamma \simeq \Delta E \simeq \frac{\hbar}{\tau}$$



Часть 4. Тепловые нейтроны.

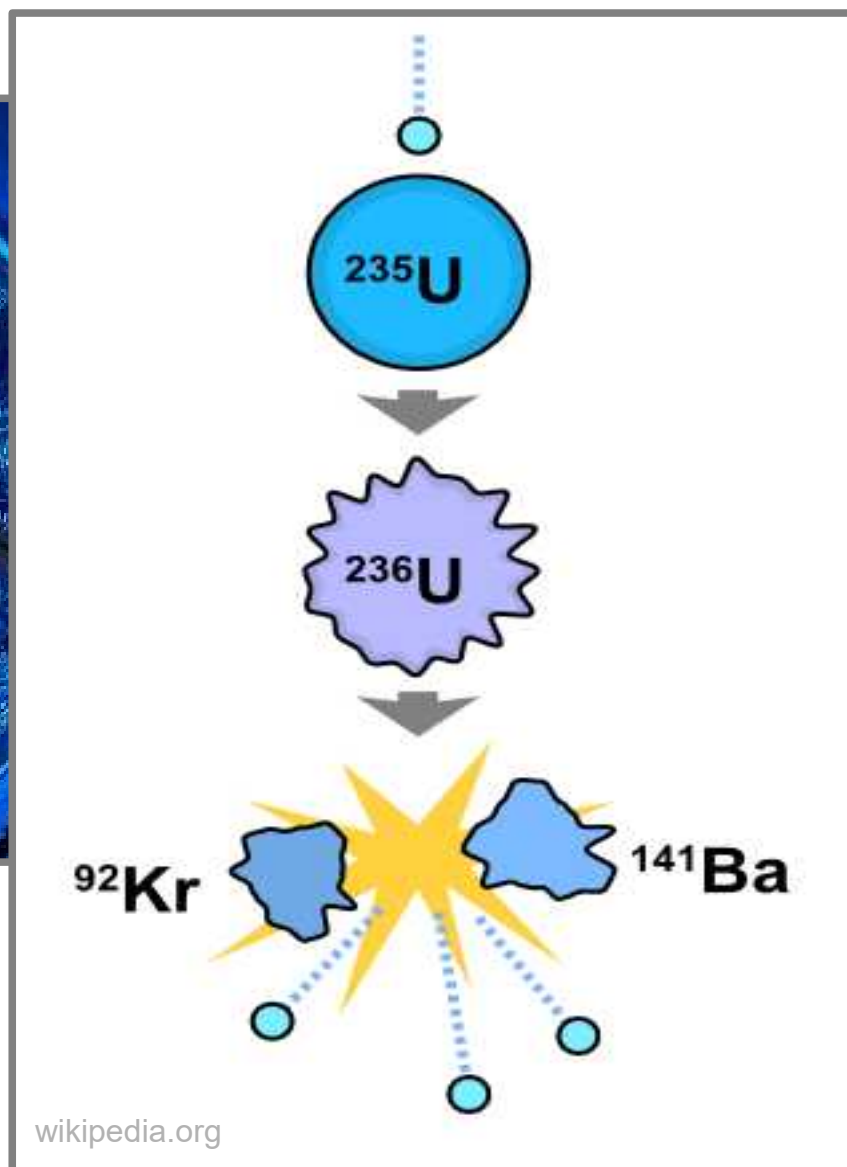
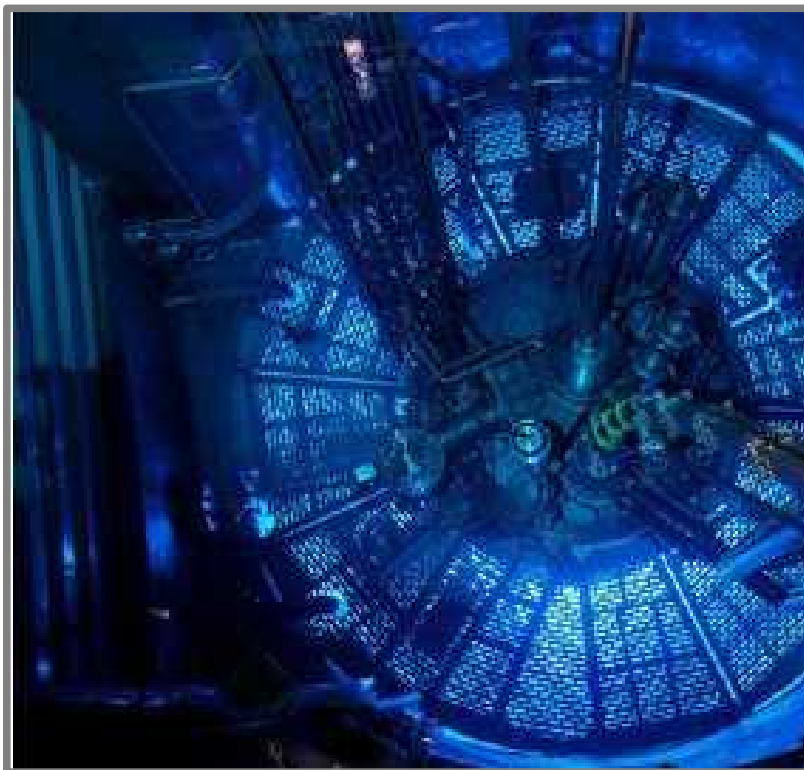
Ядерный реактор, роль
запаздывающих нейтронов.

Ядерный реактор

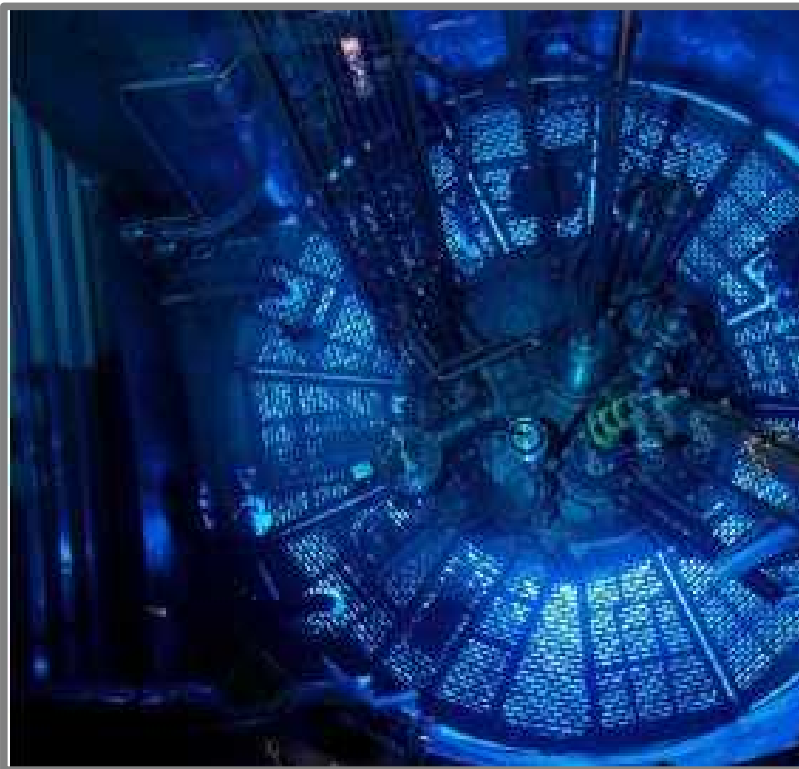


Top view to the active zone of the ILL high-flux reactor.

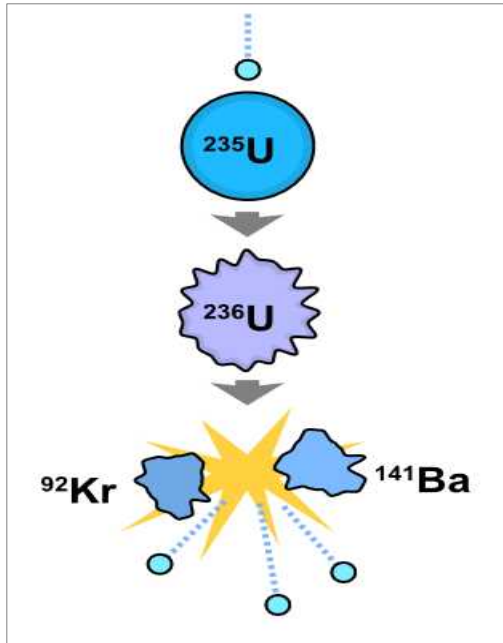
Ядерный реактор



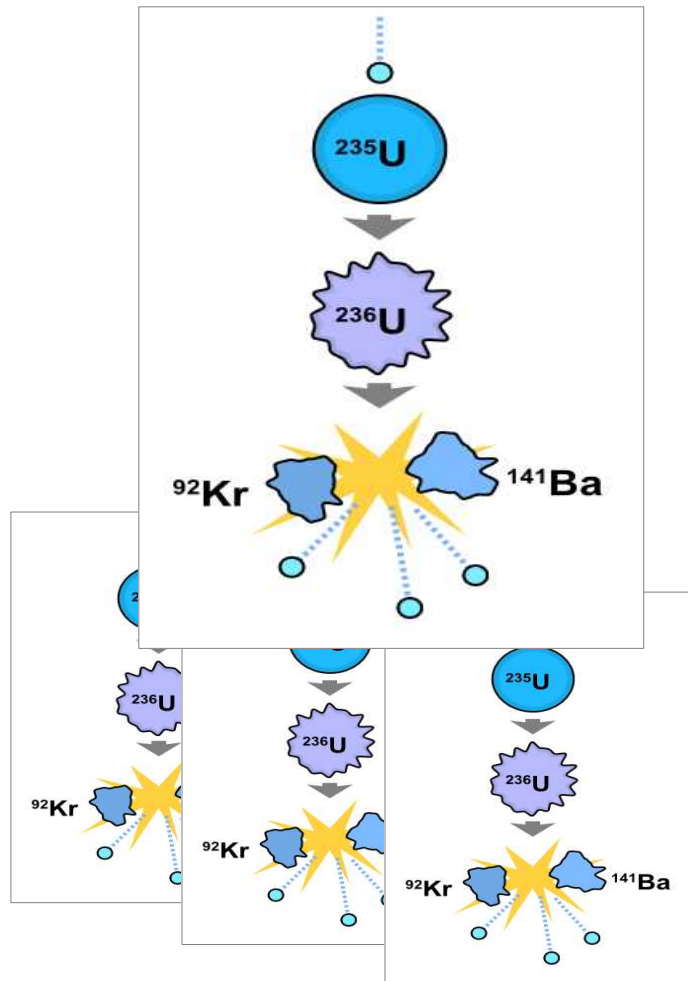
Ядерный реактор



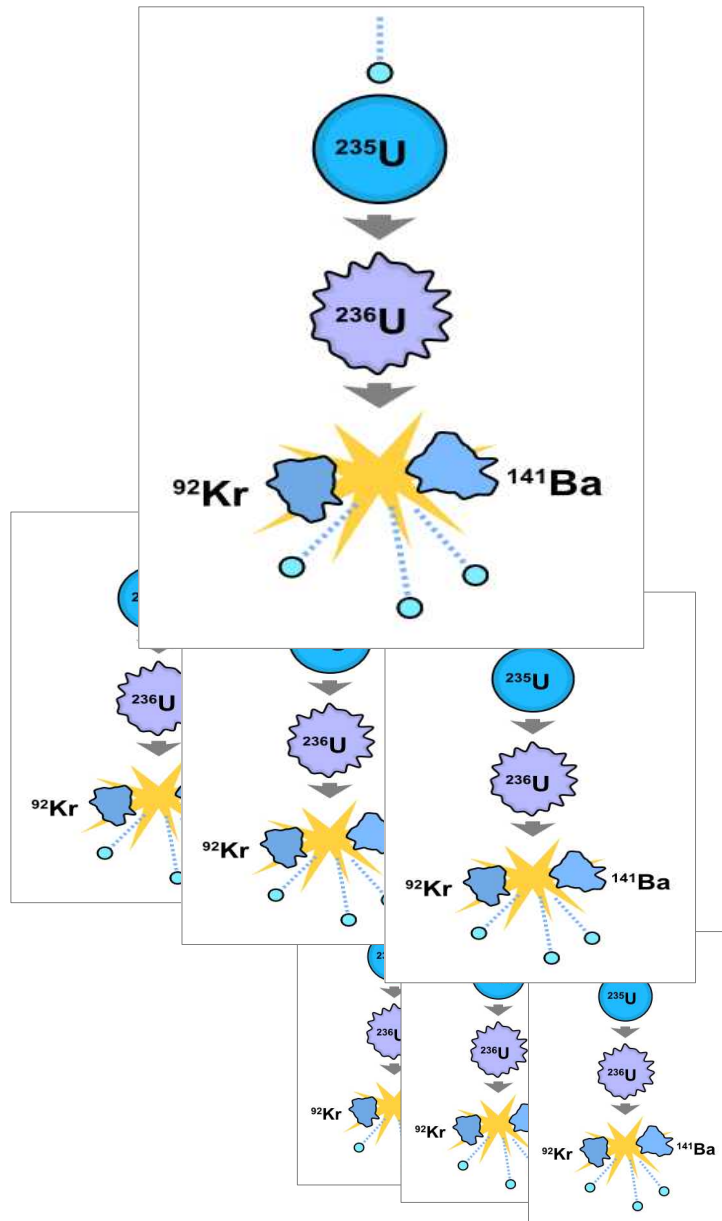
Цепная реакция, роль запаздывающих нейтронов



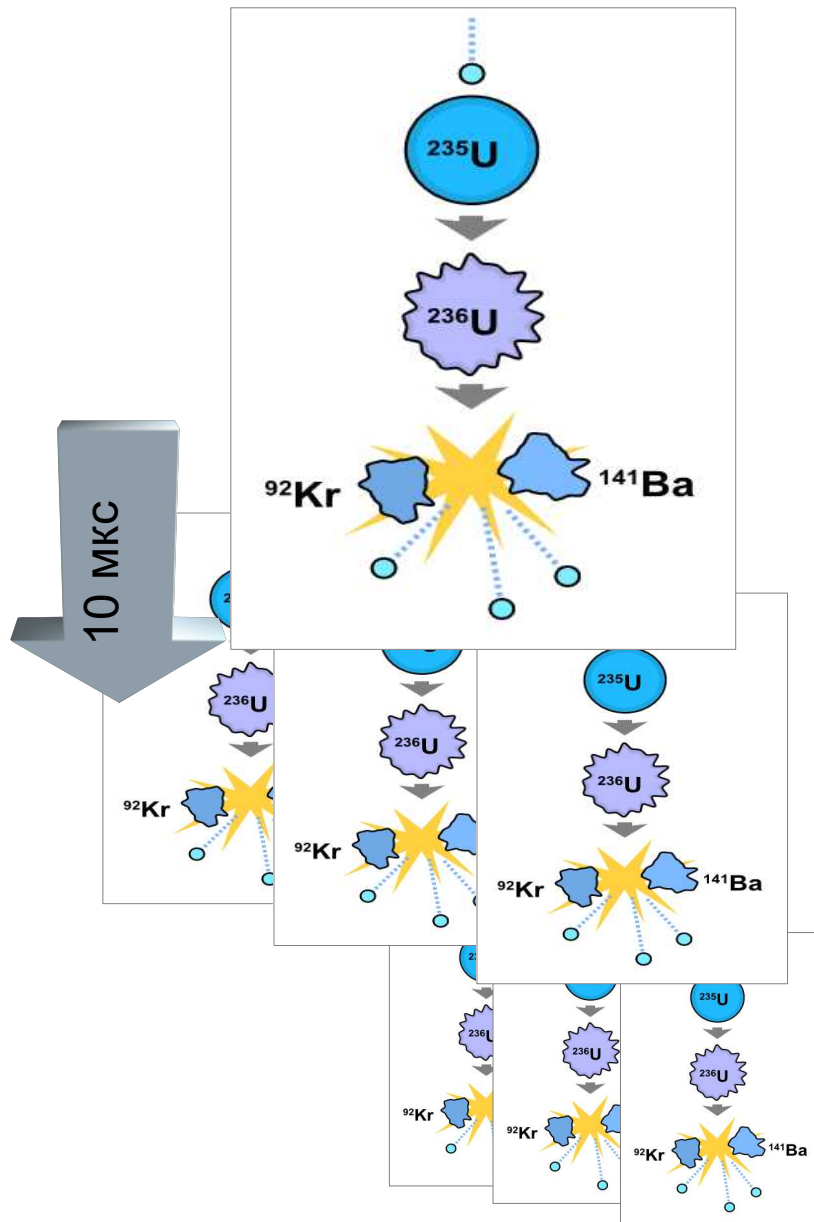
Цепная реакция, роль запаздывающих нейтронов



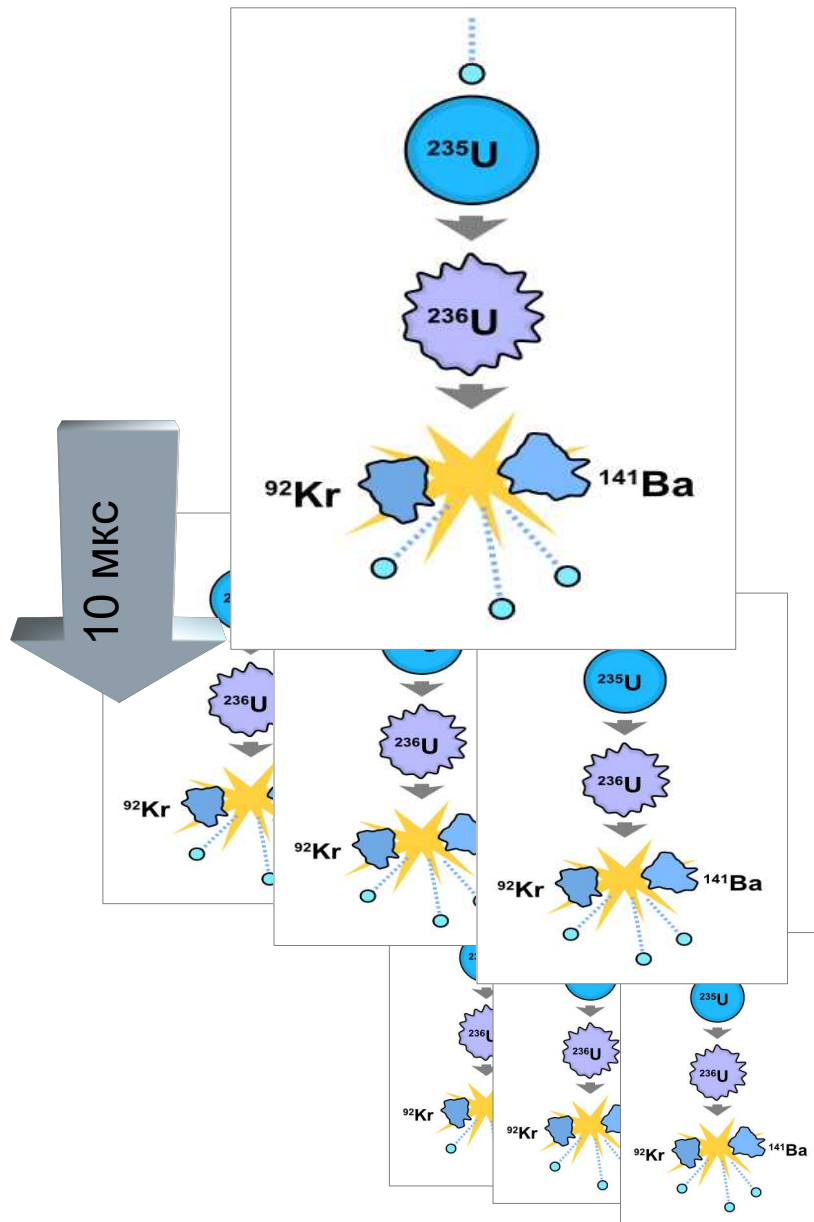
Цепная реакция, роль запаздывающих нейтронов



Цепная реакция, роль запаздывающих нейтронов

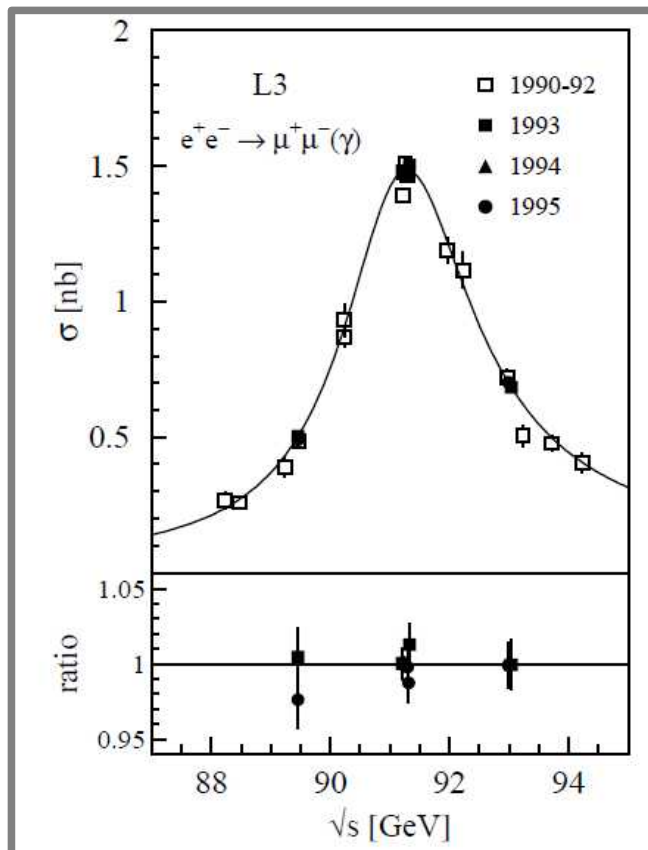


Цепная реакция, роль запаздывающих нейтронов



0.5%:
 $^{87}\text{Kr} \rightarrow ^{86}\text{Kr} + n$
 $\sim 1 \text{ мин}$

Основное на лекции



$$\frac{d N}{d t}=j(n S d x) \sigma$$

$$\sigma_{ab}=\pi \lambda^2 \frac{\Gamma_a \Gamma_b}{\left(E-E_0\right)^2+\Gamma^2 / 4}$$

$$\Gamma=\Gamma_a+\Gamma_b+\ldots$$

$$\frac{\sigma_{aa}}{\sigma_{ab}}=\frac{\Gamma_a}{\Gamma_b}=\frac{\tau_b}{\tau_a}$$