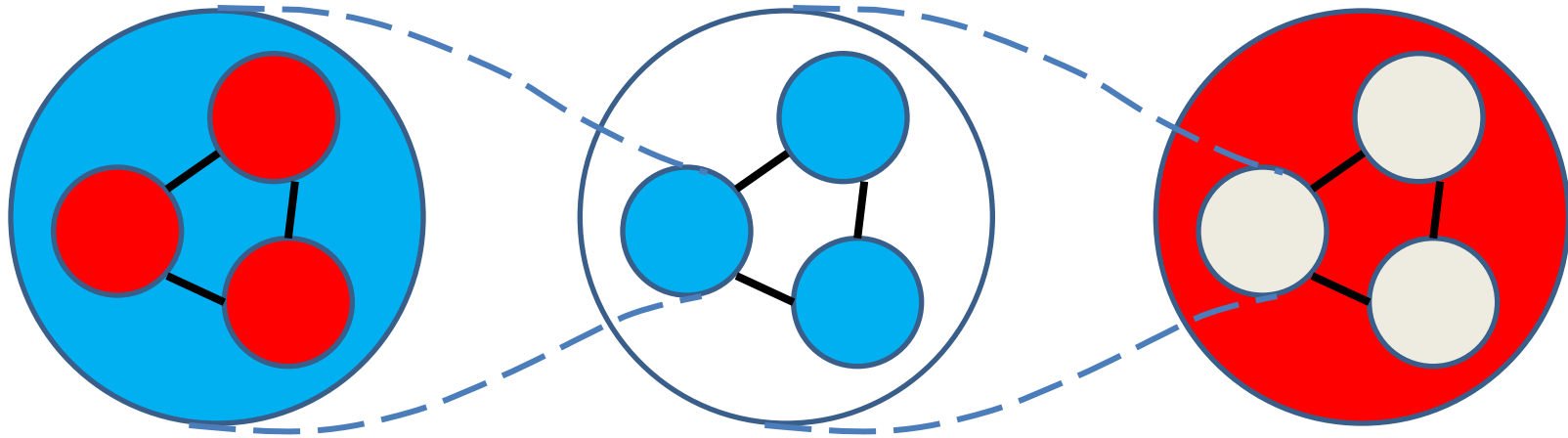


Часть II

Обзор структурных уровней

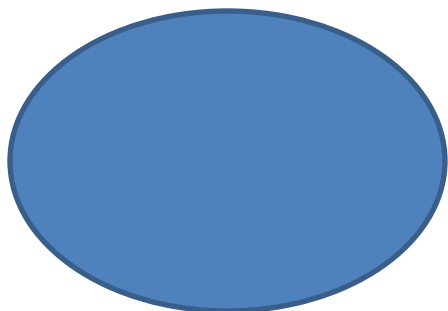
Иерархический ряд физических структур



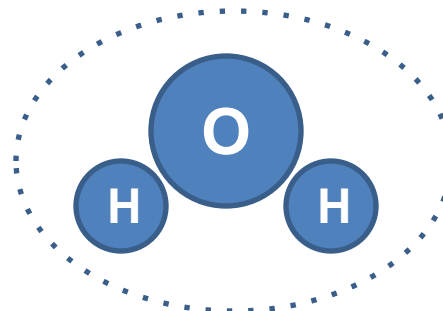
... ⇔ нуклон ⇔ **ядро ⇔ атом ⇔ молекула** ⇔ НМС ⇔ ...

Элементарные частицы

Классический структурализм

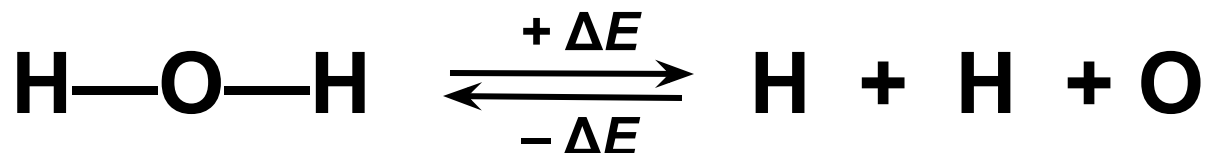


Молекула воды

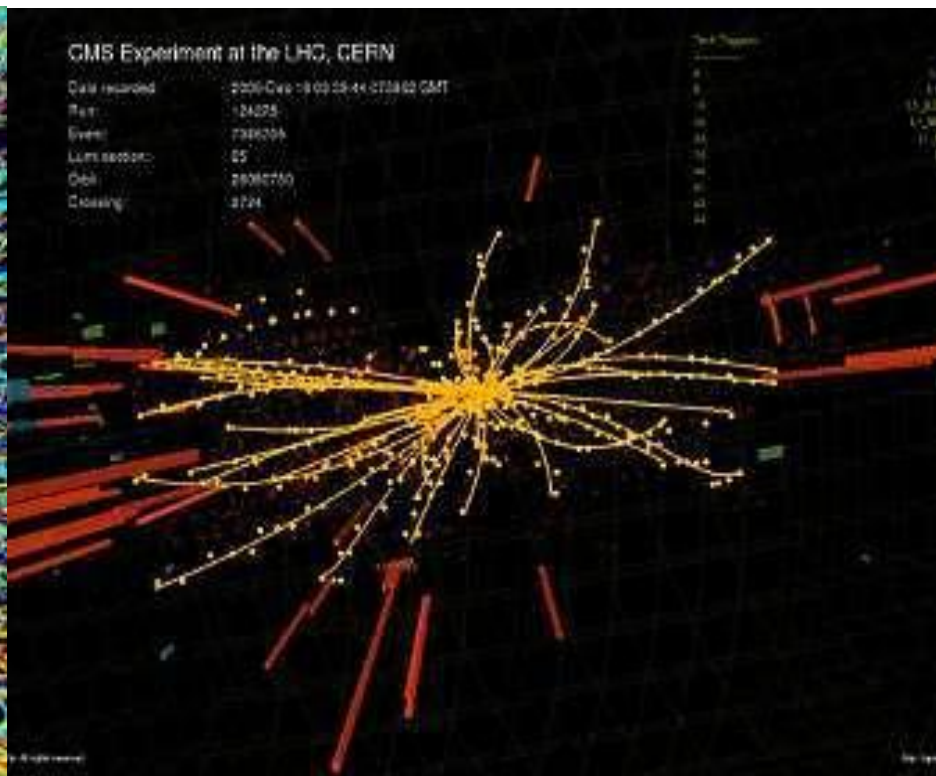
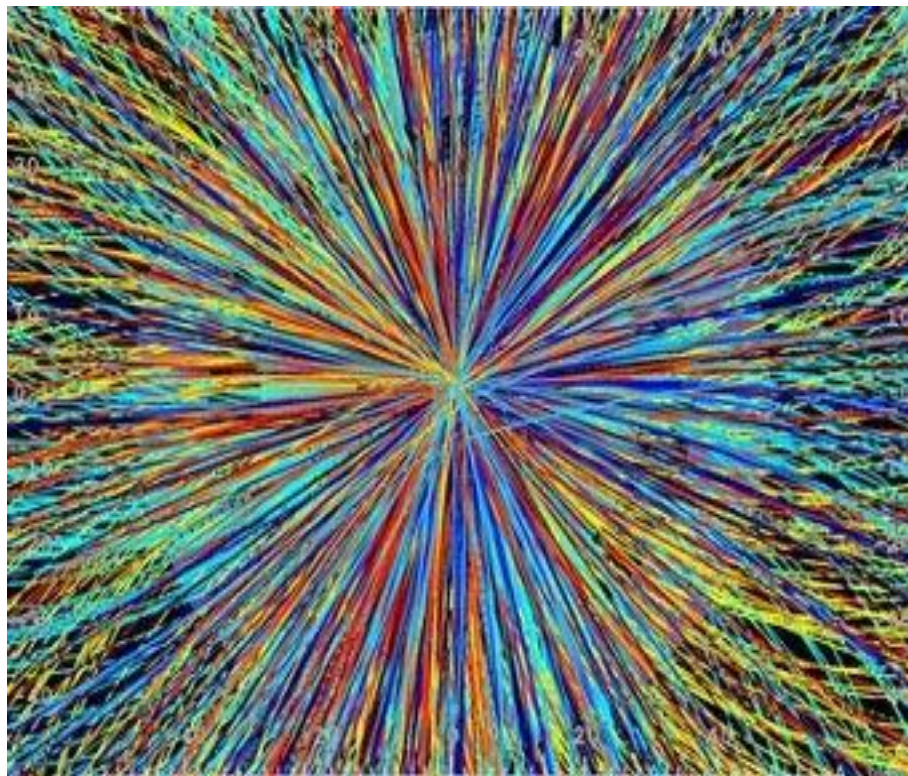
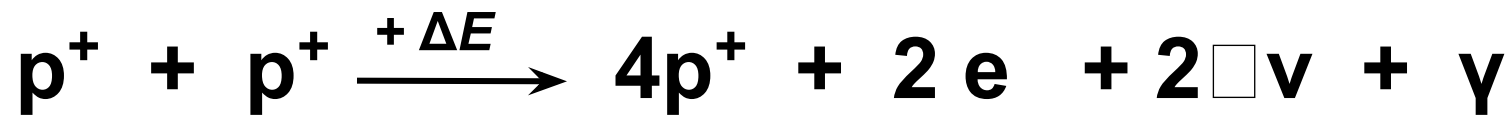


Структурная модель

Основой для принятия данной структурной модели является экспериментальная возможность проведения двух взаимно обратных процессов:



Существуют объекты, в отношении которых классический структурализм оказывается неадекватным (и бесполезным)



Элементарные частицы

Глобальное описание

Наблюдаемые ЭЧ

Масса покоя, m_0

Лептоны	1	Электрон, нейтрино
Мезоны	~ 200	Мюон (μ -мезон)
Барионы	~ 2000	протон, нейтрон

Электрический заряд, Q

Положительно заряженные	+1	протон
Нейтральные	0	нейтрон
Отрицательно заряженные	-1	электрон, мюон

Спин (S) и магнитный момент ($\mu = \gamma \cdot S$)

Фермионы

$$s = 1/2, 3/2, \dots$$

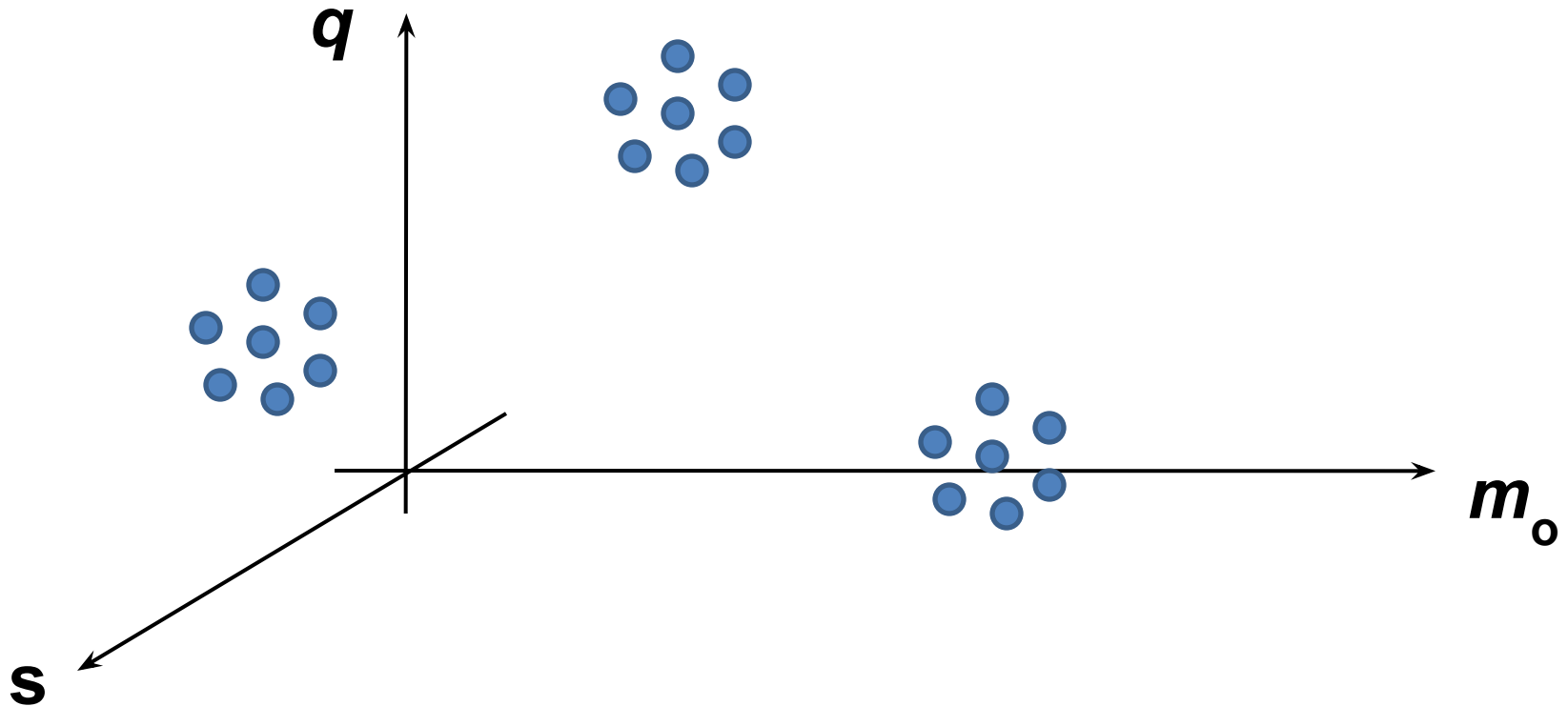
e^- , ν^0 , n^0 , p^+

Бозоны

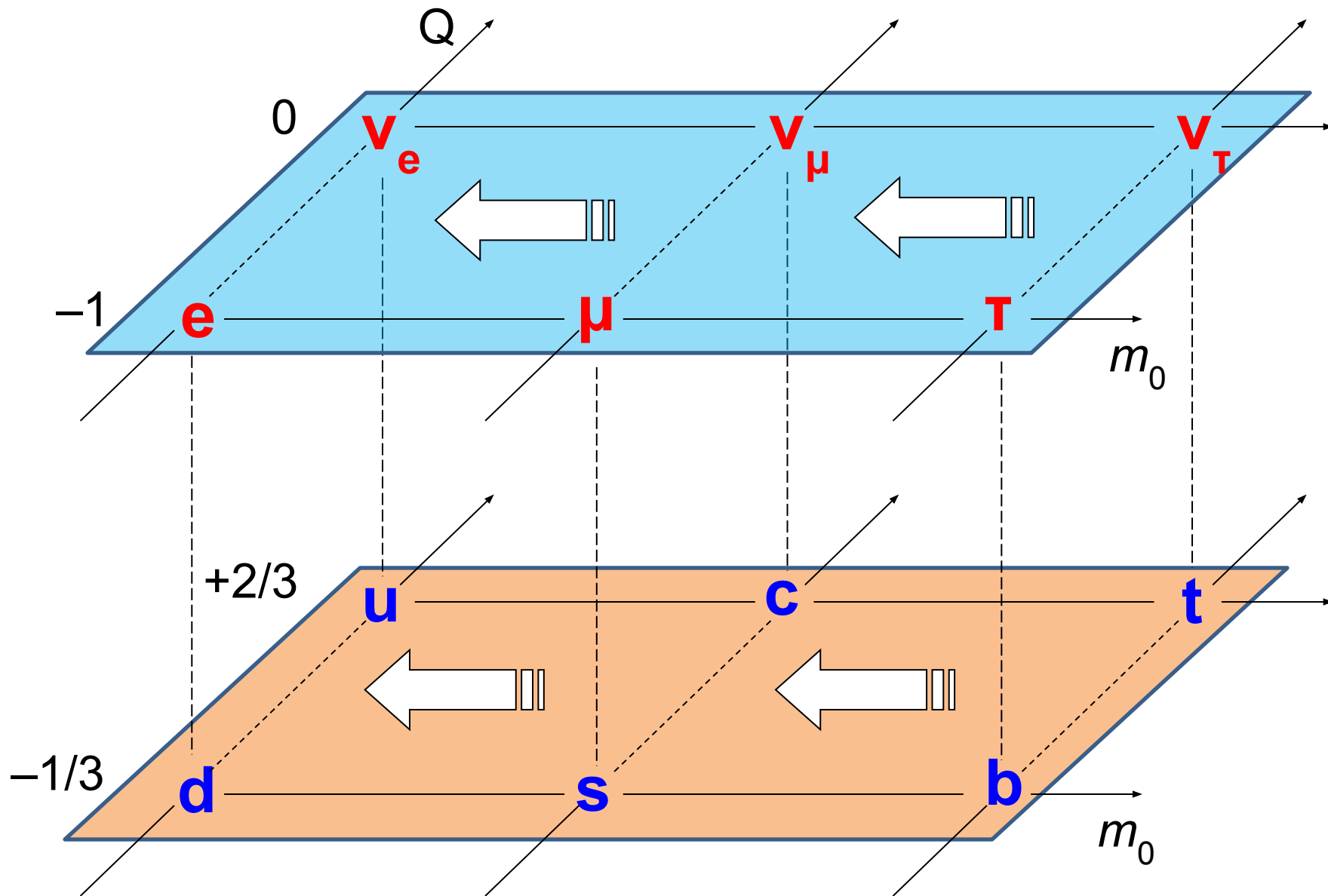
$$s = 0, 1, 2, \dots$$

γ

Мультиплеты



Кварк-лептонная модель



Взаимодействия

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ

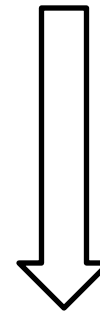
кварк \leftrightarrow кварк

кварк \leftrightarrow лептон

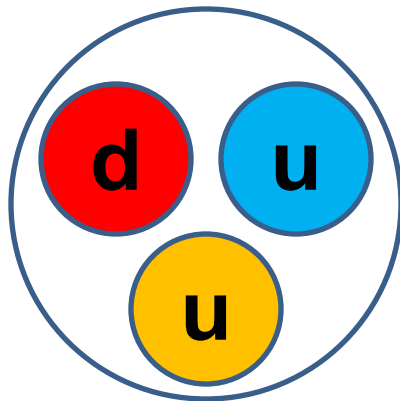
лептон \leftrightarrow лептон

ЦВЕТОВЫЕ

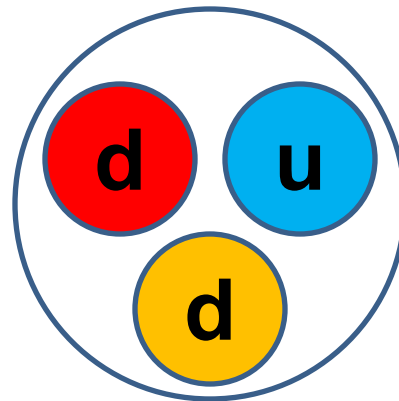
кварк \leftrightarrow кварк



Кварковые
структуры

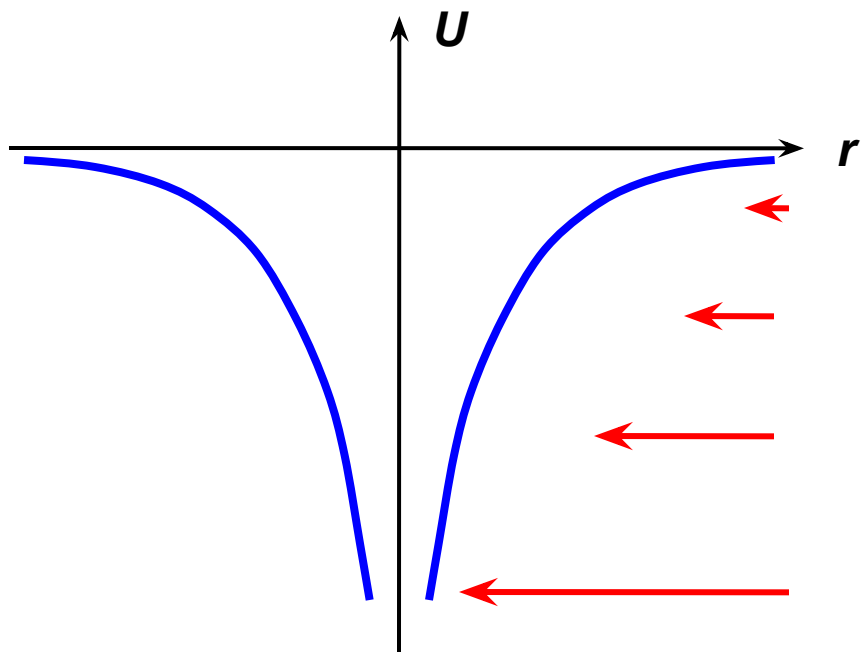


протон



нейтрон

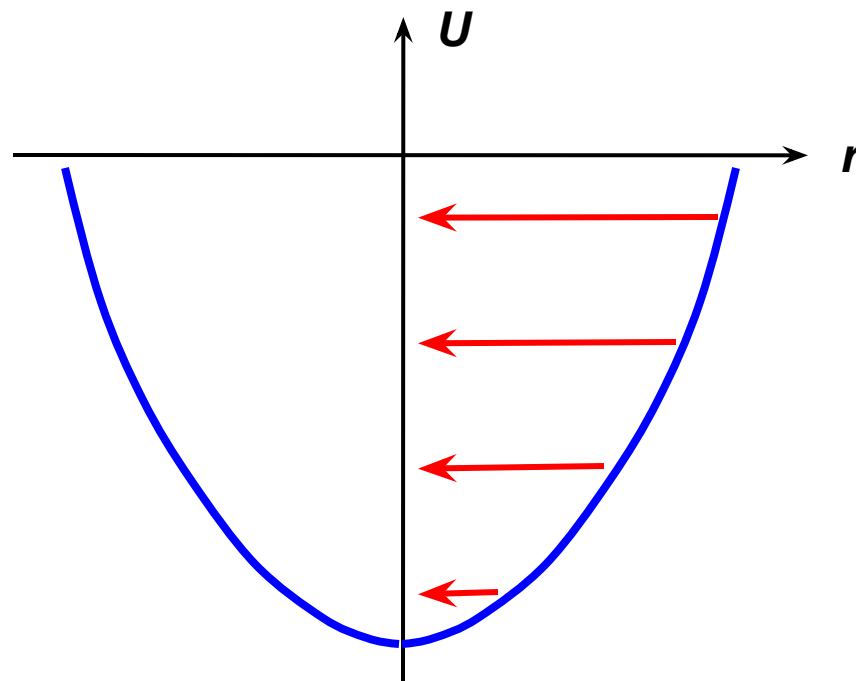
Электромагнитные взаимодействия



$$U \sim r^{-1}$$

$$F \sim r^{-2}$$

Цветовые взаимодействия



$$U \sim r^{\alpha}$$

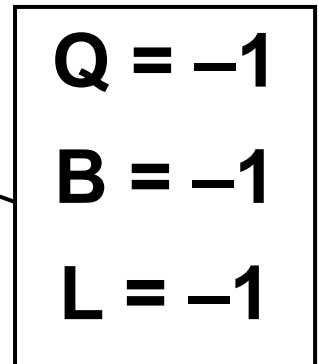
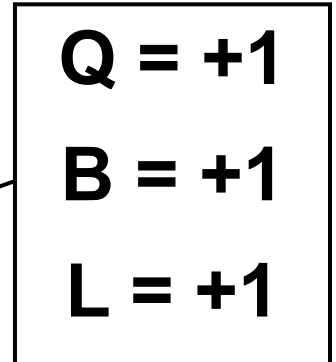
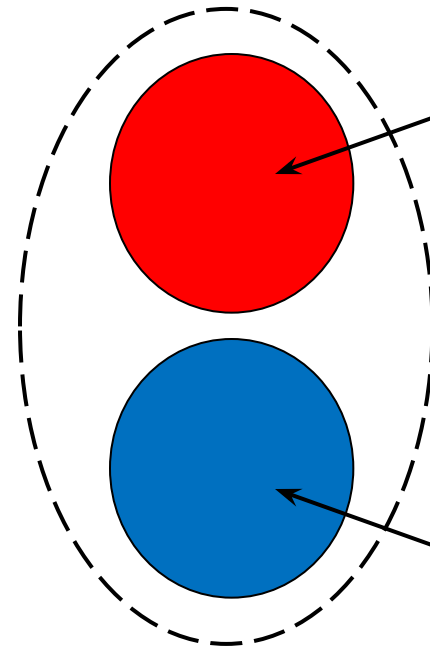
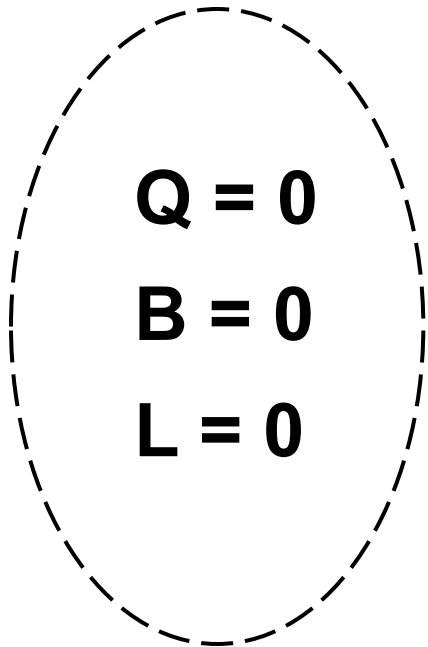
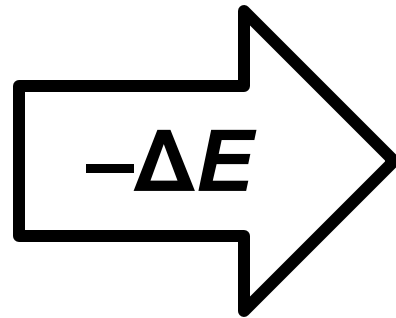
$$F \sim r^{\beta}$$

Законы сохранения

- 1) **Электрического заряда:** $\sum Q_i = \text{const}$
- 2) **Лептонного заряда:** $\sum L_i = \text{const}$
(суммарное число частиц-лептонов в изолированной системе не может изменяться)
- 3) **Барионного заряда:** $\sum B_i = \text{const}$
(суммарное число частиц-барионов в изолированной системе не может изменяться)

Античастицы

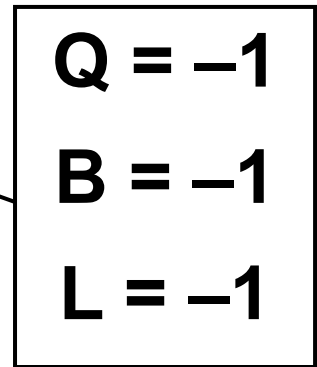
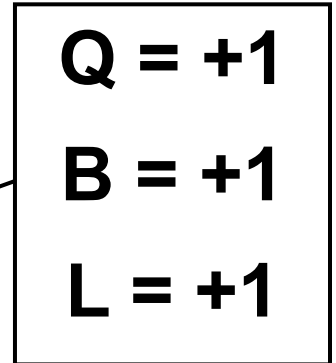
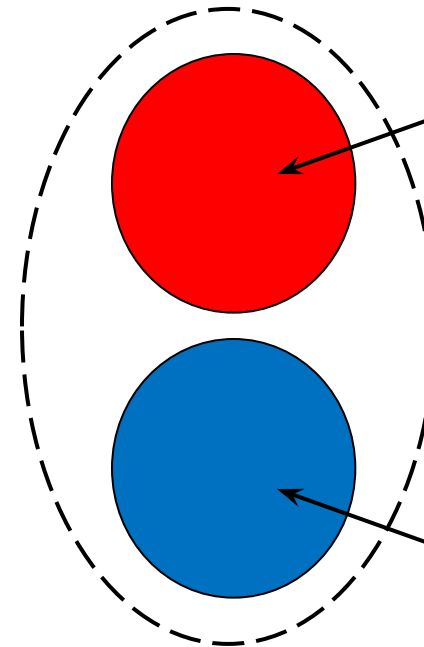
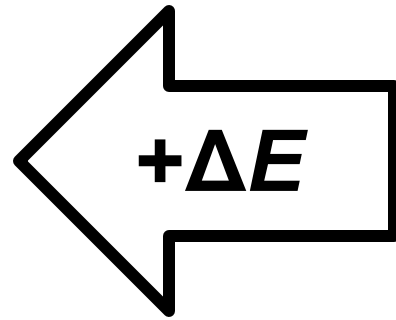
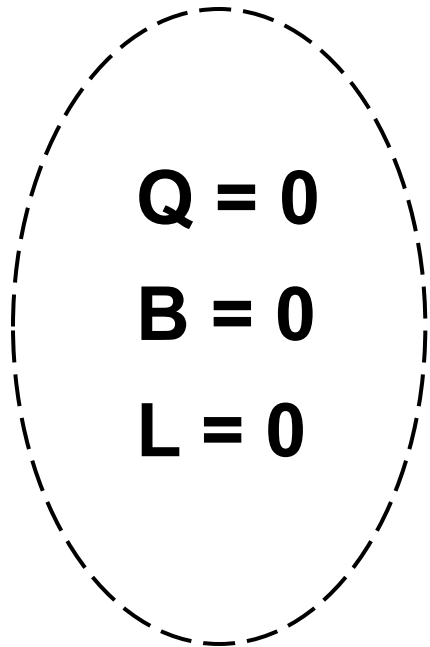
Рождение
пары



$$-\Delta E = 2mc^2$$

Античастицы

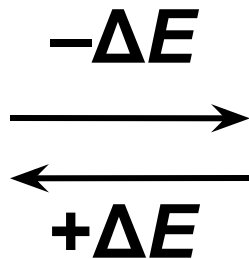
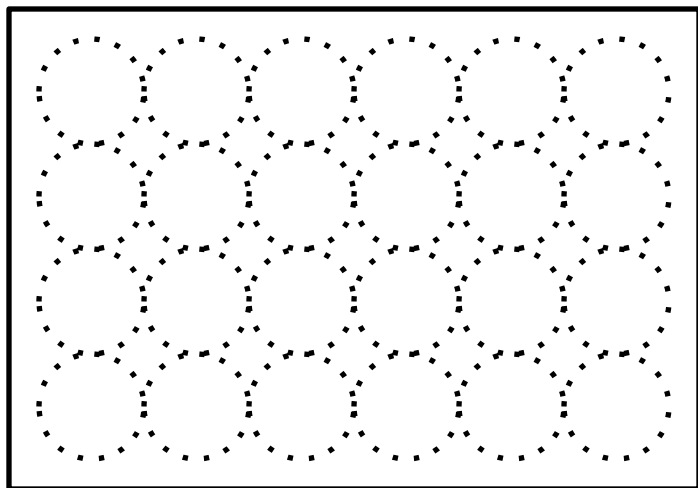
Аннигиляция
пары



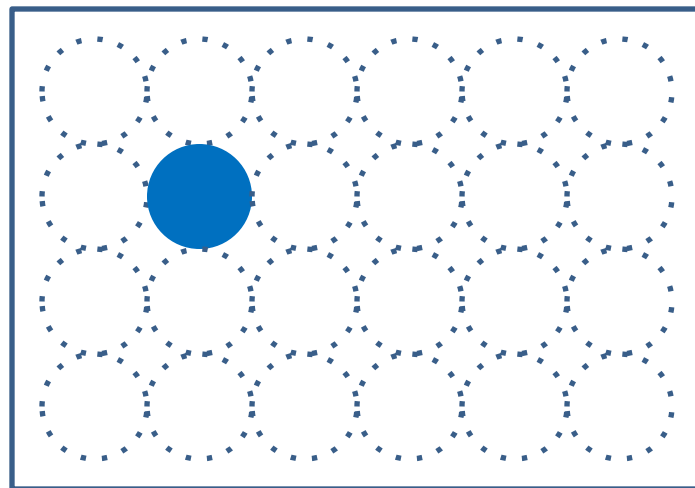
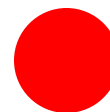
$$+\Delta E = 2mc^2$$

«Море Дирака»

$$Q = 0 \quad B = 0 \quad L = 0$$

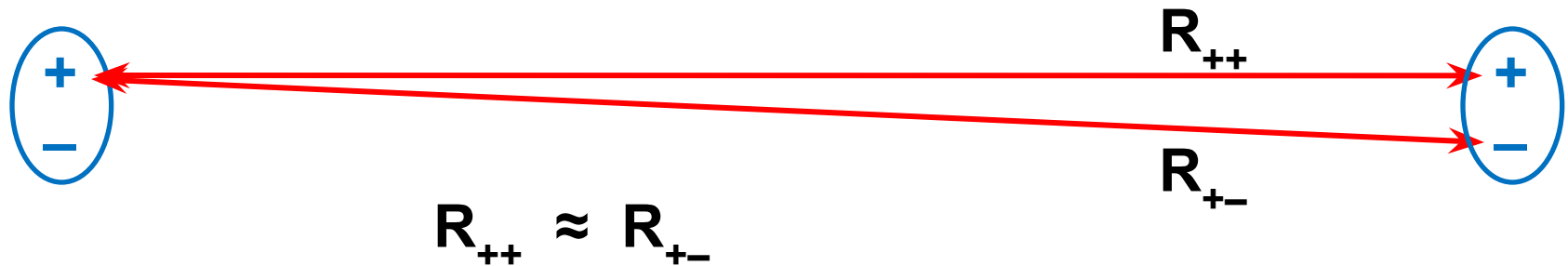


$$Q = +1 \quad B = +1 \quad L = 0$$

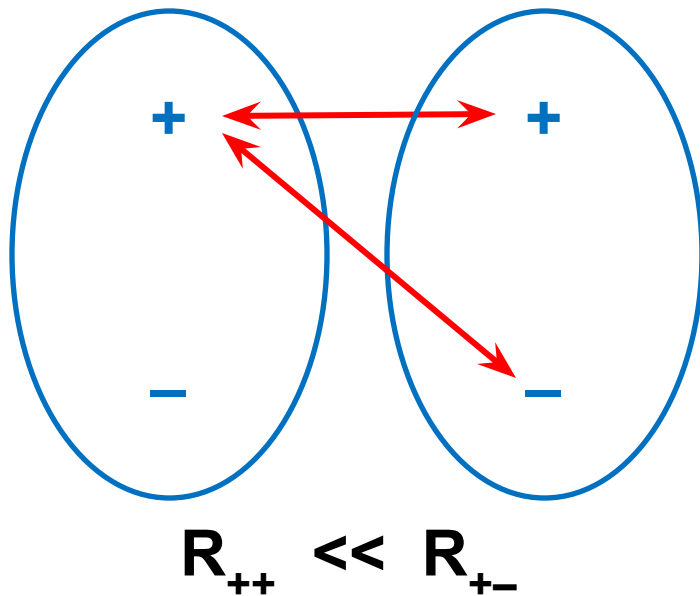


$$Q = -1 \quad B = -1 \quad L = 0$$

Атомные ядра



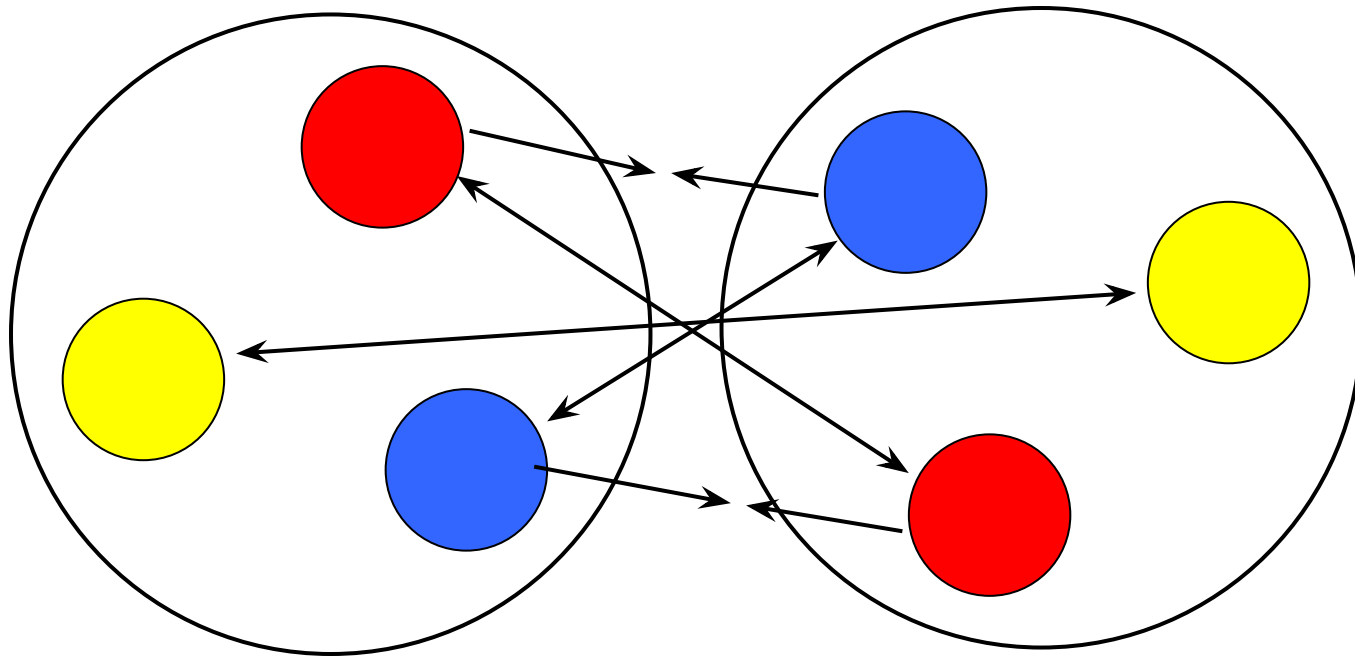
На больших расстояниях диполи не чувствуют друг друга, так как силы притяжения компенсируются силами отталкивания



На малых расстояниях диполи чувствуют друг друга, так как силы притяжения и отталкивания имеют существенно разные величины

Остаточное взаимодействие

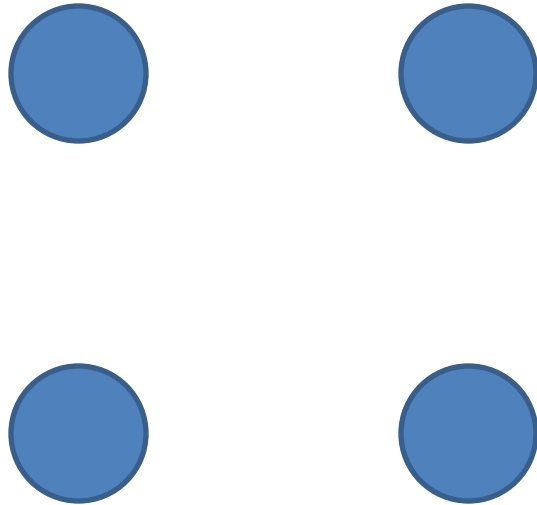
Нуклоны



**Остаточные цветовые взаимодействия
или «ядерные силы»**

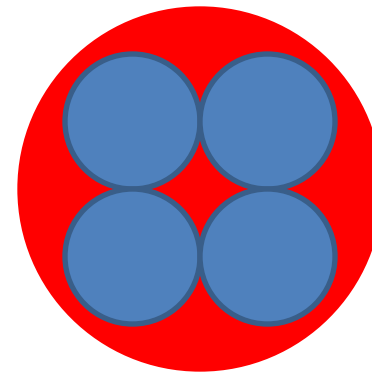
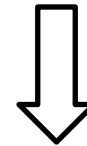
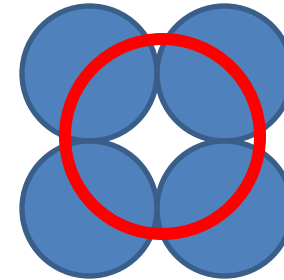
(заметны только на малых расстояниях порядка 10^{-15} м)

Нет взаимодействия



Отдельные нуклоны

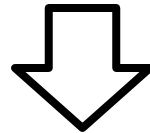
Есть взаимодействие



Атомное ядро

Нуклонный состав ядер

Числа нейтронов N_n и протонов N_p



$N_p = Z$ — зарядовое число

$N_p + N_n = M$ — массовое число

$\begin{matrix} M \\ Z \end{matrix} A$

$\begin{matrix} 4 \\ 2 \end{matrix} \text{He}$

$\begin{matrix} 56 \\ 26 \end{matrix} \text{Fe}$

$\begin{matrix} 238 \\ 92 \end{matrix} \text{U}$

Изотопы

${}^1\text{H}$ ${}^2\text{H}$ ${}^3\text{H}$

Изобары

${}^{40}\text{K}$ (19p + 21n) ${}^{40}\text{Ar}$ (18p + 22n)

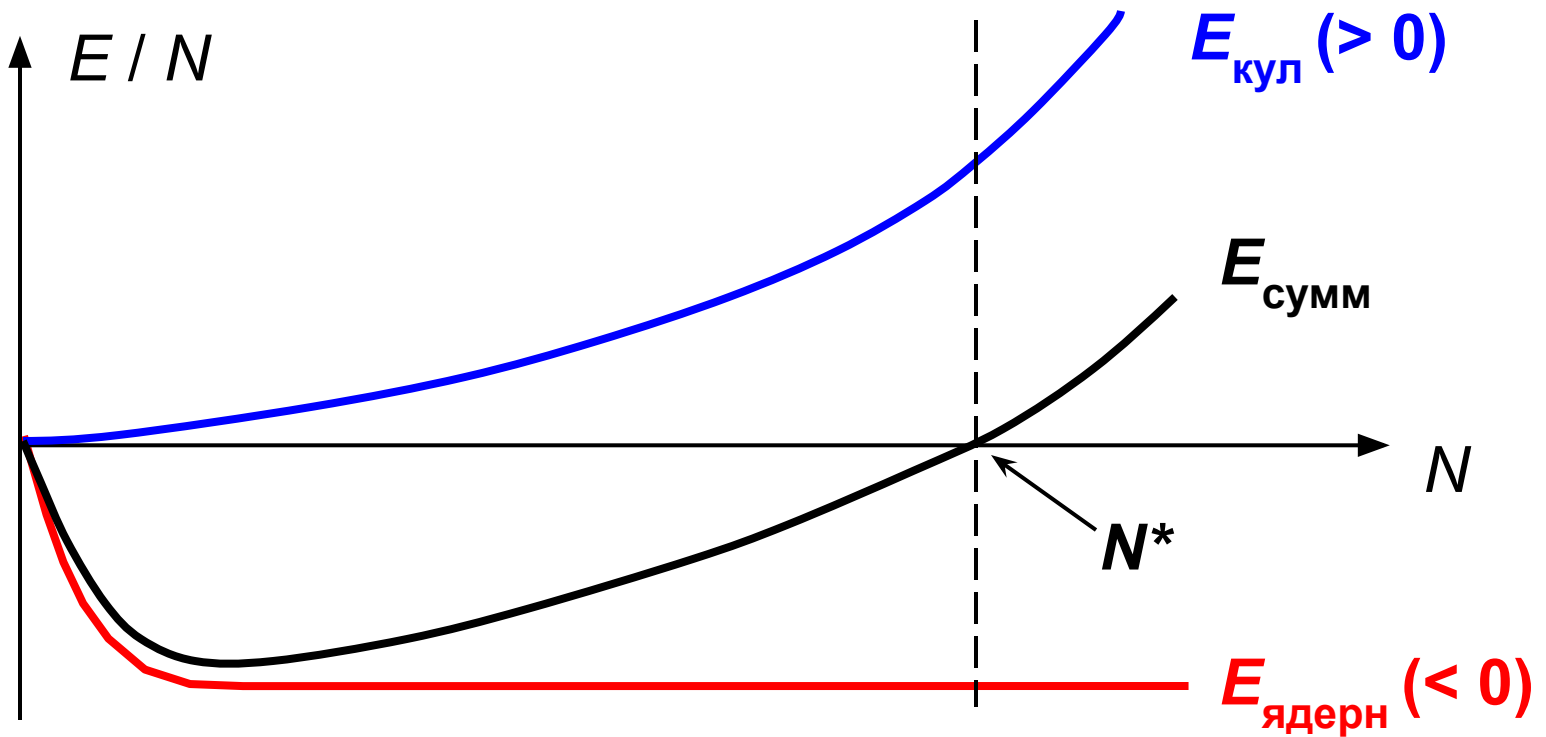
Внутриядерные взаимодействия

Два типа взаимодействий между нуклонами:

- **фундаментальное электромагнитное**, обусловленное электрическими зарядами протонов, а также собственными магнитными моментами протонов и нейтронов;
- **остаточное цветовое («ядерные силы»)**, обусловленное цветовыми зарядами кварков, содержащихся внутри расположенных рядом нуклонов.

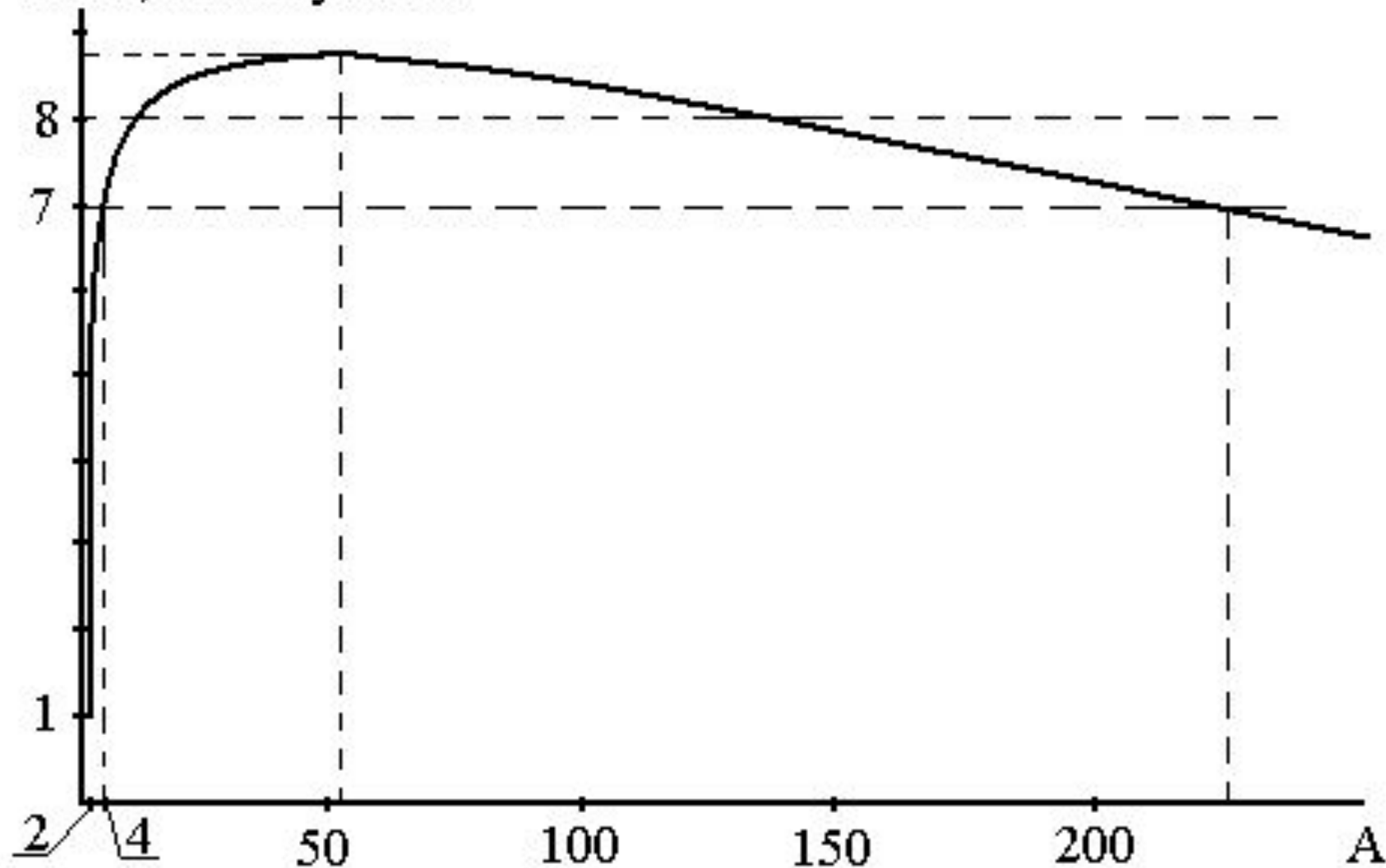
Кулоновские силы являются силами отталкивания, причем кулоновская энергия отталкивания быстро возрастает с увеличением заряда ядра

Ядерные силы являются силами притяжения и отличаются насыщенностью

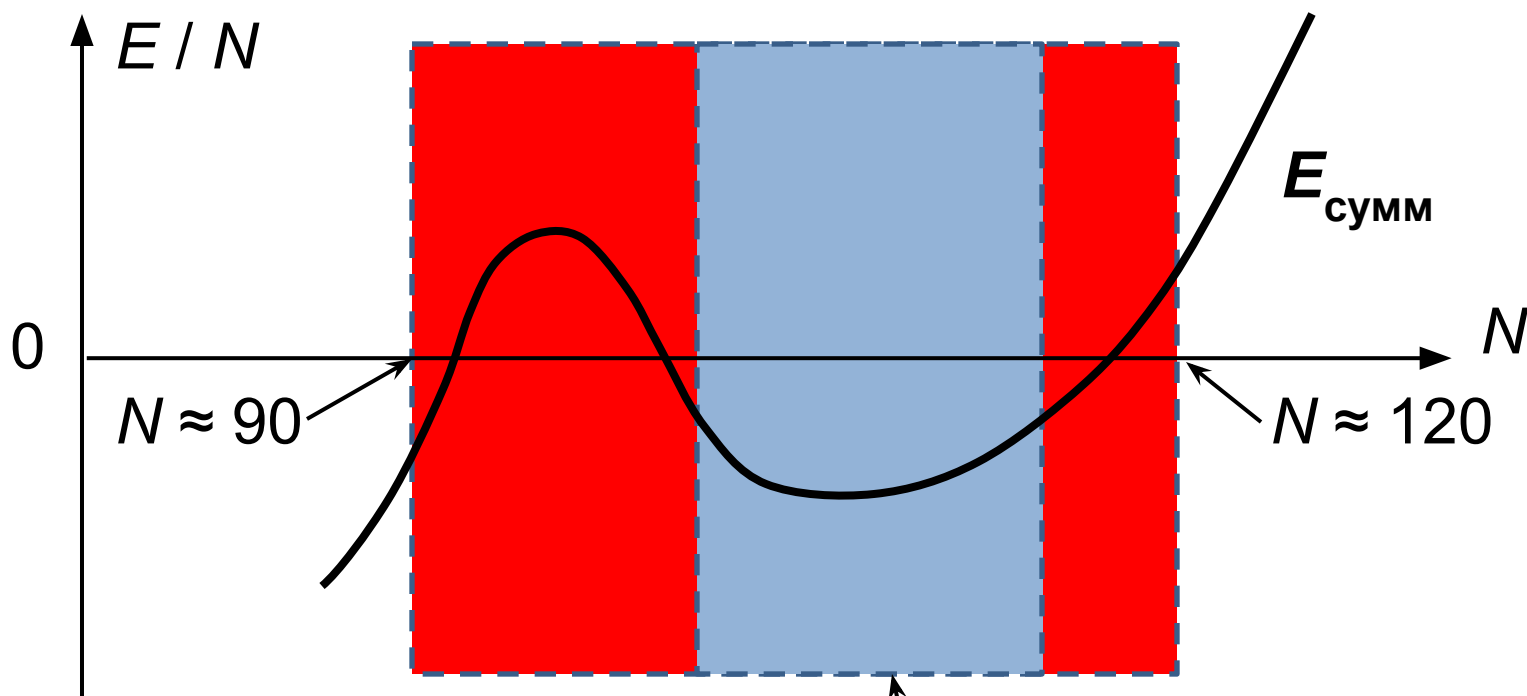


Зависимость удельной энергии связи от массового числа

$E_{\text{св}}/A$, МэВ/нуклон



Область «метастабильности»

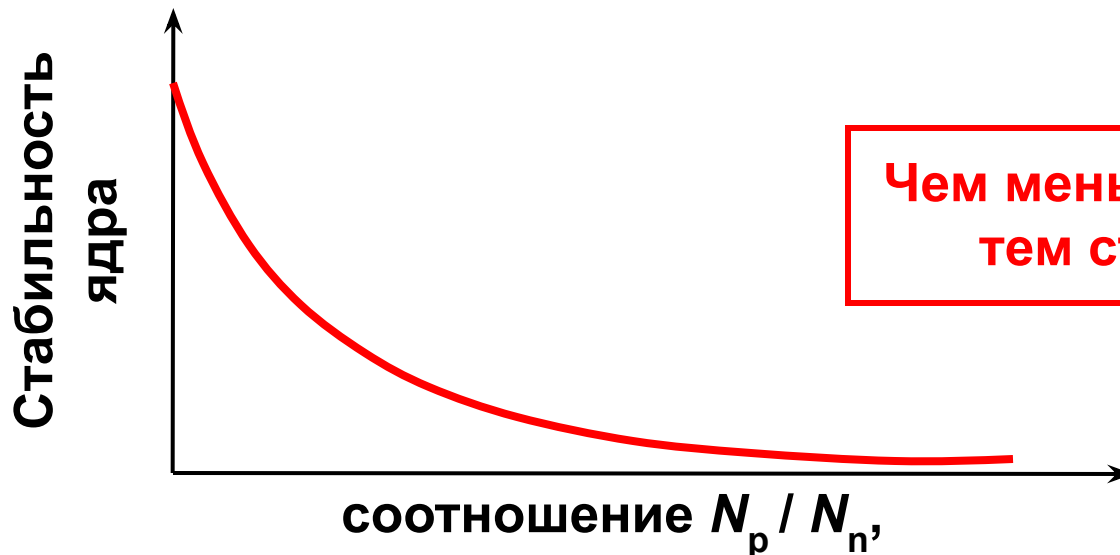


«остров стабильности»

Проблема соотношения чисел протонов и нейтронов

Для каждого числа нуклонов $N = N_p + N_n$ существует некоторое ОПТИМАЛЬНОЕ соотношение N_p / N_n , нарушение которого приводит к распаду ядра.

Фактор 1 — кулоновские силы отталкивания между протонами



Чем меньше доля протонов,
тем стабильнее ядро

Фактор 2 — кинетическая энергия нуклонов

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} n^2 \approx n^2 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}$$

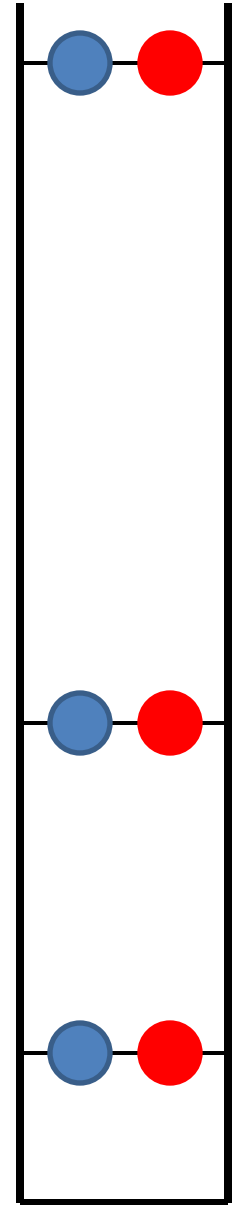
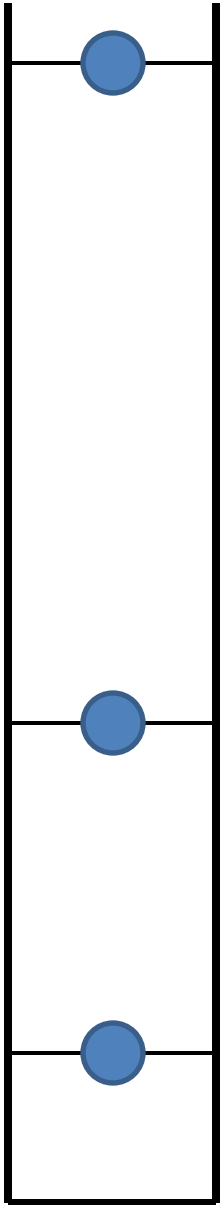
$$\sum_1^{100} n^2 = 338350$$

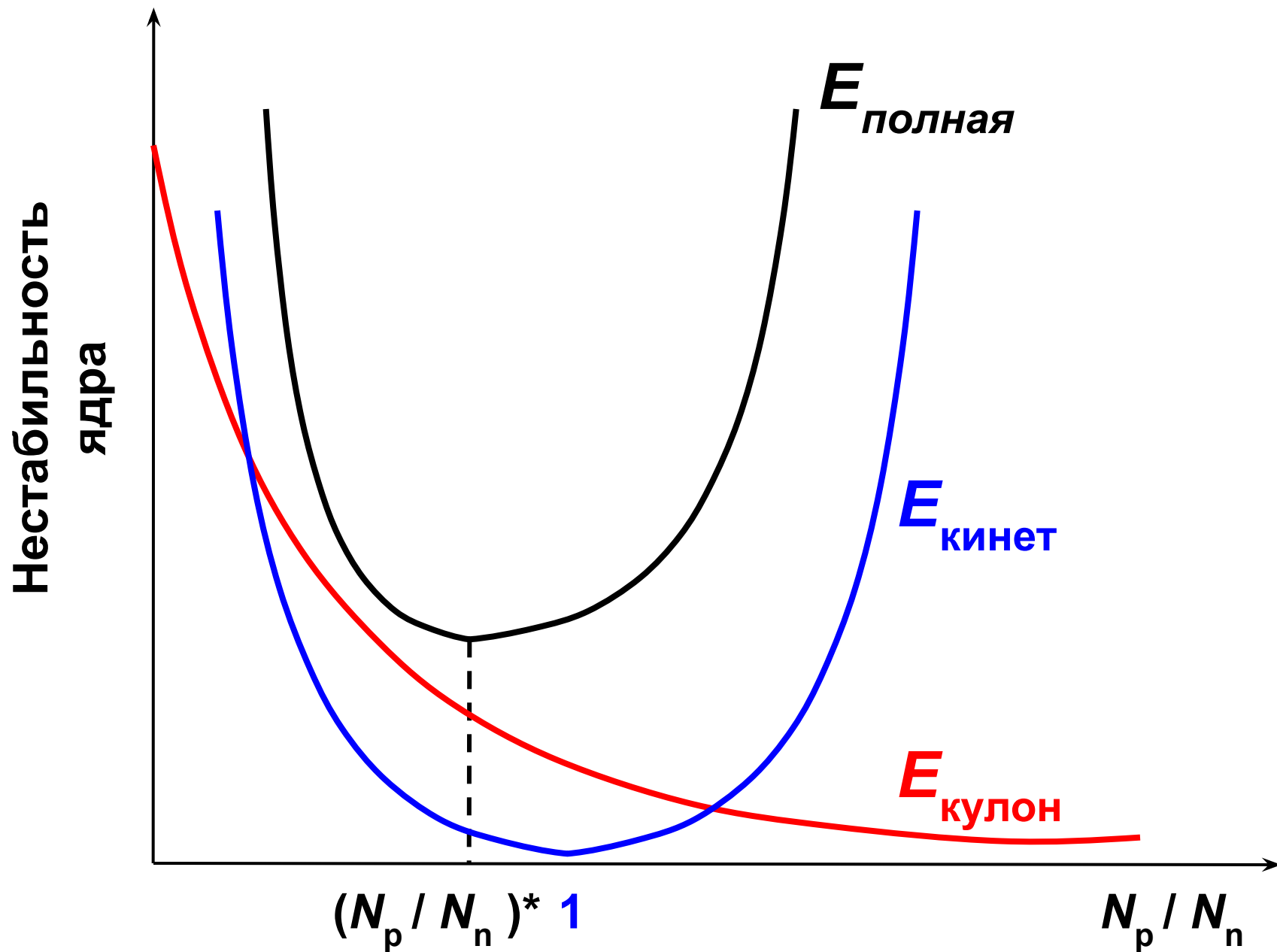
$$2 \sum_1^{50} n^2 = 85850$$

$$N_p / N_n \rightarrow 1$$

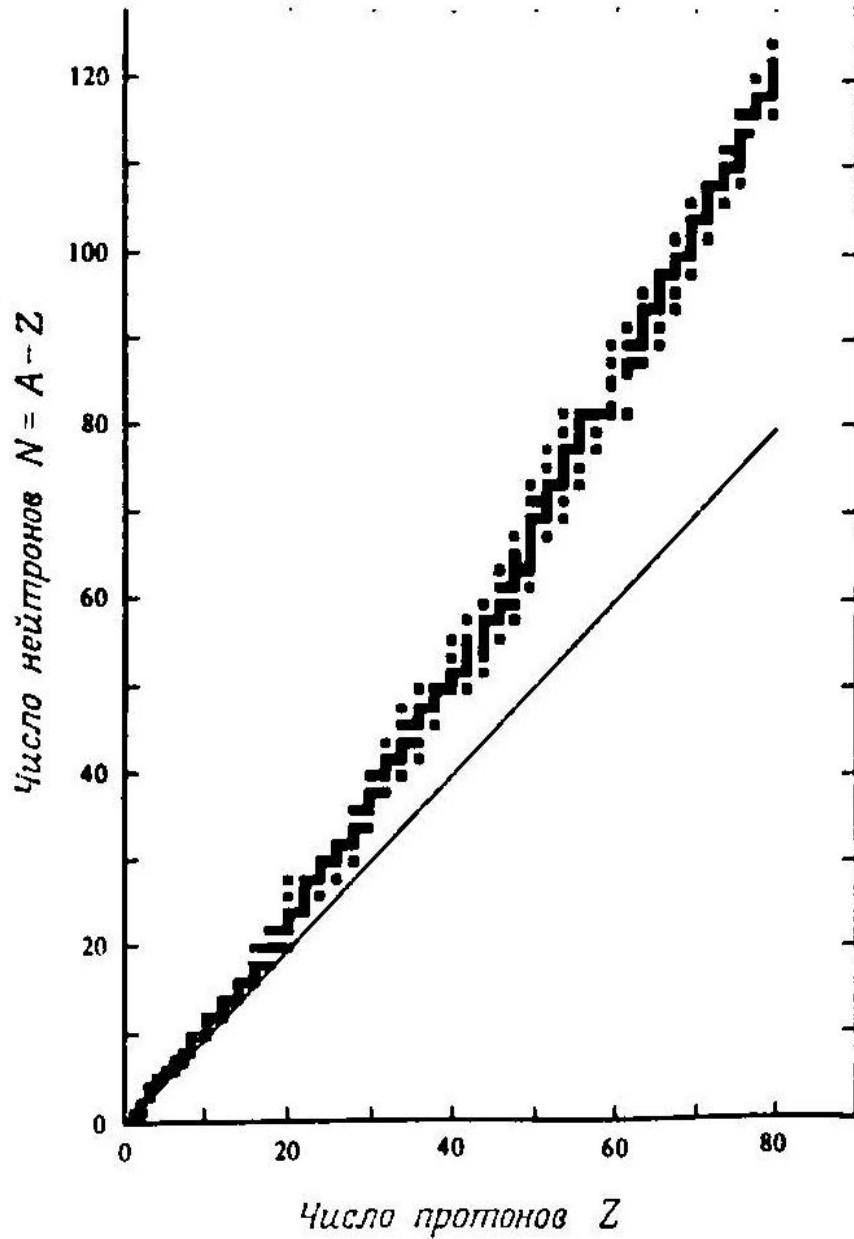
Тождественные нейтроны вынуждены расселяться поодиночке, в соответствии с правилом запрета Паули

Протоны и нейтроны расселяются попарно, в результате чего суммарная энергия уменьшается





Область стабильных ядер



$$N_p = \frac{(N_p + N_n)}{[1,98 + 0,015(N_p + N_n)^{2/3}]}$$

Ядро	M	Z (расч.)	Z (реал.)
He	4	1,98	2
C	12	5,83	6
Na	23	10,95	11
Cl	35	16,35	17
Au	197	79,18	79
Pb	207	82,64	82
U	238	93,11	92

При значительном нарушении протонно-нейтронного баланса ядро становится **РАДИОАКТИВНЫМ** и подвергается определенному виду распада.

Ядро ^{14}C

Реально
 $6\text{ p} + 8\text{ n}$

Оптимально
 $7\text{ p} + 7\text{ n}$



Электронный распад (7 000 распадов/с в человеческом теле)

Ядро ^{12}N

Реально
 $7\text{ p} + 5\text{ n}$

Оптимально
 $6\text{ p} + 6\text{ n}$



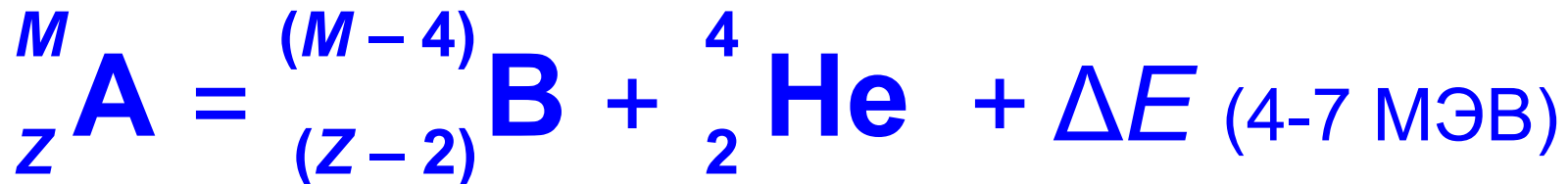
Позитронный распад

Ядерная химия

Нестабильные ядра самопроизвольно превращаются в более стабильные

α -распад

Причина: чрезмерно большой заряд ядра, что приводит к выбросу α -частиц (ядер ${}^4\text{He}$)

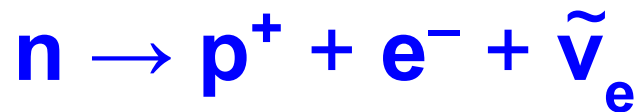


(1 МЭВ, в расчете на 1 моль актов распада, соответствует $1,3 \cdot 10^{12}$ Дж)

1 кг радия — 10^{14} Дж, 1 кг нефти — 10^7 Дж.

β-распад

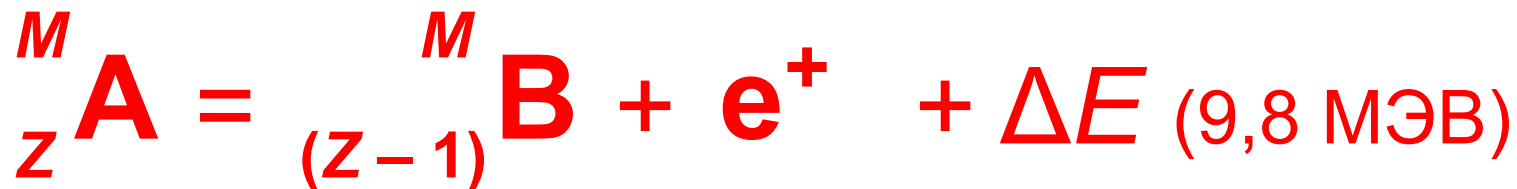
Причина: нарушение протонно-нейтронного
баланса



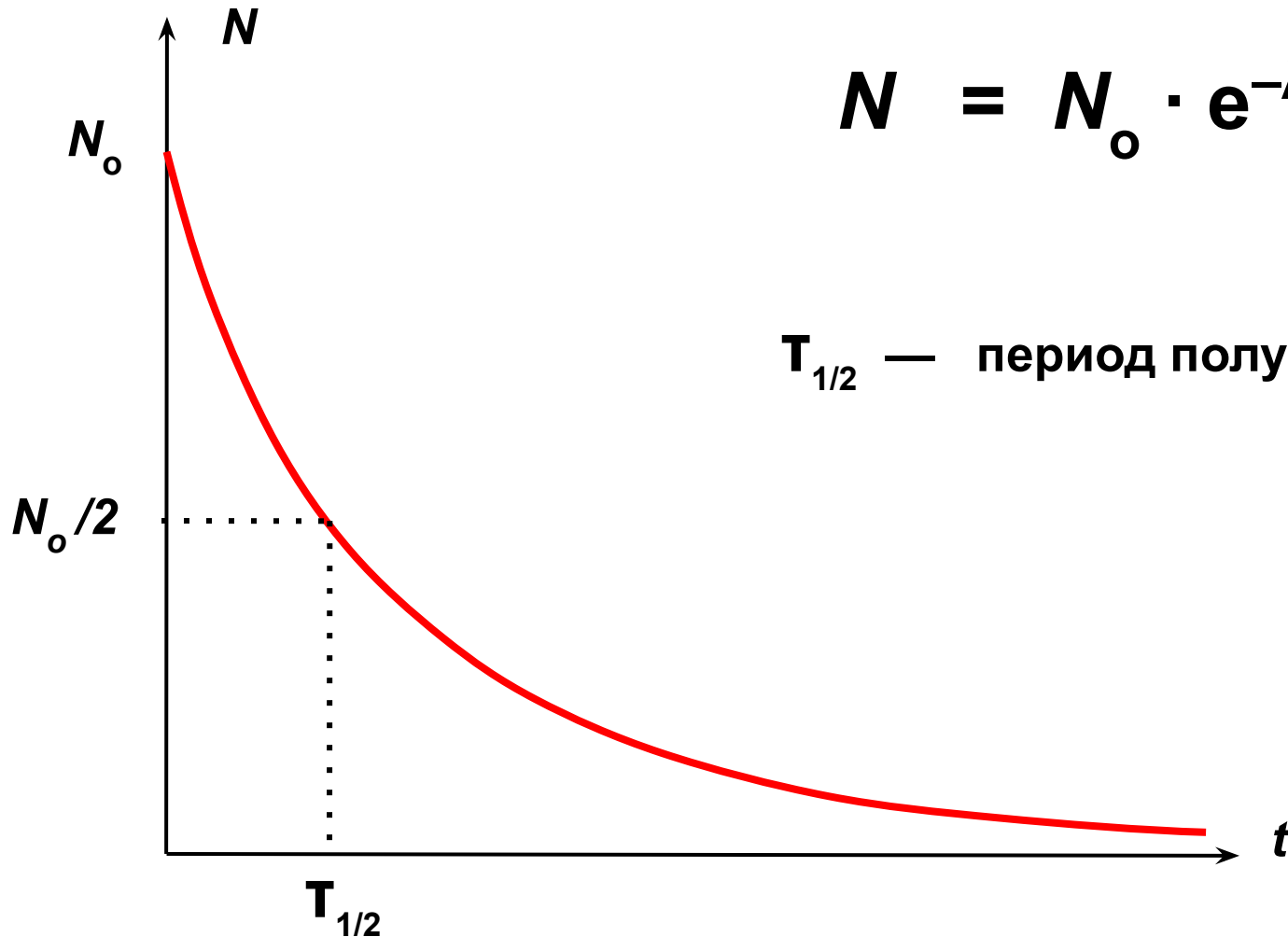
Электронный (или β⁻)
распад



Позитронный (или β⁺)
распад



Скорость распада

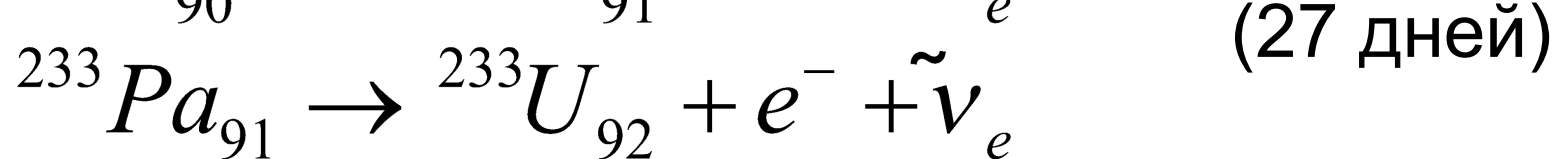
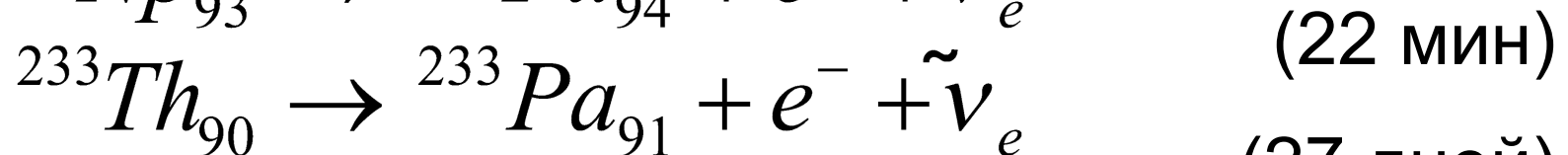
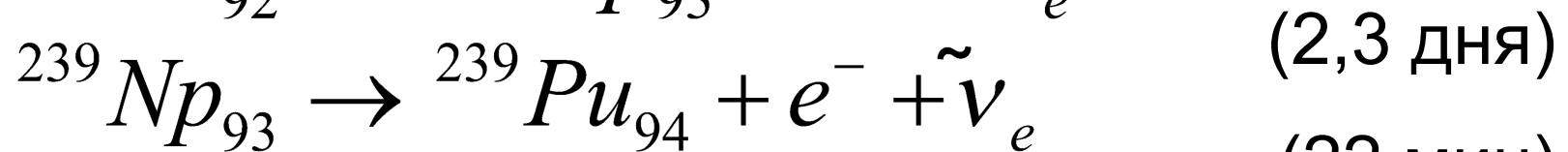
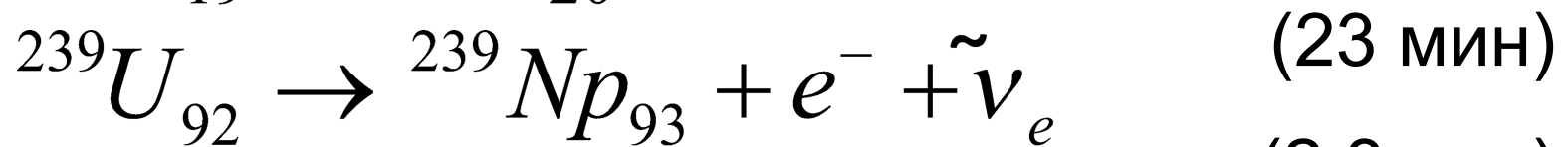
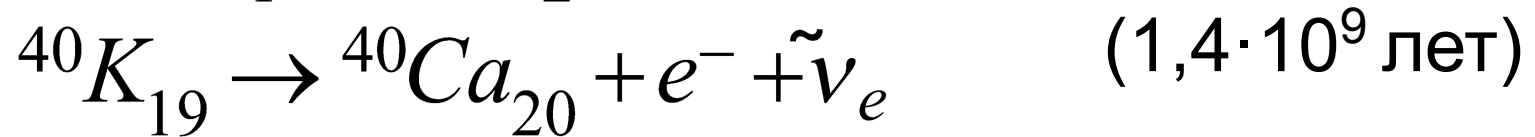
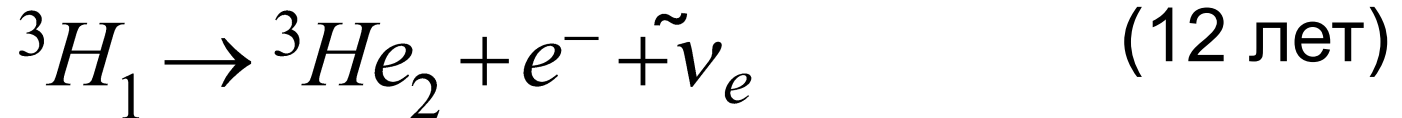


$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

$T_{1/2}$ — период полураспада

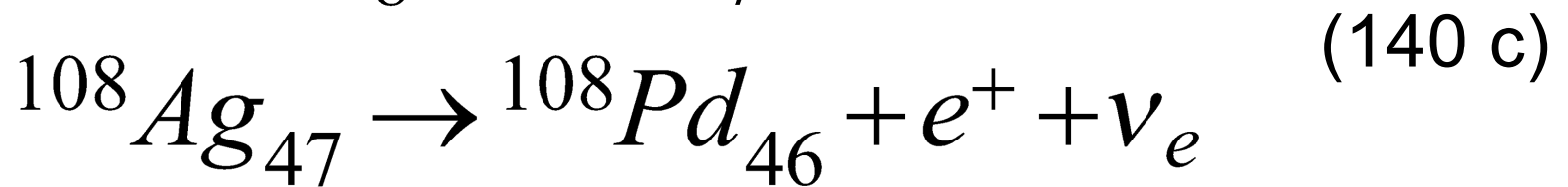
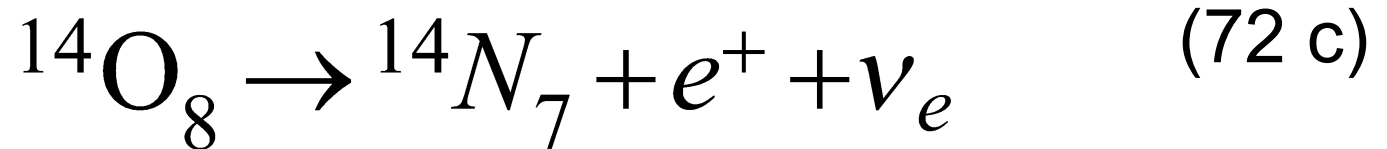
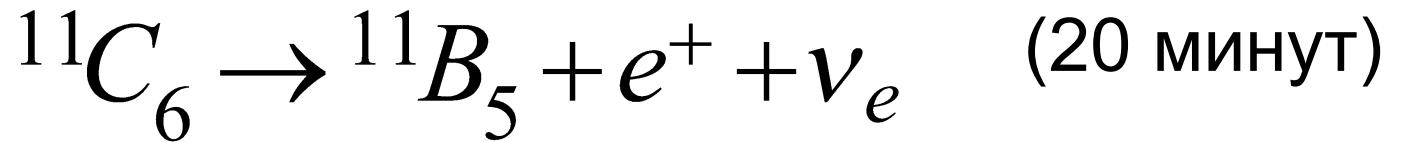
Электронный распад (β^- -распад)

Примеры:



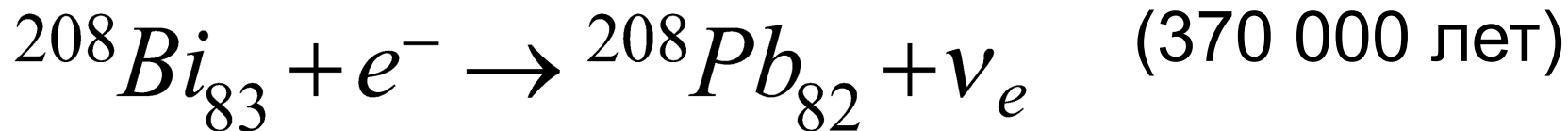
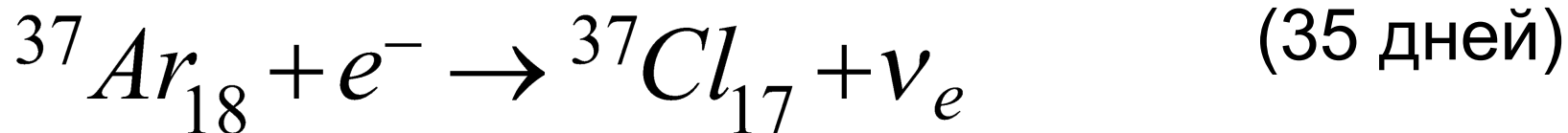
Позитронный распад (β^+ -распад)

Примеры:

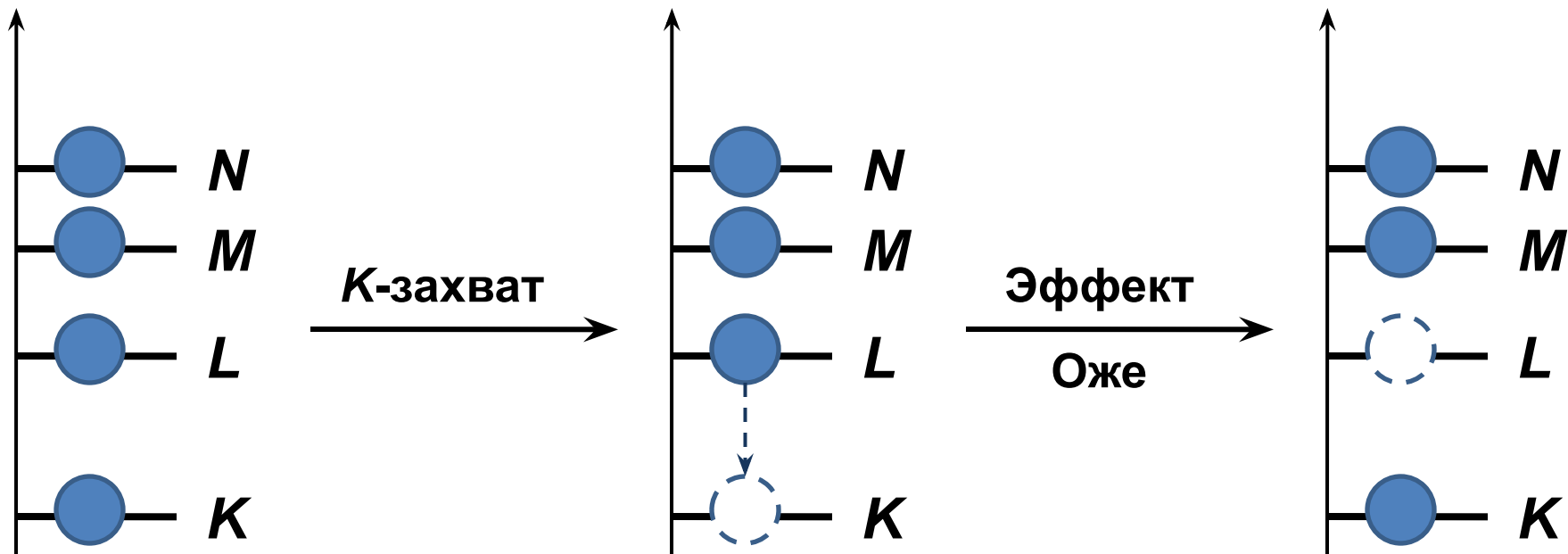
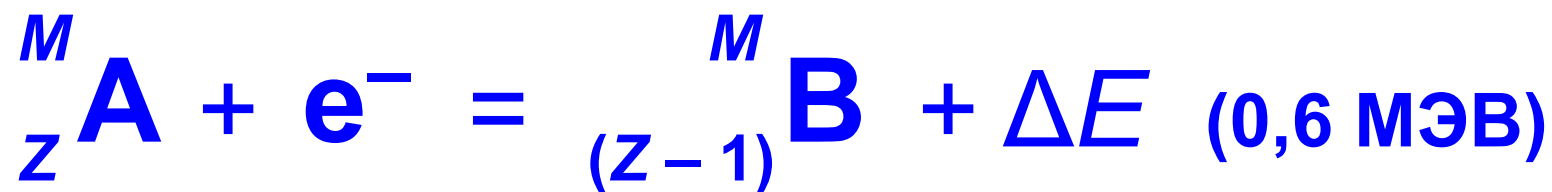
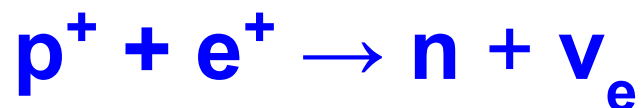


Электронный захват (e-захват, K-захват)

Примеры

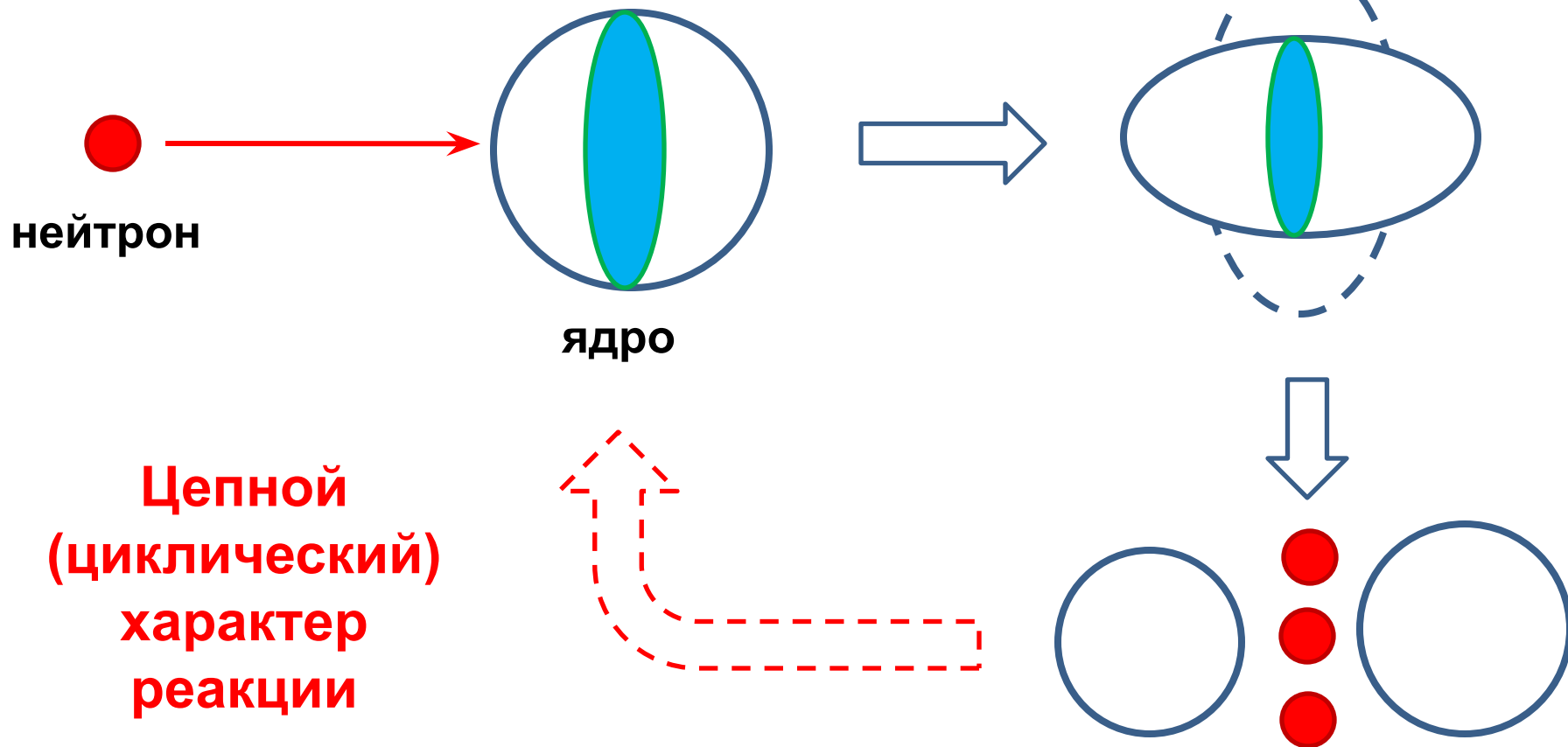
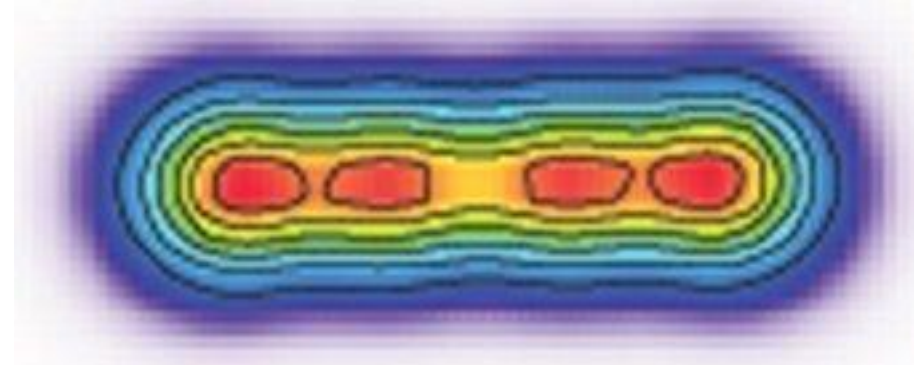


K-захват: проникновение электрона с
K-оболочки в ядро

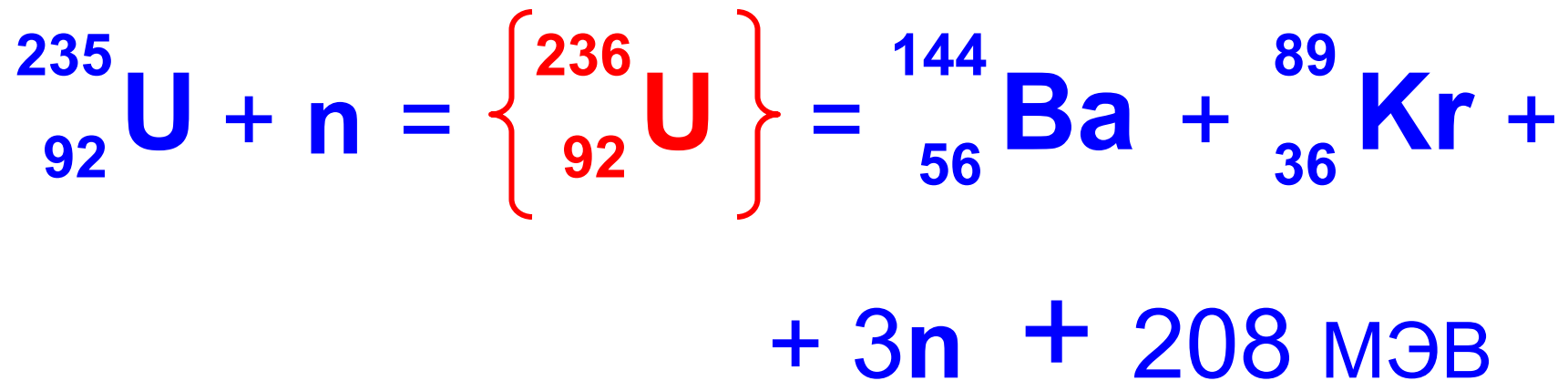


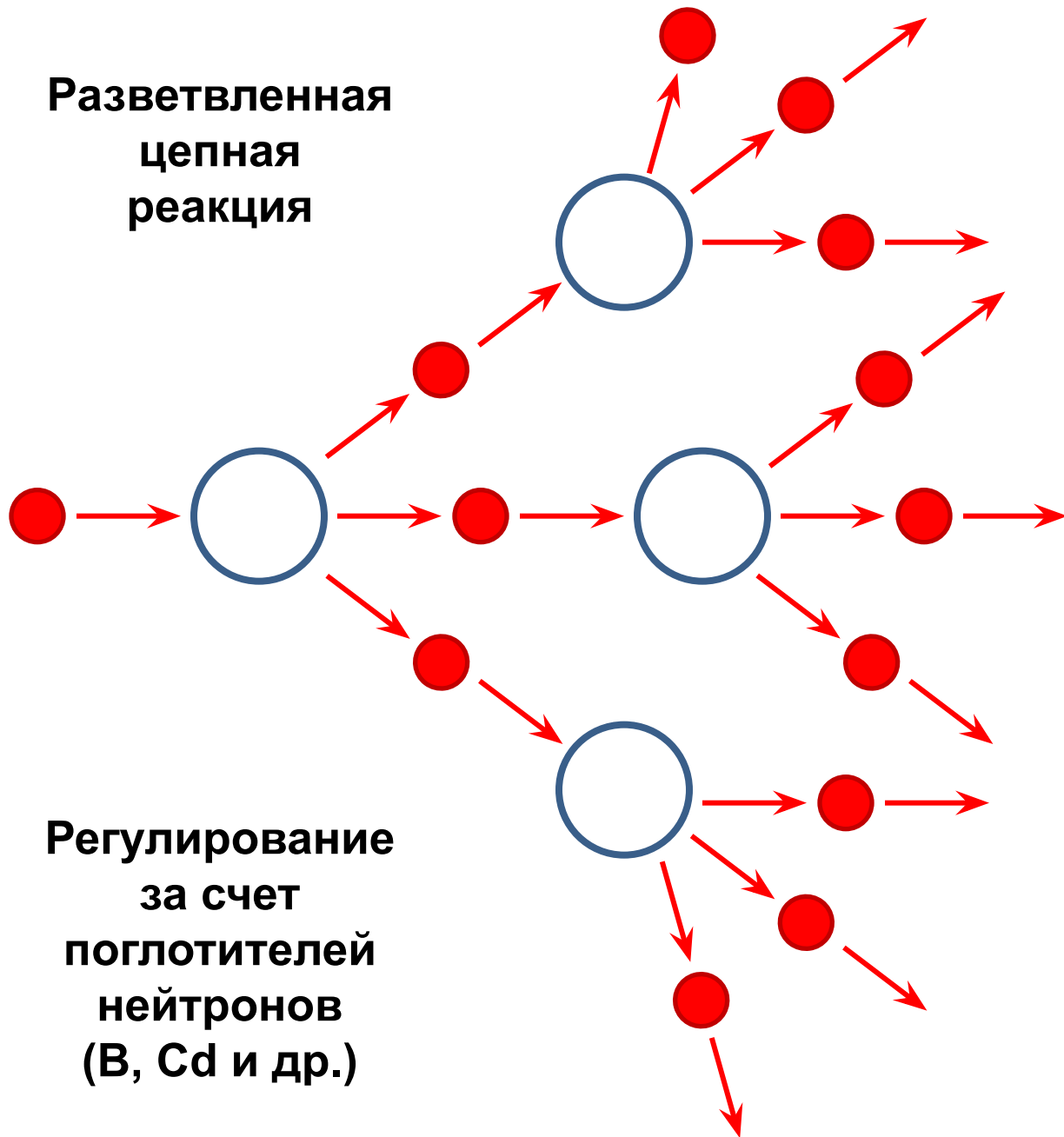
Реакция деления

Причина: потеря устойчивости большого ядра при его возмущении внешними силами



$$\begin{aligned}
 \begin{matrix} (M_1 + M_2 + k) \\ (Z_1 + Z_2) \end{matrix} \mathbf{A} + \mathbf{n} &= \frac{M_1}{Z_1} \mathbf{B} + \frac{M_2}{Z_2} \mathbf{C} + \\
 &+ (k + 1)\mathbf{n} + \Delta E
 \end{aligned}$$





**Разветвленная
цепная
реакция**

**Атомная
бомба**

**Атомный
реактор**

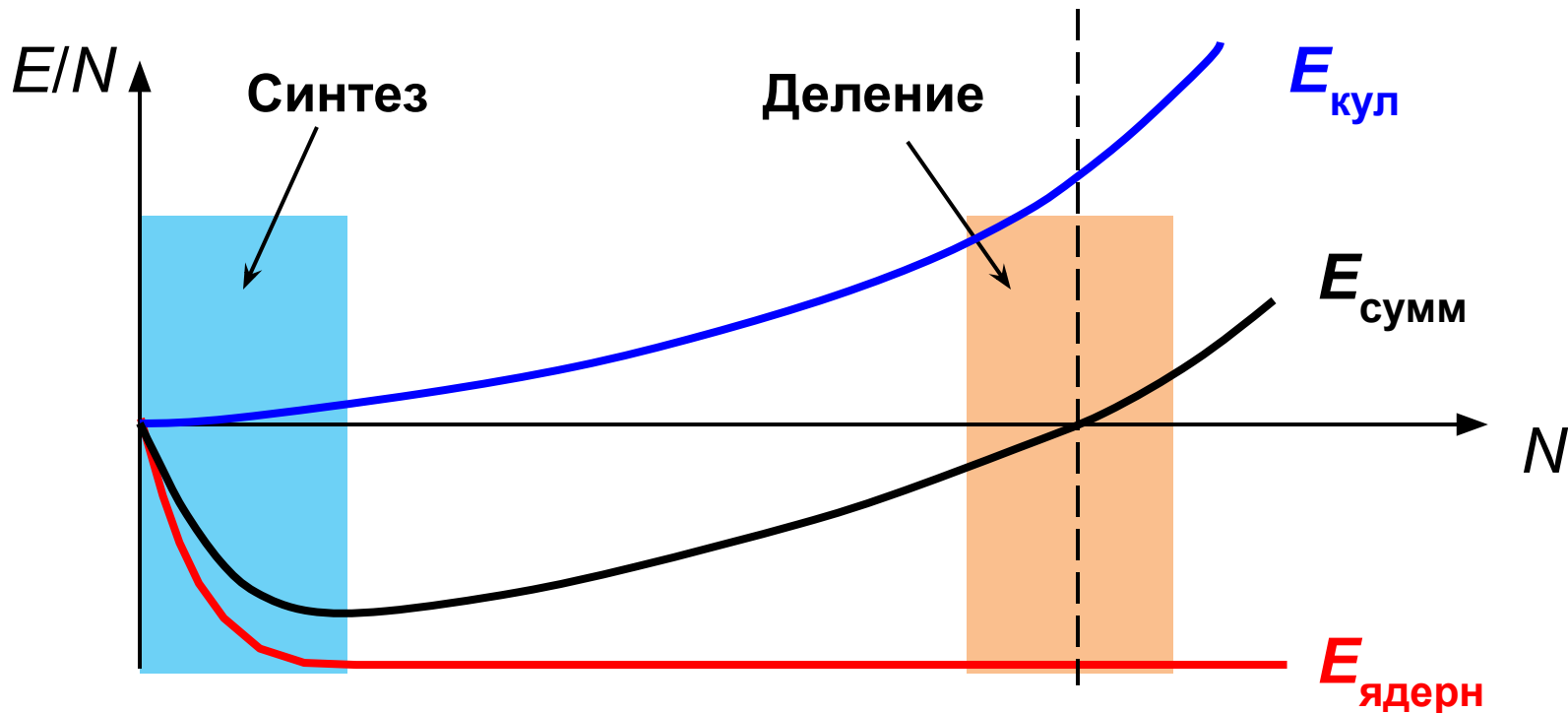
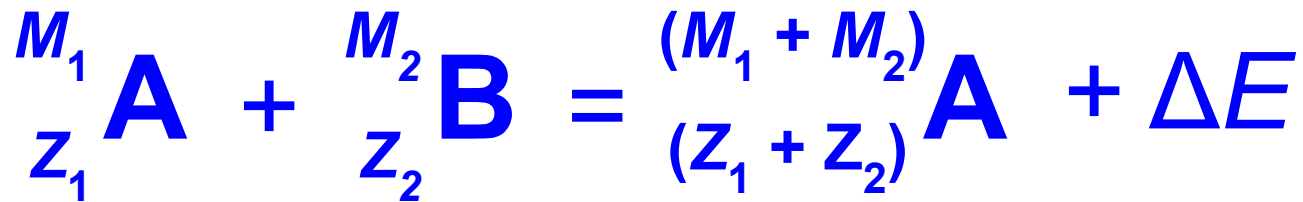
**Регулирование
за счет
поглотителей
нейтронов
(В, Cd и др.)**

**Критическая
масса (объем)**

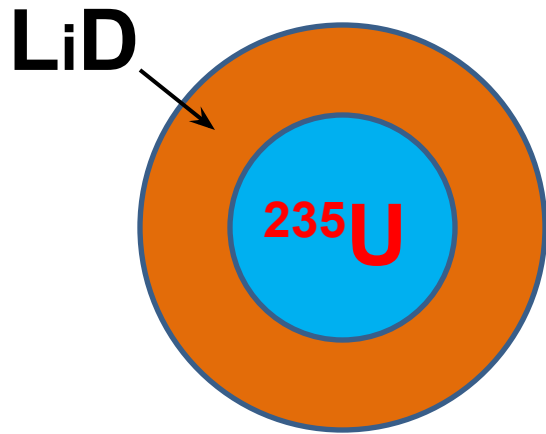
**Пространственная
форма**

Реакция синтеза

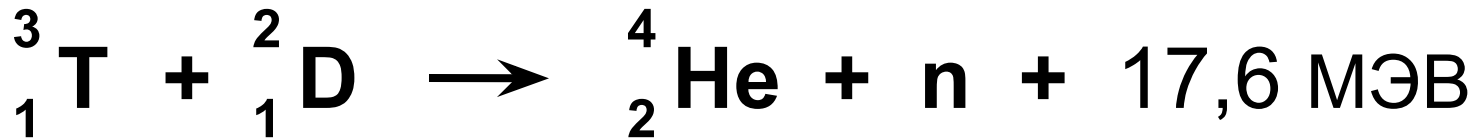
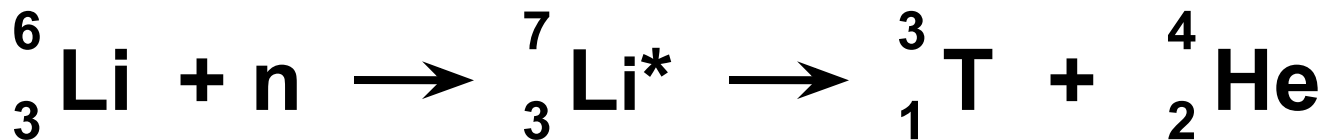
Причина: выигрыш в энергии за счет появления
новых ядерных сил типа **n-n**, **n-p** и **p-p**



Реакции синтеза протекают **при высокой температуре ($T > 10^9$ К)**, так как для сближения взаимодействующих ядер необходимо преодолеть большие силы кулоновского отталкивания

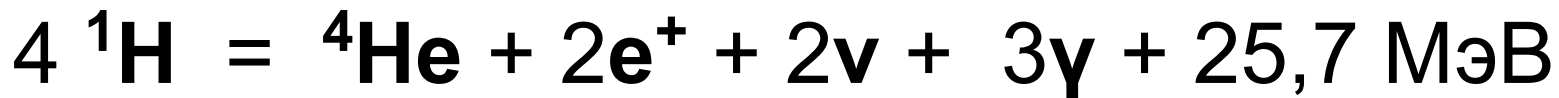
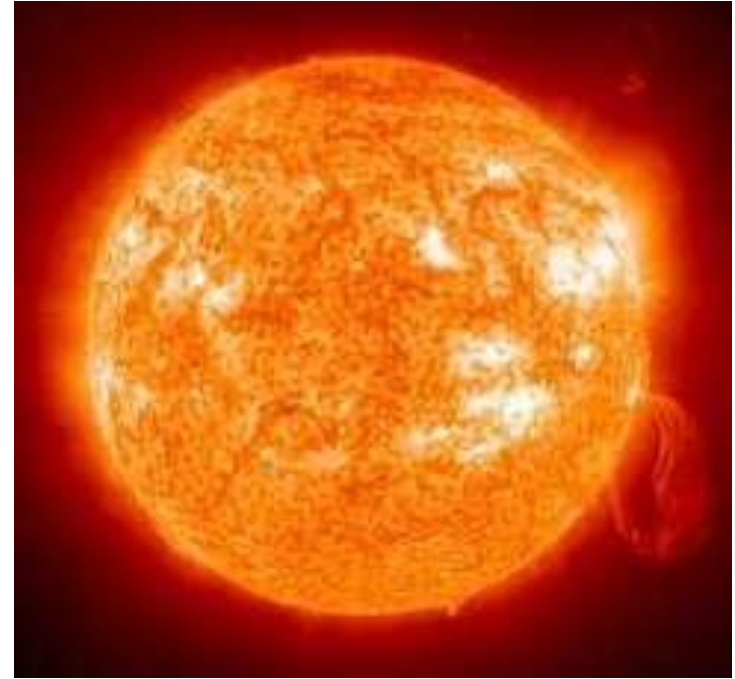
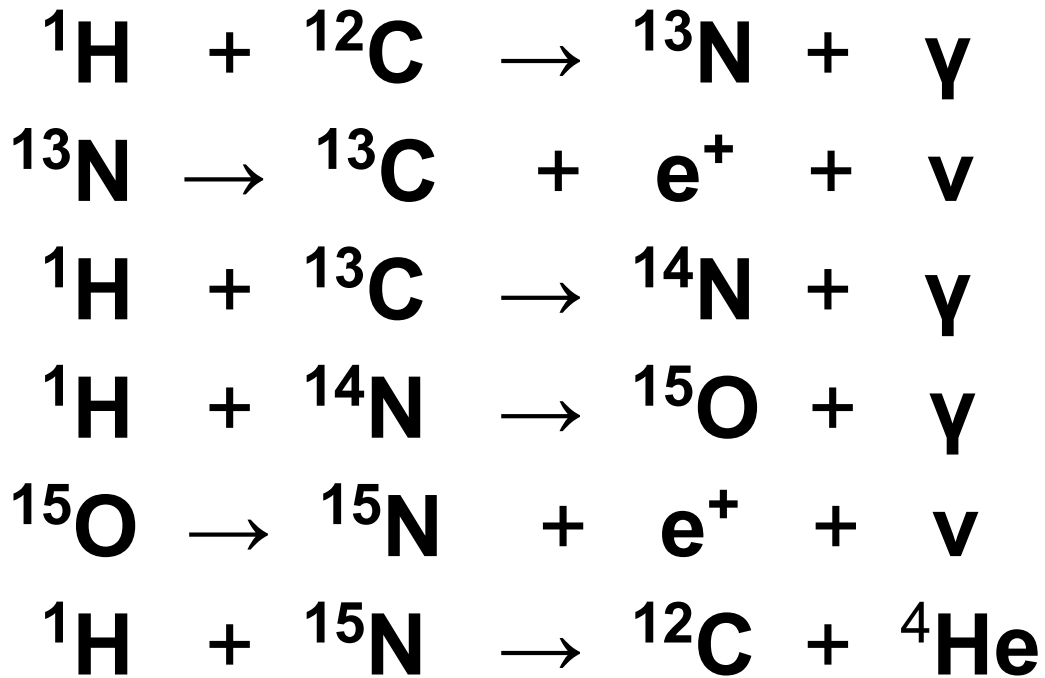


Термоядерная
(водородная)
бомба

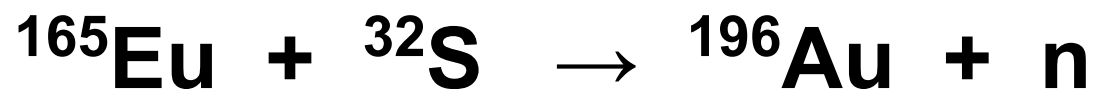




Цикл Бете (горение звезд)



Реакции типа «мишень-снаряд»

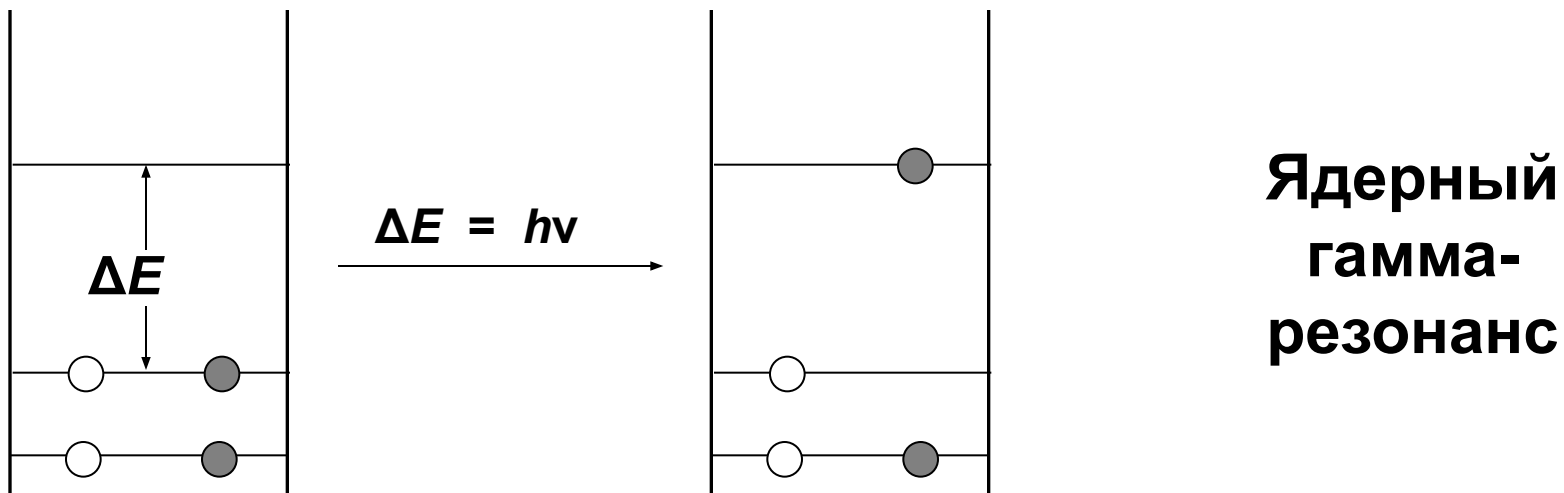


Научные
исследования в
области ядерной
химии

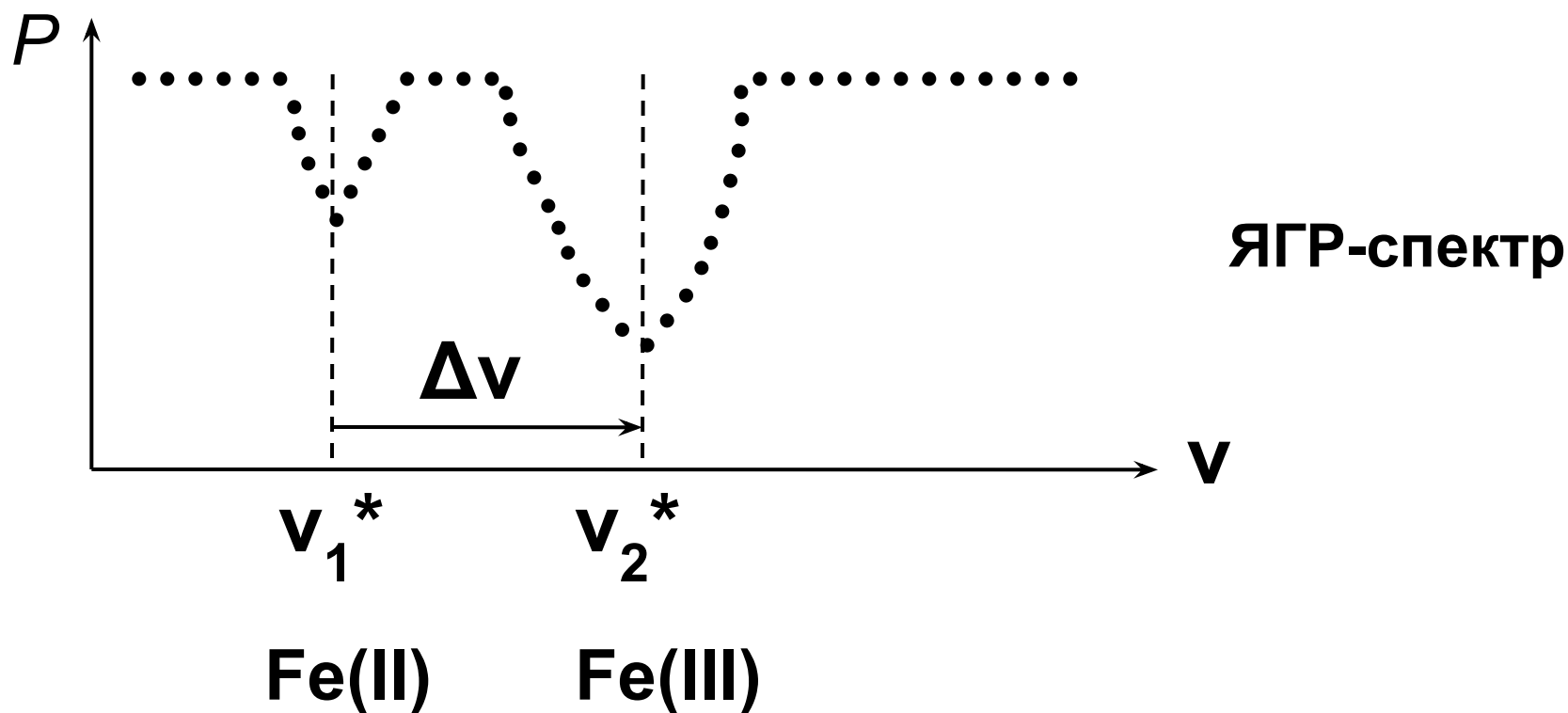
Синтез
трансурановых
элементов



Ядерная спектроскопия



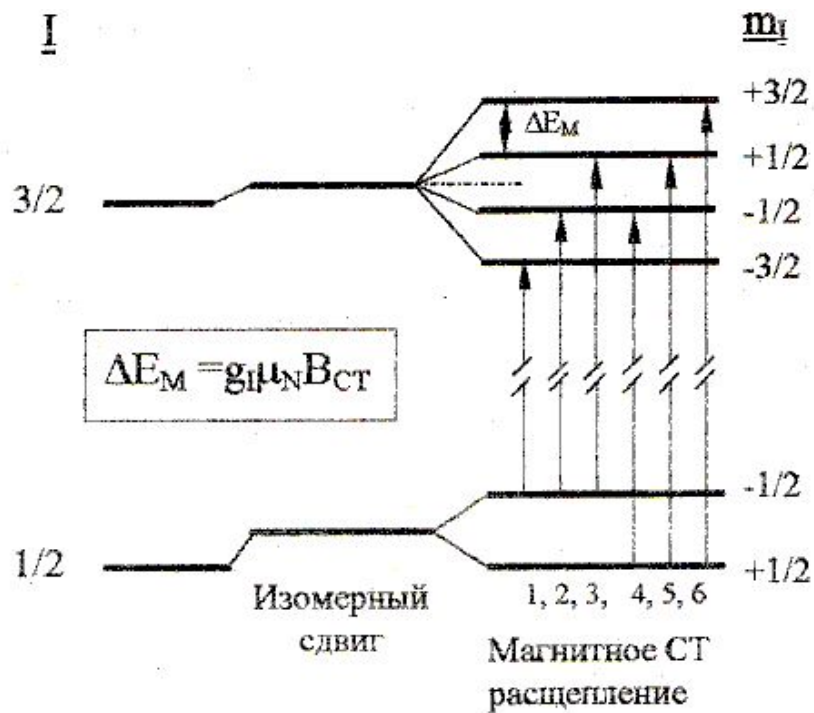
Мессбауэровская спектроскопия



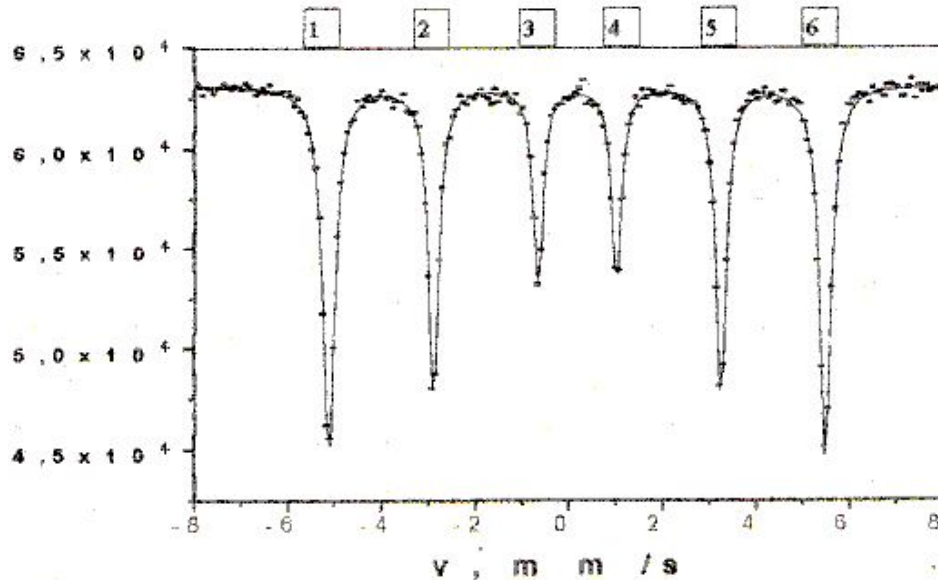
$\Delta\nu$ — химический сдвиг

Элементный
состав

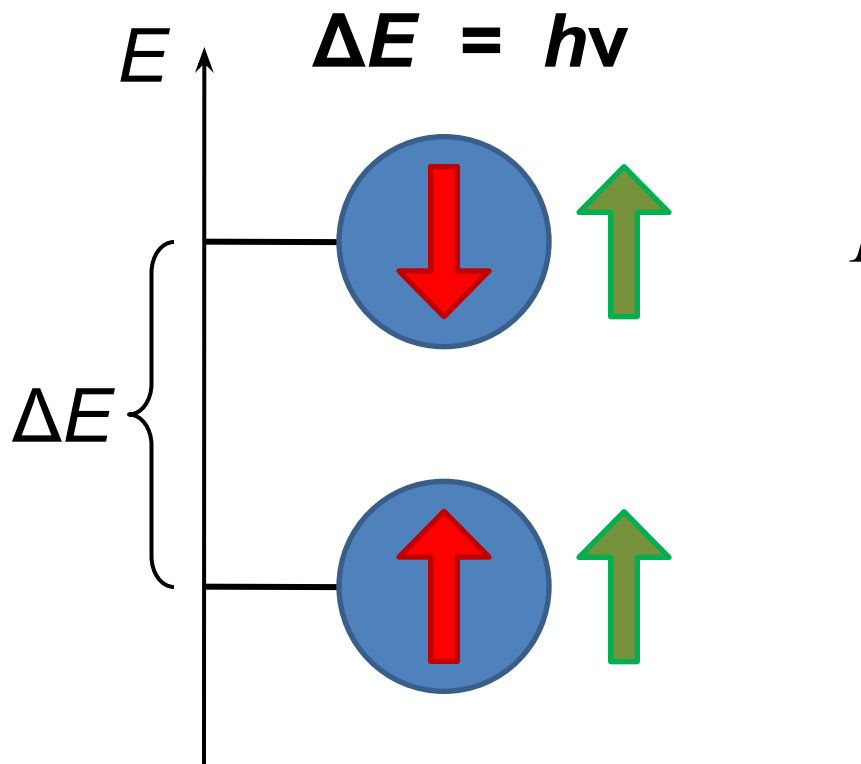
Валентные
состояния



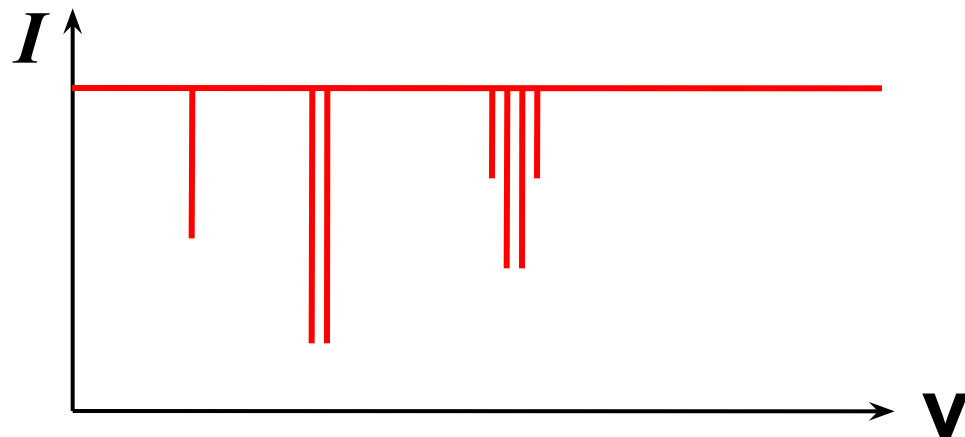
Магнитная СТ структура ядерных уровней ^{57}Fe и характерный вид мёссбауэровского спектра. Стрелками показаны разрешенные гамма-переходы.



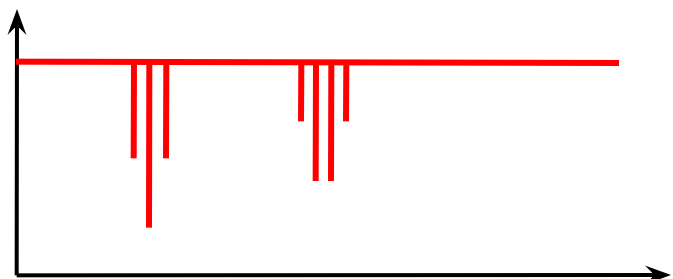
Ядерный магнитный резонанс



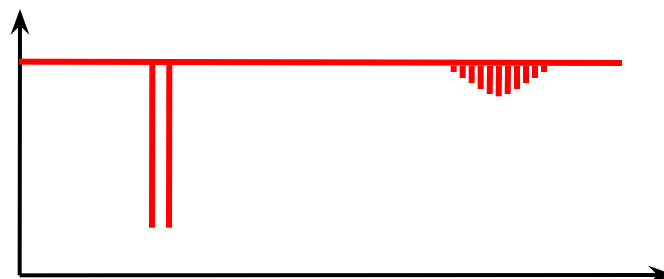
Химическое строение молекул



ЯМР-спектроскопия

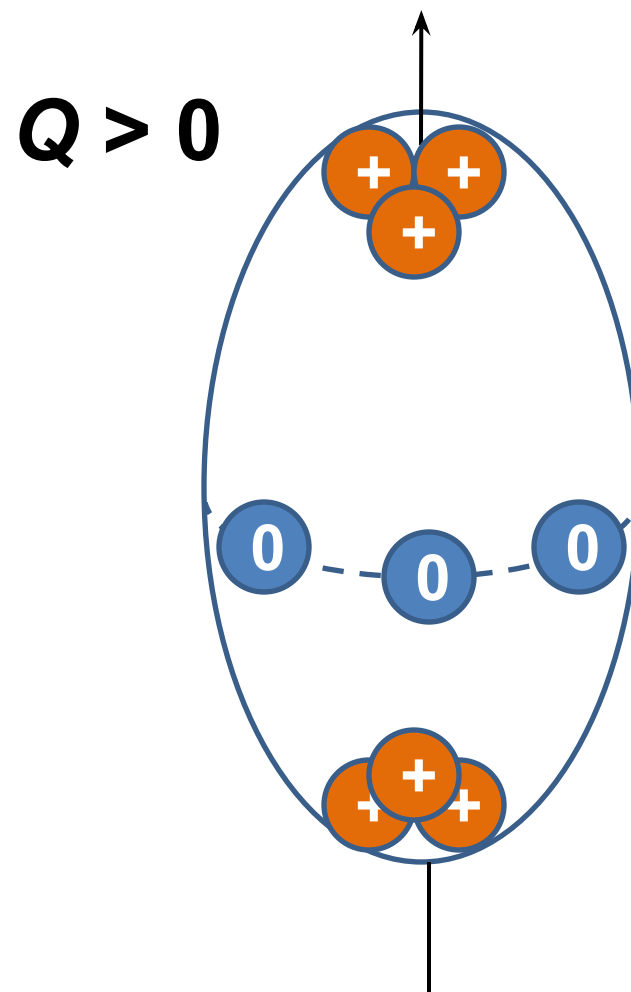
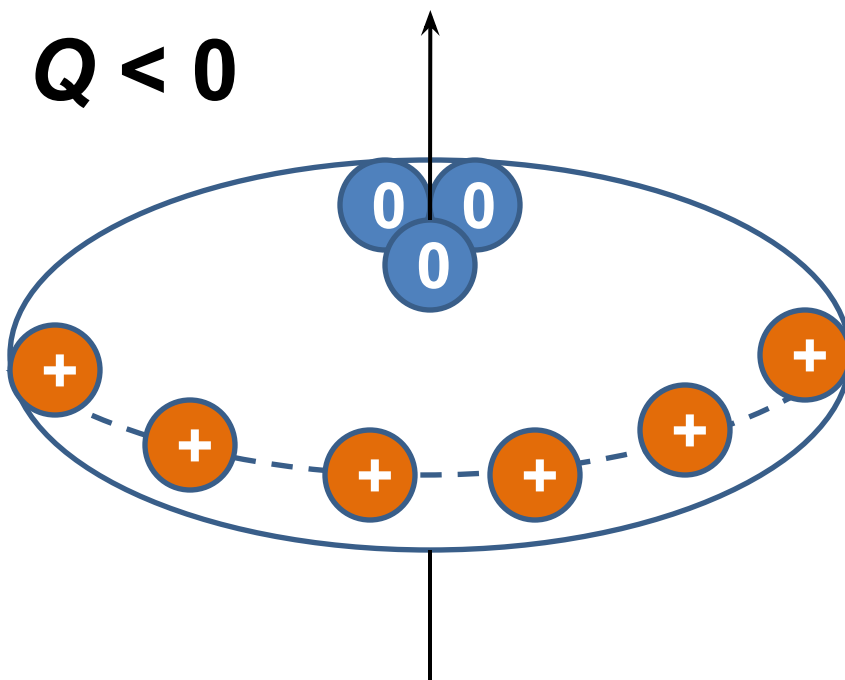


n-Бутан



Изобутан

Ядерный квадрупольный резонанс



Квадрупольный момент

$$Q = 0,4 Ze (b^2 - a^2)$$

где a — экваториальный радиус,

b — полярный радиус.

ЯКР-спектроскопия