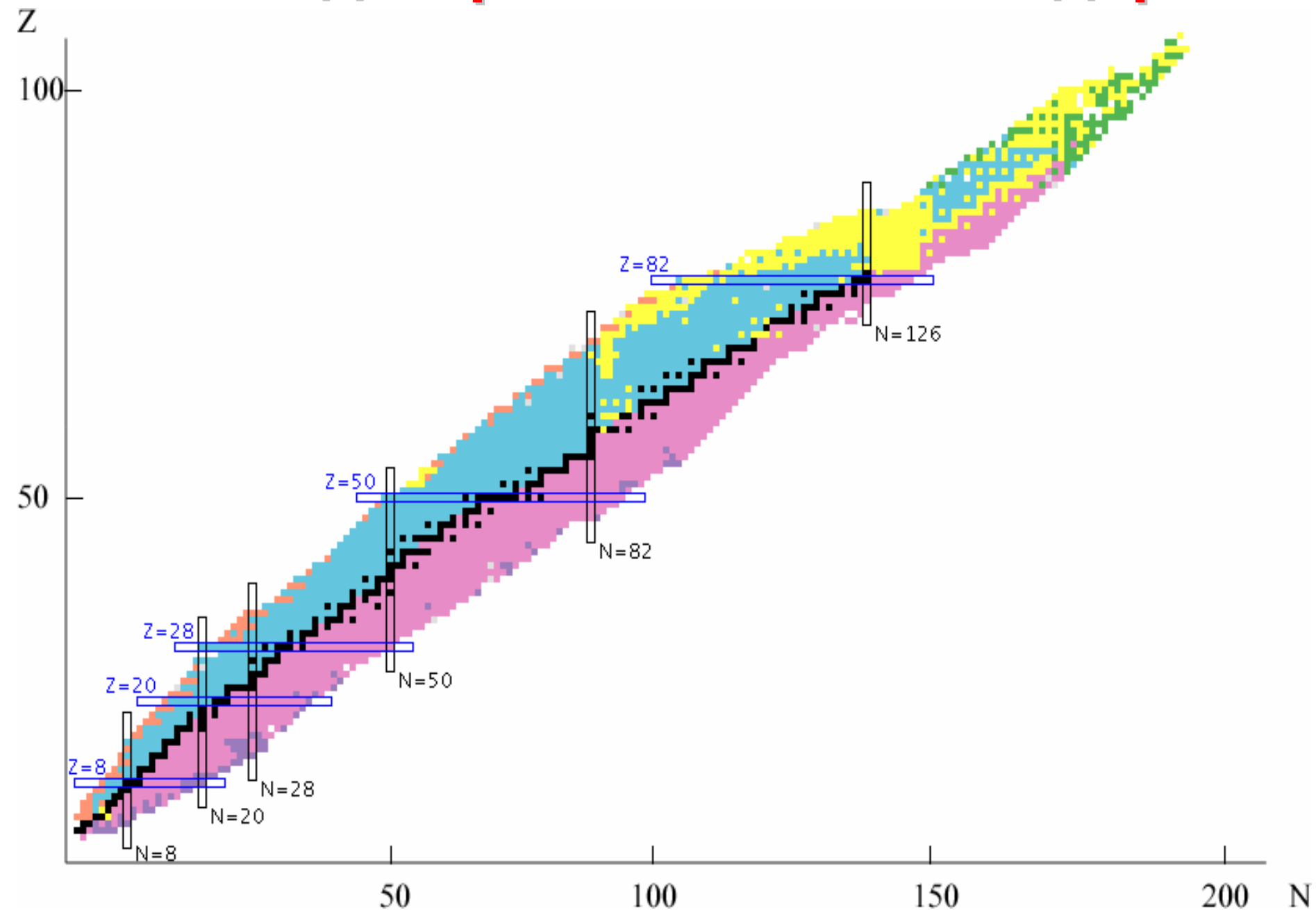




# Рождение и жизнь атомных ядер

**РАДИОАКТИВНОСТЬ**

# N-Z диаграмма атомных ядер



# Ядерная физика в Интернете



Проект кафедры общей ядерной физики физического факультета  
МГУ

осуществляется при поддержке **НИИЯФ МГУ**.

## Учебные материалы курса

### "Физика атомного ядра и частиц"

- ▶ [Физика ядра и частиц. XX век](#)
- ▶ [Частицы и атомные ядра](#)
- ▶ [Шпаргалка для отличника \(Частицы и ядра\)](#)
- ▶ [Программа курса "Физика ядра и частиц"](#)
- ▶ [Лекции профессора Б.С. Ишханова 2014](#)
- ▶ [Лекции профессора И.М. Капитонова 2014](#)
- ▶ [Частицы и атомные ядра \(основные вопросы по курсу\)](#)
- ▶ [Обязательные вопросы для допуска к экзамену](#)
- ▶ [Семинары по физике ядра и частиц](#)
- ▶ [Частицы и атомные ядра. Семинары. Задачи](#)
- ▶ [Задачи и решения](#)
- ▶ [Описания задач общего ядерного практикума физического факультета МГУ](#)
- ▶ [Тесты по физике ядра и частиц](#)
- ▶ [Темы курсовых работ для студентов второго курса](#)

## Материалы спецкурсов

- ▶ [Рождение и жизнь атомных ядер](#)
- ▶ [Ядерная физика и человек](#)
- ▶ [Микромир и Вселенная](#)
- ▶ [История атомного ядра](#)
- ▶ [Модели атомных ядер](#)
- ▶ [12 лекций по физике атомного ядра](#)
- ▶ [Ядерные реакции](#)
- ▶ [Ядерные реакции \(задачи\)](#)
- ▶ [Квантовая теория столкновений](#)
- ▶ [Фотоядерные реакции. Современный статус](#)

## Разное

- ▶ [Поиск по сайту](#)
- ▶ [Материалы научного семинара по ядерной физике НИИЯФ МГУ](#)
- ▶ [Что нового на сайте](#)
- ▶ [100-летие открытия атомного ядра. Резерфорд](#)
- ▶ [Нобелевские лауреаты по физике](#)
- ▶ [Хроника открытий в физике ядра и частиц](#)
- ▶ [Биографии физиков](#)
- ▶ [Фотографии физиков](#)
- ▶ [Ссылки на ресурсы по ядерной физике](#)
- ▶ [Школы, семинары, рабочие совещания, конференции](#)
- ▶ [Физика атомного ядра и частиц в УФН](#)
- ▶ [Рефераты студентов](#)
- ▶ [Интерактивные проекты](#)
- ▶ [Физики шутят](#)
- ▶ [О сайте](#)

## Справочные материалы

- ▶ [Частицы и атомные ядра. Основные понятия](#)
- ▶ [Карта атомных ядер](#)
- ▶ [Характеристики нуклида](#)
- ▶ [База данных по ядерным реакциям](#)
- ▶ [База данных по ядерным реакциям](#)

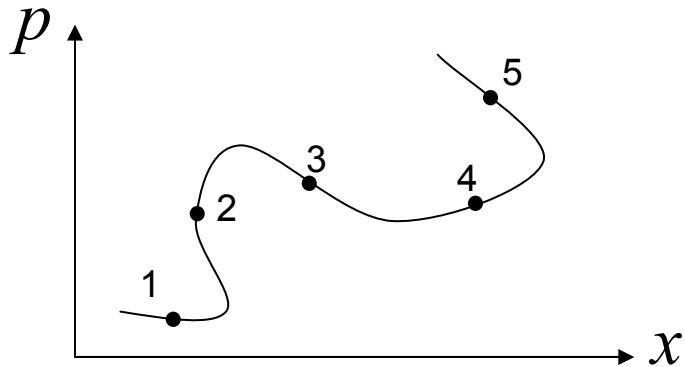
# Классическая физика

$$x, p, t$$

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

$$\frac{dU}{dx} = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$H = U + E$$



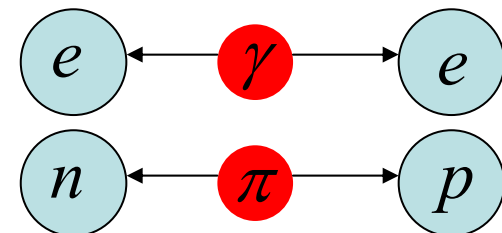
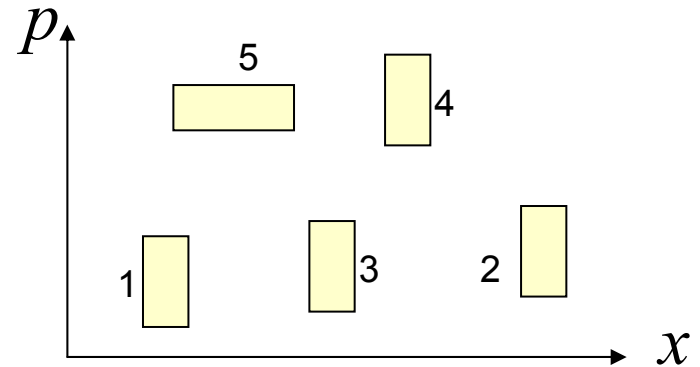
# Квантовая физика

$$\psi(x, t)$$

$$i\hbar \frac{d\psi}{dt} = (\hat{U} + \hat{E})\psi$$

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \approx \hbar$$

$$\hat{H}\psi = E\psi$$



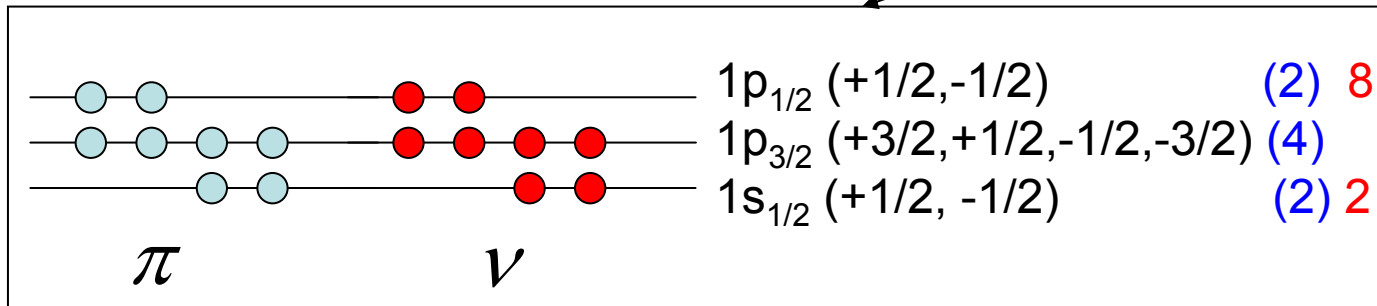
# Модели ядер

Капельная модель ядра

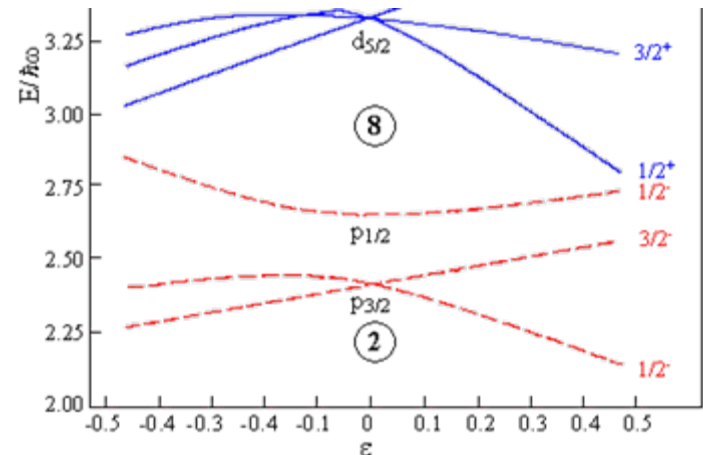
Фермион  
Принцип Паули

Магические числа  
2, 8, 20, 28, 50, 82, 126

Модель ядерных оболочек



Деформированные ядра



# Радиоактивность

**Радиоактивность** – свойство атомных ядер **самопроизвольно** изменять свой состав в результате испускания частиц или ядерных фрагментов.

# Радиоактивный распад

- $\alpha$ -распад – испускание ядрами  $\alpha$ -частиц,
- $\beta$ -распад – испускание (или поглощение) лептонов,
- $\gamma$ -распад – испускание  $\gamma$ -квантов,
- спонтанное деление – распад ядра на два осколка сравнимой массы.

К более редким видам радиоактивного распада относятся испускание ядрами одного или двух протонов, а также испускание **кластеров** – лёгких ядер от  $^{12}\text{C}$  до  $^{32}\text{S}$ . Во всех видах радиоактивности (кроме гамма-радиоактивности) изменяется состав ядра – число протонов  $Z$ , массовое число  $A$  или то и другое одновременно.



# Радиоактивность

Радиоактивный распад происходит только в том случае, если масса исходного ядра  $M_i$  больше суммы масс продуктов распада  $\sum M_f$

$$M_i > \sum M_f .$$

Разность

$$Q = \left( M_i - \sum M_f \right) c^2$$

выделяется в виде энергии продуктов распада.

# Постоянная распада $\lambda$

Постоянная распада  $\lambda$  характеризует вероятность распада атомного ядра в единицу времени.

Если в образце в момент времени  $t$  содержится  $N$  радиоактивных ядер, то количество  $dN$  ядер, распадающихся в интервал времени  $t \rightarrow t+dt$ , определяется соотношением

$$dN = -\lambda N dt$$

Знак «минус» означает, что общее число радиоактивных ядер уменьшается в результате распада.

# Закон радиоактивного распада

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

$N_0$  — количество ядер в радиоактивном источнике в начальный момент времени  $t = 0$ ,

$N(t)$  — количество радиоактивных ядер, **оставшихся** в источнике в момент времени  $t$ ,

$\lambda$  — постоянная распада.

Количество ядер радиоактивного источника, **распавшихся** за время  $t$ ,

$$N_0 - N(t) = N_0 (1 - e^{-\lambda t})$$

**Постоянная распада  $\lambda$**   
**Среднее время жизни  $\tau$**   
**Период полураспада  $T_{1/2}$**   
 **$\tau$  — среднее время жизни ядра**

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} t \left| \frac{dN}{dt} \right| dt}{\int_0^{\infty} \left| \frac{dN}{dt} \right| dt}$$

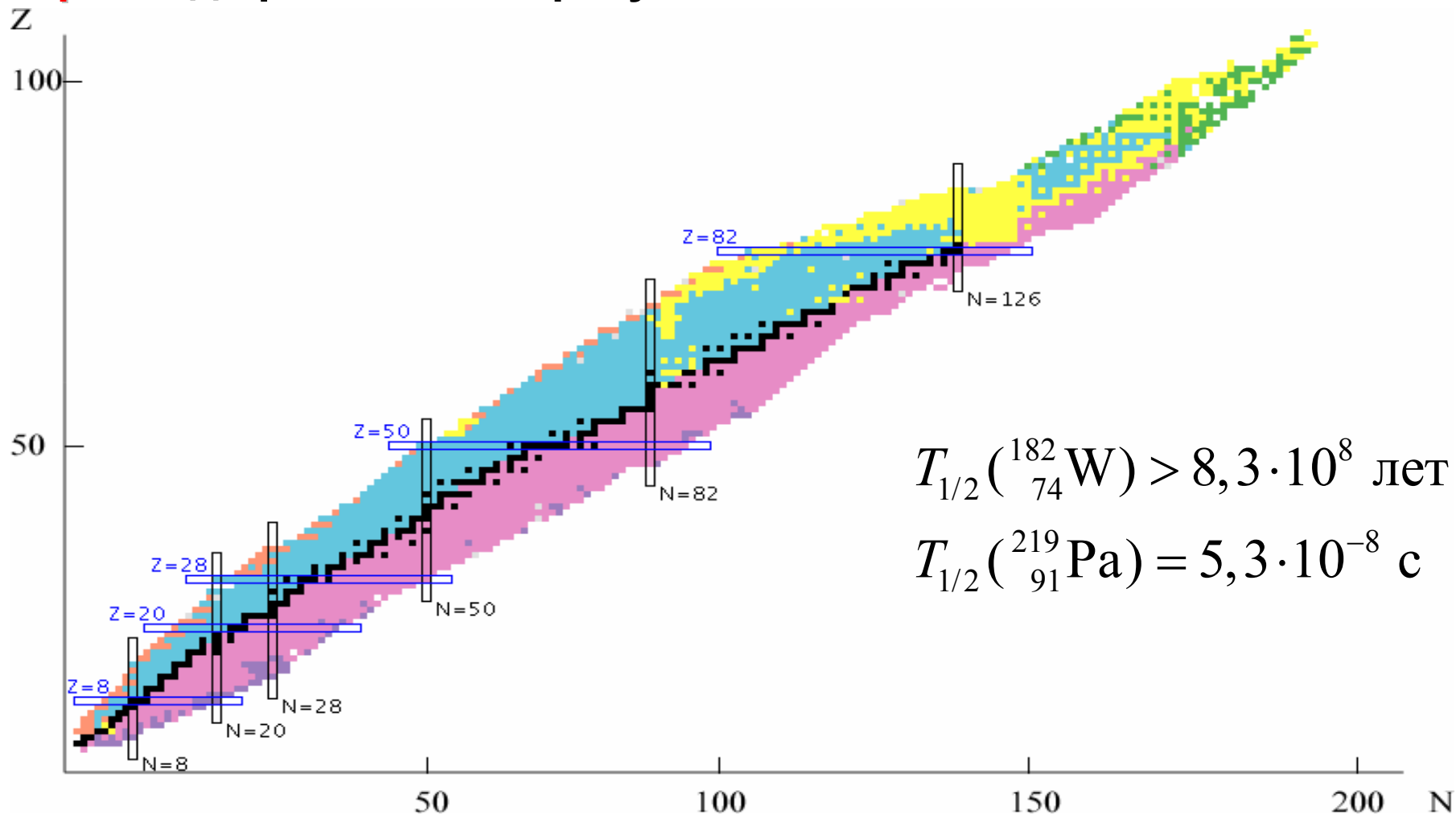
**$T_{1/2}$  - период полураспада – время, за которое число радиоактивных ядер уменьшается вдвое**

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$
$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} = \tau \cdot \ln 2$$

# $\alpha$ -распад

$\alpha$ -распад — распад атомных ядер, сопровождающийся испусканием  $\alpha$ -частицы (ядра  ${}^4\text{He}$ ).

$\alpha$ -распад происходит в результате сильного взаимодействия.



# Энергия $\alpha$ -распада $Q_\alpha$

Необходимым условием  $\alpha$ -распада ядра  $(A, Z)$  является

$$M(A, Z) > M(A - 4, Z - 2) + M_\alpha,$$

$M(A, Z)$  — масса исходного ядра,

$M(A - 4, Z - 2)$  — масса конечного ядра,

$M_\alpha$  — масса  $\alpha$ -частицы.

В результате  $\alpha$ -распада конечное ядро  $(A - 4, Z - 2)$  и  $\alpha$ -частица приобретают суммарную кинетическую энергию  $Q_\alpha$

$$Q_\alpha = [M(A, Z) - M(A - 4, Z - 2) - M_\alpha]c^2,$$

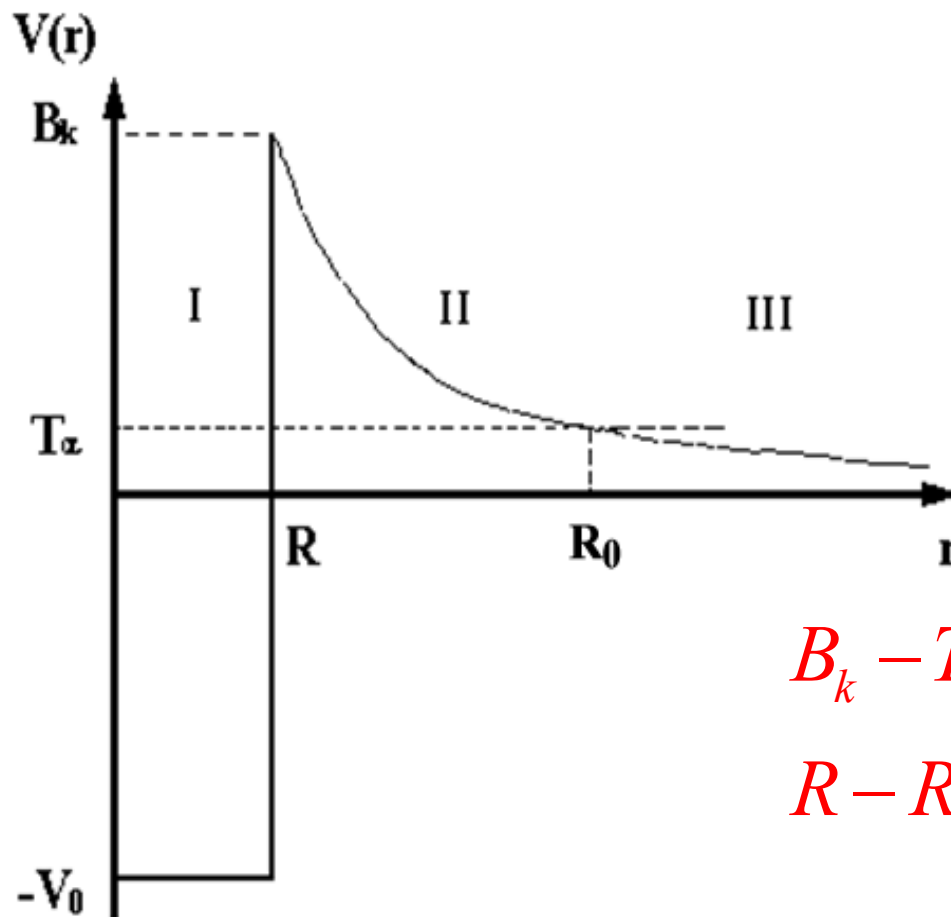
$Q_\alpha$  — энергия  $\alpha$ -распада.

Из законов сохранения энергии и импульса следует, что энергия  $\alpha$ -частицы  $T_\alpha$

$$T_\alpha = Q_\alpha \frac{M(A - 4, Z - 2)}{M(A - 4, Z - 2) + M_\alpha}.$$

$\alpha$ -частица уносит 98% энергии  $\alpha$ -распада.

# Прохождение $\alpha$ -частицы через потенциальный барьер



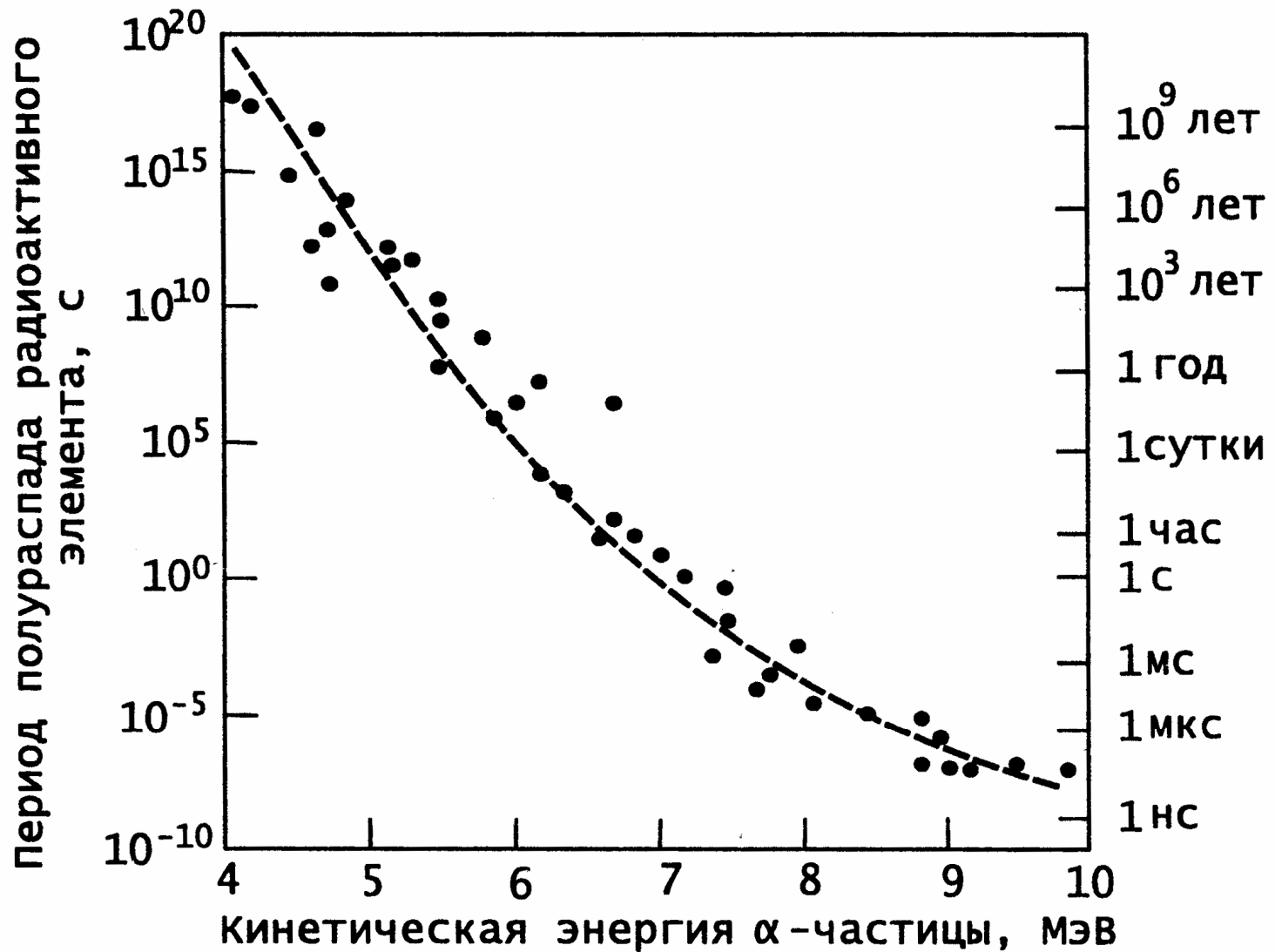
$$B_k - T_\alpha \approx 20 \text{ МэВ}$$

$$R - R_0 \approx 10^{-12} \text{ см}$$

Вероятность  $P$  прохождения  $\alpha$ -частицы с энергией  $T_\alpha$  через потенциальный барьер  $V(r)$

$$P = \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \int_R^{R_0} \sqrt{2\mu_\alpha [V(r) - T_\alpha]} dr\right) \approx e^{-84} \approx 10^{-36}$$

# Закон Гейгера-Неттола

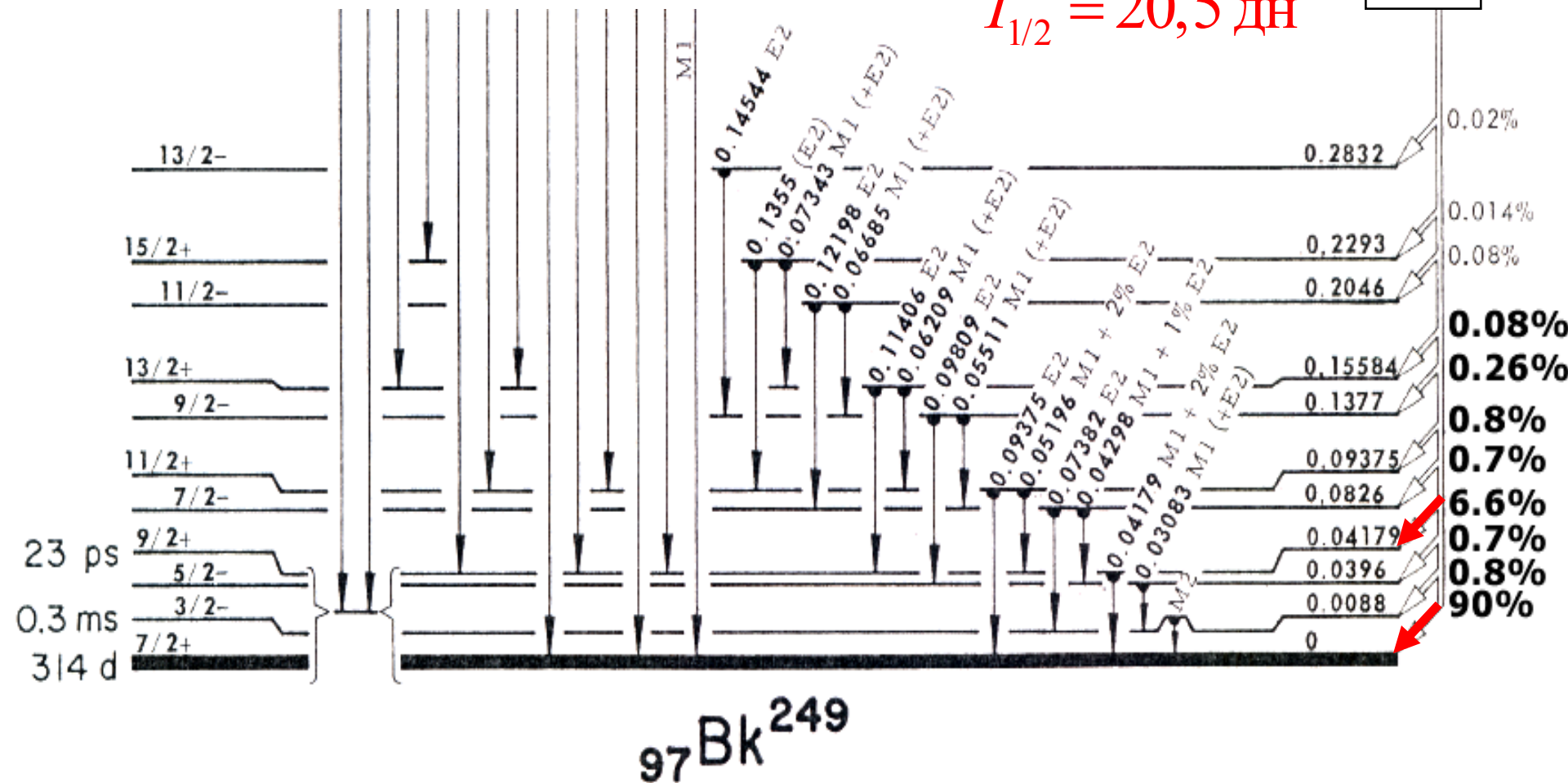




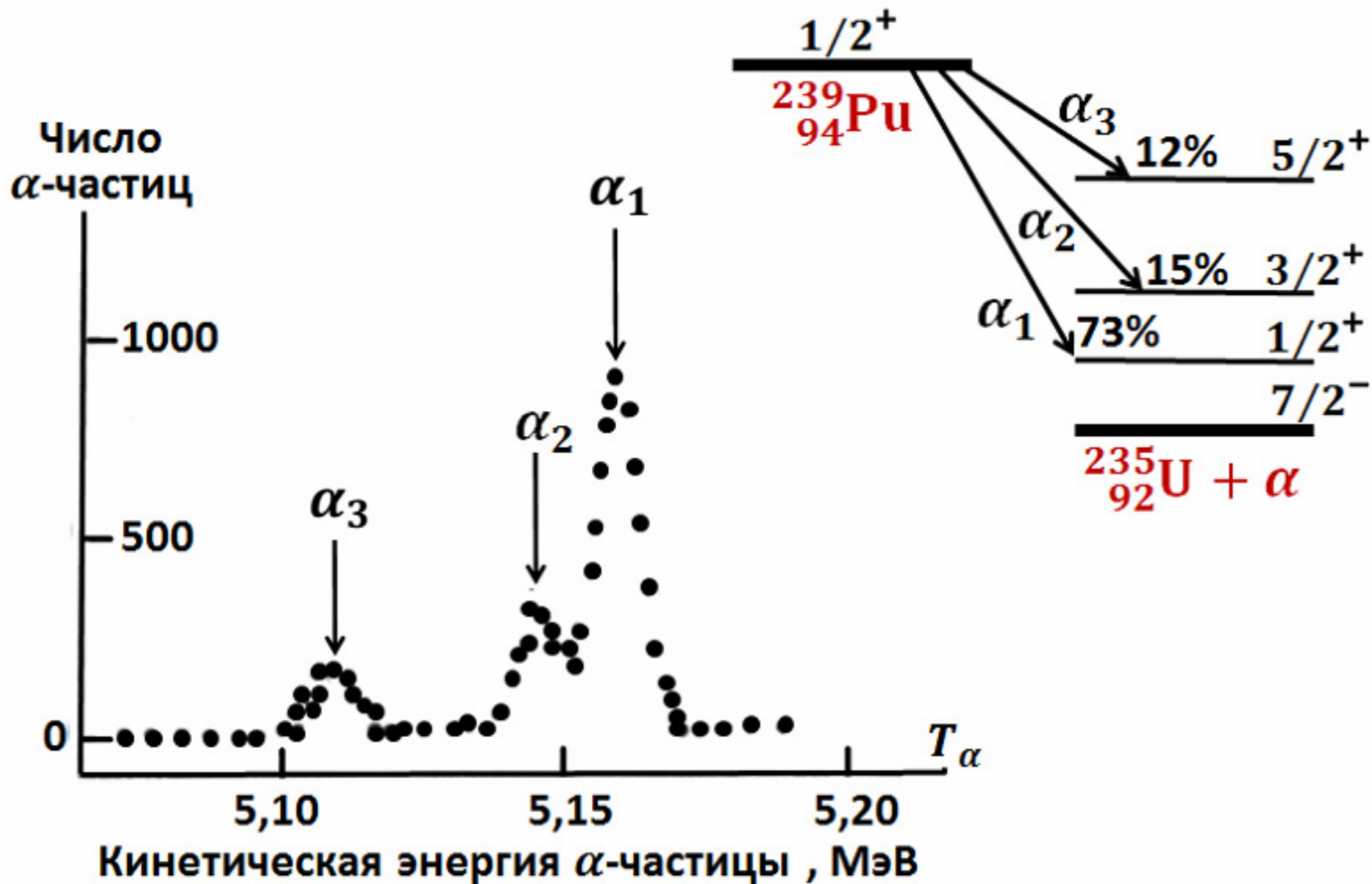
# Пример. $\alpha$ -распад $^{253}\text{Es}$ $J^p(^{253}\text{Es}) = 7/2^+$

$T_{1/2} = 20,5$  дн

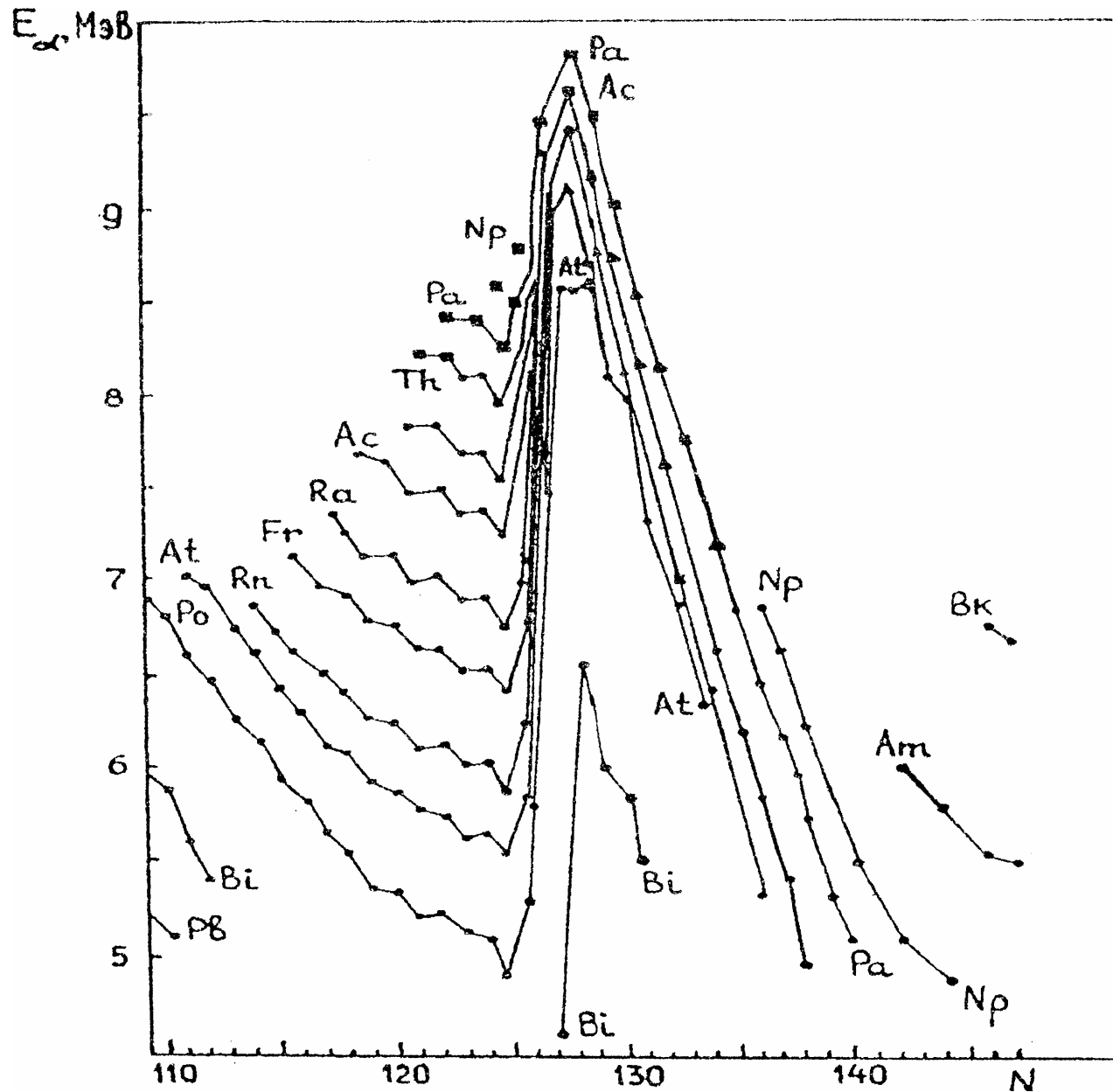
$^{253}\text{Es}$



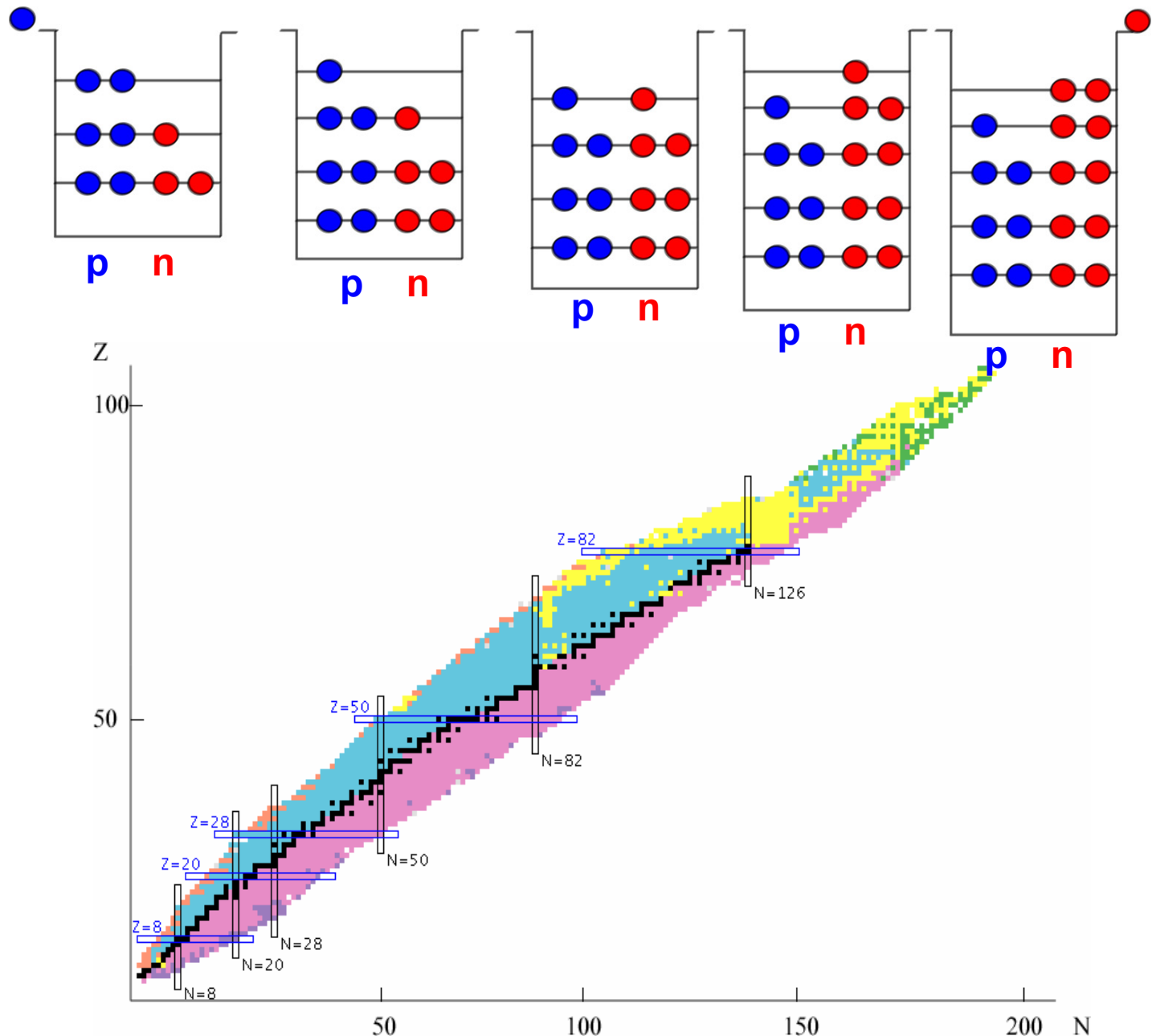
# Пример. $\alpha$ -распад $^{239}_{94}\text{Pu}$



# Энергия $\alpha$ -распада. Магическое число $N = 126$



# N-Z диаграмма атомных ядер



### Энергия $\beta$ -распада:

$$Q_{\beta^{\pm}} = [M(A, Z) - M(A, Z \mp 1) - m_e]c^2,$$

$$Q_e = [M(A, Z) - M(A, Z - 1) + m_e]c^2.$$

### Диапазон характеристик $\beta$ -распада:

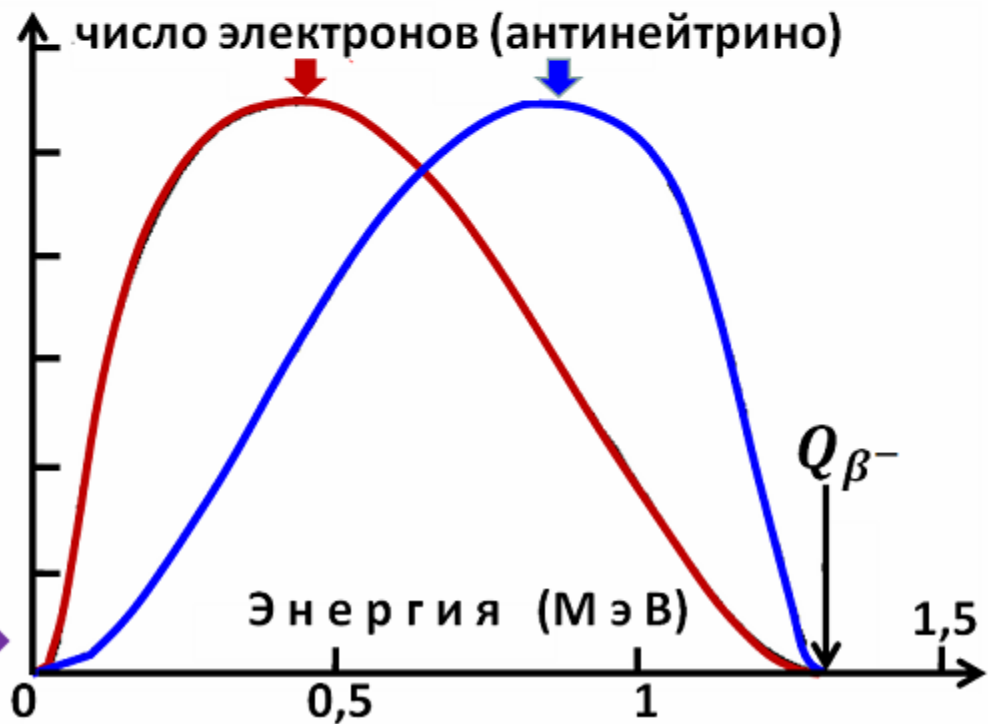
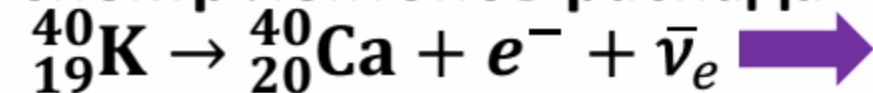
$$Q_{\beta} \approx 19 \text{ кэВ} \div 13,4 \text{ МэВ},$$

$$t_{1/2} \approx 10^{-6} \text{ сек} \div 10^{17} \text{ лет}.$$

Спектры продуктов при  
e-захвате (конечного  
ядра и нейтрино)  
**дискретны**

Спектры продуктов  
при  $\beta^{\pm}$ -распаде  
**непрерывны**

Спектр лептонов распада



# Энергия $\beta$ -распада

$$Q_{\beta^-} = [M^{\text{Я}}(A, Z) - M^{\text{Я}}(A, Z + 1) - m_e] c^2 \quad - \beta^- \text{-распад}$$

$$Q_{\beta^+} = [M^{\text{Я}}(A, Z) - M^{\text{Я}}(A, Z - 1) - m_e] c^2 \quad - \beta^+ \text{-распад}$$

$$Q_{e^-} = [M^{\text{Я}}(A, Z) + m_e - M^{\text{Я}}(A, Z - 1)] c^2 \quad - \text{e-захват}$$

$M^{\text{Я}}$  - массы ядер,  $m_e$  - масса электрона.

В справочных таблицах обычно приводятся массы или избытки масс **атомов**, поэтому для энергий  $\beta$ -распадов в этом случае

$$Q_{\beta^-} = [M^{\text{ат}}(A, Z) - M^{\text{ат}}(A, Z + 1)] c^2 \quad - \beta^- \text{-распад}$$

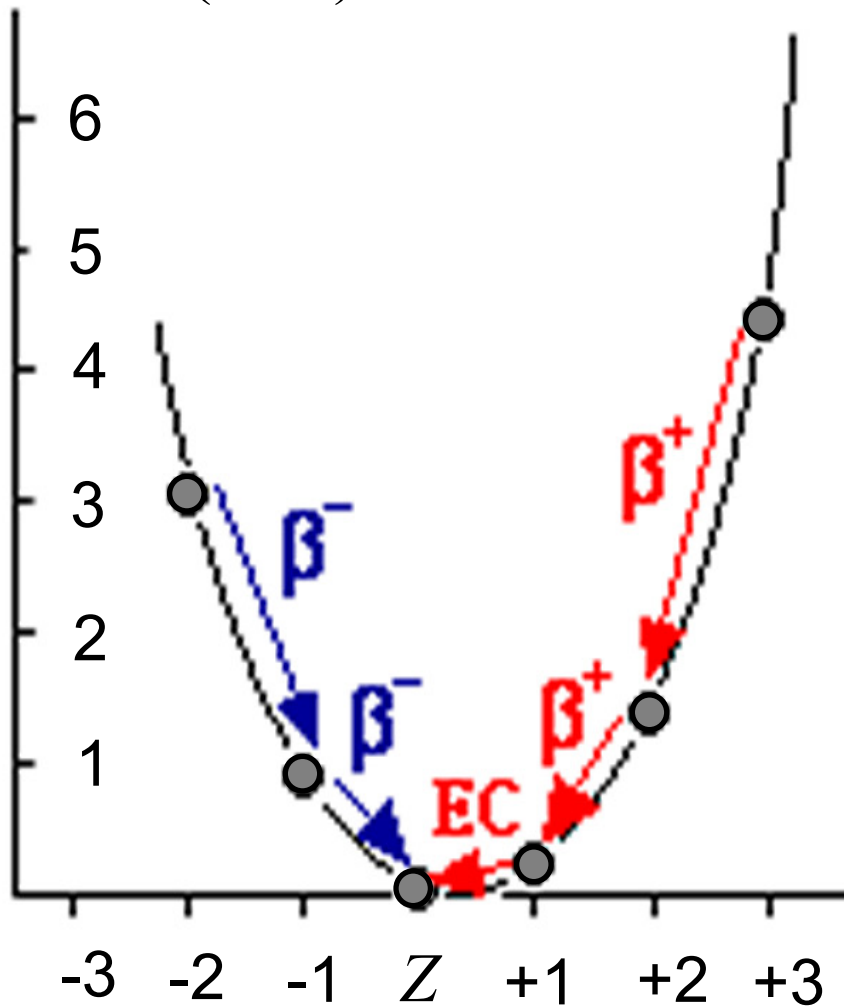
$$Q_{\beta^+} = [M^{\text{ат}}(A, Z) - M^{\text{ат}}(A, Z - 1)] c^2 - 2m_e c^2 \quad - \beta^+ \text{-распад}$$

$$Q_{e^-} = [M^{\text{ат}}(A, Z) - M^{\text{ат}}(A, Z - 1)] c^2 \quad - \text{e-захват}$$

$M^{\text{ат}}$  - массы атомов.

# $\beta$ -распад ядер

$\Delta Mc^2$  (МэВ)



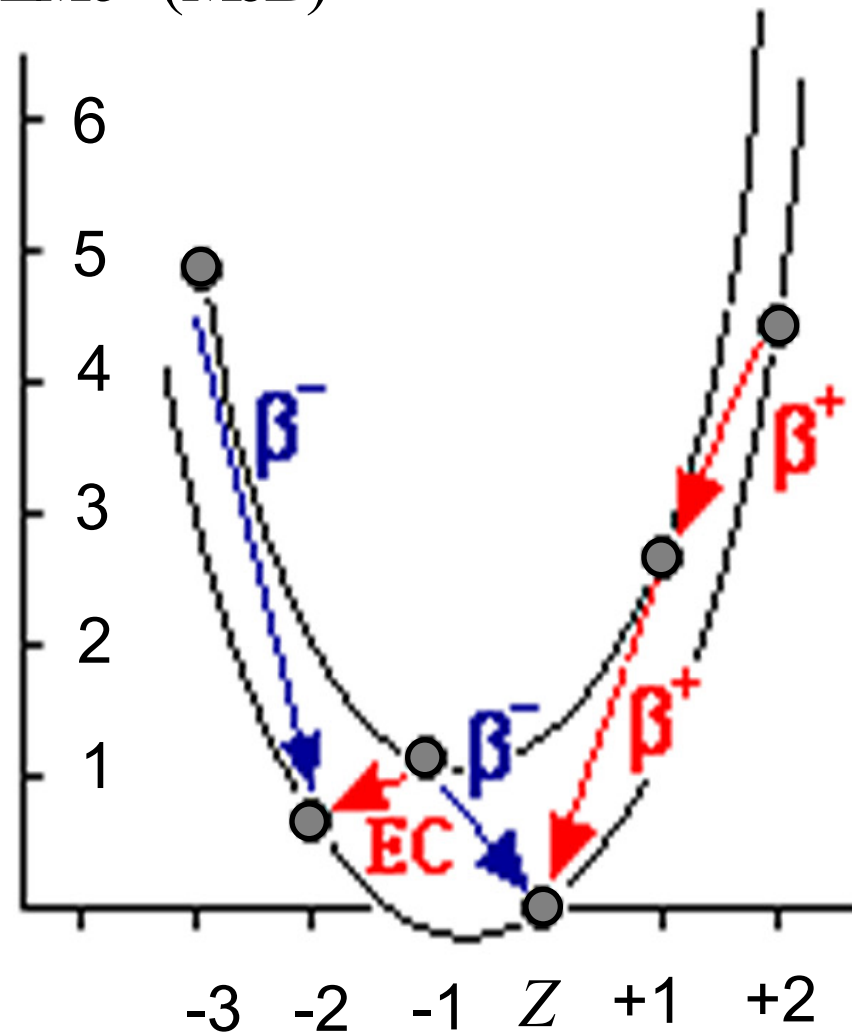
Нечетные  $A$

$\beta^- \rightarrow$

$\leftarrow \beta^+, \text{EC}$

Четные  $A$

$\Delta Mc^2$  (МэВ)



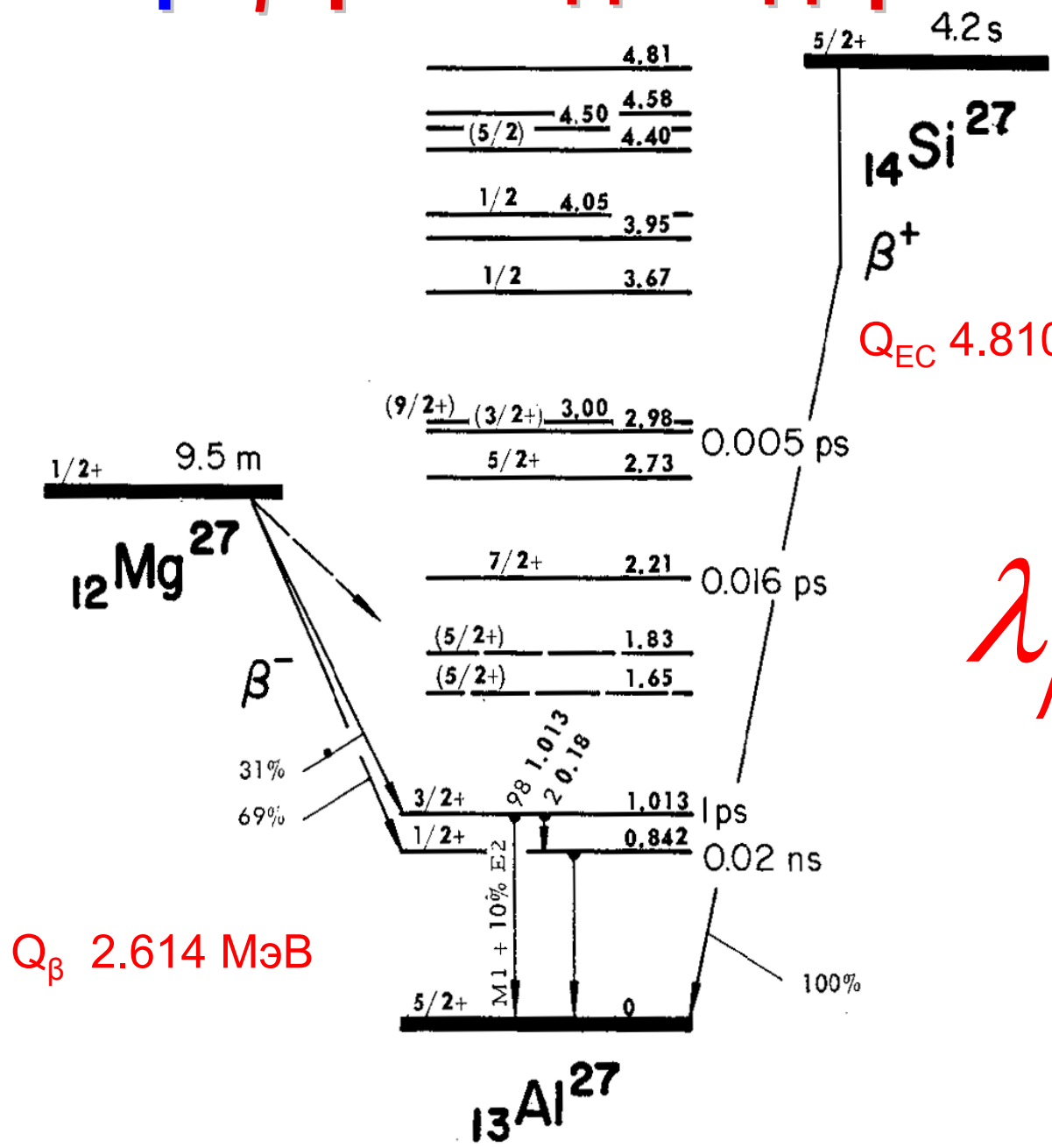
Нечетные  $A$

$\beta^- \rightarrow$

$\leftarrow \beta^+, \text{EC}$

Четные  $A$

# Пример. $\beta$ -распады ядер-изобар $A=27$



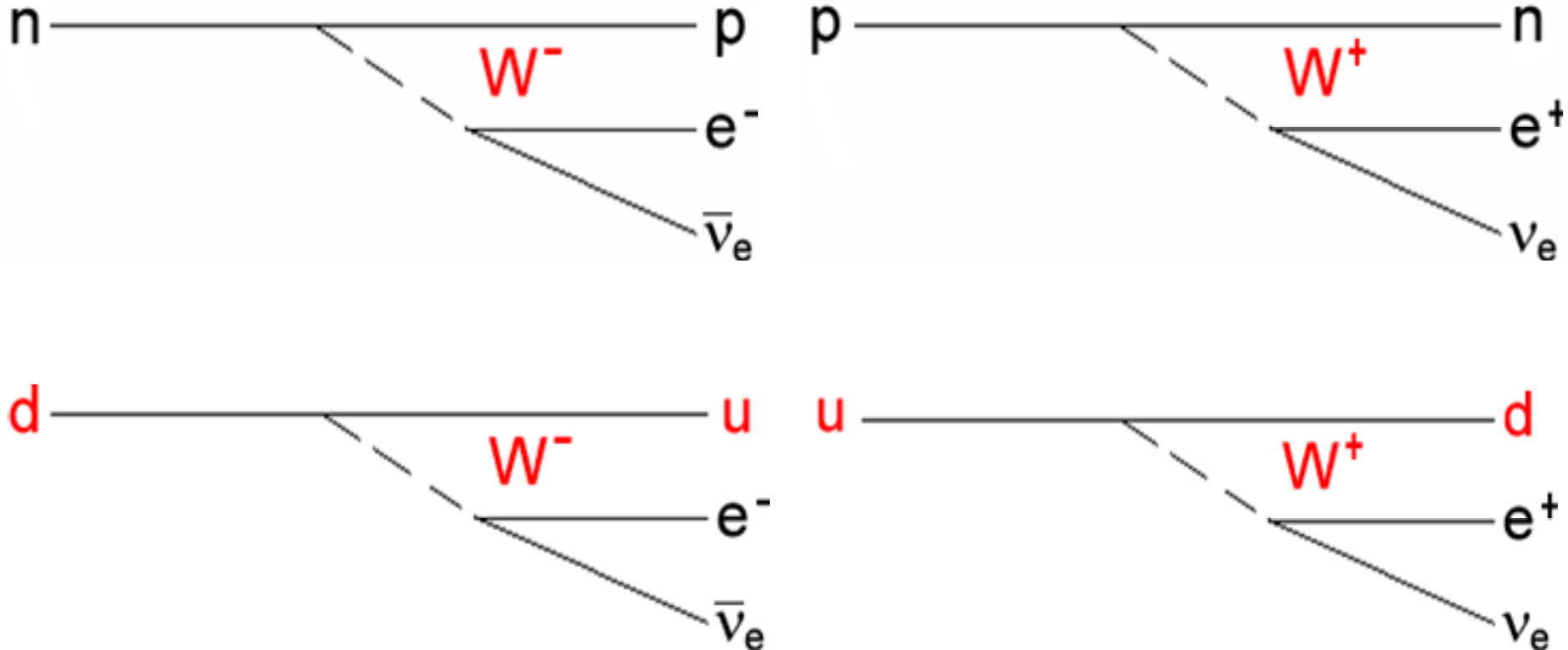
$Q_{EC} = 4.810$  MeV

$Q_{\beta} = 2.614$  MeV

$$\lambda_{\beta} \sim Q_{\beta}^5$$



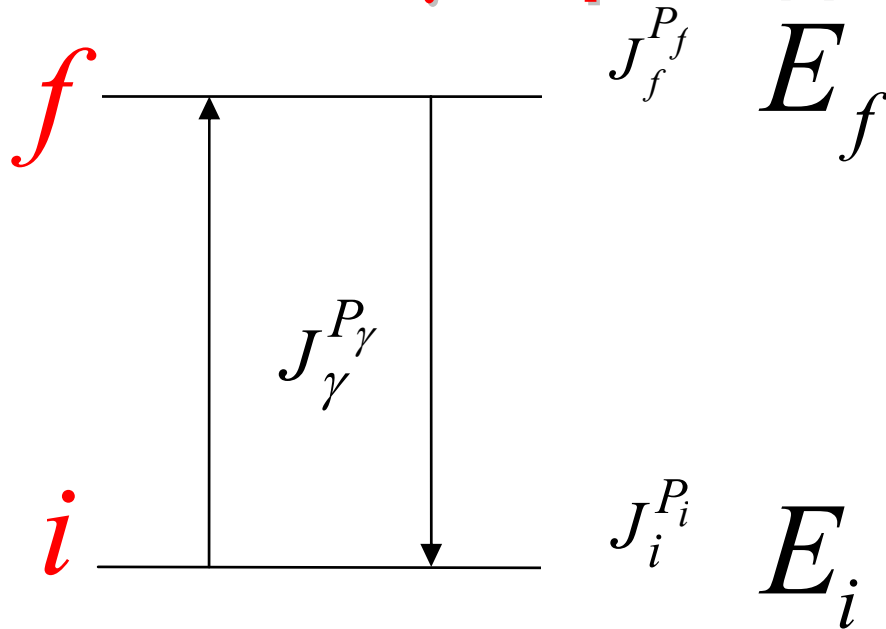
# $\beta$ -распад



$\beta$ -распад происходит в результате слабых взаимодействий. На нуклонном уровне это соответствует переходам нейтрона в протон или протона в нейтрон.

На кварковом уровне при  $\beta$ -распаде происходит превращение  $d$ -кварка в  $u$ -кварк или превращение  $u$ -кварка в  $d$ -кварк.

# **$\gamma$ -переходы в ядрах**



Квантовые числа фотона

$$J_\gamma = 1$$

$$P_\gamma = -1$$

$\gamma$ -переходы происходят в результате электромагнитного взаимодействия.

Законы сохранения энергии  $E$ , момента количества движения  $J$  и четности  $P$  в электромагнитных переходах:

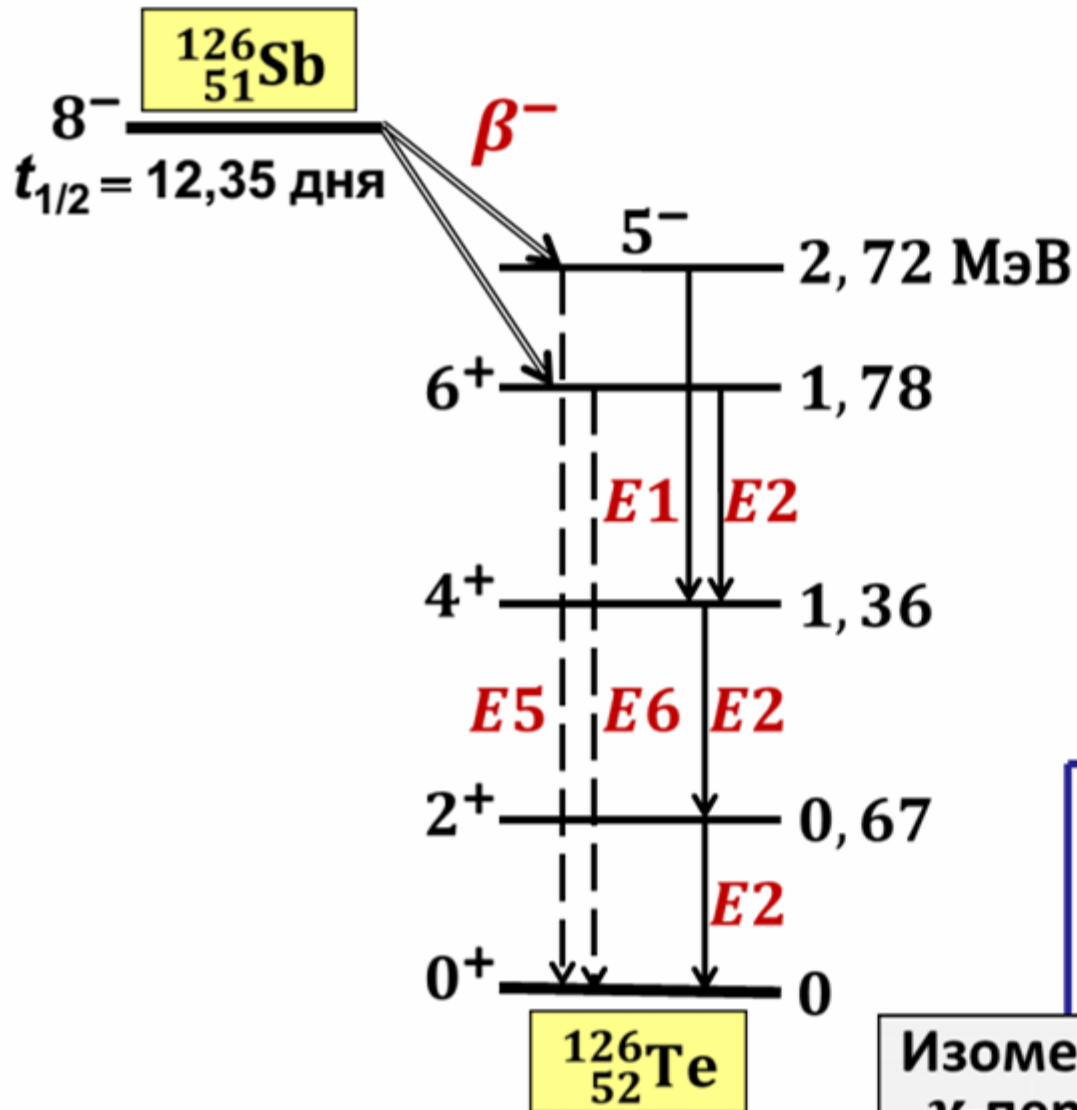
$$\vec{J}_f = \vec{J}_i + \vec{J}_\gamma \quad \text{или} \quad |J_i - J_f| \leq J_\gamma \leq J_i + J_f,$$

$$P_f = P_i \cdot P_\gamma \quad \text{или} \quad P_\gamma = P_i \cdot P_f,$$

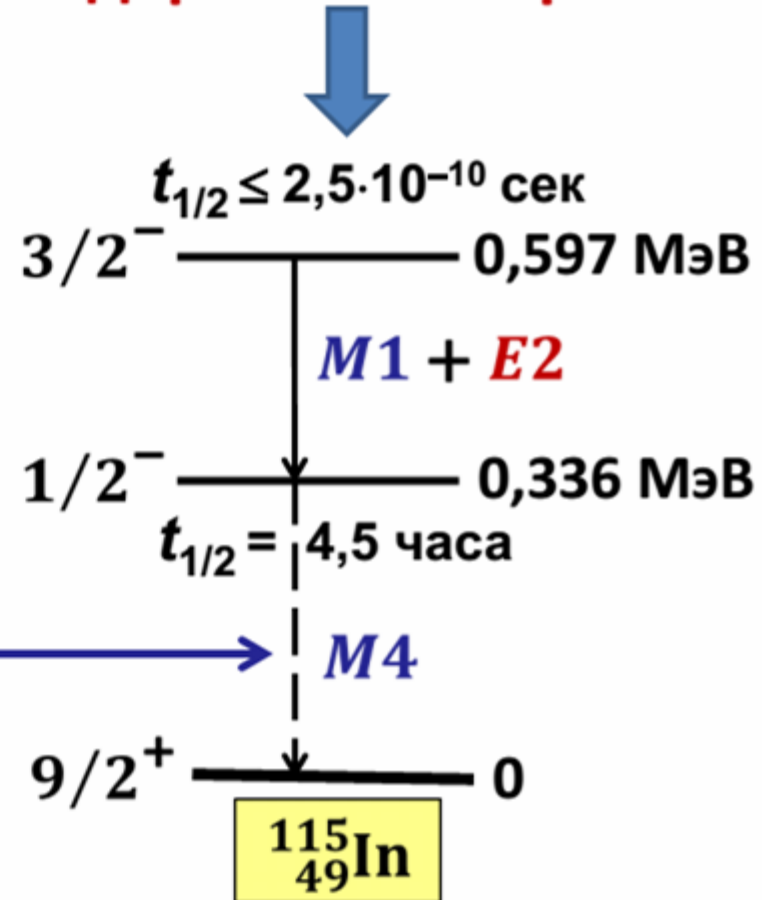
$$E_f = E_i + E_\gamma + T_R.$$

$T_R$  - энергия ядра отдачи.

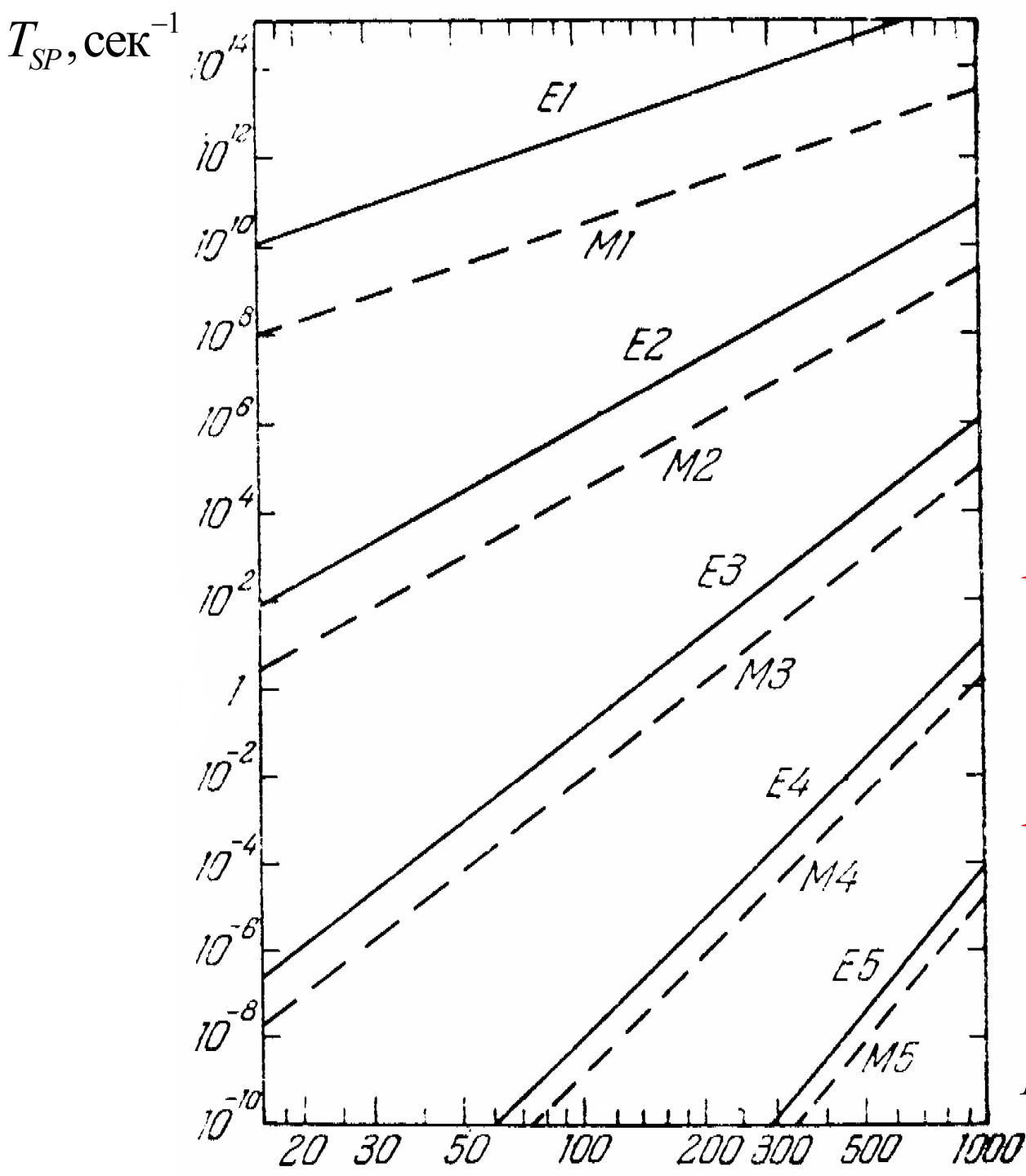
# Каскады $\gamma$ -переходов $t_{1/2} < 10^{-7}$ сек



## Ядерная изомерия:



Изомерный  
 $\gamma$ -переход



Вероятность  $\gamma$ -перехода  
(в  $\text{сек}^{-1}$ ) протона  
в зависимости от энергии  
 $\gamma$ -квантов различных  
мультипольностей

$$w(MJ) \sim \frac{1}{\hat{\lambda}} \left( \frac{R}{\hat{\lambda}} \right)^{2J+2}$$

$$w(EJ) \sim \frac{1}{\hat{\lambda}} \left( \frac{R}{\hat{\lambda}} \right)^{2J}$$

# **Резонансное поглощение $\gamma$ -квантов**

**1958 г. Р. Мессбауэр открыл явление ядерного резонанса (эффект Мессбауэра)**

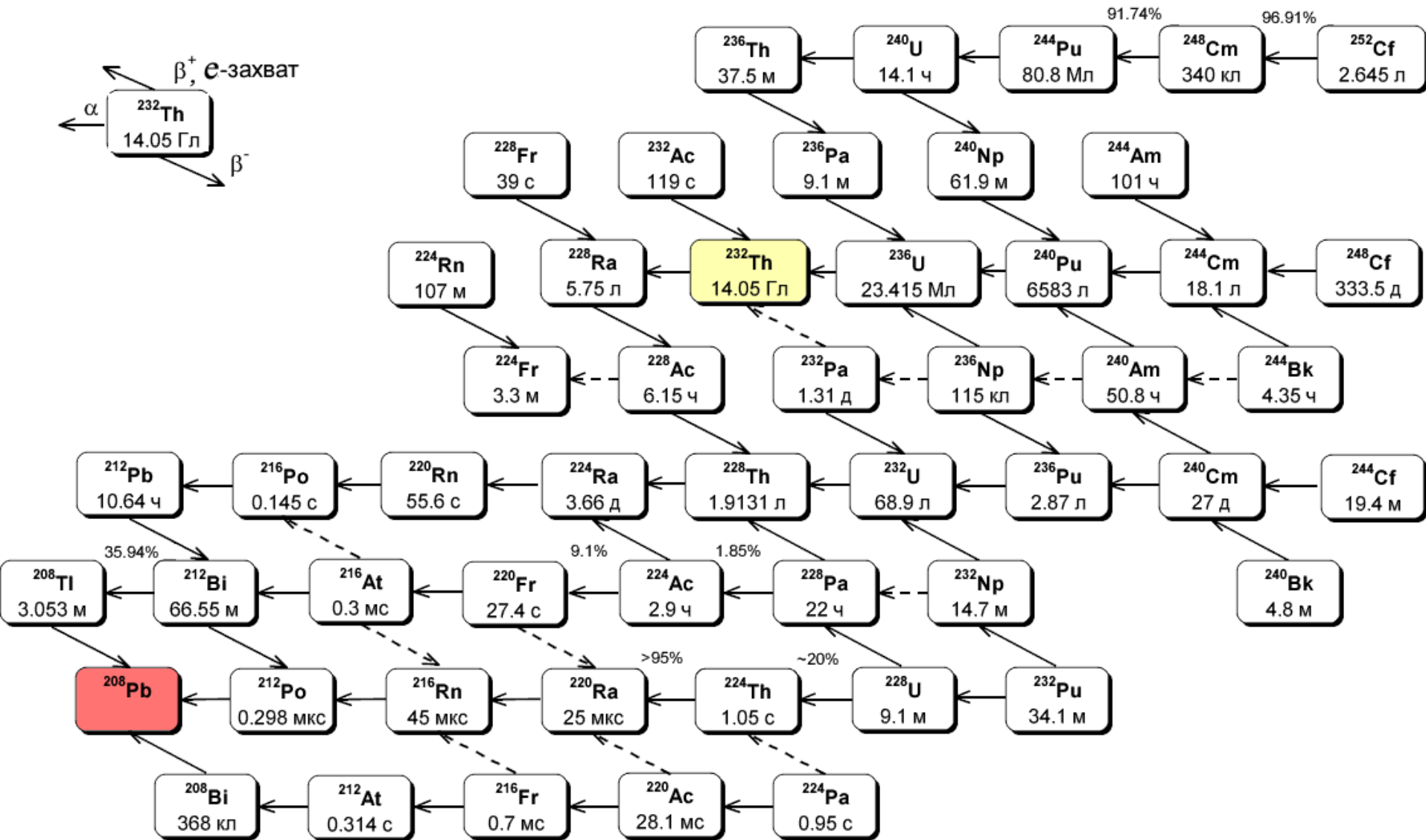
**Для свободных ядер и ядер, связанных в кристаллической решётке условия отдачи при испускании  $\gamma$ -квантов существенно различны. В кристаллах возможны  $\gamma$ -переходы, при которых энергию отдачи получает не отдельное ядро, а весь кристалл.**

**Нобелевская премия по физике**

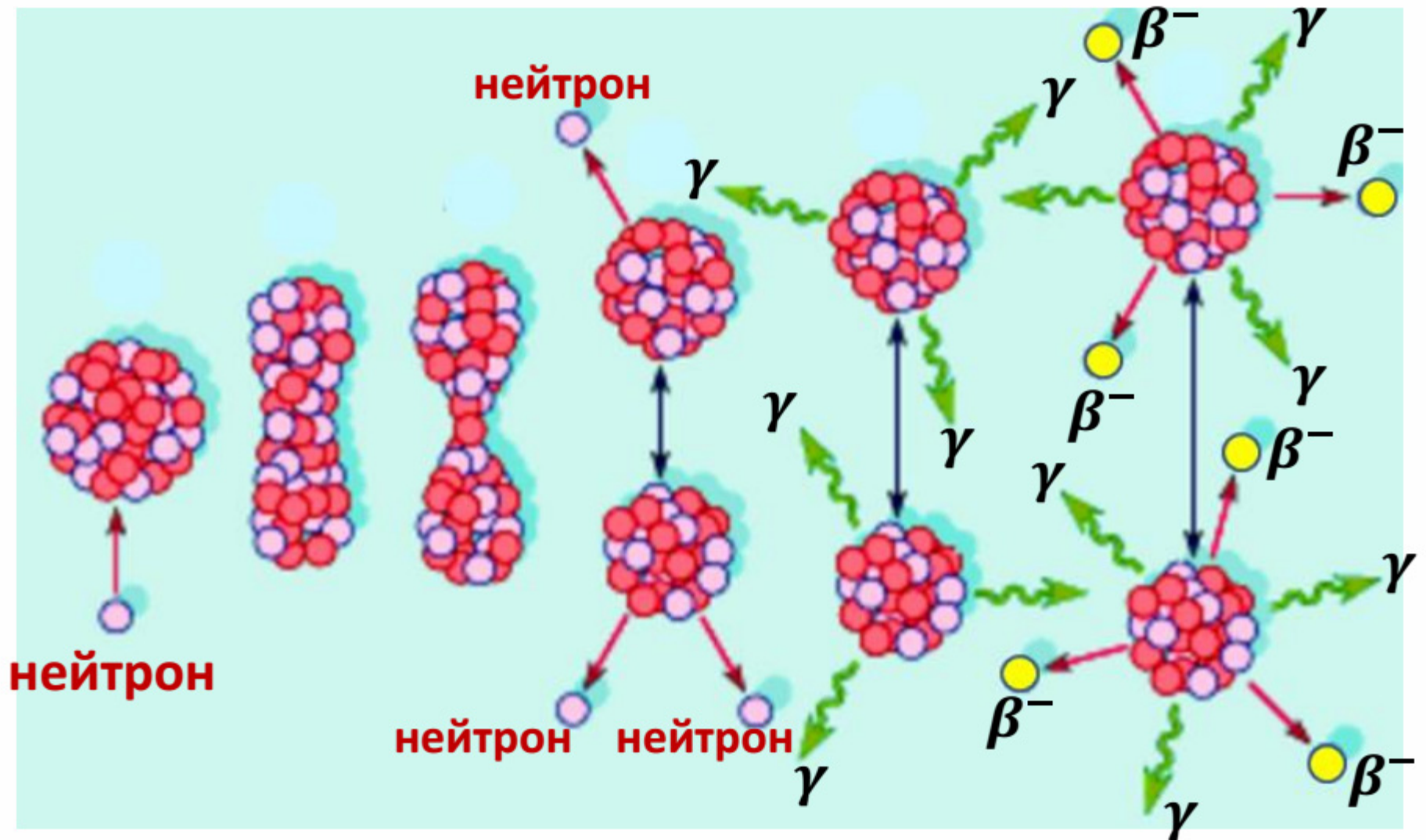
**1961 г. – Р. Мессбауэр.**

**За исследования в области резонансного поглощения гамма-излучения и открытия в этой связи эффекта, носящего его имя**

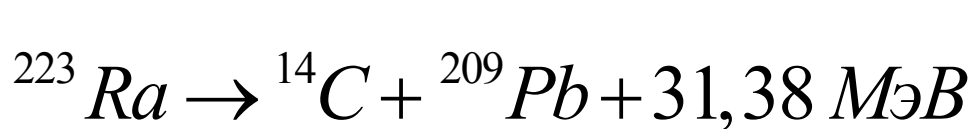
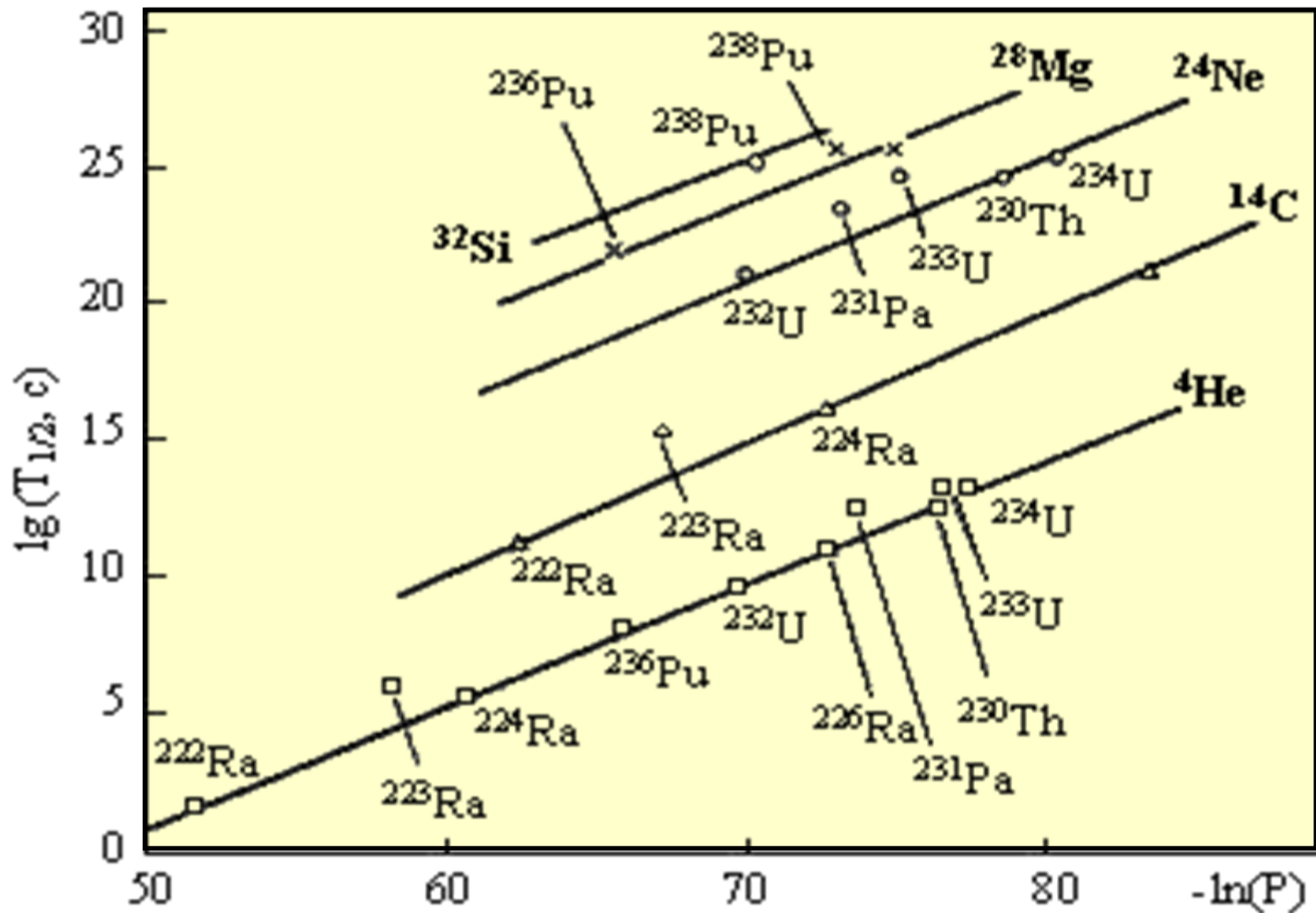
# Радиоактивное семейство 4n



# Деление ядер



# Кластерная радиоактивность



$$\frac{\lambda(\alpha)}{\lambda(^{14}\text{C})} \approx 10^{10}$$



# Типы радиоактивного распада ядер

Тип радиоактивности ядер	Тип испускаемых частиц	Год открытия	Авторы открытия
Радиоактивность атомных ядер	Излучение, вызвавшее потемнение фотопластинок	1896	A. Becquerel
Альфа-распад	${}^4\text{He}$	1898	E. Rutherford
$\beta^-$ -распад	$e^- \tilde{\nu}$	1898	E. Rutherford
$\beta^+$ -распад	$e^+ \nu$	1934	I. et F. Joliot-Curie
е-захват	$\nu$	1938	L. Alvarez
Гамма-распад	$\gamma$ -квант	1900	P. Villard
Ядерная изомерия	$\gamma$ , е-захват, $\beta^+$ , $\beta^-$ , деление	1921	O. Hahn
Спонтанное деление	Два осколка сравнимой массы	1940	Г.Н. Флеров, К.А. Петржак
Двойной $\beta$ -распад	$e^- e^- 2\tilde{\nu}_e$	1950	M.G. Ingram, J.H. Reynolds
Протонная радиоактивность	p	1981	S. Hofmann
Кластерная радиоактивность	${}^{14}\text{C}$	1984	H. Rose, G. Jones, Д.В. Александров
Двухпротонная радиоактивность	2p	2002	J. Giovinazzo, B. Blank et al. M.Pfutzner, E.Badura et al.