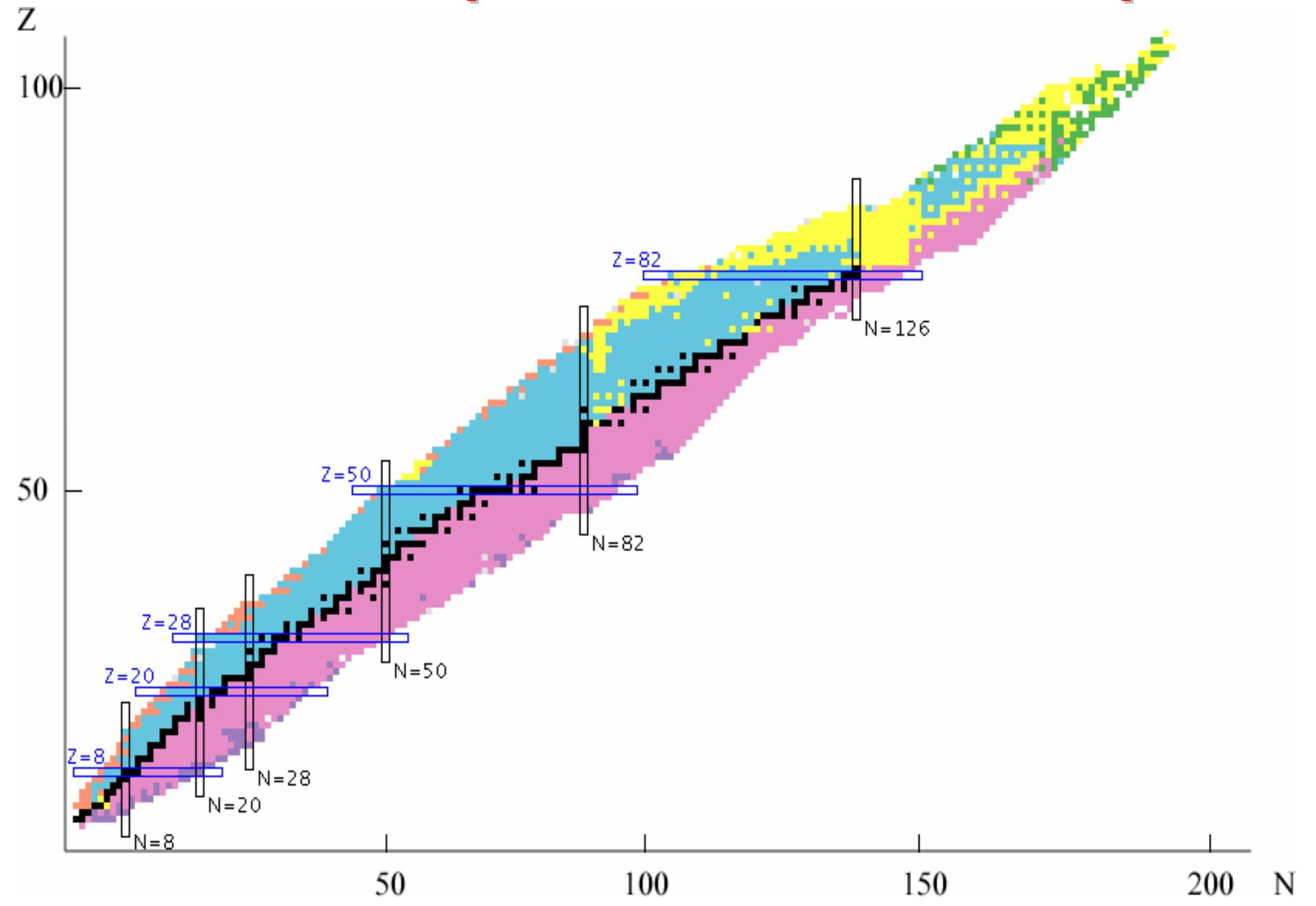


Рождение и жизнь атомных ядер

РАДИОАКТИВНОСТЬ

N-Z диаграмма атомных ядер



Ядерная физика в Интернете



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](#)

Проект кафедры общей ядерной физики физического факультета
МГУ

осуществляется при поддержке [НИИЯФ МГУ](#).

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](#)
- › [Генератор ядерных реакций](#)

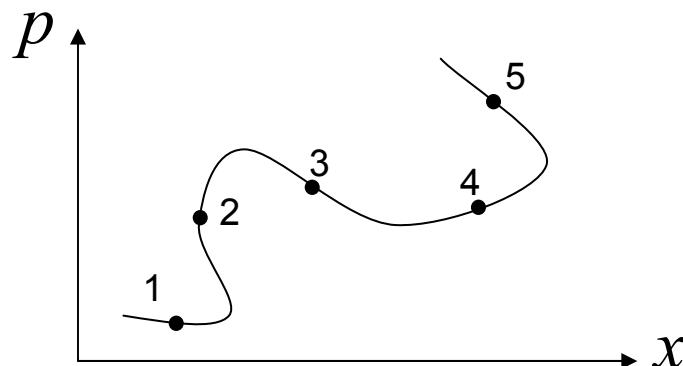
Классическая физика

$$x, p, t$$

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

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

$$H = U + E$$



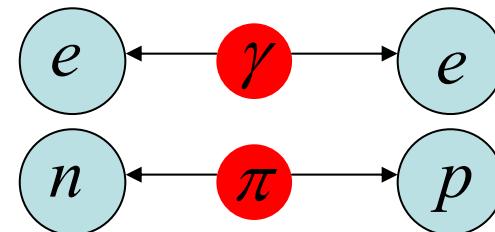
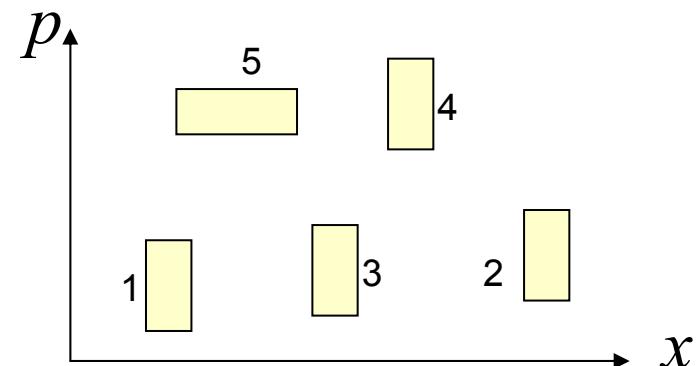
Квантовая физика

$$\psi(x, t)$$

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

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

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



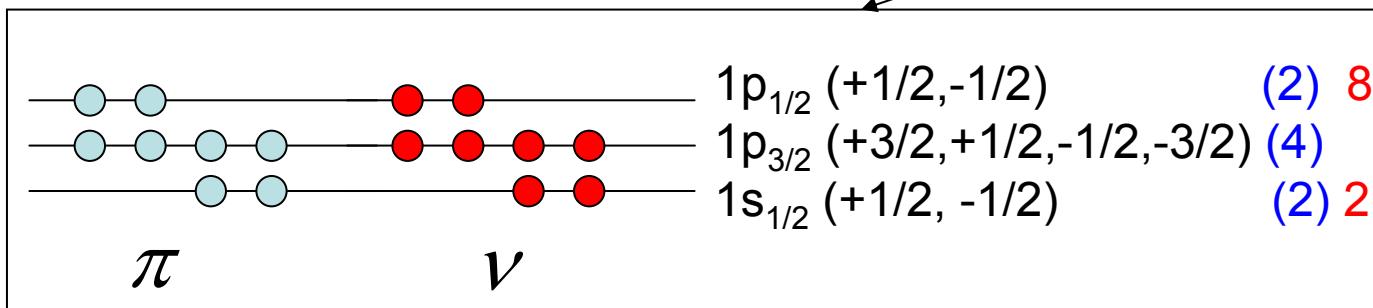
Модели ядер

Капельная модель ядра

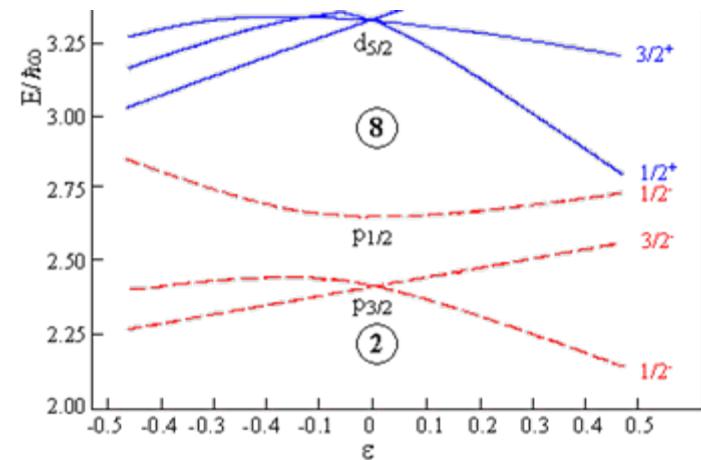
Фермион
Принцип Паули

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

- α -распад – испускание ядрами α -частиц,
- β -распад – испускание (или поглощение) лептонов,
- γ -распад – испускание γ -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}C до ^{32}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

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

выделяется в виде энергии продуктов распада.

Постоянная распада λ

Постоянная распада λ 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 — $t+dt$, 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 ,

λ — постоянная распада.

Количество ядер радиоактивного источника, распавшихся за время t ,

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

Постоянная распада λ
Среднее время жизни τ
Период полураспада $T_{1/2}$
 τ — 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

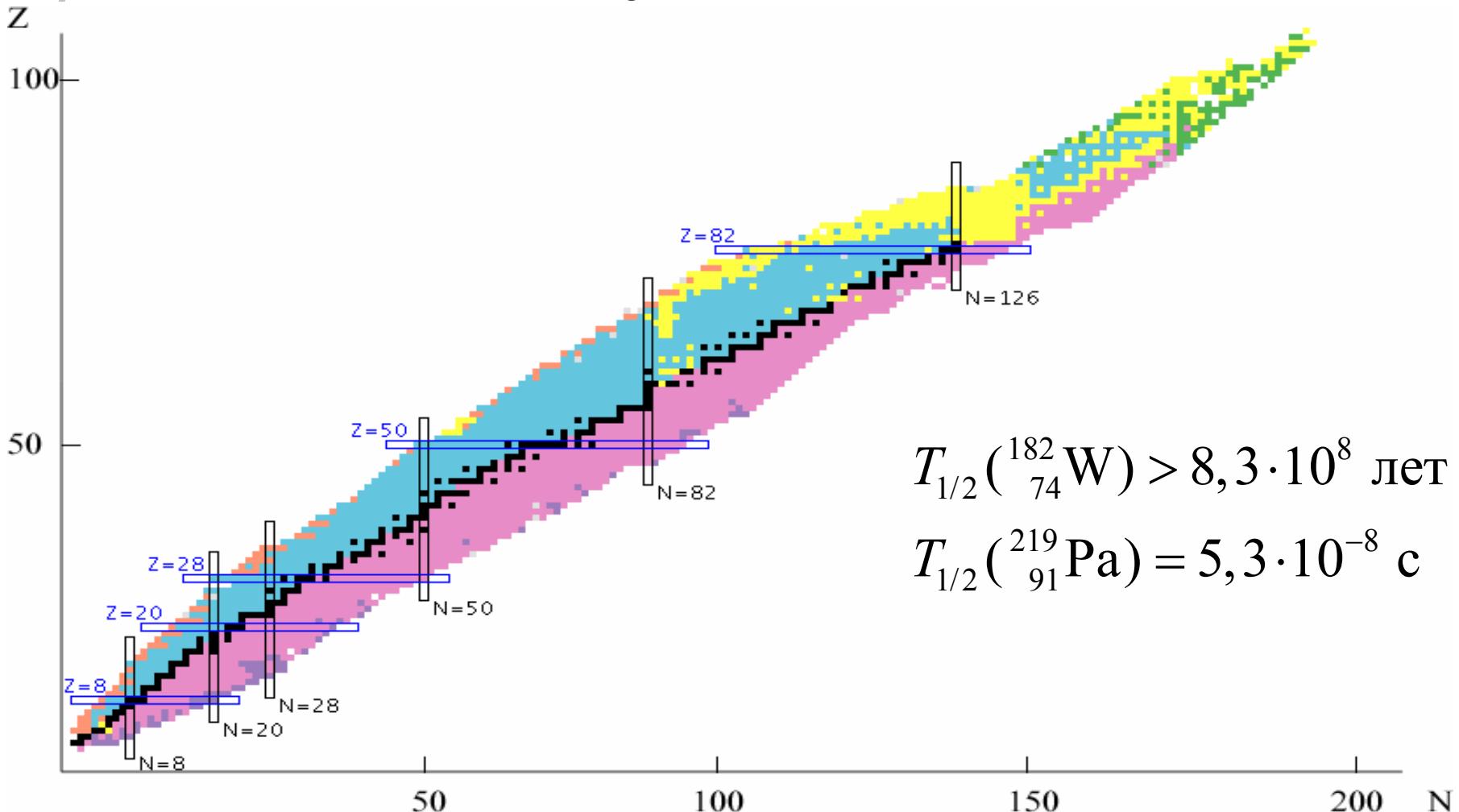
$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

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

α -распад

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

α -распад происходит в результате сильного взаимодействия.



Энергия α -распада Q_α

Необходимым условием α -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_α — масса α -частицы.

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

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

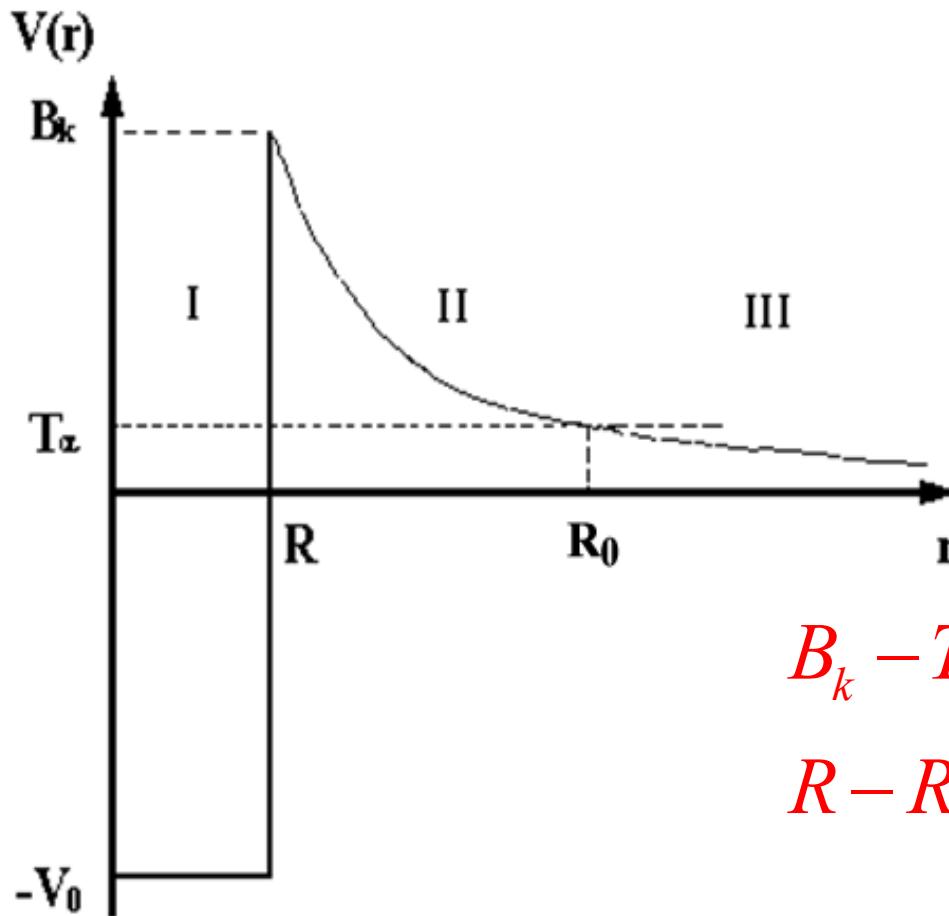
Q_α — энергия α -распада.

Из законов сохранения энергии и импульса следует, что энергия α -частицы T_α

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

α -частица уносит 98% энергии α -распада.

Прохождение α -частицы через потенциальный барьер



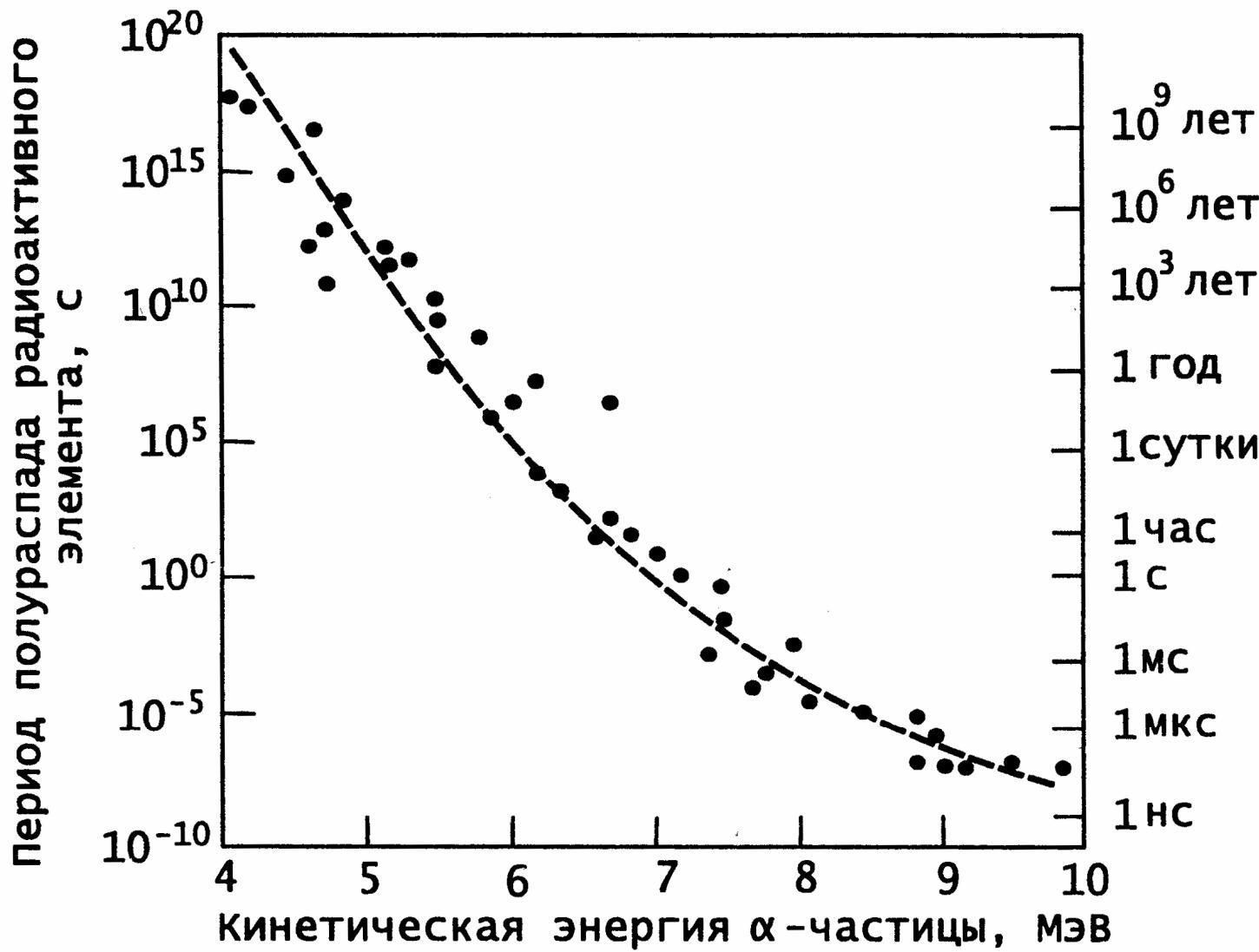
$$B_k - T_\alpha \approx 20 \text{ МэВ}$$

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

Вероятность P прохождения α -частицы с энергией T_α через потенциальный барьер $V(r)$

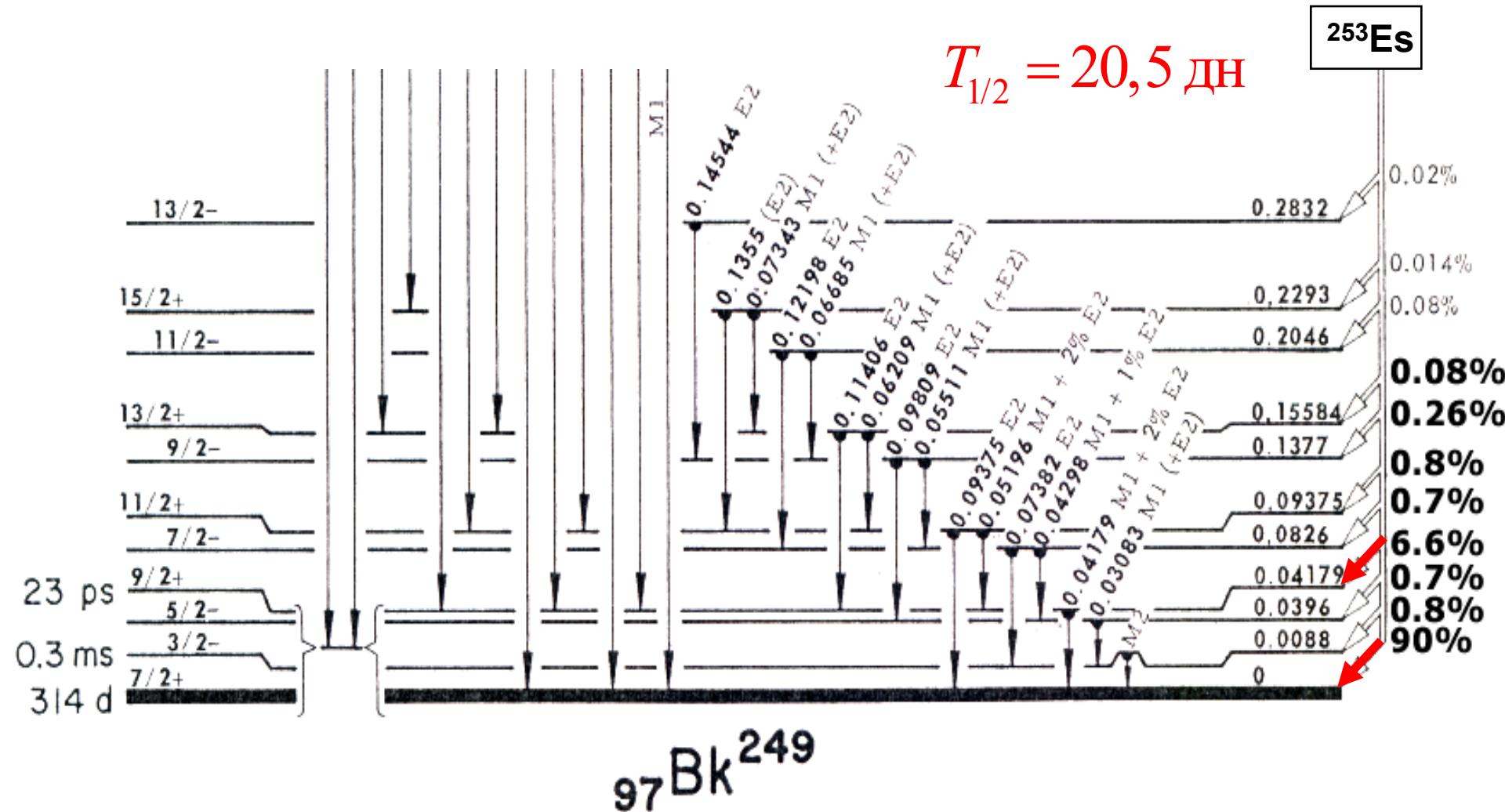
$$P = \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \int_R^{R_0} \sqrt{2\mu_\alpha [V(r) - T_\alpha]} dr\right) \approx e^{-84} \approx 10^{-36}$$

Закон Гейгера-Неттоля

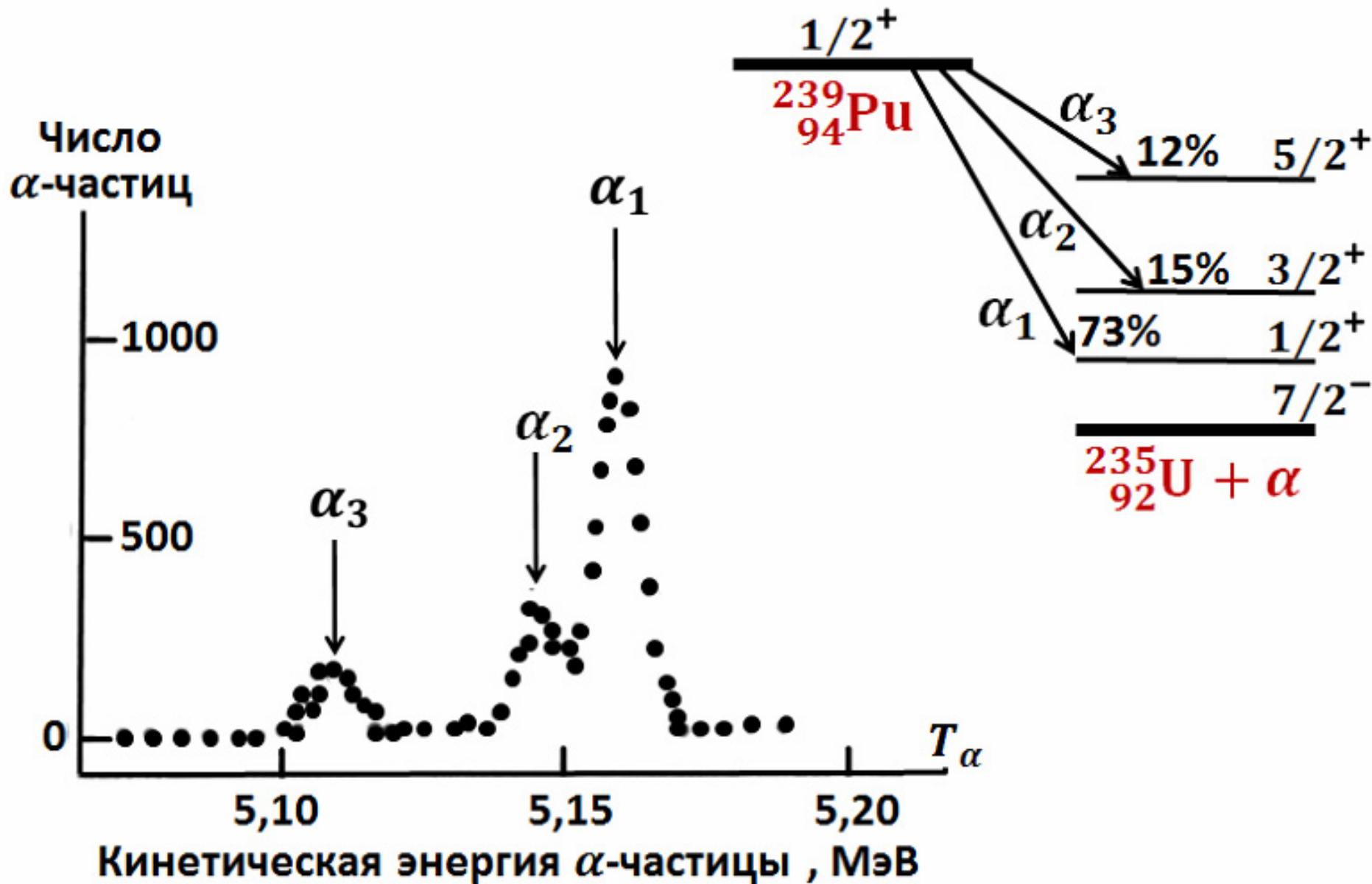


Пример. α -распад ^{253}Es $J^p(^{253}\text{Es}) = 7/2^+$

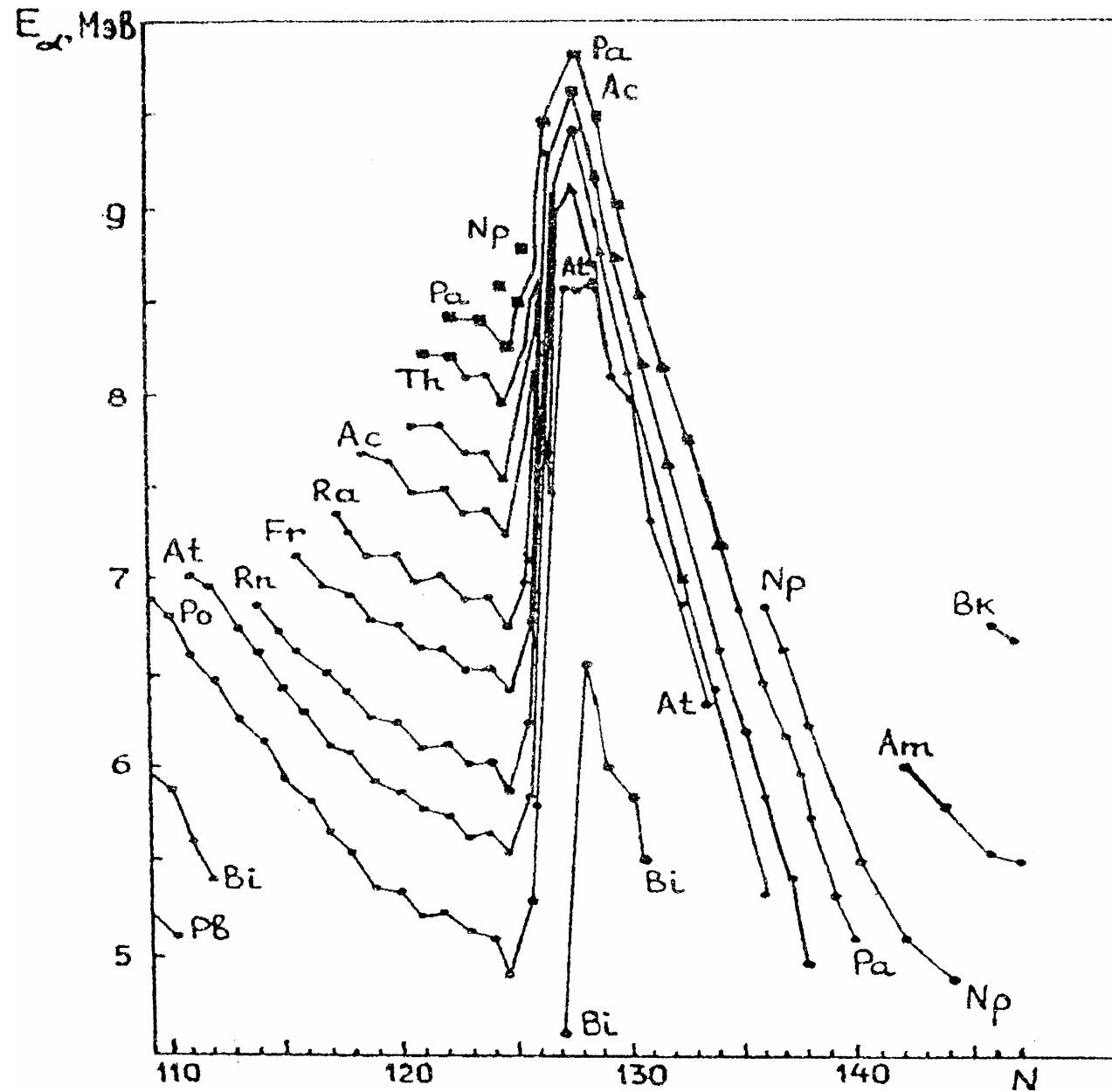
$$T_{1/2} = 20,5 \text{ дн}$$



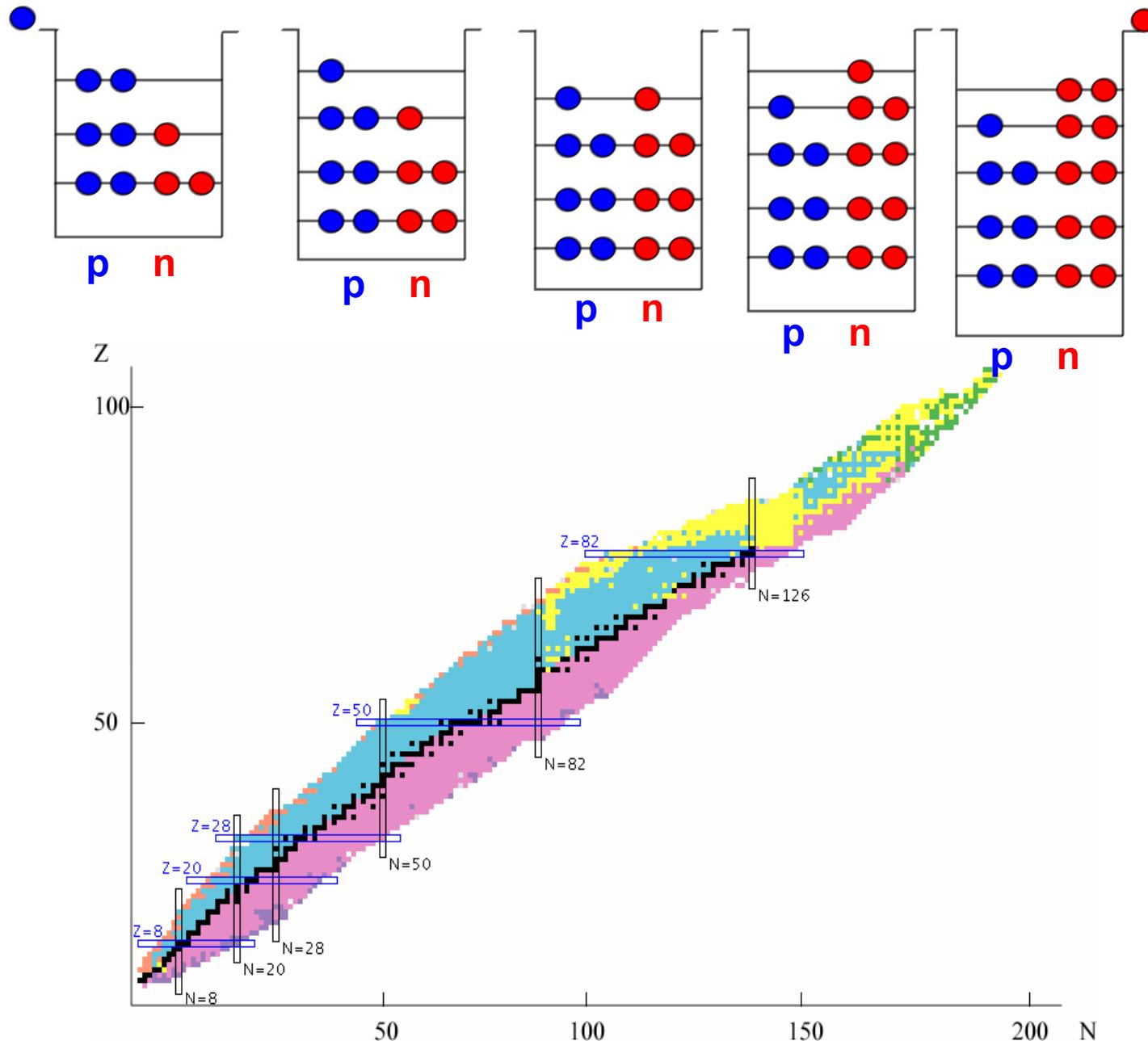
Пример. α -распад ^{239}Pu



Энергия α -распада. Магическое число $N = 126$



N-Z диаграмма атомных ядер



Энергия β -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 β -распада:

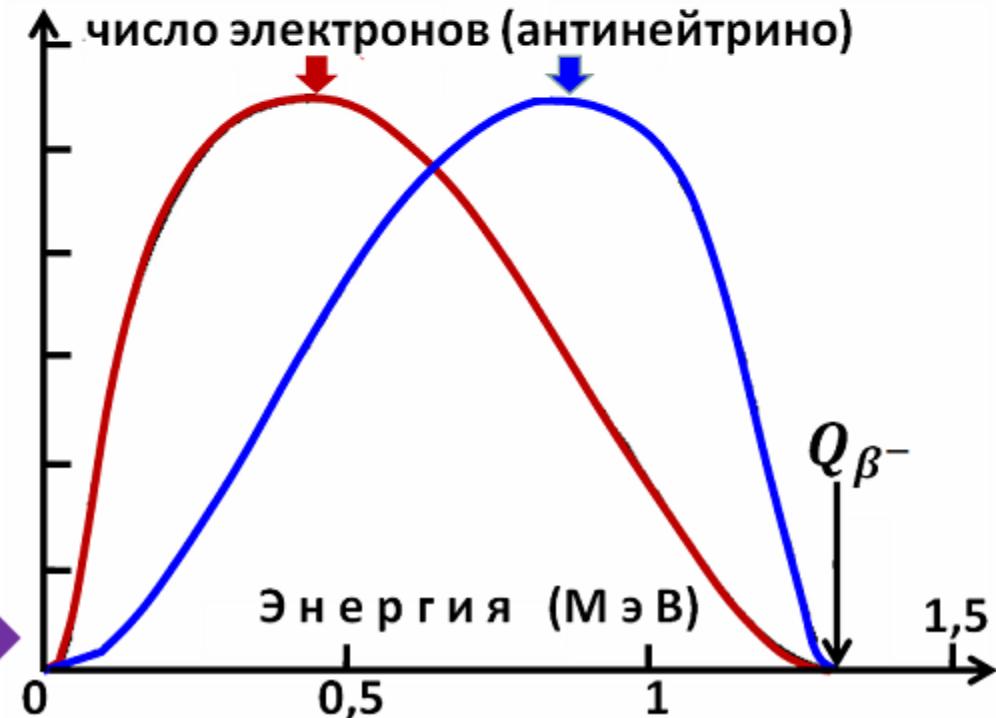
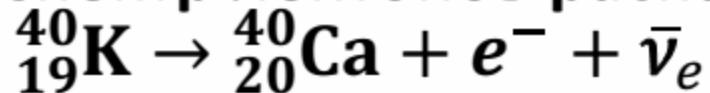
$$Q_\beta \approx 19 \text{ кэВ} \div 13,4 \text{ МэВ},$$

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

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

Спектры продуктов
при β^\pm -распаде
непрерывны

Спектр лептонов распада



Энергия β -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 β -распадов в этом случае

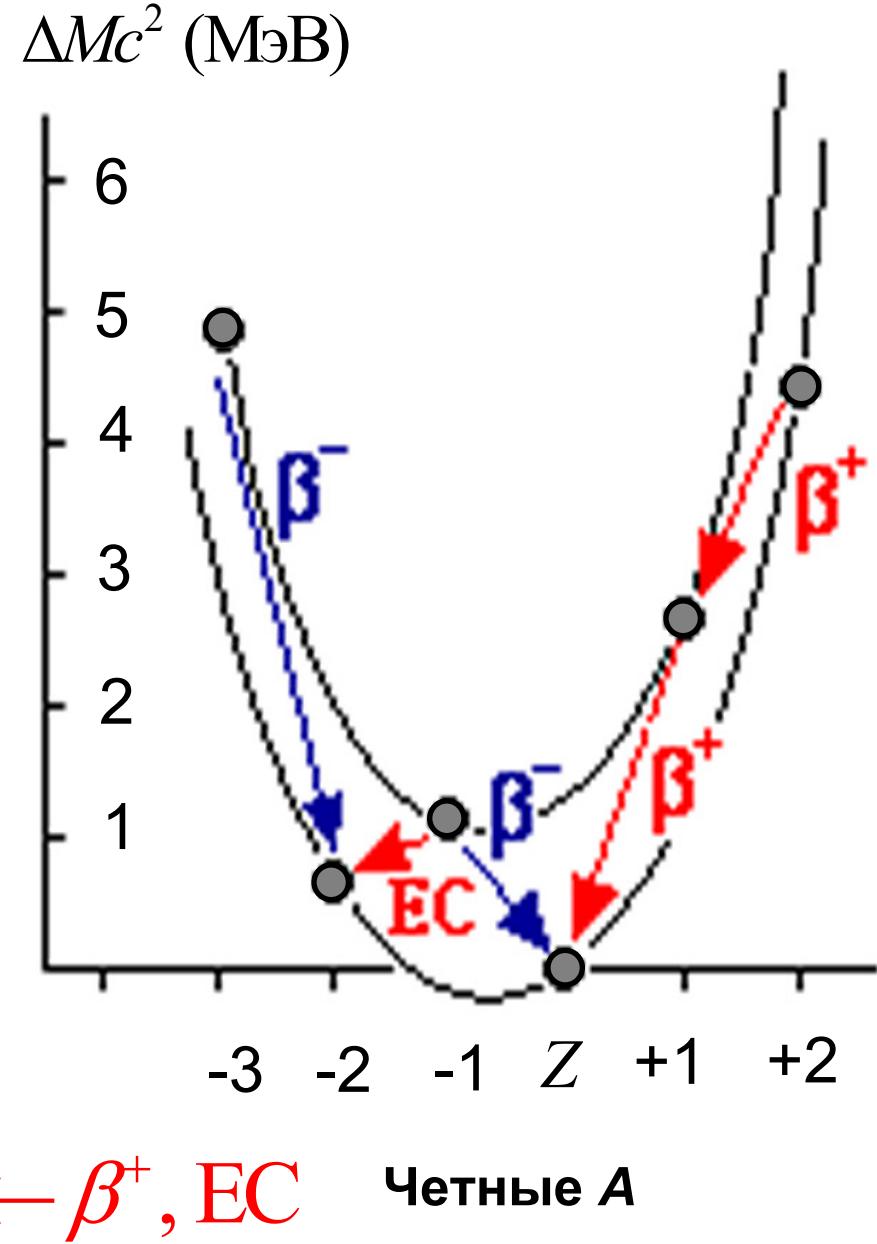
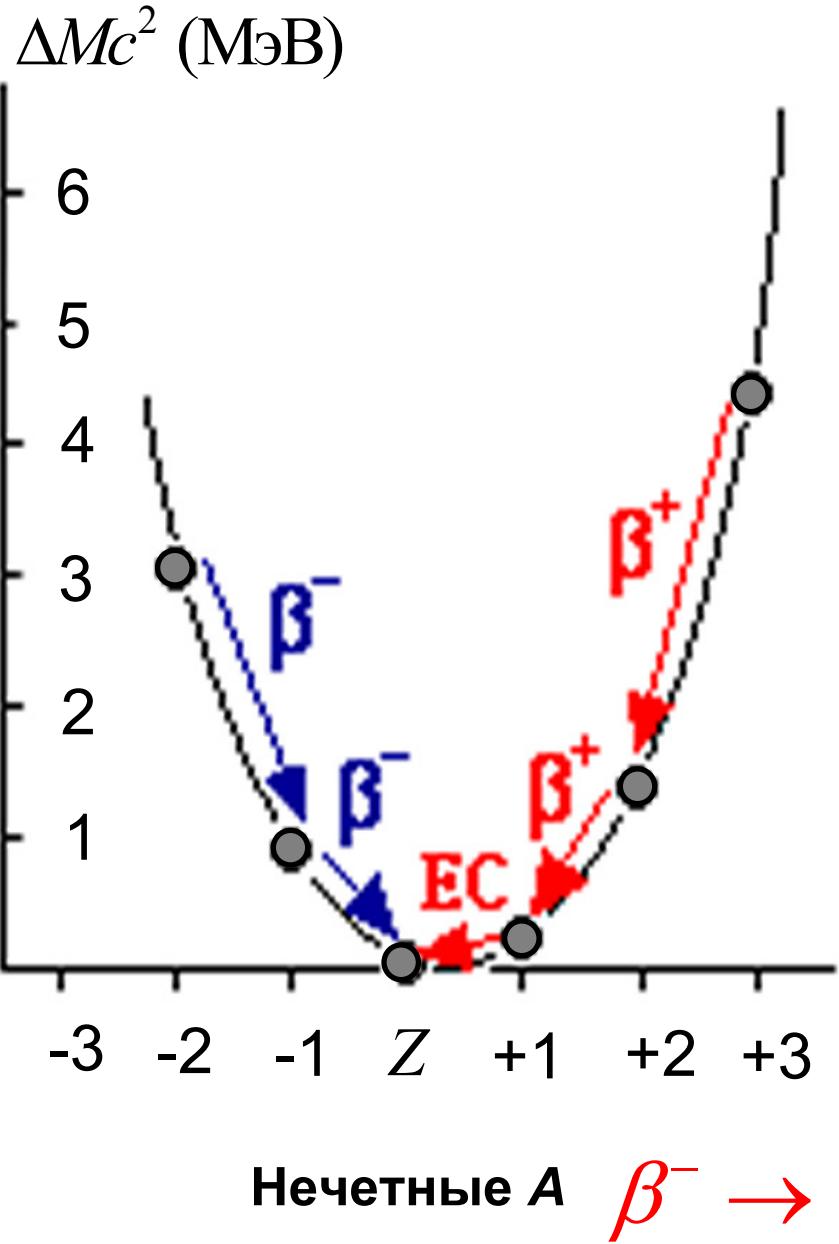
$$Q_{\beta^-} = [M^{\text{ат}}(A, Z) - M^{\text{ат}}(A, Z+1)]c^2 \quad - \beta^- \text{-распад}$$

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

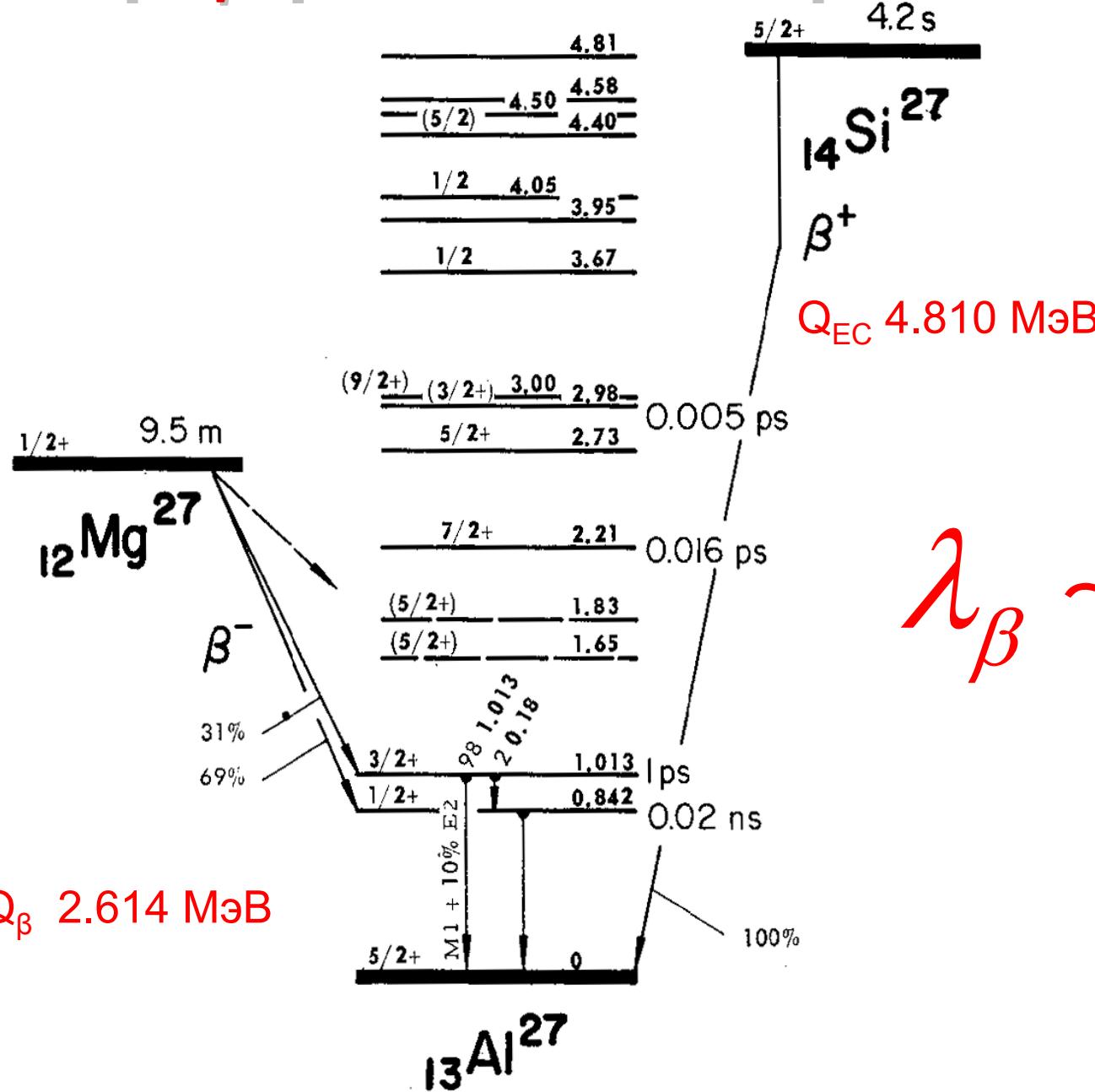
$$Q_{e^-} = [M^{\text{ат}}(A, Z) - M^{\text{ат}}(A, Z-1)]c^2 \quad - \text{e-захват}$$

$M^{\text{ат}}$ - массы атомов.

β -распад ядер

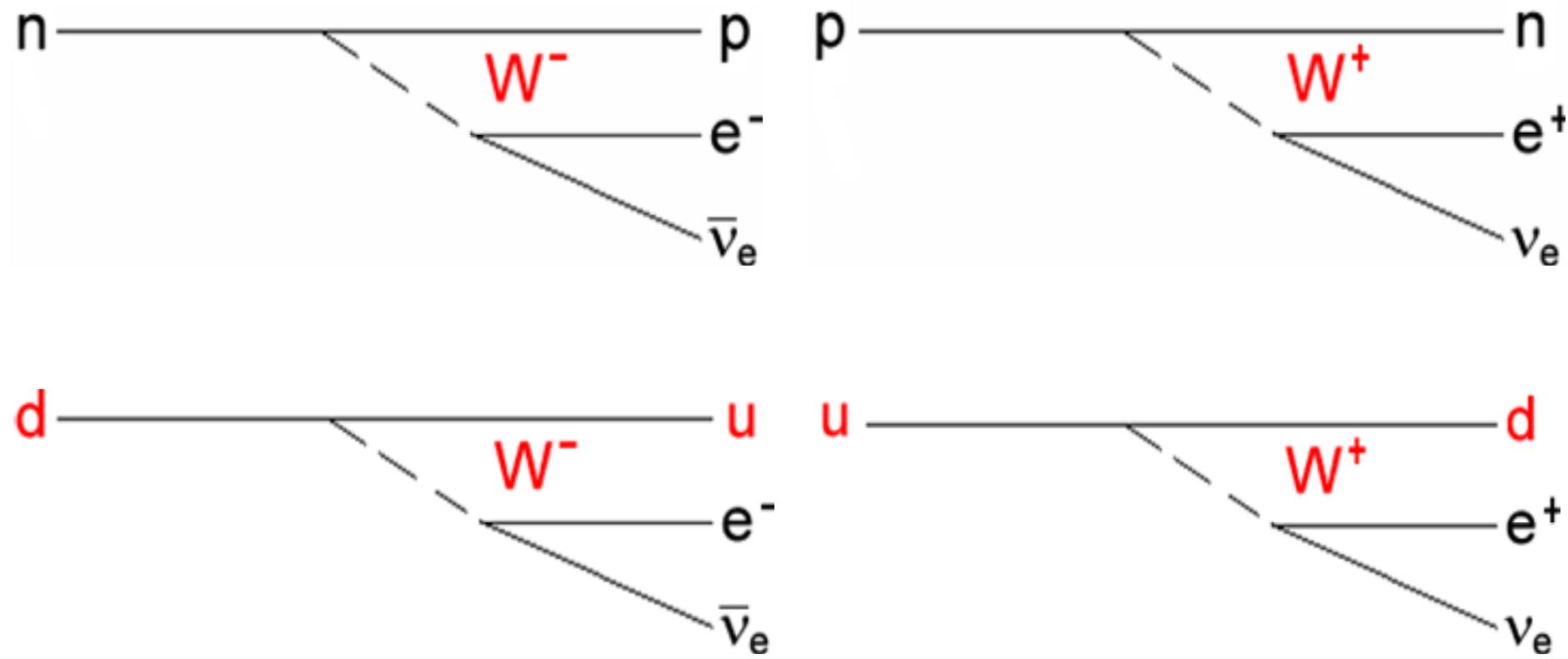


Пример. β -распады ядер-изобар $A=27$



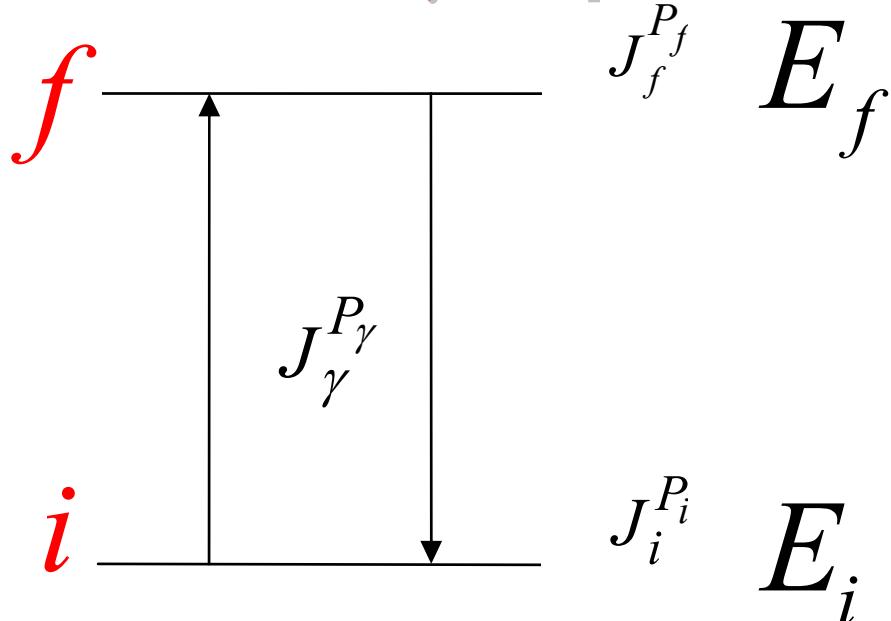
$$\lambda_\beta \sim Q_\beta^5$$

β -распад



β -распад происходит в результате слабых взаимодействий. На нуклонном уровне это соответствует переходам нейтрона в протон или протона в нейtron. На кварковом уровне при β -распаде происходит превращение *d*-кварка в *u*-кварк или превращение *u*-кварка в *d*-кварк.

γ -переходы в ядрах



Квантовые числа фотона

$$J_\gamma = 1$$

$$P_\gamma = -1$$

γ -переходы происходят в результате электромагнитного взаимодействия.

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

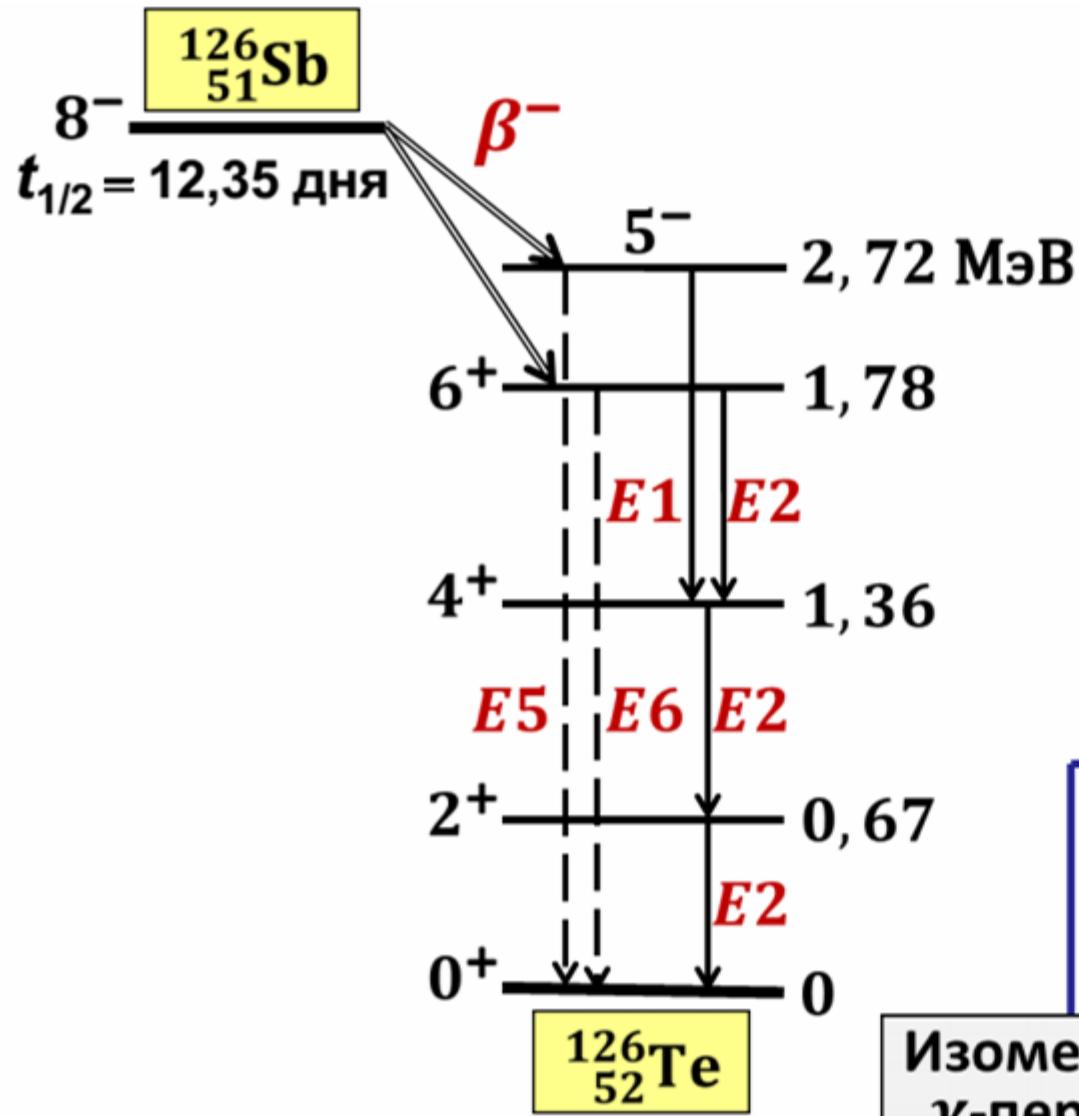
$$\vec{J}_f = \vec{J}_i + \vec{J}_\gamma \quad \text{или} \quad |J_i - J_f| \leq J_\gamma \leq J_i + J_f,$$

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

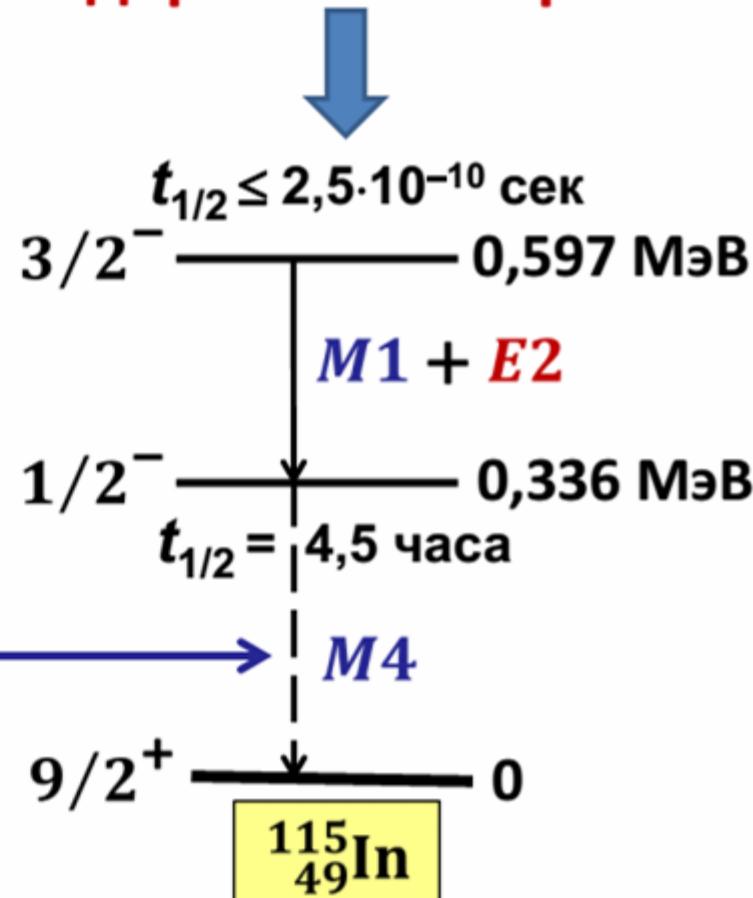
$$E_f = E_i + E_\gamma + T_R.$$

T_R - энергия ядра отдачи.

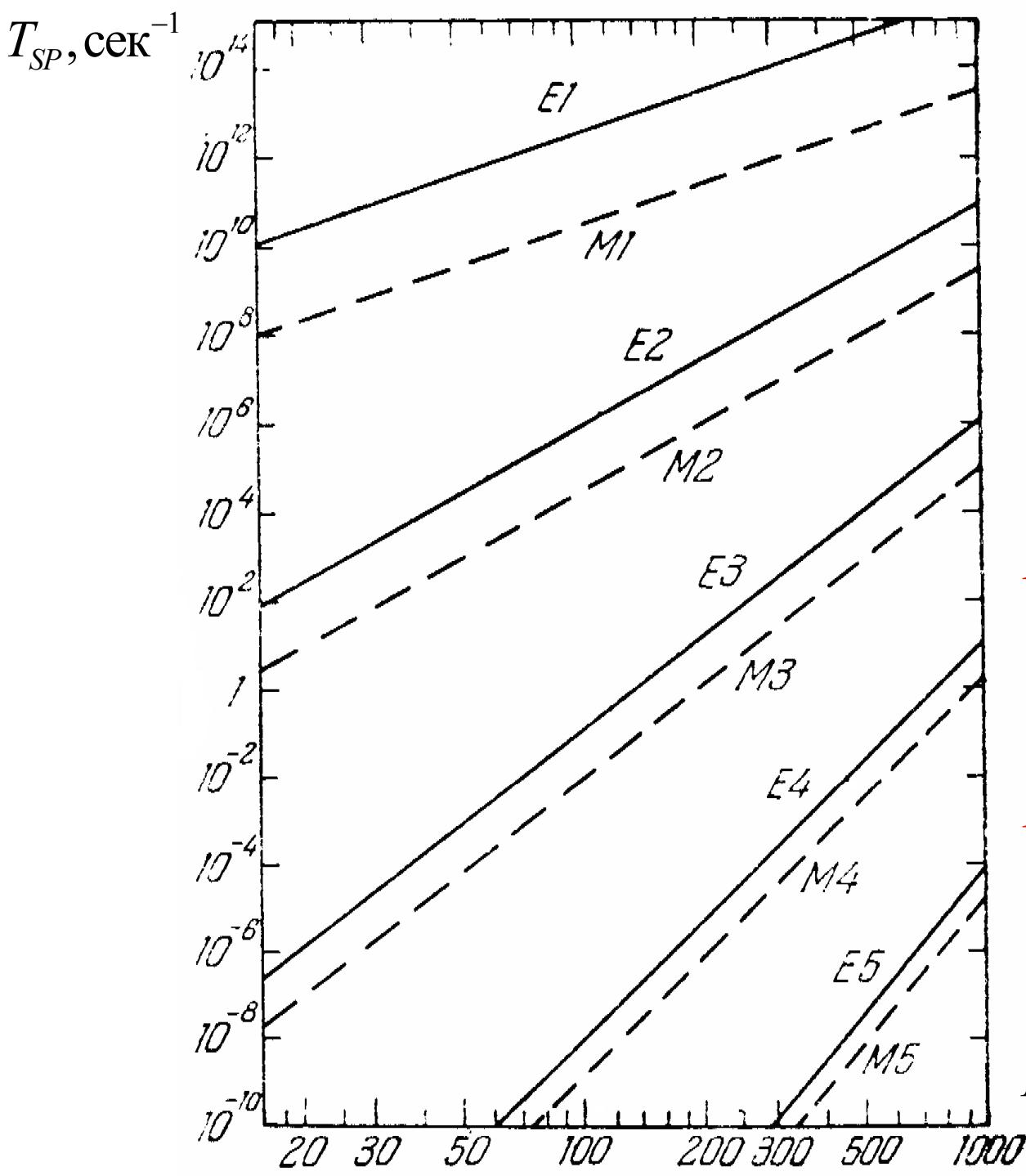
Каскады γ -переходов $t_{1/2} < 10^{-7}$ сек



Ядерная изомерия:



Изомерный
 γ -переход



Вероятность γ -перехода
(в сек^{-1}) протона
в зависимости от энергии
 γ -квантов различных
мультипольностей

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

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

Резонансное поглощение γ -квантов

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

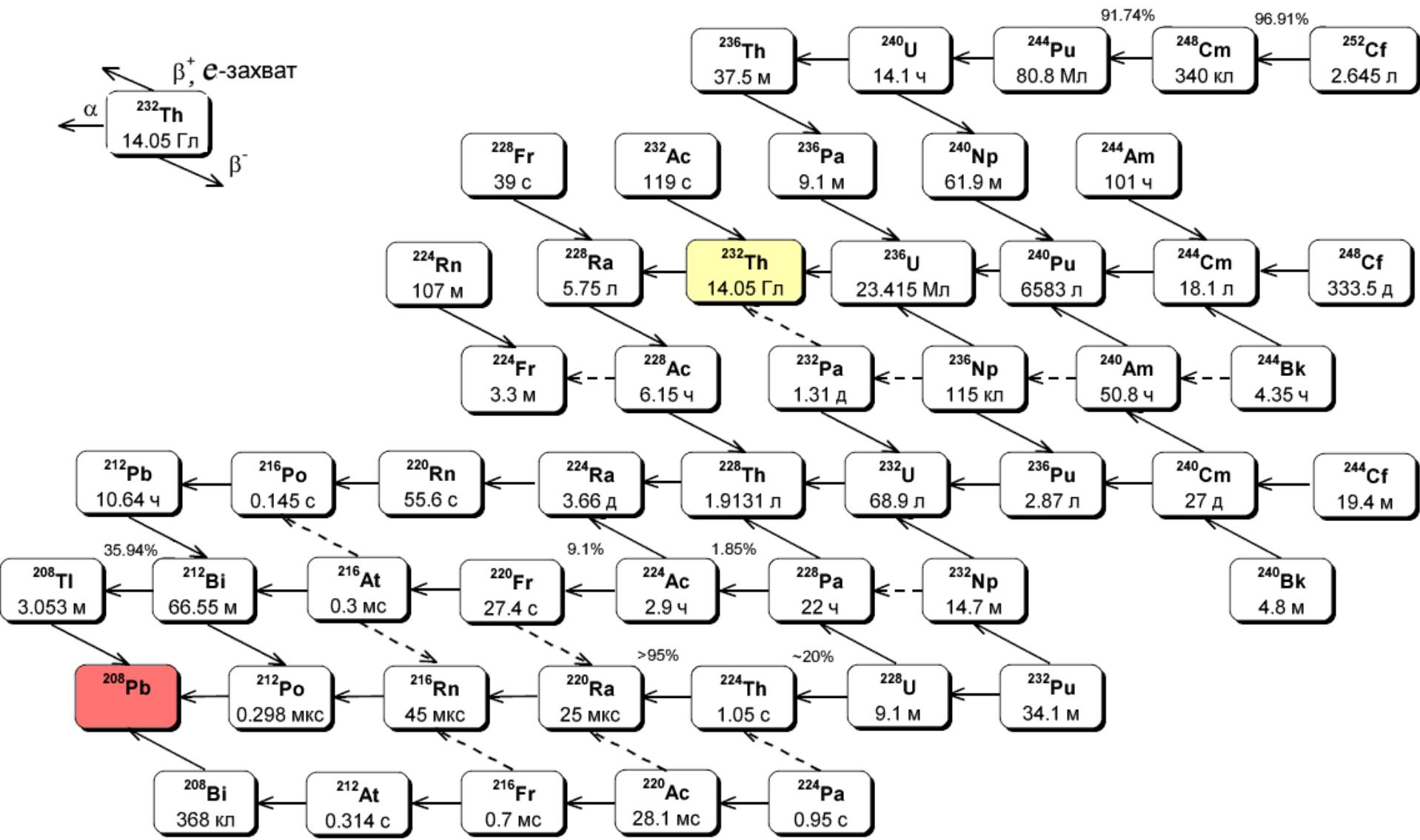
Для свободных ядер и ядер, связанных в кристаллической решётке условия отдачи при испускании γ -квантов существенно различны. В кристаллах возможны γ -переходы, при которых энергию отдачи получает не отдельное ядро, а весь кристалл.

Нобелевская премия по физике

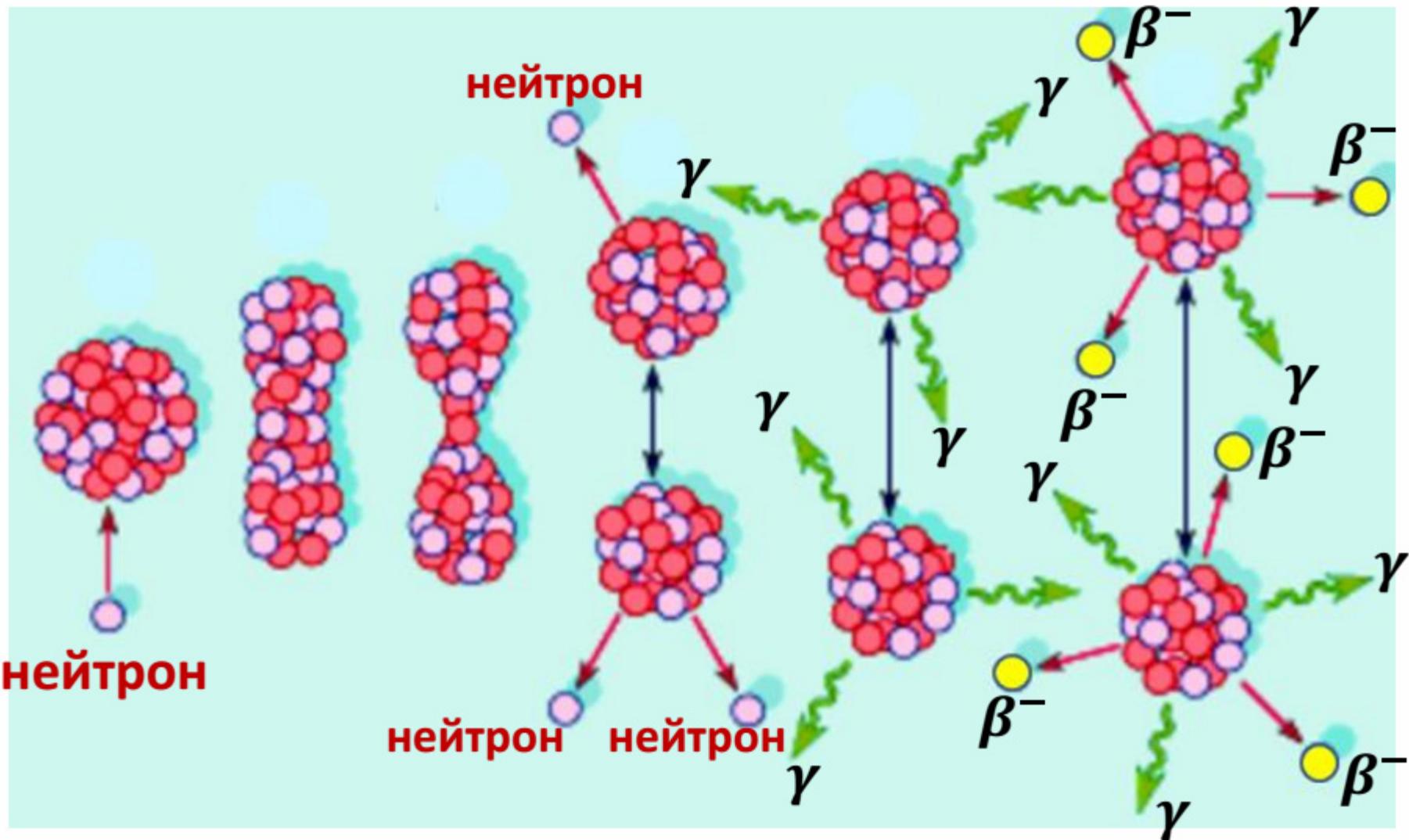
1961 г. – Р. Мессбауэр.

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

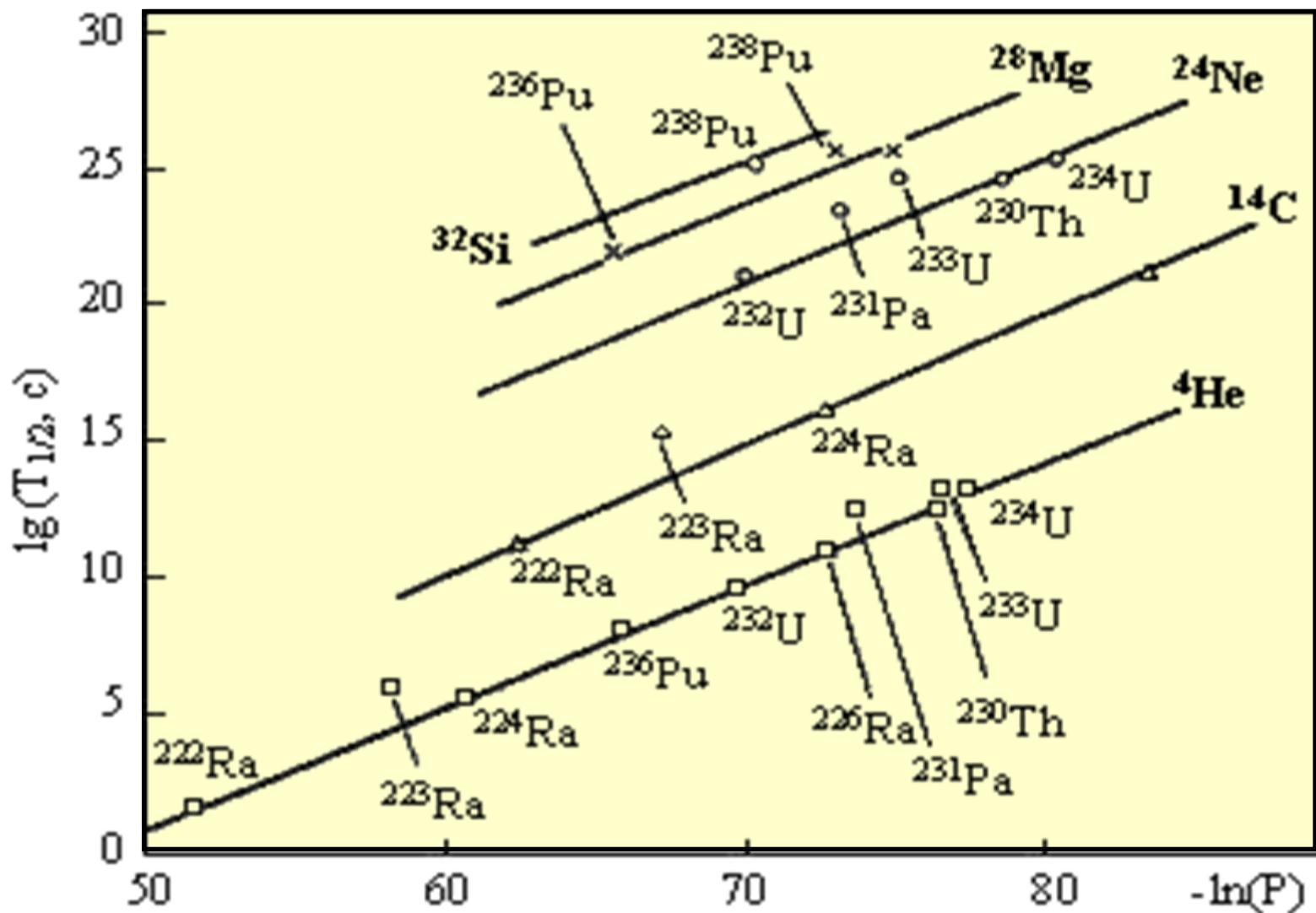
Радиоактивное семейство 4n



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
β^- -распад	$e^-\tilde{\nu}$	1898	E. Rutherford
β^+ -распад	$e^+\nu$	1934	I. et F. Joliot-Curie
е-захват	ν	1938	L. Alvarez
Гамма-распад	γ -квант	1900	P. Villard
Ядерная изомерия	γ , е-захват, β^+ , β^- , деление	1921	O. Hahn
Спонтанное деление	Два осколка сравнимой массы	1940	Г.Н. Флеров, К.А. Петржак
Двойной β -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.