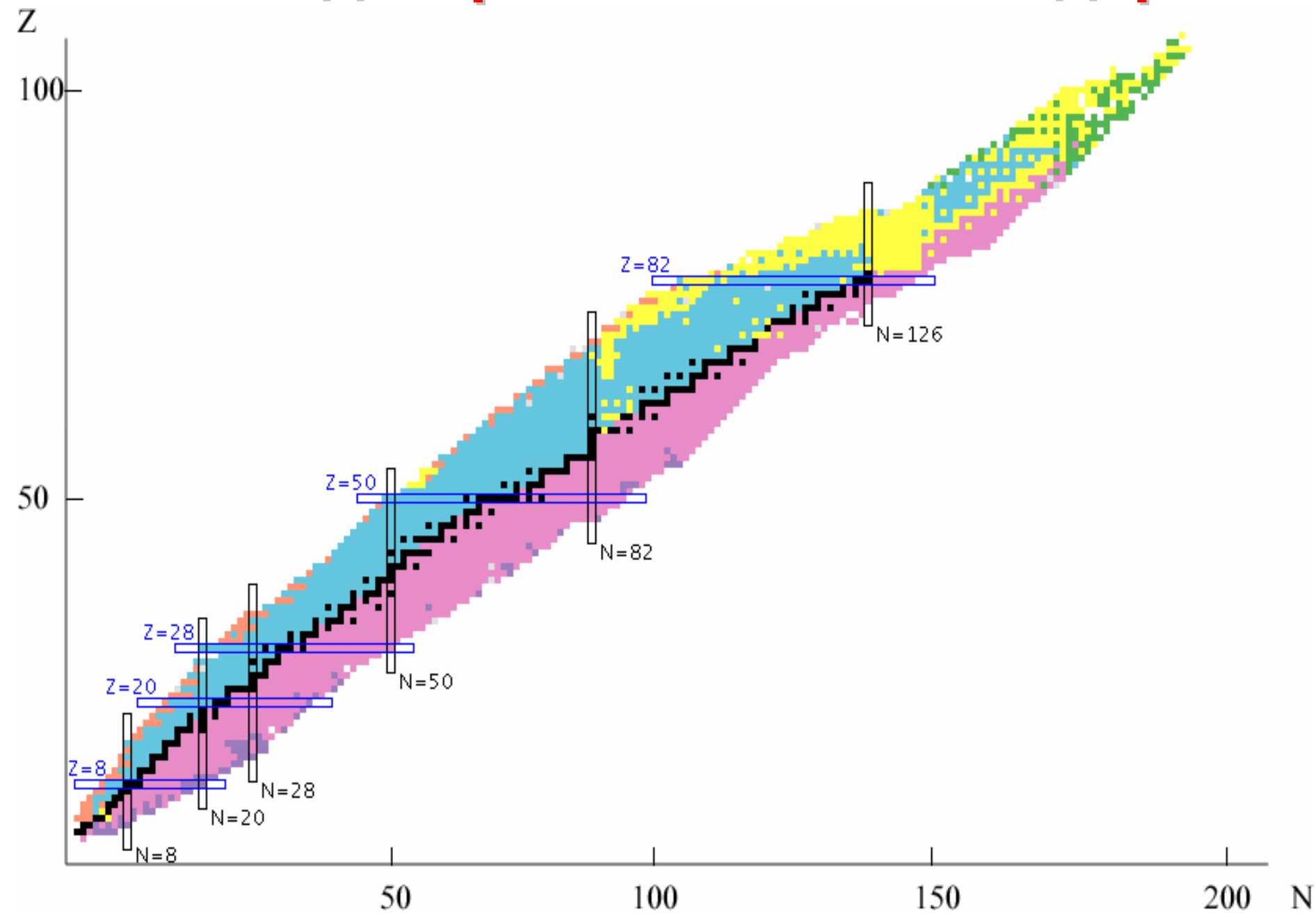


Ядерная физика и Человек

РАДИОАКТИВНОСТЬ

N-Z диаграмма атомных ядер



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

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

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 $t \rightarrow t+dt$, 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 ,

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

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

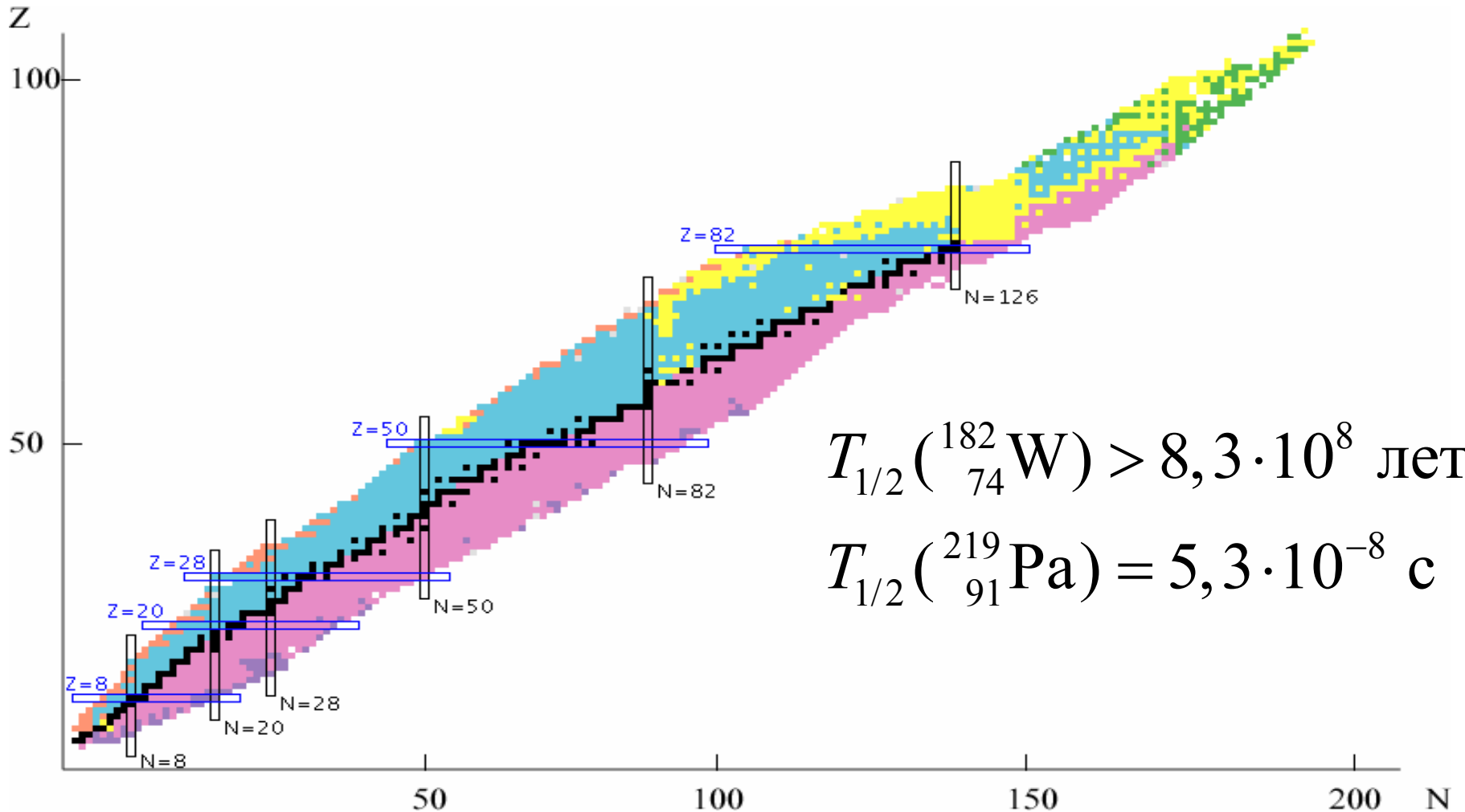
$T_{1/2}$ - период полураспада – время, за которое число радиоактивных ядер уменьшается вдвое

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

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

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

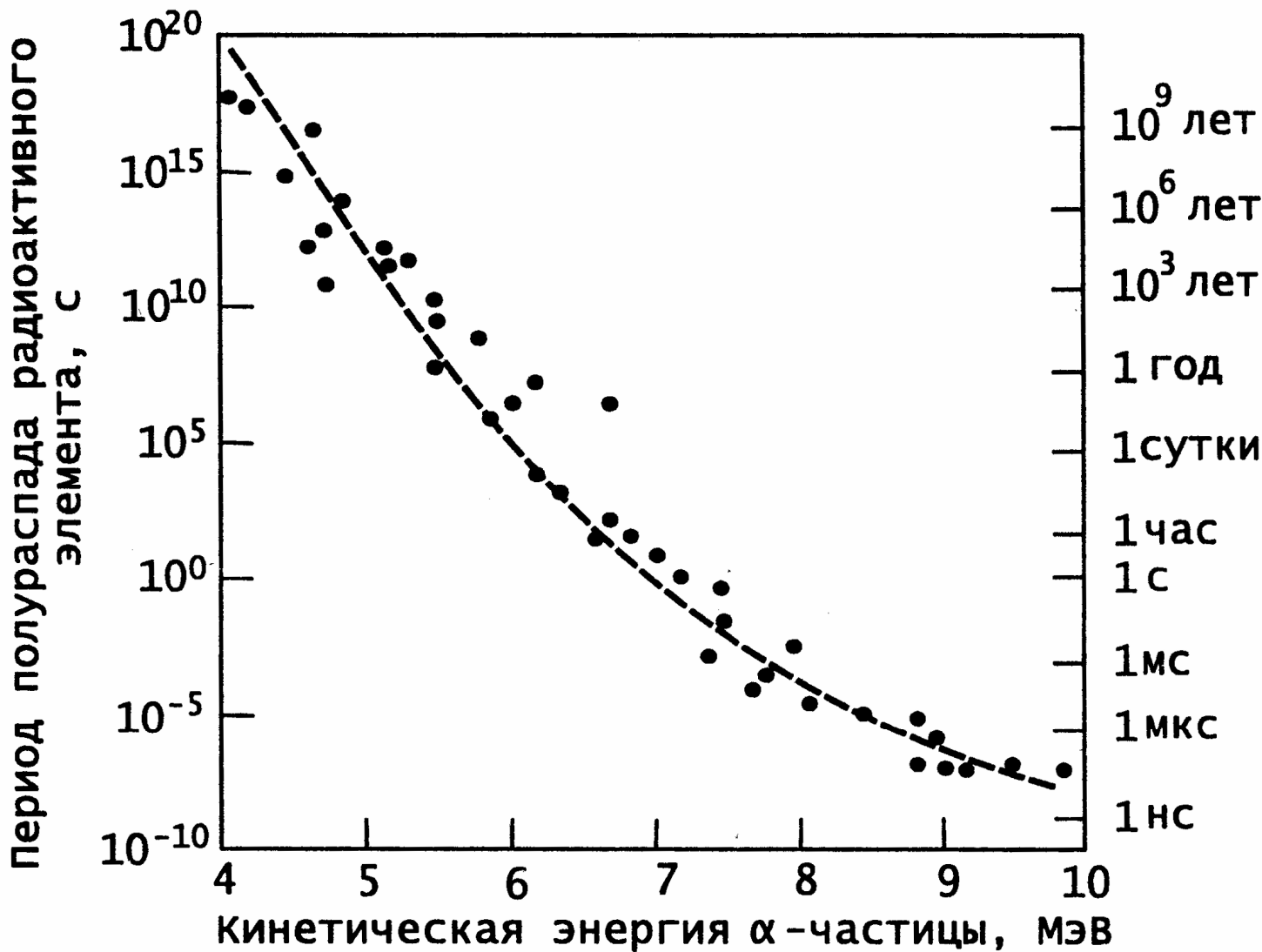
Q_α — энергия α -распада.

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

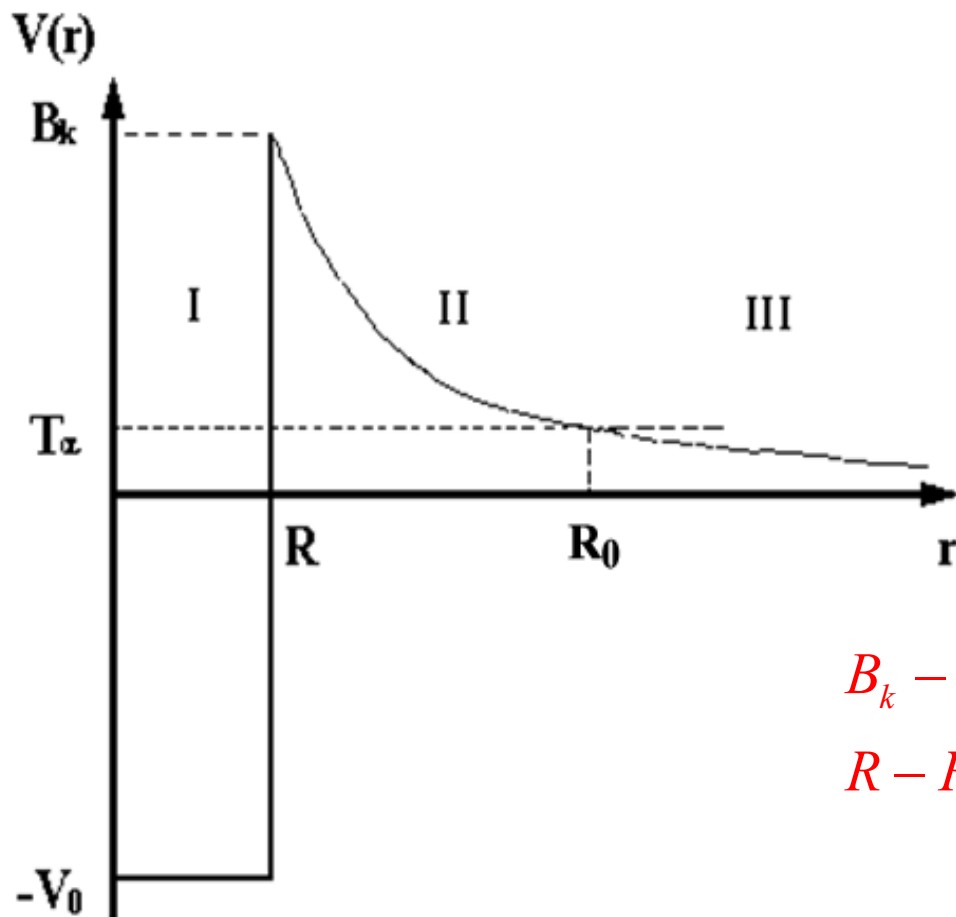
$$T_\alpha = Q_\alpha \frac{M(A - 4, Z - 2)}{M(A - 4, Z - 2) + M_\alpha}.$$

α -частица уносит 98% энергии α -распада.

Закон Гейгера-Неттола



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 $V(r)$

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

Физика процесса α -распада

Вероятность α -распада λ равна произведению вероятности обнаружить α -частицу на границе ядра f на вероятность её прохождения через потенциальный барьер P .

$$\lambda = f \cdot P$$

$$f = \frac{v}{2R} = \frac{v}{2r_0 A^{1/3}} \approx \frac{c}{2r_0 A^{1/3}} \left[\frac{2(T_\alpha + V(r))}{\mu_\alpha c^2} \right]^{1/2} \approx 10^{21} \text{ сек}^{-1}$$

v — скорость α -частицы внутри ядра $v \approx (0,1 - 0,2)c$,

T_α — кинетическая энергия α -частицы,

μ_α — приведенная масса α -частицы,

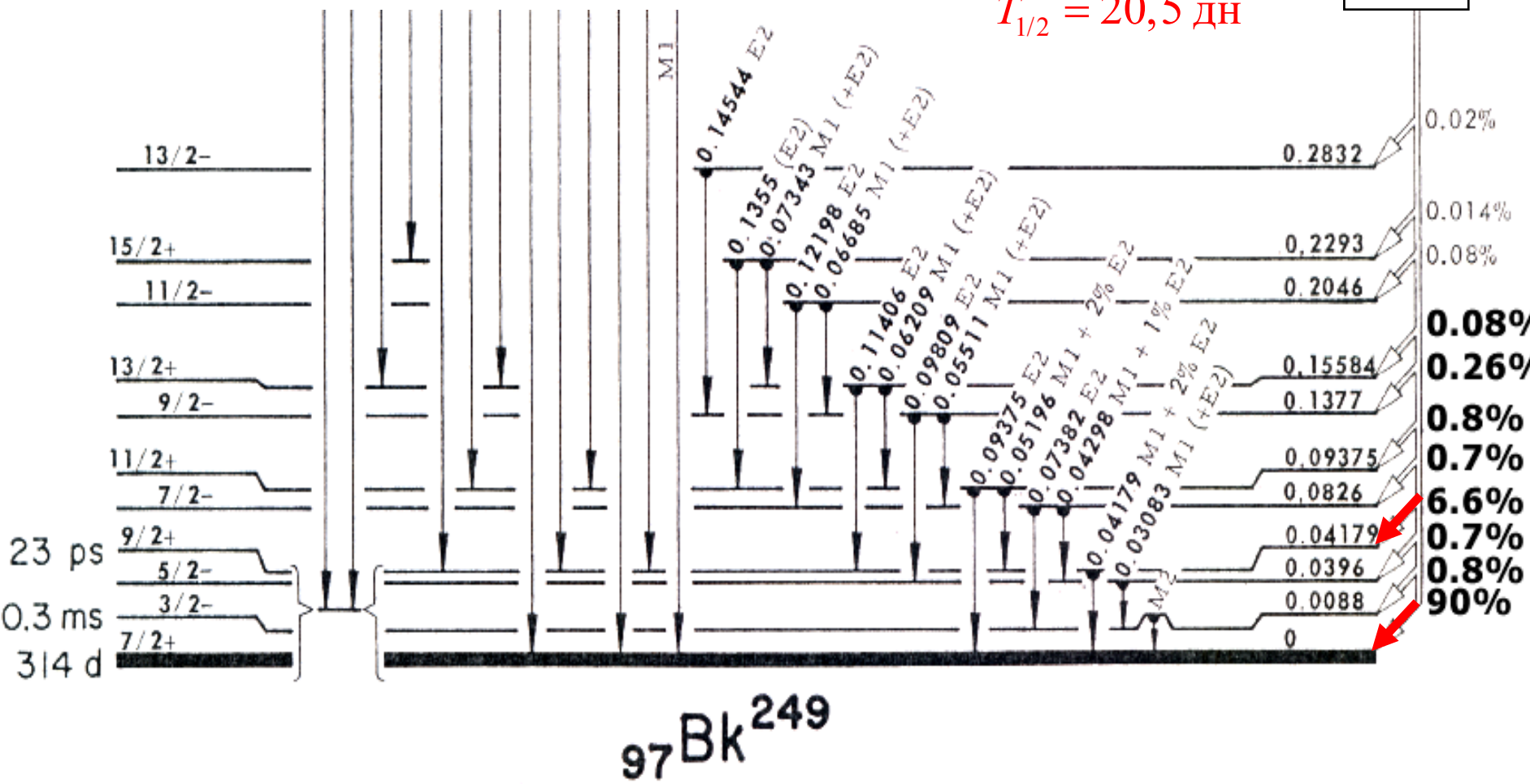
$V(r)$ — ядерный потенциал ($V_0 \approx 30$ МэВ).

Пример. α -распад ^{253}Es

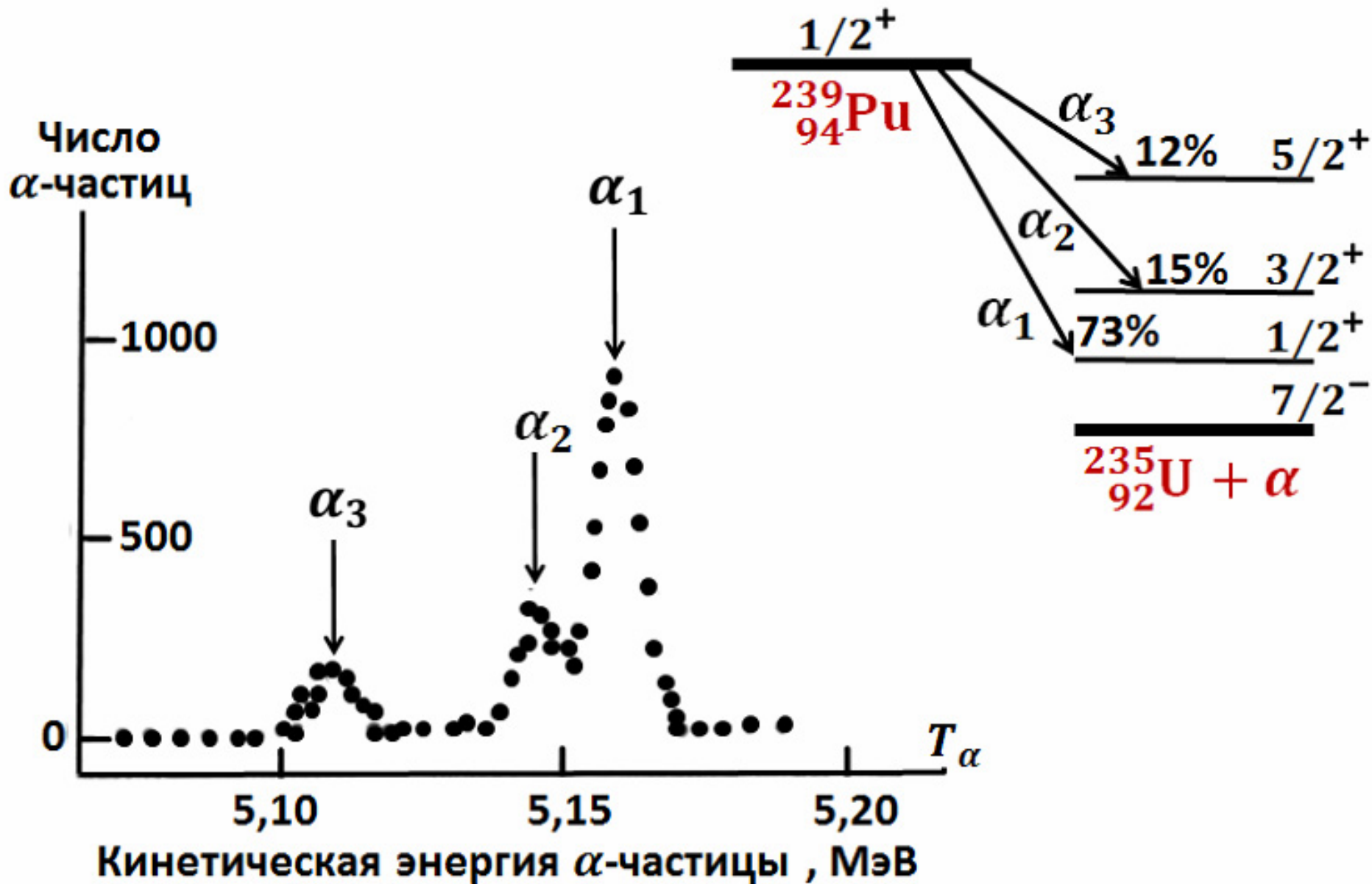
$$J^p(^{253}\text{Es}) = 7/2^+$$

$$T_{1/2} = 20,5 \text{ дн}$$

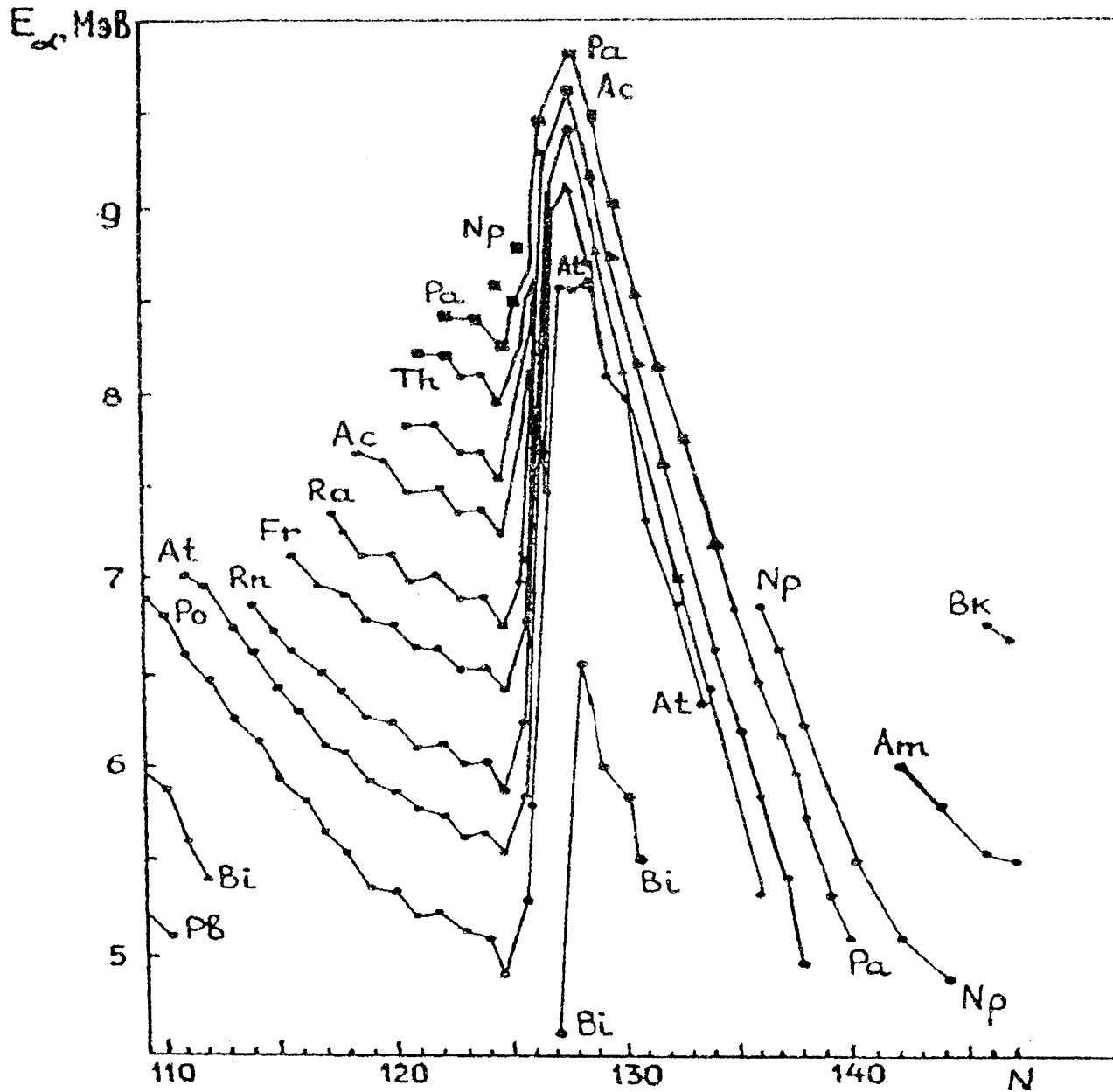
^{253}Es



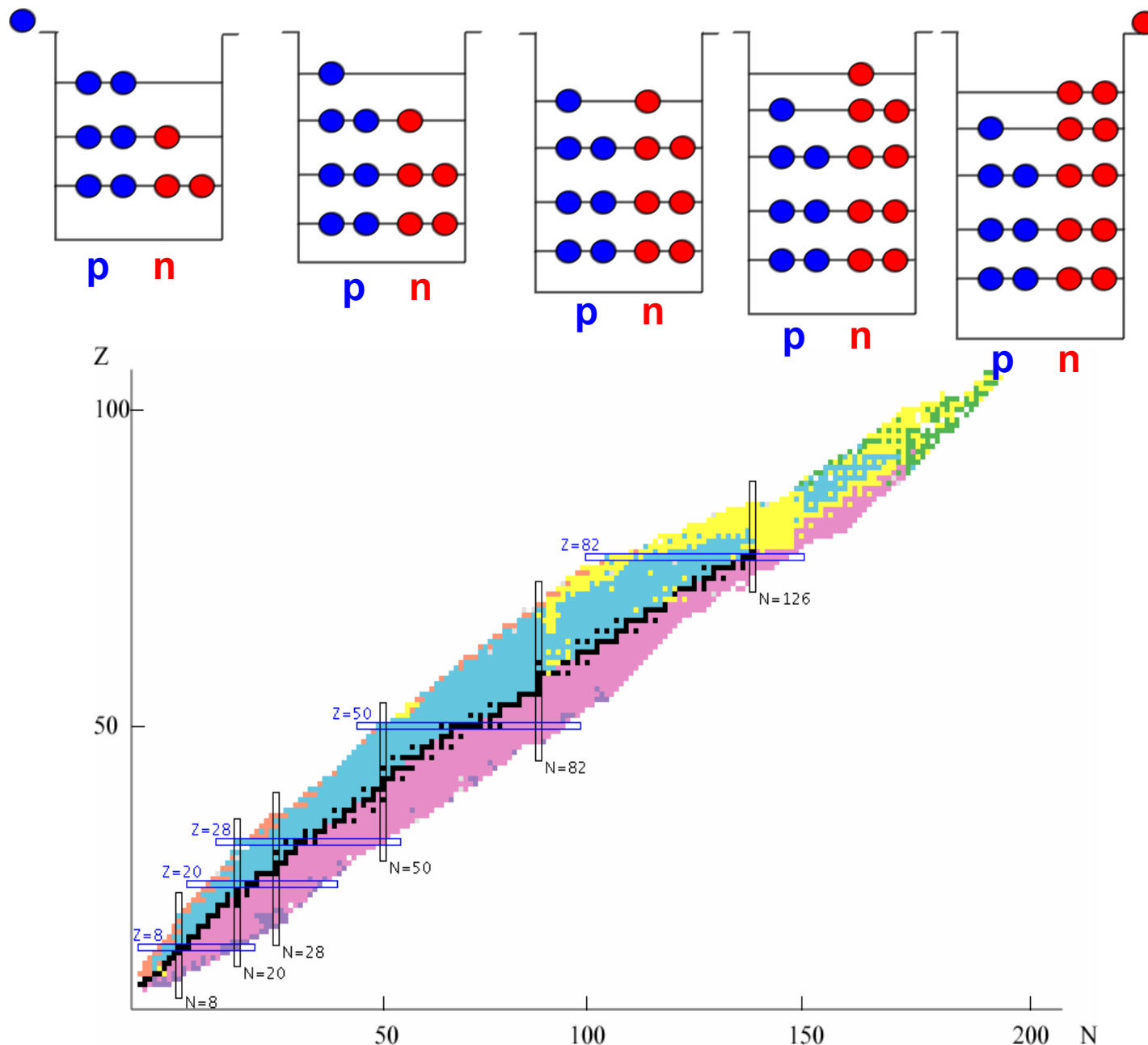
Пример. α -распад $^{239}_{94}\text{Pu}$



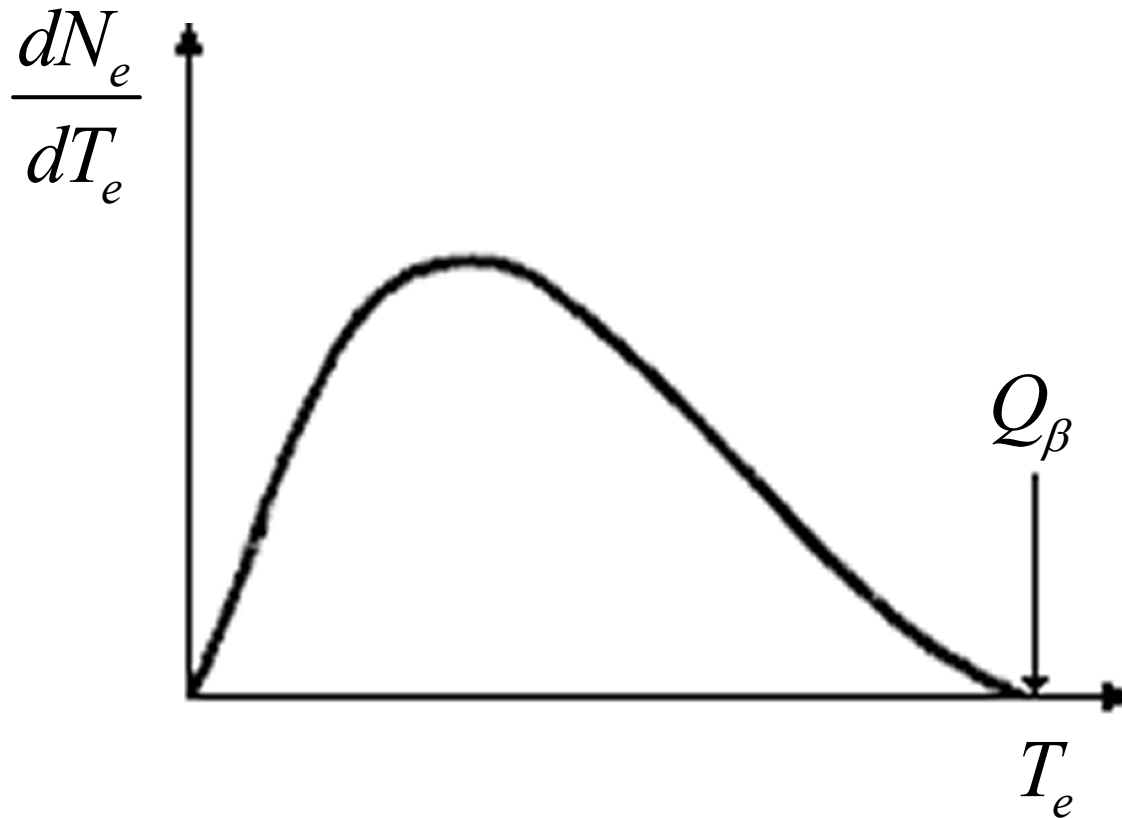
Энергия α -распада. Магическое число $N = 126$



N-Z диаграмма атомных ядер

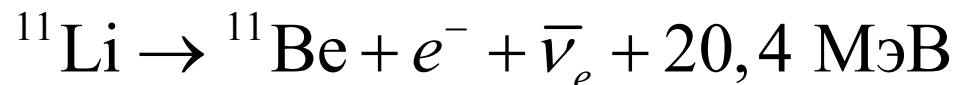
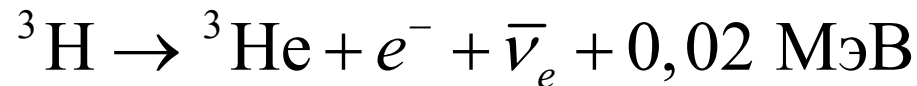


Спектр электронов β -распада



В. Паули

Энергии β -распада изменяются от 0.02 МэВ до ~20 МэВ.



Периоды полураспада изменяются от 10^{-3} с до 10^{16} лет.

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:

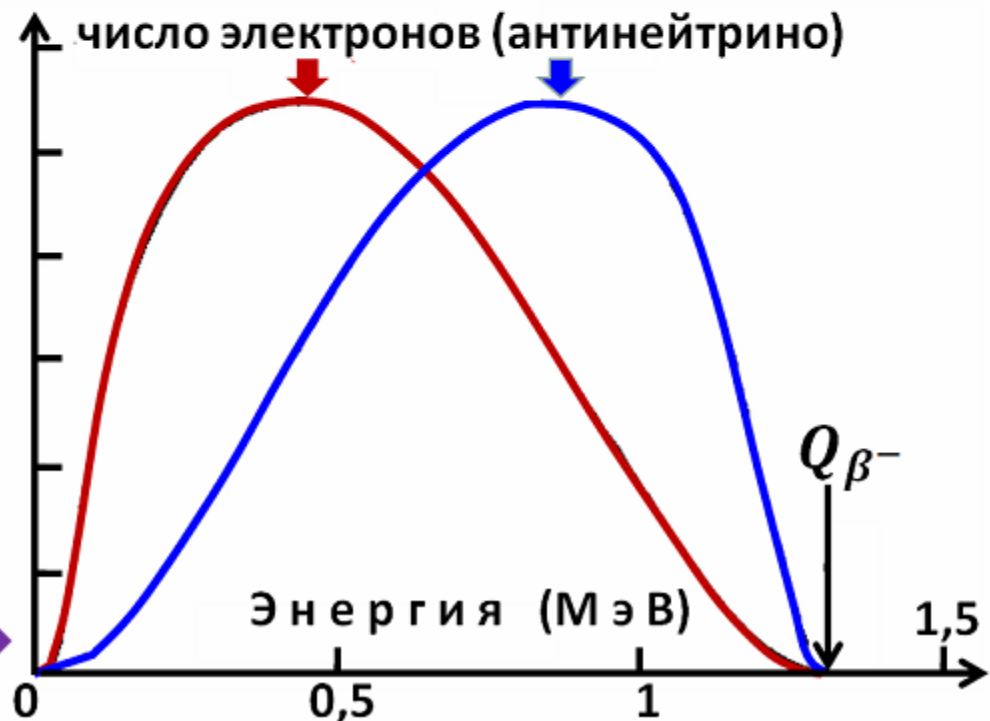
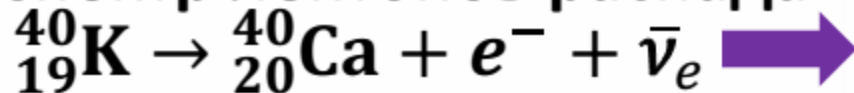
$$Q_{\beta} \approx 19 \text{ кэВ} \div 13,4 \text{ МэВ},$$

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

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

Спектры продуктов
при β^{\pm} -распаде
непрерывны

Спектр лептонов распада



Энергия β -распада

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

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

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

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

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

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

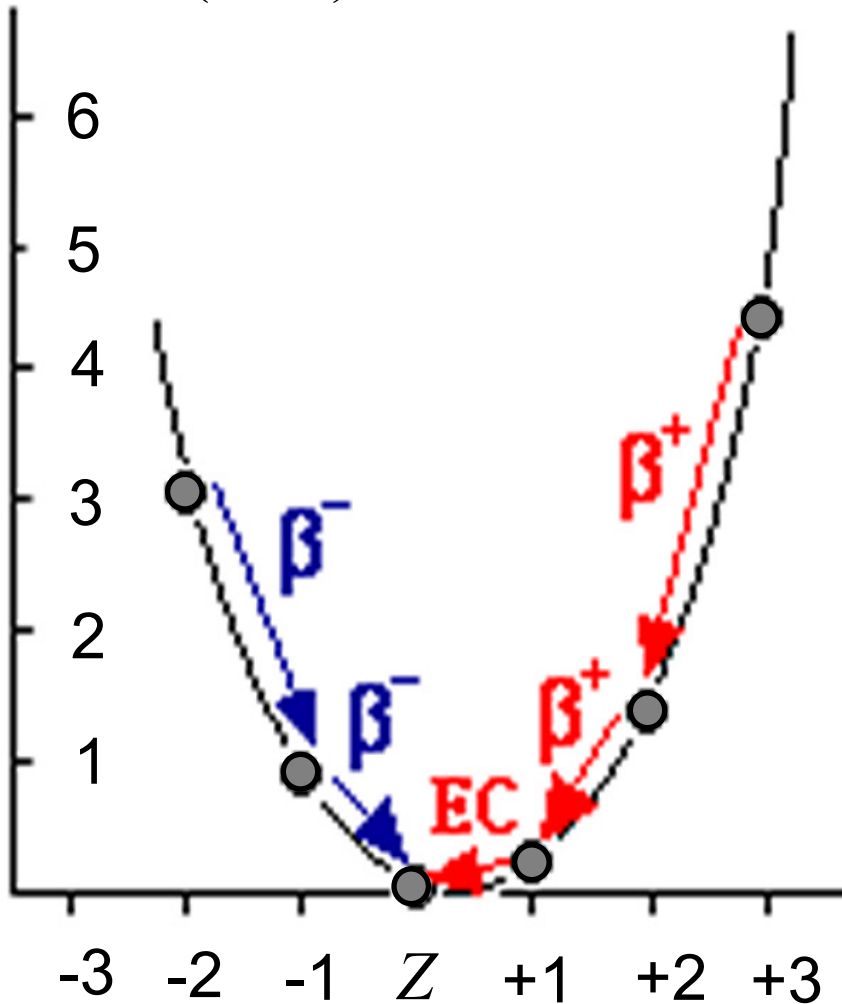
$$Q_{\beta^+} = \left[M^{\text{ат}}(A, Z) - M^{\text{ат}}(A, Z - 1) \right] c^2 - 2m_e c^2 \quad - \beta^+ \text{-распад}$$

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

$M^{\text{ат}}$ - массы атомов.

β-распад ядер

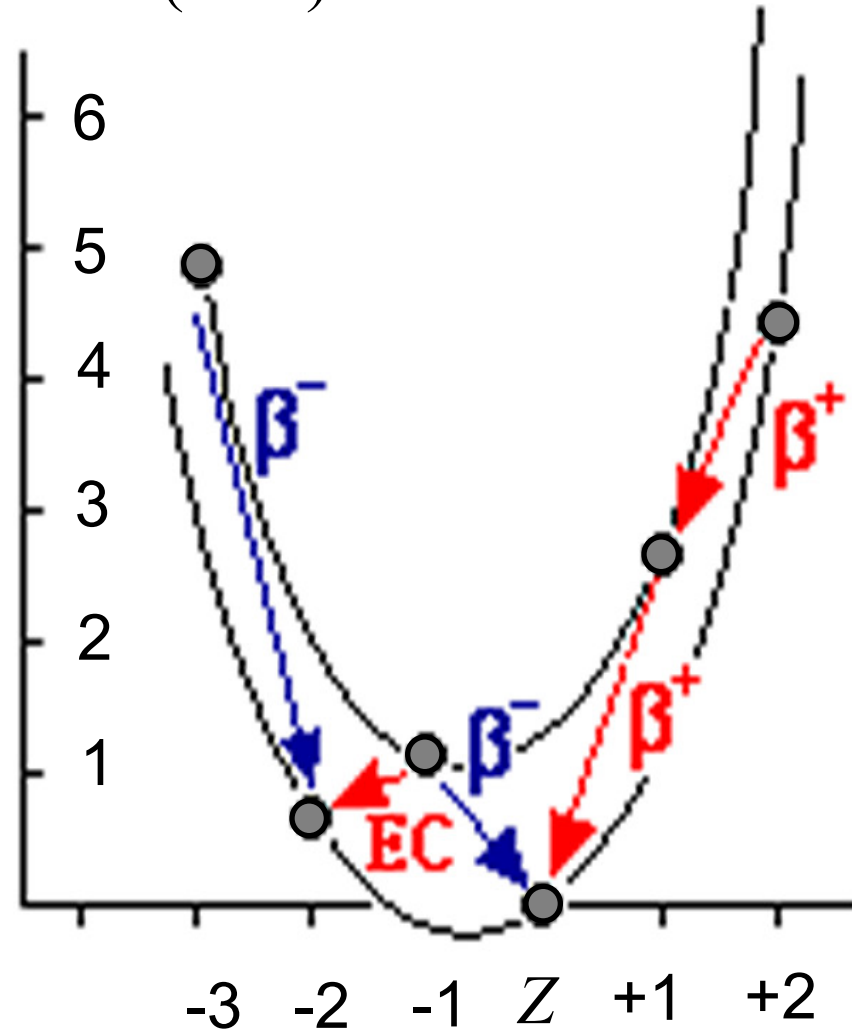
ΔMc^2 (МэВ)



Нечетные A

$\beta^- \rightarrow$

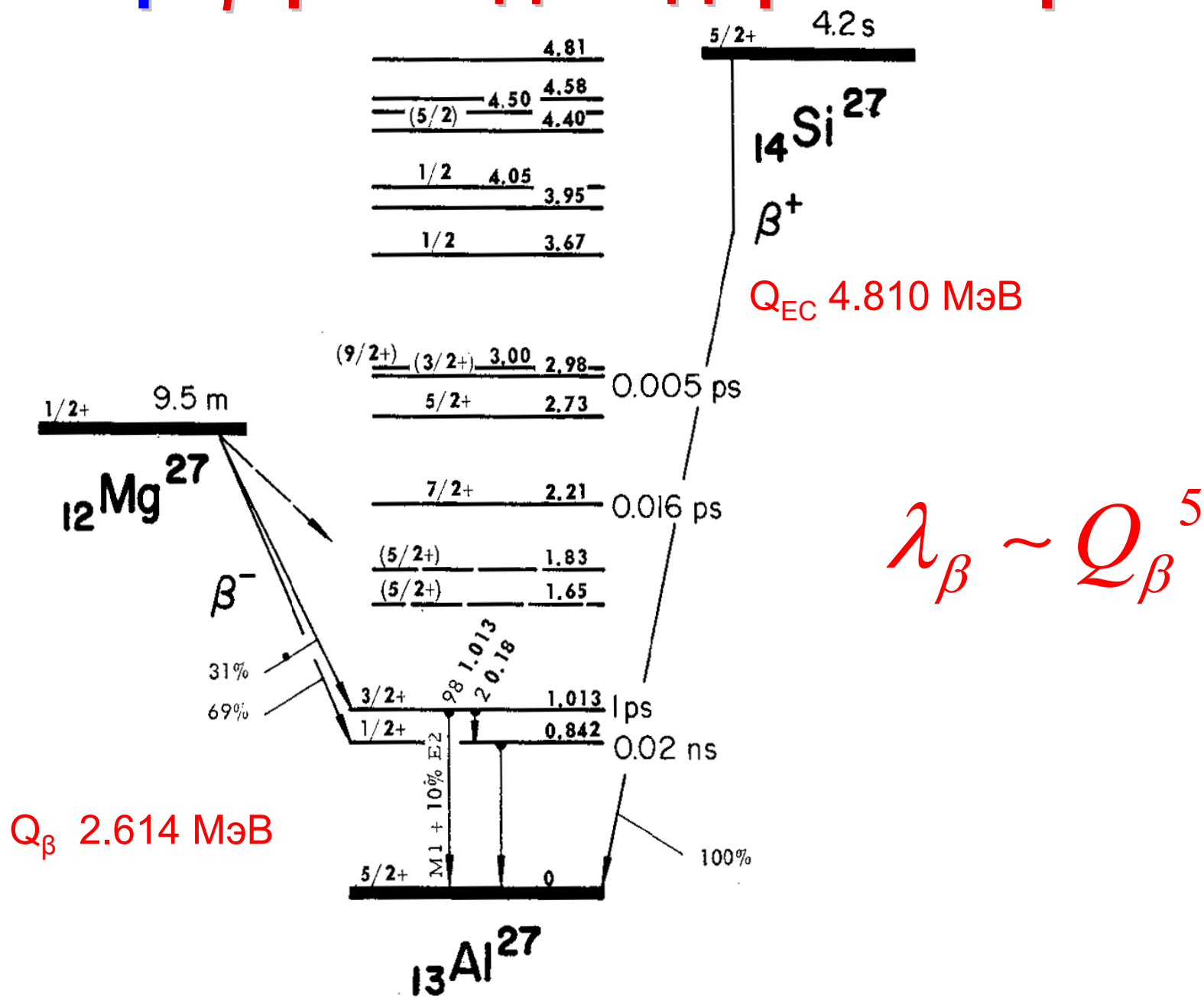
ΔMc^2 (МэВ)



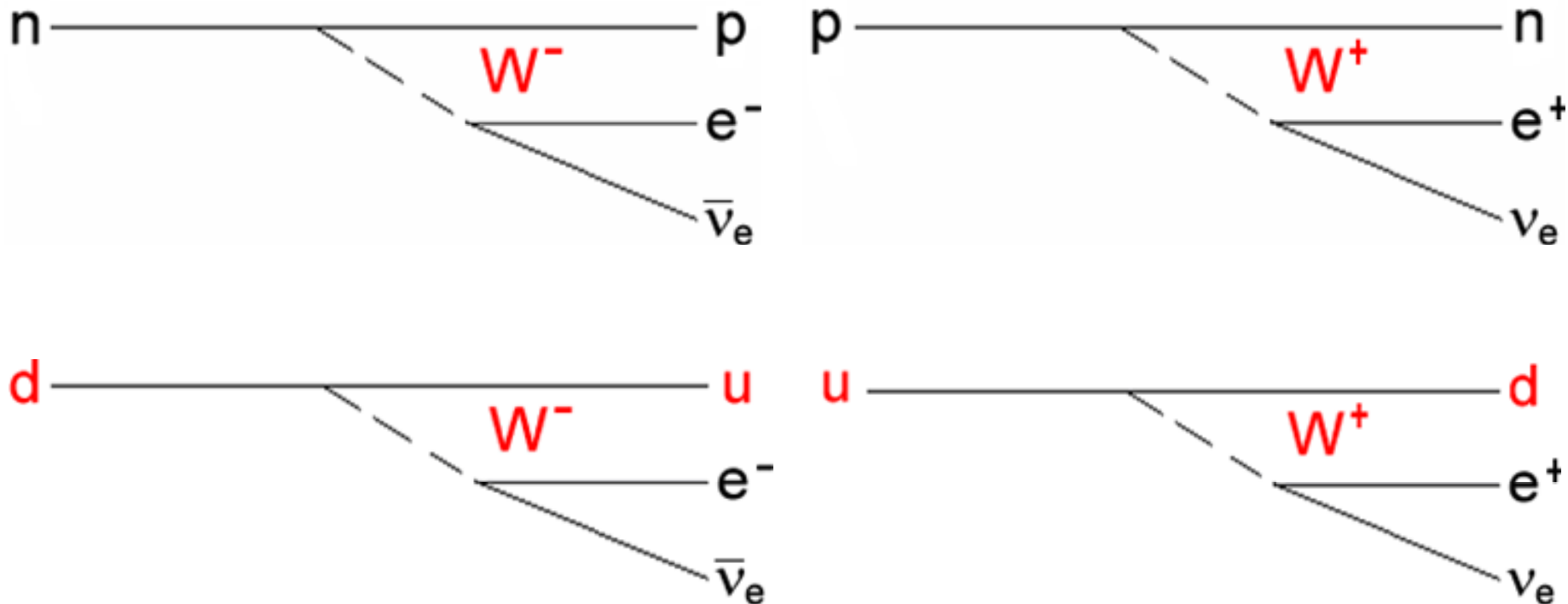
Четные A

$\leftarrow \beta^+, EC$

Пример. β -распады ядер-изобар $A=27$



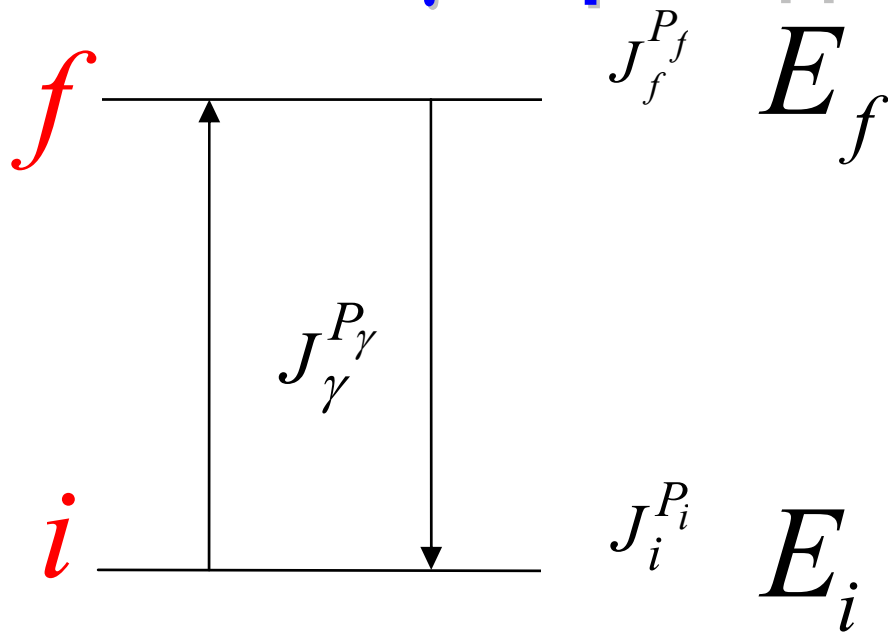
β -распад



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

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:

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

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

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

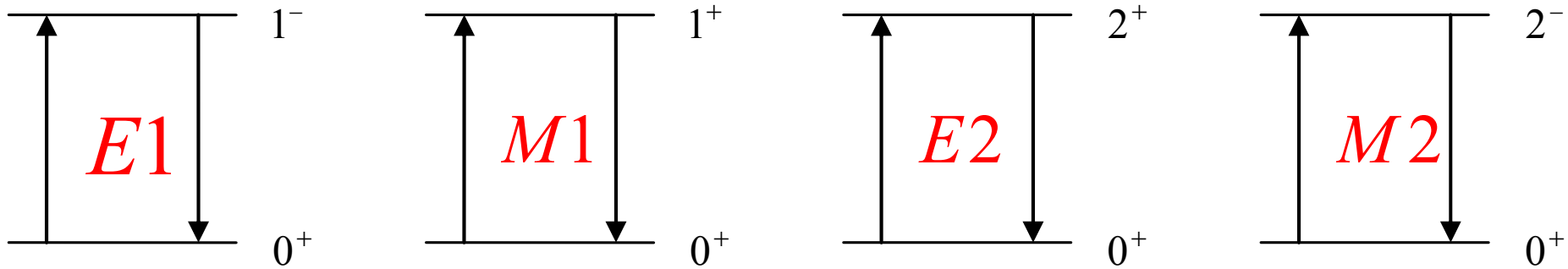
T_R - энергия ядра отдачи.

Магнитные и электрические фотоны

Фотоны с определённым значением полного момента J имеют разные значения орбитального момента l и, следовательно, разные чётности. В зависимости от чётности при определенном значении J фотоны различают на *магнитные и электрические*:

$$l = J, \quad P = (-1)^{J+1} \text{ – магнитные фотоны } MJ;$$
$$l = J \pm 1, \quad P = (-1)^J \text{ – электрические фотоны } EJ.$$

Мультипольности γ -переходов



Правила отбора по чётности

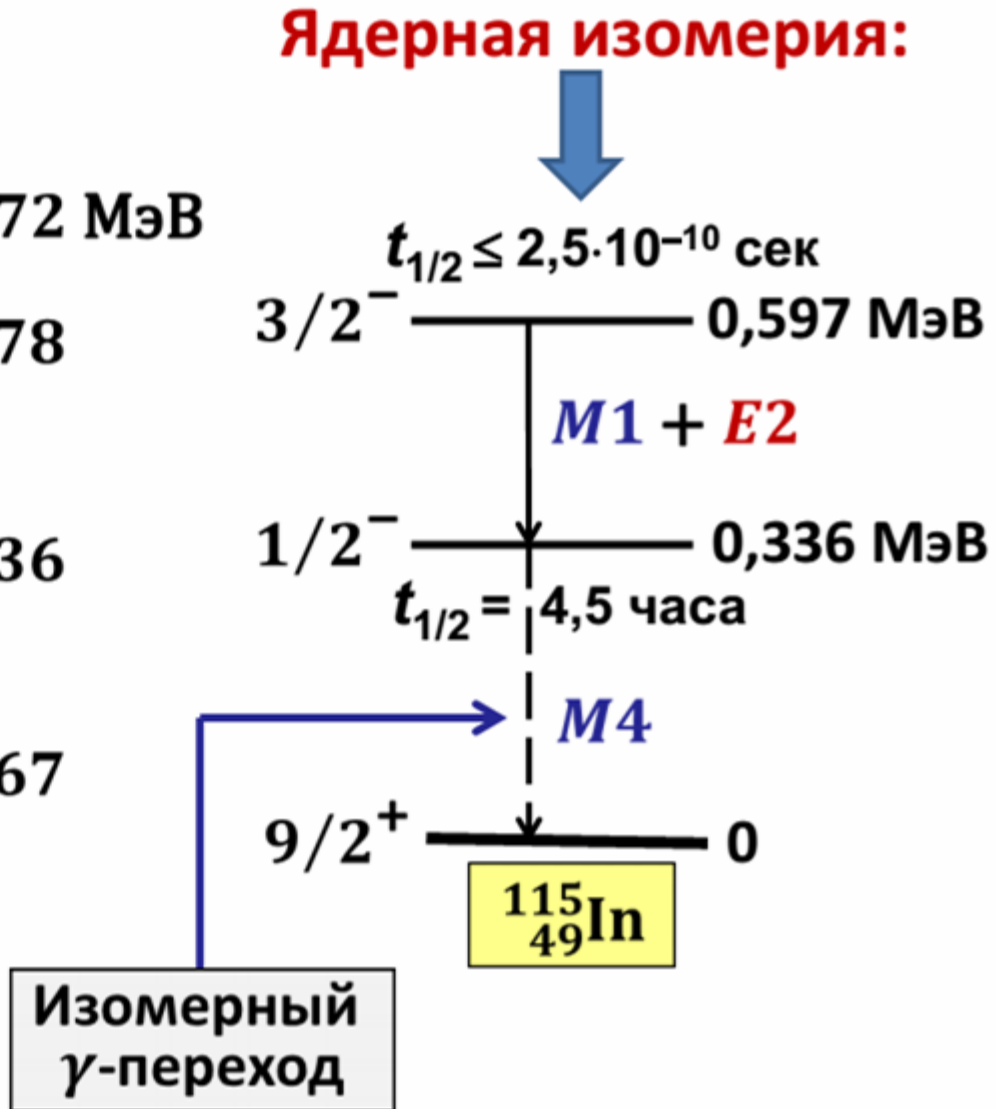
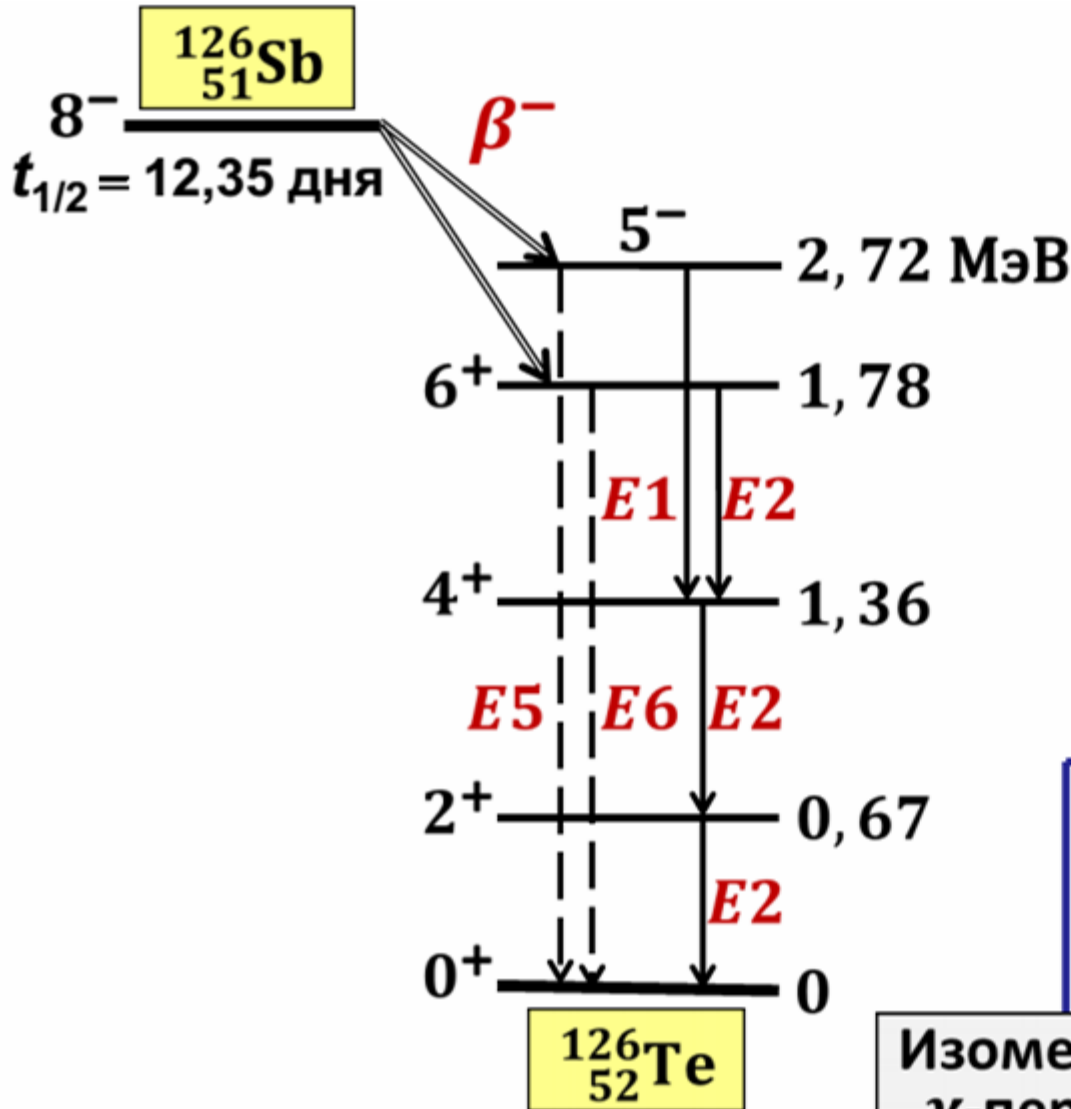
$$P_i P_f = (-1)^J \quad \text{для } EJ\text{-фотонов};$$

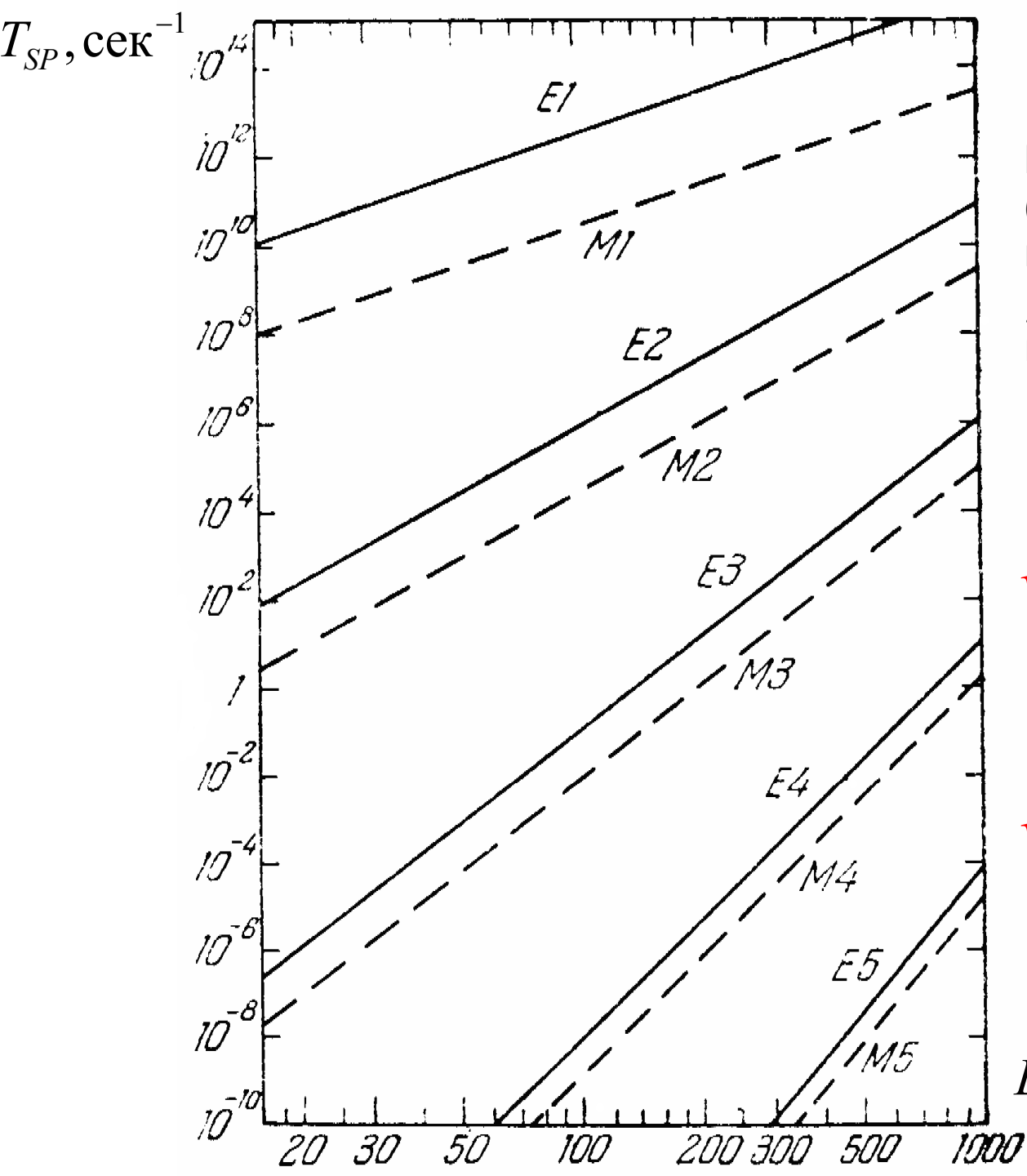
$$P_i P_f = (-1)^{J+1} \quad \text{для } MJ\text{-фотонов}.$$

Вероятности испускания или поглощения магнитных и электрических фотонов описываются приближенными соотношениями

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

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





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

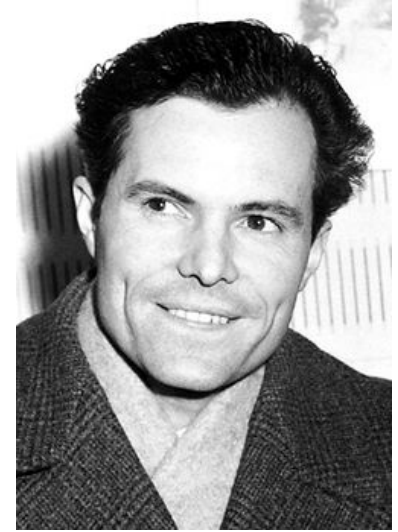
$$w(MJ) \sim \frac{1}{\hat{\lambda}} \left(\frac{R}{\hat{\lambda}} \right)^{2J+2}$$

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

$E_\gamma, \text{кэВ}$

Резонансное поглощение γ -квантов

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



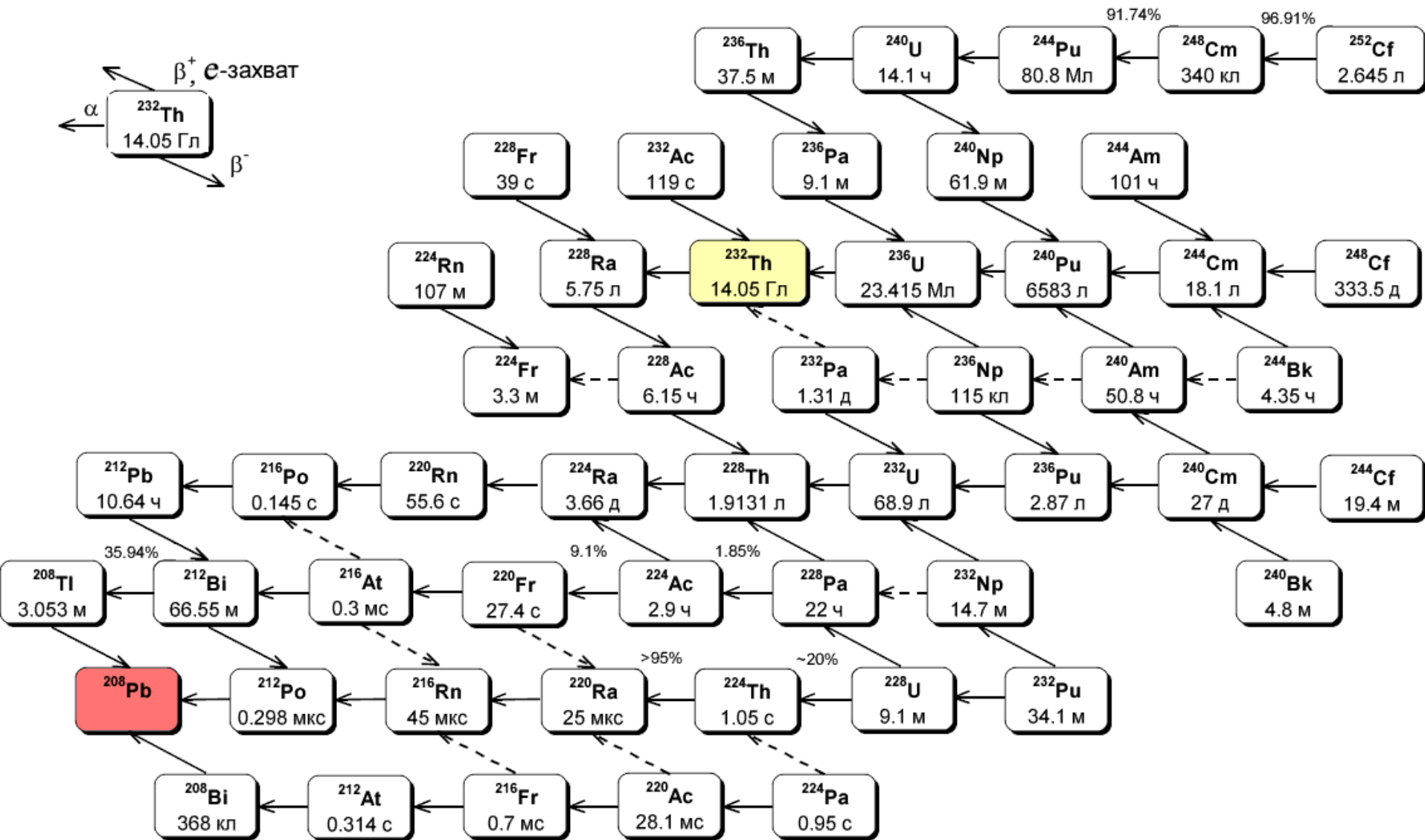
Для свободных ядер и ядер, связанных в кристаллической решётке условия отдачи при испускании γ -квантов существенно различны. В кристаллах возможны γ -переходы, при которых энергию отдачи получает не отдельное ядро, а весь кристалл.

Нобелевская премия по физике

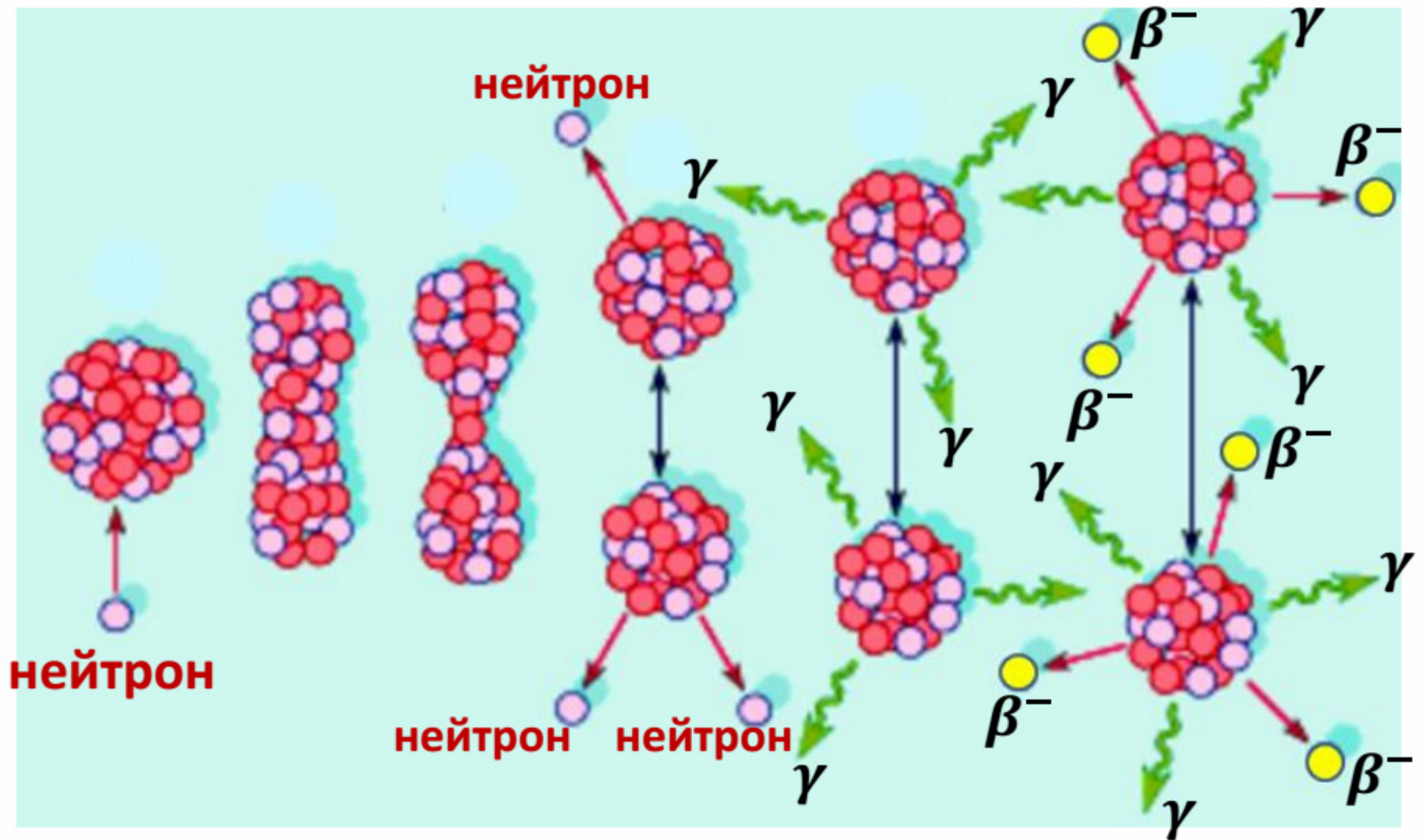
1961 г. – Р. Мессбауэр.

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

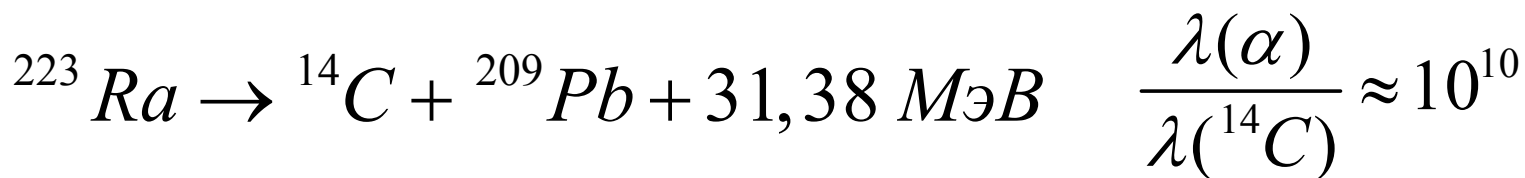
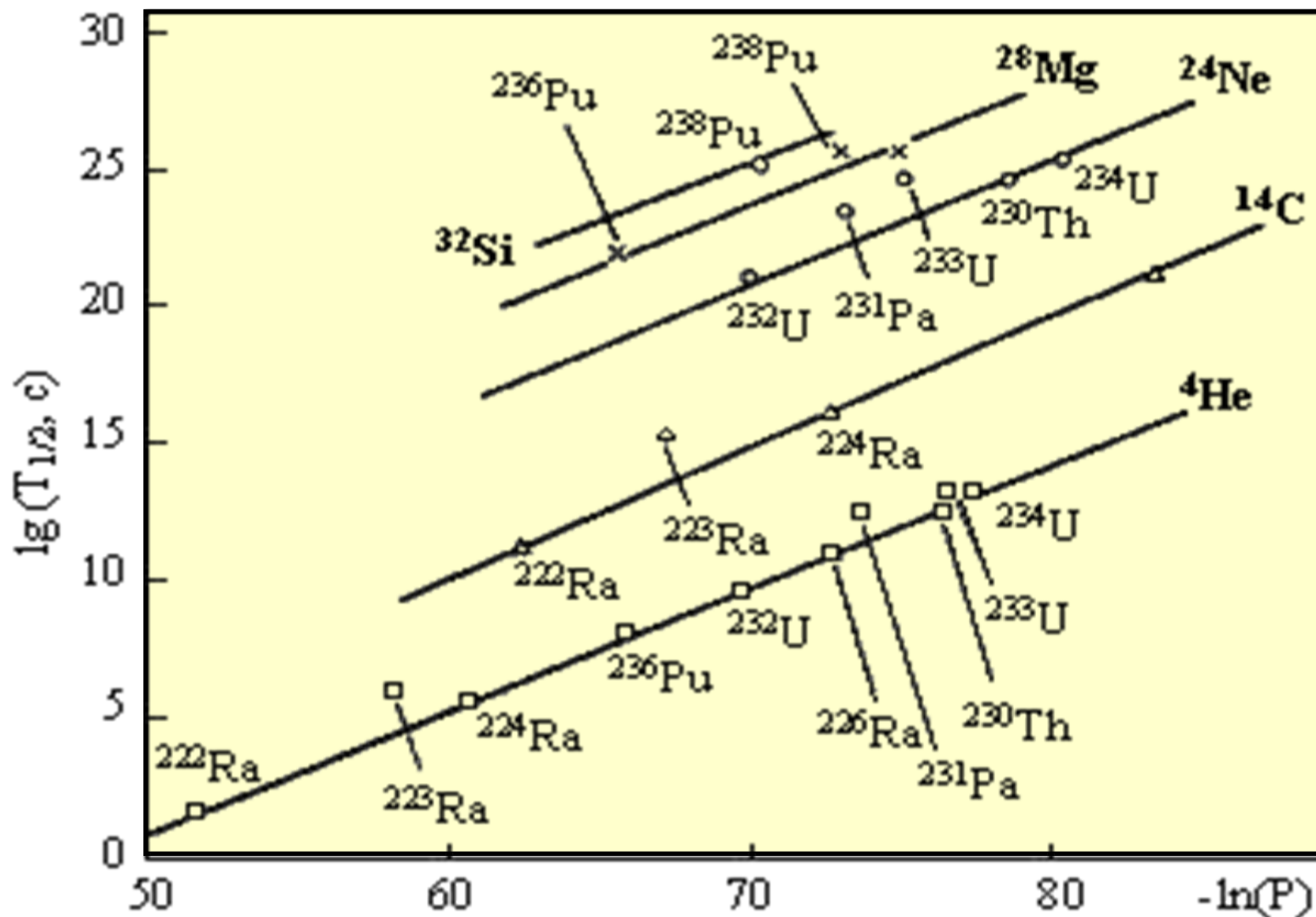
Радиоактивное семейство 4n



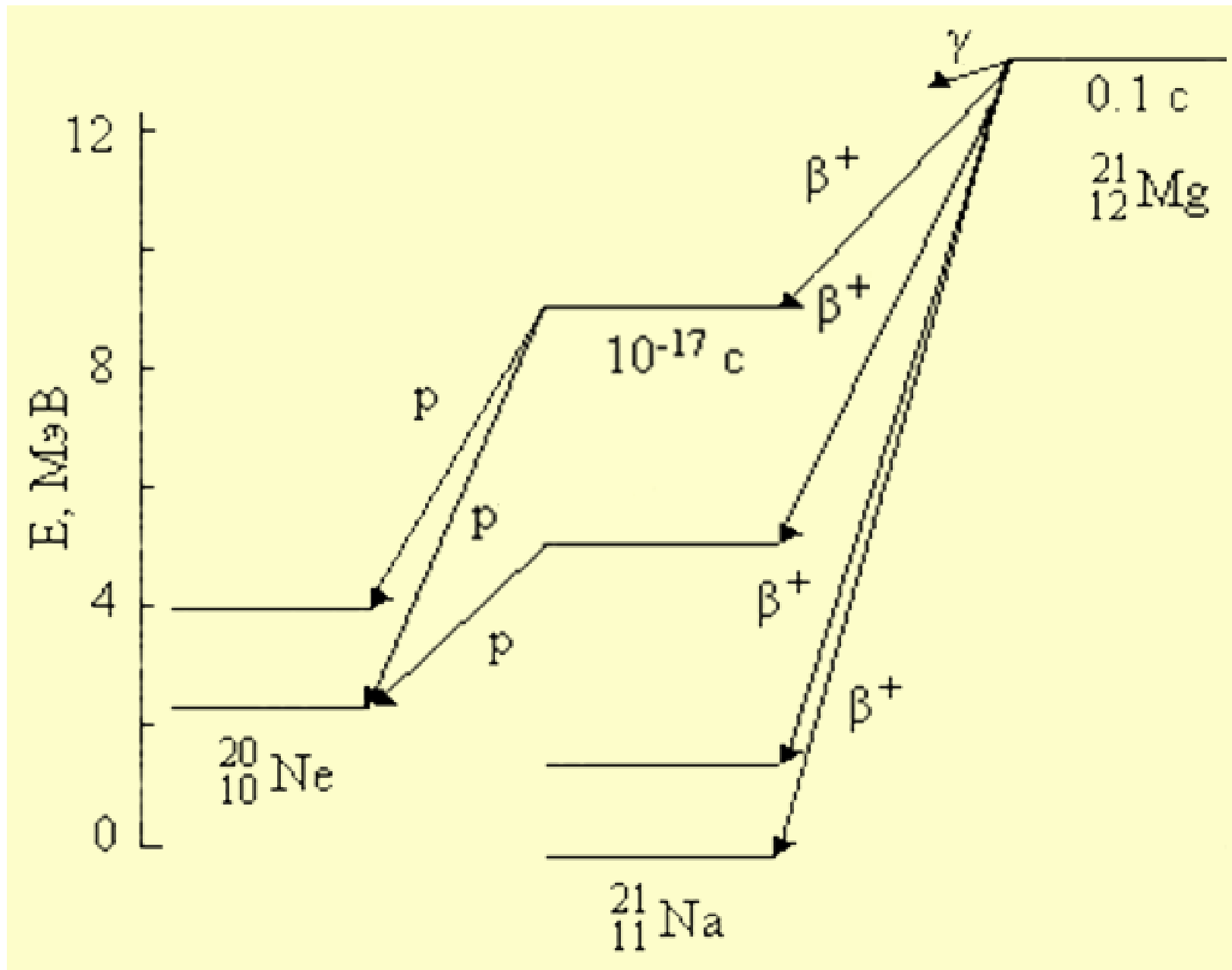
Деление ядер



Кластерная радиоактивность



Запаздывающие протоны ^{21}Na



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	$e^- \bar{\nu}$	1898	E. Rutherford
β^+ -распад	$e^+ \nu$	1934	I. et F. Joliot-Curie
e-захват	ν	1938	L. Alvarez
Гамма-распад	γ -квант	1900	P. Villard
Ядерная изомерия	γ , e-захват, β^+ , β^- , деление	1921	O. Hahn
Спонтанное деление	Два осколка сравнимой массы	1940	Г.Н. Флеров, К.А. Петржак
Двойной β -распад	$e^- e^- 2\bar{\nu}_e$	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.