

# **Энергия ядерных превращений**

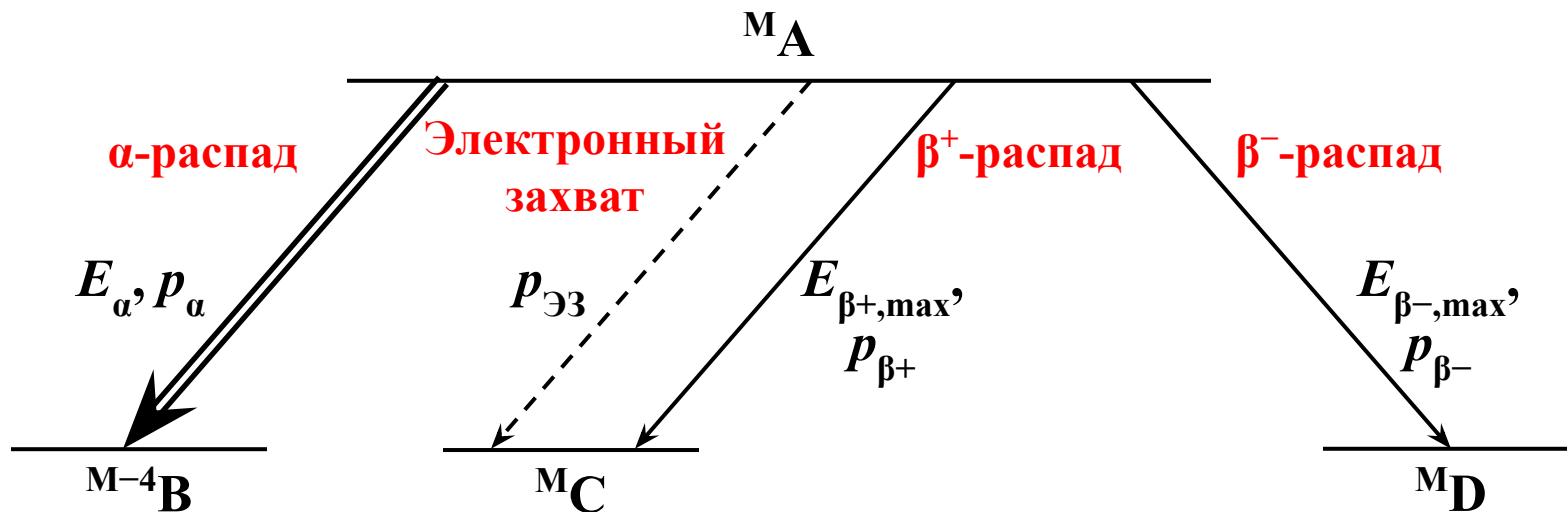
## **Схемы распада**

# Схемы распада

**Что нужно сделать в задаче:**

- 1. Построить схему распада.**
- 2. Определить энергию распада.**
- 3. Определить энергии и выход на распад испускаемых при распаде частиц ( $\alpha$ ,  $\beta$ , нейтрино).**
- 4. Определить спектр (энергия и выход на распад) регистрируемых фотонов.**

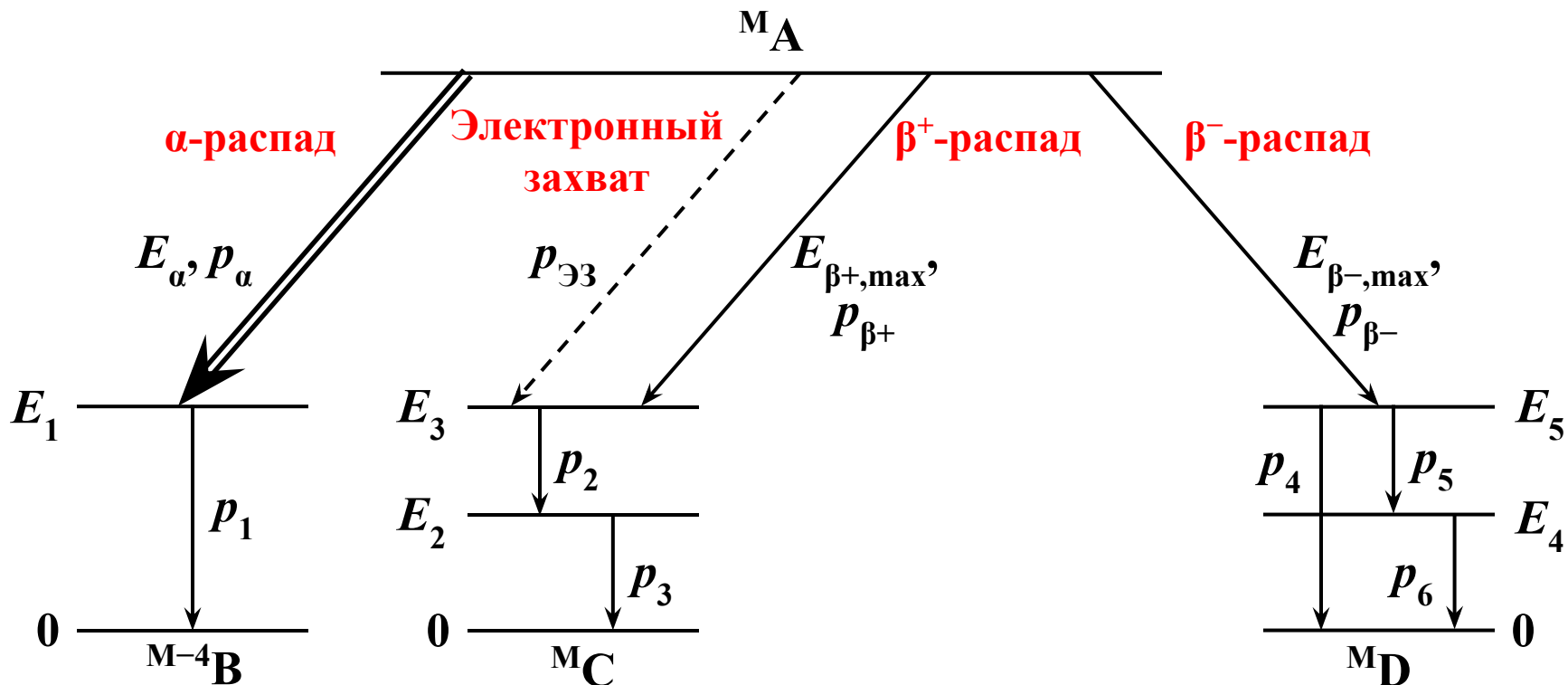
# Схемы распада



На схеме:

1. Распадающийся нуклид ( ${}^M_A$ ).
2. Тип распада. Обозначен видом и наклоном стрелки.
3. Продукты распада ( ${}^{M-4}_B, {}^M_C, {}^M_D$ ).
4. Энергия испускаемых при распаде частиц ( $E_\alpha, E_{\beta^+, \text{max}}, E_{\beta^-, \text{max}}$ ). Энергия при электронном захвате уносится нейтрино, но его энергия на схеме не обозначается.
5. Вероятность каждой моды распада (выход на распад). Все вероятности определяются по отношению к исходному нуклиду.  $P_\alpha + P_{\text{ЭЗ}} + P_{\beta^+} + P_{\beta^-} = 1$ .

# Схемы распада



Если распад происходит на возбужденное состояние, то на схеме обозначается структура уровней, маршрут переходов и их вероятности (выход на распад). Все вероятности определяются по отношению к исходному нуклиду.

Для данной схемы:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= P_\alpha \\
 P_2 &= P_3 = P_{ЭЗ} + P_{\beta^+} \\
 P_5 &= P_6 \quad P_4 + P_5 = P_4 + P_6 = P_{\beta^-}
 \end{aligned}$$

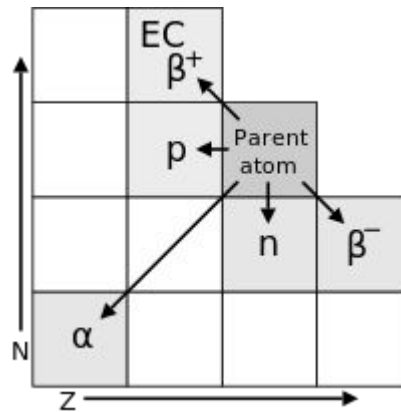
# Энергия распада

**Radioactivity.** The property of certain nuclides showing radioactive decay.

**Radioactive decay.** Nuclear decay (a spontaneous nuclear transformation) in which particles or electromagnetic radiation are emitted or the nucleus undergoes spontaneous fission or electron capture.

**Радиоактивность** – способность некоторых ядер подвергаться радиоактивному распаду.

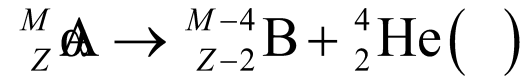
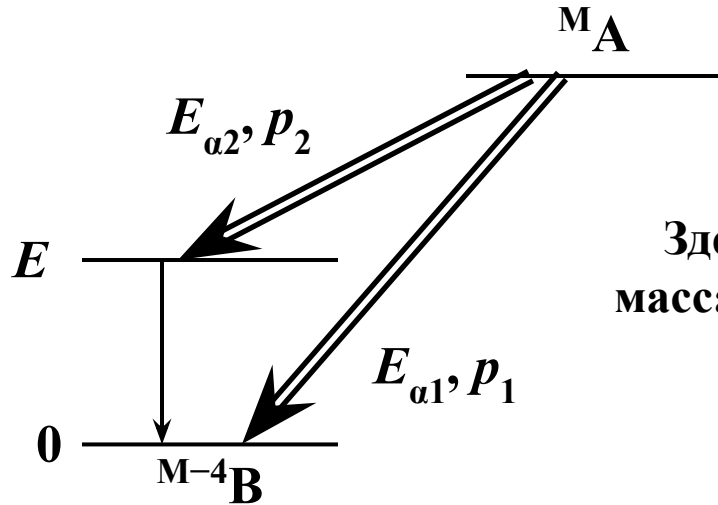
**Радиоактивный распад** – это ядерный распад (спонтанное ядерное превращение одного нуклида в другой), при котором происходит излучение частиц или электромагнитного излучения, деление ядра или захват электрона.



$$Q = -\Delta mc^2, \quad c^2 \approx 931.5 \text{ МэВ/а.е.м.}$$

Выделяющаяся при распаде энергия распределяется между испускаемыми частицами и ядрами отдачи в виде их кинетической энергии и фотонами электромагнитного излучения (если таковые присутствуют).

# α-распад



$$Q_\alpha = c^2 (m_A - m_B - m_\alpha)$$

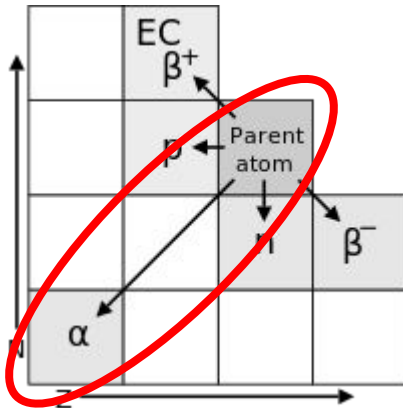
Здесь  $c$  – скорость света,  $m_A$  – масса ядра  ${}^M A$ ,  $m_B$  – масса ядра  ${}^{M-4} B$ ,  $m_\alpha$  – масса ядра  ${}^4 \text{He}$ ,  $M$  и  $Z$  – массовое и зарядовое число нуклида  ${}^M A$ .

$$Q_\alpha = c^2 (m_A + Zm_e - m_B - m_\alpha - Zm_e)$$

$$Q_\alpha = c^2 ((m_A + Zm_e) - (m_B + (Z-2)m_e) - (m_\alpha + 2m_e))$$

$$Q_\alpha = c^2 (M_A - M_B - M_{\text{He}})$$

Здесь  $M_A$  – масса атома  ${}^M A$ ,  $M_B$  – масса атома  ${}^{M-4} B$ ,  $M_{\text{He}}$  – масса атома  ${}^4 \text{He}$ ,  $m_e$  – масса электрона.



$$E_{\alpha 1} \approx \frac{M-4}{M} Q_\alpha$$

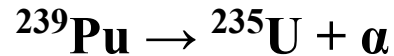
$$E_{\alpha 2} \approx \frac{4}{M} Q$$

$$E_{\alpha 2} \approx \frac{M-4}{M} (Q_\alpha - E)$$

$$E_{\alpha 2} \approx \frac{4}{M} (Q - E)$$

$$c^2 \approx 931.5 \text{ МэВ/а.е.м.}$$

## **$\alpha$ -распад**



$$^{239}\text{Pu} - 239.05216 \text{ а.е.м.}$$

$$^{235}\text{U} - 235.04393 \text{ а.е.м.}$$

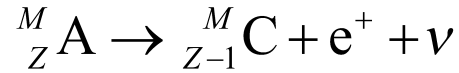
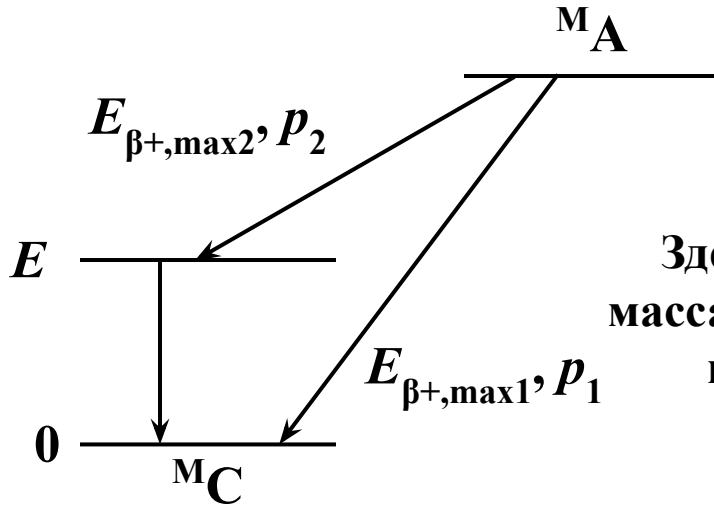
$$^4\text{He} - 4.00260 \text{ а.е.м.}$$

$$Q_\alpha = 931.5 \times (239.05216 - 235.04393 - 4.00260) = 5.244 \text{ МэВ}$$

$$E_\alpha \approx 5.244 \times 235 / 239 = 5.156 \text{ МэВ}$$

$$E_r \approx 5.244 \times 4 / 239 = 0.088 \text{ МэВ}$$

# $\beta^+$ -распад



$$Q_{\beta^+} = c^2 (m_A - m_C - m_e)$$

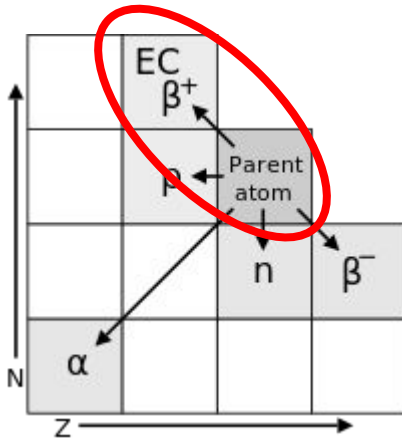
Здесь  $c$  – скорость света,  $m_A$  – масса ядра  ${}^M A$ ,  $m_C$  – масса ядра  ${}^M C$ ,  $m_e$  – масса электрона или позитрона,  $M$  и  $Z$  – массовое и зарядовое число нуклида  ${}^M A$ .

$$Q_{\beta^+} = c^2 (m_A + Zm_e - m_C - m_e - Zm_e)$$

$$Q_{\beta^+} = c^2 ((m_A + Zm_e) - (m_C + (Z-1)m_e) - 2m_e)$$

$$Q_{\beta^+} = c^2 (M_A - M_C) - 2m_e c^2$$

Здесь  $M_A$  – масса атома  ${}^M A$ ,  $M_C$  – масса атома  ${}^M C$ .



$\beta^+$ -частицы:

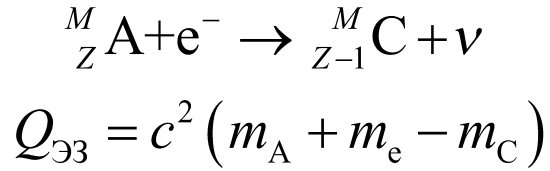
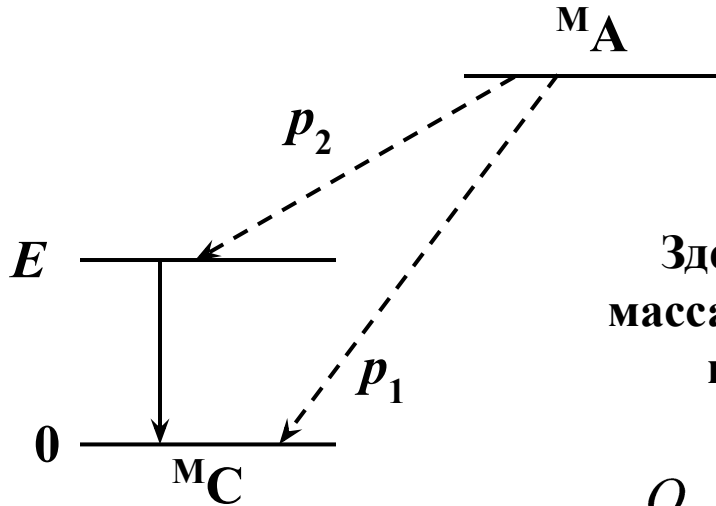
$$E_{\beta^+, \max 1} = Q_{\beta^+}$$

$$E_{\beta^+, \max 2} = Q_{\beta^+} - E$$

$$c^2 \approx 931.5 \text{ МэВ/а.е.м.} \quad m_e c^2 \approx 511 \text{ кэВ}$$



# Электронный захват



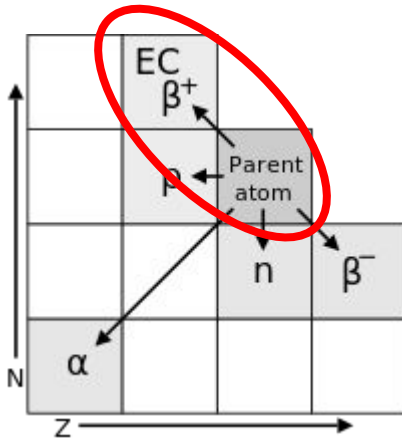
Здесь  $c$  – скорость света,  $m_A$  – масса ядра  ${}^M A$ ,  $m_C$  – масса ядра  ${}^M C$ ,  $m_e$  – масса электрона или позитрона,  $M$  и  $Z$  – массовое и зарядовое число нуклида  ${}^M A$ .

$$Q_{\text{ЭЗ}} = c^2 (m_A + (Z-1)m_e + m_e - m_C - (Z-1)m_e)$$

$$Q_{\text{ЭЗ}} = c^2 ((m_A + Zm_e) - (m_C + (Z-1)m_e))$$

$$Q_{\text{ЭЗ}} = c^2 (M_A - M_C)$$

Здесь  $M_A$  – масса атома  ${}^M A$ ,  $M_C$  – масса атома  ${}^M C$ .



**Моноэнергетические нейтрино:**

$$E_{\nu 1} = Q_{\text{ЭЗ}}$$

$$E_{\nu 2} = Q_{\text{ЭЗ}} - E$$

$$c^2 \approx 931.5 \text{ МэВ/а.е.м.} \quad m_e c^2 \approx 511 \text{ кэВ}$$

# $\beta^-$ -распад



$$Q_{\beta^-} = c^2 (m_A - m_D - m_e)$$

Здесь  $c$  – скорость света,  $m_A$  – масса ядра  ${}^M A$ ,  $m_D$  – масса ядра  ${}^M D$ ,  $m_e$  – масса электрона или позитрона,  $M$  и  $Z$  – массовое и зарядовое число нуклида  ${}^M A$ .

$$Q_{\beta^-} = c^2 (m_A + Zm_e - m_D - m_e - Zm_e)$$

$$Q_{\beta^-} = c^2 ((m_A + Zm_e) - (m_D + (Z+1)m_e))$$

$$Q_{\beta^-} = c^2 (M_A - M_D)$$

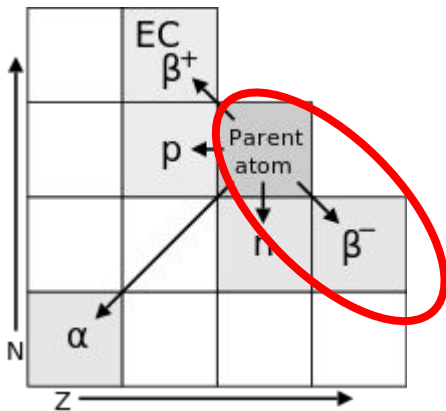
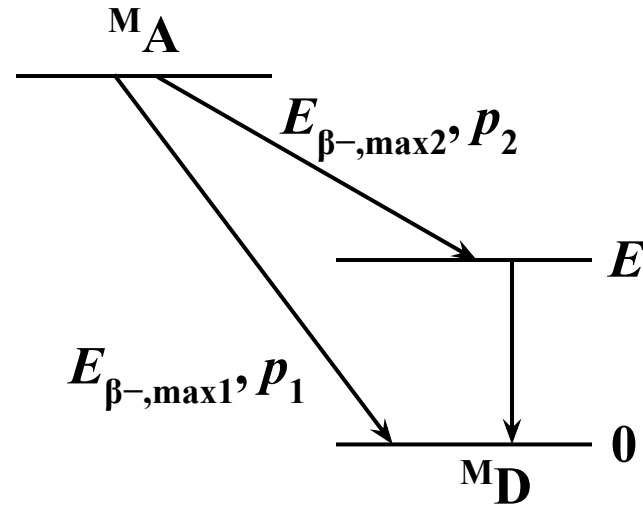
Здесь  $M_A$  – масса атома  ${}^M A$ ,  $M_D$  – масса атома  ${}^M D$ .

$\beta^-$ -частицы:

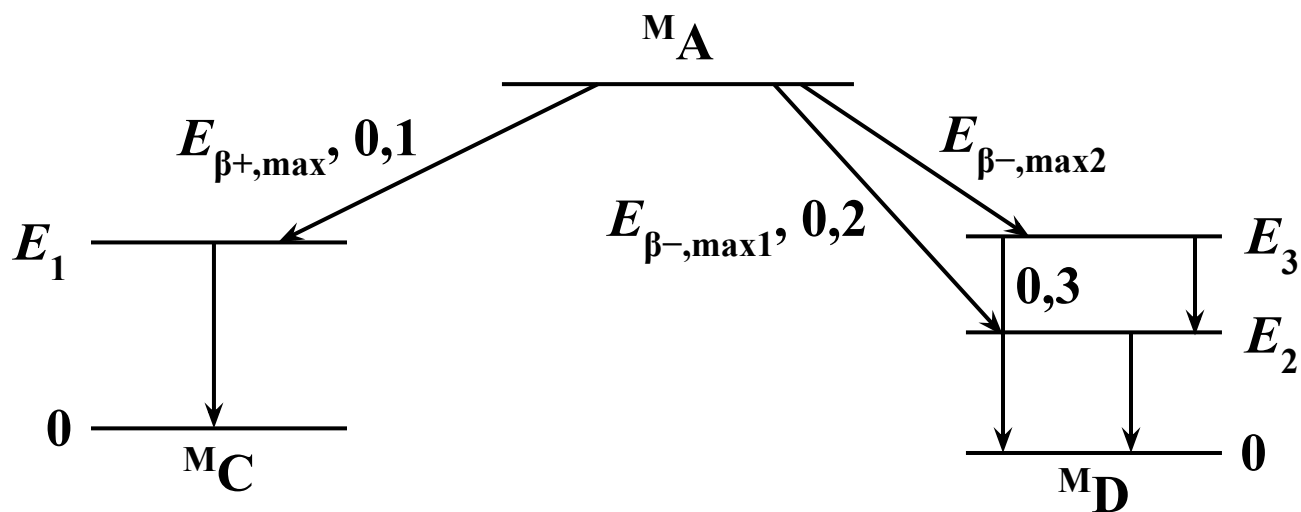
$$E_{\beta^-, \max 1} = Q_{\beta^-}$$

$$E_{\beta^-, \max 2} = Q_{\beta^-} - E$$

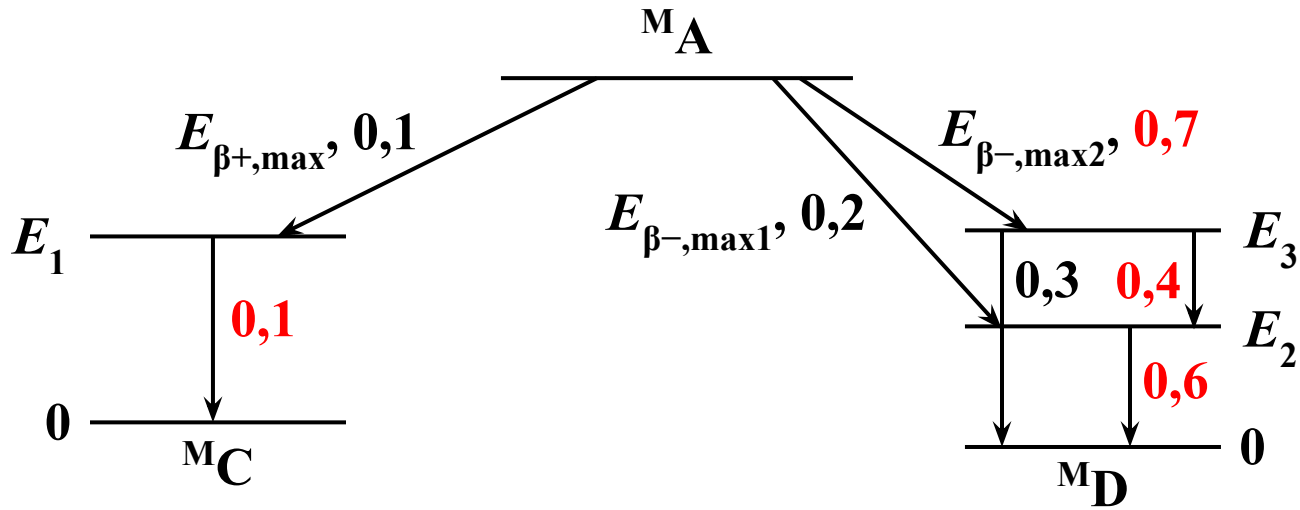
$$c^2 \approx 931.5 \text{ МэВ/а.е.м.} \quad m_e c^2 \approx 511 \text{ кэВ}$$



# Спектр регистрируемых фотонов

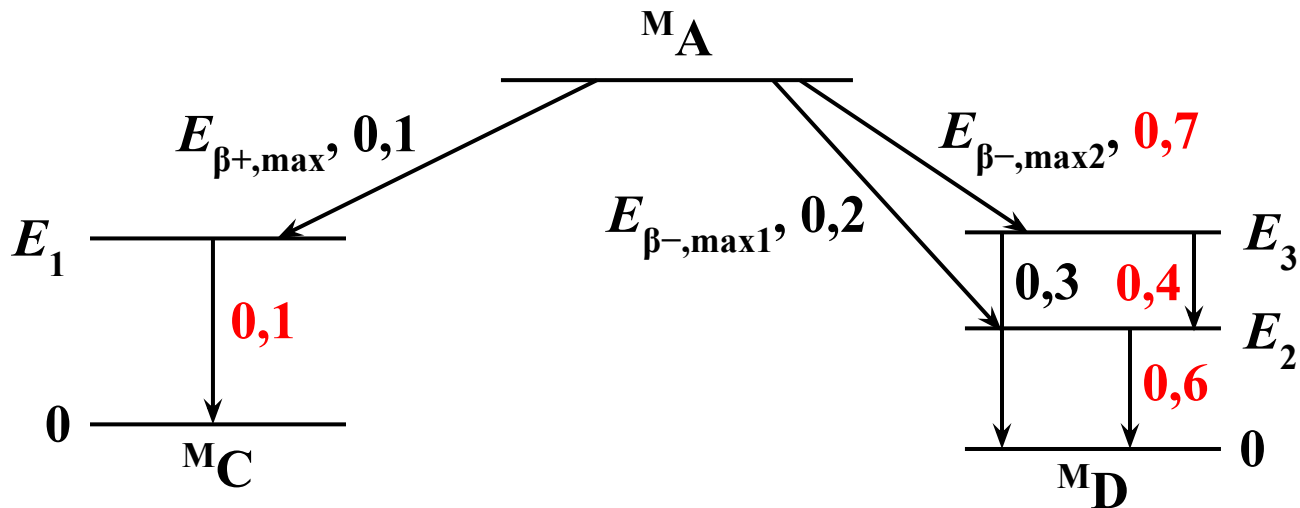


# Спектр регистрируемых фотонов



Сначала дополним схему выходами на распад

# Спектр регистрируемых фотонов



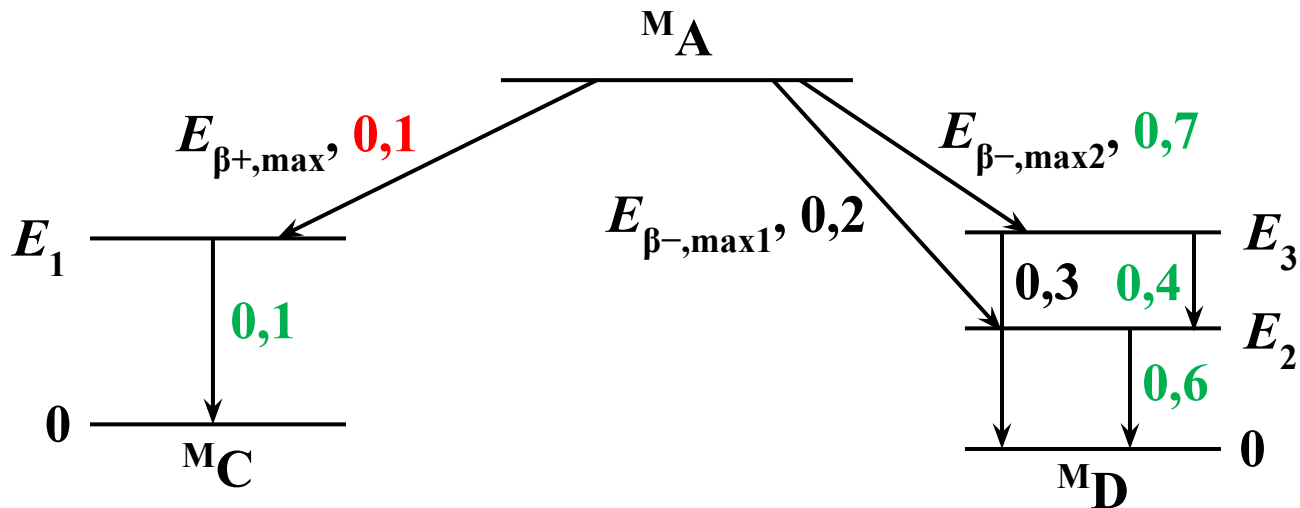
Фотоны испускаются при переходе из возбужденных состояний. Из этого можно восстановить часть спектра.

1. Энергия –  $E_1$ , выход на распад –  $0,1$
2. Энергия –  $E_3$ , выход на распад –  $0,3$
3. Энергия –  $(E_3 - E_2)$ , выход на распад –  $(0,7 - 0,3) = 0,4$
4. Энергия –  $E_2$ , выход на распад –  $(0,7 - 0,3) + 0,2 = 0,6$
5. ????

# Спектр регистрируемых фотонов



На каждый позитрон испускается два фотона по 511 кэВ каждый



Фотоны испускаются при переходе из возбужденных состояний. Из этого можно восстановить часть спектра.

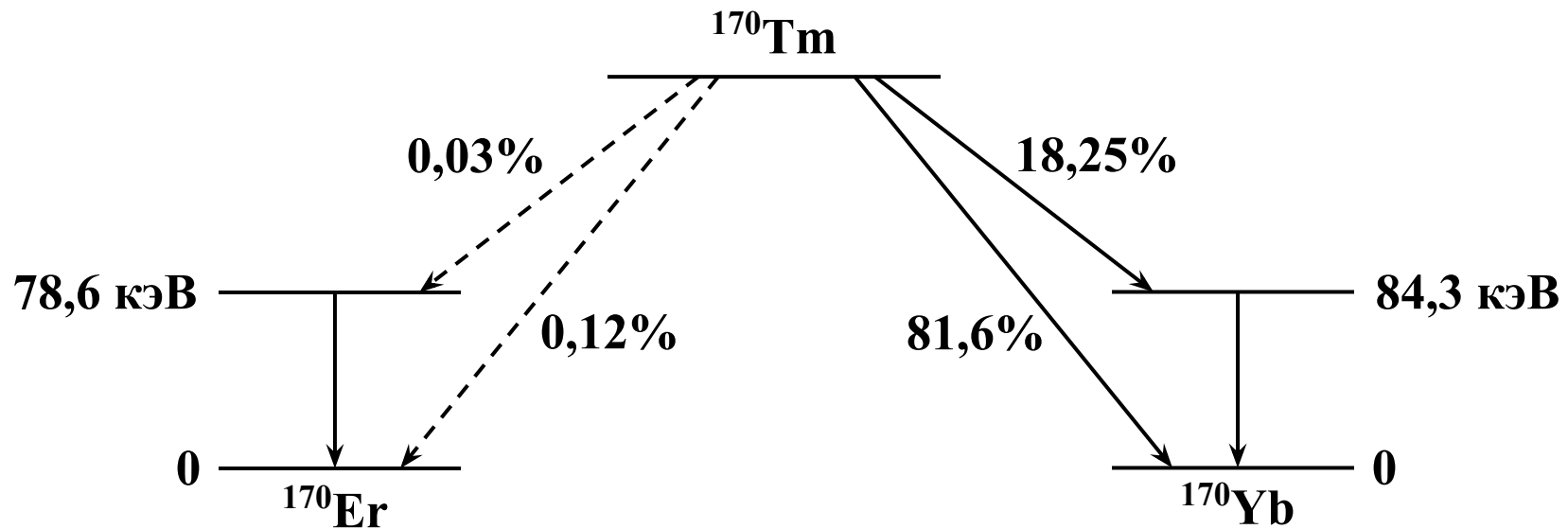
1. Энергия –  $E_1$ , выход на распад –  $0,1$
2. Энергия –  $E_3$ , выход на распад –  $0,3$
3. Энергия –  $(E_3 - E_2)$ , выход на распад –  $(0,7 - 0,3) = 0,4$
4. Энергия –  $E_2$ , выход на распад –  $(0,7 - 0,3) + 0,2 = 0,6$
5. Энергия – **511 кэВ**, выход на распад –  **$(2 \times 0,1) = 0,2$**

Ядро  $^{170}\text{Tm}$  распадается по двум механизмам: а)  $\beta^-$ -распад, при этом дочернее ядро может оказаться в основном состоянии (81,6%) или на первом возбужденном уровне 84,3 кэВ (18,25%) , б) путем электронного захвата с переходом на основное состояние ядра (0,12%) или на первый возбужденный уровень 78,6 кэВ (0,03%). Массы атомов:  $^{170}\text{Tm}$  169,935801 а.е.м.,  $^{170}\text{Er}$  169,935464 а.е.м.,  $^{170}\text{Yb}$  169,934762 а.е.м. Определите энергии испускаемых при распаде: моноэнергетических нейтрино,  $\gamma$ -квантов и максимальные энергии  $\beta$ -частиц. Постройте схему распада  $^{170}\text{Tm}$ .

<b>68</b> <b>Er</b> 167,26 $4f^{12}5d^06s^2$ Эрбий	<b>69</b> <b>Tm</b> 168,934 $4f^{13}5d^06s^2$ Тулий	<b>70</b> <b>Yb</b> 173,04 $4f^{14}5d^06s^2$ Иттербий
--	---	---

Ядро  $^{170}\text{Tm}$  распадается по двум механизмам: а)  $\beta^-$ -распад, при этом дочернее ядро может оказаться в основном состоянии (81,6%) или на первом возбужденном уровне 84,3 кэВ (18,25%), б) путем электронного захвата с переходом на основное состояние ядра (0,12%) или на первый возбужденный уровень 78,6 кэВ (0,03%). Массы атомов:  $^{170}\text{Tm}$  169,935801 а.е.м.,  $^{170}\text{Er}$  169,935464 а.е.м.,  $^{170}\text{Yb}$  169,934762 а.е.м. Определите энергии испускаемых при распаде: моноэнергетических нейтрино,  $\gamma$ -квантов и максимальные энергии  $\beta$ -частиц. Постройте схему распада  $^{170}\text{Tm}$ .

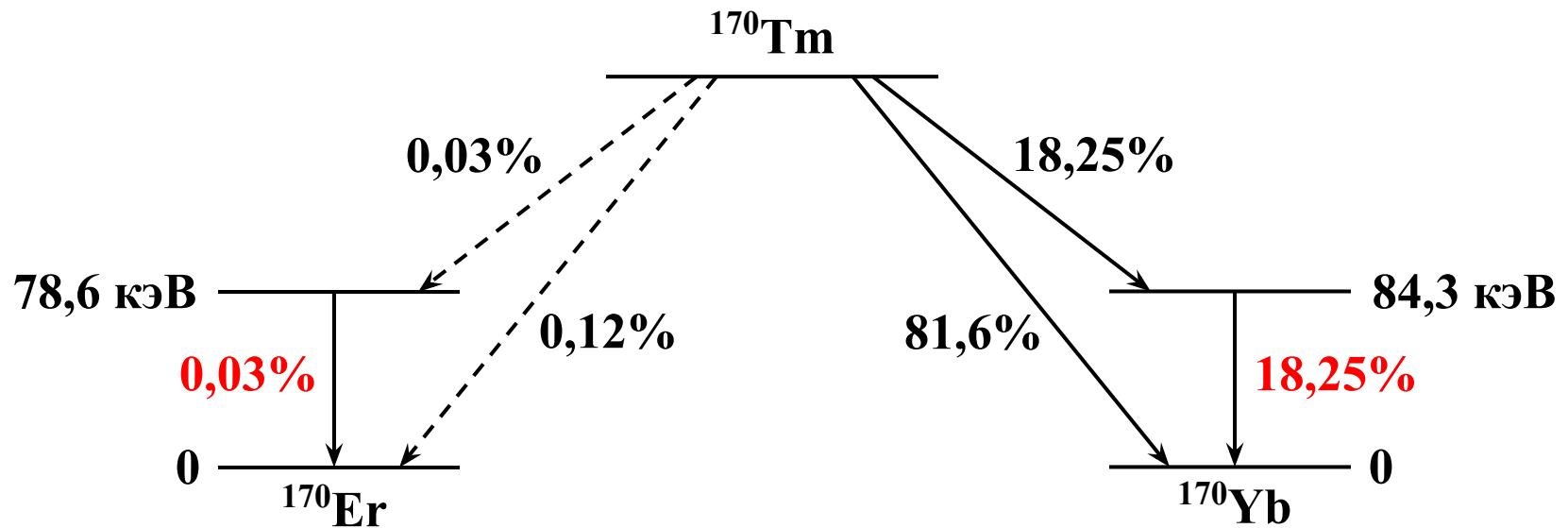
**Построим предварительный вариант схемы распада**





Ядро  $^{170}\text{Tm}$  распадается по двум механизмам: а)  $\beta^-$ -распад, при этом дочернее ядро может оказаться в основном состоянии (81,6%) или на первом возбужденном уровне 84,3 кэВ (18,25%), б) путем электронного захвата с переходом на основное состояние ядра (0,12%) или на первый возбужденный уровень 78,6 кэВ (0,03%). Массы атомов:  $^{170}\text{Tm}$  169,935801 а.е.м.,  $^{170}\text{Er}$  169,935464 а.е.м.,  $^{170}\text{Yb}$  169,934762 а.е.м. Определите энергии испускаемых при распаде: моноэнергетических нейтрино,  $\gamma$ -квантов и максимальные энергии  $\beta$ -частиц. Постройте схему распада  $^{170}\text{Tm}$ .

Со спектром  $\gamma$ -квантов уже все понятно



78,6 кэВ (0,03%) и 84,3 (18,25%)

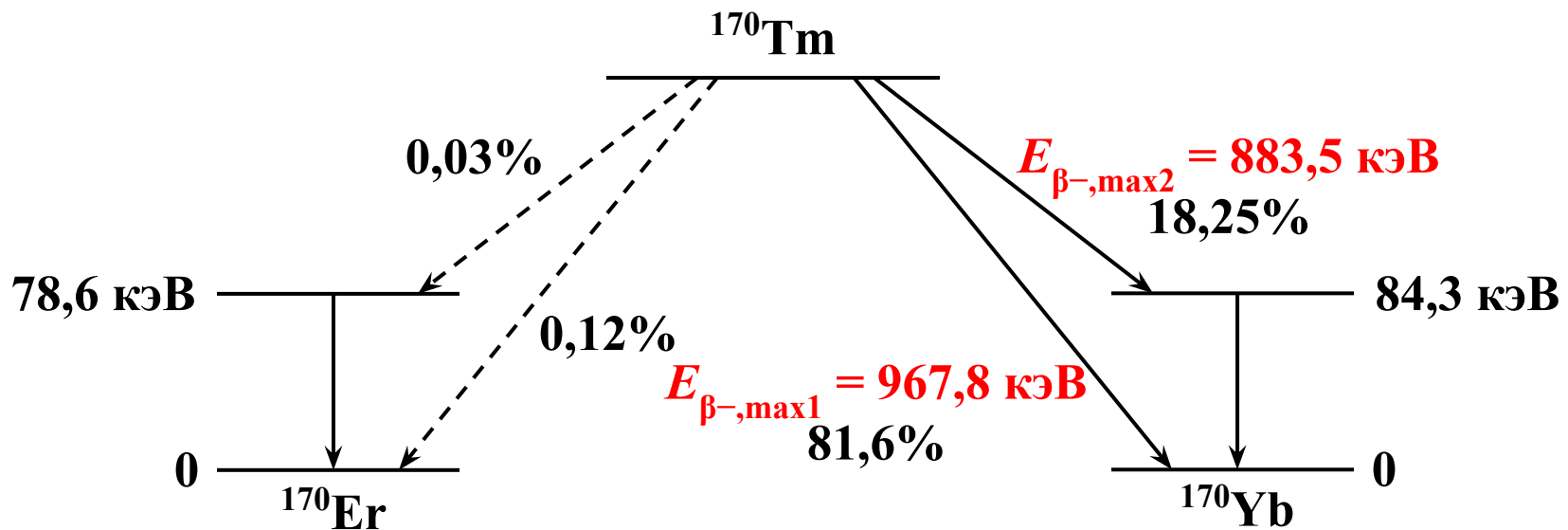
Ядро  $^{170}\text{Tm}$  распадается по двум механизмам: а)  $\beta^-$ -распад, при этом дочернее ядро может оказаться в основном состоянии (81,6%) или на первом возбужденном уровне 84,3 кэВ (18,25%) , б) путем электронного захвата с переходом на основное состояние ядра (0,12%) или на первый возбужденный уровень 78,6 кэВ (0,03%). Массы атомов:  $^{170}\text{Tm}$  169,935801 а.е.м.,  $^{170}\text{Er}$  169,935464 а.е.м.,  $^{170}\text{Yb}$  169,934762 а.е.м. Определите энергии испускаемых при распаде: моноэнергетических нейтрино,  $\gamma$ -квантов и максимальные энергии  $\beta$ -частиц. Постройте схему распада  $^{170}\text{Tm}$ .

**Вычислим энергии распада:**

$$Q_{\beta^-} = c^2(M(^{170}\text{Tm}) - M(^{170}\text{Yb})) = 931500 \times (169,935801 - 169,934762) = 967,8 \text{ кэВ}$$

$$Q_{\text{ЭЗ}} = c^2(M(^{170}\text{Tm}) - M(^{170}\text{Er})) = 931500 \times (169,935801 - 169,935464) = 313,9 \text{ кэВ}$$

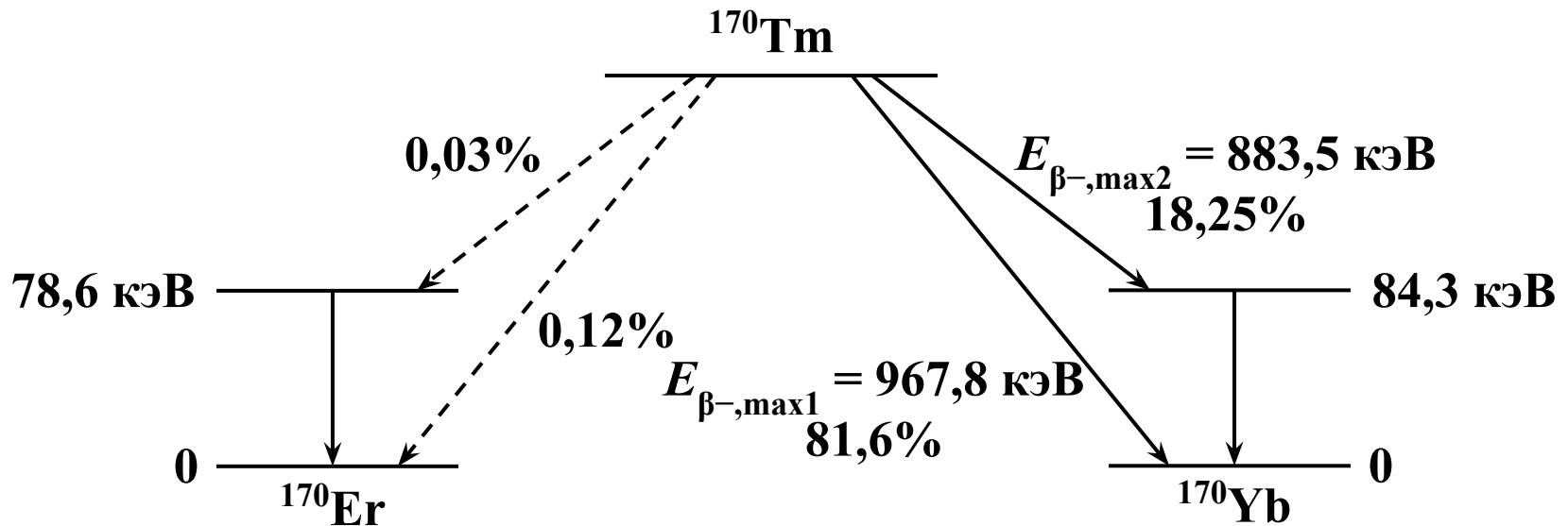
Ядро  $^{170}\text{Tm}$  распадается по двум механизмам: а)  $\beta^-$ -распад, при этом дочернее ядро может оказаться в основном состоянии (81,6%) или на первом возбужденном уровне 84,3 кэВ (18,25%), б) путем электронного захвата с переходом на основное состояние ядра (0,12%) или на первый возбужденный уровень 78,6 кэВ (0,03%). Массы атомов:  $^{170}\text{Tm}$  169,935801 а.е.м.,  $^{170}\text{Er}$  169,935464 а.е.м.,  $^{170}\text{Yb}$  169,934762 а.е.м. Определите энергии испускаемых при распаде: моноэнергетических нейтрино,  $\gamma$ -квантов и максимальные энергии  $\beta$ -частиц. Постройте схему распада  $^{170}\text{Tm}$ .



Исходя из схемы распада испускается два сорта  $\beta^-$ -частиц – при распаде в основное и возбужденное состояние. Вычислим их и нанесем на схему:

$$E_{\beta^-, \max 1} = Q_{\beta^-} = 967,8 \text{ кэВ} \quad E_{\beta^-, \max 2} = Q_{\beta^-} - 84,3 = 967,8 - 84,3 = 883,5 \text{ кэВ}$$

Ядро  $^{170}\text{Tm}$  распадается по двум механизмам: а)  $\beta^-$ -распад, при этом дочернее ядро может оказаться в основном состоянии (81,6%) или на первом возбужденном уровне 84,3 кэВ (18,25%), б) путем электронного захвата с переходом на основное состояние ядра (0,12%) или на первый возбужденный уровень 78,6 кэВ (0,03%). Массы атомов:  $^{170}\text{Tm}$  169,935801 а.е.м.,  $^{170}\text{Er}$  169,935464 а.е.м.,  $^{170}\text{Yb}$  169,934762 а.е.м. Определите энергии испускаемых при распаде: моноэнергетических нейтрино,  $\gamma$ -квантов и максимальные энергии  $\beta$ -частиц. Постройте схему распада  $^{170}\text{Tm}$ .



Исходя из схемы распада испускается два сорта моноэнергетических нейтрино – при распаде в основное и возбужденное состояние. Вычислим их:

$$E_{\nu 1} = Q_{\beta\beta} = 313,9 \text{ кэВ} \quad E_{\nu 2} = Q_{\beta\beta} - 78,6 = 313,9 - 78,6 = 235,3 \text{ кэВ}$$