

Энергия ядерных превращений

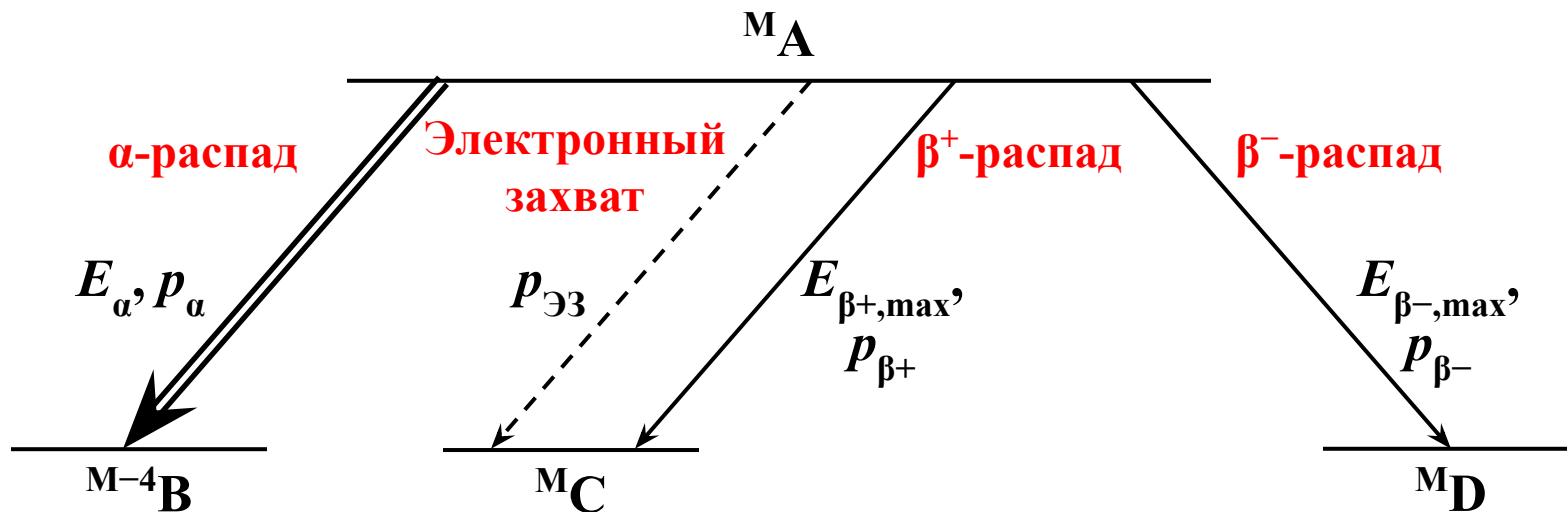
Схемы распада

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 (α , β , нейтрино).**
- 4. Определить спектр (энергия и выход на распад) регистрируемых фотонов.**

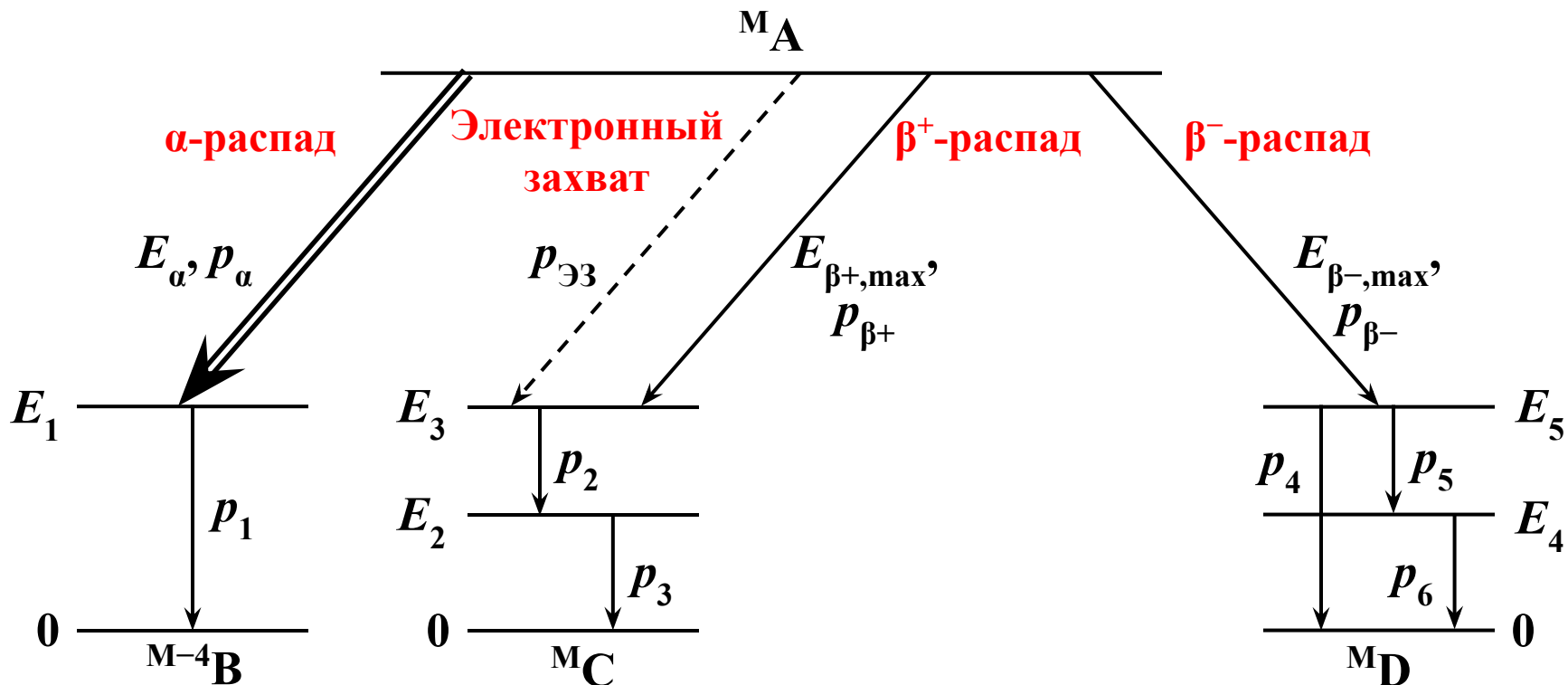
Схемы распада



На схеме:

1. Распадающийся нуклид (${}^M\text{A}$).
2. Тип распада. Обозначен видом и наклоном стрелки.
3. Продукты распада (${}^{M-4}\text{B}$, ${}^M\text{C}$, ${}^M\text{D}$).
4. Энергия испускаемых при распаде частиц (E_α , $E_{\beta^+, \text{max}}$, $E_{\beta^-, \text{max}}$). 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:

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

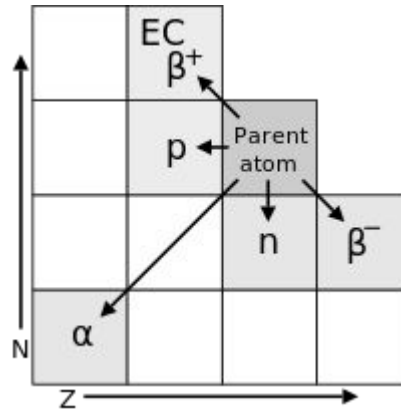
Энергия распада

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.

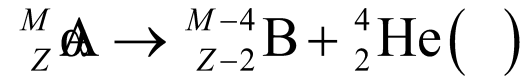
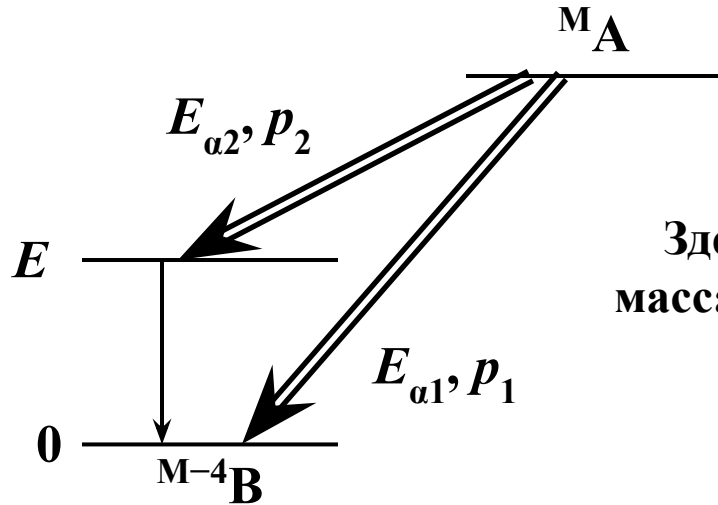
Радиоактивный распад – это ядерный распад (спонтанное ядерное превращение одного нуклида в другой), при котором происходит излучение частиц или электромагнитного излучения, деление ядра или захват электрона.



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

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



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

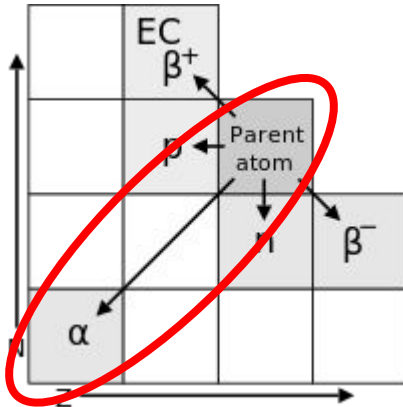
Здесь c – скорость света, m_A – масса ядра ${}^M\text{A}$, m_B – масса ядра ${}^{M-4}\text{B}$, m_α – масса ядра ${}^4\text{He}$, M и Z – массовое и зарядовое число нуклида ${}^M\text{A}$.

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

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

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

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



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

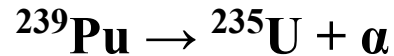
$$E_{\alpha 2} \approx \frac{4}{M} Q$$

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

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

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

α -распад



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

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

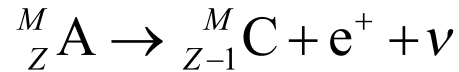
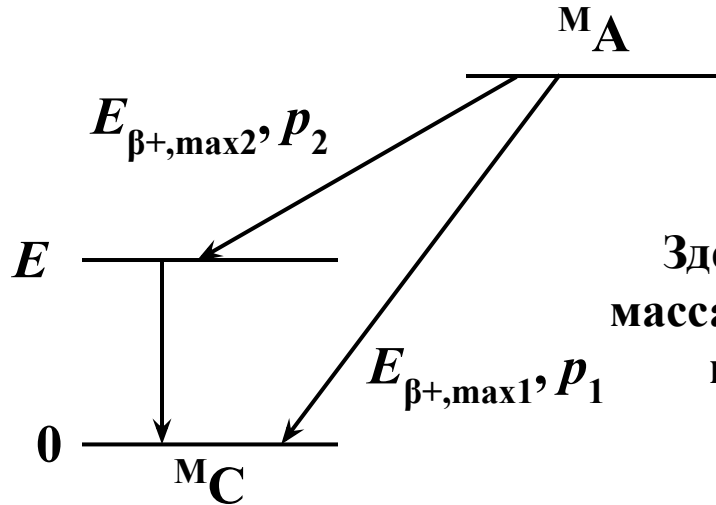
$$^4\text{He} - 4.00260 \text{ а.е.м.}$$

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

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

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

β^+ -распад



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

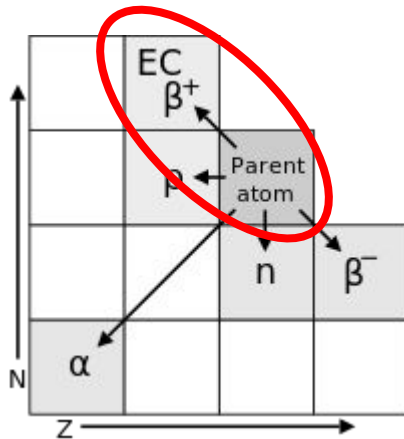
Здесь c – скорость света, m_A – масса ядра ${}^M A$, m_C – масса ядра ${}^M C$, m_e – масса электрона или позитрона, M и Z – массовое и зарядовое число нуклида ${}^M A$.

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

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

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

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



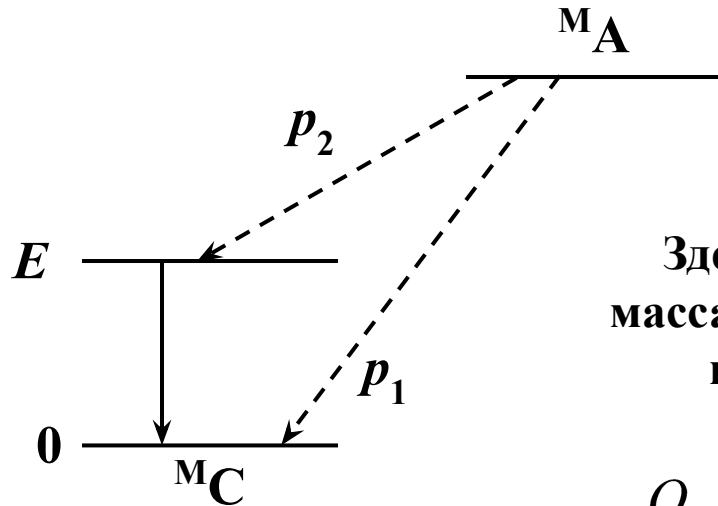
β^+ -частицы:

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

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

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

Электронный захват



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

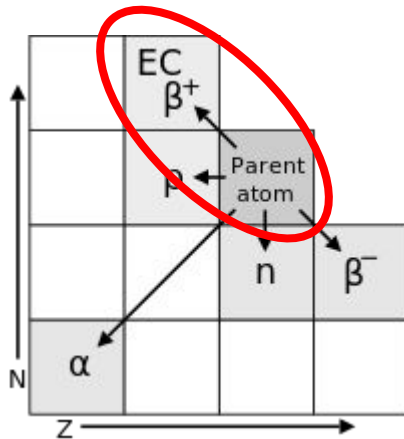
Здесь c – скорость света, m_A – масса ядра ${}^M A$, m_C – масса ядра ${}^M C$, m_e – масса электрона или позитрона, M и Z – массовое и зарядовое число нуклида ${}^M A$.

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

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

$$Q_{\text{ЭЗ}} = c^2 (M_A - M_C)$$

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



Моноэнергетические нейтрино:

$$E_{\nu 1} = Q_{\text{ЭЗ}}$$

$$E_{\nu 2} = Q_{\text{ЭЗ}} - E$$

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

β^- -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 ${}^M A$.

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

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

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

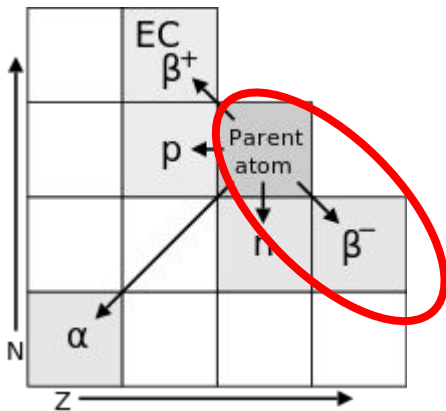
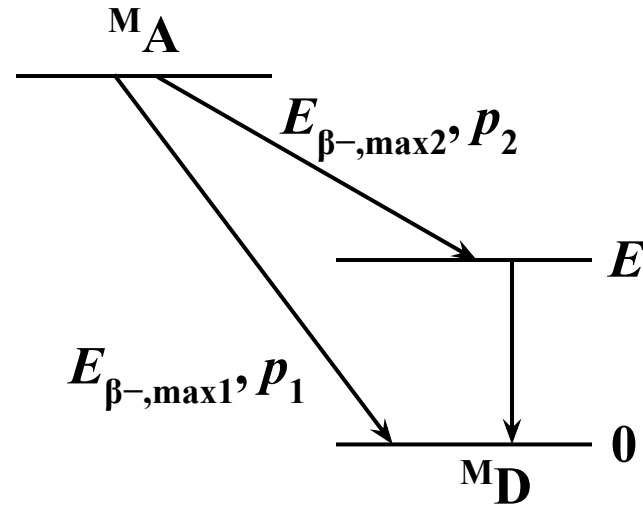
Здесь M_A – масса атома ${}^M A$, M_D – масса атома ${}^M D$.

β^- -частицы:

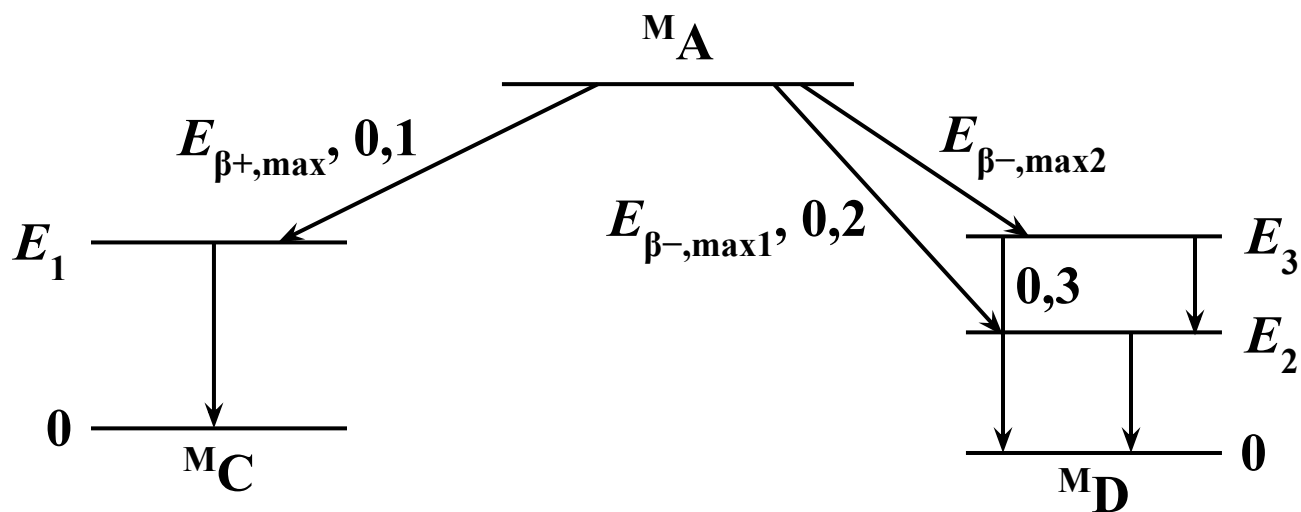
$$E_{\beta^-, \max 1} = Q_{\beta^-}$$

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

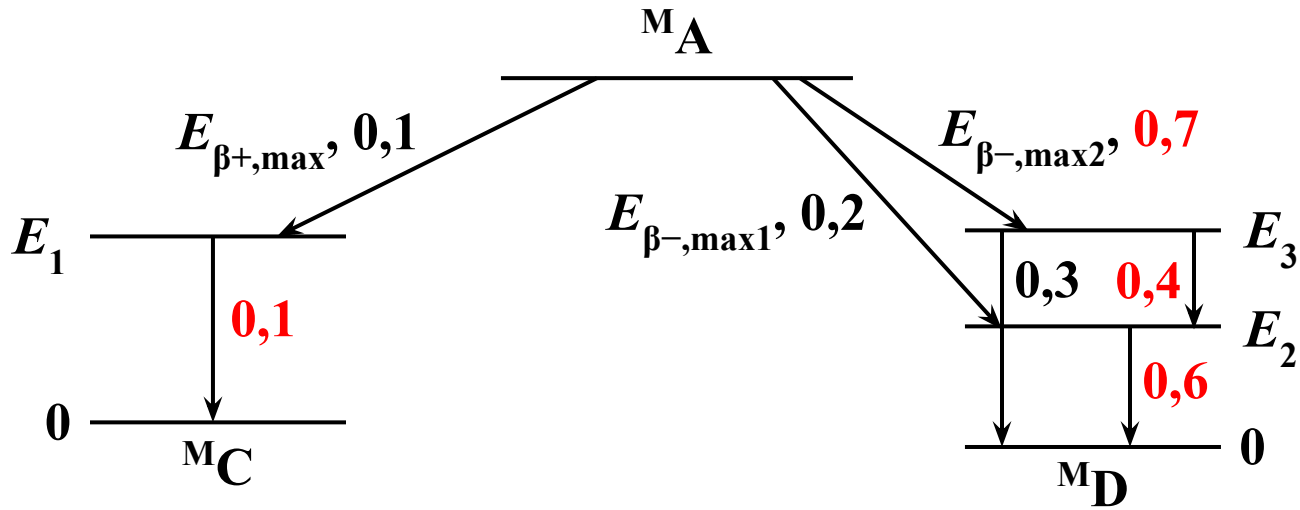
$$c^2 \approx 931.5 \text{ МэВ/а.е.м.} \quad m_e c^2 \approx 511 \text{ кэВ}$$



Спектр регистрируемых фотонов

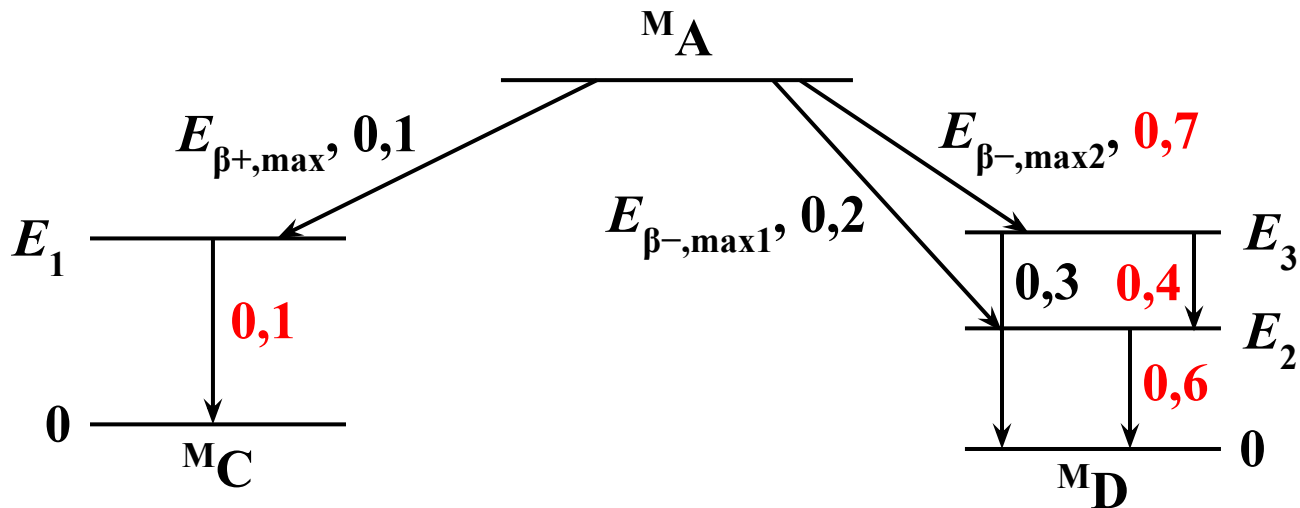


Спектр регистрируемых фотонов



Сначала дополним схему выходами на распад

Спектр регистрируемых фотонов



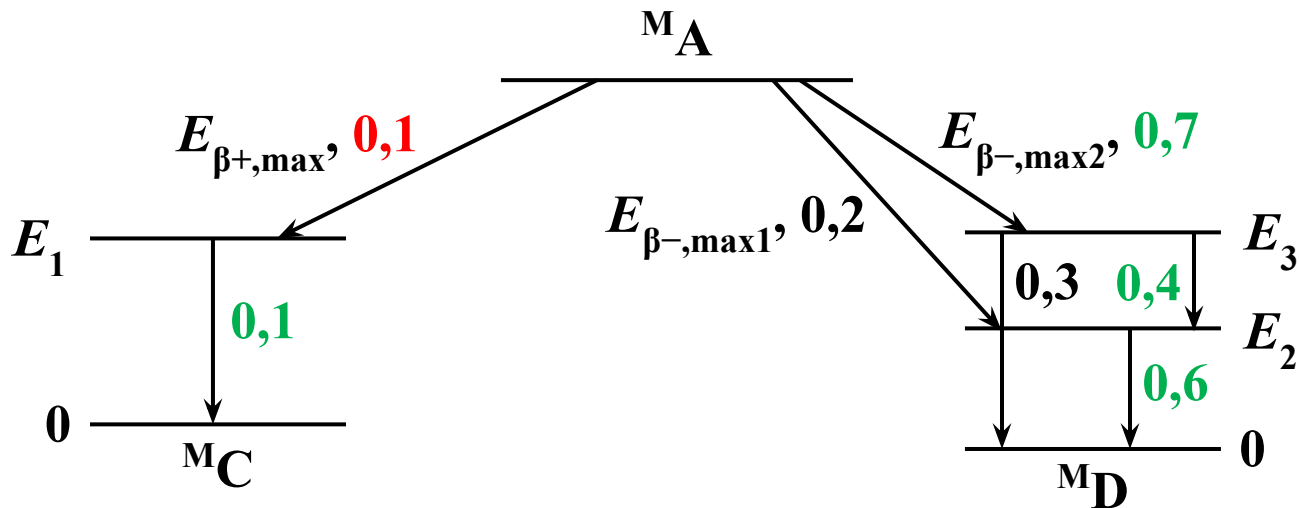
Фотоны испускаются при переходе из возбужденных состояний. Из этого можно восстановить часть спектра.

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.

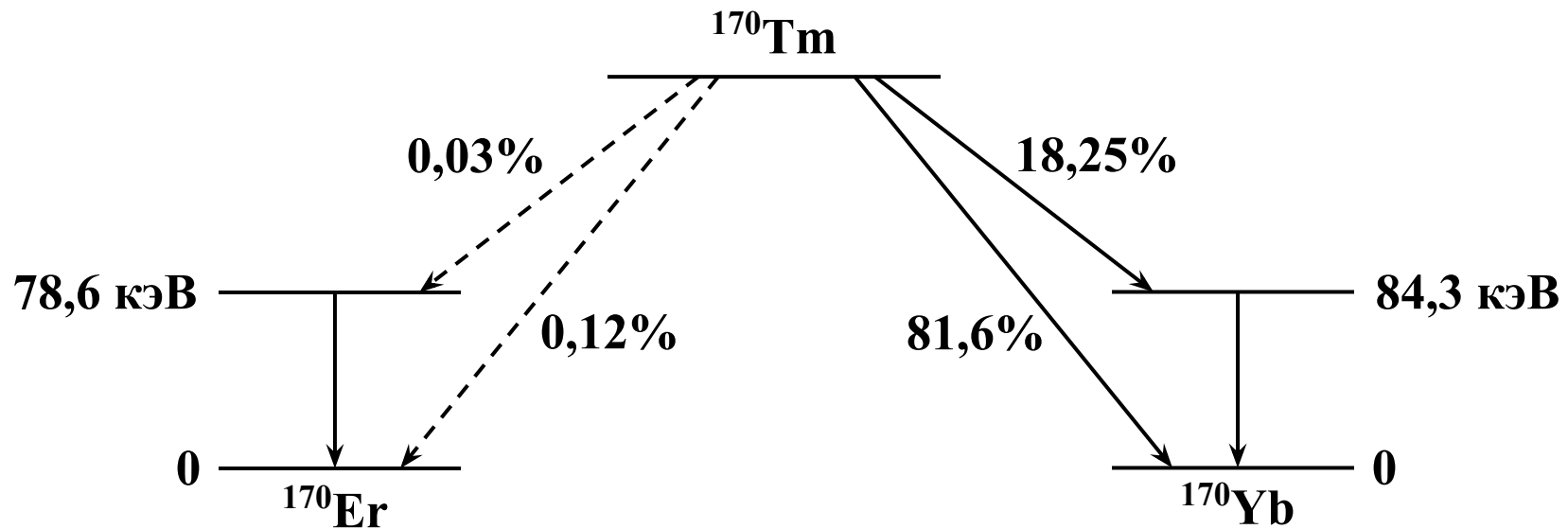
1. Энергия – E_1 , выход на распад – 0,1
2. Энергия – E_3 , выход на распад – 0,3
3. Энергия – $(E_3 - E_2)$, выход на распад – $(0,7 - 0,3) = 0,4$
4. Энергия – E_2 , выход на распад – $(0,7 - 0,3) + 0,2 = 0,6$
5. Энергия – 511 кэВ, выход на распад – $(2 \times 0,1) = 0,2$

Ядро ^{170}Tm распадается по двум механизмам: а) β^- -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}Tm 169,935801 а.е.м., ^{170}Er 169,935464 а.е.м., ^{170}Yb 169,934762 а.е.м. Определите энергии испускаемых при распаде: моноэнергетических нейтрино, γ -квантов и максимальные энергии β -частиц. Постройте схему распада ^{170}Tm .

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

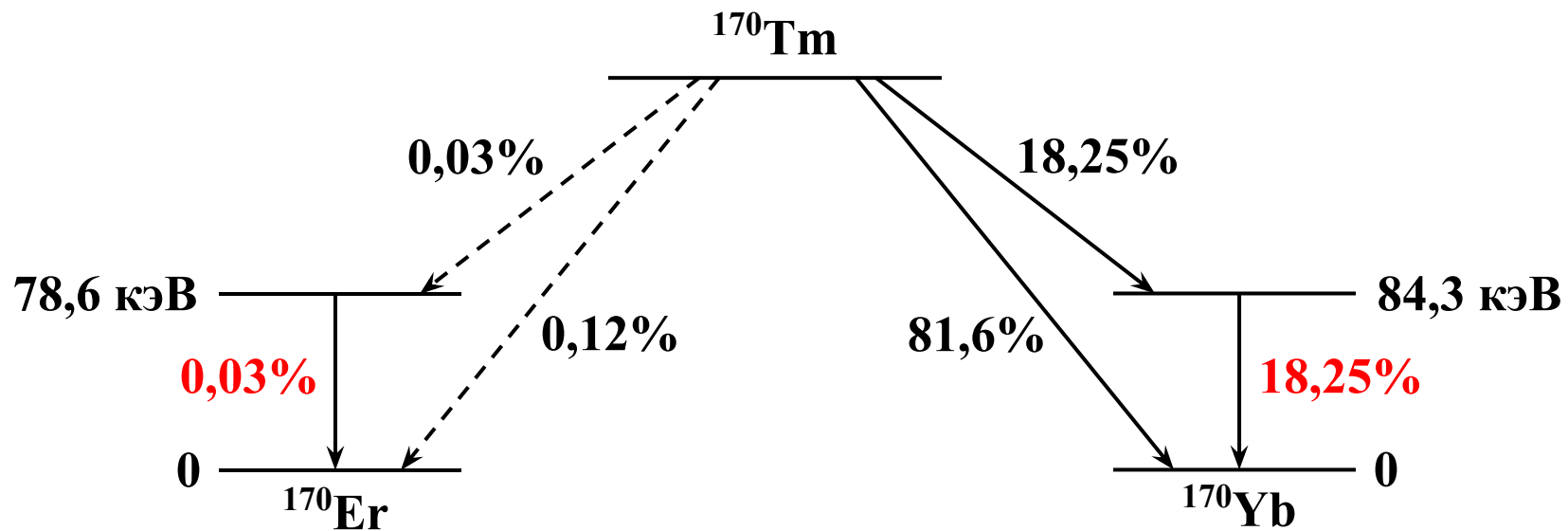
Ядро ^{170}Tm распадается по двум механизмам: а) β^- -распад, при этом дочернее ядро может оказаться в основном состоянии (81,6%) или на первом возбужденном уровне 84,3 кэВ (18,25%), б) путем электронного захвата с переходом на основное состояние ядра (0,12%) или на первый возбужденный уровень 78,6 кэВ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

Построим предварительный вариант схемы распада



Ядро ^{170}Tm распадается по двум механизмам: а) β^- -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}Tm 169,935801 а.е.м., ^{170}Er 169,935464 а.е.м., ^{170}Yb 169,934762 а.е.м. Определите энергии испускаемых при распаде: моноэнергетических нейтрино, γ -квантов и максимальные энергии β -частиц. Постройте схему распада ^{170}Tm .

Со спектром γ -квантов уже все понятно



78,6 кэВ (0,03%) и 84,3 (18,25%)

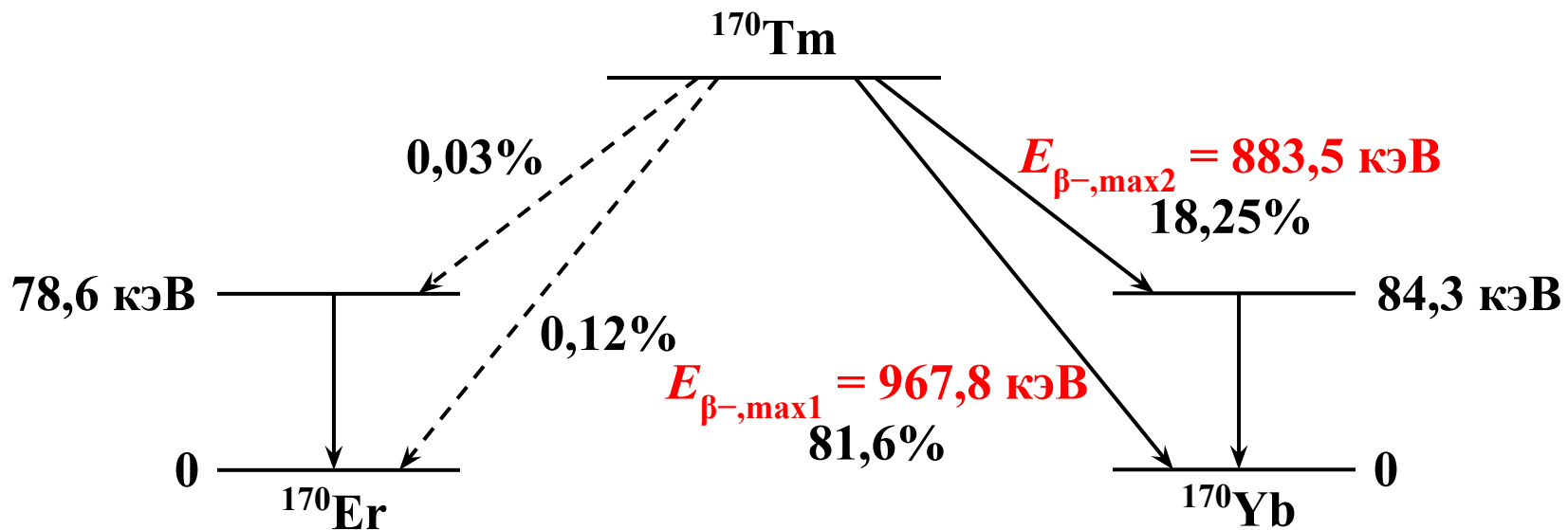
Ядро ^{170}Tm распадается по двум механизмам: а) β^- -распад, при этом дочернее ядро может оказаться в основном состоянии (81,6%) или на первом возбужденном уровне 84,3 кэВ (18,25%) , б) путем электронного захвата с переходом на основное состояние ядра (0,12%) или на первый возбужденный уровень 78,6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

Вычислим энергии распада:

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

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

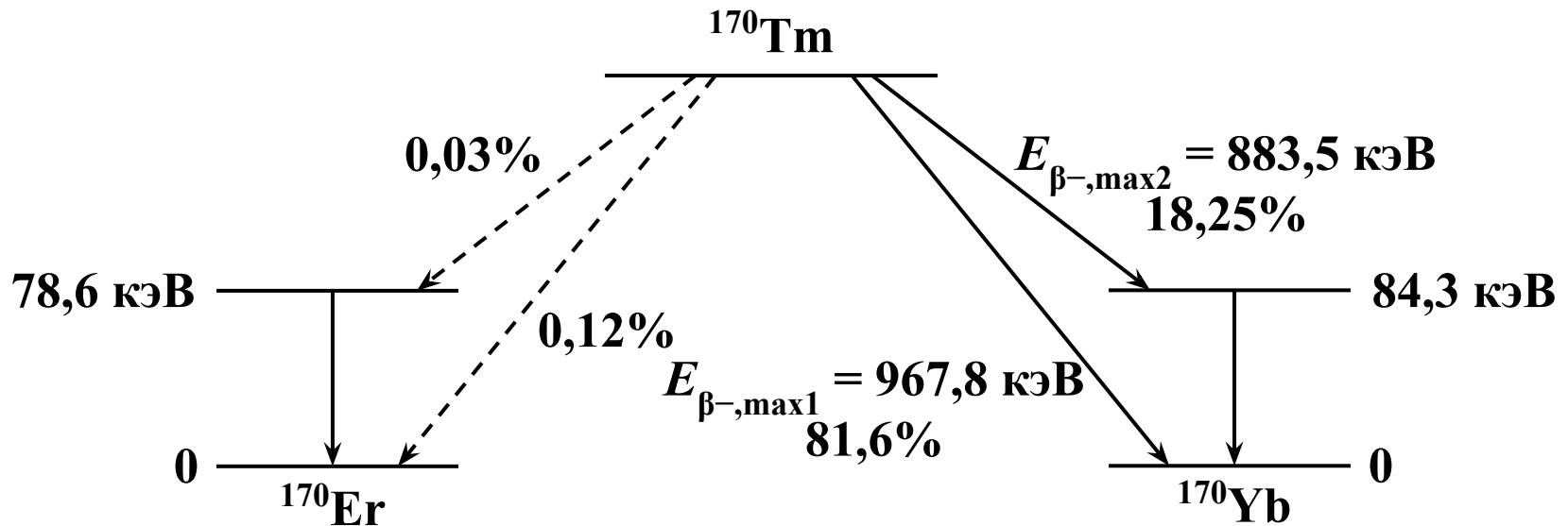
Ядро ^{170}Tm распадается по двум механизмам: а) β^- -распад, при этом дочернее ядро может оказаться в основном состоянии (81,6%) или на первом возбужденном уровне 84,3 кэВ (18,25%), б) путем электронного захвата с переходом на основное состояние ядра (0,12%) или на первый возбужденный уровень 78,6 кэВ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



Исходя из схемы распада испускается два сорта β^- -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}Tm распадается по двум механизмам: а) β^- -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}Tm 169,935801 а.е.м., ^{170}Er 169,935464 а.е.м., ^{170}Yb 169,934762 а.е.м. Определите энергии испускаемых при распаде: моноэнергетических нейтрино, γ -квантов и максимальные энергии β -частиц. Постройте схему распада ^{170}Tm .



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

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