

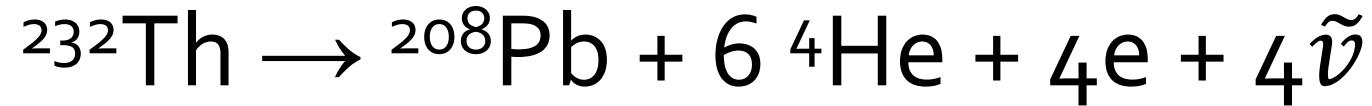
# ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ПРЕДСКАЗАНИЕ ГЕО-НЕЙТРИННОГО СПЕКТРА ДЛЯ БАКСАНСКОЙ НЕЙТРИННОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ИЯИ РАН

---

Студент II курса 217 группы Уваров Клим Артурович

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН,  
г.н.с. ОТФ ИЯИ РАН Горбунов Дмитрий Сергеевич

# Источники гео-нейтрино в Земле



# Порог детектирования антинейтрино

Обратный бета-распад на свободных протонах:



Порог реакции:

$$T_{\pi} = \frac{(m_n + m_e)^2 - m_p^2}{2m_p} = 1.806 \text{ MeV} \quad (2)$$

# Сечение реакции обратного бета-распада

$$\sigma(E_{\tilde{\nu}}) = 9,57 \times 10^{-44} p_e E_e \text{ [см}^2\text{]} \quad (3)$$

Энергия и импульс позитрона:

$$E_e = E_{\tilde{\nu}} - (m_n - m_p) = E_{\tilde{\nu}} - 1.239 \text{ MeV} \quad (4)$$

$$p_e = \sqrt{E_e^2 - m_e^2} \quad (4.1)$$

## Расчёт формы спектра электронов для $\beta$ -распада

Универсальная форма бета-спектра разрешённых распадов:

$$\varphi^e(W) = DW(W_0 - W)^2(W^2 - m_e^2 c^4)^{\gamma - \frac{1}{2}} e^{\pi y} |\Gamma(\gamma + iy)|^2 \quad (5)$$

W – полная энергия электрона, Z – заряд дочернего ядра,  
D – нормировочный коэффициент.

$$\gamma = \sqrt{1 - (\alpha Z)^2} \quad (5.1)$$

$$y = \frac{\alpha Z W}{\sqrt{W^2 - (m_e c^2)^2}} \quad (5.2)$$

Нормировочный коэффициент определяется из выражения:

$$\int_{m_e c^2}^{W_0} \varphi^e(W) dW = 1 \quad (6)$$

Спектр антинейтрино получается из электронного спектра:

$$f^{\tilde{\nu}}(E) = \varphi^e(W)|_{W=W_0-E} \quad (7)$$

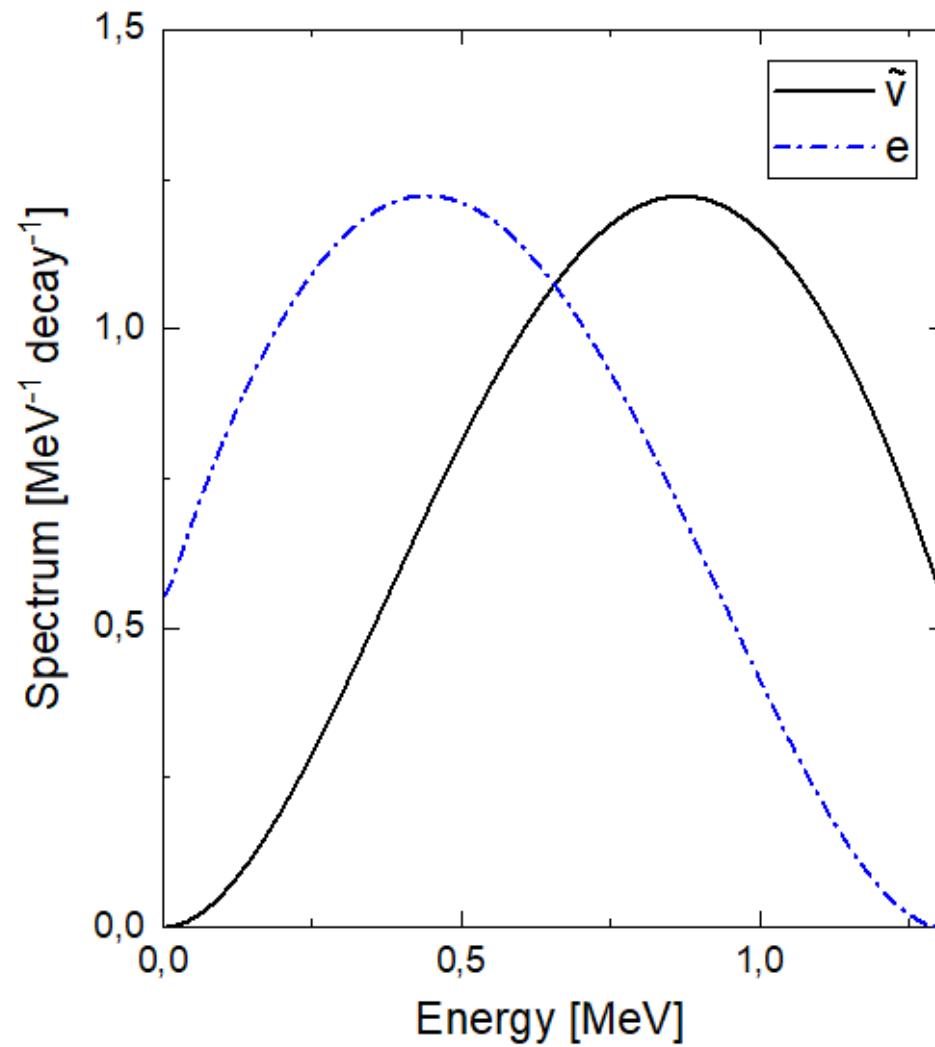


Рис. 1. Сравнение энергетического спектра, нормированного на один распад для  $e$  и  $\tilde{\nu}$  для  ${}^{40}\text{K}$ .

## Расчёт спектра разветвлённых цепей распадов

Если в образце  $n_i$  ядер типа  $i$ , то число распадов в единицу времени:

$$r_{ij} = \lambda_i n_i b_{ij} \quad (7)$$

где  $b_{ij}$  - это коэффициент ветвления:

$$\sum_j^k b_j = 1$$

Вероятность каждого распада в секунду определяется следующим образом:

$$R_{ij} = \frac{\lambda_i n_i b_{ij}}{\sum_j r_{ij}} \quad (8)$$

$$\frac{R_{ij}}{R_{ik}} = \frac{b_{ij}}{b_{ik}} \quad (9)$$

$$\sum_h R_{hj} = 1 \quad (10)$$

$$\sum_j R_{ji} = \sum_k R_{ik} \quad (11)$$

Система уравнений полностью определяет цепочку распадов

Переход  $i \rightarrow j$  может проходить в разные ядерные состояния с разными конечными точками спектра и разной интенсивностью  $I_{ijk}$

Нормировка интенсивностей:  $\sum_k I_{ijk} = 1$

Спектр, нормированный на один распад головного ядра цепи:

$$f(E) = \sum_{ij} R_{ij} \sum_k I_{ijk} f_{ijk}(E) \quad (12)$$

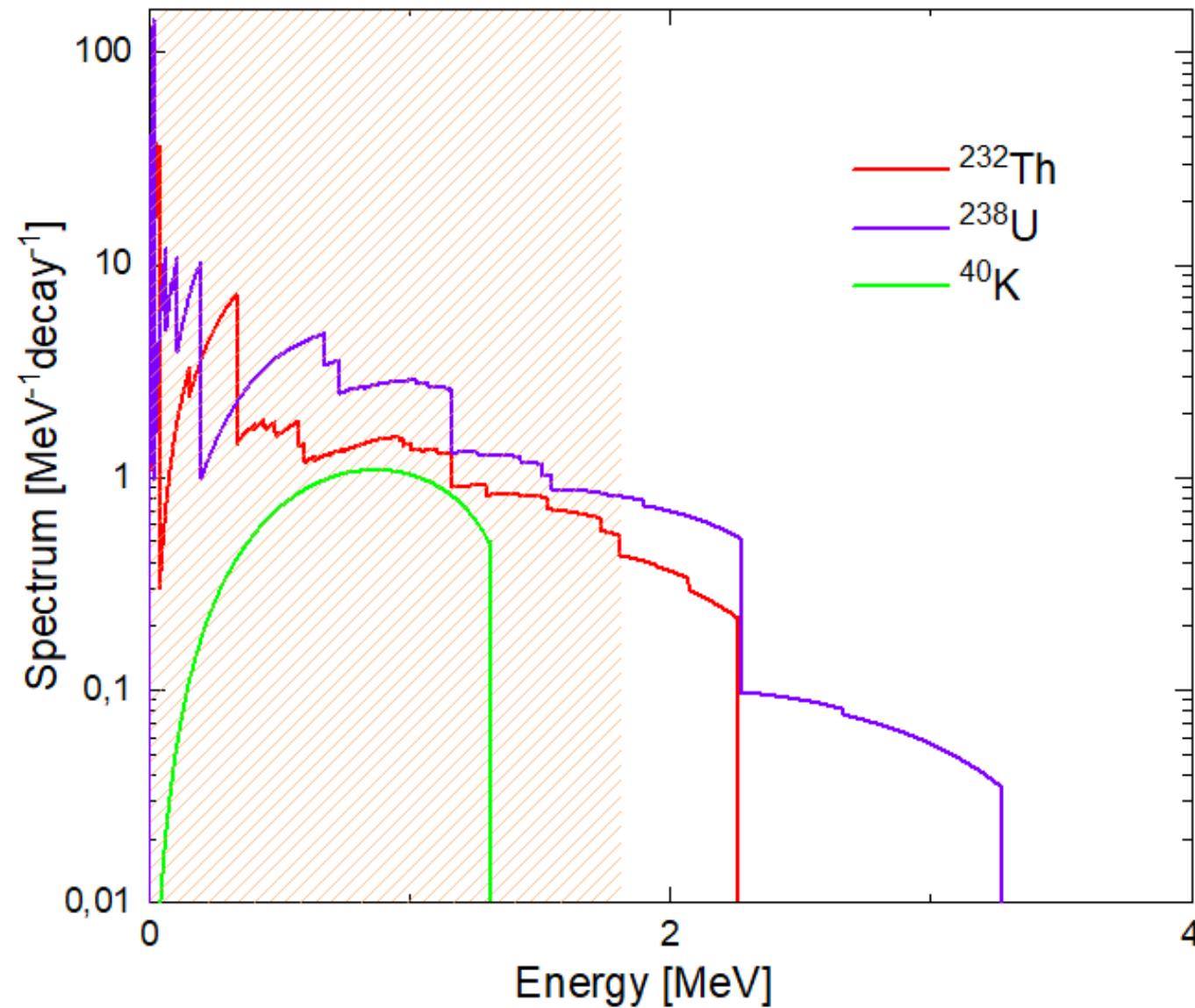
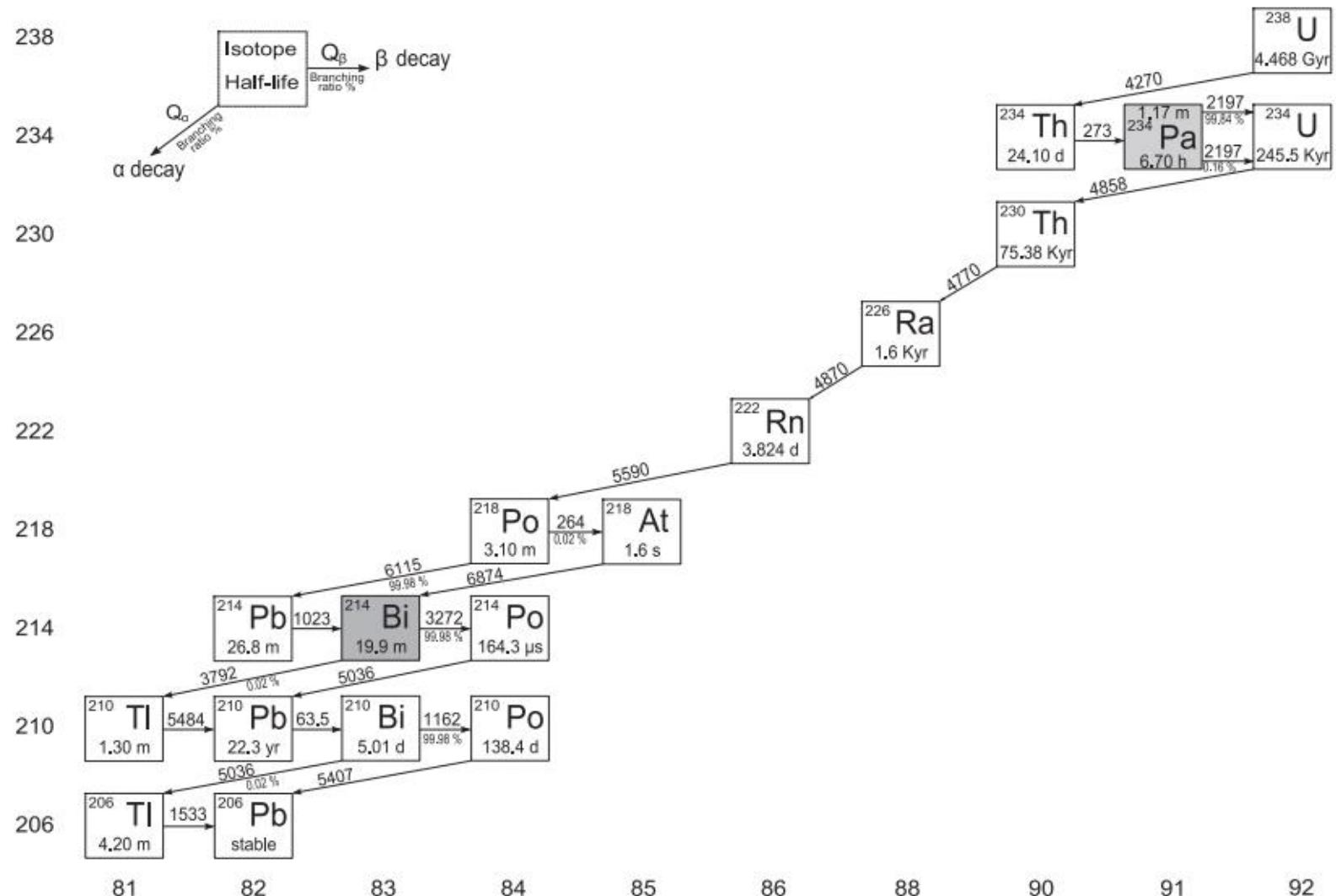


Рис. 2. Спектры антинейтрино, нормированные на один распад головного ядра для цепей  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  и для  $^{40}\text{K}$ . Заштрихованная область – невидимая для детектора. 11

# Цепочка распадов $^{238}\text{U}$

Рис. 3. Схема распадов цепи  $^{238}\text{U}$ . Серым цветом обозначены «главные» источники. [3]



# Спектр от $^{238}\text{U}$

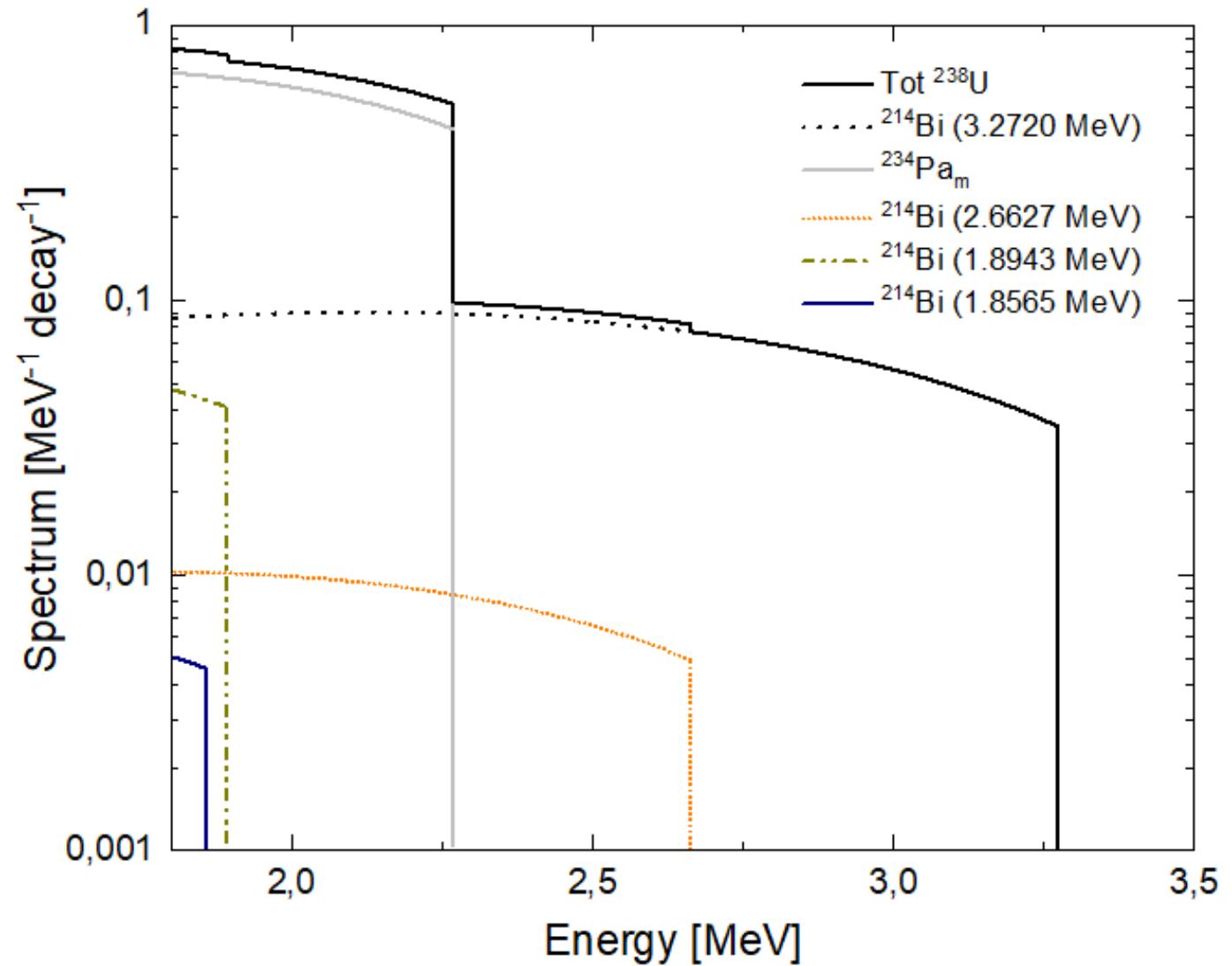
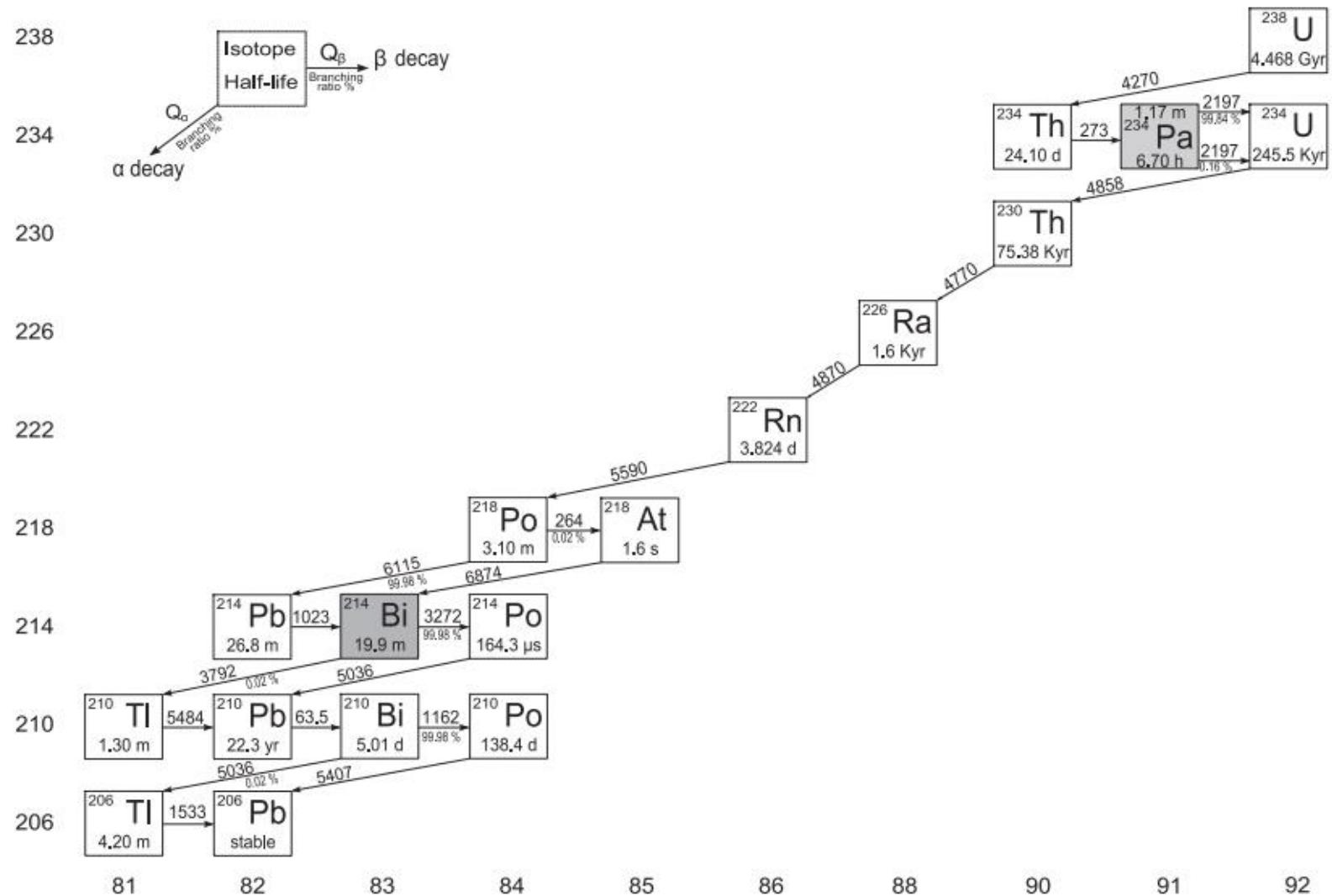


Рис. 4. Энергетический спектр (нормированный на один распад  $^{238}\text{U}$ ) антинейтрино цепи урана для энергий выше 1,806 МэВ

# Цепочка распадов $^{232}\text{Th}$

Рис. 5. Схема распадов цепи  $^{232}\text{Th}$ . Серым цветом обозначены «главные» источники. [3]



# Спектр от $^{232}\text{Th}$

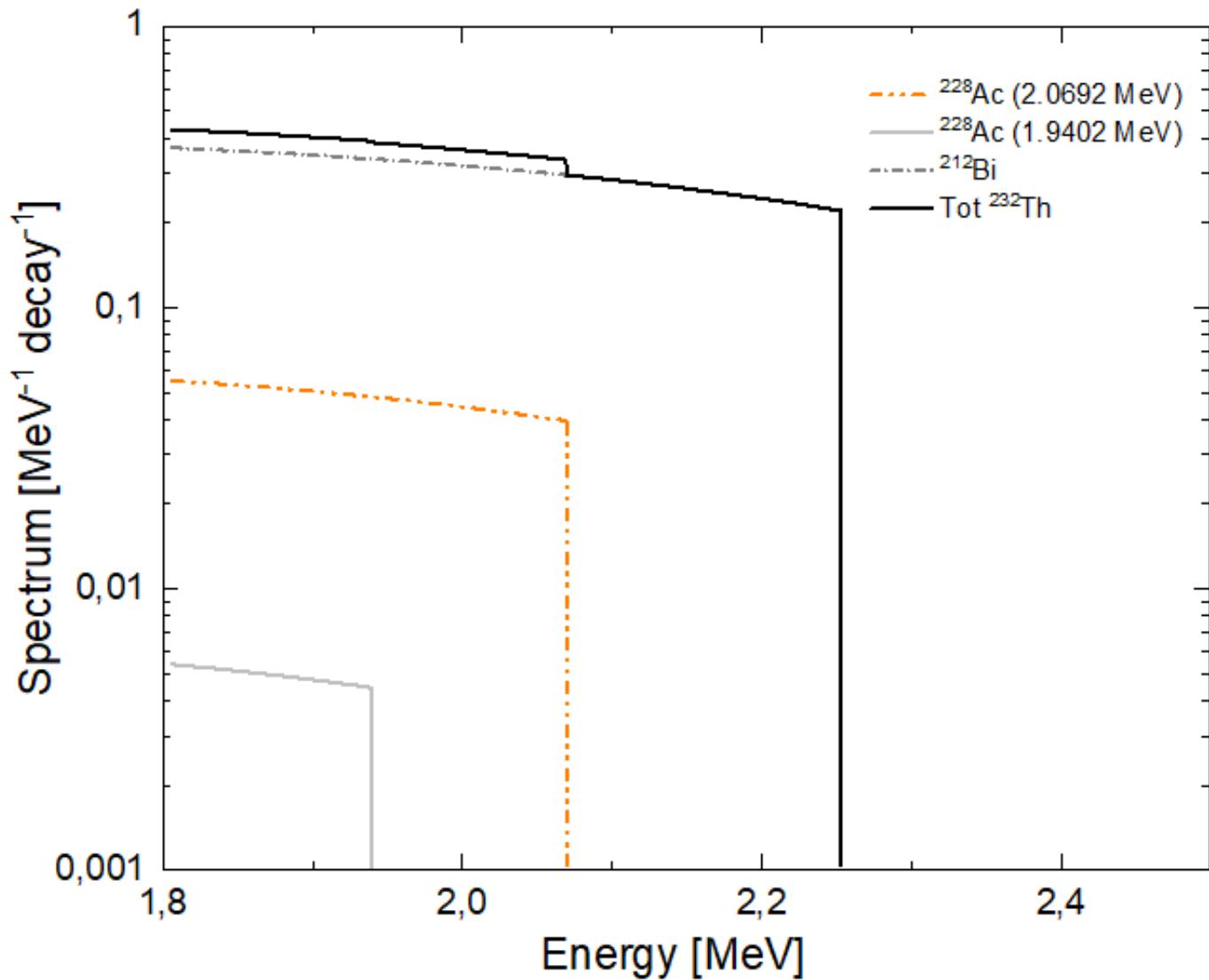


Рис. 6. Энергетический спектр (нормированный на один распад  $^{232}\text{Th}$ ) антинейтрино цепи тория для энергий выше 1,806 МэВ

# Потеря информации на осцилляциях антинейтрино

Вероятность выживания электронного аромата:

$$P_{ee}(E_{\tilde{\nu}}, d) = 1 - (\cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \Delta_{21} + \sin^2 2\theta_{13} [\cos^2 \theta_{12} \Delta_{31} + \sin^2 \theta_{12} \Delta_{32}]) \quad (13)$$

$\theta_{ij}$  - углы смешивания

$\Delta m_{ij}^2$  - разность квадратов масс разных ароматов антинейтрино

$$\Delta_{ij} = \sin^2 \left( 1.27 \frac{|\Delta m_{ij}^2| d}{E_{\tilde{\nu}}} \right) \quad (14)$$

$\underbrace{\phantom{1.27 \frac{|\Delta m_{ij}^2| d}{E_{\tilde{\nu}}}}}_{=}$   
$$\pi \frac{d}{d_{osc}}$$

# Длина осциляций

$$d_{osc} = \frac{\pi E_{\tilde{\nu}}}{1.27 |\Delta m^2|} \quad (15)$$

Усреднённая вероятность для энергий из диапазона энергий гео-нейтрино:

$$\langle P_{ee} \rangle = 1 - 0.5(\cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} + \sin^2 2\theta_{13}) = 0.558 \pm 0.015 \quad (16)$$

# Спектр излучения гео-нейтрино

$$F_X(E_{\tilde{\nu}}) = f_X(E_{\tilde{\nu}}) \langle P_{ee} \rangle \int_{V_{\oplus}} d\vec{r} \frac{\rho(\vec{r})}{4\pi |\vec{R}_D - \vec{r}|^2} \frac{a_X(\vec{r}) C_X \lambda_X}{m_X} \quad (17)$$

$\rho(\vec{r})$  - плотность пород в некоторой точке земли,

$\vec{R}_D$  - радиус-вектор, описывающий положение детектора (БНО ИЯИ РАН),

$a_X(\vec{r})$  и  $C_X$  - массовая и изотопная распространённость X,

$\lambda_X$  и  $m_X$  - постоянная распада и атомная масса.

# Эталонная модель Земли

## Обозначения:

**СС** – континентальная кора,

**ОС** – океаническая кора,

**UC**, **MC**, **LC** – верхняя, центральная и нижняя кора соответственно,

**W** – океан.

**LM**, **DM**, **EM** – литосферная, обеднённая и обогащённая мантия соответственно.

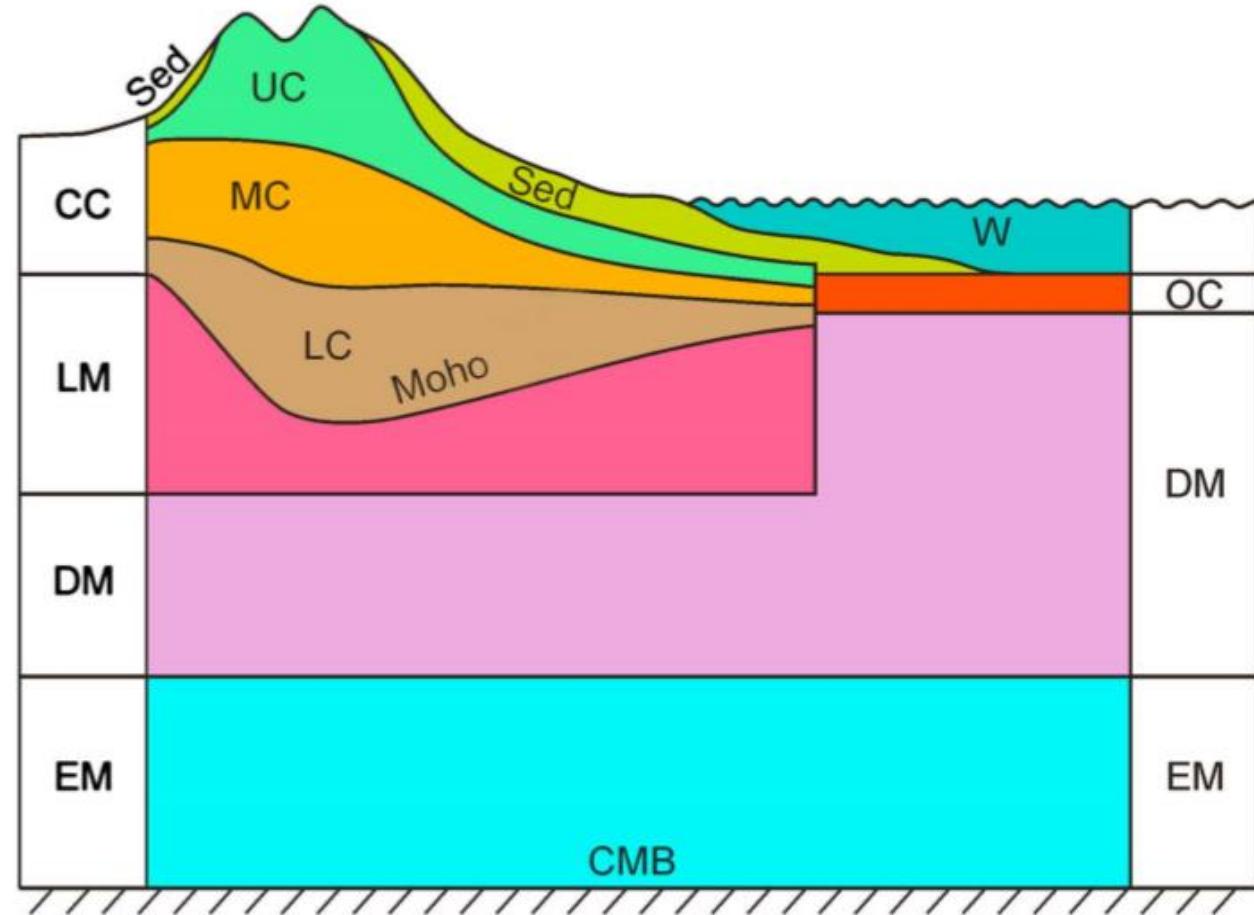


Рис. 7. Схематичное изображение строения Земли вне ядра [10].

## Оценки потока антинейтрино от природных источников для БНО [10]

$$\Phi(^{238}\text{U}) = 5.10^{+1.11}_{-0.90}$$

$$\times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\Phi(^{232}\text{Th}) = 4.36^{+1.26}_{-0.83}$$

# Роль реакторных антинейтрино

99,9 % образуются в распадах изотопов  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Pu}$

Спектр реакторных антинейтрино представляется в виде:

$$\Lambda(E_{\tilde{\nu}}) = \sum_{i=1}^4 f_i \lambda_i(E_{\tilde{\nu}}) \quad (18)$$

$\lambda_i(E_{\tilde{\nu}})$  – спектр антинейтрино для одного распада  $i$ -го радионуклида

$f_i$  – доля  $i$ -го элемента в общем сигнале

$$P_{th} = R\langle Q \rangle = R \sum_{i=1}^4 f_i Q_i \quad (19)$$

$$P_{th} = \frac{P_i}{p_i} = \frac{R f_i Q_i}{p_i} \quad (20)$$



$$p_i = \frac{f_i Q_i}{\sum f_i Q_i} \quad (21)$$

$R$  - общее число делений в единицу времени,

$\langle Q \rangle$  ( $Q_i$ ) - средняя энергия выделяемая за одно деление (изотопа  $i$ ),

$P_{th}$  - тепловая мощность,

$p_i$  - энергетическая фракция  $i$ -го изотопа.

Спектр от k-го реактора:

$$R_k(E_{\tilde{\nu}}) = P_{th}LF \sum_{i=1}^4 \frac{p_i}{Q_i} \lambda_i(E_{\tilde{\nu}}) \quad (22)$$

$LF$  - коэффициент полезной нагрузки.

Эмпирический спектр i-го изотопа, нормированный на одно деление:

$$\lambda_i(E_{\tilde{\nu}}) = \exp\left(\sum_{k=0}^3 a_i^k E_{\tilde{\nu}}^k\right) \quad (23)$$

# Спектр излучения реакторных антинейтрино

$$R(E_{\tilde{\nu}}) = \sum_{k=1}^N \left[ P_{th}^k \langle LF \rangle_k \frac{P_{ee}(E_{\tilde{\nu}}, d)}{4\pi d^2} \sum_{i=1}^4 \frac{p_i^k}{Q_i^k} \lambda_i^k(E_{\tilde{\nu}}) \right] \quad (24)$$

Аппроксимация абсолютного расстояния между местом производства и детектирования ( $R_{\oplus}$ ) – средний радиус Земли - 6371 км:

$$d = R_{\oplus} 2 \sin \left( \frac{\alpha}{2} \right) \quad (25)$$

# Спектр взаимодействия

$$S(E_{\tilde{\nu}}) = \sigma(E_{\tilde{\nu}}) \left[ R(E_{\tilde{\nu}}) + \sum_X F_X(E_{\tilde{\nu}}) \right] \quad (26)$$

1 TNU = Одно взаимодействие на  $10^{32}$  протонов в год

# Обсуждение результатов

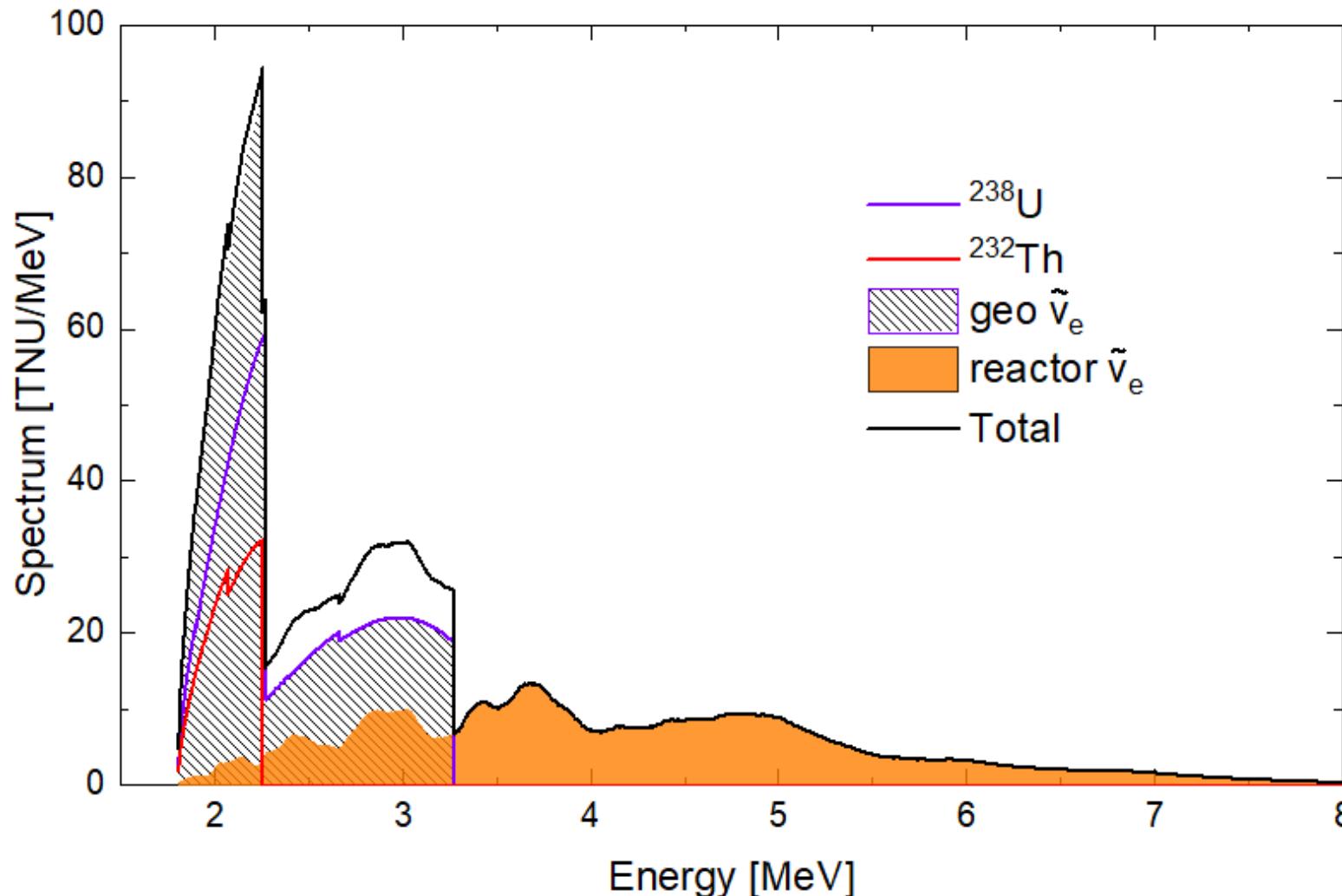


Рис. 8. Энергетический спектр взаимодействия, ожидаемый в эксперименте в БНО

Интеграл  
реакторного  
сигнала:  
 $S_R \approx 29 \text{ TNU}$   
и сигнала  
гео-нейтрино  
 $S_G \approx 46 \text{ TNU}$

# Литература

1. Ву Ц. С. Бета-распад / Ц. С. Ву, С. А. Мошковский. – Атомиздат. Москва. 1970 – 50 с.
2. McDonough W. F. The compositions of the Earth/ W. F. McDonough, S. -s. Sun// Chemical Geology 120 (1995) стр. 223 - 253
3. Fiorentini G. Geo-neutrinos and earth's interior/ Gianni Fiorentin, Marcello Lissi, d, Fabio Mantovani// Physics Reports 453 (2007) стр. 117 – 172.
4. Nucleus Ground and Isomeric States Parameters Search Engine [Электронный ресурс]. Режим доступа - <http://cdfe.sinp.msu.ru/services/gsp.en.html>, свободный – (28.04.2020).
5. Firestone, R.B., Shirley, V.S. (Eds.), 1996. Table of Isotopes [Электронный ресурс]. Режим доступа - <http://isotopes.lbl.gov/education/isotopes.html>
6. Chu S.Y.F. Ekström L.P. Firestone R.B. The Lund/LBNL Nuclear Data Search (Version 2.0, February 1999) [Электронный ресурс]. Режим доступа - <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/index.asp>, свободный – (28.04.2020).
7. Capozzi F. Global constraints on absolute neutrino masses and their ordering / Francesco Capozzi, Eleonora Di Valentino, Eligio Lisi, Antonio Marrone, Alessandro Melchiorri, and Antonio Palazzo // Phys. Rev. D 95, 096014 – Published 30 May 2017
8. Petcov S. T. The LMA MSW solution of the solar neutrino problem, inverted neutrino mass hierarchy and reactor neutrino experiments / S.T.Petcov, M.Piai. // Physics Letters B, Volume 533, Issues 1-2, 2 May 2020, p. 94-106.
9. Smirnov O. Experimental Aspects of Geoneutrino Detection: Status and Perspectives / Oleg Smirnov // Progress in Particle and Nuclear Physics, Volume 109, November 2019, 103712
10. Huang Yu. A reference Earth model for the heat-producing elements and associated geoneutrino flux / Yu Huang, Viacheslav Chubakov, Fabio Mantovani, Roberta L. Rudnick, William F. McDonough // arXiv:1301.0365
11. Dziewonski A. M. Preliminary reference Earth model / Adam M. Dziewonski, Don L. Anderson // Physics of the Earth and Planetary Interiors Volume 25, Issue 4, June 1981, Pages 297-356.
12. Gabi Laske, Zhitu Ma, Guy Masters and Michael Pasyanos CRUST 1.0 A New Global Crustal Model at 1x1 Degrees / [Электронный ресурс]. Режим доступа - <https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust1.html>, свободный (01.05.20)

13. Garnero E. J. Structure and dynamics of Earth's lower mantle / Garnero E.J., McNamara A. K. // Science. 2008 May 2;320(5876):626-8. doi: 10.1126/science.1148028

14. Baldoncini M. Reference worldwide model for antineutrinos from reactors / Marica Baldoncini, Ivan Callegari, Giovanni Fiorentini, Fabio Mantovani, Barbara Ricci, Virginia Strati, and Gerti Xhixha // PHYSICAL REVIEW D 91, 065002 (2015)

15. Djurcic Z. Uncertainties in the anti-neutrino production at nuclear reactors / Z Djurcic, J A Detwiler, A Piepke, V R Foster, L Miller, and G Gratta // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics Published 10 March 2009.

16. The Power Reactor Information System (PRIS) / [Электронный ресурс]. Доступно по адресу - <https://prisweb.iaea.org/Home/Pris.asp>, - свободный, требуется регистрация (10.05.20).

17. LABORATORY FOR NUCLEAR TECHNOLOGIES, A reference worldwide model for antineutrinos from reactors. / [Электронный ресурс]. Доступен по адресу - <https://www.fnal.gov/antineutrino/>, свободный. (10.05.20).

18. Barna A. M. Global Antineutrino Modeling: A Web Application / A.M. Barna, S.T. Dye. // arXiv:1510.05633v2 [physics.ins-det] 6 Feb 2018.

Спасибо за  
внимание