



Поиск редких мод распада ^{96}Zr

Аспирант группы А24-121
Хусаинов Т.К.

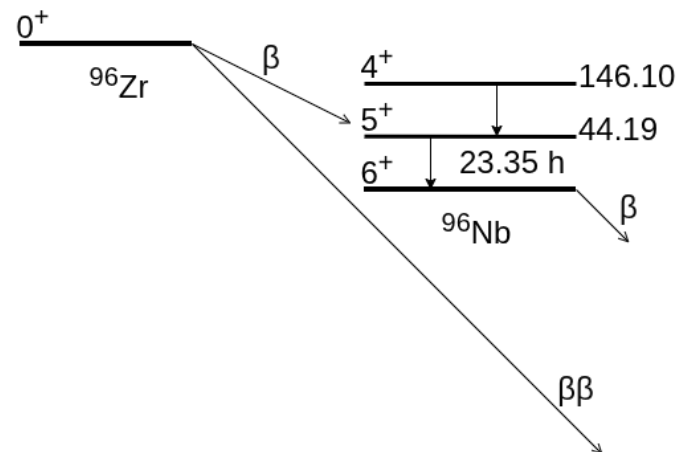
Научный руководитель
Д.ф.-м.н., Гуров Ю.Б.

Научный консультант
Д.ф.-м.н., Якушев Е.А.

19.01.2026



Точное исследование процессов двухнейтринного двойного бета-распада как в основное, так и в возбужденные состояния дочерних ядер также представляет исключительный интерес, поскольку позволяет повысить точность расчета ядерных матричных элементов (ЯМЭ) как для распадов 2ν , так и для распадов 0ν . Точные расчеты ЯМЭ (0ν), в свою очередь, позволят точно определить эффективную массу Майорановского нейтрино.



$$Q_{\beta} = 164 \text{ keV}$$

$$Q_{\beta\beta} = 3356 \text{ keV}$$

$$Q_{\beta} = 3192 \text{ keV}$$

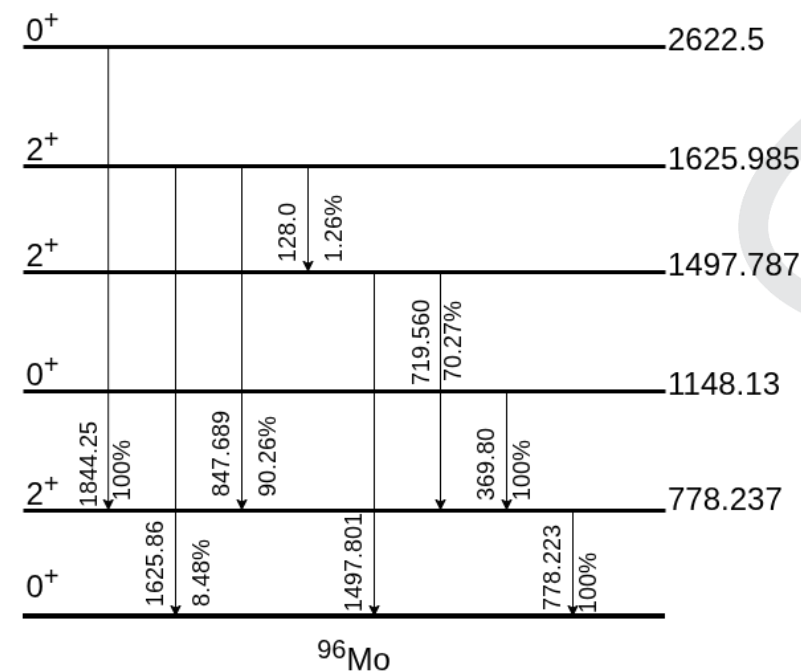


Схема распада Zr-96

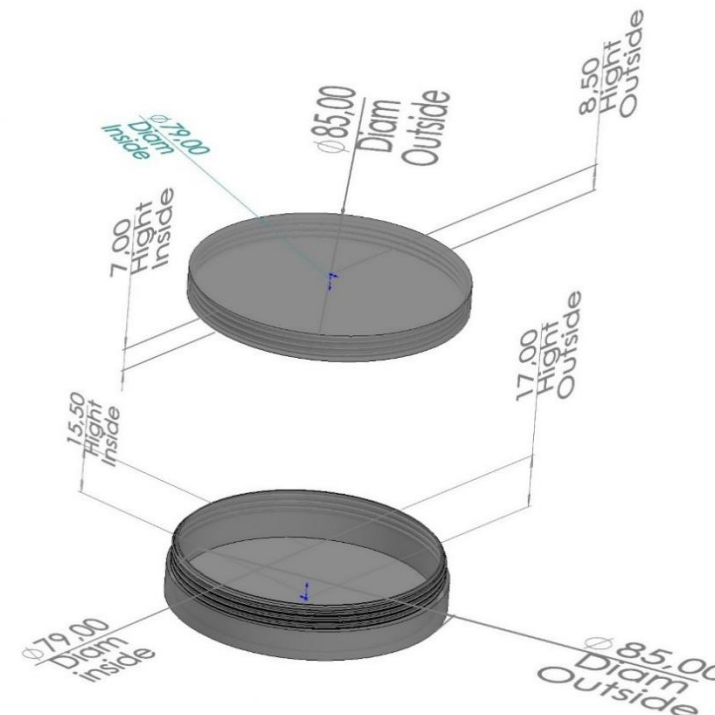
В результате первого в мире обогащения циркония газоцентрифужным методом в АО «ПО «Электрохимический завод», произведены образцы оксида и борида циркония с обогащением по изотопу ^{96}Zr более 88 % (содержание в естественной смеси 2.8 %).

1 контейнер – борид массой 149.520 г (^{96}Zr – 90.382 г)

2 контейнер – оксид массой 75.865 г (^{96}Zr – 50.277 г)

3 контейнер – оксид массой 59.100 г (^{96}Zr – 39.166 г).

В сумме: 179.825 г ^{96}Zr



Форма и размеры
контейнеров для
циркония

Наземные измерения и их результаты

В ЛЯП ОИЯИ была создана экспериментальная установка, состоящая из трех низкофоновых германиевых детекторов.

Аналогичный детектор используется для регистрации когерентного рассеяния нейтрино в эксперименте νGeN .

Измерения фона продолжались 1080 часов. Измерения с образцами 248 часов.

В результате поставлены ограничения на активность U-238 (< 49 мкБк/г) и Th-232 (< 8 мкБк/г) C.L. 90%.

Ограничение на период полураспада ^{96}Zr на уровень 1148 кэВ Mo-96 C.L. 90%

$$T_{1/2} > 1.2 \cdot 10^{19} \text{ лет}$$

Лучшее ограничение на данный момент: $T_{1/2} > 3.1 \cdot 10^{20} \text{ лет}$

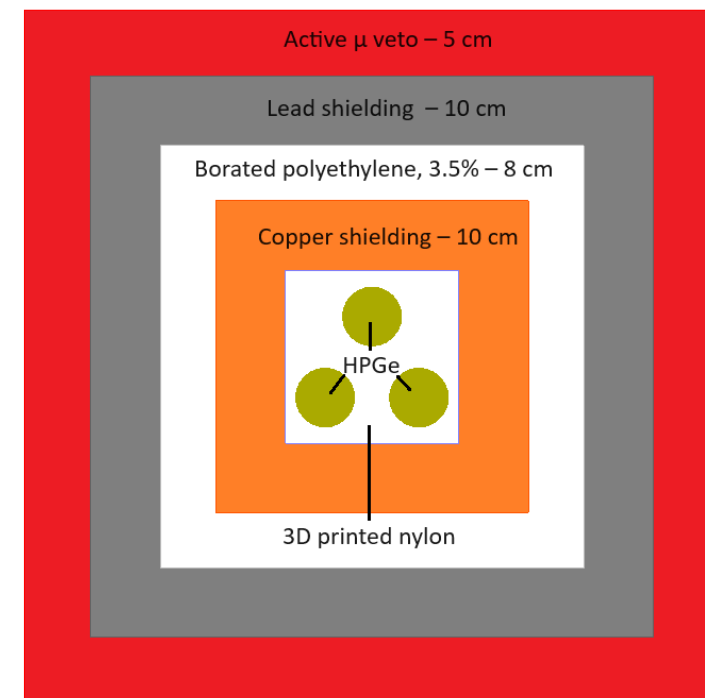


Схема установки

Образцы циркония были доставлены в лабораторию низкофоновых измерений БНО ИЯИ РАН.

Измерения фона продолжались ~100 суток.

Измерения с образцами – ~520 суток.

Предварительные результаты:

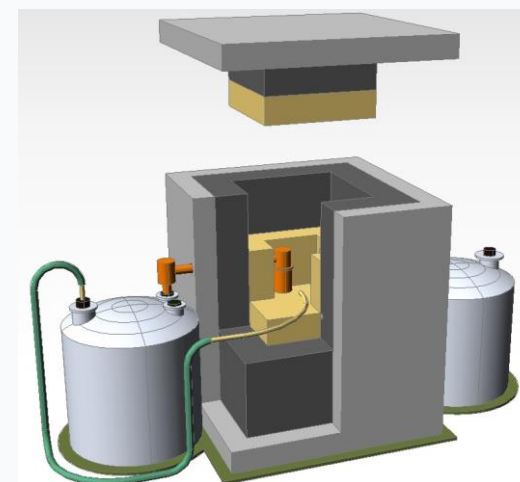
Обнаружен бета-распад Zr-96 с периодом полураспада

$$T_{1/2} = (2.0 \pm 0.6) \cdot 10^{20} \text{ лет}$$

Поставлено ограничение на период полураспада Zr-96 на уровень 1148 кэВ
Mo-96 C.L. 90%

$$T_{1/2} > 6.4 \cdot 10^{20} \text{ лет}$$

Экспериментальная установка СНЕГ



Защита состоит из: 80 мм борированного полиэтилена, 230 мм свинца и 120 мм меди.

Модернизация подземной установки

Весной 2025 года на площадку БНО было доставлено комптон-вето (NaI-сцинтиллятор) для тестовых измерений.

Осенью 2025 года доставлен новый германиевый детектор и начаты измерения фоновых условий на нем.



1. XXI Международная научная конференция молодых ученых "Молодежь в науке - 2024". Выступление с докладом «Экспериментальный поиск двойного бета-распада ^{96}Zr на возбужденные состояния ^{96}Mo ». Зарубежный (за пределами РФ) уровень. Победитель. Даты: 2024-10-29 - 2024-10-31.
2. LXXV Международная конференция «ЯДРО-2025. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ядерно-физические технологии». Выступление с докладом «Mass calibration of the HPGe detector from nuGeN experiment with dissolved uranium calibration source.». Международный уровень. Участник. Даты: 2025-07-01 - 2025-07-06.
3. 29th International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2025). Выступление с докладом «HPGe detector mass calibration with a dissolved uranium source». Международный уровень. Участник. Даты: 2025-10-27 - 2025-10-31.

1. Семинар отдела НЭОЯСиРХ «История экспериментального исследования двойного бета-распада». Дата: 17.02.2025.
2. RICOCHET collaboration meeting. Low energy recoils from germanium using Cf252 (data and MC). Даты: 19.05.2025-21.05.2025.
3. Совещание коллабораций NuGEN и DANSS. «Калибровка германиевого детектора с помощью уранового источника». Даты: 25.06.2025-27.06.2025.
4. Семинар в Институте ядерной физики Республики Казахстан. “HPGe detector mass calibration with a dissolved uranium source”. Дата: 05.11.2026.

1. Barabash, A.S., Warot, G., Nagorny, S., Pagnanini, L., Pirro, S., Ponomarev, D.V., Rozov, S.V., Rukhadze, N.I., Shitov, Y.A., Stekl, I. and **Khussainov, T.K.**, 2025. Search for Double-Beta Decay of ^{82}Se into ^{82}Kr Excited States Using the OBELIX Installation. *Physics of Particles and Nuclei*, 56(3), pp.831-834.
2. Belov, V., Bistryakov, A., Danilov, M., Evseev, S., Fomina, M., Ignatov, G., Kazartsev, S., Khushvaktov, J., **Khussainov, T.**, Konovalov, A. and Kuznetsov, A., 2025. New constraints on coherent elastic neutrino–nucleus scattering by the νGeN experiment. *Chinese Physics C*, 49(5), p.053004.
3. Barabash, A., Evseev, S., Filosofov, D., Kazalov, V., **Khussainov, T.**, Lubashevskiy, A., Mokhine, N.D., Ponomarev, D., Rozov, S., Vasilyev, S., Vorobyeva, M., Yakushev, E. and Yumatov, V., 2026. Application of a high-precision distributed uranium source for determining the effective mass and volume of a HPGe detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*

1. Публикация статьи, посвященной наземным измерениям с первым описанием образцов циркония.
2. Публикация статьи о бета-распаде Zr-96.
3. Публикация статьи о лучших ограничениях $2\nu\beta\beta$ -распада Zr-96 на возбужденные уровни Mo-96.
4. Измерения с образцами на новой подземной установке в БНО ИЯИ РАН.

Спасибо за внимание!



Бэкап вероятность двойного бета-распада

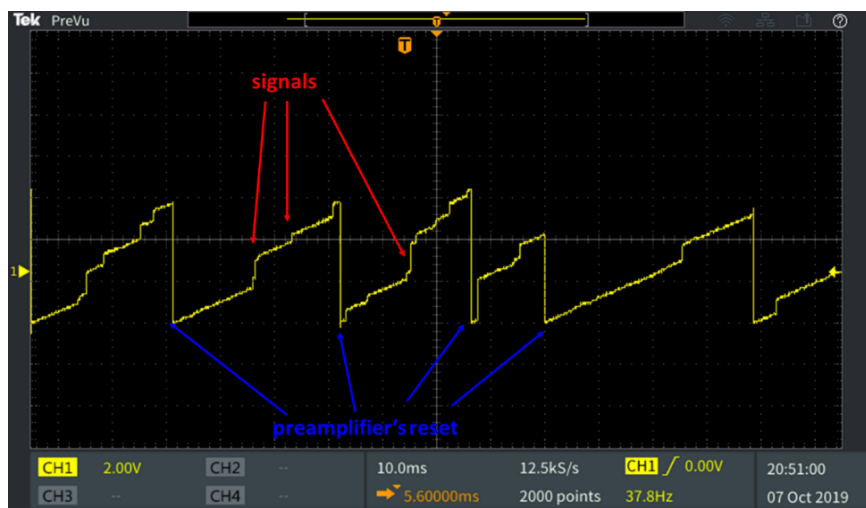
$$T_{1/2}^{2\nu}{}^{-1} = G_{2\nu} Q_{\beta\beta, Z} |M^{2\nu}|^2$$

$$T_{1/2}^{0\nu}{}^{-1} = G_{0\nu} Q_{\beta\beta, Z} |M^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$

где $G_{\beta\beta, Z}$ – фазовое пространство, зависящее от энергии распада и зарядовому числу распадающегося ядра, $|M|^2$ – квадрат ядерного матричного элемента (ЯМЭ), а $\langle m_{\beta\beta} \rangle^2$ – квадрат эффективной массы майорановского электронного нейтрино.

Все детекторы оборудованы предусилителем со сбросом заряда. При достижении заряда в детекторе определенного значения происходит сброс.

$$k_{eff} = \frac{E_{max} - E_{\gamma}}{E_{max}}$$



Сигналы с детекторов

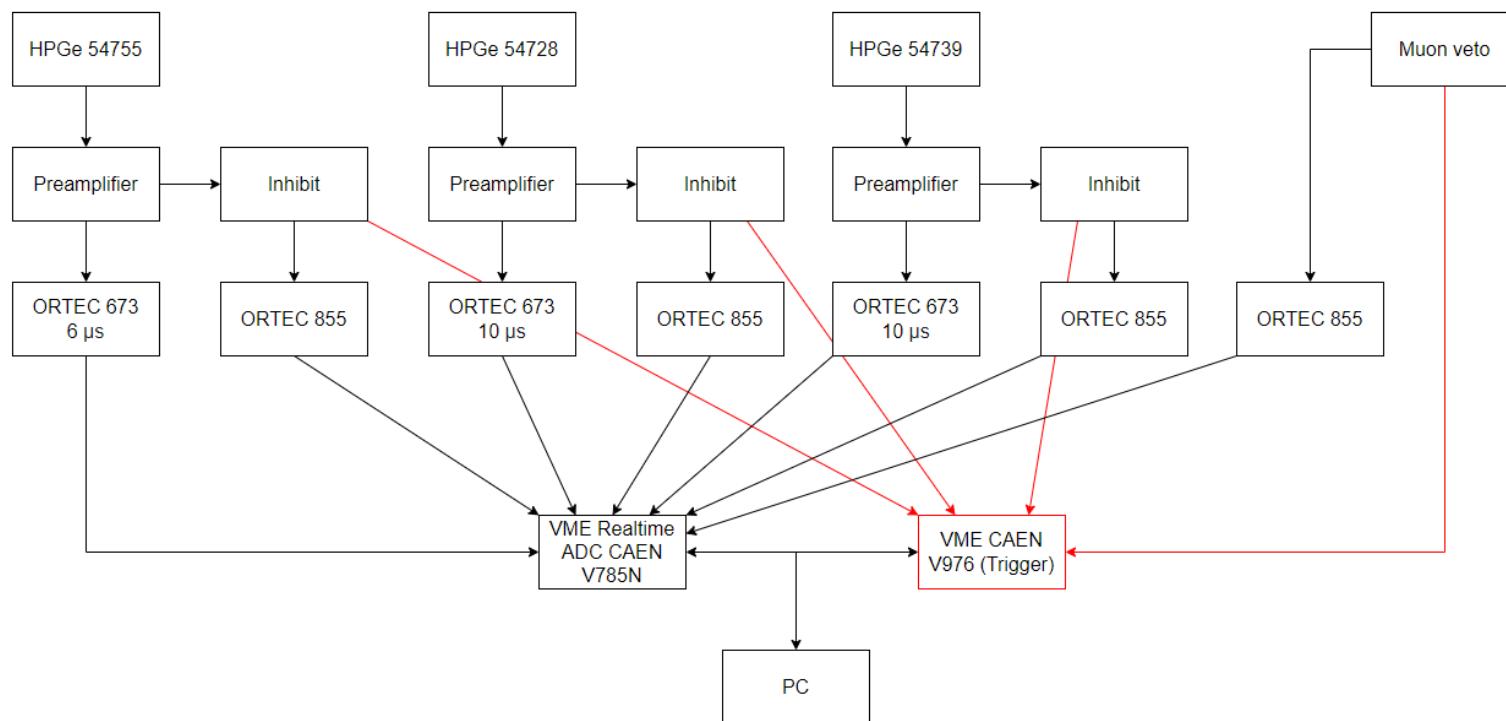
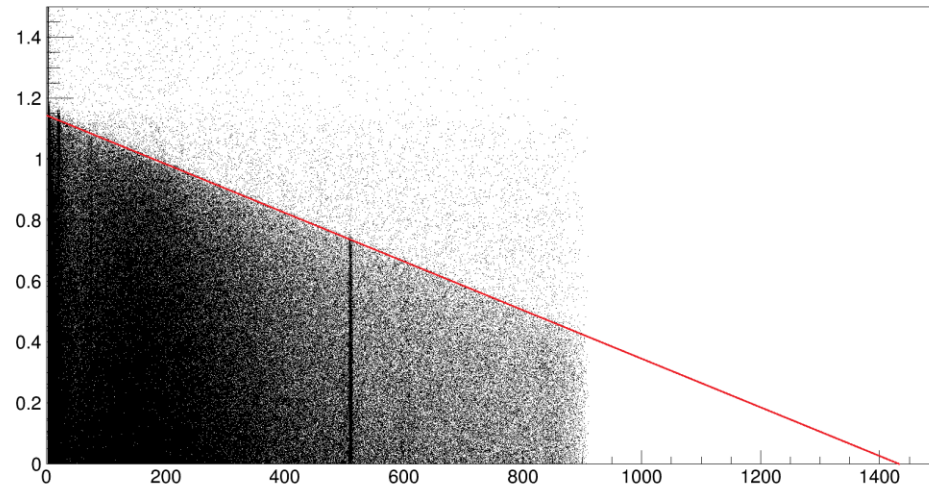


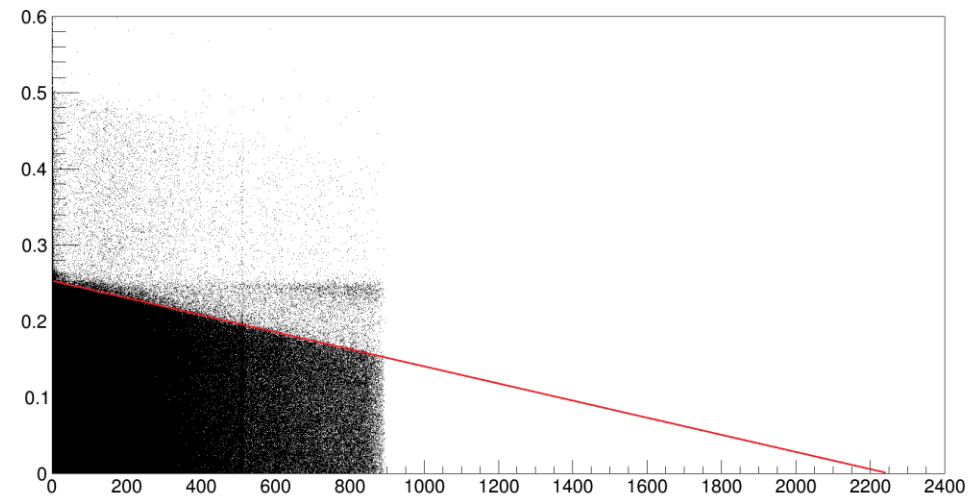
Схема электроники в эксперименте

Бэкап коэффиценты

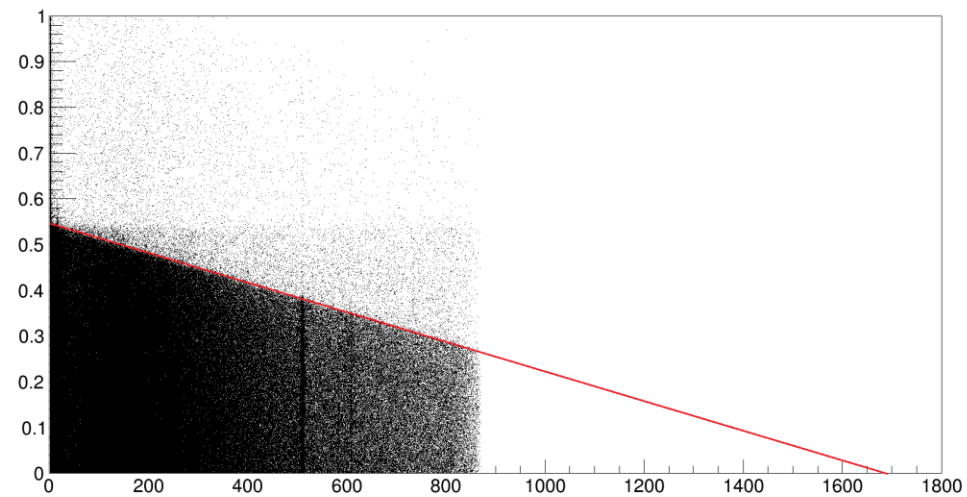
(t-t_inh28[0]):energy[5]



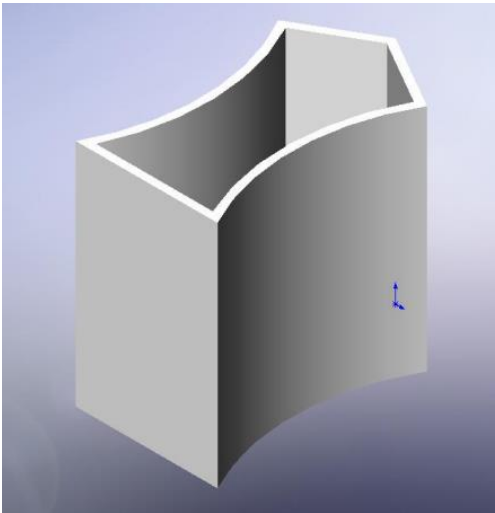
(t-t_inh55[0]):energy[4]



(t-t_inh39[0]):energy[3]

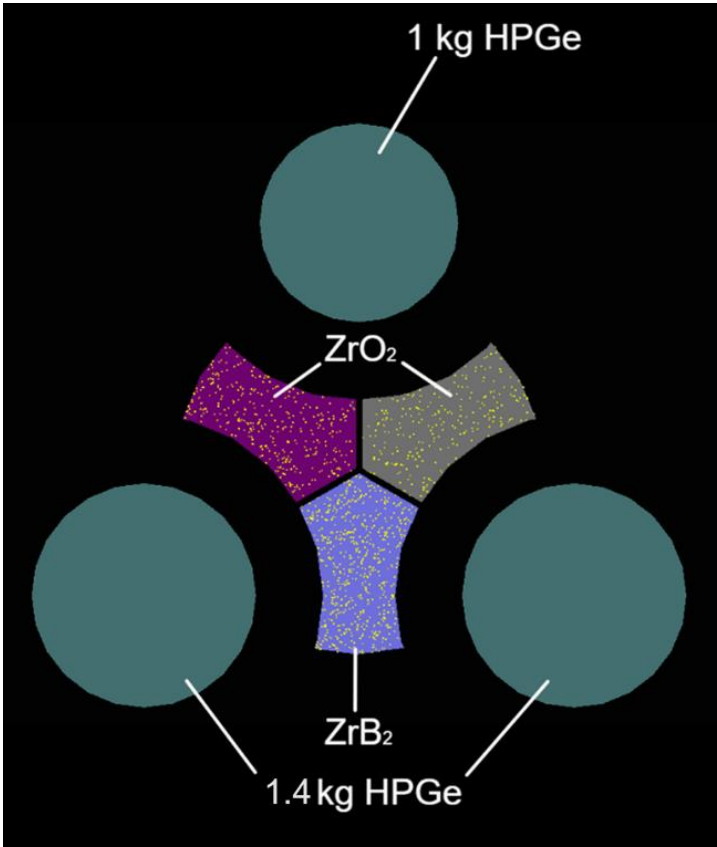


Также рассмотрена геометрия с расположением образцов в контейнерах, образующих «трилистник» между детекторами



Полученные эффективности детекторов

| Детектор | 54739 | 54755 | 54728 | Суммарная |
|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Энергия, кэВ | | | | |
| 370 | $0.934 \cdot 10^{-2}$ | $1.803 \cdot 10^{-2}$ | $1.595 \cdot 10^{-2}$ | $4.332 \cdot 10^{-2}$ |
| 778 | $0.359 \cdot 10^{-2}$ | $0.909 \cdot 10^{-2}$ | $0.738 \cdot 10^{-2}$ | $2.006 \cdot 10^{-2}$ |



Размещение детекторов и образцов в модели Geant4

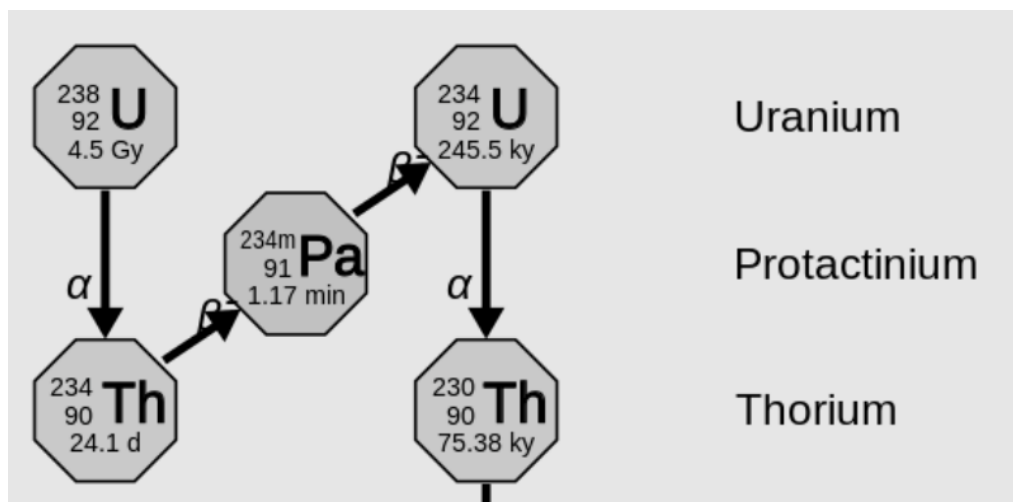
Моделирование уранового источника

Проведены измерения с калибровочным источником урана, распределенным в растворе азотной кислоты

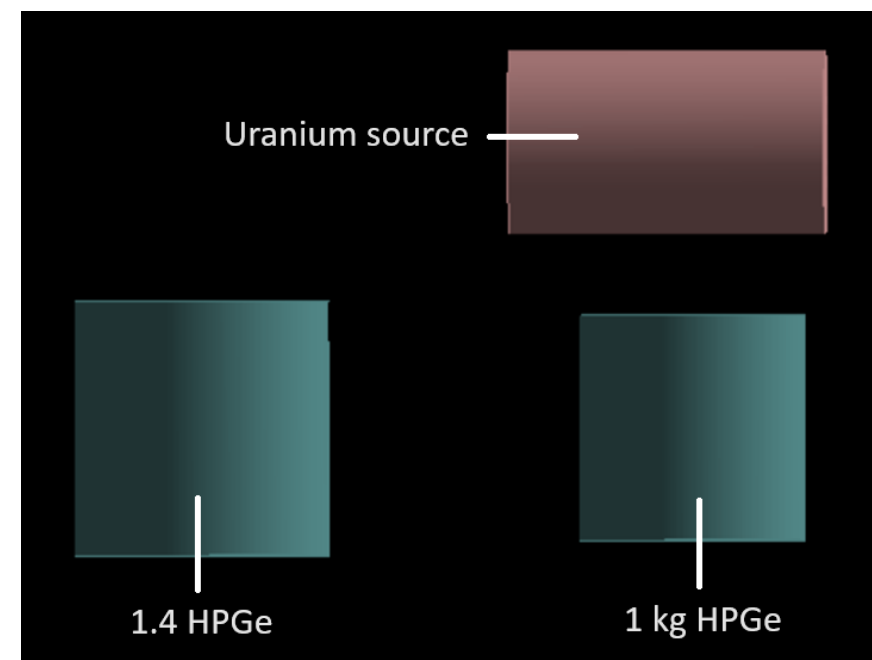
Масса урана (125 ± 6.25) мг, тогда активность источника (1550 ± 8) Бк

Измерения проводились в январе 2024, источник был произведен в августе 2022, таким образом время выдержки почти 1.5 года.

Таким образом ряд радия до ^{234}Pa включительно находится в равновесии



Радиоактивный ряд радия

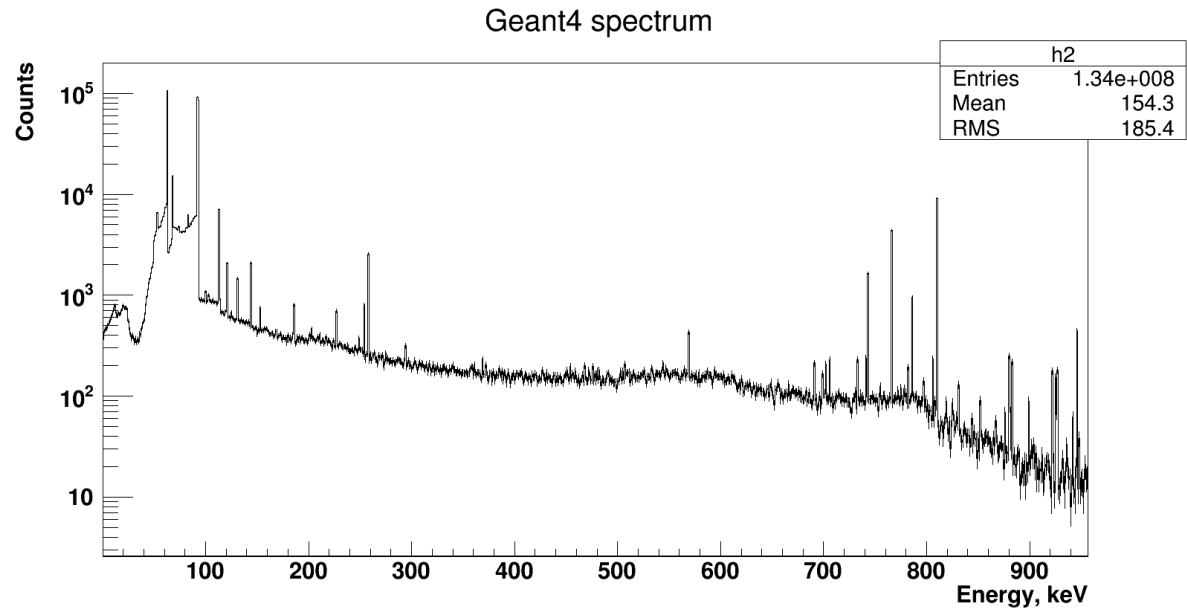


Размещение детекторов и источника в модели Geant4

Проверка Монте-Карло

Проведены измерения с калибровочным источником урана, распределенным в растворе азотной кислоты

Масса урана (125 ± 6.25) мг, тогда активность источника (1550 ± 8) Бк



Спектр радиевого ряда до ^{234}Pa ,
полученный в Geant4

Сравнение экспериментальных эффективностей с полученными в симуляциях

| Е, кэВ | Отношение эксперимента к Монте-Карло |
|--------|--------------------------------------|
| 258.26 | 0.82 ± 0.03 |
| 742.81 | 0.73 ± 0.04 |
| 766.36 | 1.01 ± 0.03 |
| 786.27 | 0.98 ± 0.07 |

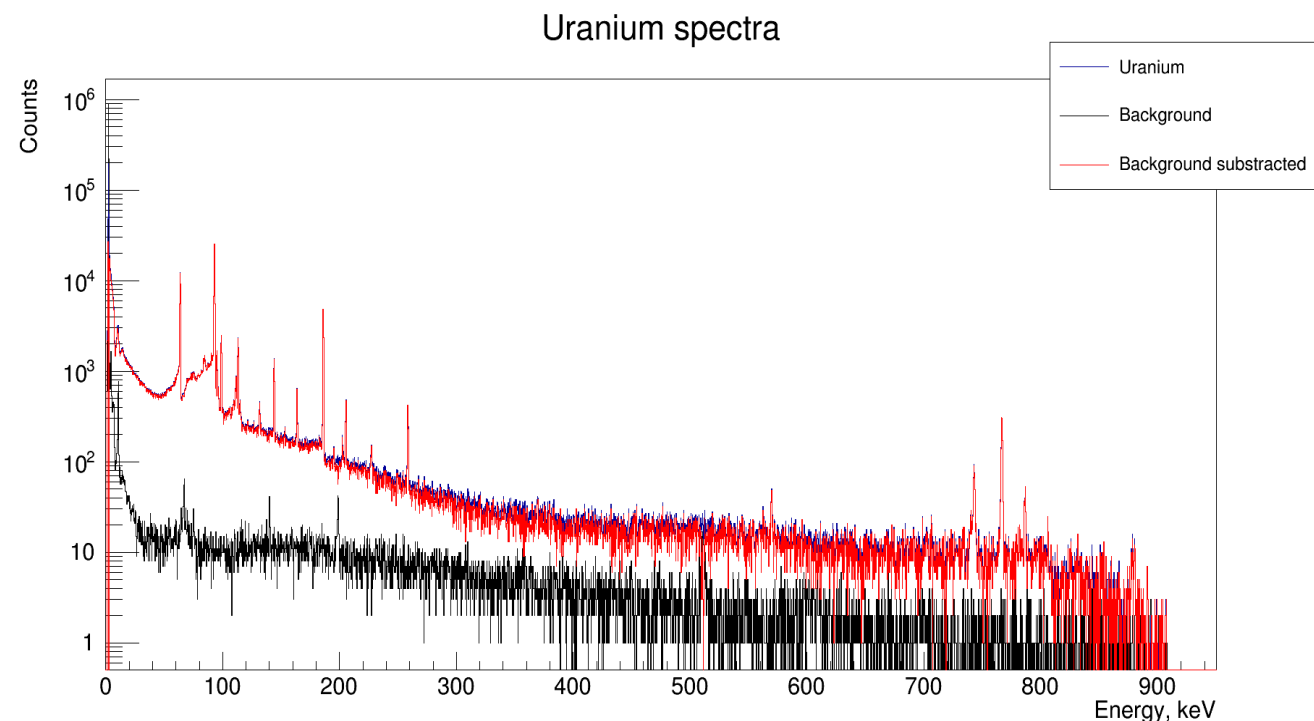
Причинами несоответствия могут являться:

- Некорректный учет электронной конверсии в Radioactive Decay dataset
- Недостаток информации о внутренней геометрии детекторов

Бэкап эффе́ктивности детекторов

| Детектор \ Энергия, кэВ | 39 | 55 | 28 | Суммарная |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Схема 1 (цилиндрические коробочки) | | | | |
| 370 | $1.021 \cdot 10^{-2}$ | $1.807 \cdot 10^{-2}$ | $0.874 \cdot 10^{-2}$ | $3.702 \cdot 10^{-2}$ |
| 370 (уч. неэфф.) | $0.796 \cdot 10^{-2}$ | $1.503 \cdot 10^{-2}$ | $0.646 \cdot 10^{-2}$ | $2.945 \cdot 10^{-2}$ |
| 778 | $0.675 \cdot 10^{-2}$ | $1.195 \cdot 10^{-2}$ | $0.528 \cdot 10^{-2}$ | $2.397 \cdot 10^{-2}$ |
| 778 (уч. неэфф.) | $0.362 \cdot 10^{-2}$ | $0.994 \cdot 10^{-2}$ | $0.238 \cdot 10^{-2}$ | $1.595 \cdot 10^{-2}$ |
| Схема 2 («трилистник») | | | | |
| 370 | $1.264 \cdot 10^{-2}$ | $2.167 \cdot 10^{-2}$ | $2.045 \cdot 10^{-2}$ | $5.476 \cdot 10^{-2}$ |
| 370 (уч. неэфф.) | $0.934 \cdot 10^{-2}$ | $1.803 \cdot 10^{-2}$ | $1.595 \cdot 10^{-2}$ | $4.332 \cdot 10^{-2}$ |
| 778 | $0.795 \cdot 10^{-2}$ | $1.406 \cdot 10^{-2}$ | $1.375 \cdot 10^{-2}$ | $3.575 \cdot 10^{-2}$ |
| 778 (уч. неэфф.) | $0.359 \cdot 10^{-2}$ | $0.909 \cdot 10^{-2}$ | $0.738 \cdot 10^{-2}$ | $2.006 \cdot 10^{-2}$ |

Для проверки выполненных расчетов эффективности и модели Geant4 регистрации гамма-квантов, были



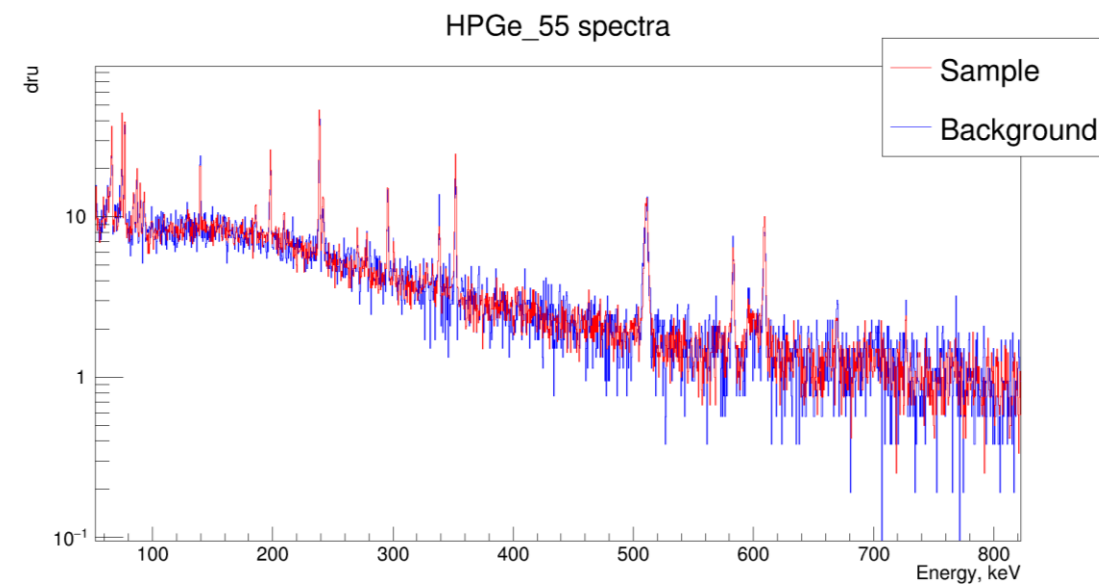
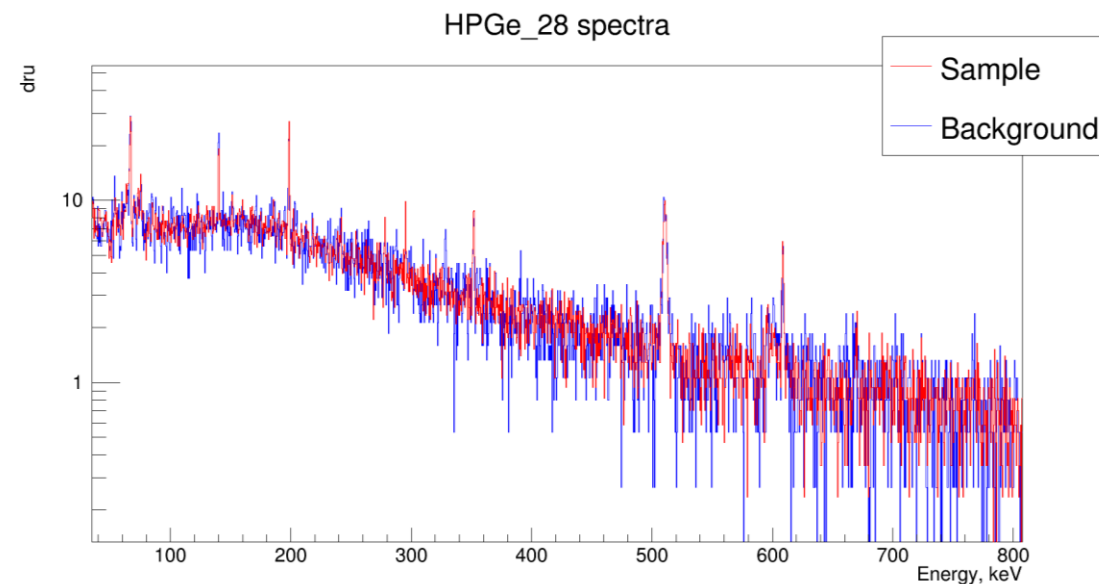
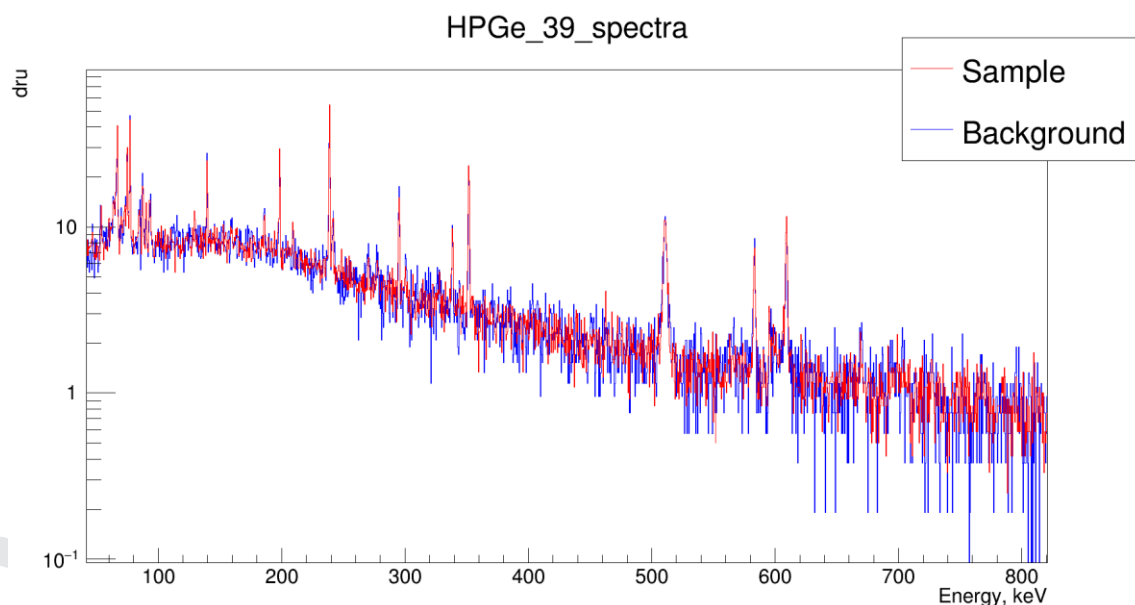
Сравнение фонового спектра и спектра с источником

Бэкап результаты сравнения МК

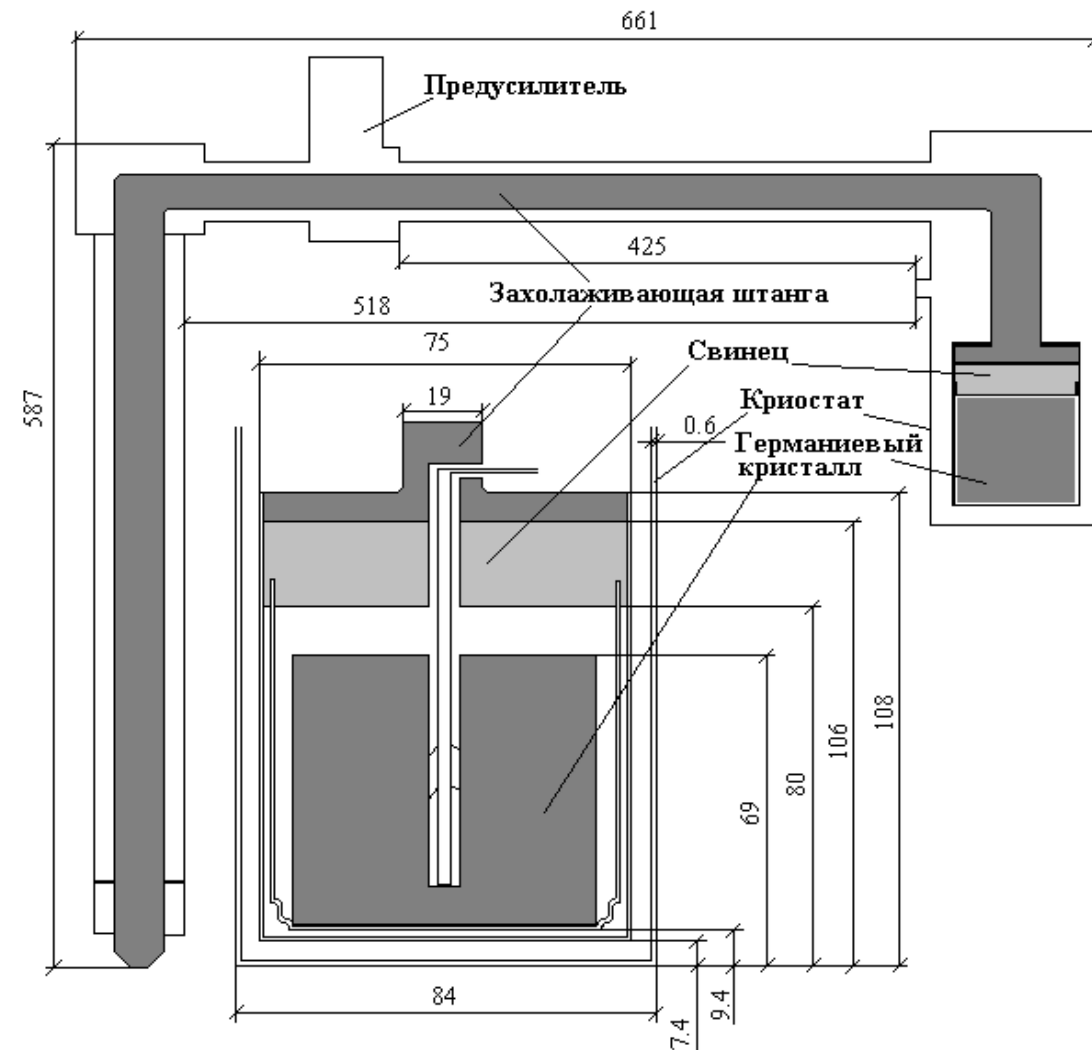
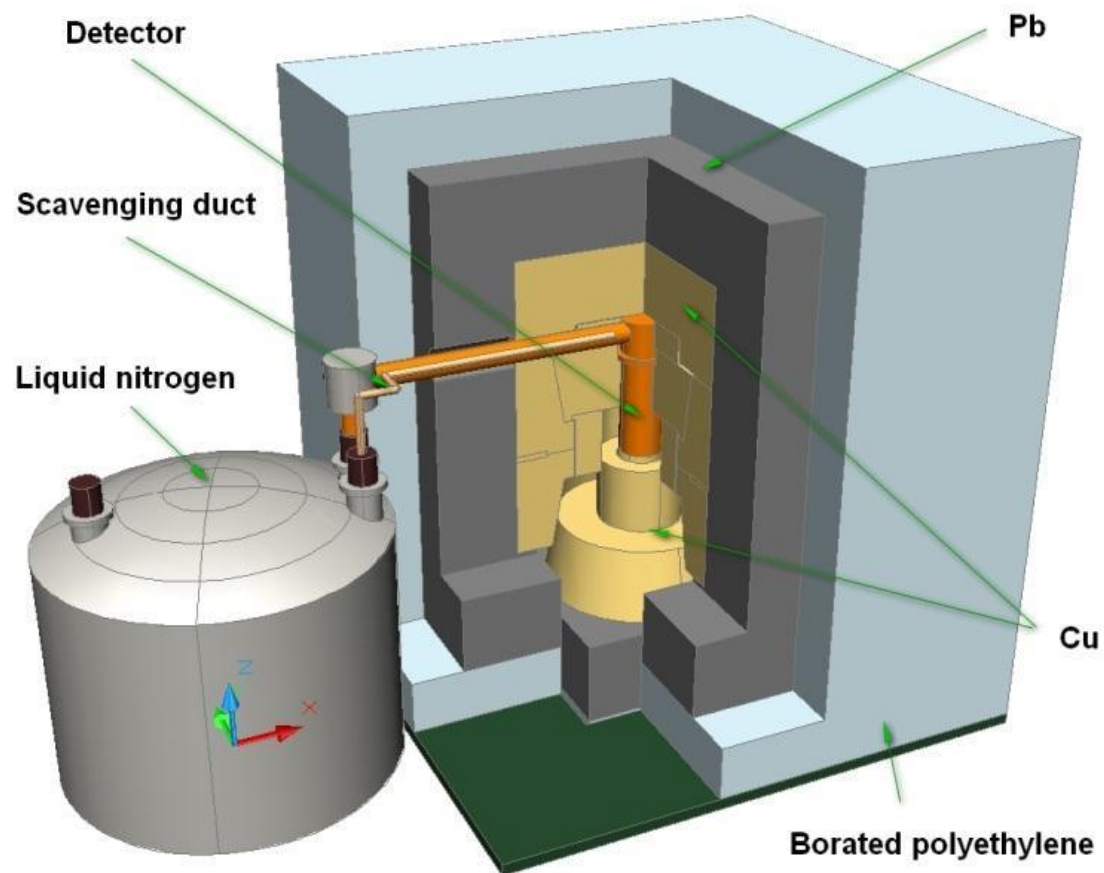
| Е, кэВ | Монте-Карло | Монте-Карло (с уч. неэф.) | Экспериментальная | Отношение экспериментальной к Монте-Карло (с уч. неэф.) |
|--------|-----------------------|---------------------------|---------------------------------|---|
| 258.26 | $1.920 \cdot 10^{-5}$ | $1.571 \cdot 10^{-5}$ | $(1.16 \pm 0.04) \cdot 10^{-5}$ | 0.82 ± 0.03 |
| 742.81 | $1.228 \cdot 10^{-5}$ | $0.586 \cdot 10^{-5}$ | $(0.40 \pm 0.02) \cdot 10^{-5}$ | 0.73 ± 0.04 |
| 766.36 | $3.263 \cdot 10^{-5}$ | $1.503 \cdot 10^{-5}$ | $(1.48 \pm 0.04) \cdot 10^{-5}$ | 1.01 ± 0.03 |
| 786.27 | $7.166 \cdot 10^{-5}$ | $0.320 \cdot 10^{-5}$ | $(0.28 \pm 0.02) \cdot 10^{-5}$ | 0.98 ± 0.07 |

Результаты измерений с образцами

В результате наземных измерений, проведенных в ЛЯП ОИЯИ продолжительностью 244 часа получены экспериментальные спектры



Бэкап установка БНО



Образцы отправлены в БНО ИЯИ РАН для проведения подземных измерений с лучшими фоновыми условиями:

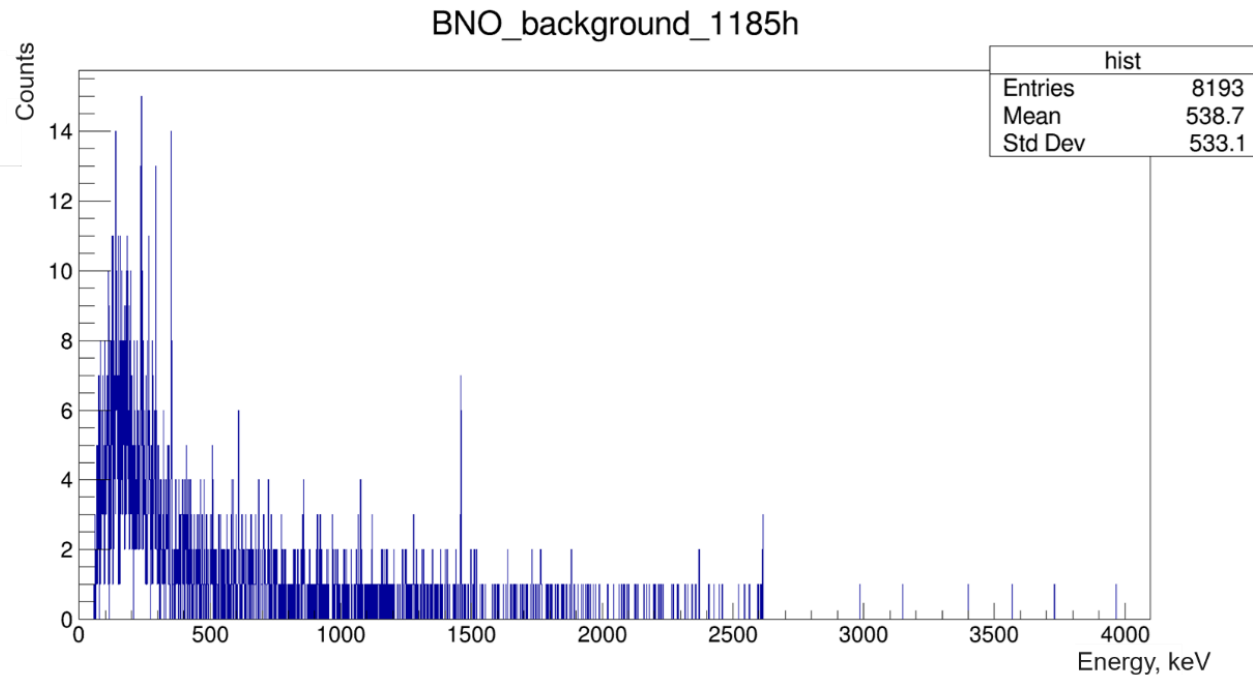
370 кэВ - (0.18 ± 0.06) событий в сутки

778 кэВ - (0.10 ± 0.04) событий в сутки

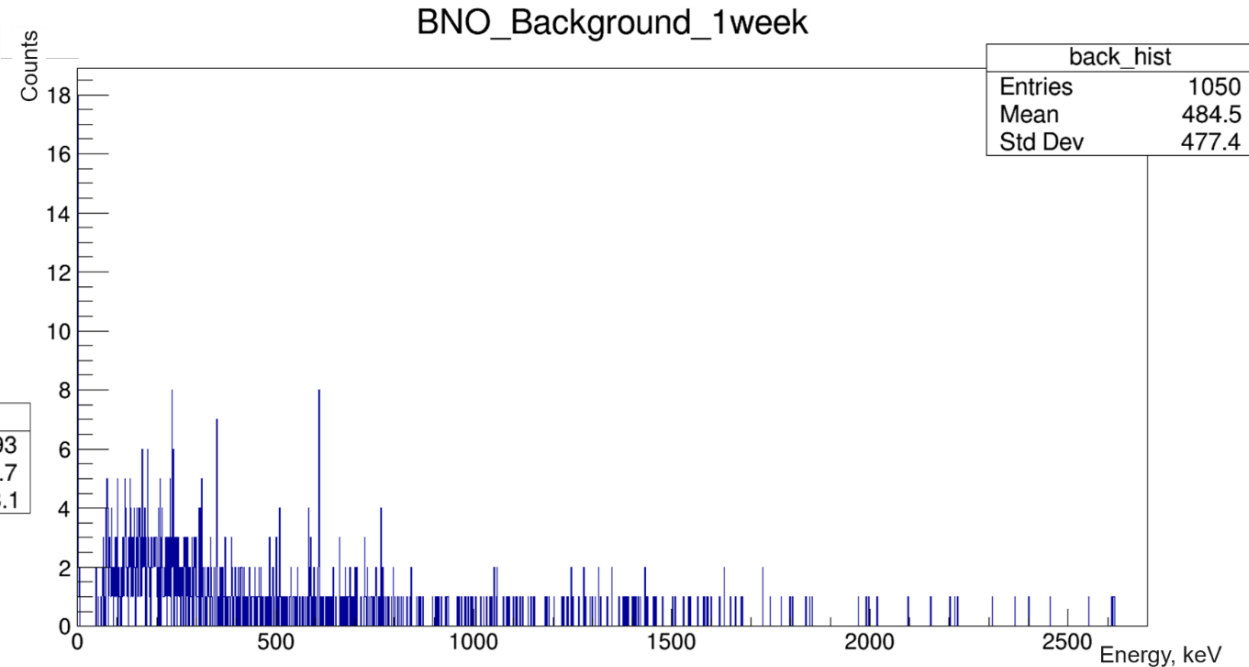
Анализ фоновых условий спектрометра в БНО показывает, что стабильные измерения, продолжительностью более 1 года, позволят достичь чувствительности, необходимой для регистрации, впервые в мире, двухнейтринного бета распада Zr-96 на возбужденные состояния Mo-96. Кроме того, фоновые условия, масса и радиоактивная чистота образцов позволят впервые обнаружить бета распад Zr-96 в Nb-96, предполагаемый период полураспада которого составляет более 10^{20} лет

Результаты подземных измерений

В ходе предварительных измерений превышений над уровнем фона не обнаружено

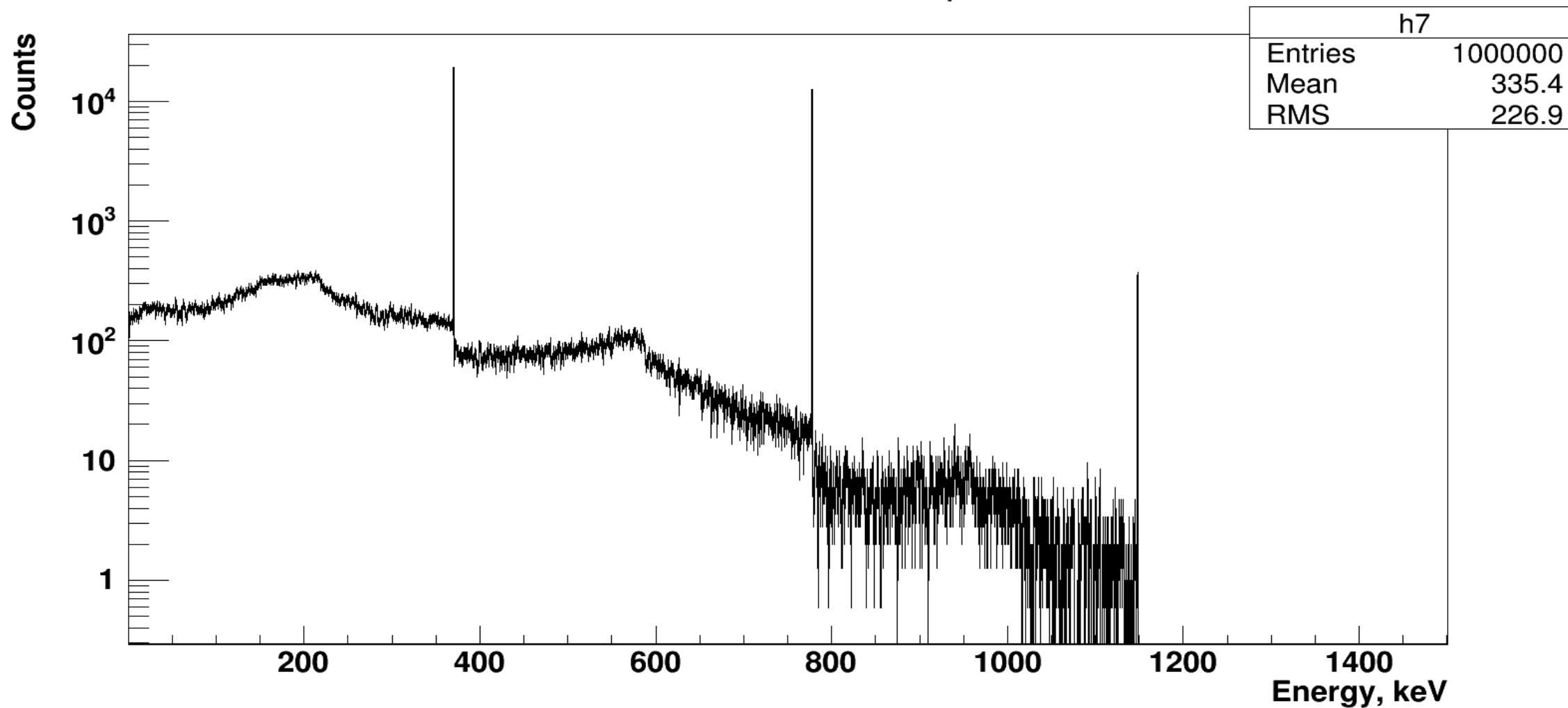


Фоновый спектр (1185 часов)



Спектр с образцами (160 часов)

BNO_Geant4_spectrum



Search for Double-Beta Decay of ^{82}Se into ^{82}Kr Excited States Using the OBELIX Installation

A. S. Barabash^{a,*}, G. Warot^b, S. Nagorny^c, L. Pagnanini^{d,e}, S. Pirro^d, D. V. Ponomarev^f, S. V. Rozov^g, N. I. Rukhadze^f, Yu. A. Shitov^h, I. Stekl^h, T. K. Khussainov^{i,k}, V. I. Yumatov^a, and E. A. Yakushev^f

^a National Research Center “Kurchatov Institute,” Moscow, 123182 Russia

^b Modane Underground Laboratory, CNRS/CEA, F-73500 France

^c Department of Physics, Engineering Physics and Astronomy, Queen’s University Kingston, Ontario, K7L 3N6 Kingston, Canada

^d Gran Sasso National Laboratory, INFN, Assergi, AQ, Italy

^e Gran Sasso Scientific Institute, L’Aquila, Italy

^f Laboratory of Nuclear Problems, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia

^g Institute of Experimental and Applied Physics, Czech Technical University in Prague, Prague, 11000 Czech Republic

^h Institute of Nuclear Physics, Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, Almaty, 050032 Kazakhstan

*e-mail: barabash@itep.ru

Received June 23, 2024; revised September 1, 2024; accepted November 4, 2024

Abstract—A search for the processes of double beta decay of ^{82}Se into excited states of ^{82}Kr is conducted using the OBELIX setup. The measurements are conducted using a 600 cm³ HPGe detector. The detector is surrounded by 6.5 kg of enriched selenium (the content of ^{82}Se was ~92.5%). The data collected over 17572.2 h of measurements are given. As a result, a world-record sensitivity is reached for transitions of this type. Specifically, we have found an indication of the existence of two-neutrino ^{82}Se decay into the first 0^+ ^{82}Kr excited state with a half-life of $4.4^{+1.6}_{-0.9} \times 10^{22}$ years.

New constraints on coherent elastic neutrino–nucleus scattering by the νGeN experiment*

V. Belov,^{1,2} A. Bystriakov,^{1,3,4} M. Danilov,^{3,2} S. Evseev,¹ M. Fomina,¹ G. Ignatov,^{3,5} S. Kazartsev,^{1,2} J. Khushvaktov,¹ T. Khussainov,^{1,6} A. Kononov,^{3,2} A. Kuznetsov,¹ A. Lubashevskiy,^{1,3,2,†} D. Medvedev,¹ D. Ponomarev,^{1,3,2} D. Sautner,⁵ K. Shakhov,¹ E. Shevchik,¹ M. Shirchenko,^{1,2} S. Rozov,¹ I. Rozova,¹ S. Vasilyev,¹ E. Yakushev,¹ I. Zhitnikov,^{1,2} and D. Zinatulina¹

(νGeN Collaboration)

¹ Dzhelapov Laboratory of Nuclear Problems, Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie, 141980, Dubna, Russia

² Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences,

7a Prospect 60-letiya Oktyabrya, 117312, Moscow, Russia

³ Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, 53 Leninskiy Prospekt, 119991, Moscow, Russia

⁴ Dubna State University, 19 Universitetskaya St., 141980, Dubna, Russia

⁵ Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutskiy per., 141700, Dolgoprudny, Russia

⁶ Institute of Nuclear Physics of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan,

1 Ibragimov Street, 050032, Almaty, Kazakhstan

(Dated: February 27, 2025)

The νGeN experiment searches for coherent elastic neutrino–nucleus scattering (CE ν NS) at the Kalinin Nuclear Power Plant. A 1.41-kg high-purity low-threshold germanium detector surrounded by active and passive shielding is deployed at the minimal distance of 11.1 m allowed by the lifting mechanism from the center of reactor core, utilizing one of the highest antineutrino fluxes among the competing experiments. The direct comparison of the count rates obtained during reactor-ON and reactor-OFF periods with the energy threshold of 0.29 keV_{ee} shows no statistically significant difference. New upper limits on the number of CE ν NS events are evaluated on the basis of the residual ON–OFF count rate spectrum.

¹ Application of a high-precision distributed uranium
² source for determining the effective mass and volume
³ of a HPGe detector

⁴ A. Barabash^b, S. Evseev^a, D. Filosofov^a, V. Kazalov^{c,f}, T. Khussainov^{a,d,*},
⁵ A. Lubashevskiy^{a,b,e}, N.D. Mokhine^a, D. Ponomarev^{a,b,e}, S. Rozov^a, S.
⁶ Vasilyev^a, M. Vorobyeva^a, E. Yakushev^a, V. Yumatov^b

^a Dzhelapov Laboratory of Nuclear Problems, Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie, Dubna, 141980, Russia

^b National Research Center “Kurchatov Institute”, Kurchatov Complex of Theoretical and Experimental Physics, Moscow, 117318, Russia

^c Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, 7a Prospect 60-letiya Oktyabrya, Moscow, 117312, Russia

^d Institute of Nuclear Physics of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, 1 Ibragimov Street, Almaty, 050032, Kazakhstan

^e Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, 53 Leninskiy Prospekt, Moscow, 119991, Russia

^f Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, 173 Ulitsa Chernyshevskogo, Nalchik, 360004, Russia

Abstract

¹ A distributed uranium source with the accurately certified activity of ^{238}U
² has been used to verify the effective mass of the HPGe detector intended for the νGeN neutrino experiment. The source, dissolved in nitric acid, provides homogeneous irradiation of the detector crystal allowing the study of its mass and volume. The experimental spectra obtained with the distributed source have been compared to the detailed Geant4 Monte Carlo simulations. The measured counting rates of several γ -lines agree with the simulated efficiencies, confirming that the detector’s mass and volume coincide with the manufacturer’s specifications. The results demonstrate the applicability of

*Corresponding author. Email: khussainov@jinr.ru