



Модель γ -фона в подреакторном помещении энергоблока №3 КАЭС

Научный руководитель: Литвинович Е.А.

(доц., к.ф.-м.н.)

Консультант:

Мачулин И.Н.

(к.ф.-м.н.)

Студент:

Крапля В.М.

Москва 2026г

Введение

Упругое когерентное рассеяние нейтрино (УКРН)

$$\frac{d\sigma}{dT} = \frac{G_F^2}{4\pi} M \left(2 - \frac{MT}{E^2} \right) N^2$$

Формула дифференциального сечения УКРН, где

T – энергия отдачи ядра [кэВ]

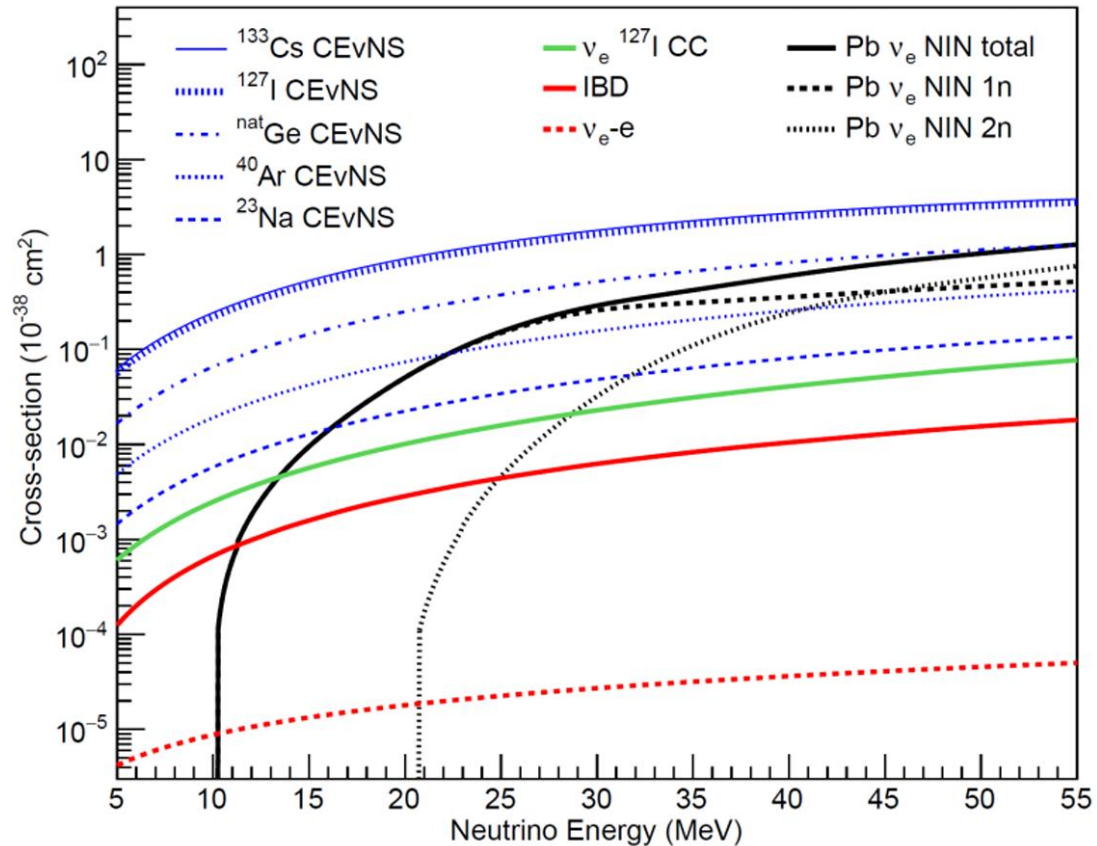
Gf – постоянная ферми [ГэВ⁻²]

M – масса ядра [МэВ]

E – энергия нейтрино [МэВ]

N – число нейтронов

Требуется сверхнизкий порог детектирования (сотни Эв)



Сечение взаимодействия больше ➡ масса мишени меньше

Трудности при поиске УКРН

Большие шумы в ROI

Цель и задачи работы

- **Цель:** Расчет эффекта от УКРН в перспективном детекторе на основе неорганических сцинтилляторов.
- **Задачи этого семестра:**
 1. Анализ экспериментальных данных твердотельного детектора на основе NaI по γ -фону в подреакторном помещении энергоблока 3 Калининской АЭС.
 2. Моделирование отклика детектора, на основе NaI(Tl), в Geant4
 3. Поиск модели γ -фона в помещении на основе данных моделирования.

- **Исследование фоновых условий является определяющим фактором успеха при поиске упругого когерентного рассеяния реакторных антинейтрино на ядрах.**
- **Создание модели фона в помещении, позволит провести моделирование отклика перспективного детектора, в рамках технического предложения по установке для поиска УКР реакторных антинейтрино на ядрах.**

Экспериментальные данные



Рис.1. Детектор на основе NaI(Tl), $\varnothing 9\text{см} \times 9\text{см}$

Точки, в которых проводились измерения по 1800с в помещении 3А-121/1 →

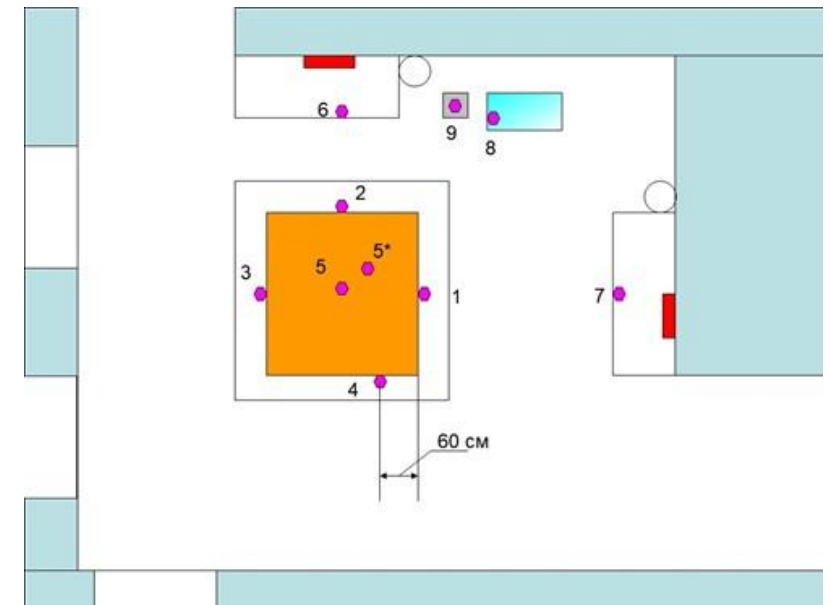
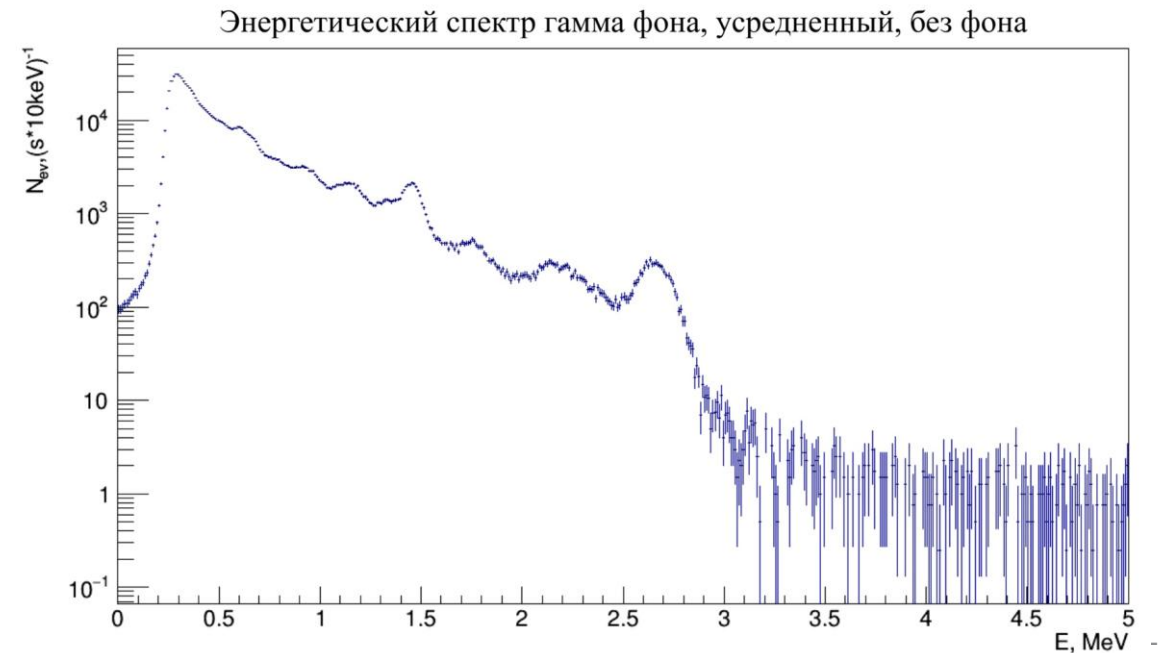


Рис.2. Схема помещения 3А-121/1

Рис.3. Энергетический спектр фоновых условий в помещении за вычетом собственного фона детектора, усредненный по всем дням и точкам измерений



Модель в Geant4 для генерации данных

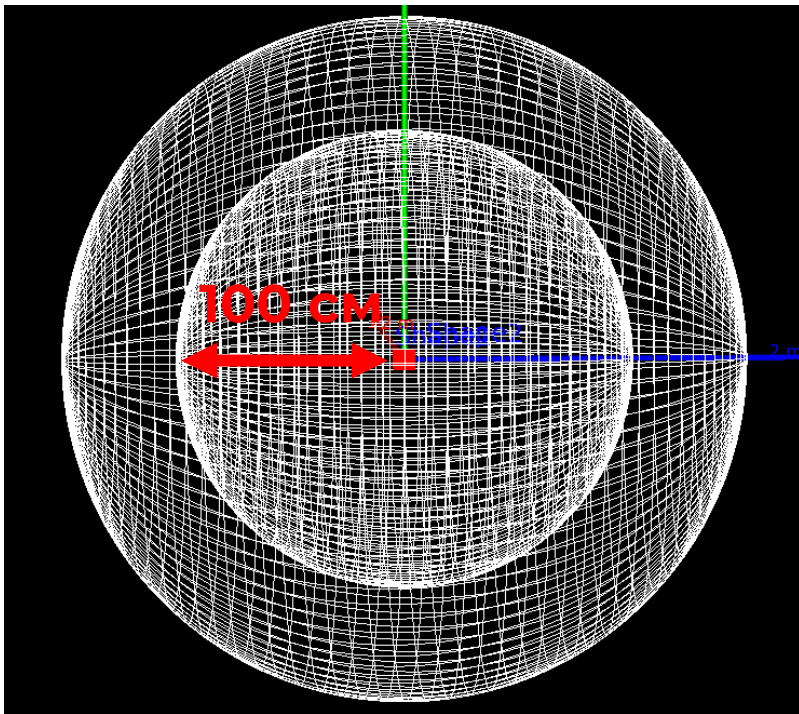


Рис.4. Геометрия модели для генерации данных в Geant4

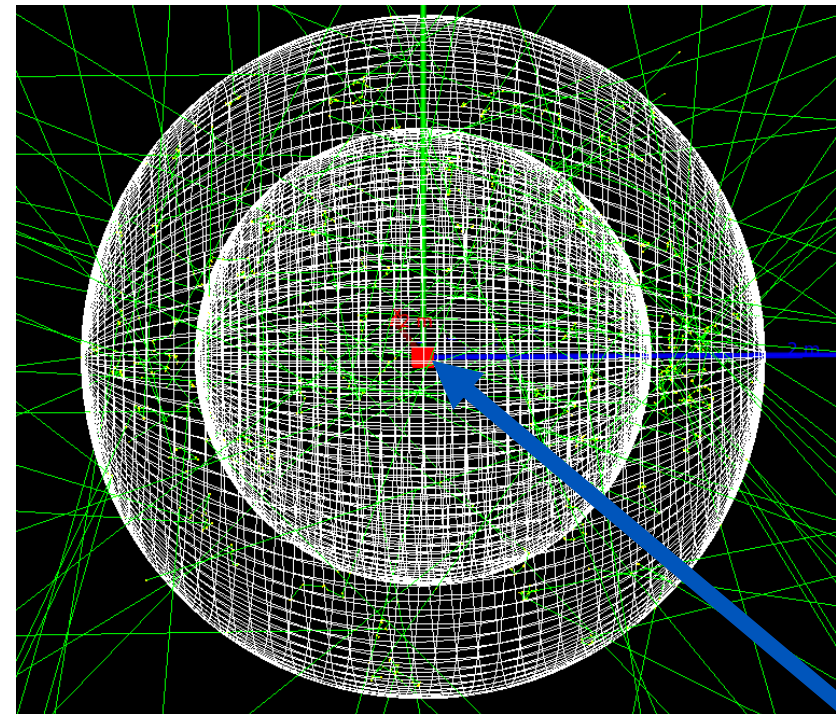


Рис.5. Пример изотропного «розыгрыша» 100 событий в бетонной сфере

Для 5 выбранных изотопов (рядов), а именно Cs137, Co60, K40, U238, Th232 были сгенерированы по 100 млн событий изотропно смоделированных в бетонной сфере толщиной 50 см.

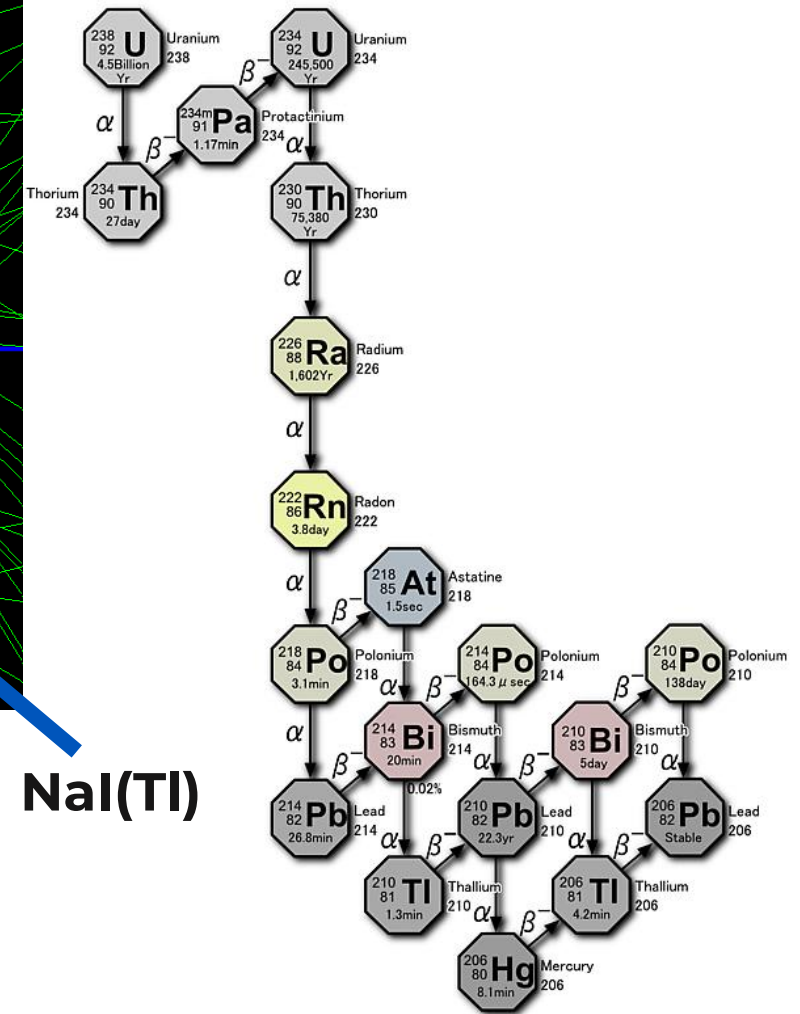


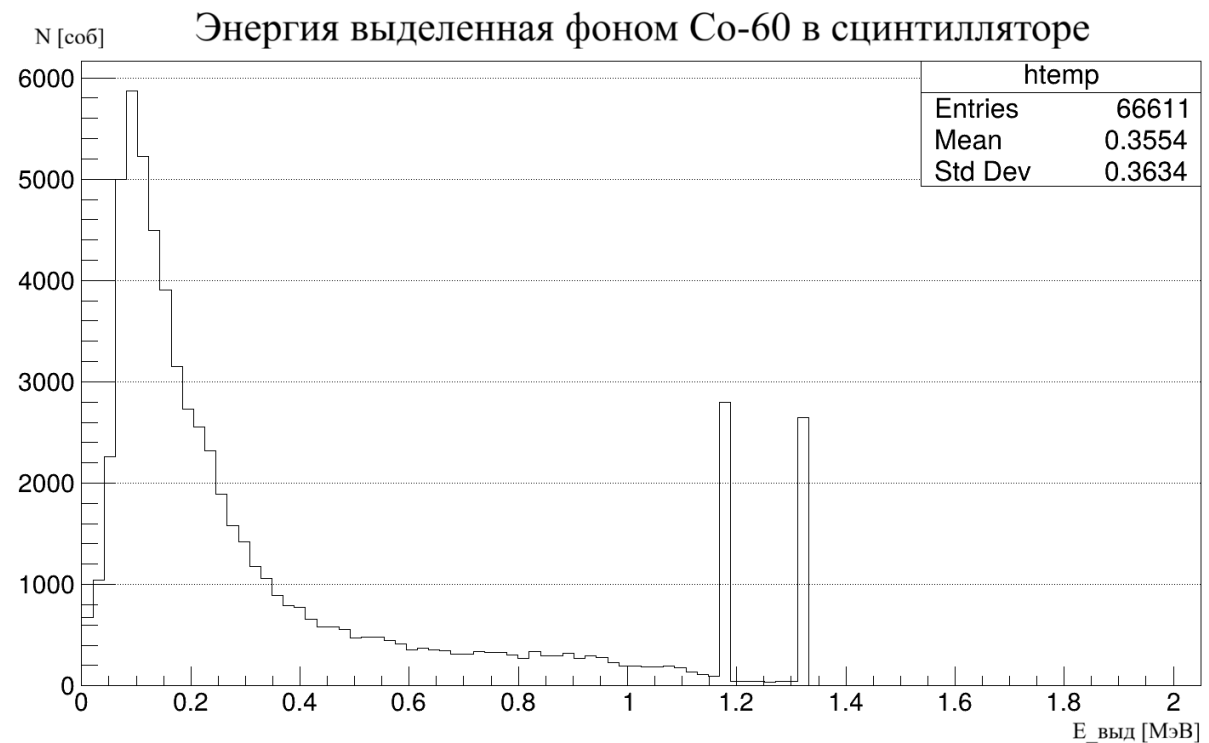
Рис.6. Радиоактивный ряд Урана-238

Пример сгенерированных данных



Рис.7. Энергетический спектр выделенной энергии в NaI(Tl) радиоактивным рядом U238

Рис.8. Энергетический спектр выделенной энергии в NaI(Tl) радиоактивным рядом Th232



Создание модели гамма-фона

Для решения задачи оптимизации были использованы алгоритм Simplex, ConjugateFR, Scan в составе программы root. Модель содержит 24 свободных параметра, из них

- 5 – коэффициенты масштабирования гистограмм отдельных изотопов (Cs, Co, K, U, Th)
- 15 – параметры энергетического разрешения (по 3 параметра на изотоп)

$$\sigma_k = \sqrt{a^2 + b^2 E_k + c^2 E_k^2}$$

Стандартное отклонение выделенной в сцинтилляторе энергии, где a, b, c – параметры, E_k – энергия события

- 4 – параметры функции отклика

$$E_{exp} = a + bE_{vis} + cE_{vis}^2 + dE_{vis}^3$$

Энергия события наблюдаемая на эксперименте, где a, b, c, d – параметры, E_{vis} – энергия события, с учетом энергетического разрешения

Согласие модели с экспериментальными данными

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_{\text{бин}}} \frac{(N_{\text{мод}}(i) - N_{\text{эксп}}(i))^2}{\sigma_{\text{мод}}^2(i) + \sigma_{\text{эксп}}^2(i)}$$

N_{мод} - число событий в бине для модели,

N_{эксп} - число событий в бине для эксперимента,

I - номер бина гистограммы(Энергия, МэВ) ,

σ_{мод} – стандартное отклонение числа смоделированных событий,

σ_{эксп} - стандартное отклонение числа смоделированных событий,

N_{бин} - число бинов в которых проверяется гипотеза (0,3 МэВ – 2,9 МэВ)

*Согласование модели с экспериментом в
разных диапазонах энергий*

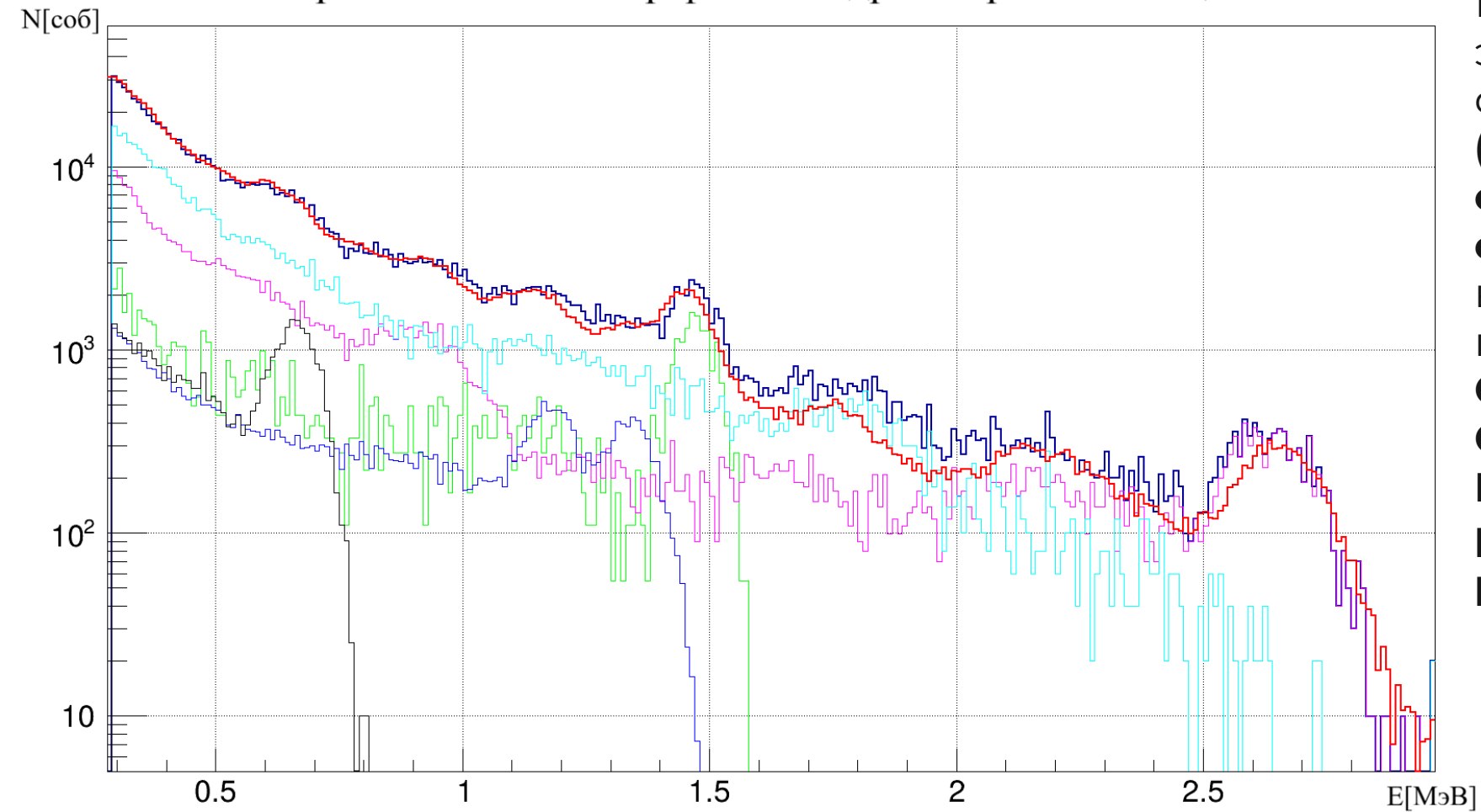
E = 0,3 – 1 МэВ: $\chi^2/\text{ndf} = 126.536 / 71 \approx 1,7$

E = 1 – 2 МэВ: $\chi^2/\text{ndf} = 236.696 / 101 \approx 2,3$

E = 2 – 2,9 МэВ: $\chi^2/\text{ndf} = 166.173 / 90 \approx 1,8$

Результаты

Энергетический спектр фона в подреакторном помещении



$$\text{Ch2} / \text{ndf} = 502.206 / 260 \approx 1,9$$

Рис.9. Дифференциальные энергетические спектры γ -фона **экспериментальный (красный)** и **смоделированный (тёмно синий)** с показанными вкладами отдельных изотопов, где:
Cs137 - черный,
Co60 - синий,
K40 -зеленый,
ряд **U238** - голубой,
ряд **Th232** – фиолетовый.

Заключение

- На основе экспериментальных данных измерений γ -фона NaI детектором в подреакторном помещении энергоблока №3 КАЭС и моделирования в Geant4 найдена модель гамма фона, наилучшим образом описывающая экспериментальные данные;
- Наилучше согласие модели с экспериментальными данными достигнуто в области энергии 0,3-2,9 МэВ при $\chi^2 / \text{ndf} = 502.206 / 260 \approx 1,9$;
- Также сделана оценка удельной активности каждого из изотопов в бетоне (табл.1).

ИЗОТОП	$A_{\text{мод}}, \text{ Бк/кг}$	$A_{\text{бет}}, \text{ Бк/кг}$
^{137}Cs	$10,80 \pm 0,02$	<1
^{60}Co	$4,88 \pm 0,02$	-
^{40}K	$105,09 \pm 0,02$	354,4
^{238}U	$43,69 \pm 0,02$	24,5
^{232}Th	$22,21 \pm 0,02$	37,3

Таблица 1. Удельные активности изотопов в бетоне подреакторного помещения. Сравнение с активностями обычного бетона



**Спасибо за
внимание!**

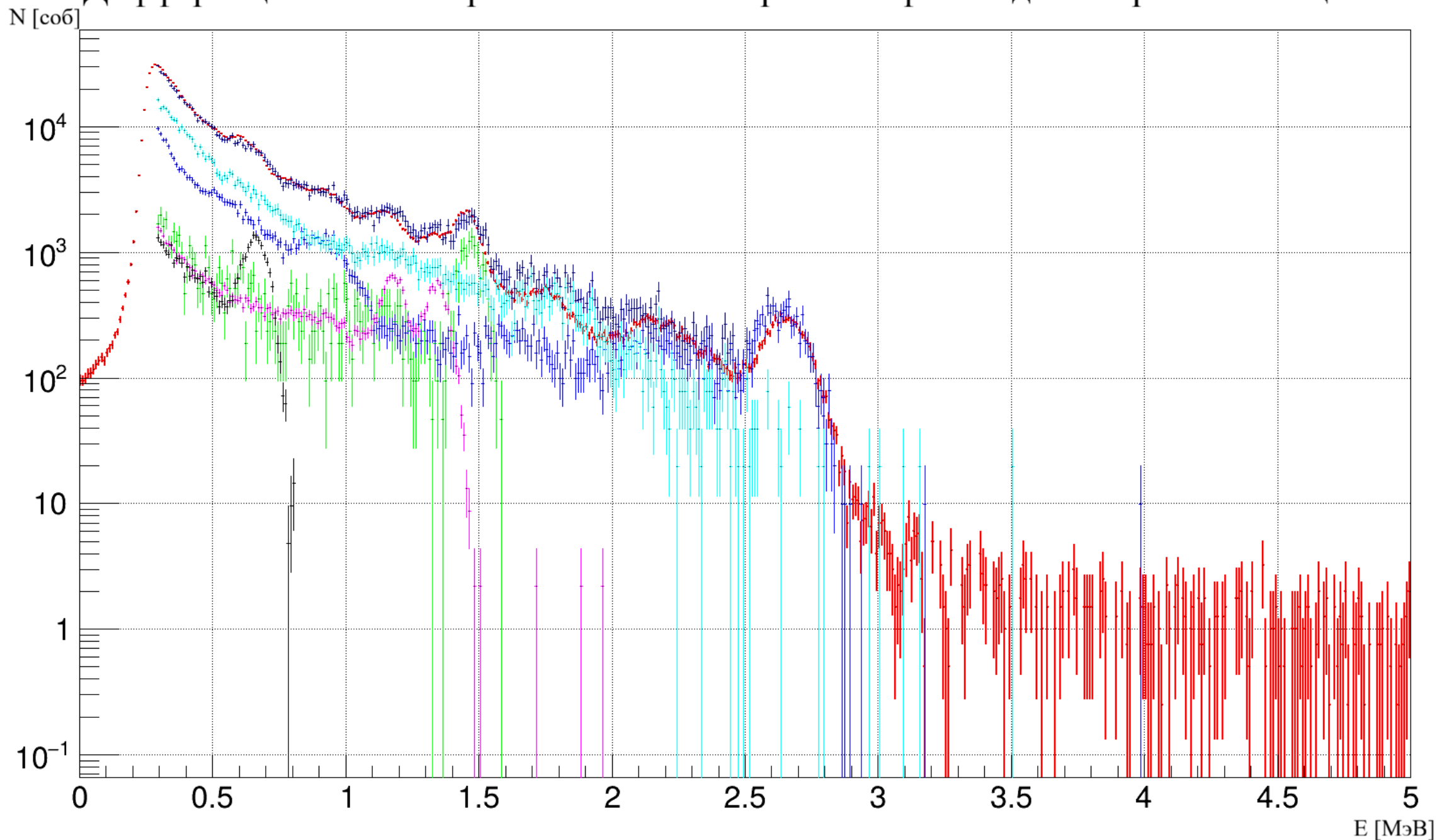


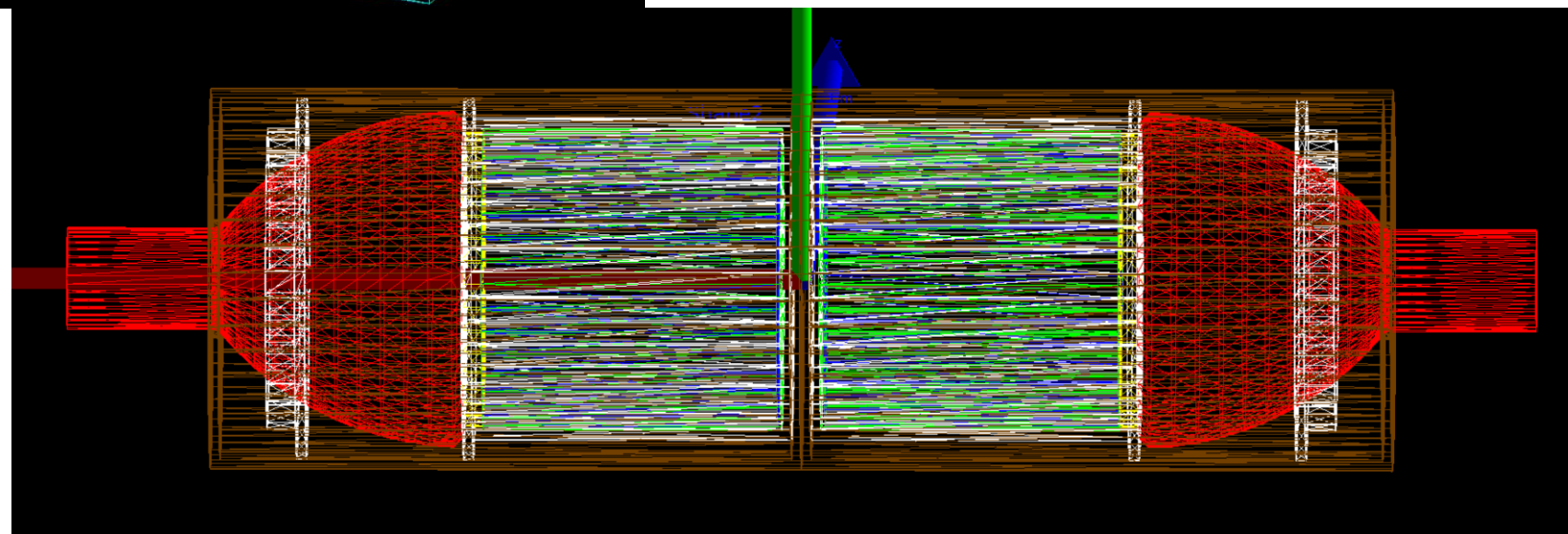
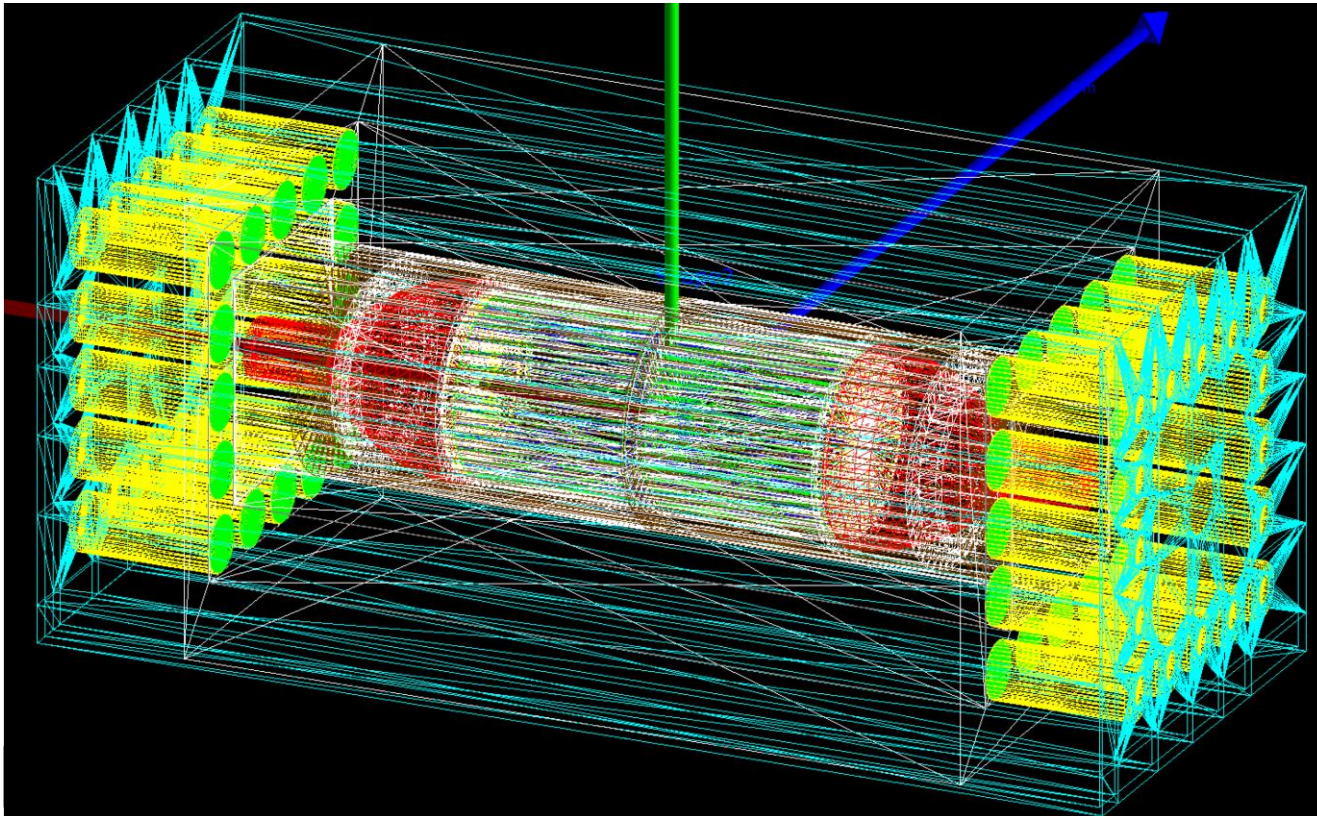
Параметр	a^2 , МэВ ²	b^2 , МэВ	c^2 , 1
σ_{Cs}	1.59041×10^{-3}	5.08107×10^{-7}	1.34047×10^{-4}
σ_{Co}	1.9478×10^{-3}	7.9825×10^{-5}	1.82038×10^{-4}
σ_K	1.48333×10^{-3}	2.30582×10^{-6}	1.01396×10^{-4}
σ_U	8.94184×10^{-3}	4.7249×10^{-3}	8.58505×10^{-6}
σ_{Th}	4.03218×10^{-3}	7.12412×10^{-4}	1.6427×10^{-4}

Параметр	a, МэВ	b, 1	c, МэВ ⁻¹	d, МэВ ⁻²
Отклик E	$-1.72052 \cdot 10^{-3}$	1.00794	$5.49497 \cdot 10^{-5}$	$2.56723 \cdot 10^{-4}$

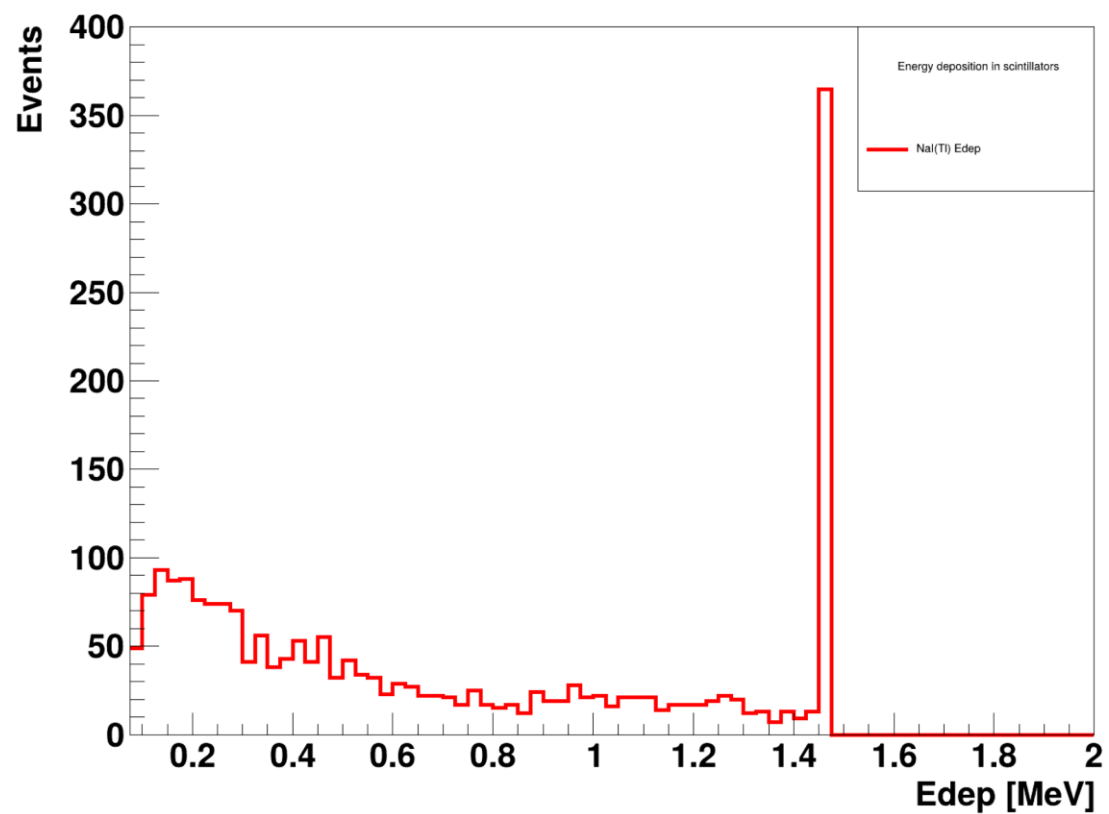
Параметр	Значение
M_{Cs}	$5.04 \pm 0, 01$
M_{Co}	$1.83 \pm 0, 01$
M_K	$55.06 \pm 0, 01$
M_U	$19.99 \pm 0, 01$
M_{Th}	$9.95 \pm 0, 01$

Дифференциальный энергетический спектр гамма-фона в детекторном помещении

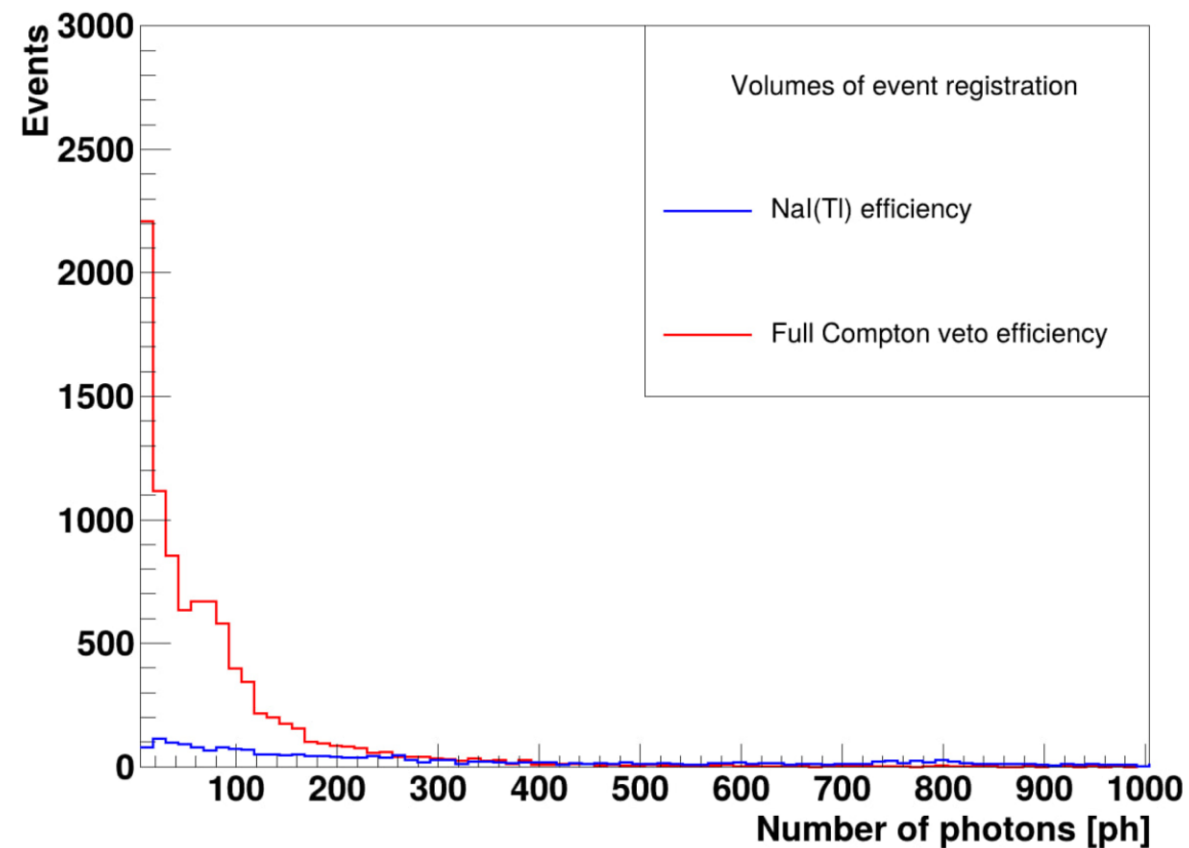


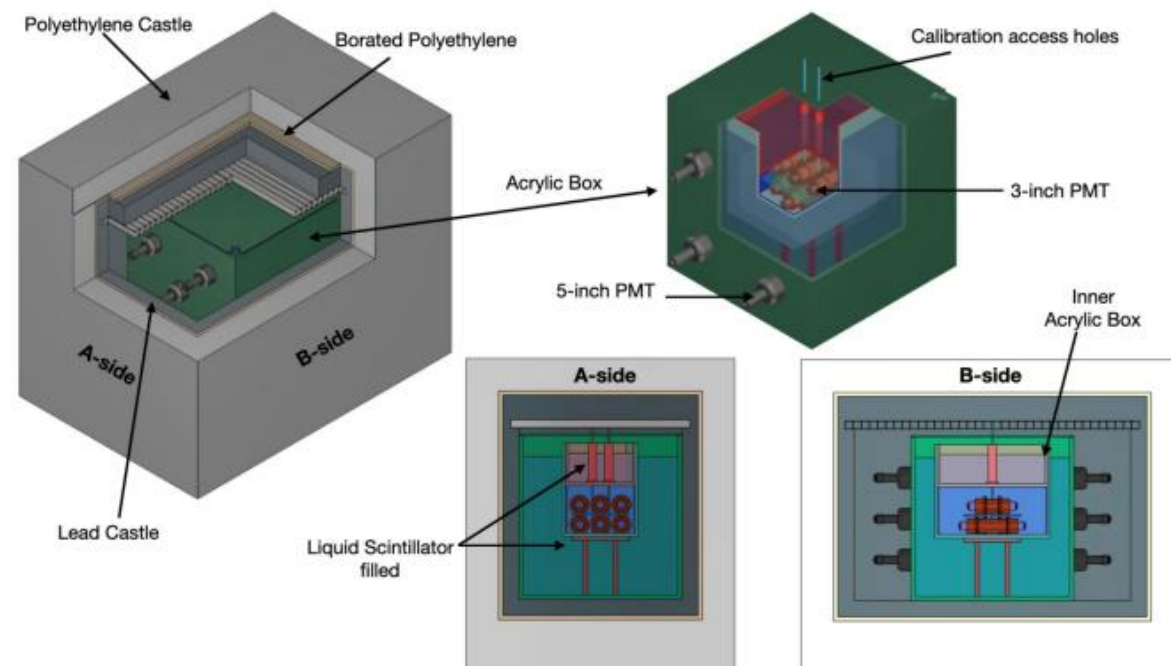
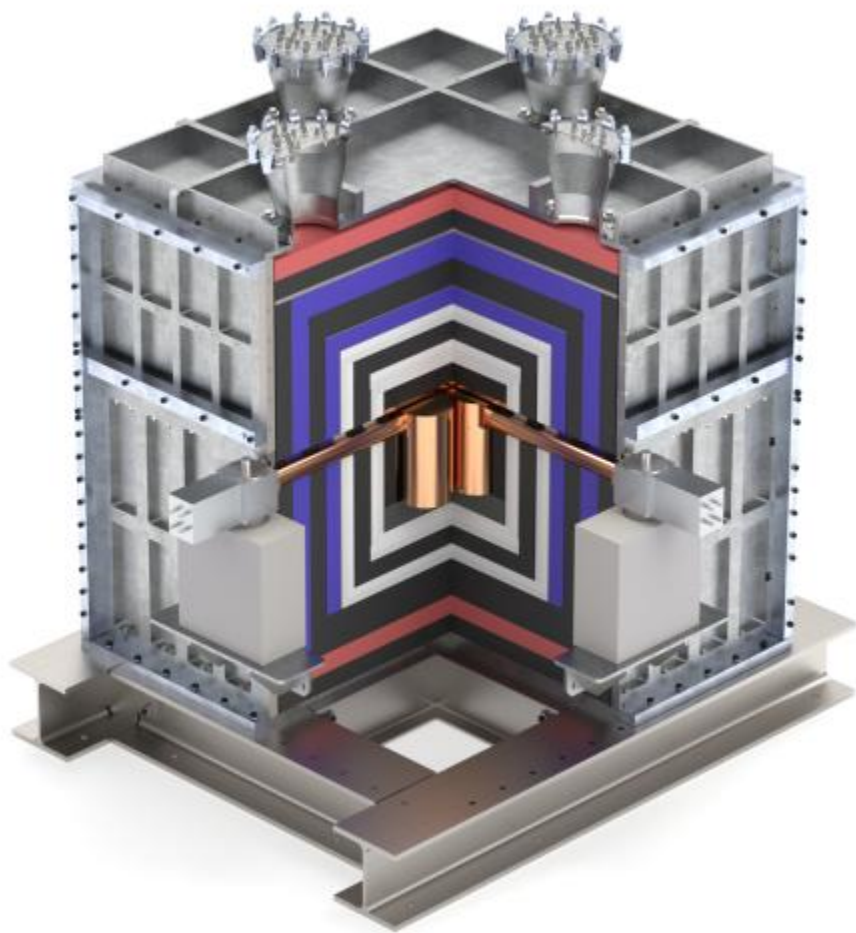


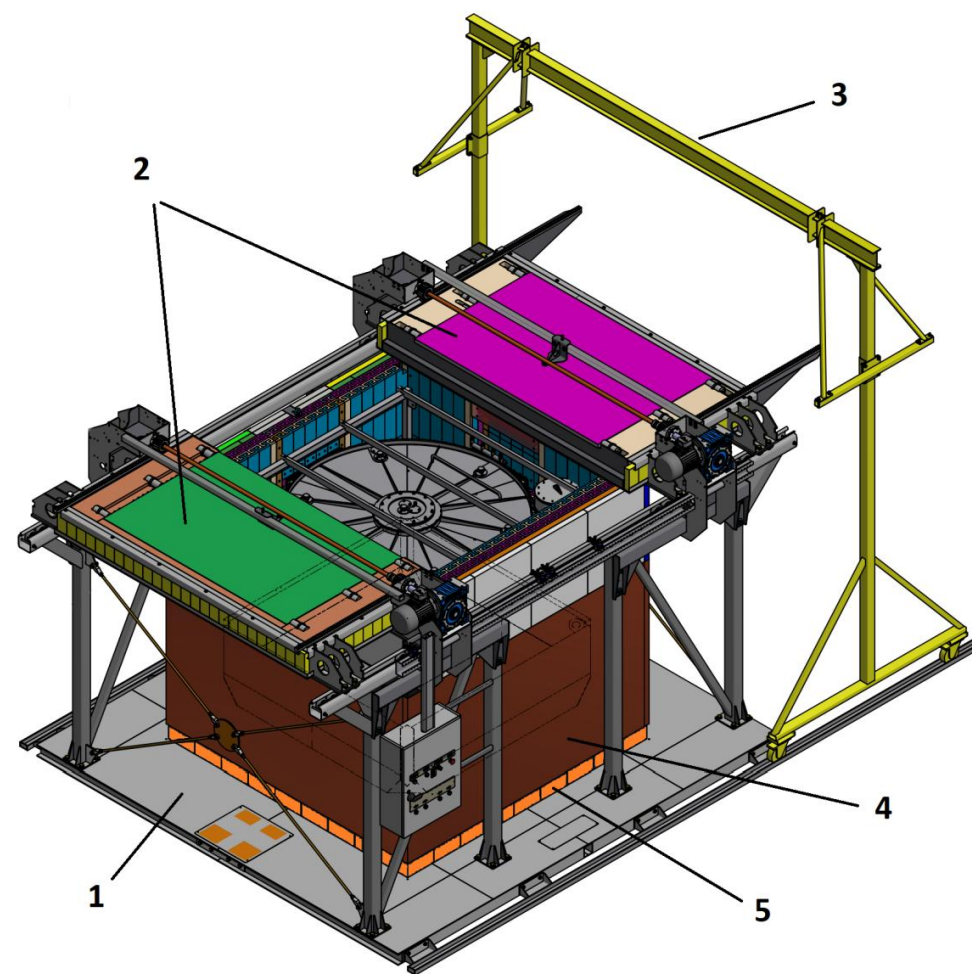
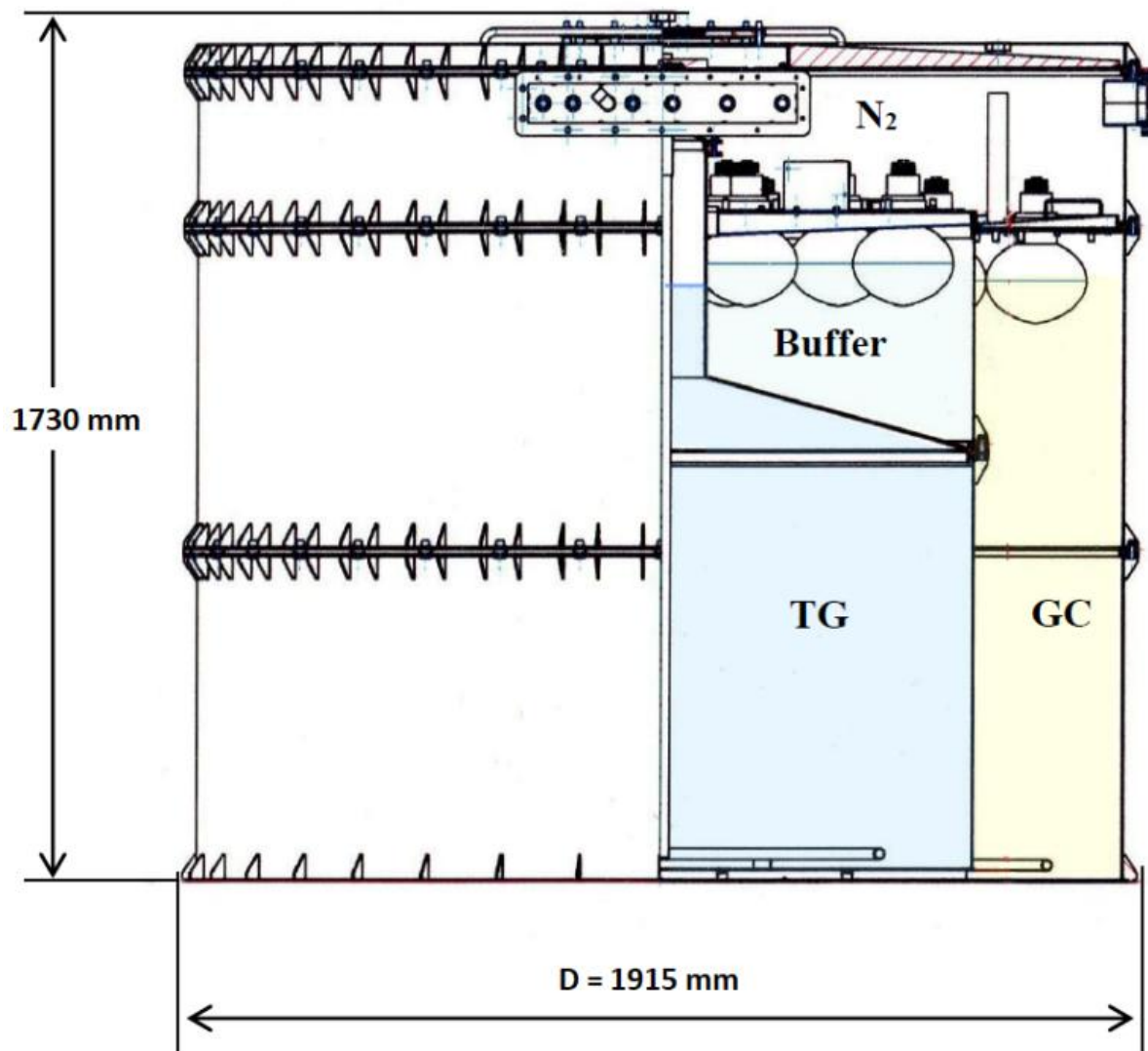
Edep in NaI(Tl)

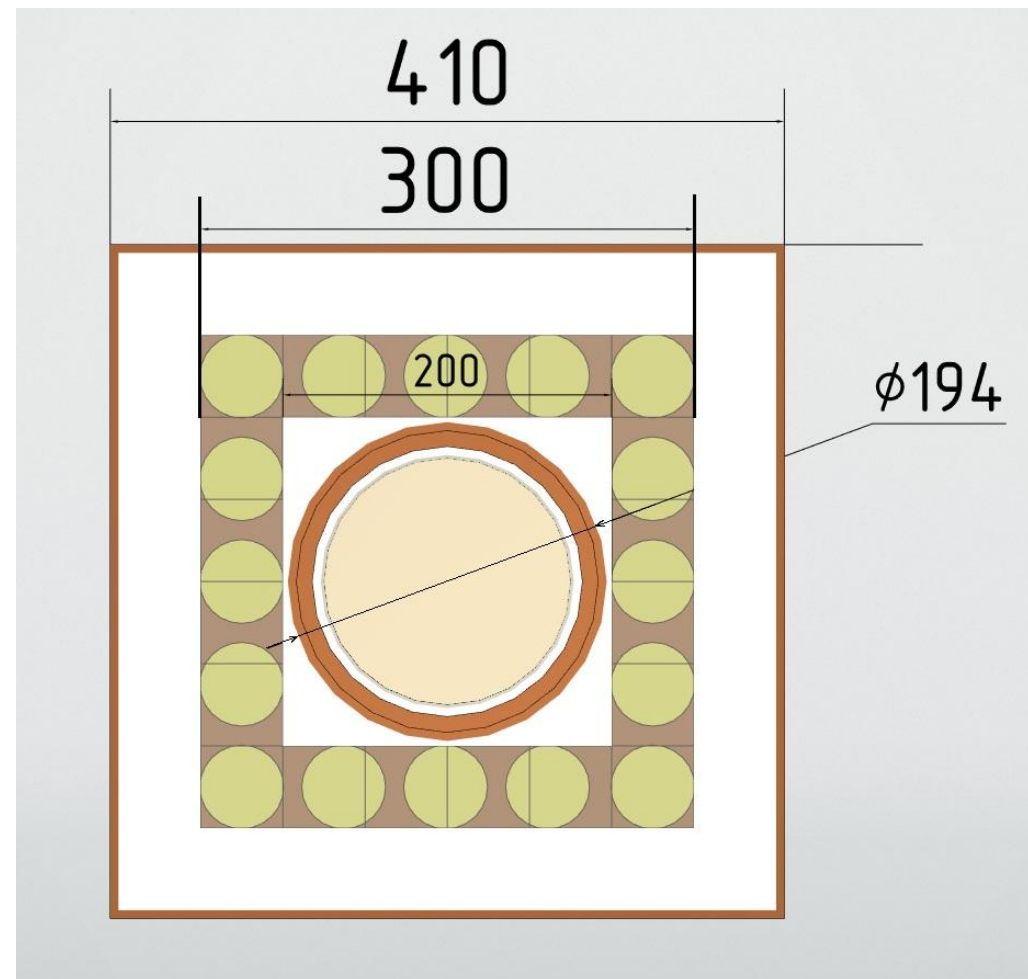
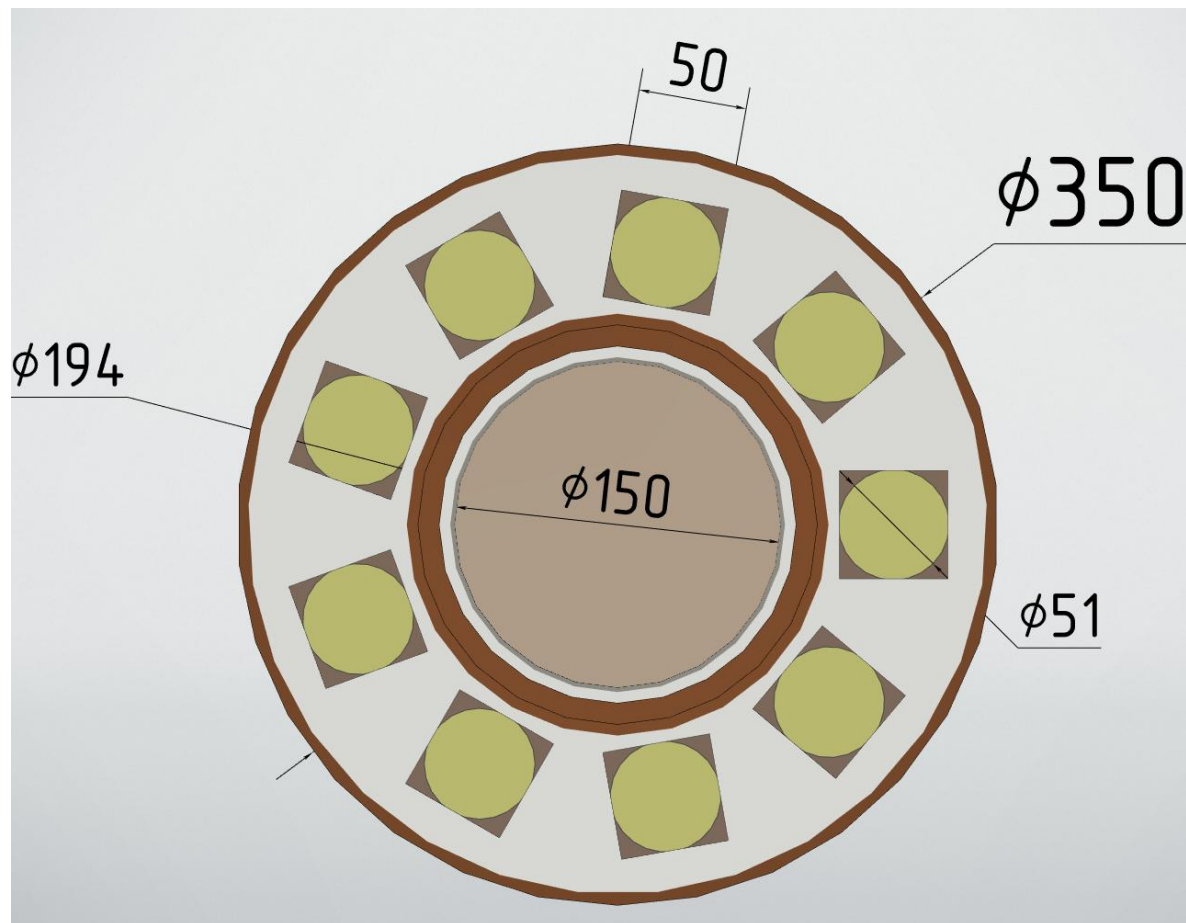


Photon Collection on PMT

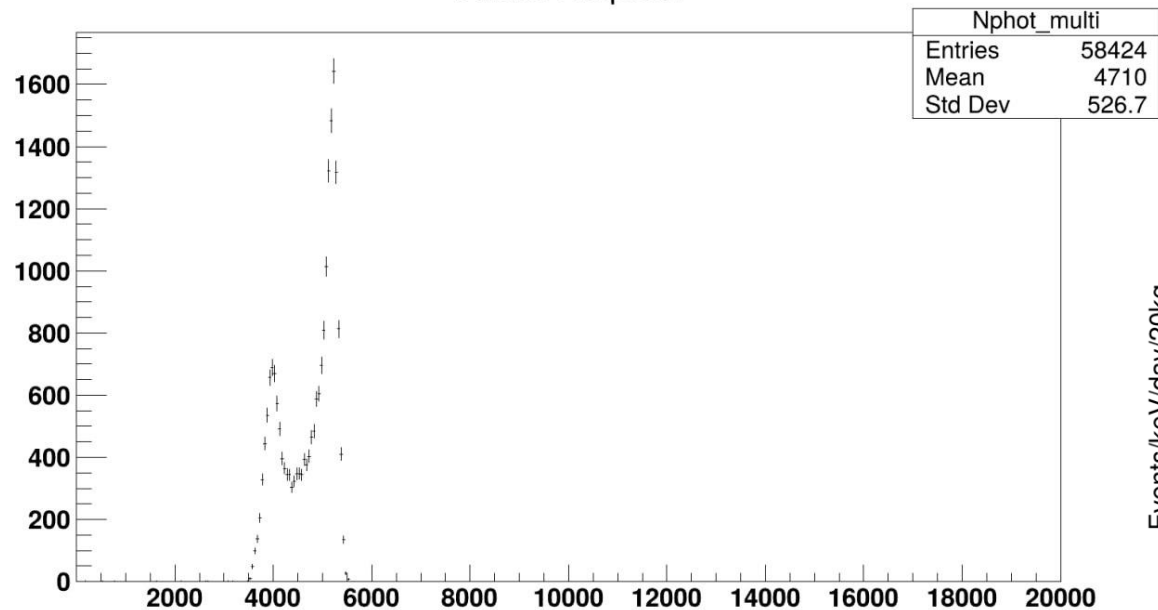




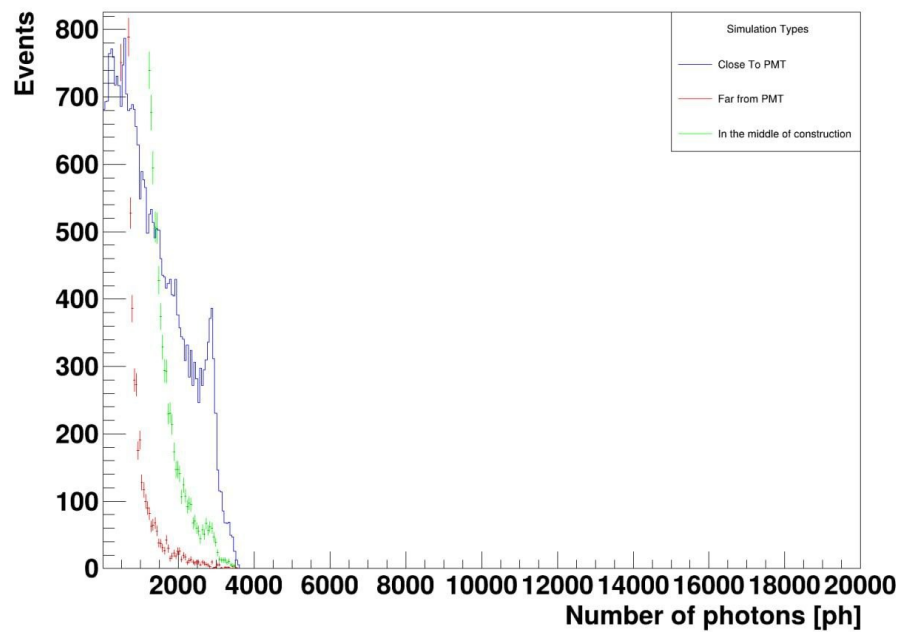




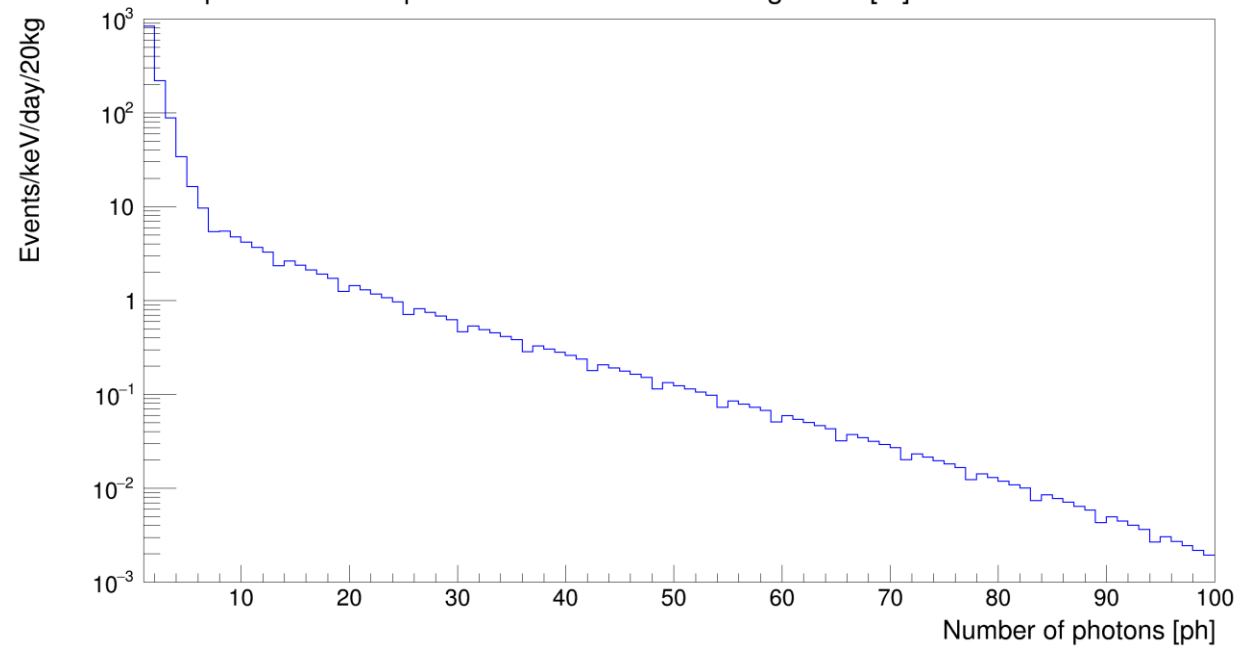
Photon deposit



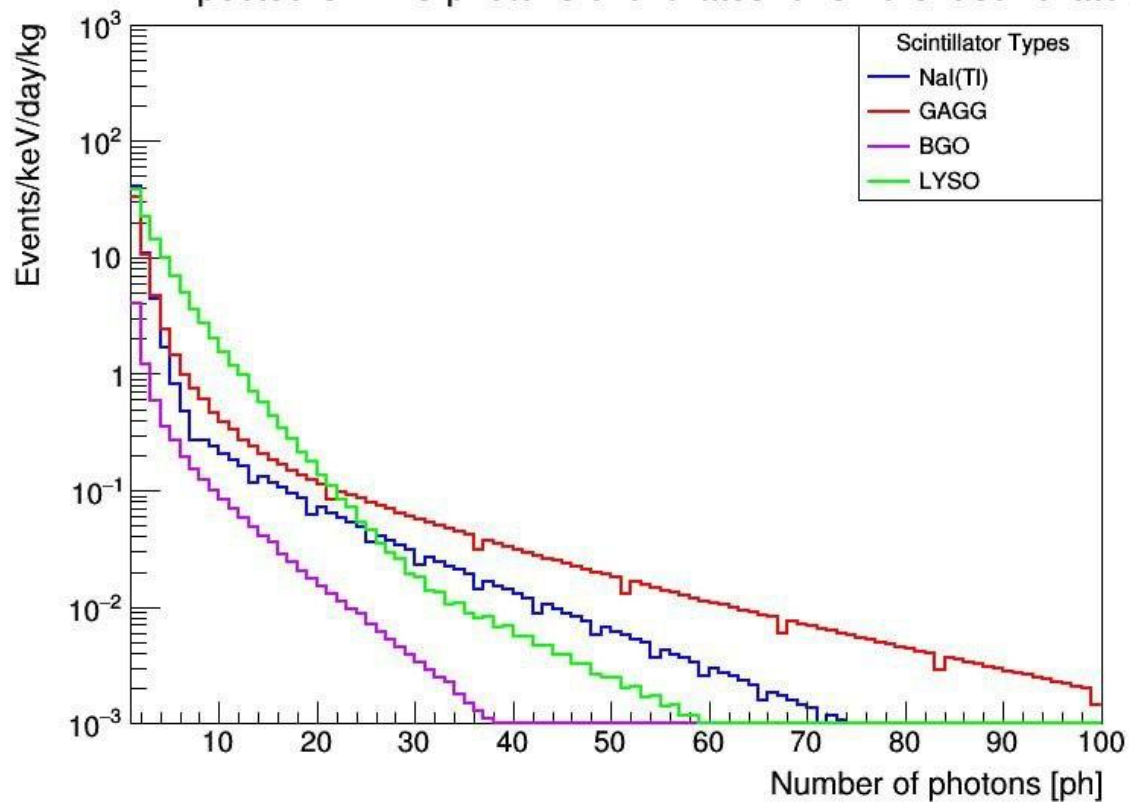
Photon deposit



Expected CEvNS photons event rates for 20kg of NaI(Tl)



Expected CEvNS photons event rates for different scintillators



Expected CEvNS integral rates for different scintillators

