

Лукьяшин Антон Викторович от коллаборации РЭД

# Экспозиция детектора РЭД-100 на Калининской АЭС

Научная сессия секции ядерной физики отделения ОФН РАН 2024

ОИЯИ Дубна 2024

# Содержание

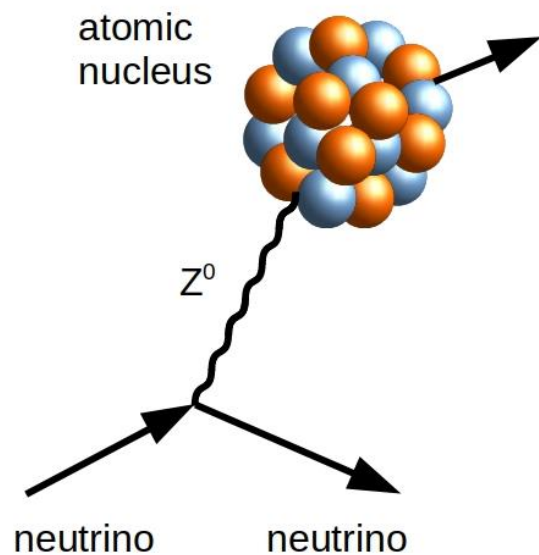
1. Упругое когерентное рассеяние нейтрино на атомном ядре
2. Внутреннее устройство детектора РЭД-100
3. Принцип работы детектора и отбор событий
4. Расположение детектора РЭД-100 на Калининской АЭС
5. Детектор в сборке с пассивной защитой
6. Экспозиция детектора РЭД-100 на КАЭС
7. Накопление и анализ данных
8. Предварительные результаты

# Упругое когерентное рассеяние нейтрино

- Упругое Когерентное Рассеяние Нейтрино на атомном ядре (УКРН)
- Coherent Elastic  $\nu$ -Nucleus Scattering (CEvNS, CENNS, CNS, CNNS,...)

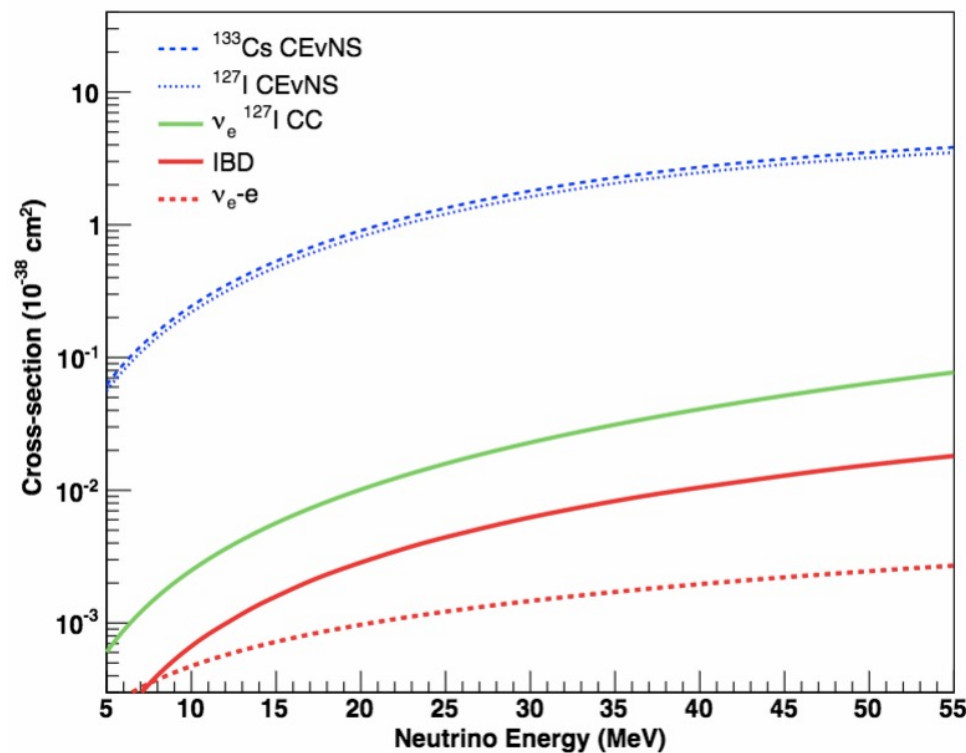
$$\frac{d\sigma}{dT}(E, T) \simeq \frac{G_F^2}{4\pi} M Q_W^2 F^2(q^2) \left[ 1 - \frac{MT}{2E^2} \right] \quad T_{max} = \frac{2E^2}{2E+M}$$

$$\sigma(E) \simeq \frac{G_F^2}{4\pi} Q_W^2 F^2(q^2) E^2$$



$$Rq \ll 1$$

$$E \lesssim 50 \text{ MeV}$$



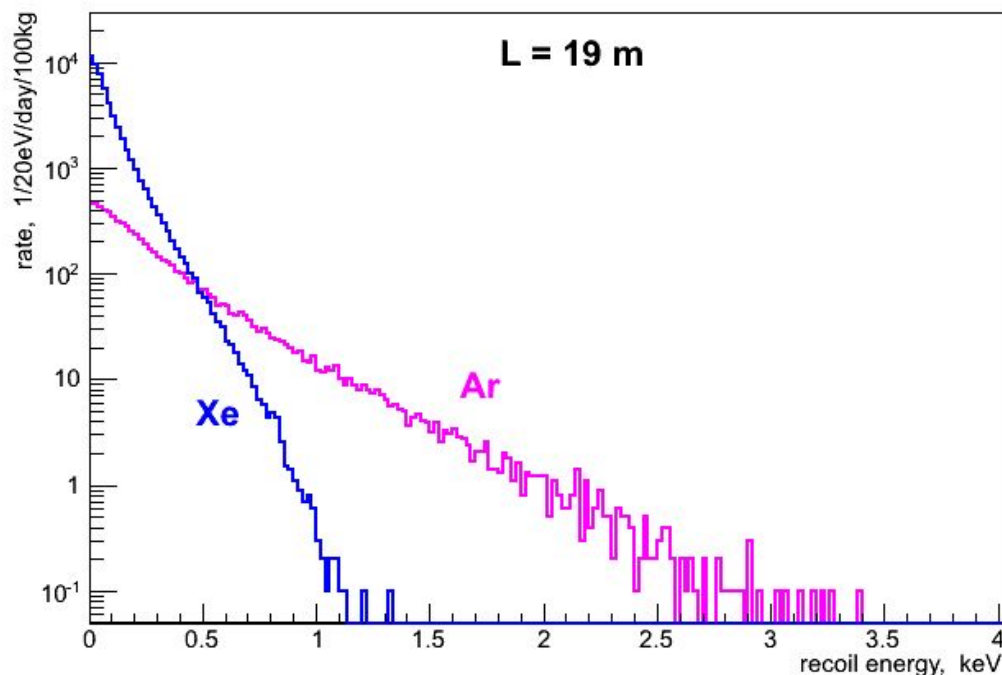
«Coherent Neutrino Nucleus Scattering as a Probe of the Weak Neutral Current» D.Z. Freedman, Phys. Rev. D 9 (1974) 1389.;

D.Z. Freedman «Coherent effects of a weak neutral current».

«Isotopic and chiral structure of neutral current», V.B. Kopeliovich and L.L. Frankfurt, JETP Lett. 19 (1974) 145

# Отклик от УКРН

- При когерентном рассеянии нейтрино на атомном ядре часть энергии передаётся ядру (оно приобретает импульс). Ядро отдачи может произвести отклик.
- Детектор по поиску УКРН для реакторных нейтрино должен быть чувствителен к энергиям ядер отдачи с энергией  $\leq 1$  кэВ.
- Детектор должен обеспечивать возможность регистрации очень слабых ионизационных сигналов в рабочей среде!

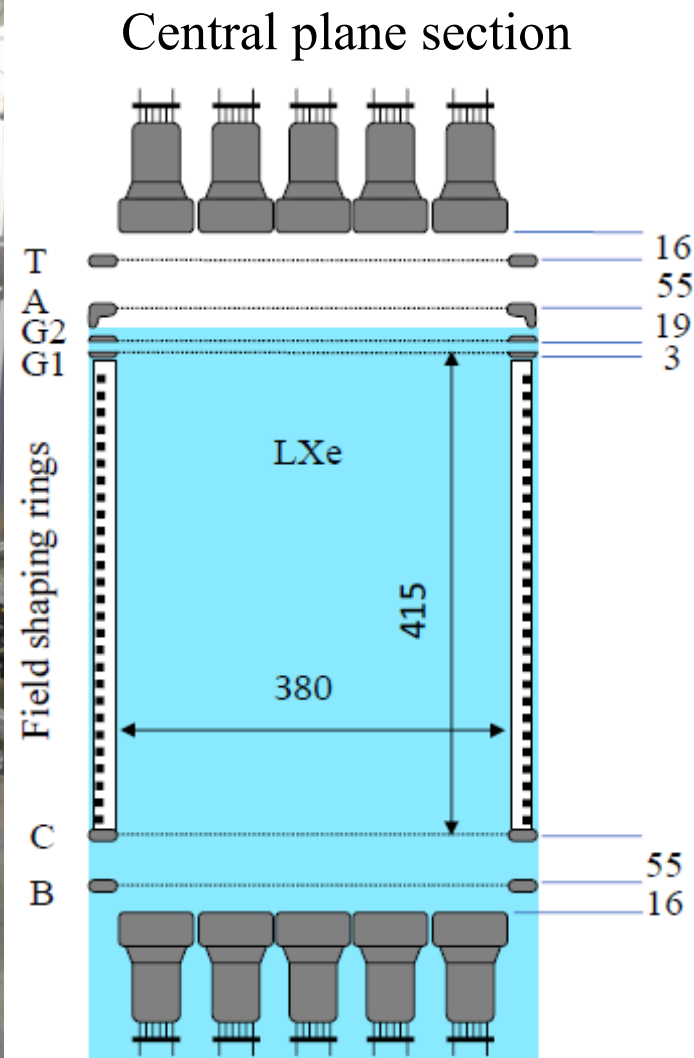
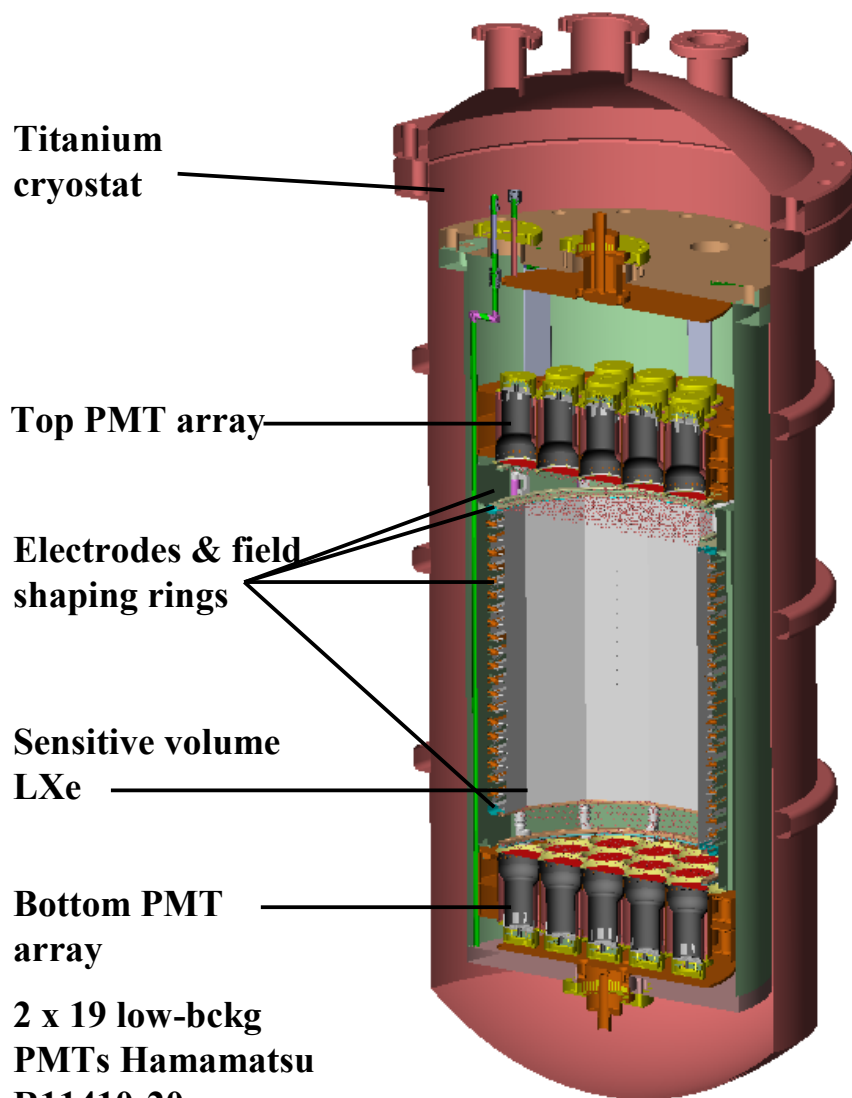


$E_\nu$ [MeV]	$^{132}\text{Xe}$ $T_{\text{max}}$ [keV]	$^{40}\text{Ar}$ $T_{\text{max}}$ [keV]
2	0.06	0.21
4	0.26	0.85
6	0.58	1.92
8	1.03	3.41
10	1.61	5.32
12	2.32	7.66
14	3.16	10.13
16	4.13	13.62

# Двухфазный эмиссионный детектор РЭД-100

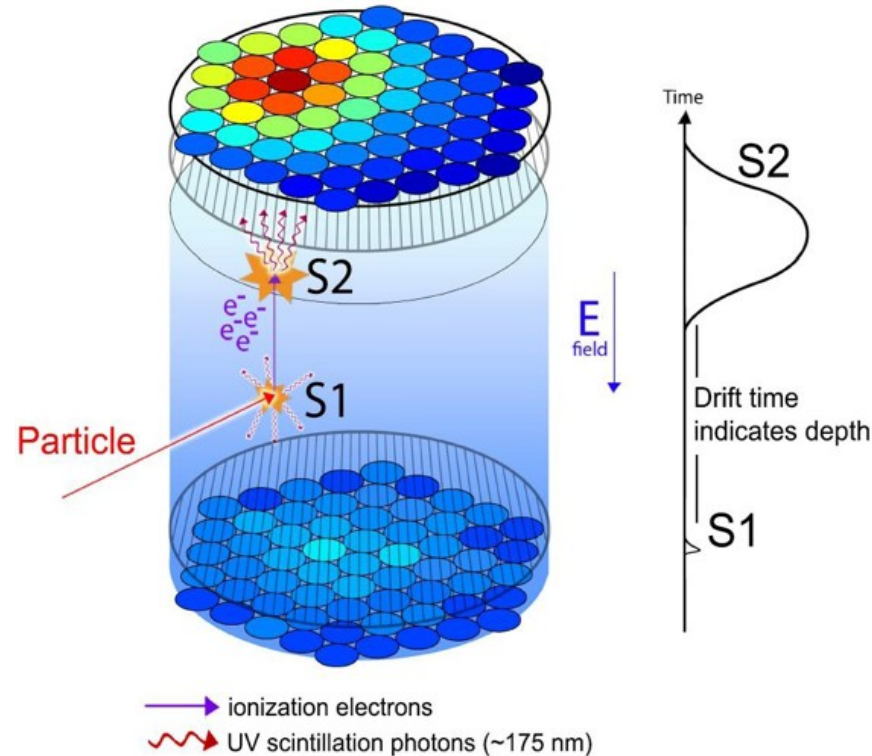
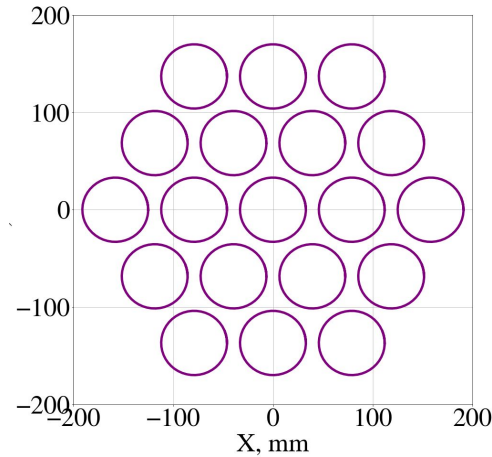
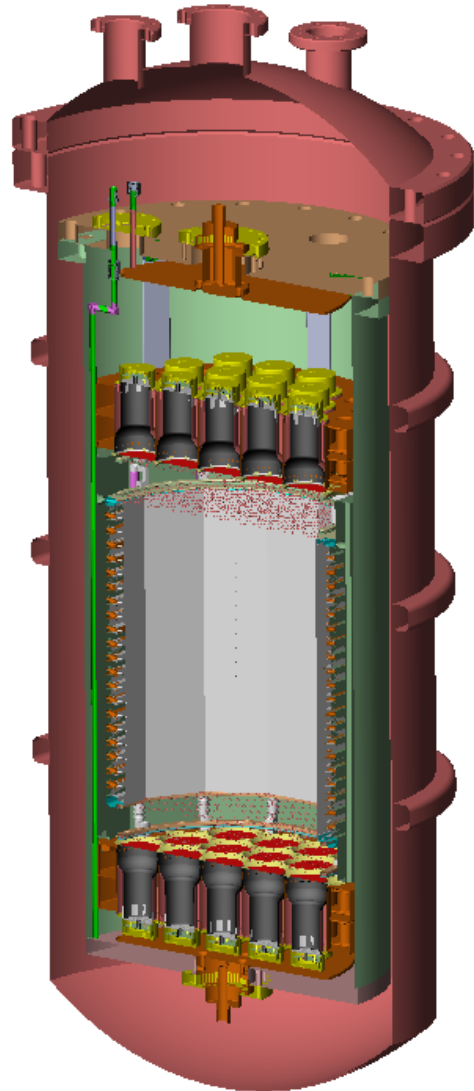
Российский Эмиссионный Детектор (РЭД); Russian Emission Detector (RED); [характерная масса жидкого ксенона внутри порядка одной сотни килограмм]

«First ground-level laboratory test of the two-phase xenon emission detector RED-100». Collaboration. RED-100 // *Akimov D. et al. JINST. V. 15 2020. P02020.*



All the pitches in [mm]

# Принцип работы детектора



Детектор обеспечивает возможность регистрации очень слабых ионизационных сигналов в массивной рабочей среде - вплоть до единичных электронов!!!  
Ожидаемый сигнал от УКРН событий содержит до ~10 электронов ионизации.

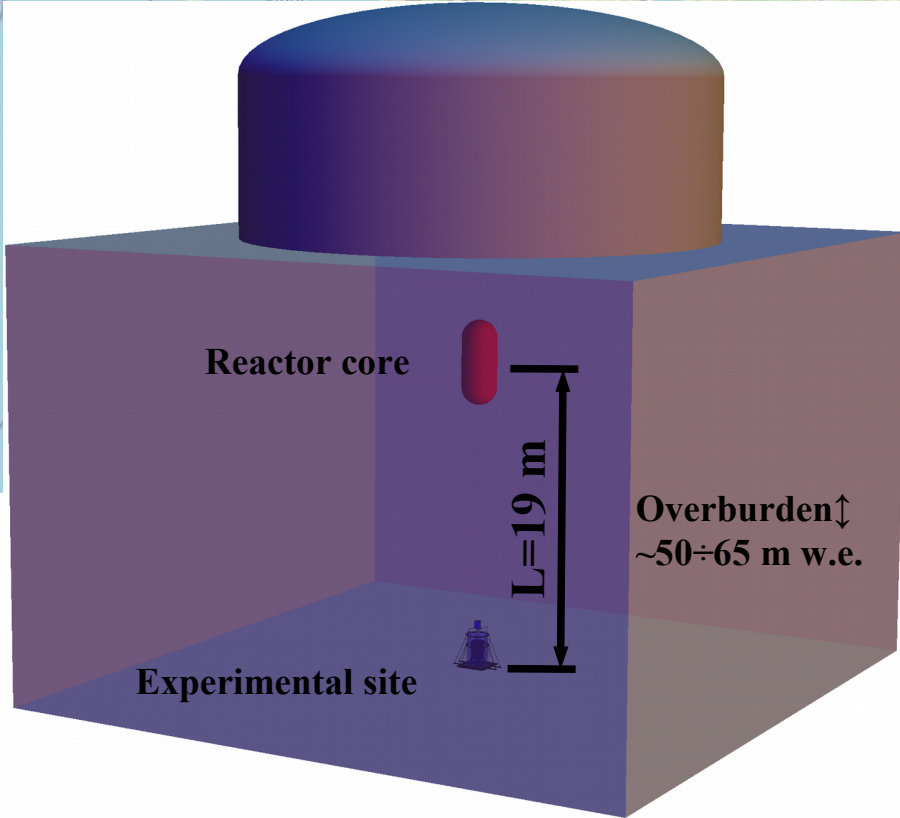
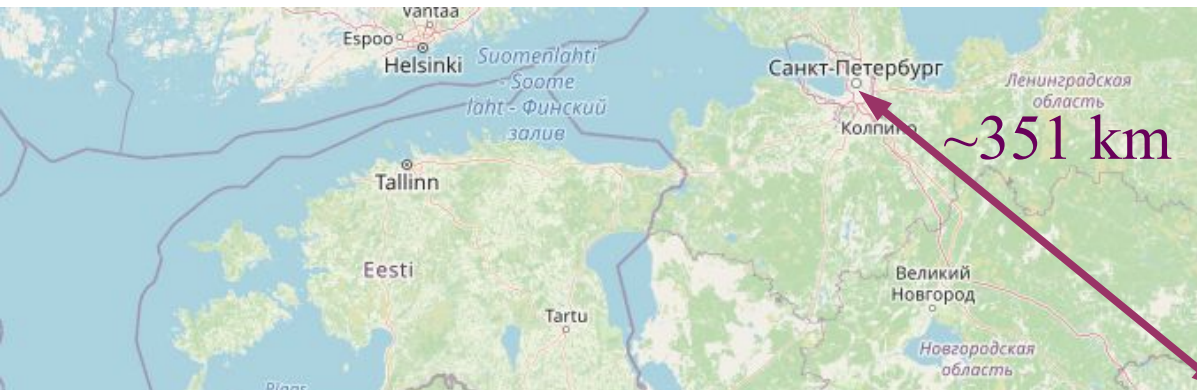
Характерный сигнал от ядер отдачи от УКРН: практически только S2, компактное точечное событие

- S1 — сцинтиляционный сигнал (в жидкой фазе)
- S2 — электролюминесцентный сигнал (в газообразной фазе)

Image by LUX collaboration

# Расположение детектора РЭД-100 на Калининской АЭС

Экспериментальный сеанс на КАЭС 2021-2022

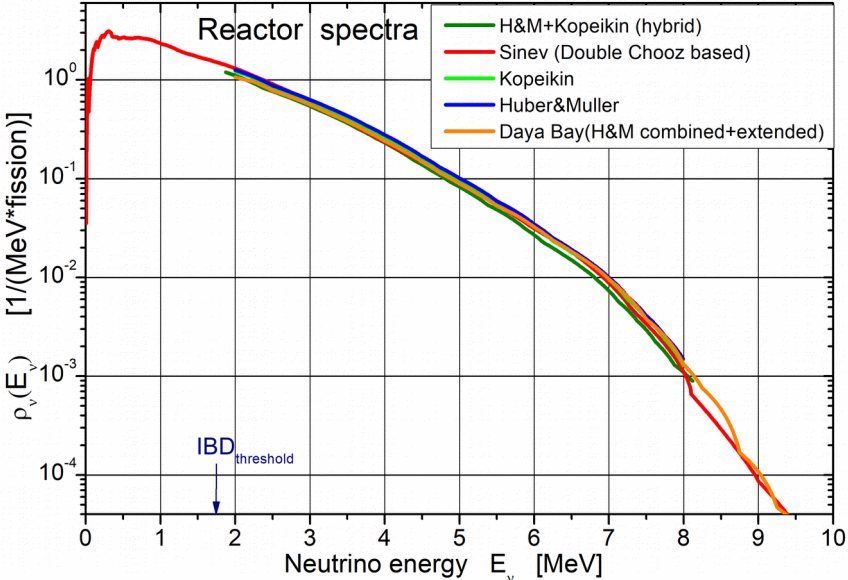


VVER-1000 (WWER-1000 ВВЭР-1000)

$P_e = 1000 \text{ MW}$     $P_{th} = 3000 \text{ MW}$

$L = 19 \text{ m}$     $\Phi_v \sim 1.35 \cdot 10^{13} \text{ v/cm}^2/\text{s}$

# Расположение детектора РЭД-100 на Калининской АЭС



GEMMA  $L \sim 13.9$  m

$\nu$ GeN; DANSS  $L \sim 10.9 \div 12.9$  m

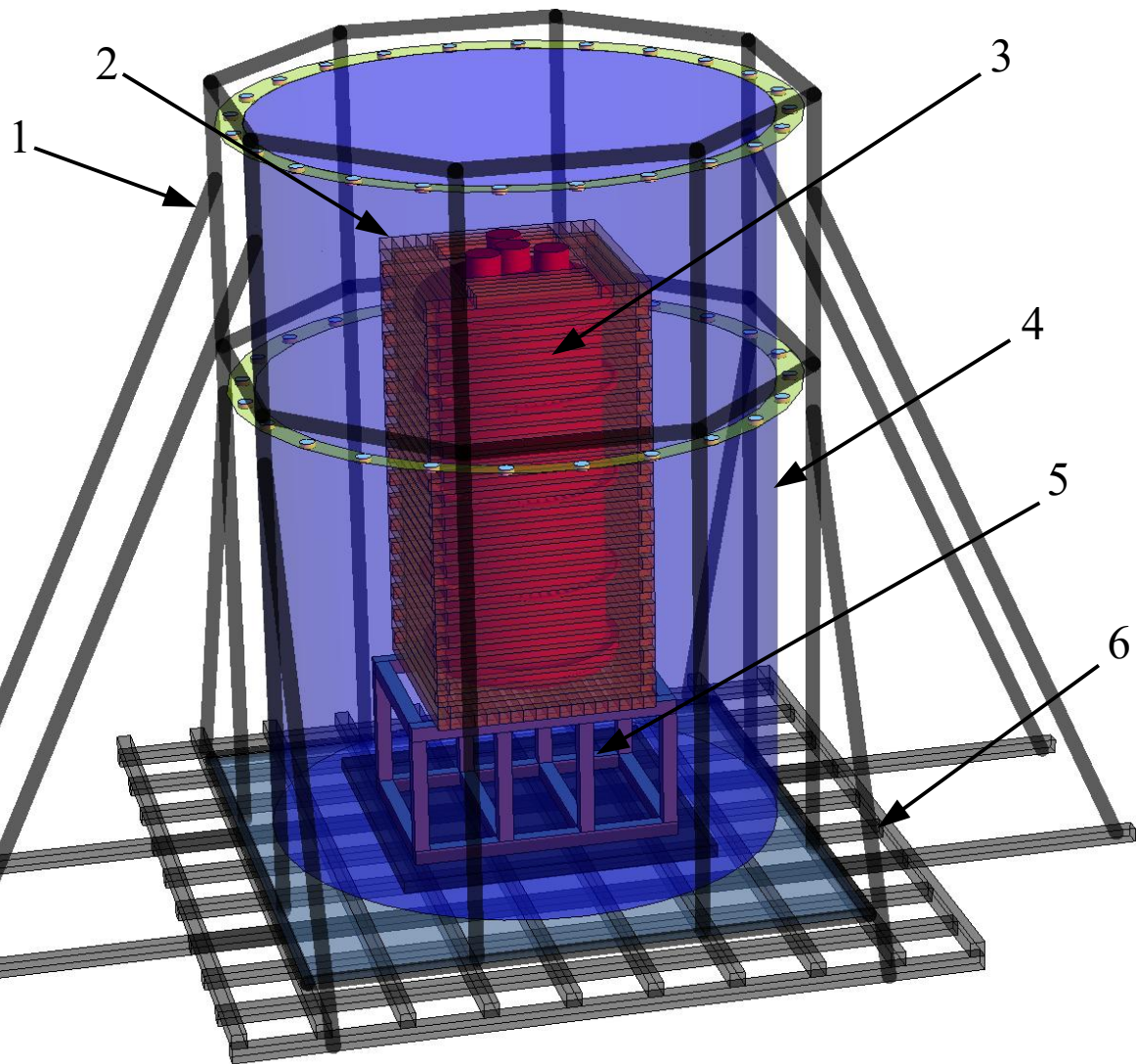
RED-100; iDream  $L \sim 19$  m

$\Phi \sim 9.14 \cdot 10^{19}$  fission/s

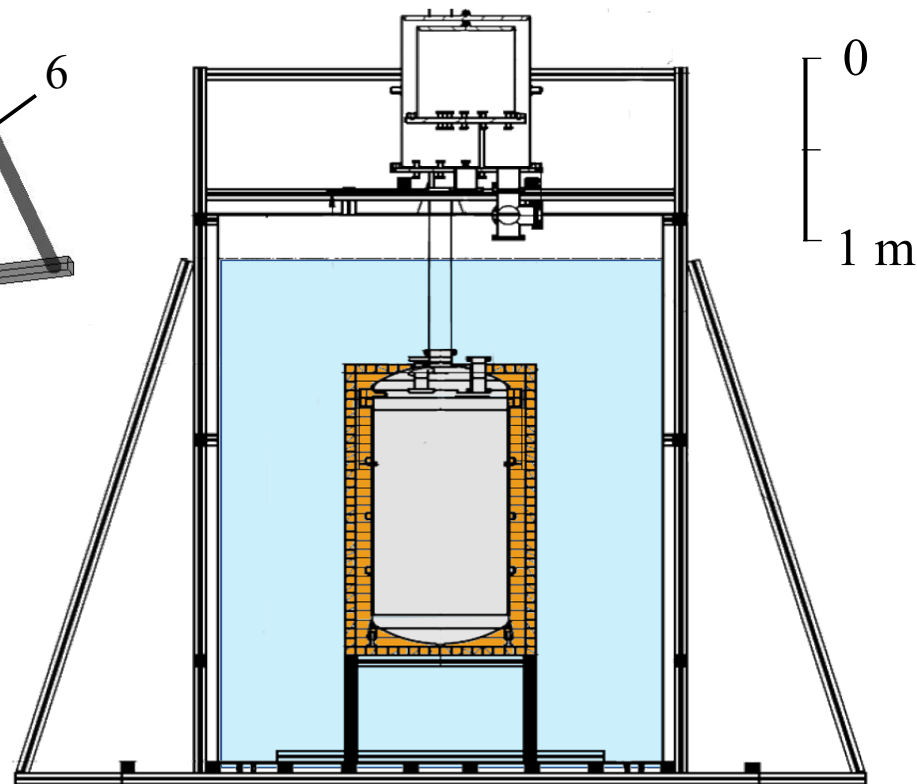




# Пассивная защита детектора РЭД-100



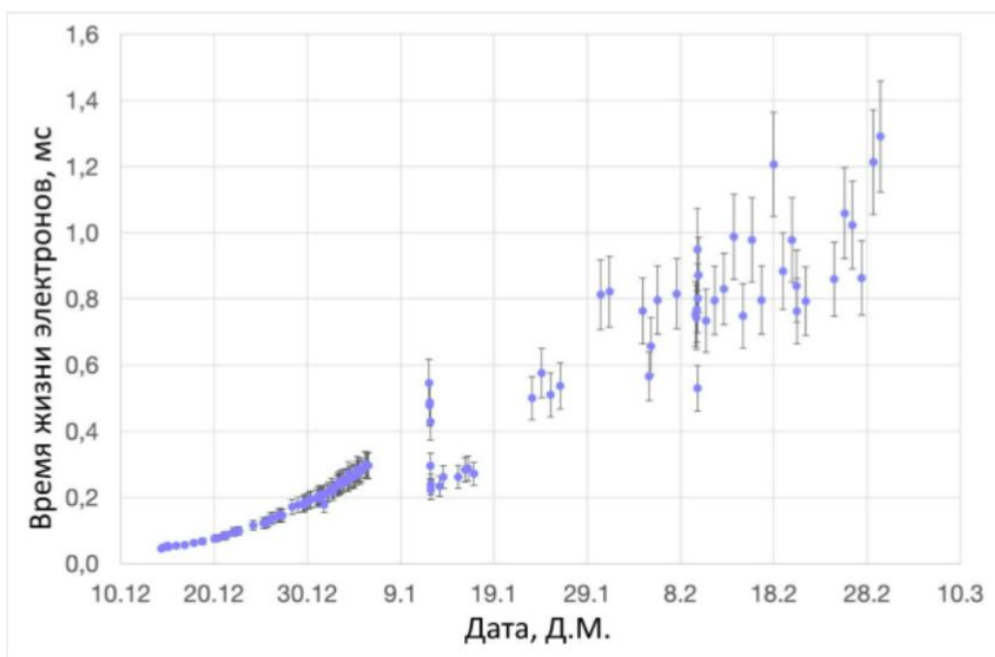
- 1 — поддерживающий каркас
- 2 — медная защита («колодец» из медных брусков: бруски 5x5x85 см)
- 3 — детектор РЭД-100
- 4 — водная защита (бак с водой: D~210 см; H~300см)
- 5 — пьедестал для детектора
- 6 — платформа



- «Passive shielding of the RED-100 detector in an experiment to study the CENNS process» Lukyashin A.V. @NPhE-2020
- «A Passive Shield for the RED-100 Neutrino Detector» Instrum Exp Tech 64, 202–208 (2021).

# РЭД-100 на экспериментальной площадке

Во время сеанса постоянно производилась очистка ксенона от электроотрицательных примесей путём пропускания его через промышленные геттеры SAES на основе сплавов активных металлов.

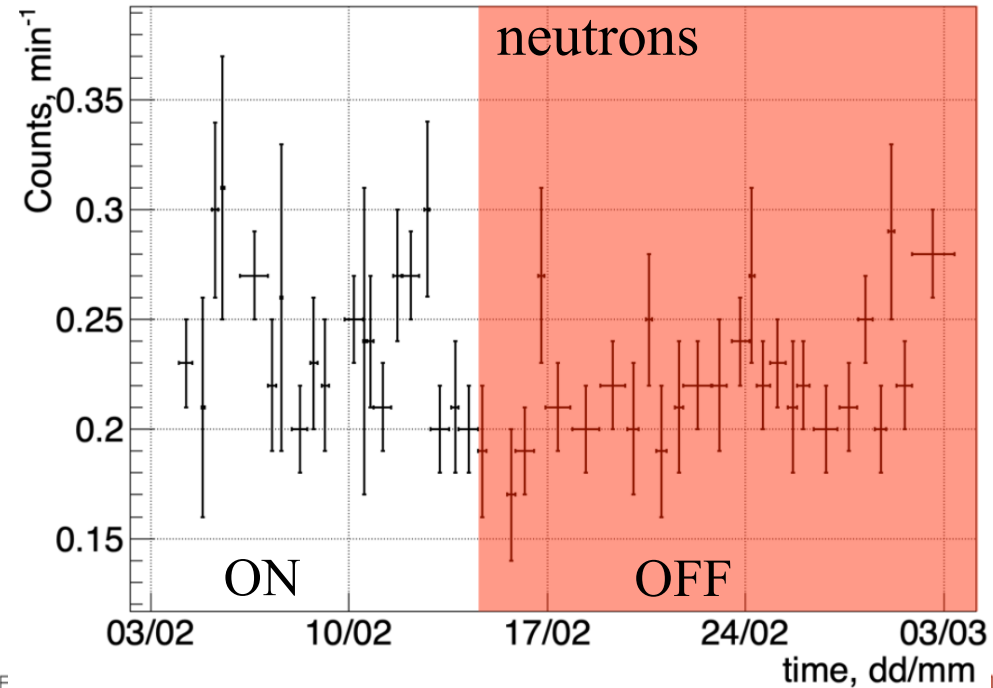
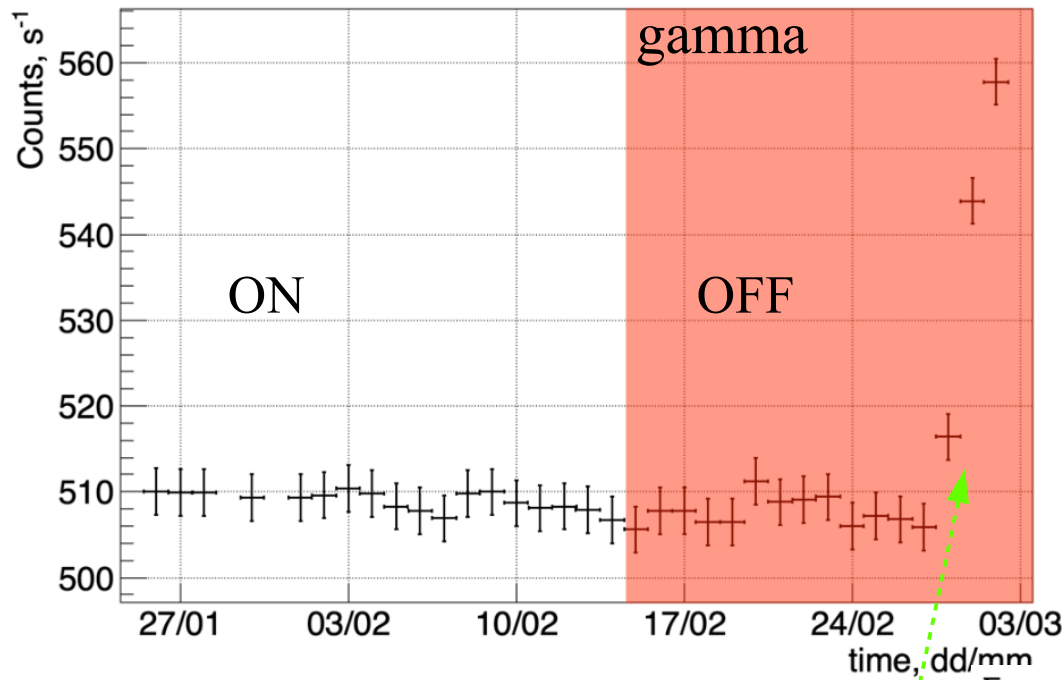


D.Yu. Akimov et al 2022 JINST 17 T11011

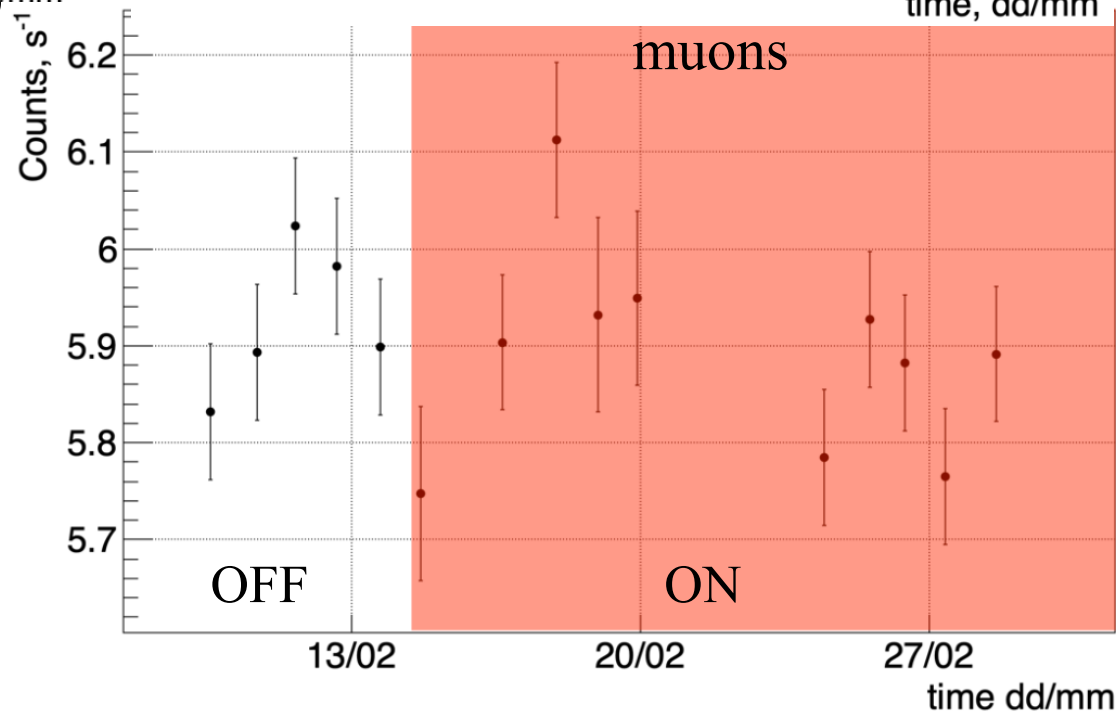


Измерение внешнего фона на площадке:  
NaI[Tl] (гамма-кванты)  
Bicron (BC501A) (нейтроны)  
RED-100 (мюоны)  
"Radex" (радон)

# Оценка фоновых условий



Опустошение водного резервуара

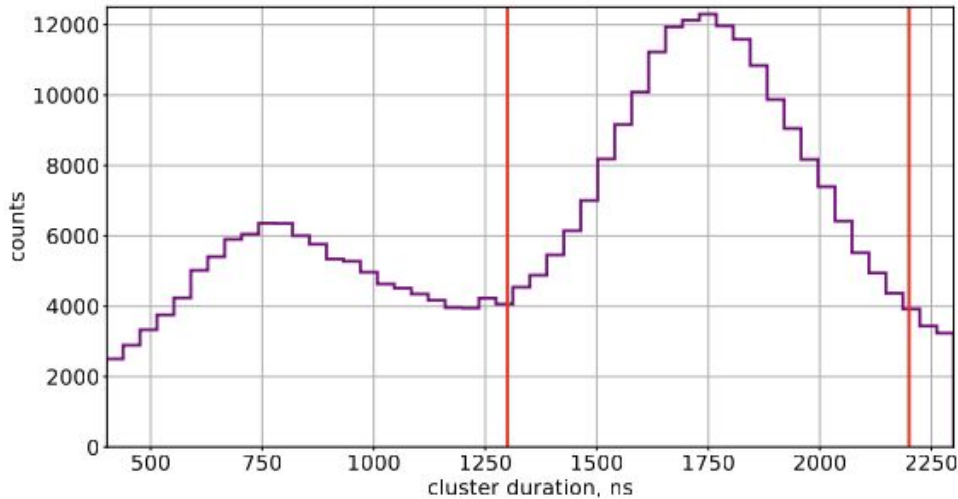


Нет изменений в фоне, который мог бы быть скоррелирован с состоянием ON/OFF реактора.

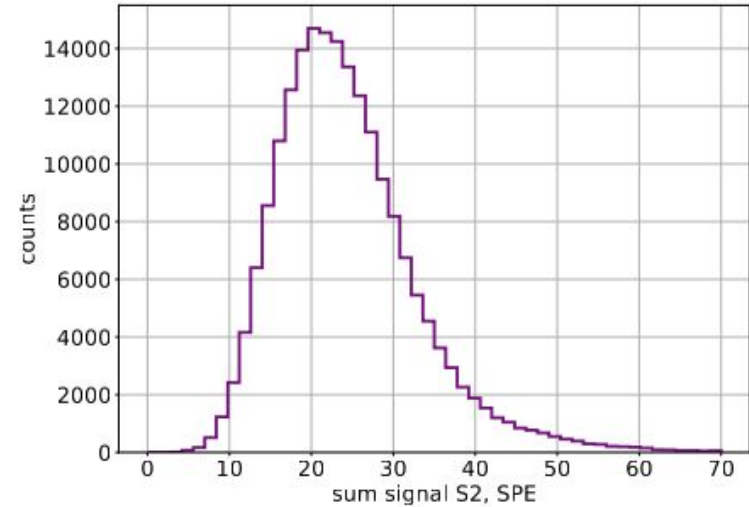
Akimov D.Yu. et.al. JINST 18 (2023) 12, P12002

# Сигналы от одиночных электронов

Распределение SE событий по длительности

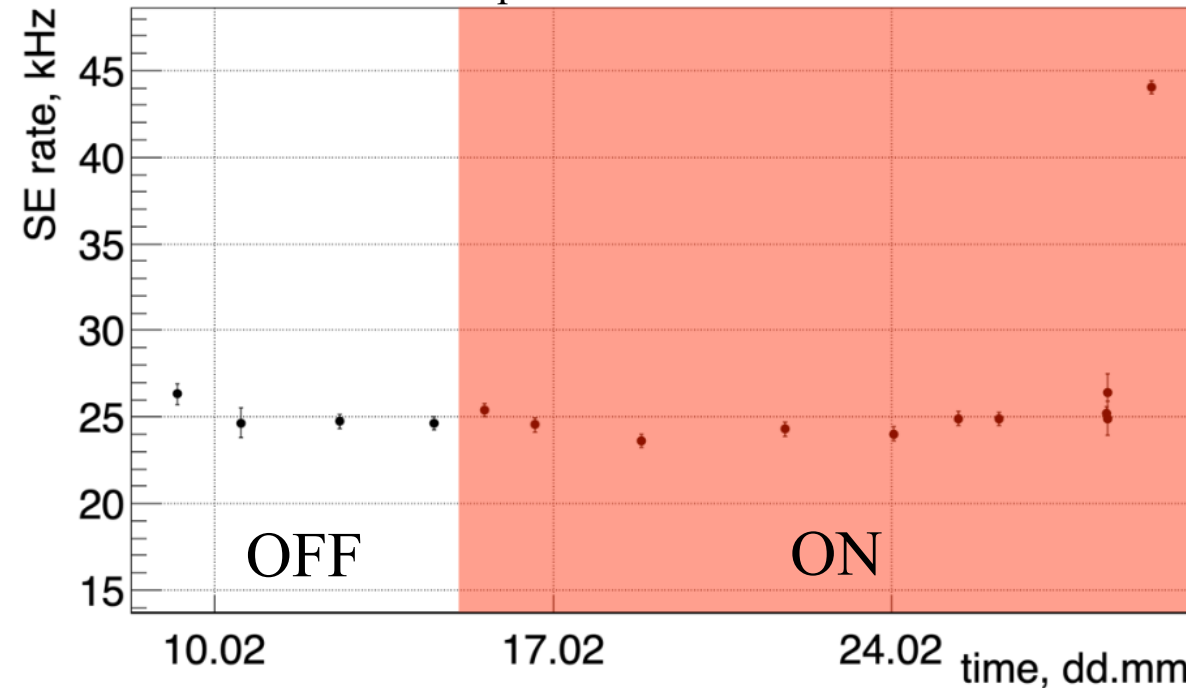


Распределение SE событий по площади S2 сигнала



[arXiv:2403.12645](https://arxiv.org/abs/2403.12645)

Скорость счета SE

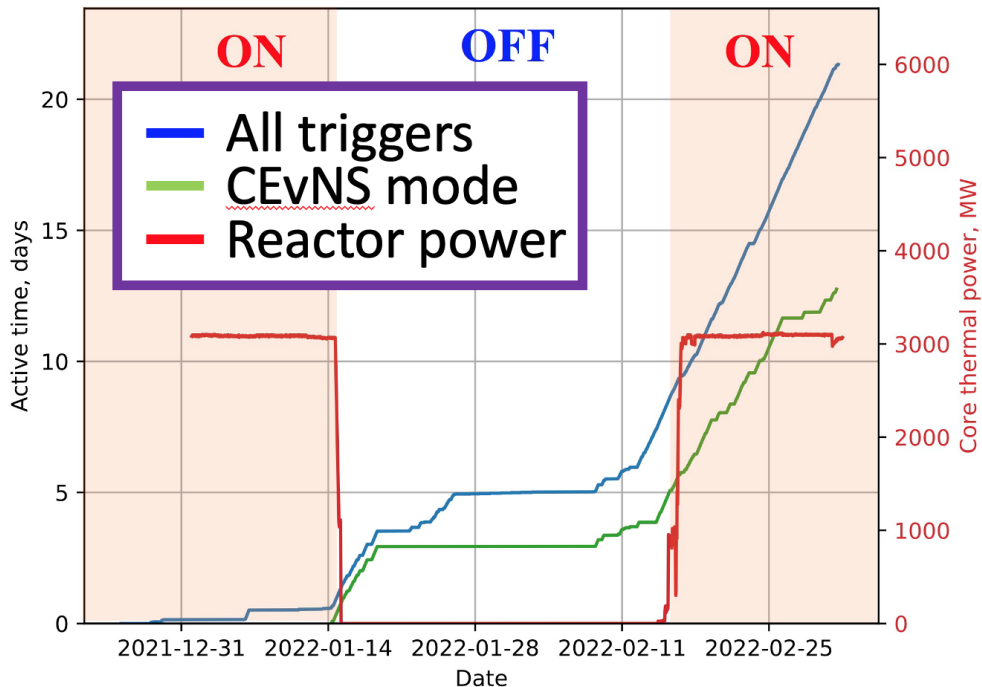


Скорость счёта SE событий довольно стабильна; разница между периодами ON/OFF реактора составила  $1.9\% \pm 1.2\%$ . Правая верхняя точка на графике (в самом конце периода набора данных) связана с опустошением водного резервуара пассивной защиты детектора!

Akimov D.Yu. et.al. JINST 18 (2023) 12, P12002

# Накопление и анализ данных

Data collection at KNPP

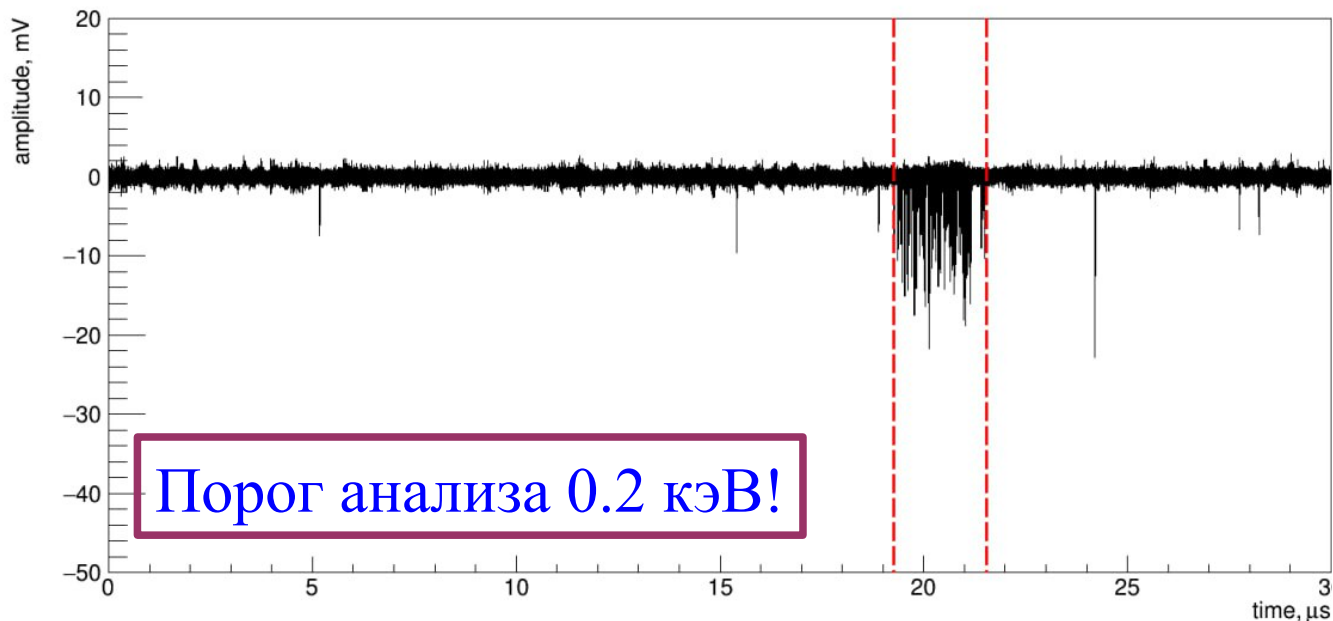


Триггер на УКРН события:

- Совпадения 60 PE ( $\sim 2-3SE$ ) в окне 2 мкс
- Менее 50 PE в окне 50 мкс до триггера
- Блокировки после больших СИГНАЛОВ

Применяемые отборы:

- Зеселённость формы
- Радиус
- Длительность
- Энергия
- Точечность (NN)



# Ожидаемый сигнал и характеристики фона

- На основе полученных параметров детектора, а также программных пакетов GEANT, NEST, ANTS2 проведено детальное моделирование отклика детектора на УКРН
- Рассчитана чувствительность ~50 раз больше предсказаний СМ

*Background rate and CEvNS prediction /~65 kg LXe / day (Preliminary)*

<u>number of e-</u>	5	6
<u>bckg</u>	307	41
<u>cevns</u>	0.4*	0.06

\*Uncertainties on prediction numbers are under calculation  
Current estimation is 30%

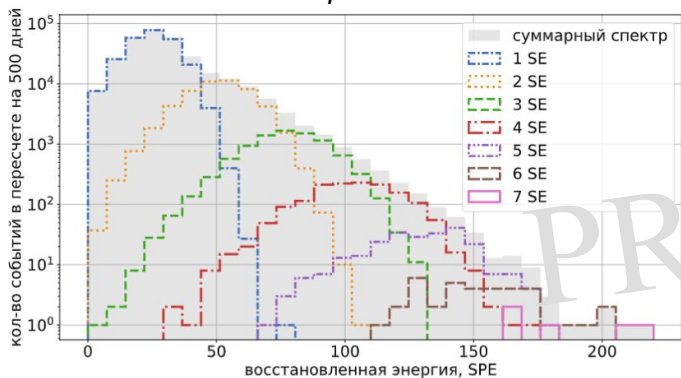
Энергетические спектры нейтрино с уточнённой жёсткой областью спектра:

Daya Bay: F. P. An et.al. Phys Rev Letters 129, 041801 (2022)

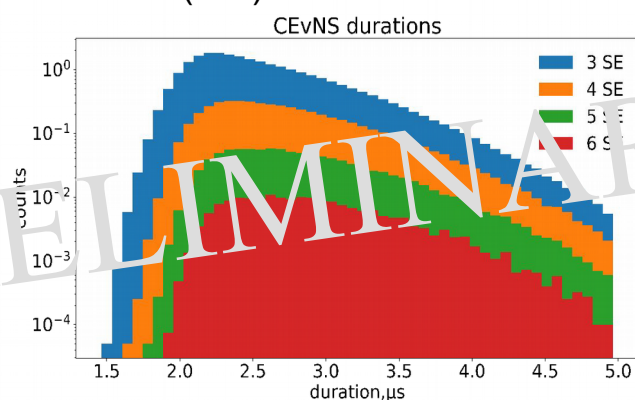
Double Chooz: V.V. Sinev, et.al. Physics of Atomic Nuclei, 2024, Vol. 87, No. 1, pp. 79–89

➔ Намечен повторный анализ

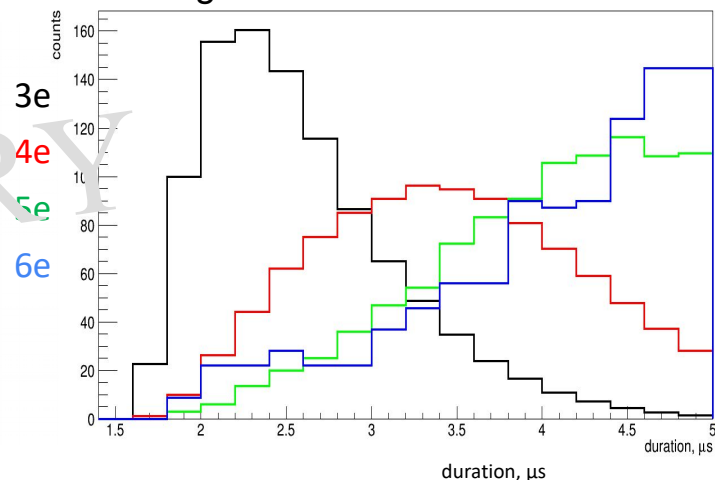
Модельный спектр CEvNS



CEvNS (MC) events durations



Background events durations



# Итоги

- Детектор РЭД-100 успешно прошел первый раунд испытаний на АЭС и показал способность эффективно работать в условиях АЭС
- Радиационная защита установки РЭД-100 обеспечивает эффективную защиту от радиационных фонов в условиях мощной АЭС
- Проведён анализ данных
- Оптимизированы отборы событий
- Фоновые условия приняты во внимание и для надёжного отбора событий был поднят порог детектора до уровня  $4\div 5$  SE
- Проведена оценка чувствительности
- Новые опубликованные энергетические спектры нейтрино с уточнённой жёсткой областью спектра [Daya Bay, Double Chooz, DANSS] внесут коррективы (**Секция: Нейтрино**. Доклад: И.Алексеев «Измерение реакторных нейтрино высоких энергий в эксперименте ДАНСС»)
- Проводится переоценка чувствительности с учётом новых спектров
- В настоящее время осуществляется модернизация детектора и его подготовка к экспериментальному сеансу с аргоном (РЭД-100/LAr) в ЛЭЯФ МИФИ (**Секция: Детекторы**. Доклад: А.Пинчук «Модернизация детектора РЭД-100/LAr для наблюдения когерентного рассеяния антинейтрино на ядрах аргона»)

# Благодарности

Коллектив авторов выражает благодарность:

- АО «Наука и инновации» Госкорпорации «Росатом» (Договор № 313/1679-Д от 16.09.2019) за сотрудничество и поддержку постановки эксперимента на базе Калининской АЭС.
- Российскому Научному Фонду за финансовую поддержку работ по модернизации установки РЭД-100 в рамках контракта №22-12-00082 от 13 мая 2022 года для проведения второго раунда испытаний на АЭС с жидким аргоном в качестве рабочей.
- Руководству Института Ядерной Физики и Технологий (ИЯФИТ) и Института Промышленных Ядерных Технологий (ИПЯТ) НИЯУ МИФИ за помощь в проведении работ.
- Научной программе «Нейтринные детекторы для дистанционного контроля ядерных реакторов и астрофизических установок» (FSWU-2022-0018).
- Научной программе «Фундаментальные свойства элементарных частиц и космология» (№ 0723-2020-0041).

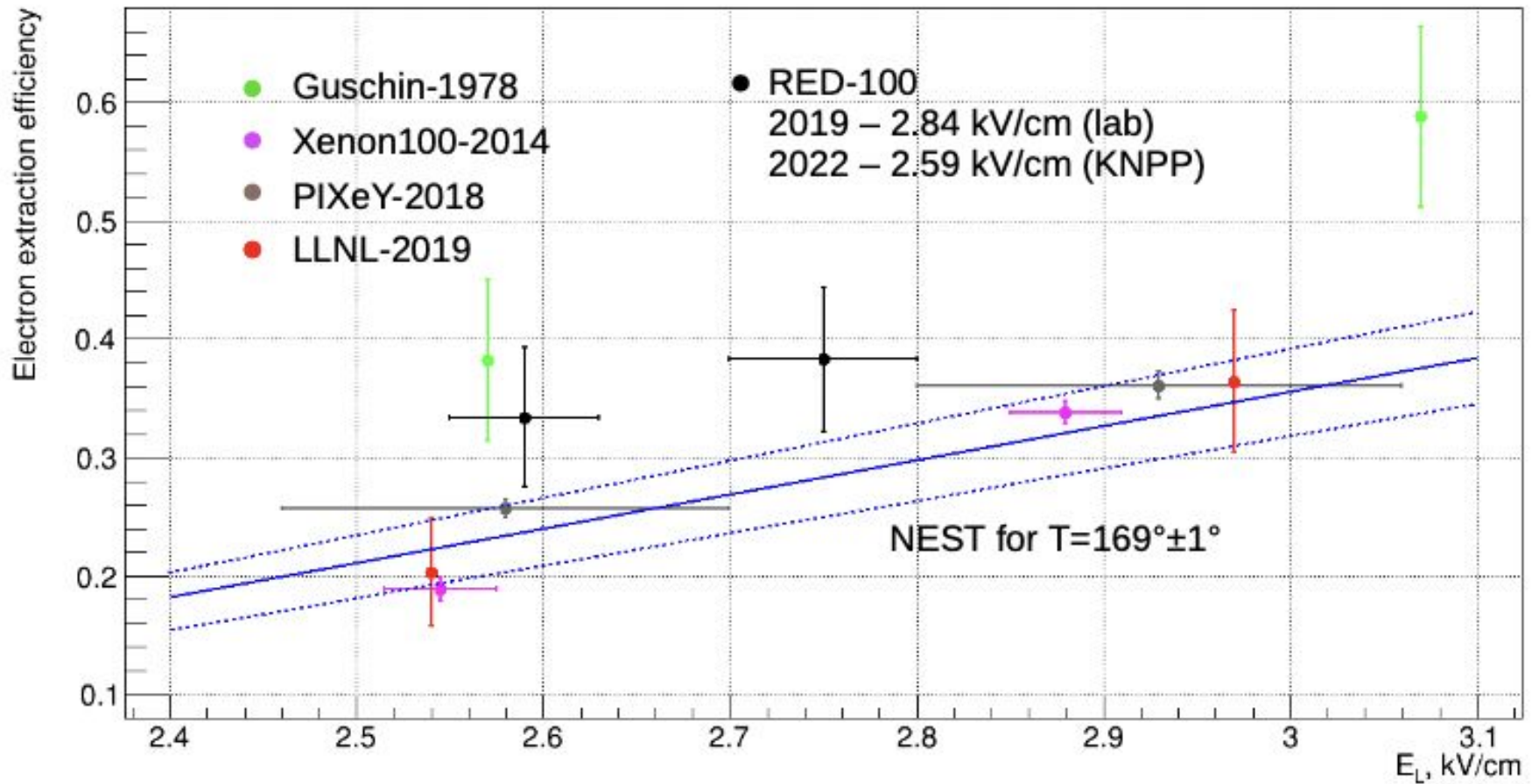
## Спасибо!



Спасибо за внимание!

# Backup slides

Измерения коэффициента экстракции электронов из жидкой фазы в газовую



# Acknowledgement

- Authors are grateful for support the Joint Stock Company "Science and Innovations" of the State Corporation «Rosatom», the Russian Science Foundation (grant №18-12-00135, 12.04.2018, RFBR №17-02-01077)

Thank you!

# References and web-links

- <https://indico.nevod.mephi.ru/event/2/> (Conference)
- <https://www.openstreetmap.org/>
- <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=496>
- <http://stock.rosenergoatom.ru/fotobank/>

<https://indico.nevod.mephi.ru/event/2/contributions/61/>

*Busanov O.A. et al* EPJ Web of Conf. 2014. V. 65. P. 03002.

doi 10.1051/epjconf/20136503002

<https://vedtver.ru/news/society/kalininskaja-ajes-remontnuju-kampaniju-2022-goda-prodolzhaet-jenergoblok-2/>

[https://indico.cern.ch/event/773082/contributions/3567672/attachments/1941658/3219658/Shirchenko\\_CERN\\_081119.pdf](https://indico.cern.ch/event/773082/contributions/3567672/attachments/1941658/3219658/Shirchenko_CERN_081119.pdf)

[https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99\\_SALES\\_LIBRARY/etd/High\\_energy\\_PMT\\_TPMZ0003E.pdf](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/High_energy_PMT_TPMZ0003E.pdf)

# Упругое когерентное рассеяние нейтрино

- Упругое Когерентное Рассеяние Нейтрино на атомном ядре (УКРН)
- Coherent Elastic  $\nu$ -Nucleus Scattering (CEvNS, CENNS, CNS, CNNS,...)

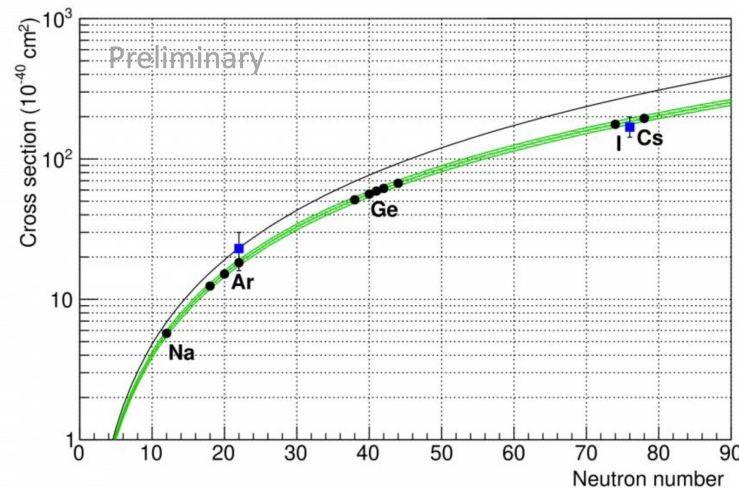
$$\frac{d\sigma}{dT}(E, T) = \frac{G_F^2}{2\pi} M \left[ 2 - \frac{2T}{E} + \left(\frac{T}{E}\right)^2 - \frac{MT}{E^2} \right] \frac{Q_W^2}{4} F^2(q^2)$$

$$\frac{d\sigma}{dT}(E, T) \simeq \frac{G_F^2}{4\pi} M Q_W^2 F^2(q^2) \left[ 1 - \frac{MT}{2E^2} \right] \quad T_{max} = \frac{2E^2}{2E+M}$$

$$\sigma(E) \simeq \frac{G_F^2}{4\pi} Q_W^2 F^2(q^2) E^2$$

$$Q_W^2 = ((A-Z) - Z \cdot \sin^2 \theta_W)^2 \simeq N_{ino}^2$$

$$\sin^2 \theta_W \simeq 0.231$$



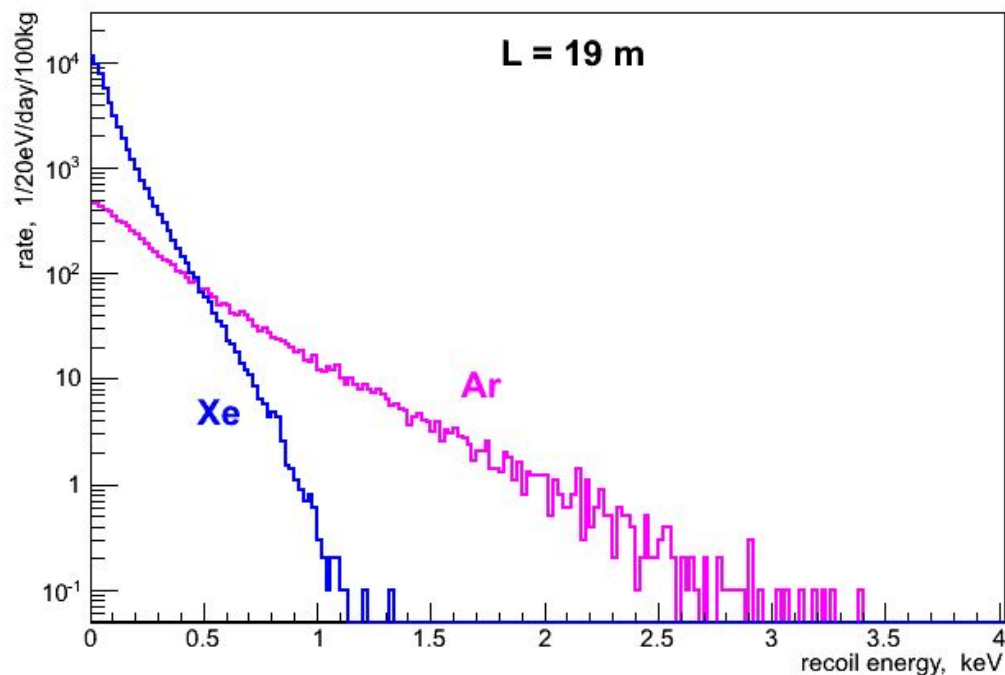
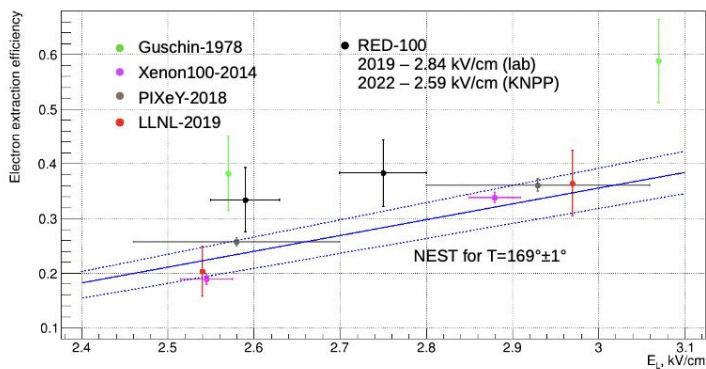
«Coherent Neutrino Nucleus Scattering as a Probe of the Weak Neutral Current» D.Z. Freedman, Phys. Rev. D 9 (1974) 1389.;

D.Z. Freedman «Coherent effects of a weak neutral current».

«Isotopic and chiral structure of neutral current», V.B. Kopeliovich and L.L. Frankfurt, JETP Lett. 19 (1974) 145

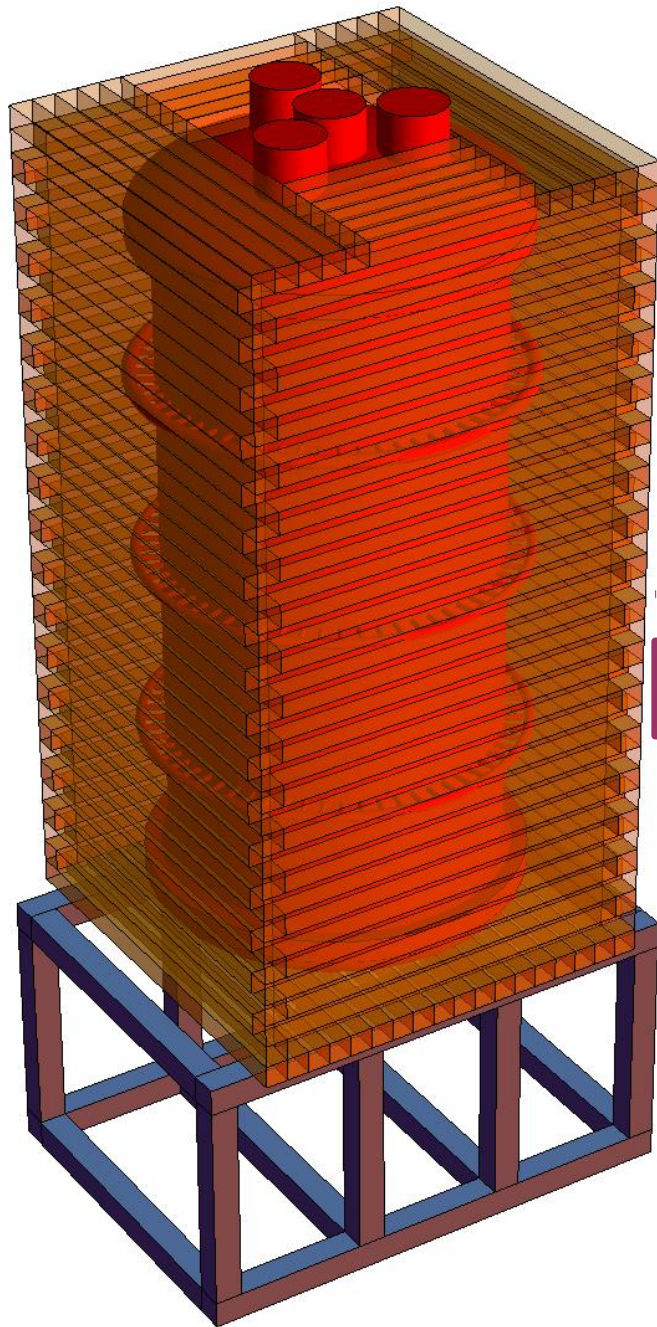
# Упругое когерентное рассеяние нейтрино

- Малые энергии ядер отдачи
- 

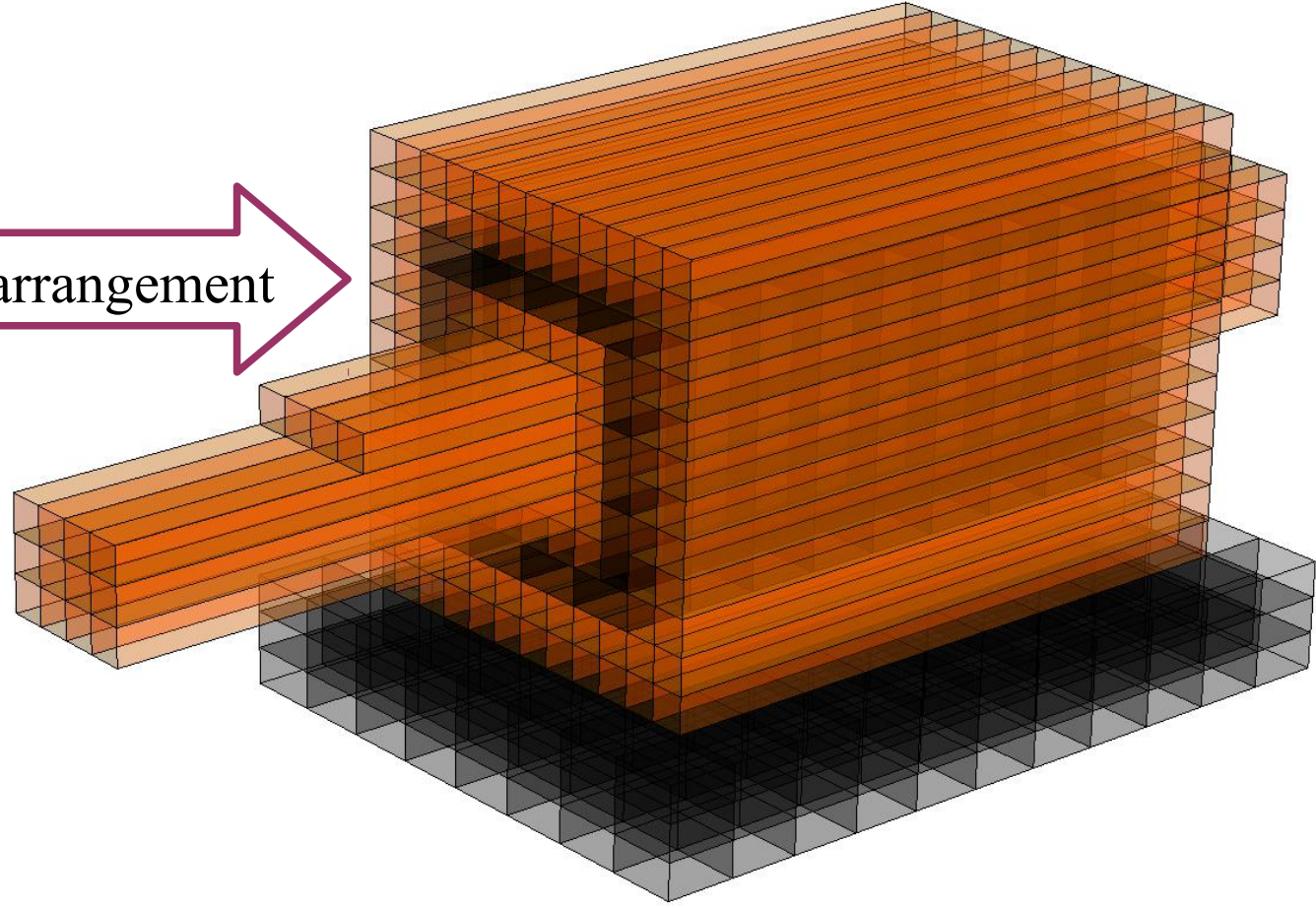


# Copper shielding

- A combined copper/lead shielding for NaI(Tl) scintillation detector
- Copper layers ( $\sim 15$  cm) with a lead belt ( $\sim 5$  cm) mounted on lead base ( $\sim 15$  cm)

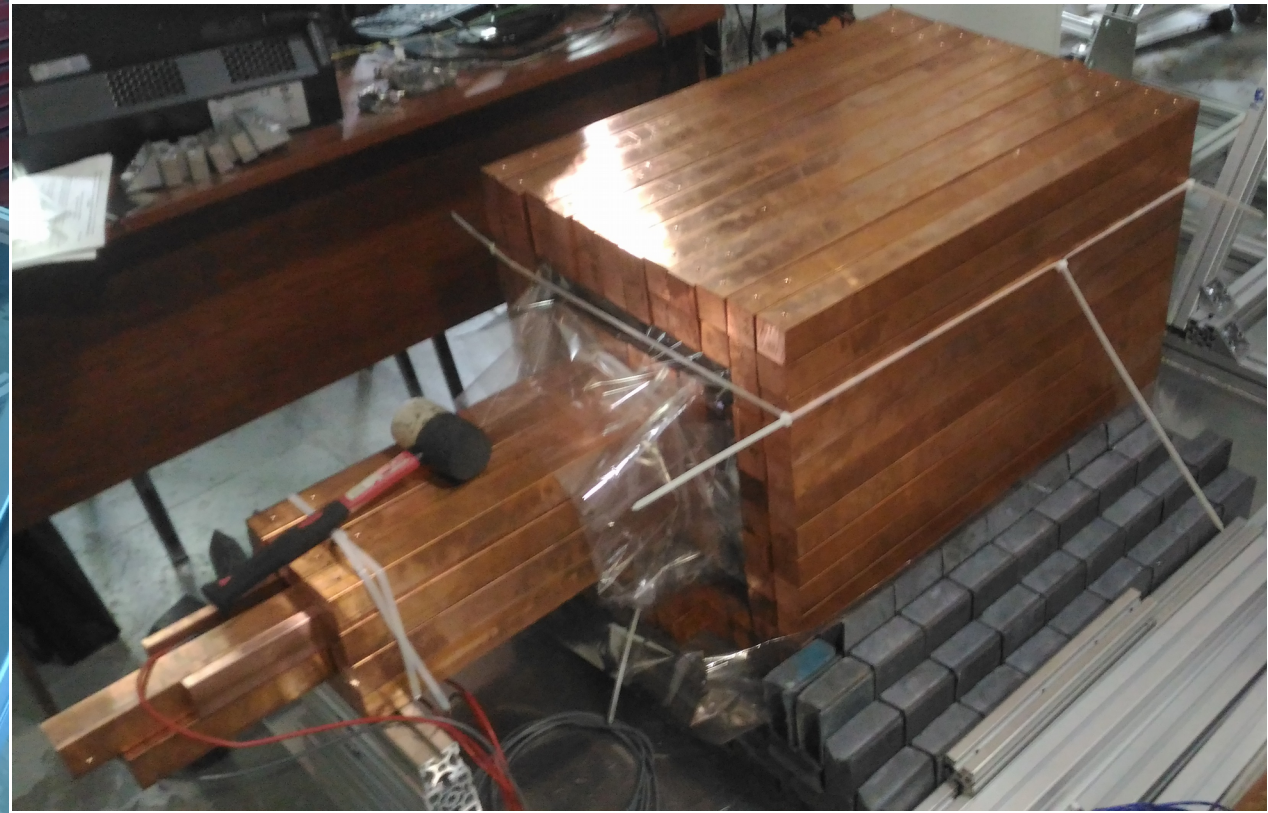


Rearrangement



# Copper shielding

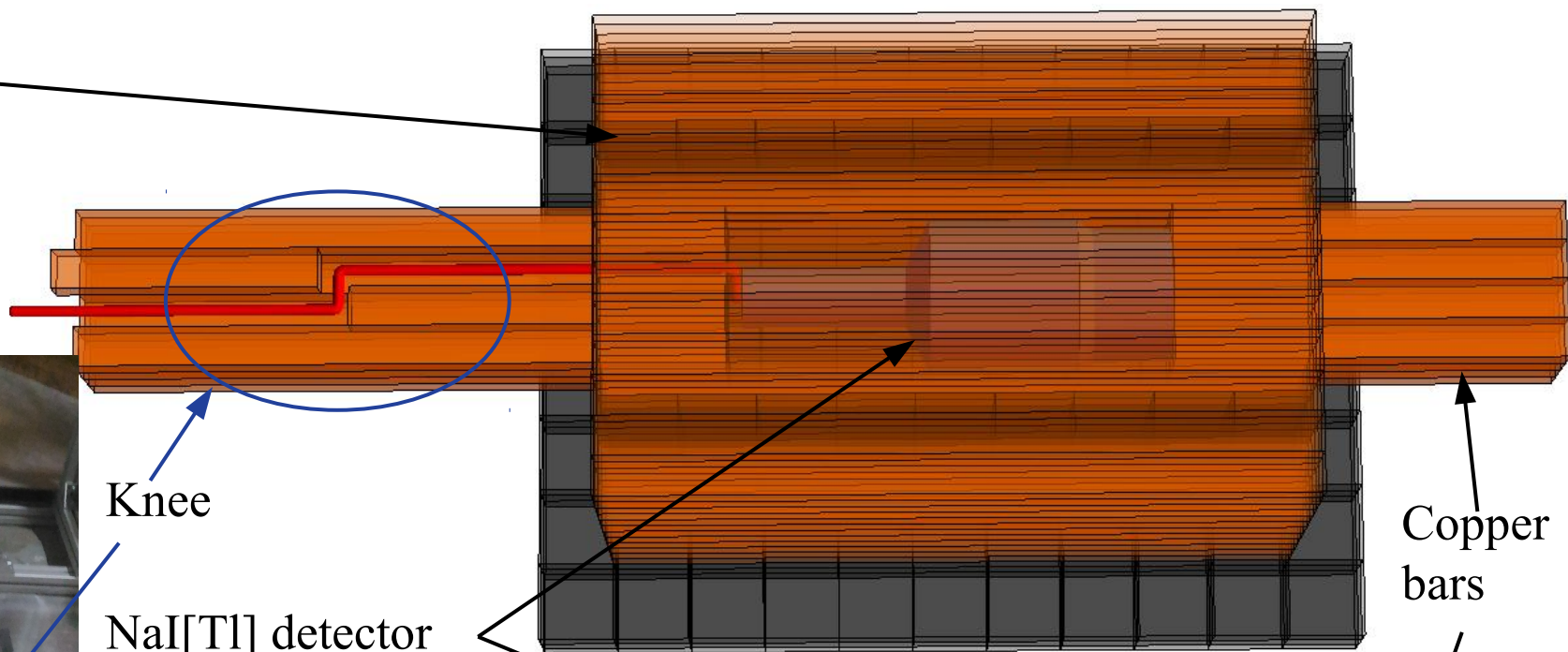
Due to the fact that we did not have the technical ability to test the complete assembly before the RED-100 installation was transported to the KalininNPP, the gamma background was measured by NaI[Tl] detector in the laboratory of NRNU MEPhI (Moscow).





# Copper pile with lead belt

Lead belt



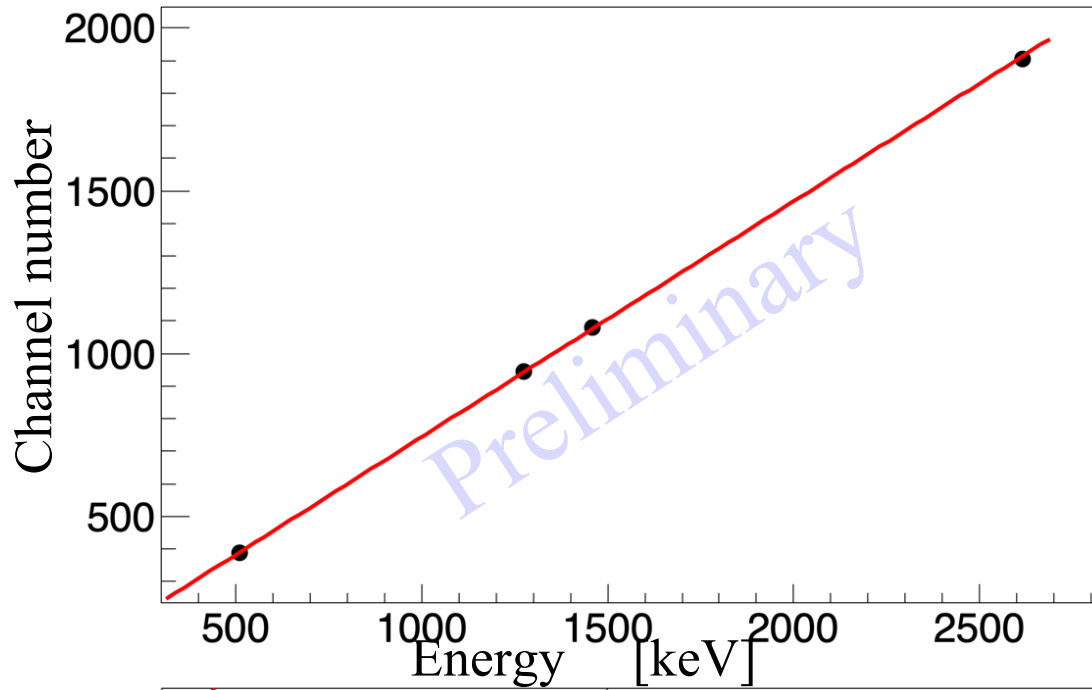
Knee

NaI[Tl] detector

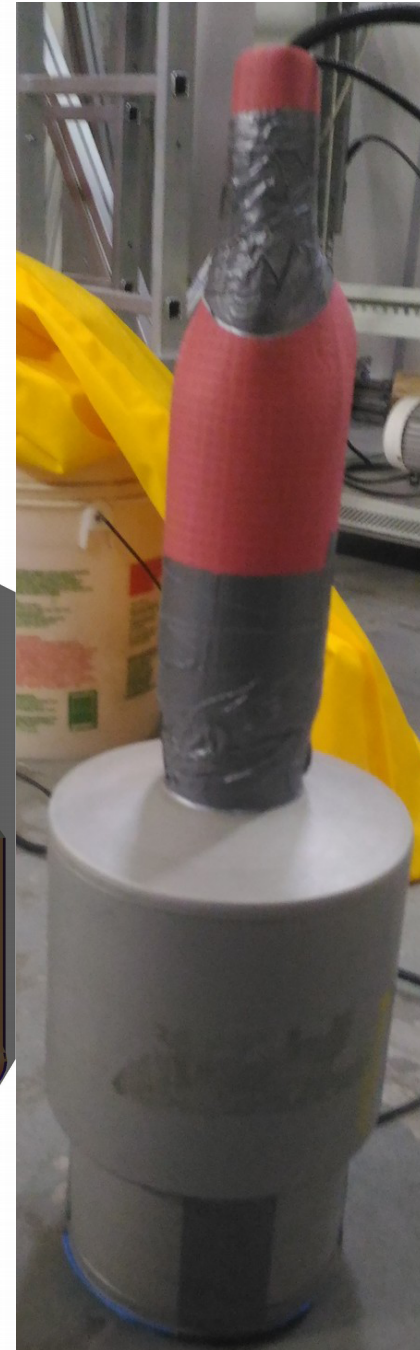
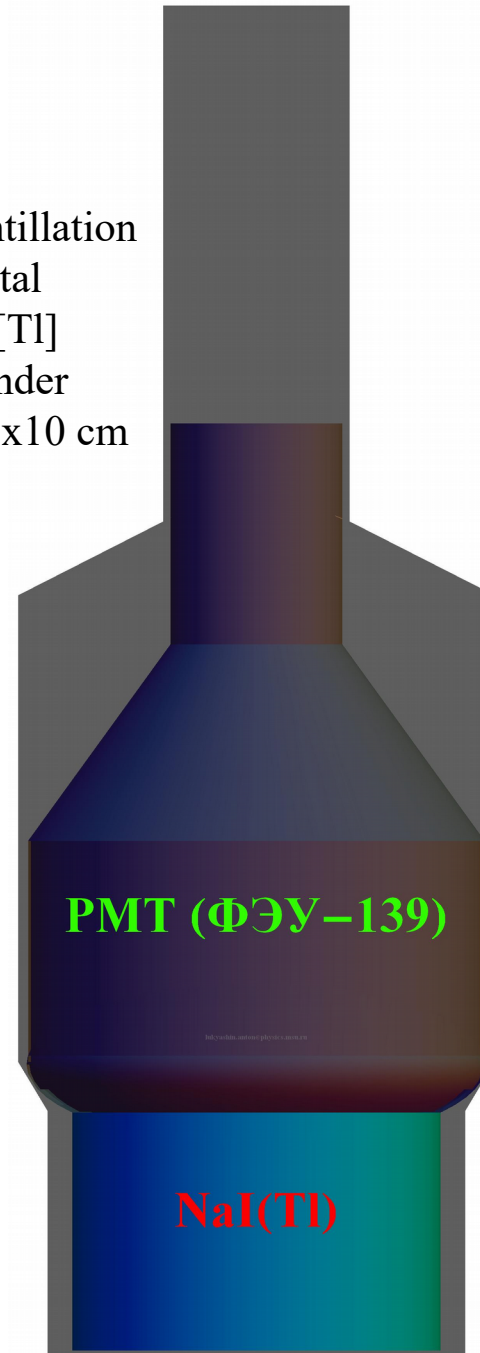
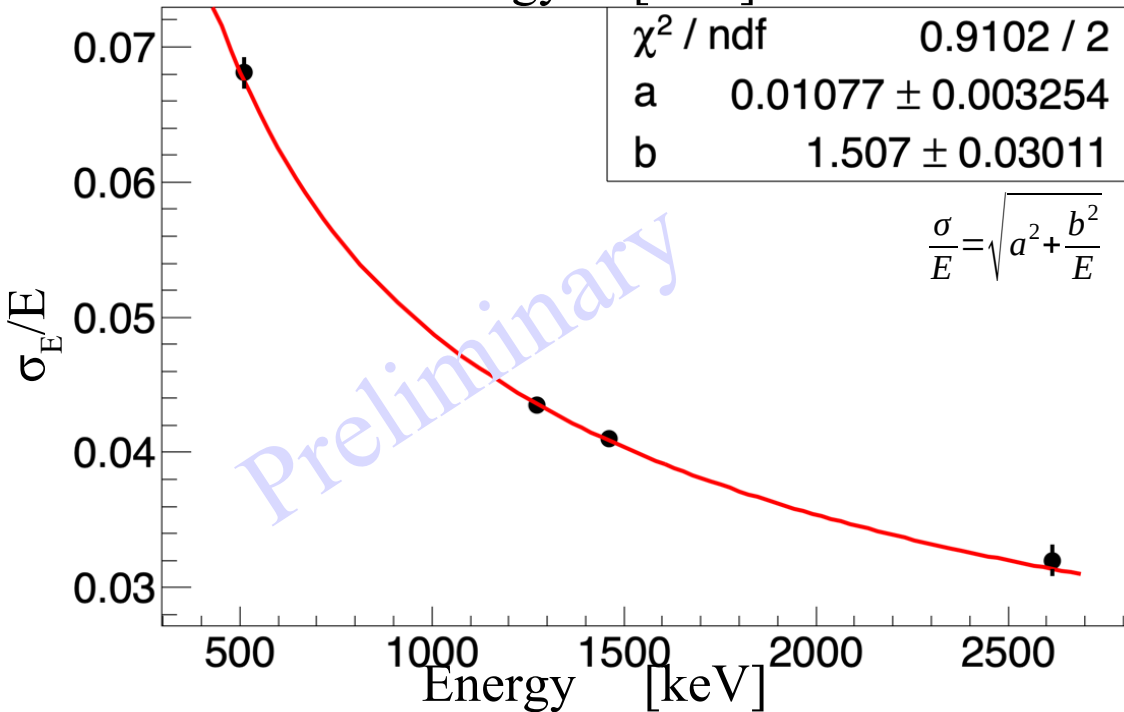
Copper bars



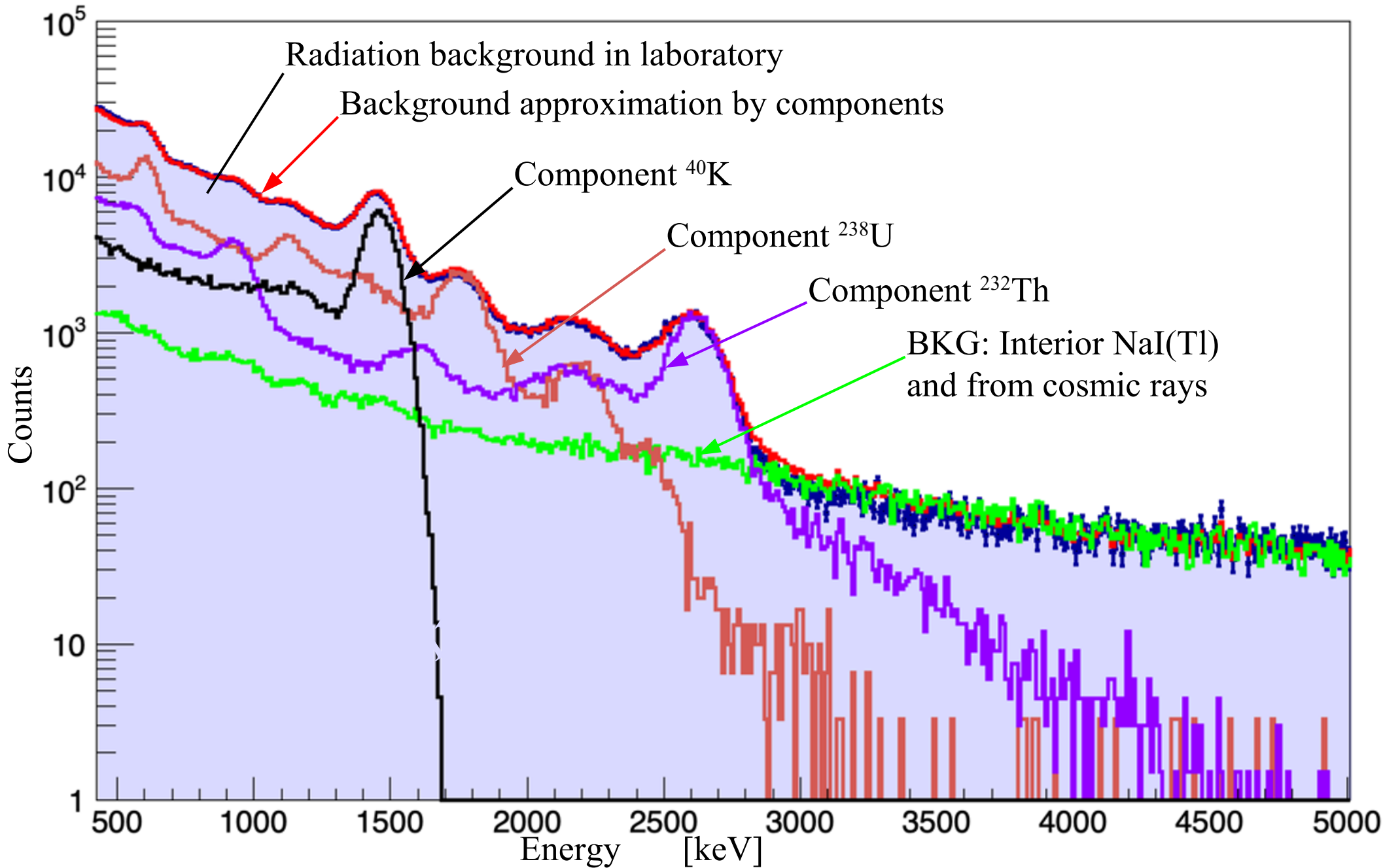
# Scintillation detector NaI(Tl)



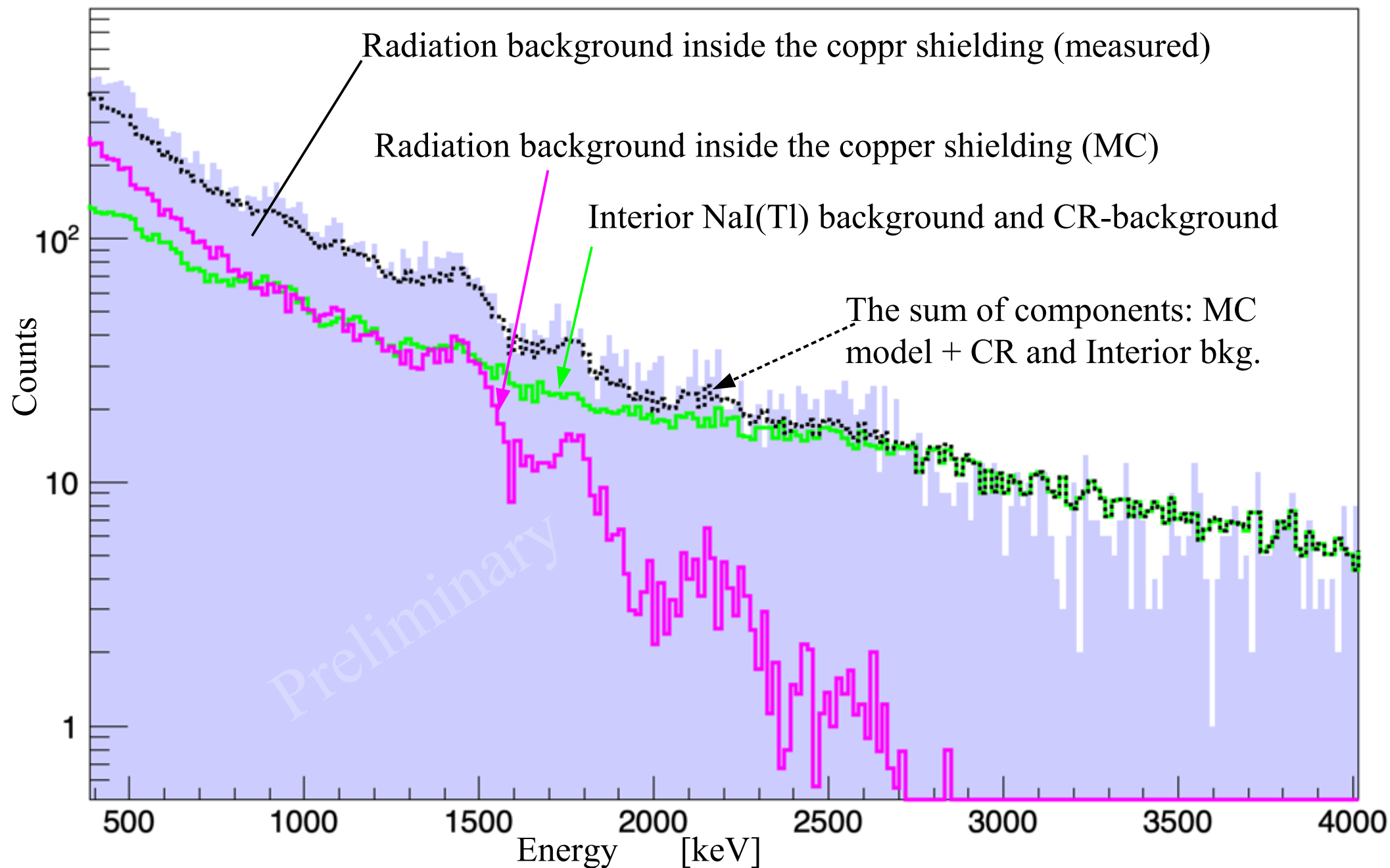
Scintillation crystal  
NaI(Tl)  
cylinder  
Ø15x10 cm



# Simulation GEANT4 and calculations



# Simulation GEANT4 and calculations



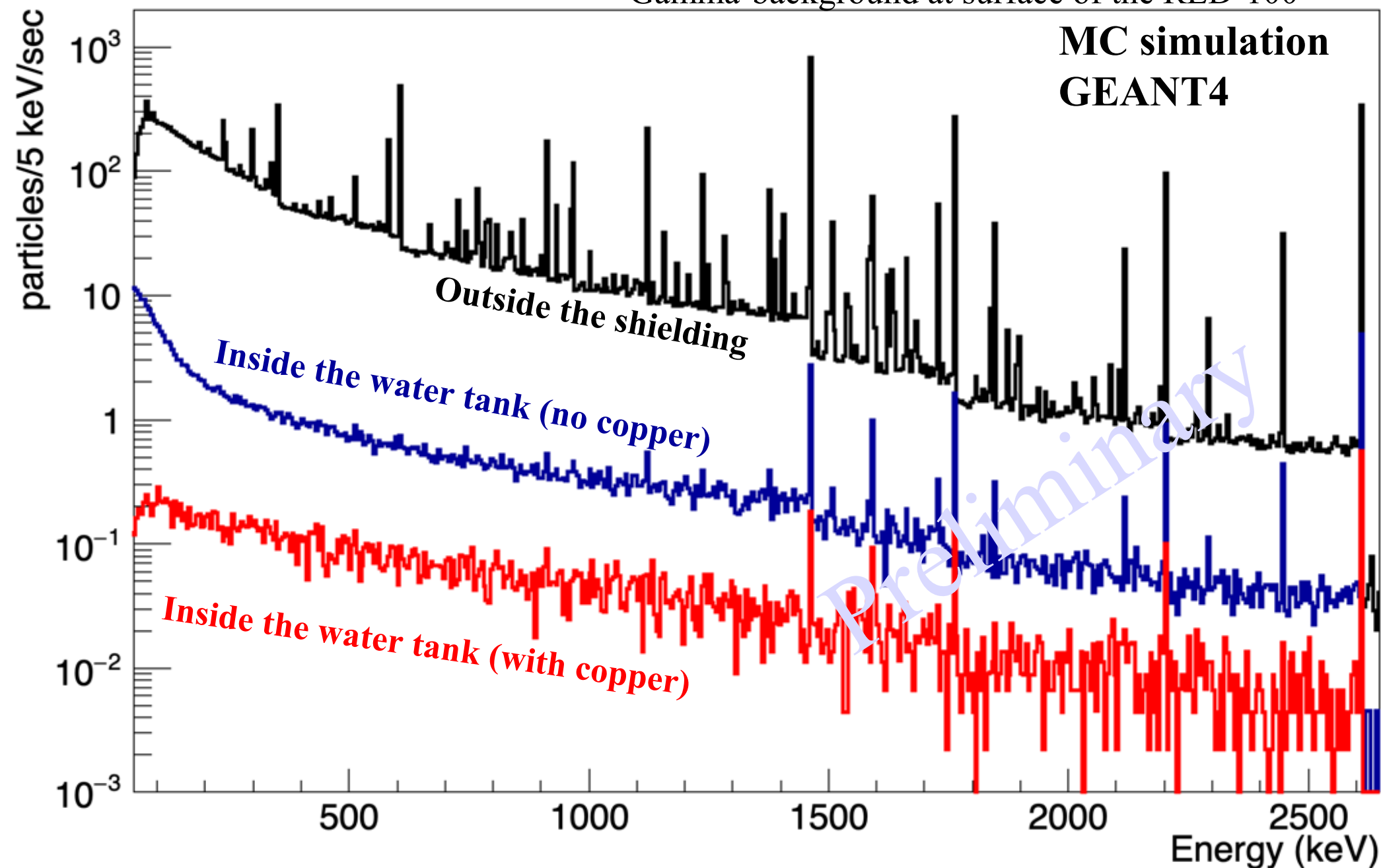
# Results comparison and conclusion

- The main source of gamma background is the concrete floor of the laboratory.
- Concentration of isotope in laboratory concrete
- $^{40}\text{K}$        $203 \pm 1$       Bq/kg
- $^{238}\text{U}$        $44 \pm 1$       Bq/kg
- $^{232}\text{Th}$        $21 \pm 1$       Bq/kg
- These concentrations were used in computer simulations to estimate the suppression factor for gamma background.

# Simulating and calculations

Gamma-background at surface of the RED-100

MC simulation  
GEANT4



# Water shielding

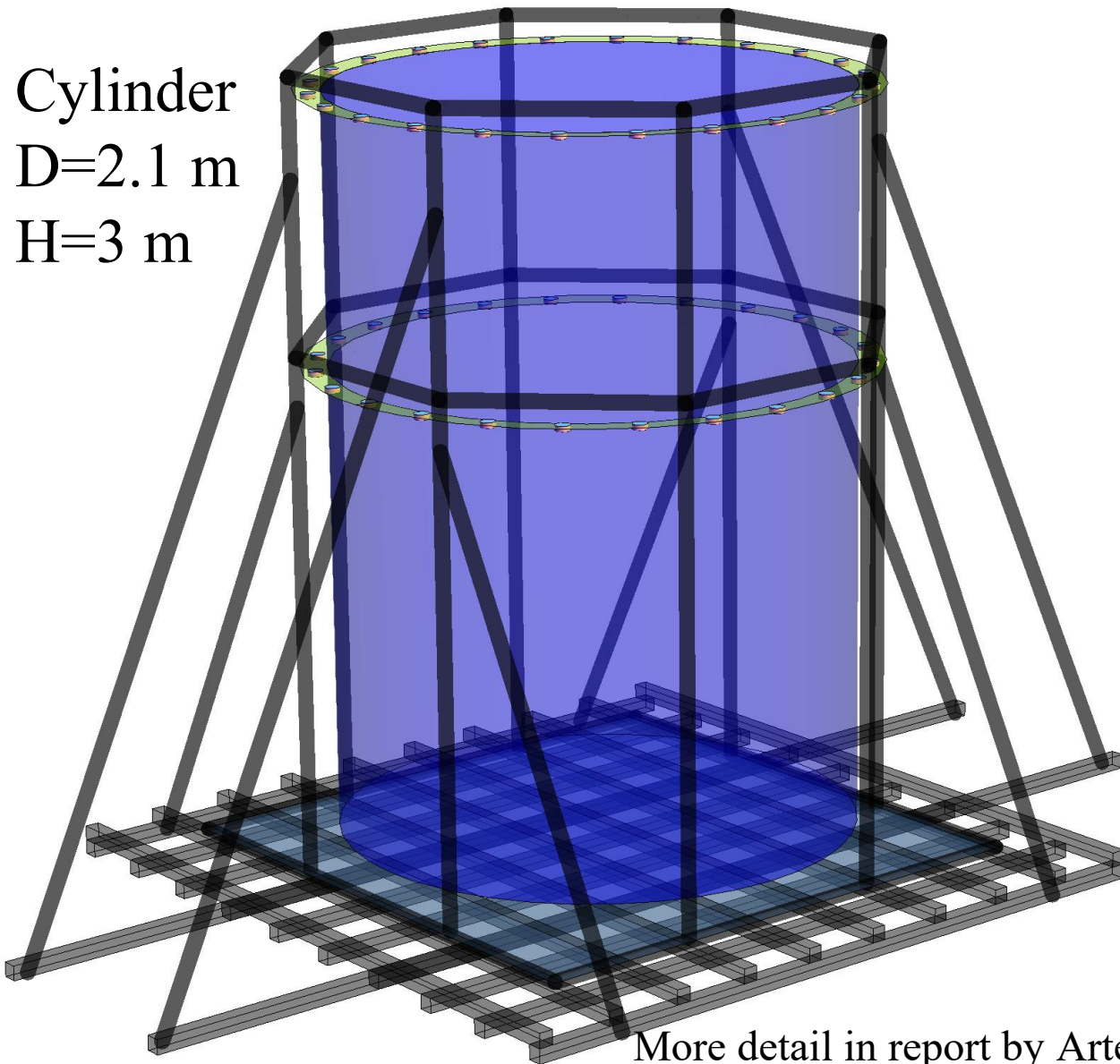
Flexible tank made of special fabric

Supporting frame made of aluminium profile

Cylinder

$D=2.1\text{ m}$

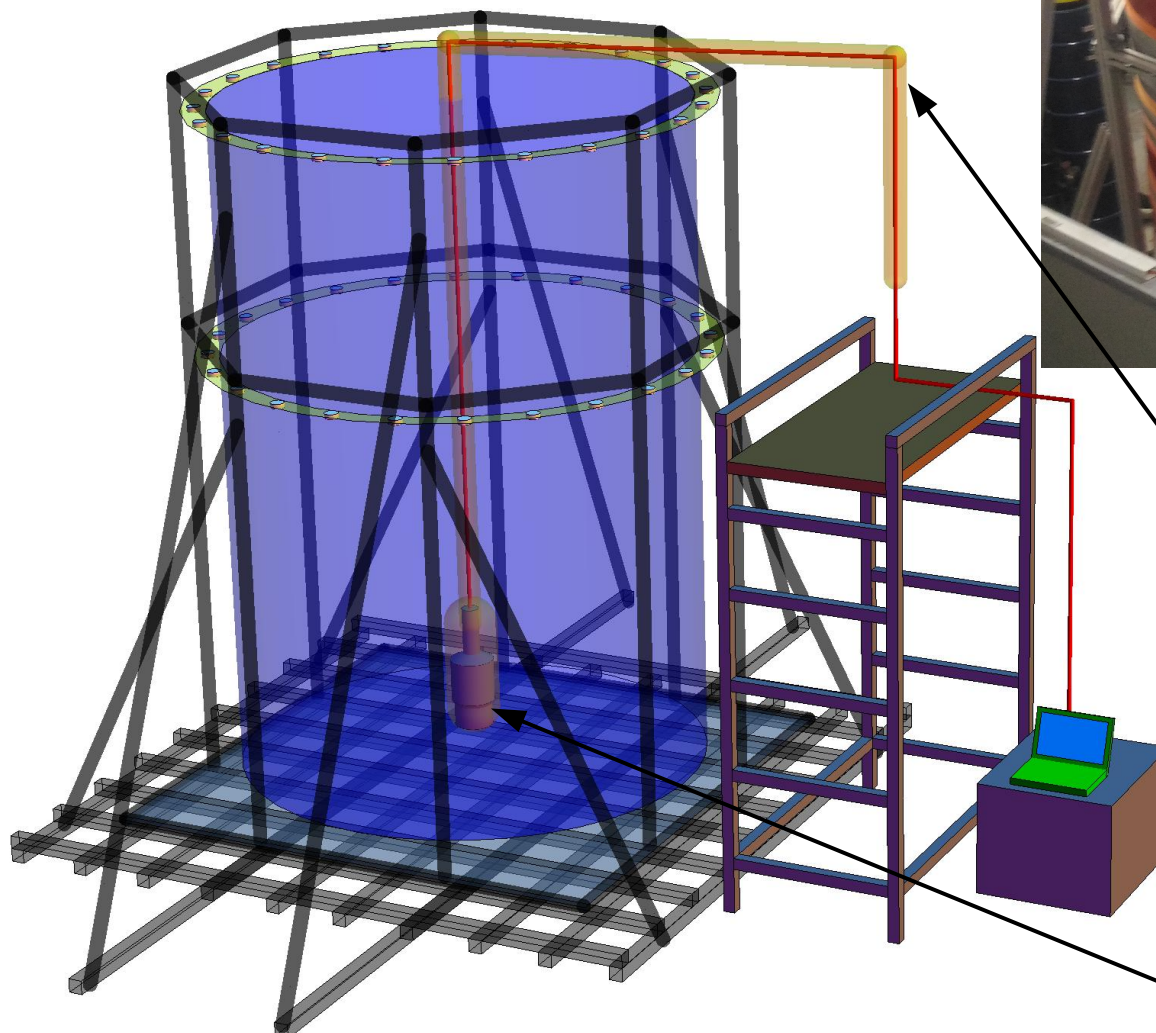
$H=3\text{ m}$



More detail in report by Artem Pinchuk @NPhE-2020

# Water tank

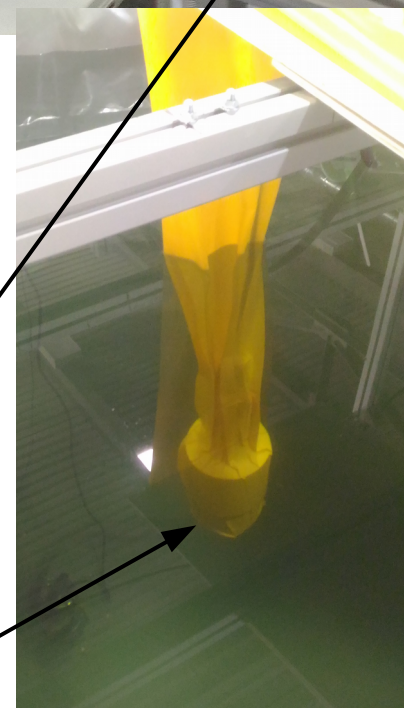
Special sleeve for the experiment:  
durable, waterproof, soft, flexible  
L~390 cm; D~20 cm.



Waterproof sleeve

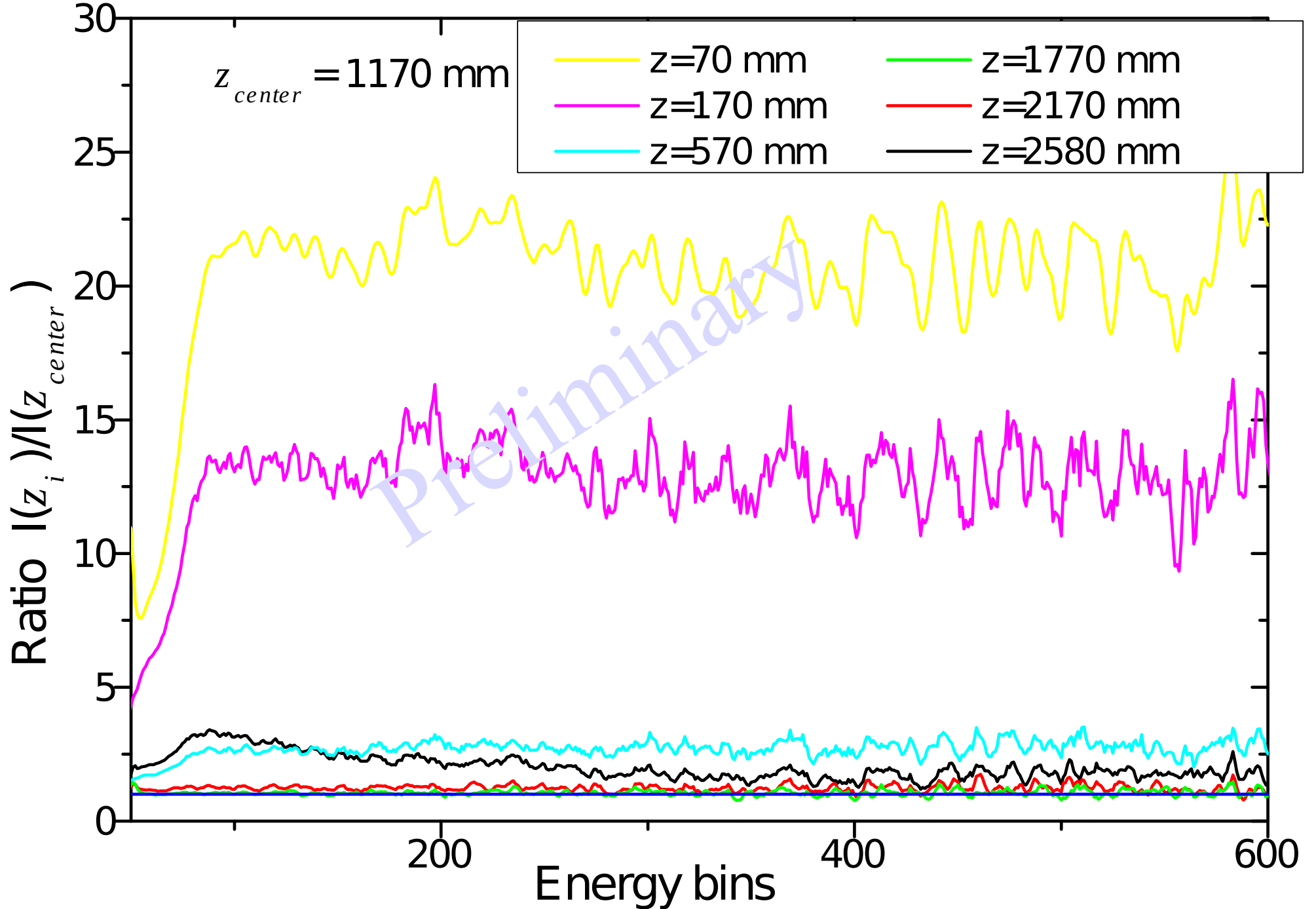
Computer &  
ADC blocks

NaI(Tl) detector

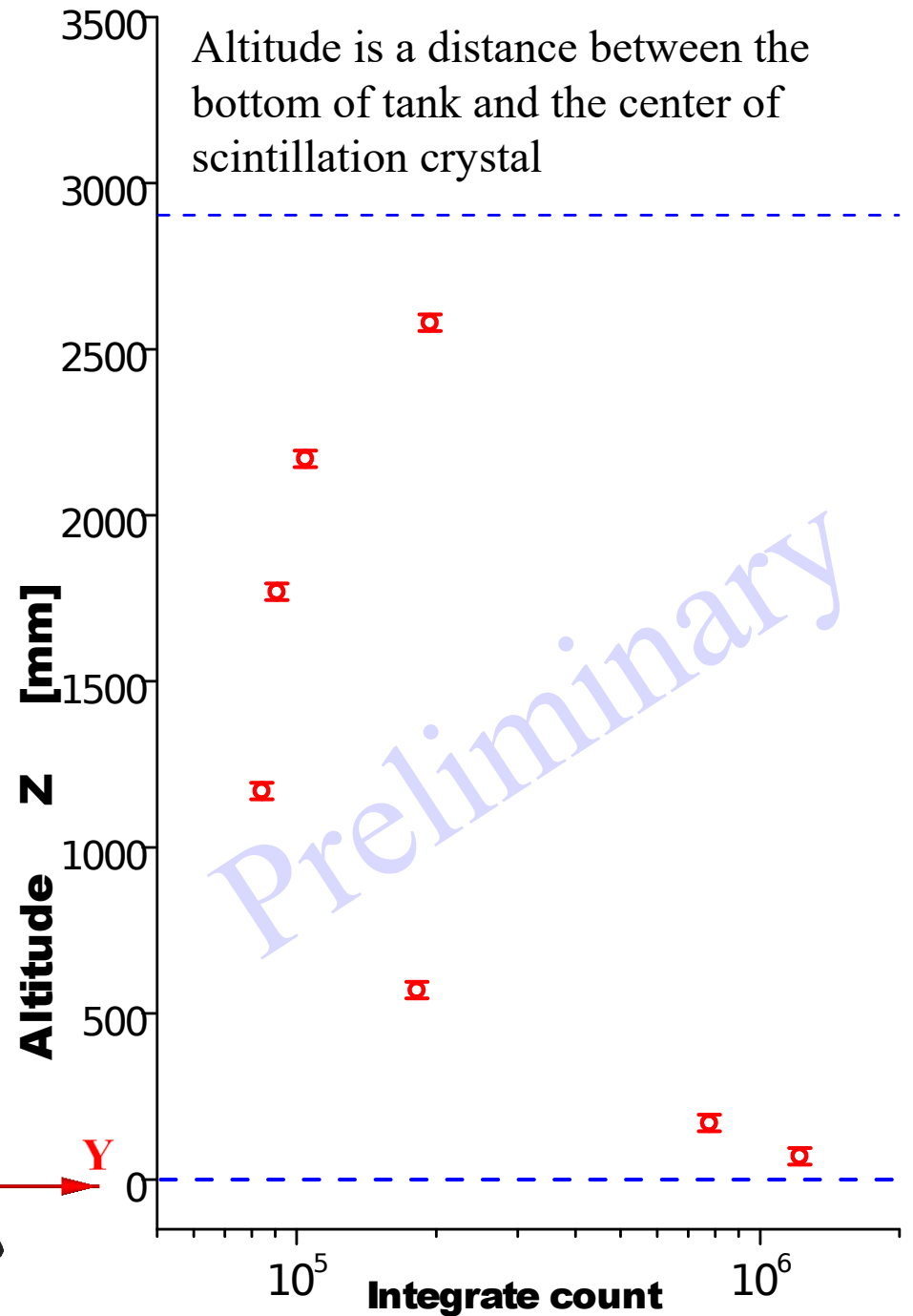
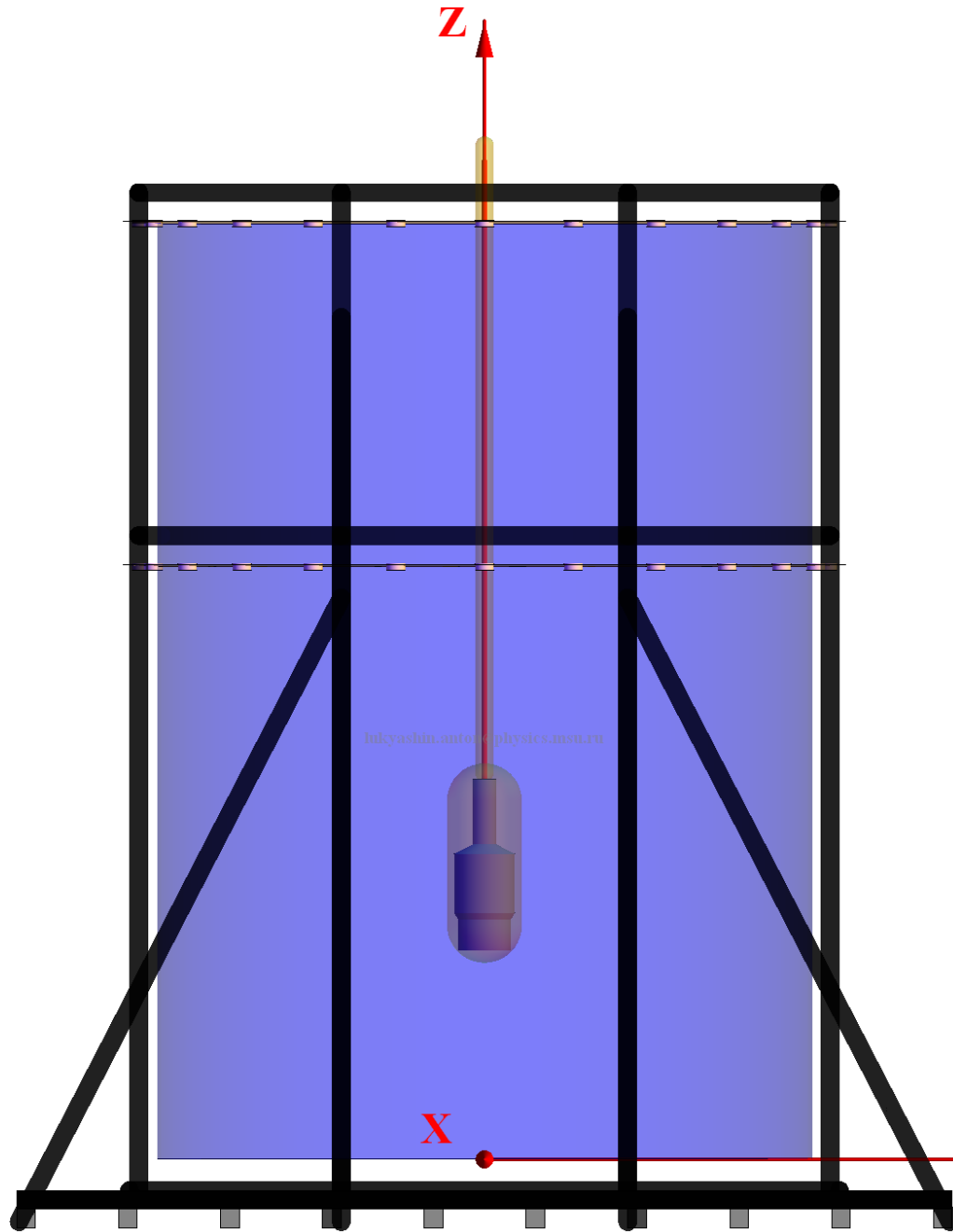


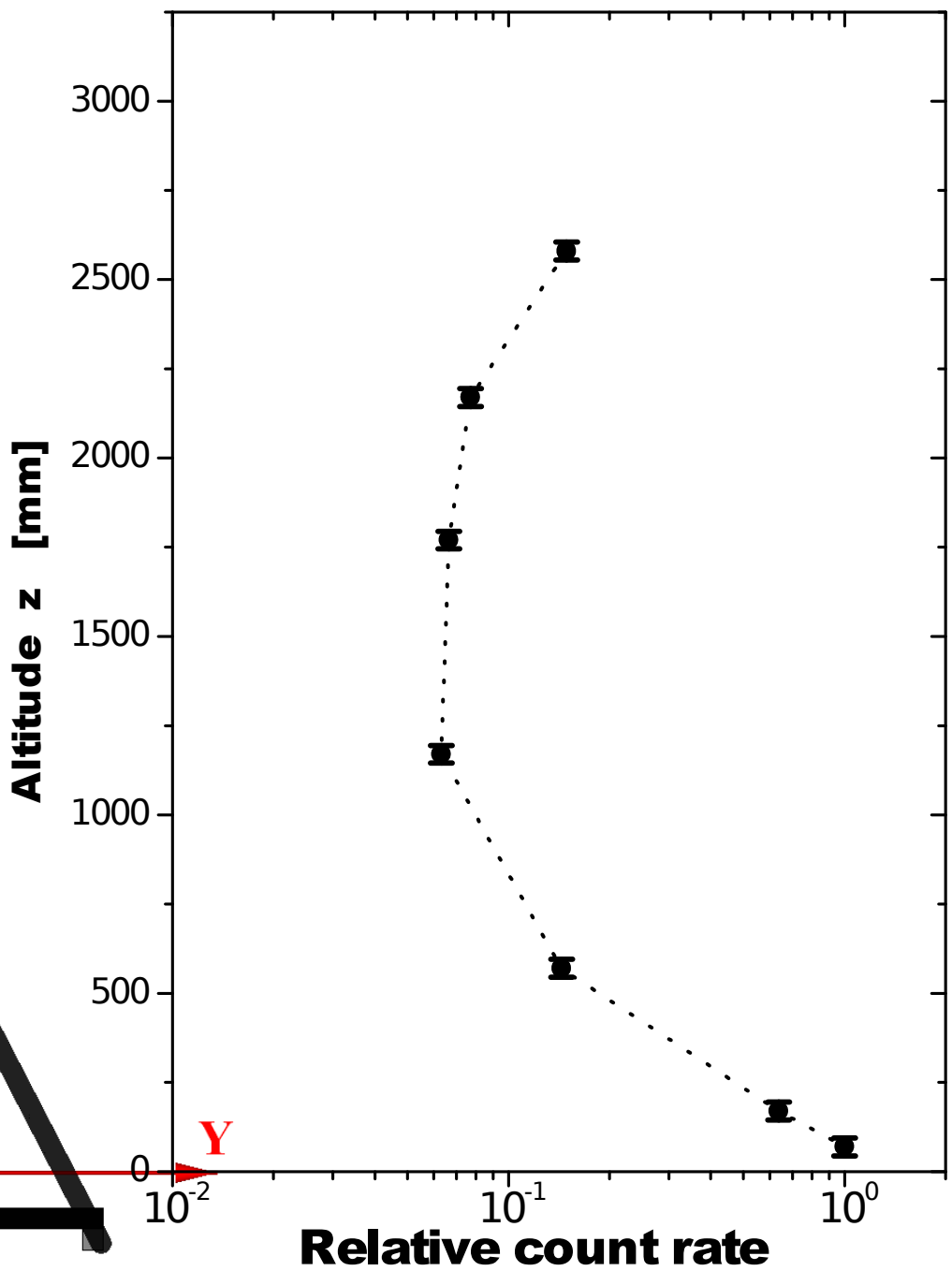
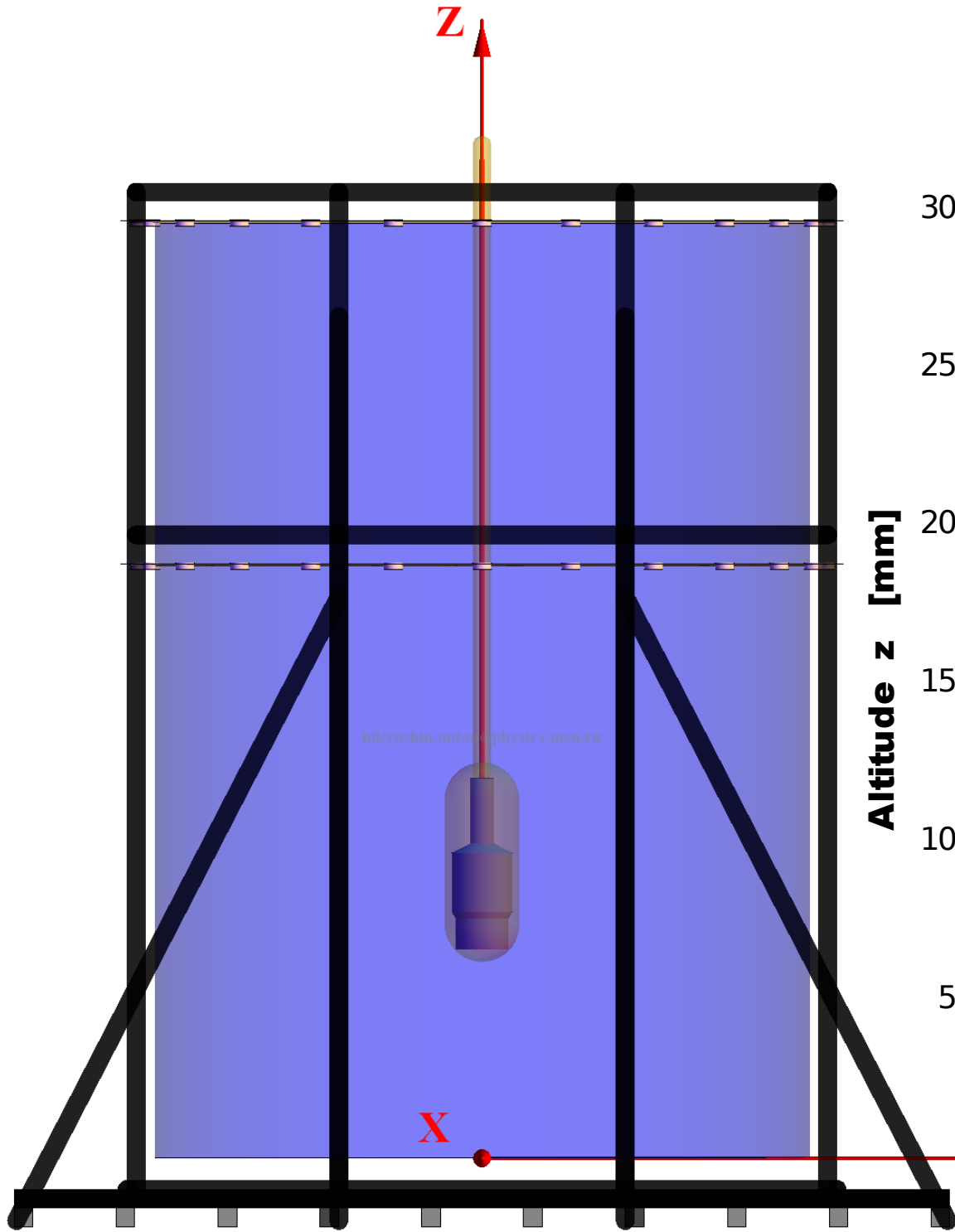


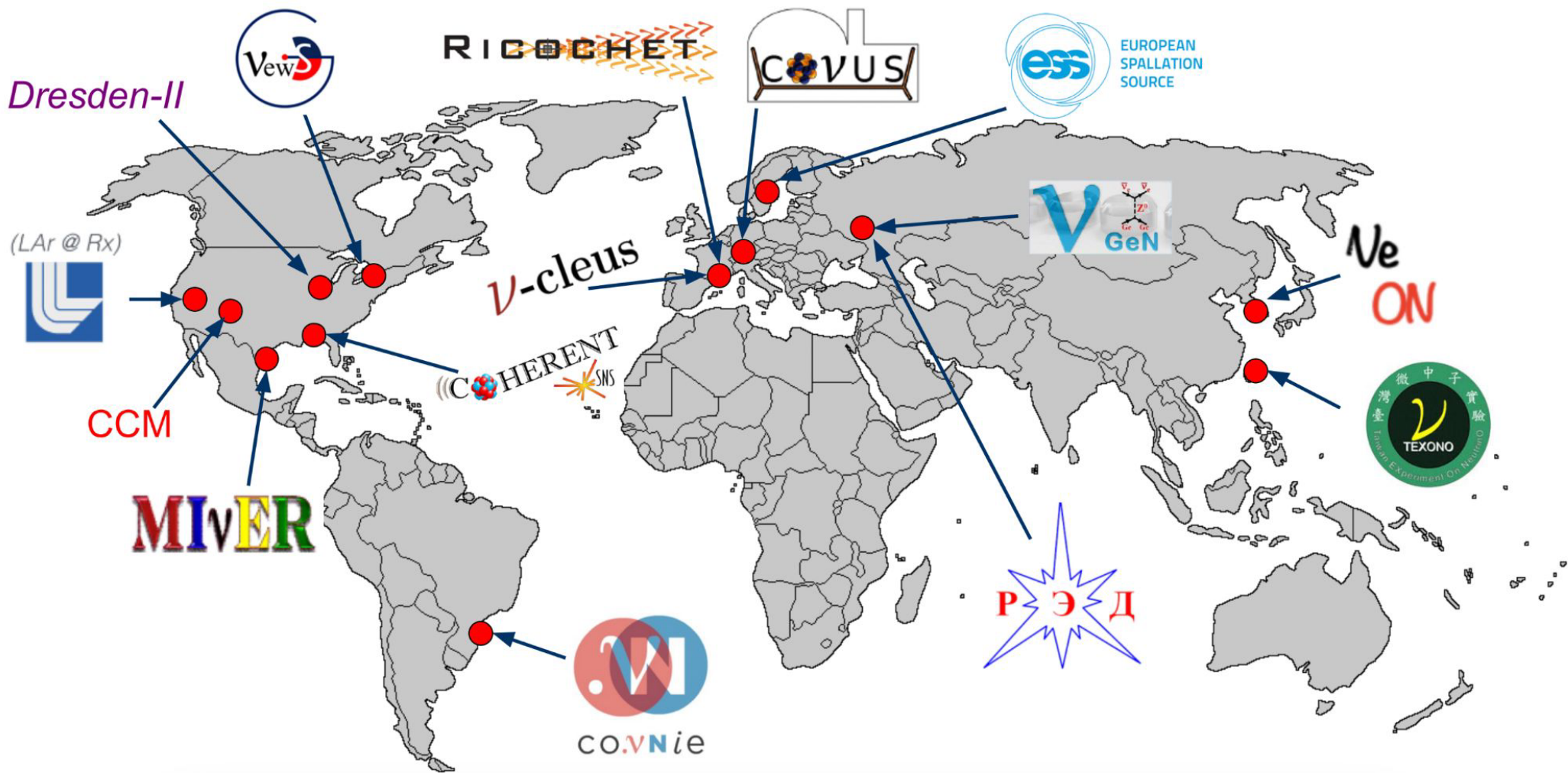
# Relative ratio of intensities at various altitudes



# Experiment with water tank







# Gaussian

$$\chi^2(p) = \sum_i \left( \frac{f_{model}(x_i, p) - f_{model_{dataset}}(x_i, p)}{\sigma_{x_i}} \right)^2$$

$$\Delta \chi^2 = \chi^2 - \min[\chi^2]$$

