

Научная инфраструктура НИЦ "Курчатовский институт" на Калининской атомной электростанции: прикладные нейтринные исследования в интересах атомной отрасли России

Е.А. Литвинович^{1,2}

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

1-5 апреля 2024, Дубна

Научная сессия секции ЯФ Отделения физических наук РАН

Наши цели

- Обеспечение предельной безопасности развития атомной энергетики в РФ
 - Внедрение комплементарных методов диагностики состояния ядерных объектов, в т.ч. в нештатных и аварийных ситуациях

Наши цели

- Обеспечение предельной безопасности развития атомной энергетики в РФ
 - Внедрение комплементарных методов диагностики состояния ядерных объектов, в т.ч. в нештатных и аварийных ситуациях

$$W_{\text{АЭС}} \sim \sum_i f_i(t) e_i(t) - \text{мощность согласно измерениям штатными методами АЭС (N1K, N2K, НПВД)}$$

**Число делений нуклидов
в активной зоне**

$$N_\nu \sim \sum_i f_i(t) \langle \sigma \rangle(t) - \text{число антинейтрино, измеряемое нейтринным детектором, т.е. нейтринный детектор измеряет непосредственно число делений, а не его произведение с энергией деления}$$

Наши цели

- Обеспечение предельной безопасности развития атомной энергетики в РФ
 - Внедрение комплементарных методов диагностики состояния ядерных объектов, в т.ч. в нештатных и аварийных ситуациях
- Изучение возможности применения нейтринного метода для применения гарантий МАГАТЭ к плавучим атомным энергоблокам
 - Эксплуатация ПАТЭС не предполагает обращения со свежим и облученным топливом, т.к. реактор является отпрессованным на заводе-изготовителе и возвращается на завод-изготовитель после 8-10 лет эксплуатации
- Испытания новых материалов и технических решений для нейтринных детекторов

Основополагающие работы:

1. L. Mikaelyan, Neutrino laboratory in the atomic plant (fundamental and applied researches), in Proceedings of the International conference "Neutrino-77", Vol. 2, Nauka, Moscow (1978), pp. 383-385.
2. А.А. Боровой, Л.А. Микаэлян, Возможности практического применения нейтрино, Атомная энергия **44**, вып. 6, 508-510 (1978).

Научно-исследовательская инфраструктура
НИЦ «Курчатовский институт» на КАЭС

Лаборатория в подреакторном помещении энергоблока №3 КЛНАЭС в зоне контролируемого доступа (ЗКД); вспомогательное помещение в ЗКД для удаленного контроля параметров нейтринного детектора



Научно-исследовательская инфраструктура
НИЦ «Курчатовский институт» на КАЭС

Лаборатория в подреакторном помещении энергоблока №3 КЛНАЭС в зоне контролируемого доступа (ЗКД); вспомогательное помещение в ЗКД для удаленного контроля параметров нейтринного детектора



Комплекс вспомогательных детекторов для регистрации космического излучения и измерений нейтронного и гамма-фона, измерений атмосферных мюонов

Научно-исследовательская инфраструктура
НИЦ «Курчатовский институт» на КАЭС

Лаборатория в подреакторном помещении энергоблока №3 КЛНАЭС в зоне контролируемого доступа (ЗКД); вспомогательное помещение в ЗКД для удаленного контроля параметров нейтринного детектора

Комплекс вспомогательных детекторов для регистрации космического излучения и измерений нейтронного и гамма-фона, измерений атмосферных мюонов

Научно-исследовательская инфраструктура
НИЦ «Курчатовский институт» на КАЭС

Система радиационной защиты, допускающая размещение нейтринных детекторов различного типа для проведения долгосрочных испытаний

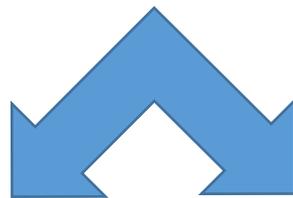
Лаборатория в подреакторном помещении энергоблока №3 КЛНАЭС в зоне контролируемого доступа (ЗКД); вспомогательное помещение в ЗКД для удаленного контроля параметров нейтринного детектора

Комплекс вспомогательных детекторов для регистрации космического излучения и измерений нейтронного и гамма-фона, измерений атмосферных мюонов



Научно-исследовательская инфраструктура
НИЦ «Курчатовский институт» на КАЭС

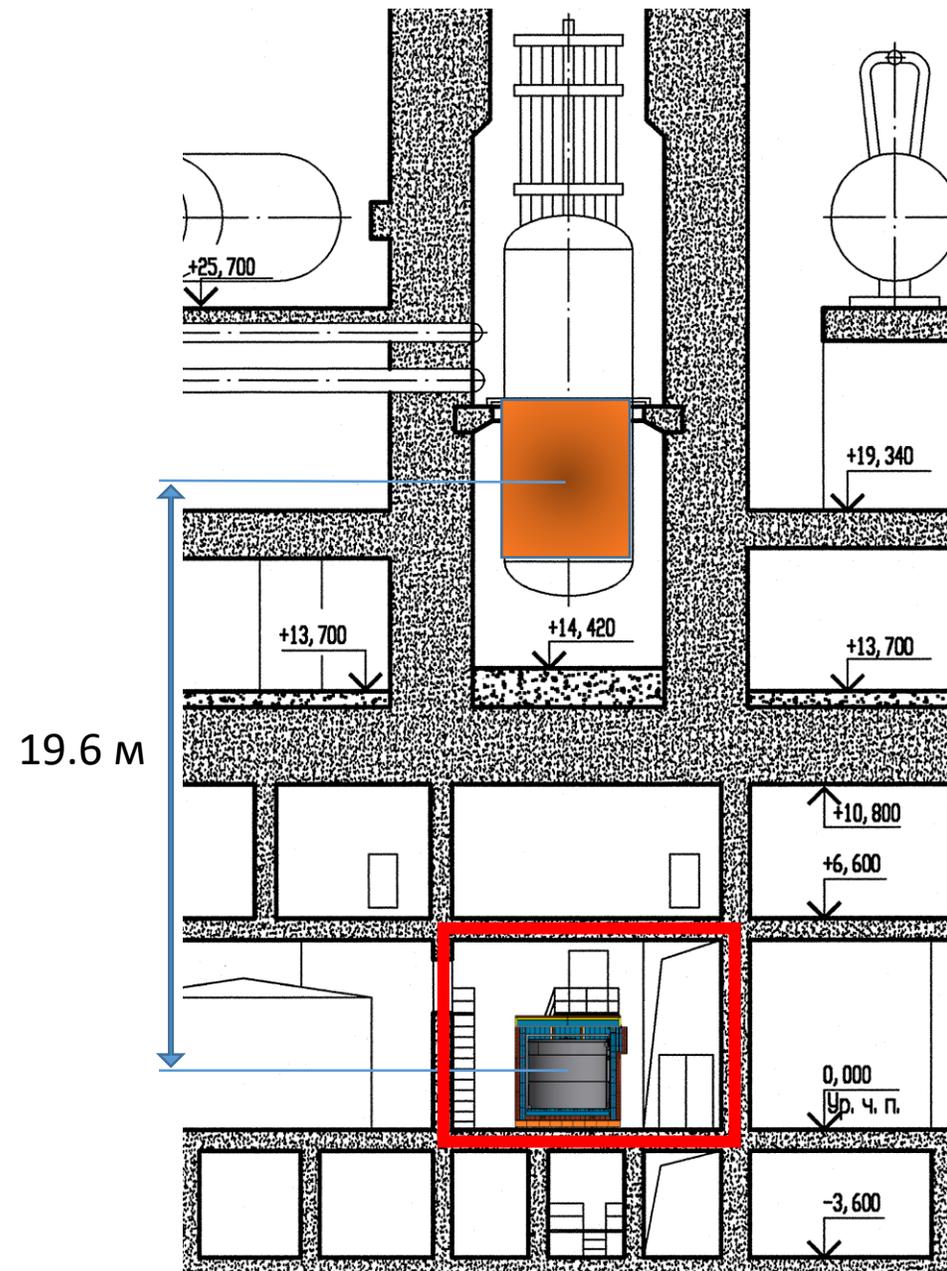
Система радиационной защиты, допускающая размещение нейтринных детекторов различного типа для проведения долгосрочных испытаний



Прототип промышленного детектора реакторных антинейтрино iDREAM – industrial **D**etector of **R**eactor **A**ntineutrinos for **M**onitoring

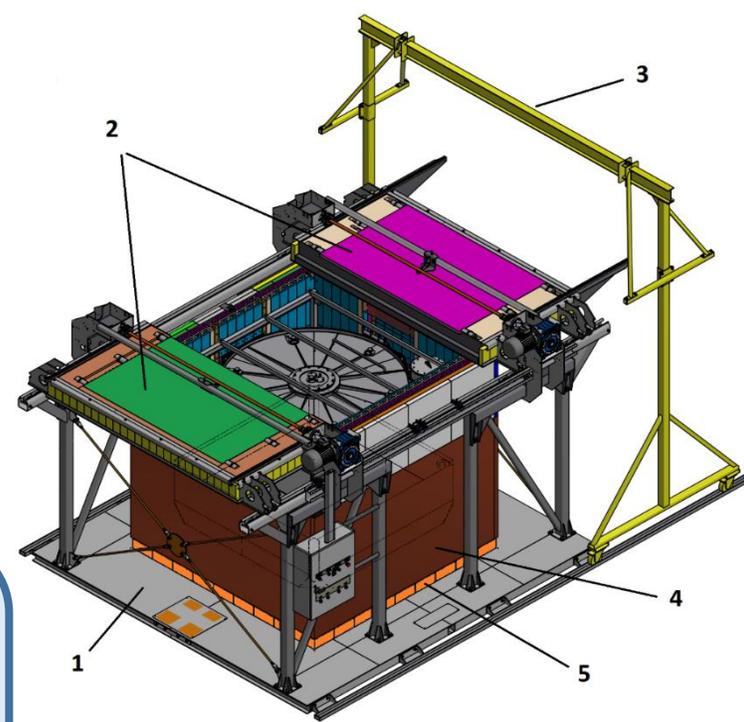
Лаборатория

- Помещение (~40 м²) в зоне контролируемого доступа (ЗКД) энергоблока №3 Калининской АЭС, на отметке 0.0 м, 20 м от центра активной зоны РУ ВВЭР-1000 (3 ГВт)
- Вспомогательное помещение в пределах ЗКД для удаленного контроля параметров нейтринного детектора, хранения оборудования
- Проведение работ регламентируется соглашением о взаимодействии и сотрудничестве между НИЦ «Курчатовский институт» и АО «Концерн Росэнергоатом» (2022-2026 гг., с возможностью продления)



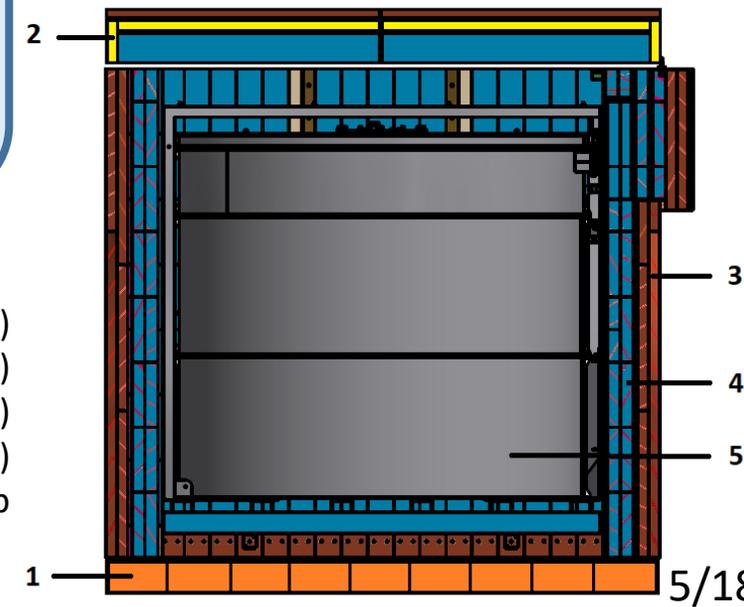
Защита

- 1 – разгрузочная платформа
- 2 – сцинтилляционные пластины
- 3 – монтажный кран
- 4 – пластины из п/э
- 5 – чугун

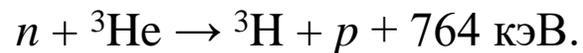
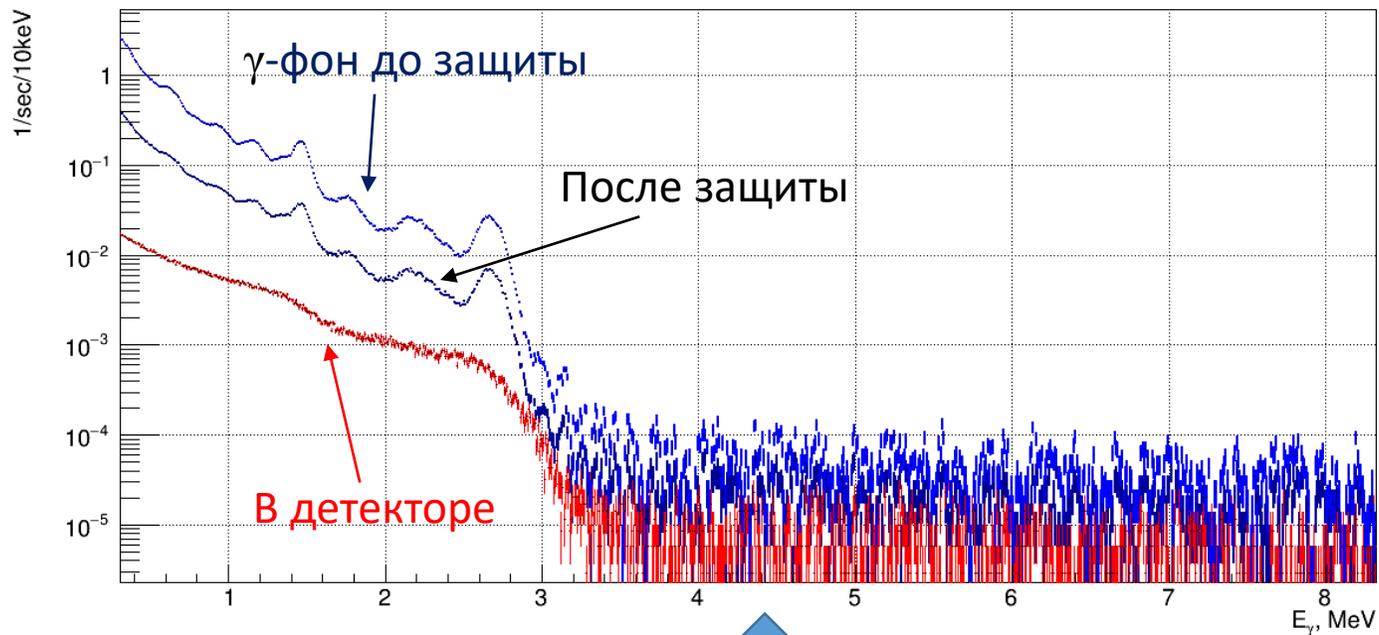


- ❑ Пространство 2x2x2 м³ внутри защиты для нейтринного детектора.
- ❑ Окна для вывода кабелей, сверху раздвижные створки.
- ❑ Возможность установки дополнительного слоя (чугун, свинец) с внешней стороны стенок.

- 1 (оранжевый) – чугун (14 см)
- 2 (желтый) – свинец (5 см)
- 3 (коричневый) – чистый п/э (10 см)
- 4 (синий) – борированный п/э (16 см)
- 5 – нейтринный детектор



Защита

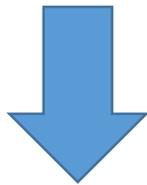


- Измерения при помощи сборки из ${}^3\text{He}$ -счетчиков с замедлителем.
- Фактор подавления защитой нейтронов >100.

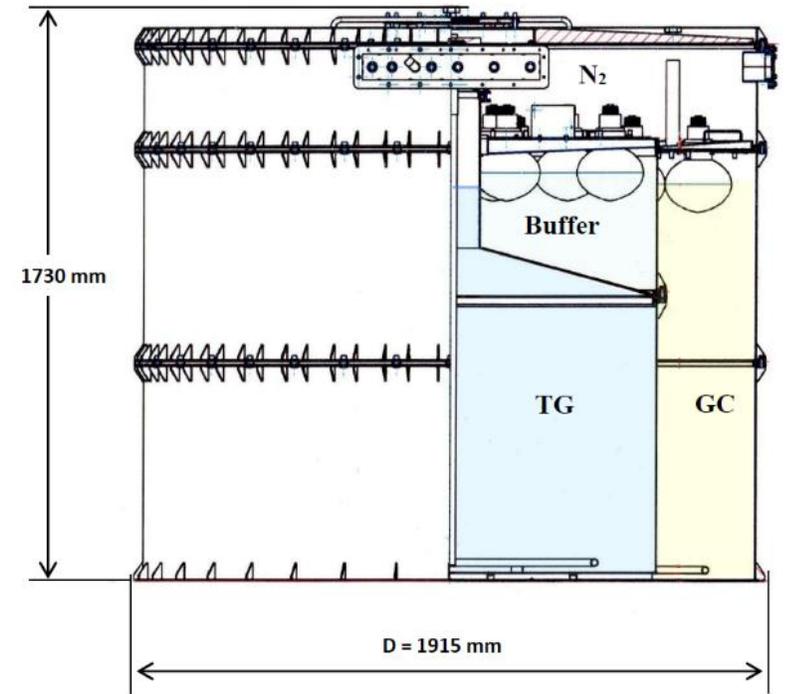
- Гамма-фон в подреакторном помещении измерен детектором на основе NaI(Tl) $d=h=90$ мм.
- Измеренный поток γ -квантов на защиту из мирового объема разыгран в GEANT4, статистика 4 сут. Подавление потока γ -квантов в 3÷8 раз, в зависимости от энергии.
- **Н.В.:** Детектор iDREAM дополнительно давит внешний γ -фон за счет наличия 30 см гамма-кетчера (по периметру) и 40 см буфера (сверху).

Нейтринный детектор

- Изначальные требования:
 - Детектор для прикладных задач, на основе доказанных технических решений, с прицелом на тиражирование
 - Простота монтажа и обслуживания
 - Экономически целесообразный



Детектор на основе жидкого сцинтиллятора, регистрация антинейтрино по обратному бета-распаду на протоне

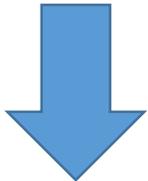


iDREAM – industrial **D**etector of **RE**actor **A**ntineutrinos for **M**onitoring:

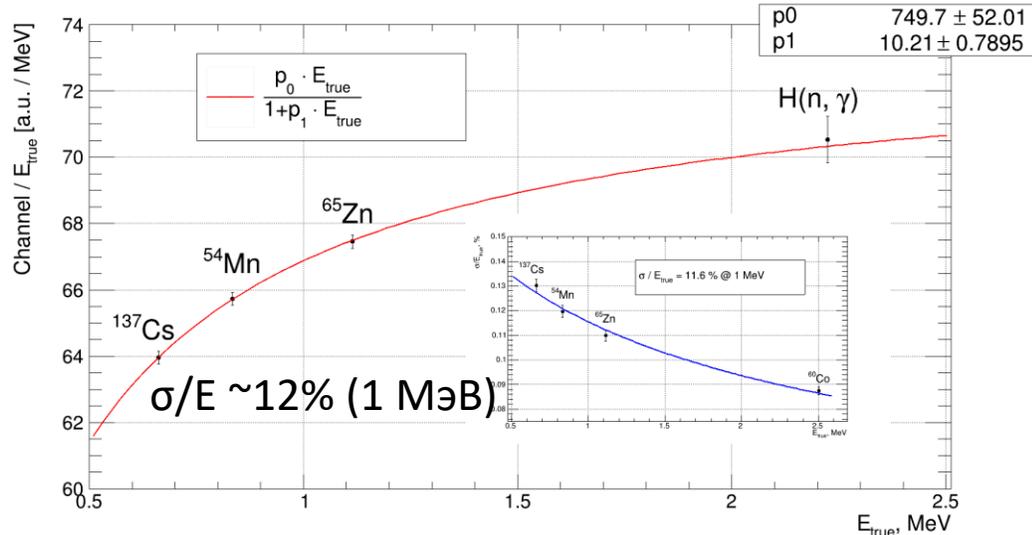
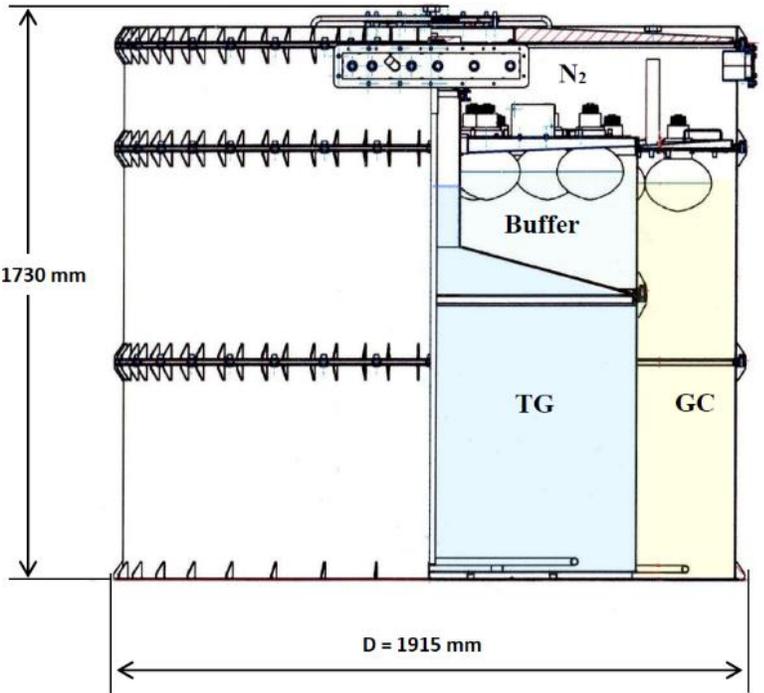
- Мишень (TG) – Gd-ЖОС (1 g/l) в стальном баке, 1.1 m³
- Гамма-кетчер (GC) – ЖОС без Gd во внешнем стальном баке, 1.8 m³
- Буфер – чистый ЛАБ, 0.5 m³
- 16 ФЭУ R5912 в мишени, 12 в гамма-кетчере
- Мюонные пластины сверху.

Нейтринный детектор

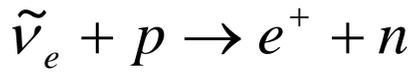
- Изначальные требования:
 - Детектор для прикладных задач, на основе доказанных технических решений, с прицелом на тиражирование
 - Простота монтажа и обслуживания
 - Экономически целесообразный



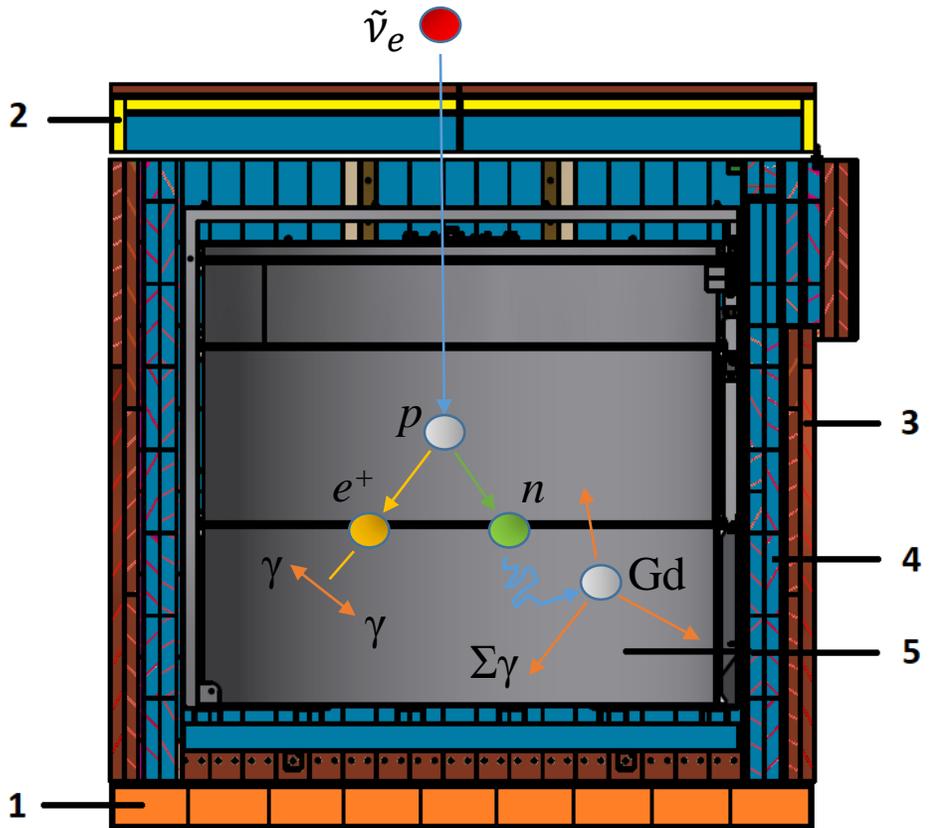
Детектор на основе жидкого сцинтиллятора, регистрация антинейтрино по обратному бета-распаду на протоне



Нейтринный детектор



$$E_{th} = 1,8 \text{ MeV} \quad E_{prompt} = E_\nu - 0,78 \text{ MeV}$$



Ввод в эксплуатацию – 2021
Непрерывный набор данных с 07.2022 г.

- 1 (оранжевый) – чугун (14 см)
- 2 (желтый) – свинец (5 см)
- 3 (коричневый) – чистый п/э (10 см)
- 4 (синий) – борированный п/э (16 см)
- 5 – нейтринный детектор



Gd-ЖОС

- ЛАБ + PPO + bis-MSB + Gd (0.1%), всего 1.1 м³, Gd в составе триметилгексаноата Gd(TMHA)₃
- Gd-ЖОС приготовлен в сотрудничестве с НИЦ «Курчатовский институт» – ИРЕА
 - Растворение Gd-концентрата (Gd-MS, 10 г/л) в ЛАБе, очистка TMHA и ЛАБа, использованного для приготовления Gd-MS – вакуумной дистилляцией
- За 2.5 г наблюдений деградации оптических и химических свойств Gd-ЖОС не отмечалось при условии постоянной, менее 20 °С температуры сцинтилляционного раствора и отсутствия контакта с атмосферой
 - Величина R_{Gd-H} стабильна в пределах $\pm 2.4\%$ ($\pm 3\sigma$)
 - Время захвата нейтрона τ стабильно в пределах $\pm 2\%$ ($\pm 3\sigma$)
 - Темп падения отклика детектора: $\sim 3\%$ /год

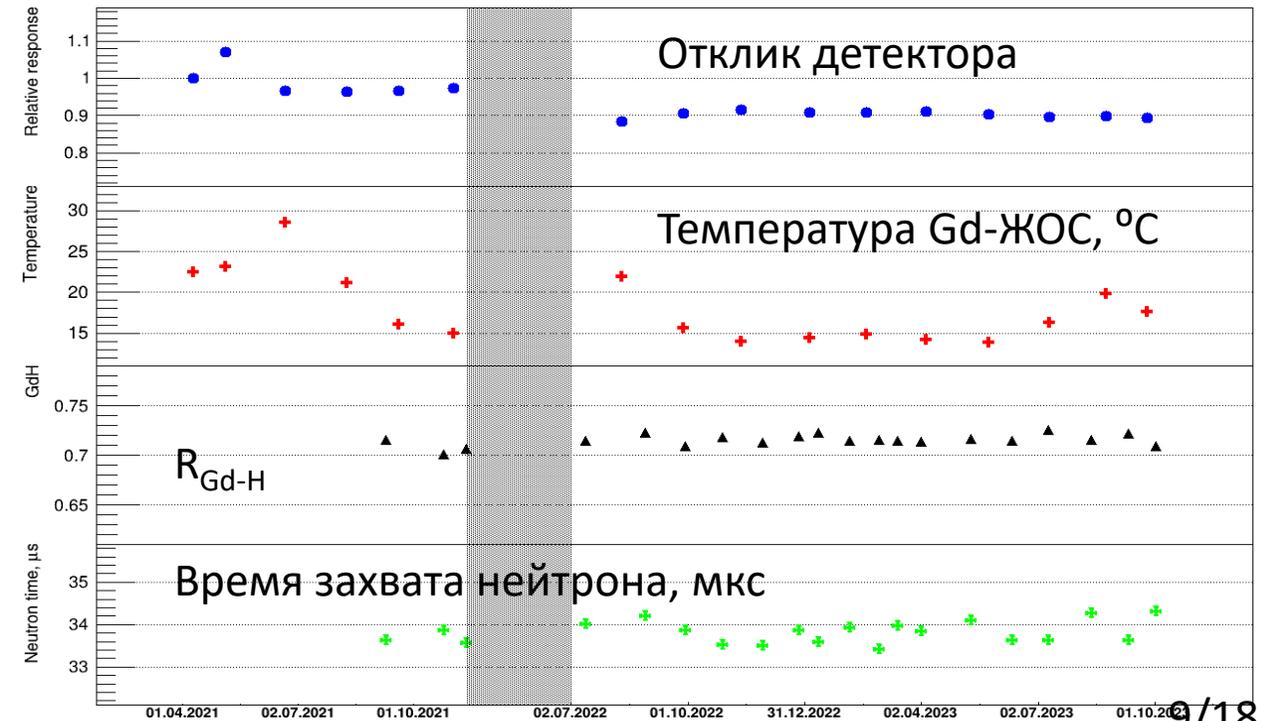
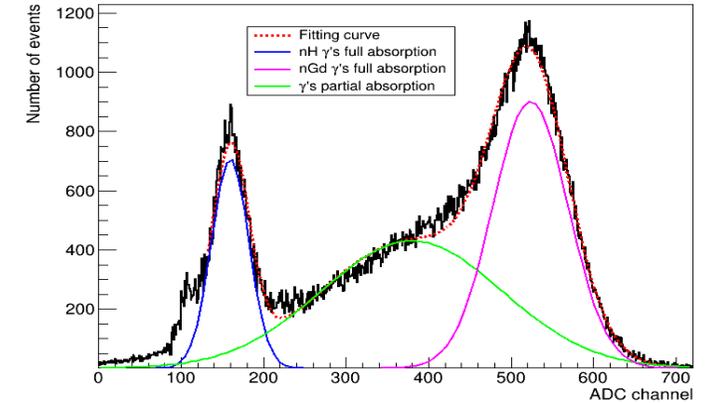
А. Абрамов и др., Письма в ЖТФ **49** (2023) 29

Зарядовый спектр захватов нейтронов от источника ²⁵²Cf в центре детектора iDREAM:

$$\frac{N_{Gd}}{N_H} = \frac{\sigma_{Gd}}{\sigma_H} \times \frac{\rho_{Gd}}{\rho_H}$$

$$R_{Gd-H} = N'_{Gd} / (N'_H + N'_{Gd})$$

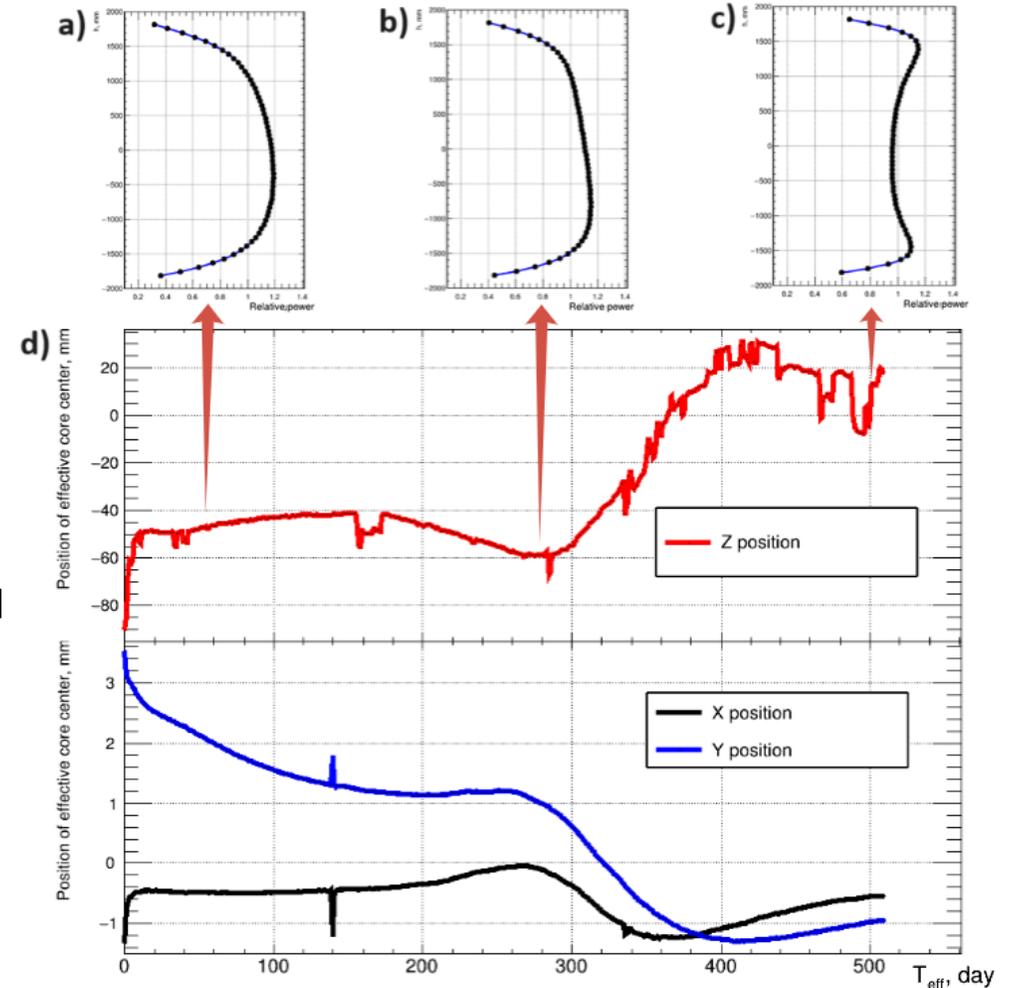
N'_{Gd} и N'_H - интегралы в пиках полного поглощения γ -квантов от захватов нейтронов гадолинием и водородом



Учет детальной геометрии активной зоны

- Размер активной зоны реактора ВВЭР-1000: $h=3.70$ м, $d=3.16$ м
- Расчет объемного распределения мощности и глубины выгорания для 163 ТВС в 60 слоях по высоте - по программе БИПР-7а, предназначенной для проектных и эксплуатационных расчетов ВВЭР
- Переход к объемному распределению долей деления ^{235}U , ^{239}Pu , ^{238}U , ^{241}Pu по программе ТВС-М

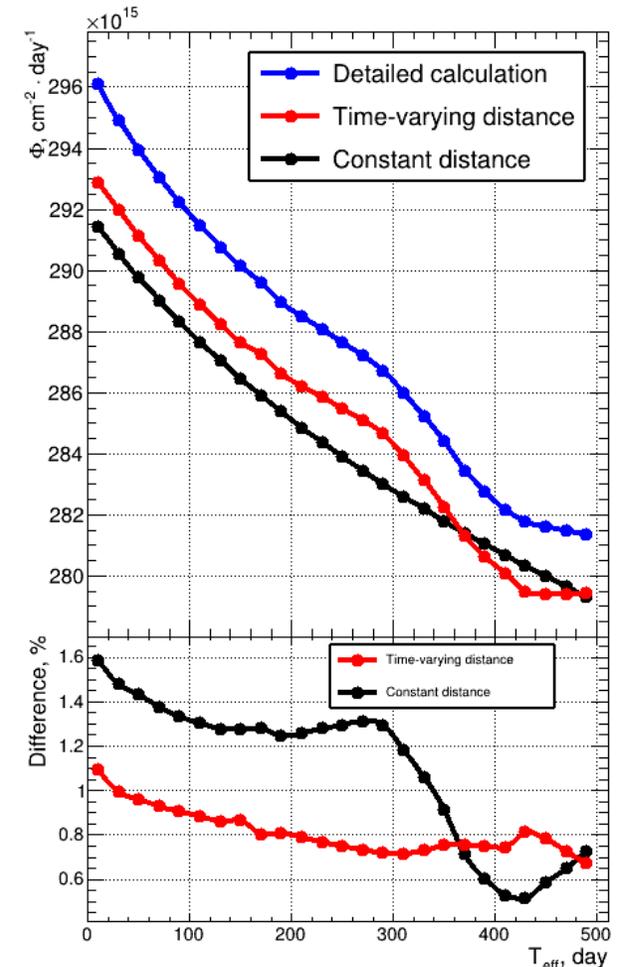
Усредненные по горизонтальной плоскости профили энерговыделения для начала (а), середины (b) и конца (c) кампании; (d) – изменение положения эффективного центра АЗ относительно ее геометрического центра по осям Z (красная кривая), X (черная) и Y (синяя) в зависимости от эфф. сут.



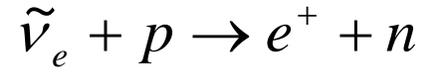
Учет детальной геометрии активной зоны

Поток антинейтрино в течение 13-й топливной кампании энергоблока №3 КАЭС на основе детального расчета (синий) и упрощенных моделей АЗ (черный – точечная АЗ с центром, равном геометрическому, красный – точечная АЗ, меняющая положение в соответствии с меняющимся центром энерговыделения).

- Вычисление потока антинейтрино в рамках модели спектров Курчатовского института (KI model: V. Kopeikin, M. Skorokhvatov, O. Titov, Phys. Rev. D **104** (2021) L071301), с учетом распределения долей деления нуклидов по объему АЗ
- Для небольших расстояний от реактора, сравнимых с размерами АЗ:
 - Детальный расчет дает бОльший поток антинейтрино в сравнении с упрощенными моделями точечной АЗ: для iDREAM максимальная поправка $\sim 0.5 \div 1.6\%$, в зависимости от периода топливной кампании
 - Появляется зависимость потока от направления на АЗ



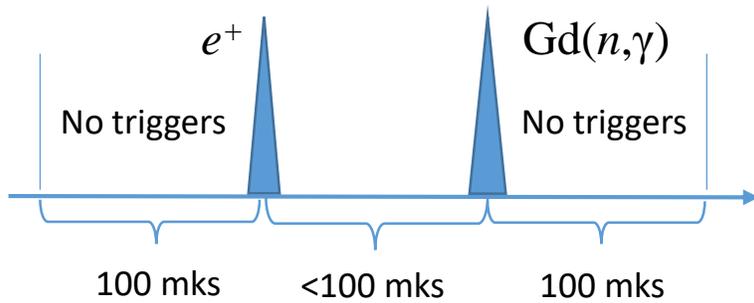
Сигнал от антинейтрино в iDREAM



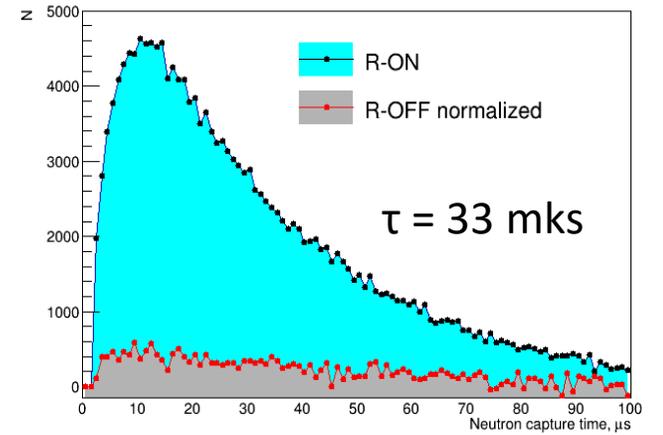
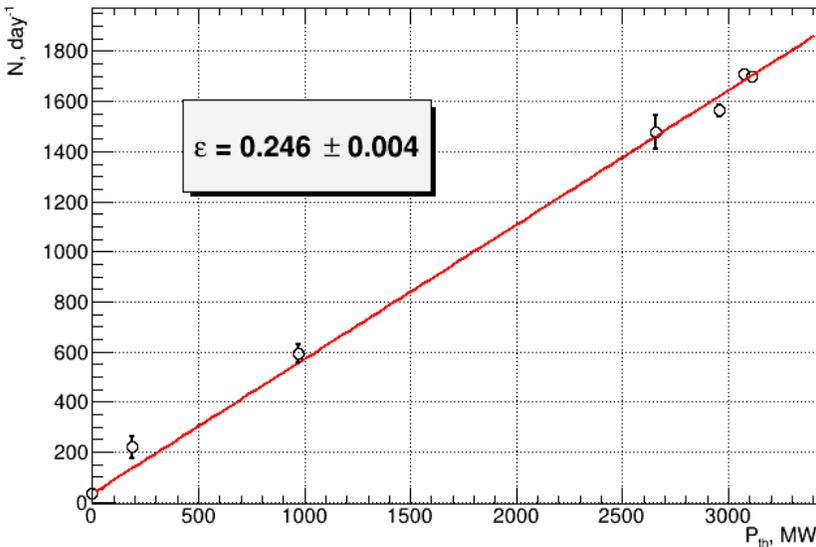
$$N_{det} = k \cdot \frac{P_{th}}{E_f} \cdot \langle \sigma \rangle, \quad k = \frac{\epsilon N_p}{4\pi L^2}$$

E_f from V. Kopeikin *et al*, Phys. Atom. Nucl. **67** (2004) 1963
 $\langle \sigma \rangle$ from V. Kopeikin *et al*, Phys. Rev. D **104** (2021) L071301

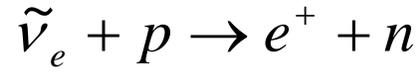
Эффективность ϵ извлекается из линейной зависимости среднесуточной скорости счета антинейтрино от мощности реактора.



3 MeV light



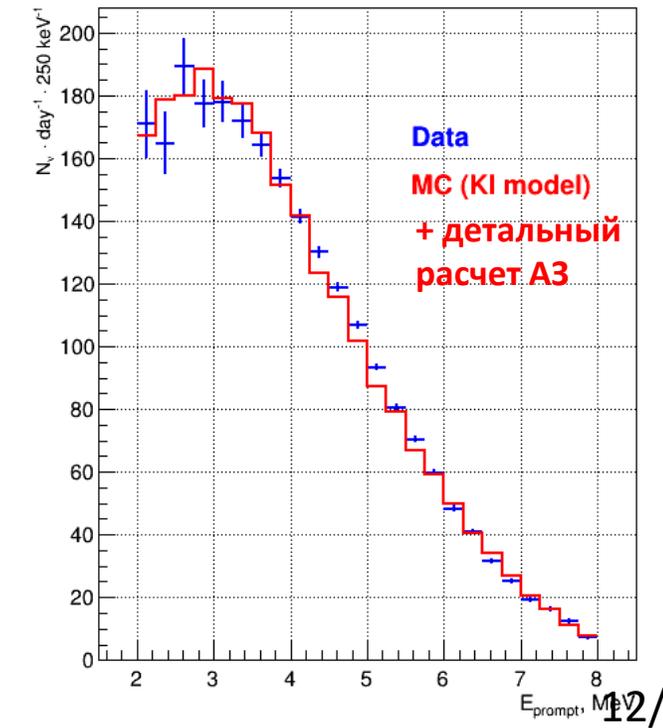
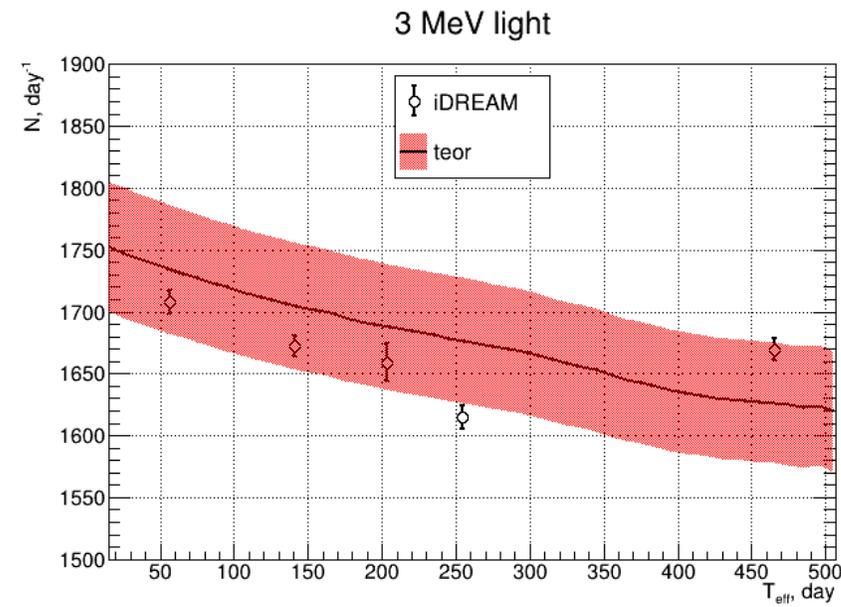
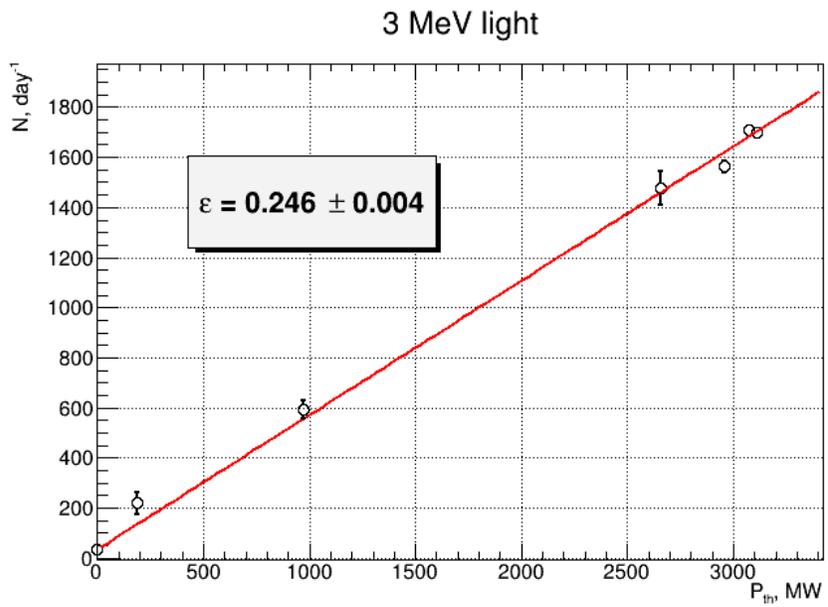
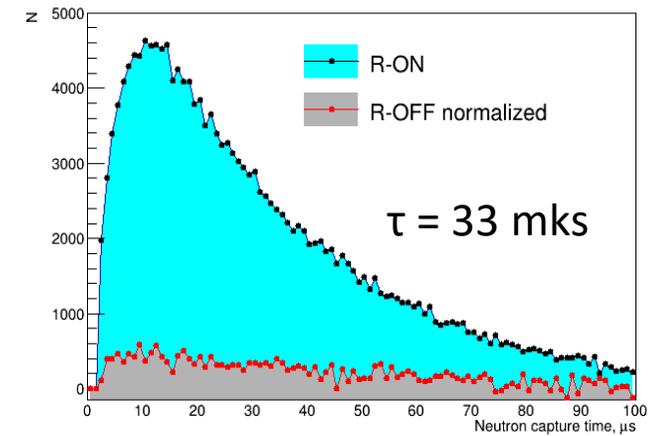
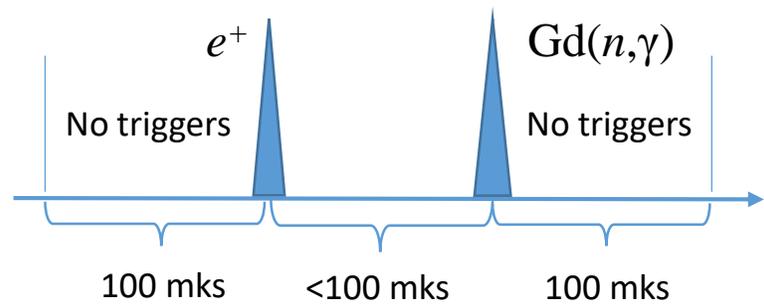
Сигнал от антинейтрино в iDREAM



$$N_{det} = k \cdot \frac{P_{th}}{E_f} \cdot \langle \sigma \rangle, \quad k = \frac{\epsilon N_p}{4\pi L^2}$$

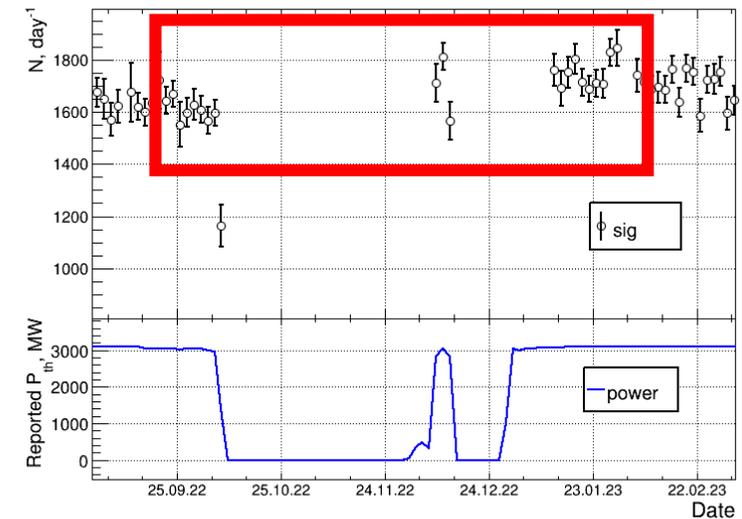
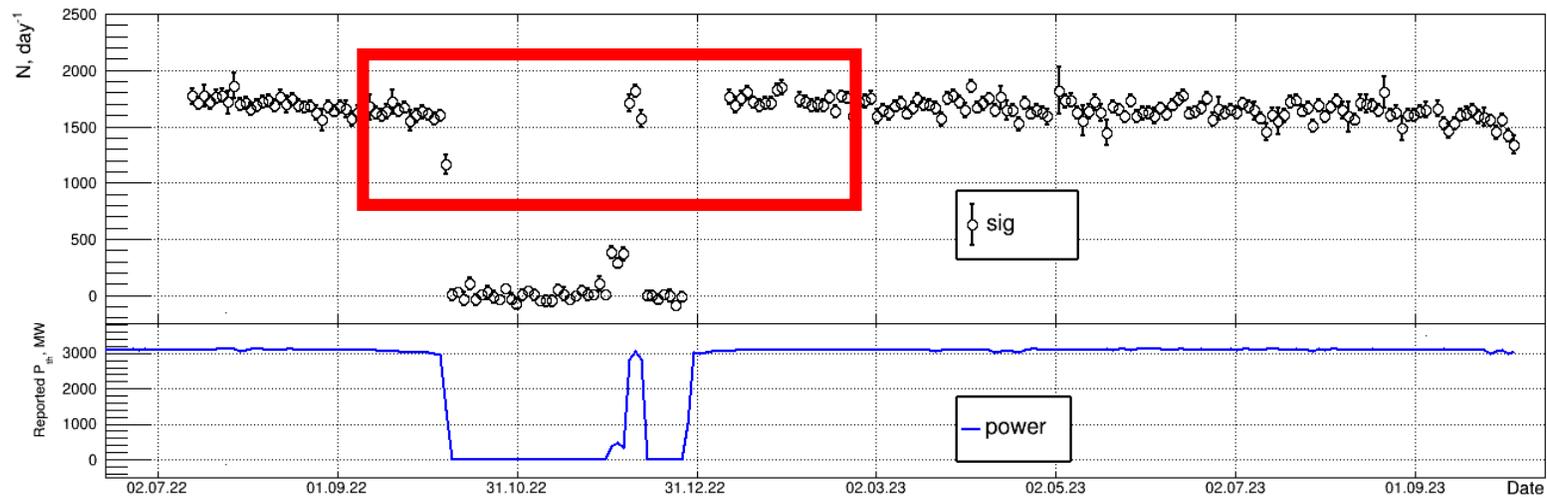
E_f from V. Kopeikin *et al*, Phys. Atom. Nucl. **67** (2004) 1963
 $\langle \sigma \rangle$ from V. Kopeikin *et al*, Phys. Rev. D **104** (2021) L071301

Эффективность ϵ извлекается из линейной зависимости среднесуточной скорости счета антинейтрино от мощности реактора.



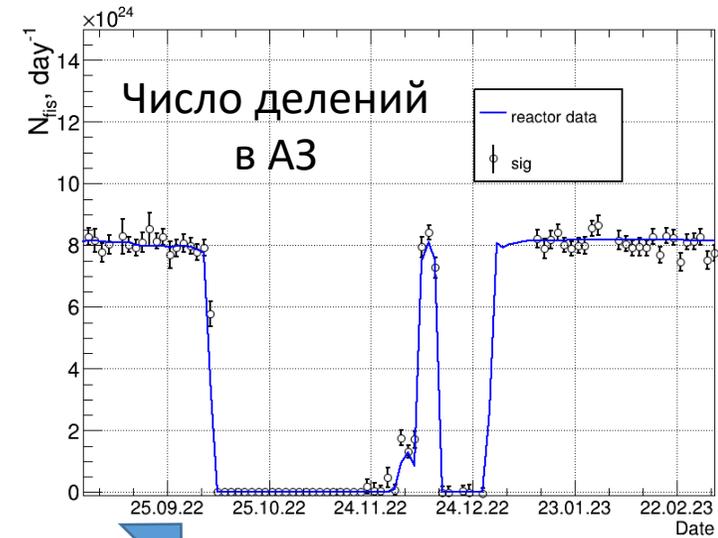
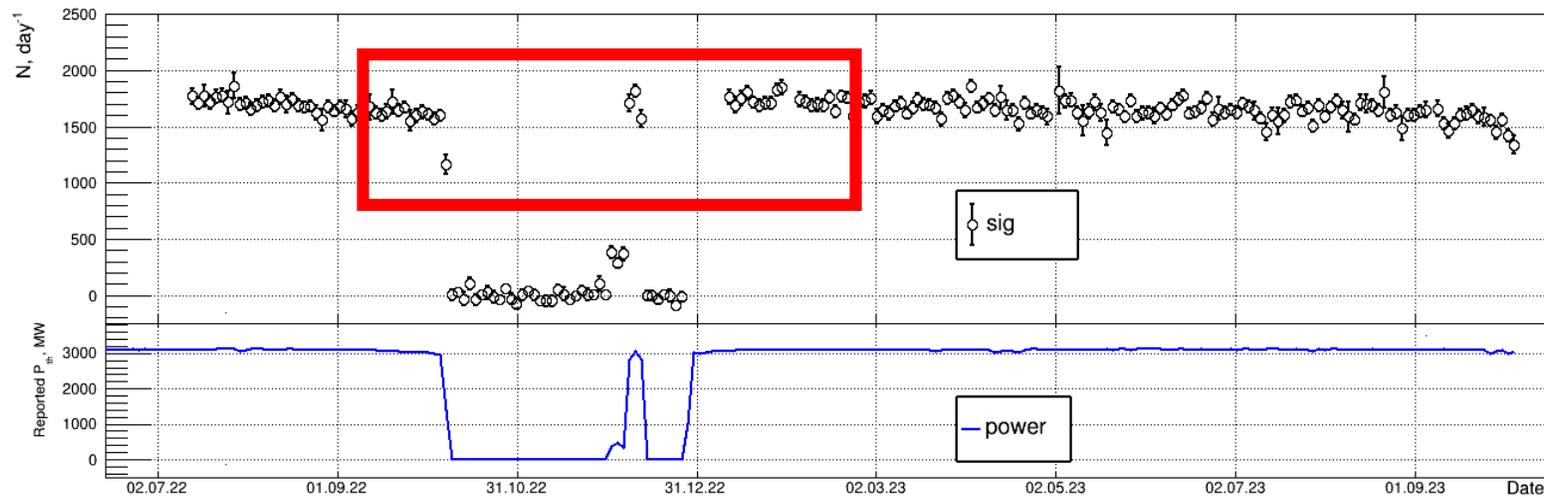
Сигнал от антинейтрино в iDREAM

- $T_{\text{live}}(\text{R-ON}) = 217$ сут., $T_{\text{live}}(\text{R-OFF}) = 41$ сут.
- $E_{\text{prompt}} > 3$ МэВ, 5 МэВ $< E_{\text{delayed}} < 10$ МэВ
 - Преимущества высокого порога: поправка на неравновесную составляющую в спектре антинейтрино (В.И. Копейкин, М.Д. Скорохватов, ЯФ **80** (2017) 142) и вклад от ОЯТ из бассейна выдержки суммарно $< 1\%$
- Учен вклад в поток антинейтрино от соседних блоков №2 (1.2%) и №4 (1.6%) по графикам их мощности



Сигнал от антинейтрино в iDREAM

- $T_{\text{live}}(\text{R-ON}) = 217$ сут., $T_{\text{live}}(\text{R-OFF}) = 41$ сут.
- $E_{\text{prompt}} > 3$ МэВ, $5 \text{ МэВ} < E_{\text{delayed}} < 10$ МэВ
 - Преимущества высокого порога: поправка на неравновесную составляющую в спектре антинейтрино (В.И. Копейкин, М.Д. Скорохватов, ЯФ **80** (2017) 142) и вклад от ОЯТ из бассейна выдержки суммарно $< 1\%$
- Учен вклад в поток антинейтрино от соседних блоков №2 (1.2%) и №4 (1.6%) по графикам их мощности



$$N_{\nu} \sim \sum_i f_i(t) \langle \sigma \rangle(t)$$

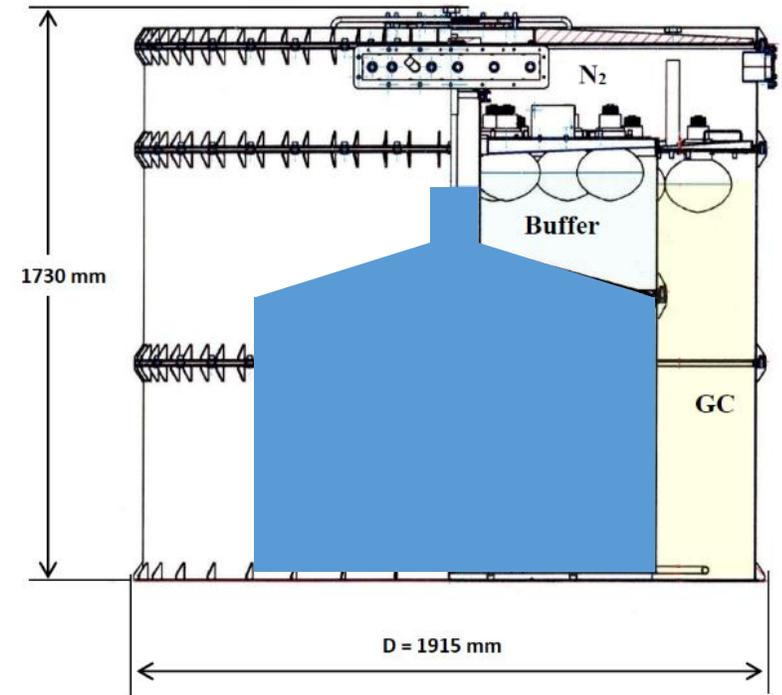
Над чем мы работаем - 1

- Замена внутреннего стального (сборного) бака и стальной крышки с ФЭУ на акриловые летом 2024 года
- Достижение герметичности сочленения нижней и верхней частей баков по фланцам (акрил) в условиях агрессивной среды (ЛАБ) – нетривиальная задача
- Мы ожидаем подавление собственного фона детектора в 2-5 раз.

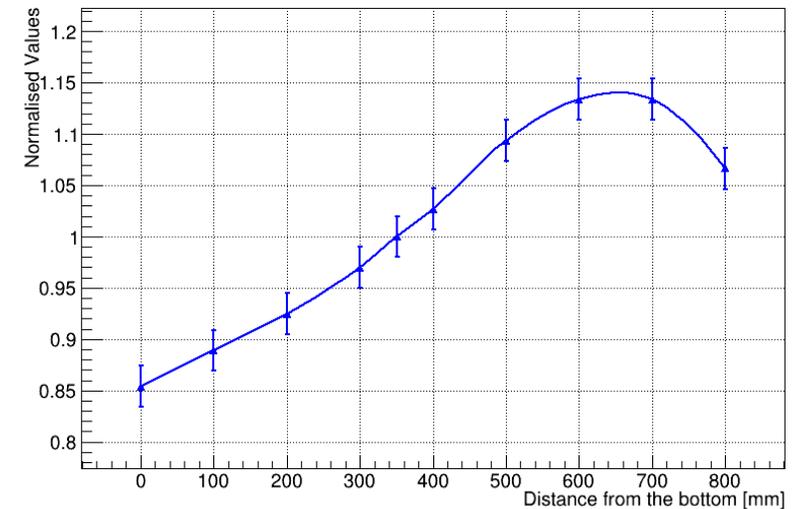


Над чем мы работаем - 2

- Геометрическая неоднородность светособирания iDREAM ~30% из-за «сложной» геометрии мишени с Gd-ЖОС (акриловая мембрана с трубкой, удерживающая на себе 400 л буферного ЛАБа).

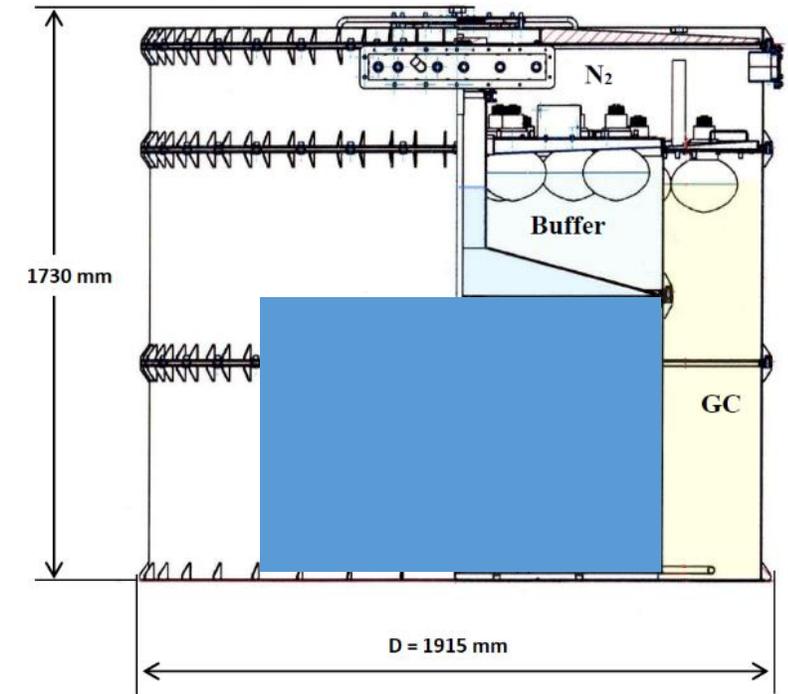


⁶⁰Co along Z axis Regular(blue) & After(red) removing 100 l from TG

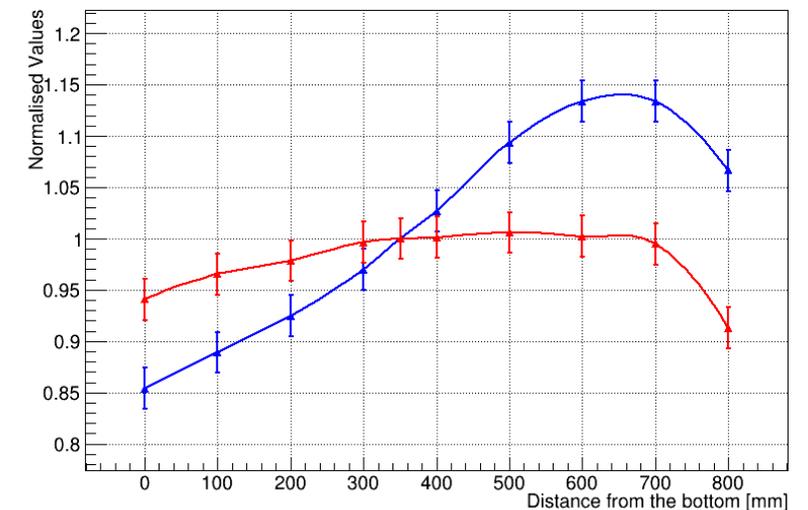


Над чем мы работаем - 2

- Геометрическая неоднородность светособирания iDREAM ~30% из-за «сложной» геометрии мишени с Gd-ЖОС (акриловая мембрана с трубкой, удерживающая на себе 400 л буферного ЛАБа).
- Слив 100 л Gd-ЖОС из-под мембраны позволяет получить цилиндрическую мишень и значимое улучшение неоднородности: 30% → 10%
- Набор данных с цилиндрической мишенью: ИДЕТ СЕЙЧАС



⁶⁰Co along Z axis Regular(blue) & After(red) removing 100 l from TG



Перспективы внедрения

- В рамках работ по договору с АО «Наука и инновации» на выполнение НИОКР «Разработка нейтринного детектора для дистанционного контроля активной зоны реактора на новых физических принципах» в 2019-2021 гг. для установки iDREAM достигнут и защищен уровень технологического развития TRL 5 (согласно Приказу №1/420-П от 24.04.2018 ГК «РОСАТОМ»).
- АО «Концерн Росэнергоатом» официально уведомило о готовности к рассмотрению возможности внедрения результатов работ в свою хозяйственную деятельность после достижения TRL 7.

Заключение

- На энергоблоке №3 КЛНАЭС действует научная инфраструктура, которая позволяет проводить исследования в потоке антинейтрино от промышленного реактора, измерять в динамике фоновые условия в подреакторном помещении.
- Синтезирован и испытан Gd-содержащий жидкий сцинтиллятор на основе ЛАБа, 1.1 м³. Раствор является стабильным на протяжении 2.5 лет наблюдений, при условиях поддержания постоянной температуры на уровне менее 20 °С и отсутствия контакта с атмосферой.
- В рамках испытаний установки iDREAM продолжается накопление статистики взаимодействий антинейтрино. Модернизация установки летом 2024 г.
- Для iDREAM подтвержден уровень технологического развития TRL 5. Работы направлены на достижение TRL 6 с целью выхода на внедрение технологии в хозяйственную деятельность АО «Концерн Росэнергоатом».