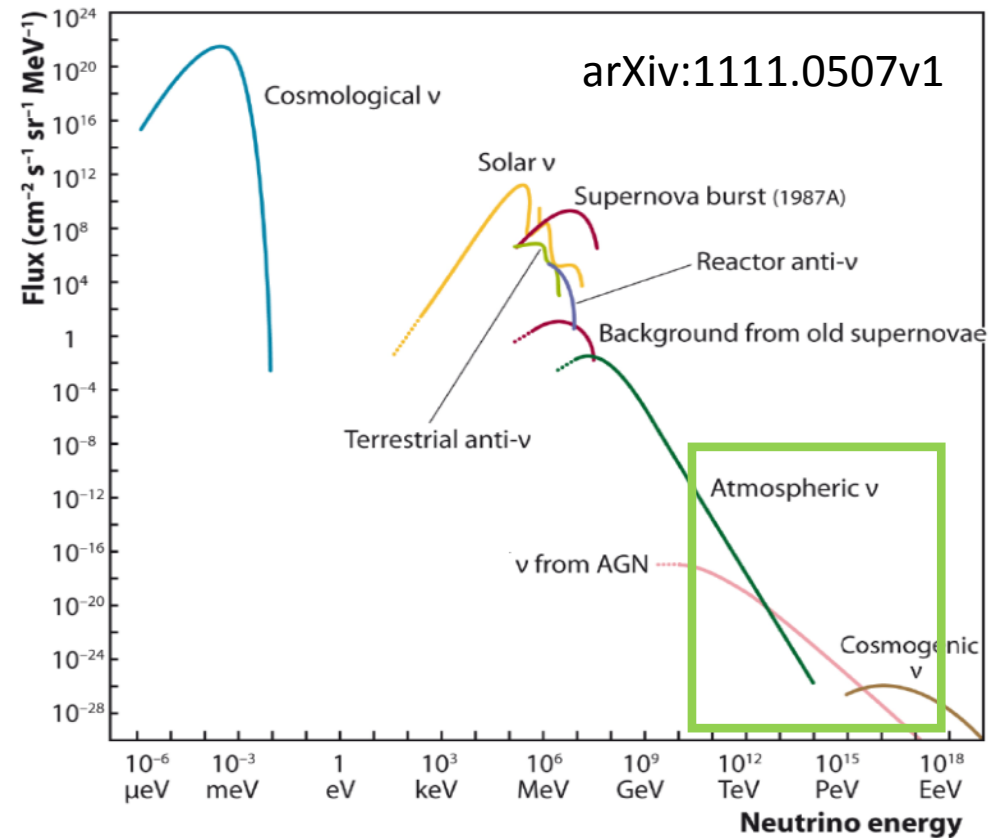
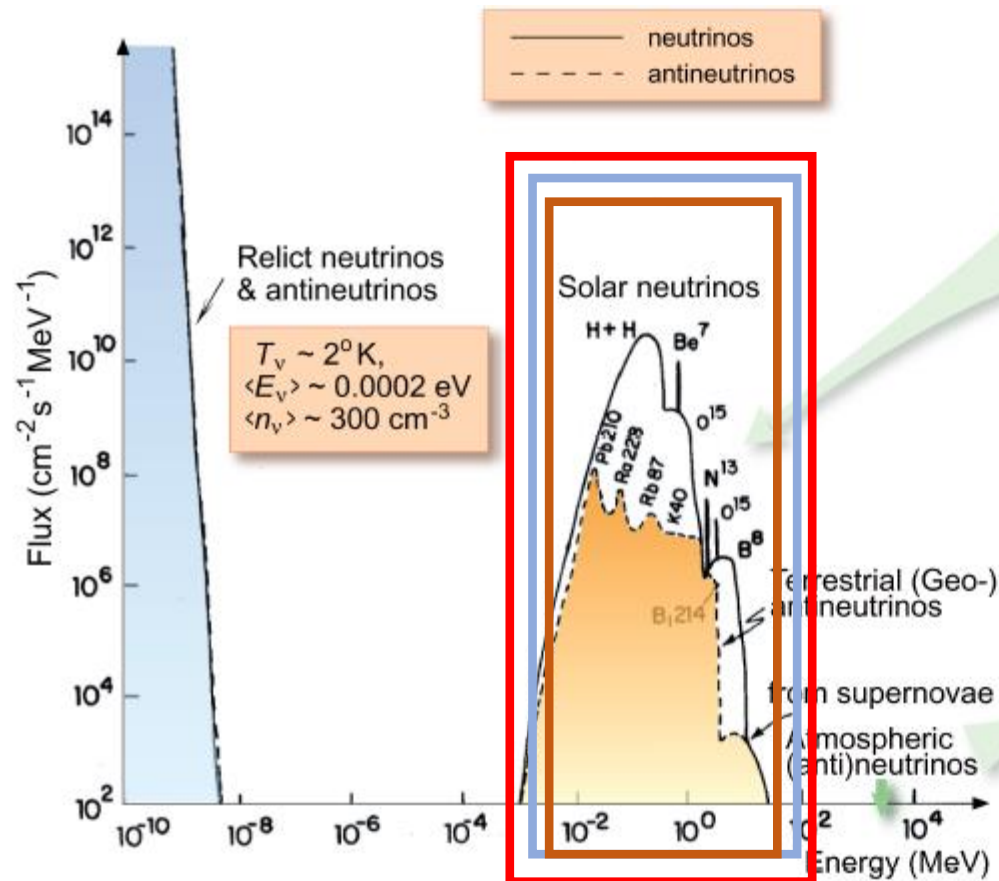


Конференция НИИЯФ МГУ

Физика нейтрино в ОЭПВАЯ фундаментальные и прикладные исследования

*Чепурнов А.С., Широков Е.В., Громов М.Б., Николаев А.С.
+ аспиранты и студенты физического факультета МГУ*

26.02.2024



Реликтовые нейтрино - энергия 10^{-4} поток $10^{13}-10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

Солнечные нейтрино - $\sim 1 \text{ кэВ} - \sim 15 \text{ МэВ}$ поток $10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

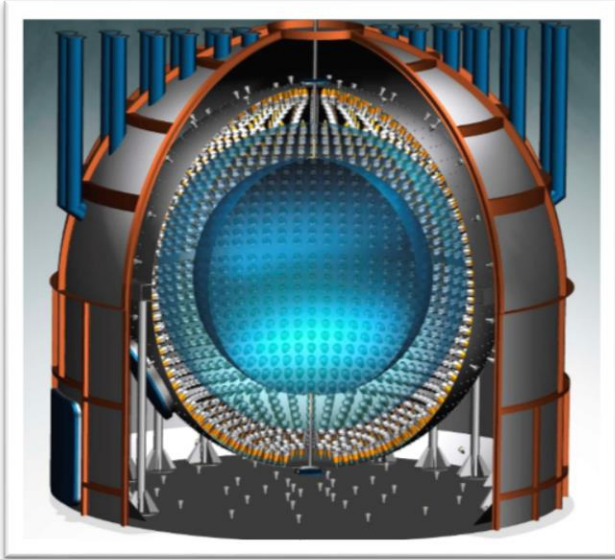
Недра земли (геонейтрино) - $\sim 1 \text{ кэВ} - \sim 3.3 \text{ МэВ}$ поток $10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

Реакторные нейтрино - $\sim 1 \text{ кэВ} - \sim 9 \text{ МэВ}$ (1 ГВт – 10 м) поток $\sim 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

Космические лучи - $\sim >100 \text{ МэВ}$ поток $10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

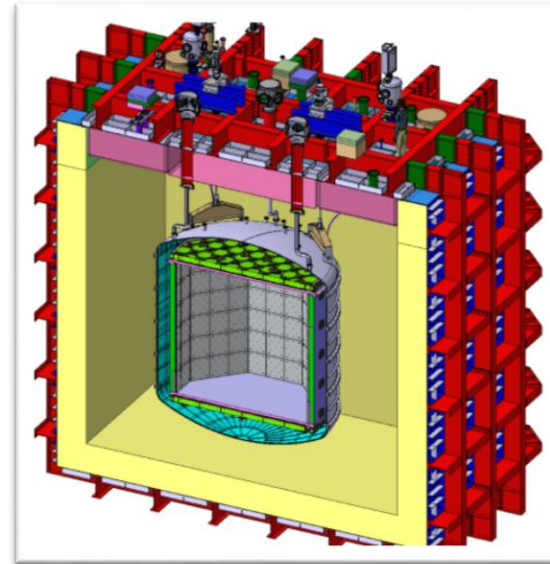
НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ

Исследование солнечных и
земных (гео)нейтрино



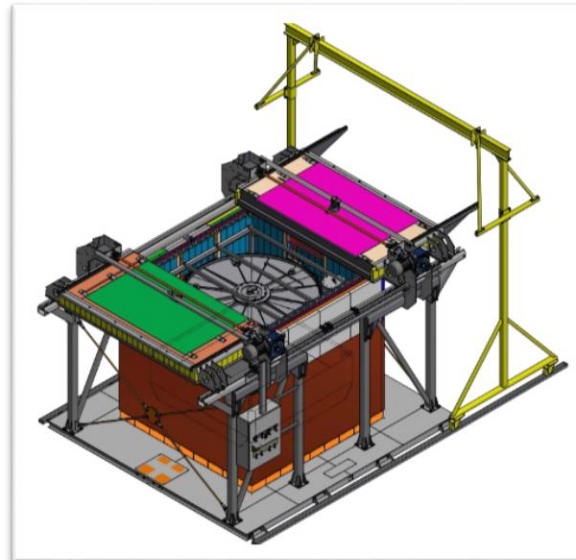
Эксперимент
Borexino

Регистрации частиц тёмной
материи/солнечных нейтрино



TeV-PeV нейтринный телескоп

Регистрация и исследование
реакторных антинейтрино



Эксперименты
iDREAM, TAO (JUNO)

Эксперименты
DarkSide-50, DarkSide-20k,
DarkSide-LowMass



Эксперимент
Baikal- GVD

Сцинтилляционный/черенковский метод регистрации частиц через процесс рассеяния и/или специальные реакции

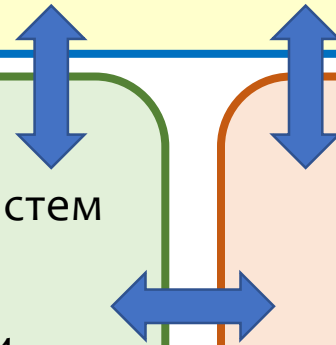
Состав и особенности используемой экспериментальной методики:

- стратегия и тактика проведения долгосрочных низкофоновых экспериментов в подземных низкофоновых лабораториях
- низкий порог регистрации событий по энергии при широком диапазоне регистрируемых энергий
- исследование имеющихся и разработка новых низкофоновых материалов
- специальные методики скрининга материалов (измерения уровней остаточной радиоактивности)
- новые сцинтилляторы
- новые принципы и приборы для регистрации слабых фотонных сигналов
- разработка электроники и ПО с учетом требований высокой надежности низких шумов и высокого быстродействия

Моделирование

- Geant4 создание моделей отдельных подсистем детекторов и моделей детекторов в целом
- NeuCBOT, SaG4n, TALYS and etc расчёт и/или моделирование ядерных реакций для оценки фоновых условий

Анализ и обработка экспериментальных данных



Исследование солнечных и земных нейтрино в эксперименте Borexino (Италия)

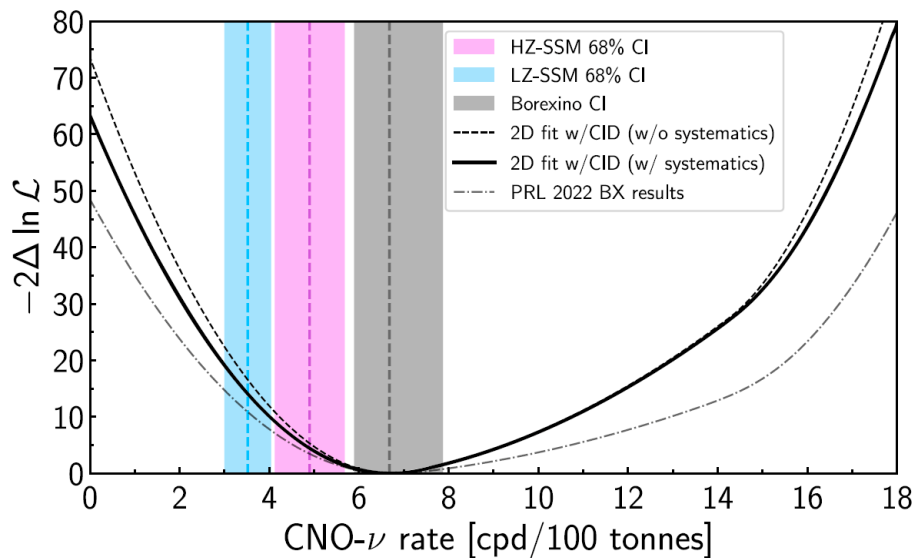
Детектор Borexino завершил свою работу 7 октября 2021 года, проработав 14.5 лет
Сцинтиллятор слит, ведётся демонтаж некоторых частей детектора

Ведётся анализ данных, который продлится ещё около 2 лет

Основные цели на 2022-2023 гг.	Публикации
Итоговые результаты по измерению потока CNO-нейтрино с учётом и без ограничения на ^{210}Bi	<i>Phys. Rev. Lett.</i> 129 , 252701 (2022) <i>Phys. Rev. D</i> 108 , 102005 (2023)
Совместный анализ данных всех фаз измерений (2007-2021) <ul style="list-style-type: none">○ Итоговые значения измеренных потоков pp- и ^7Be-нейтрино,○ рекордная точность для потока pp-нейтрино (было 11%, станет 8%)○ Новый рекордный предел на эффективный магнитный момент нейтрино○ Новый рекордный предел на время жизни электрона по отношению к гипотетическому распаду на нейтрино и моноэнергетический фотон	Планируются в 2024 и 2025 гг.
Определение направления прихода нейтринного излучения в сцинтилляционном детекторе	<i>Phys. Rev. Lett.</i> 128 (2022) 9, 091803 <i>Phys. Rev. D</i> 105 (2022) 5, 052002
Сезонные вариации потока солнечных нейтрино и определение параметров орбиты Земли	<i>Astroparticle Physics</i> 145 , 102778 (2023)

Итоговые результаты эксперимента Borexino по исследованию солнечных CNO-нейтрино

Анализ: **Многопараметрическая подгонка** энергетического спектра и пространственного распределения событий в третьей фазе измерений с применением **ограничения** на направление прилёта солнечных нейтрино **методом CID**

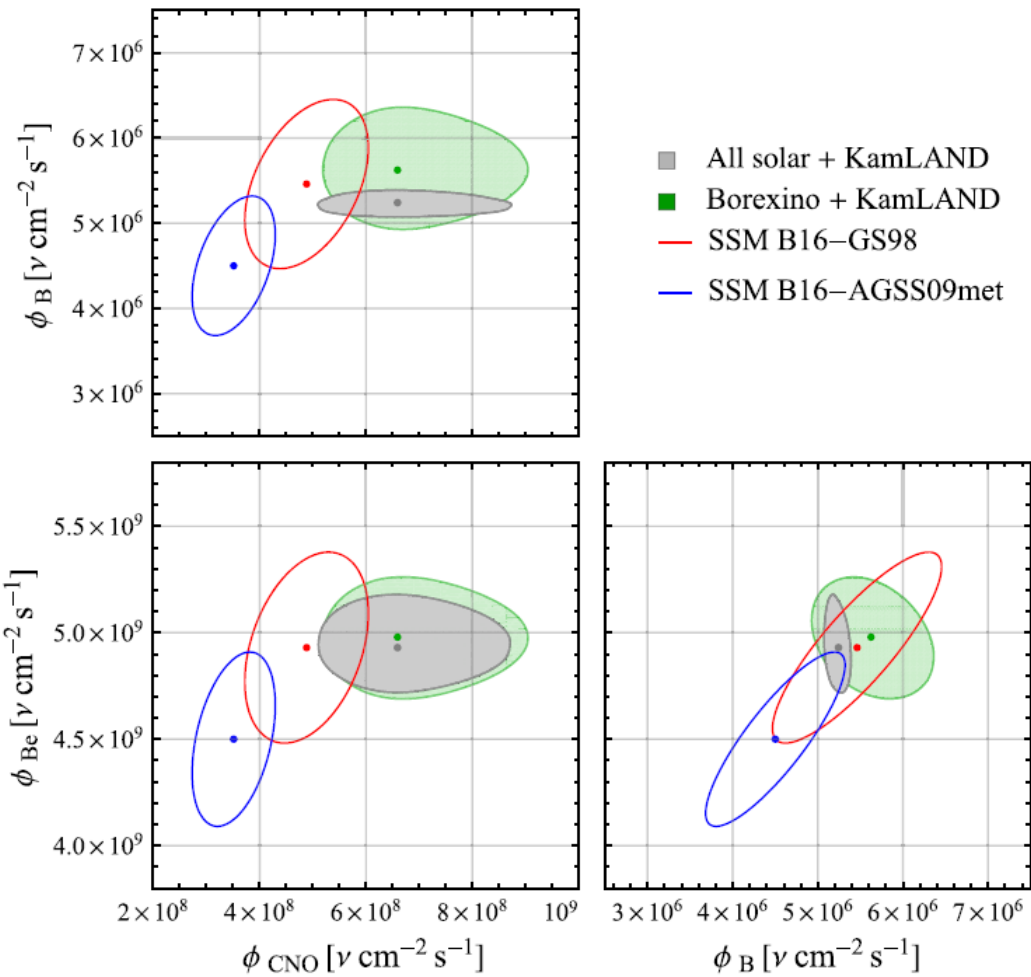


Самое точное измерение потока CNO-ν на текущий момент
Отсутствие CNO-нейтрино отвергается с достоверностью **8σ**
Согласуется со ССМ с высокой металличностью,
вариант с низкой металличностью исключается на уровне 3.2σ CL

Phys. Rev. D **108**, 102005 (2023)

	<i>Phys. Rev. Lett.</i> 129 , 252701 (2022)	<i>Phys. Rev. D</i> 108 , 102005 (2023)
Поток CNO-ν, ν / (см ² * с)	$6.6_{-0.9}^{+2.0} \times 10^8$	$6.7_{-0.8}^{+1.2} \times 10^8$
Ошибка, %	22	15

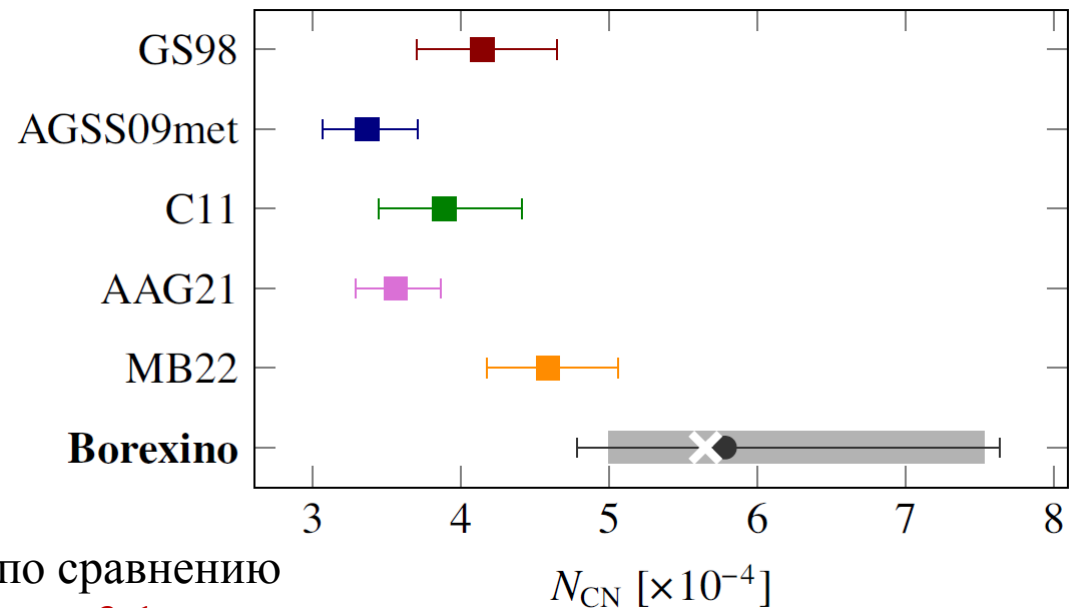
Измерение потока CNO-нейтрино с помощью детектора Borexino и влияние результатов на Стандартную модель Солнца (СМС)



Скорость счёта нейтринных событий
 $R_{\text{CNO}} = 6.7^{+2.0}_{-0.8}$ соб./ (день \times 100 т)

Поток CNO-нейтрино
 $6.6^{+2.0}_{-0.9} \times 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

Распространённость углерода и азота в Солнце по отношению к распространённости водорода
 $N_{\text{CN}} = 5.78^{+1.86}_{-1.00} \times 10^{-4}$

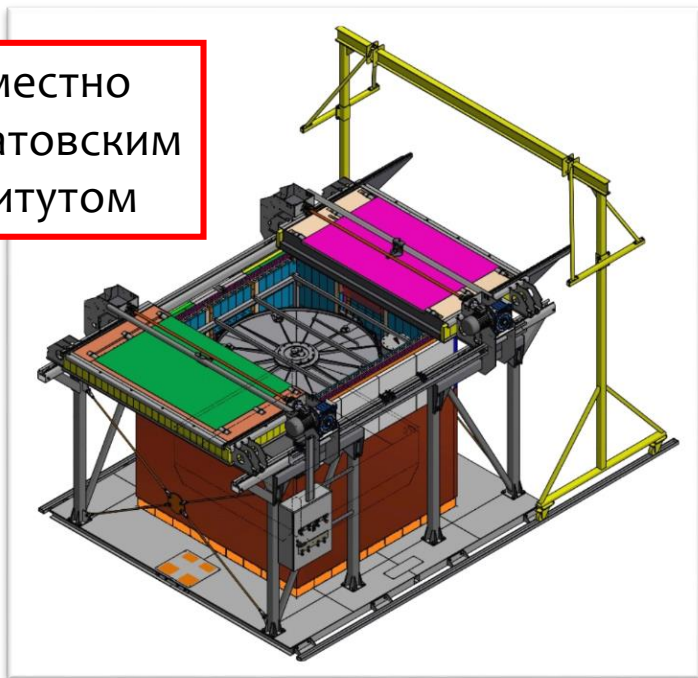


СМС с высокой металличностью (B16-GS98) предпочтительна по сравнению с СМС с низкой металличностью (B16-AGSS09met) **на уровне 3.1 σ**

Регистрация и исследование реакторных антинейтрино

Эксперимент iDREAM

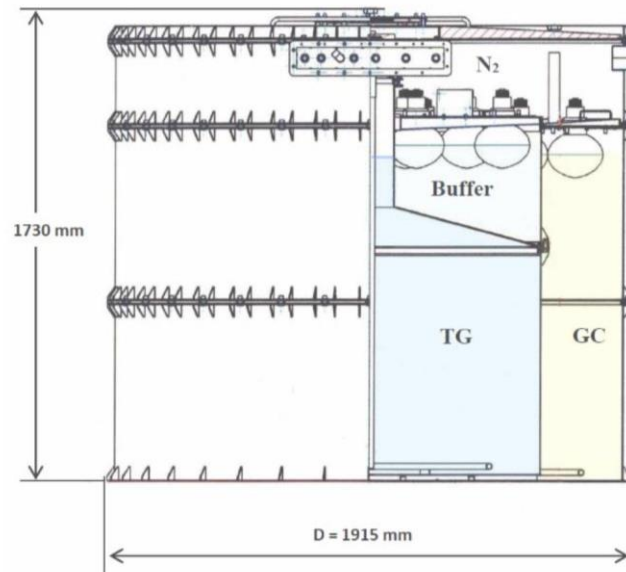
Совместно
с Курчатовским
институтом



Демонстрационный эксперимент по контролю работы ядерных реакторов с помощью нейтринных детекторов

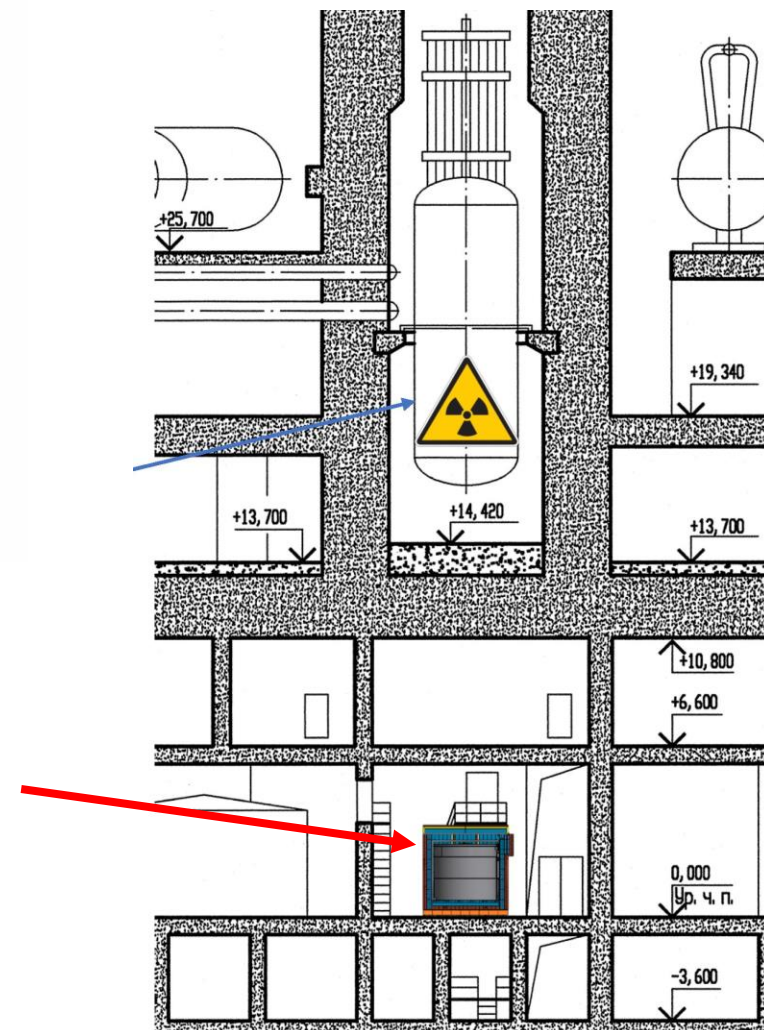
- Детектор перевезён и установлен на КАЭС
- Измерения проведены с включённым и выключенным реактором
- Выполняется анализ данных
- Планируется модернизация детектора

○ Опубликовано статьи : *JINST* 17 P09001 (2022), *Phys. Part. Nuclei* 54, 468–473 (2023), *Phys. Atom. Nuclei* 86, 1389–1393 (2023)



- Мишень (TG) 1м³ 1г/л Gd-ЛАБ ЖОС
- Гамма-кетчер (GC) – 1.8м³ ЛАБ ЖОС
- Буфер (Buffer) - 0.5 м³ ЛАБ
- 16 + 12 ФЭУ R5912
- Мюонное вето из ПОС
- Пассивная защита из ПЭ(Br)

3 ГВт ВВЭР реактор
(3 энергоблок Калининской АЭС)



Регистрация антинейтрино в детекторе iDREAM

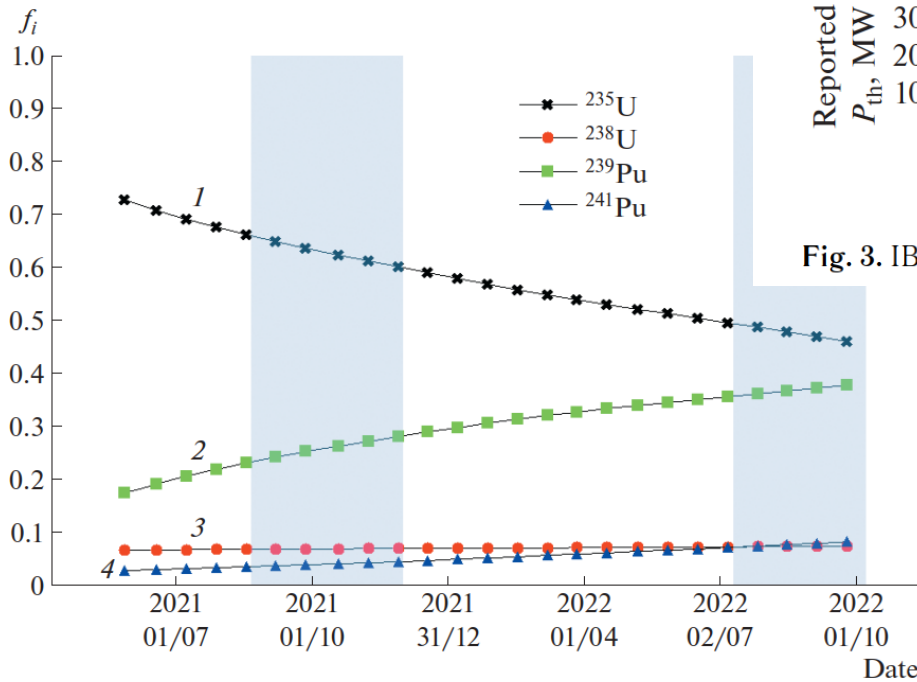


Fig. 4. Fission fraction evolution within the reactor campaign: 1— ^{235}U , 2— ^{239}Pu , 3— ^{238}U , 4— ^{241}Pu . Shaded bands indicate the time periods covered by iDREAM data.

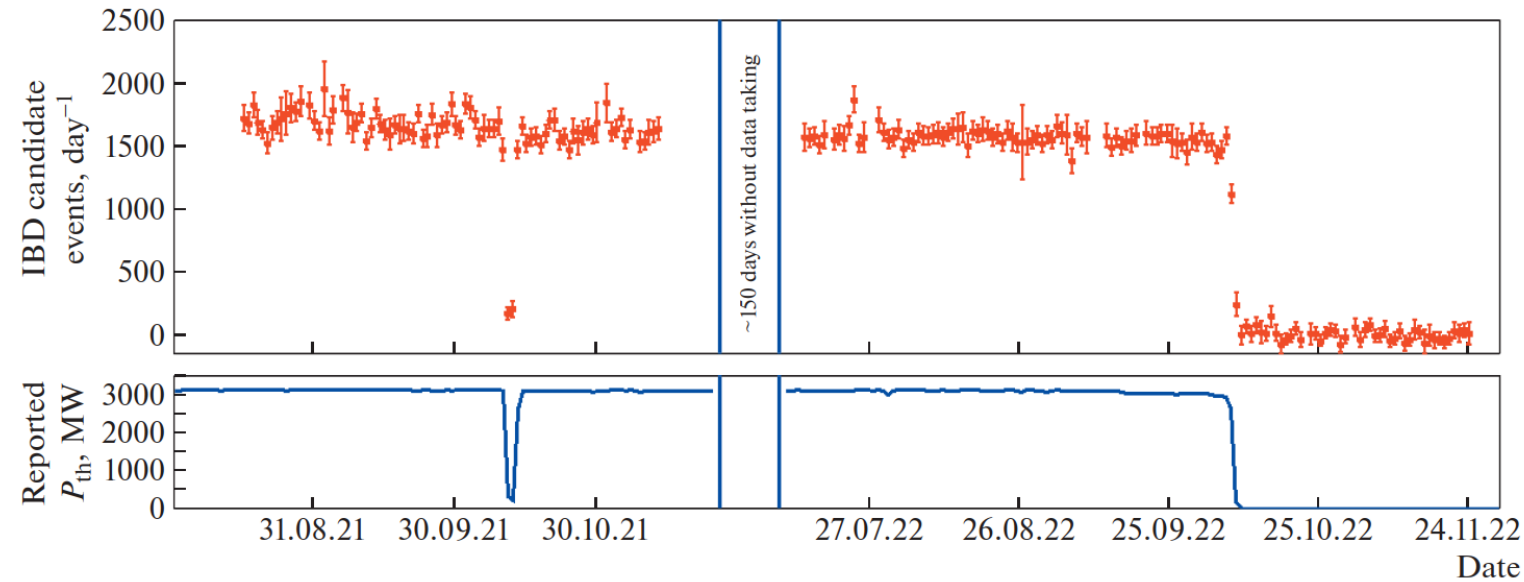
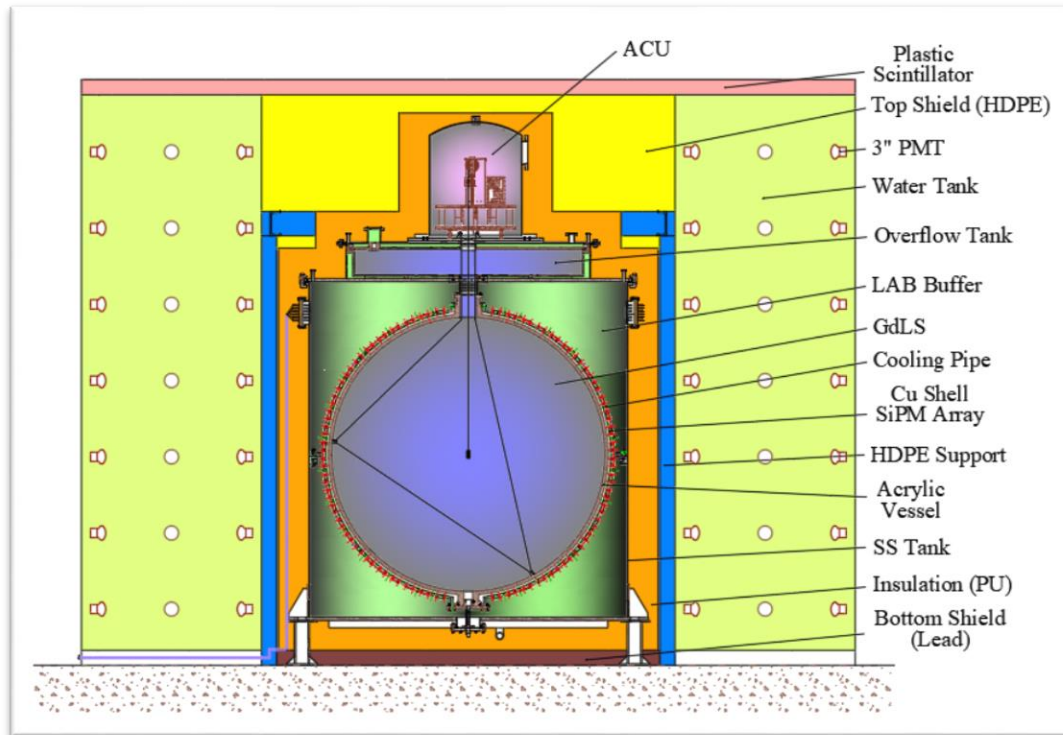


Fig. 3. IBD candidate events' rate (markers with error bars) and the reported thermal power P_{th} (continuous line below).

Первые результаты по реакторным антинейтрино, полученные в течение 101,7 (27,5) дней работы детектора в режиме R-ON (R-OFF). Измеренная частота возникновения антинейтрино в зависимости от f_{239} была сопоставлена с моделью реакторного спектра Курчатовского института, показывающим, что выгорание топлива отчетливо видно.

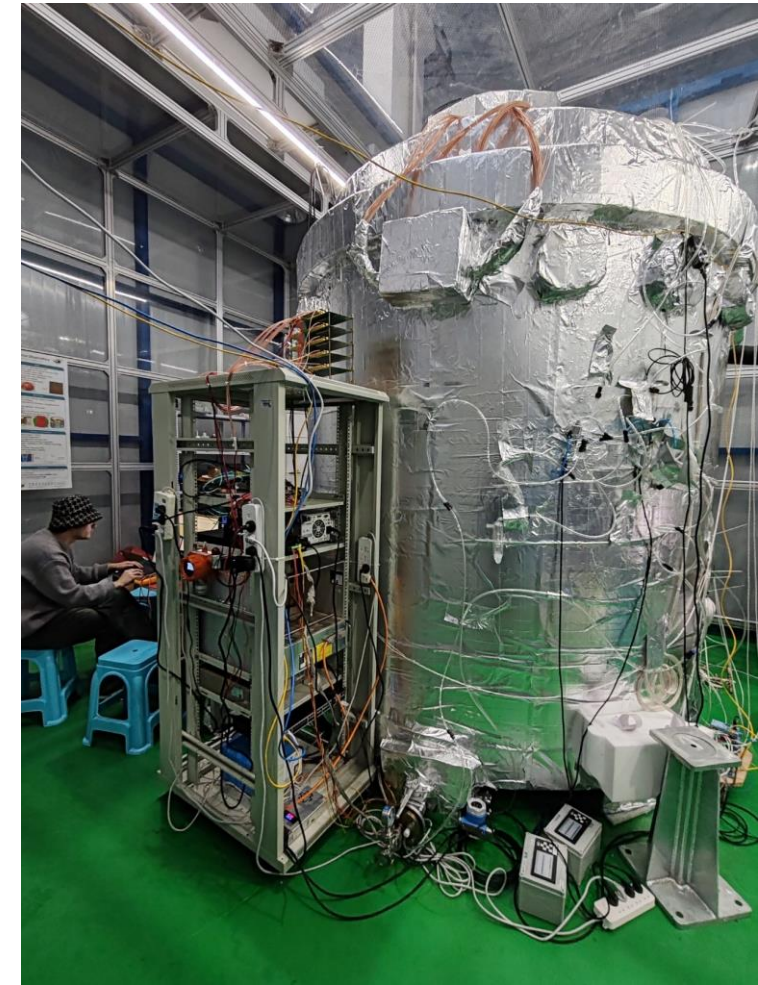
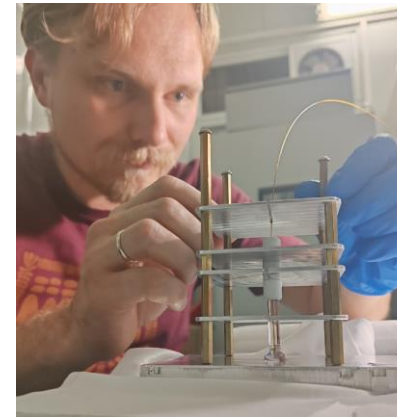
Детектор ТАО (эксперимент JUNO, Китай)



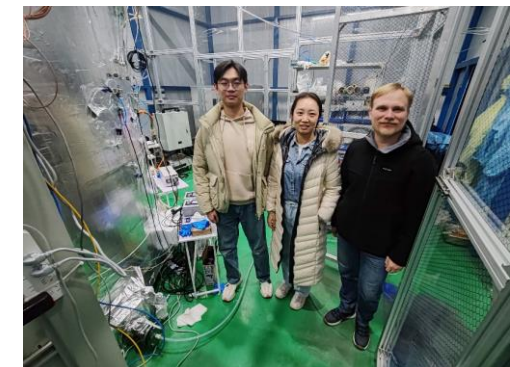
Обеспечение эксперимента JUNO опорным экспериментальным (модельно независимым) спектром реакторных антинейтрино

Группа из НИИЯФ МГУ отвечает за светодиодную калибровочную систему (оборудование, ПО, моделирование, анализ данных).

2023: тестирование системы на прототипе детектора



Работы по сборке 1:1 прототипа детектора ТАО и установке системы светодиодной калибровки в феврале, июле и ноябре 2023 года в ИЕР (Пекин)



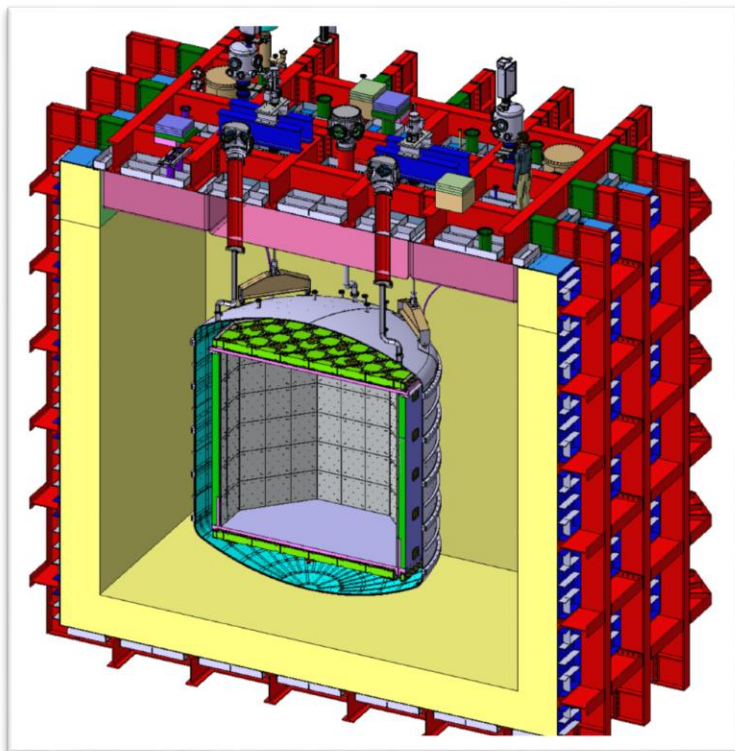
Поиск частиц тёмной материи в эксперименте DarkSide (Италия)

Цель: прямая регистрация частиц тёмной материи

Метод: наблюдение рассеяния частиц тёмной материи на ядрах и электронах мишени в двухфазной аргоновой время-проекционной камере (LAr-TPC)

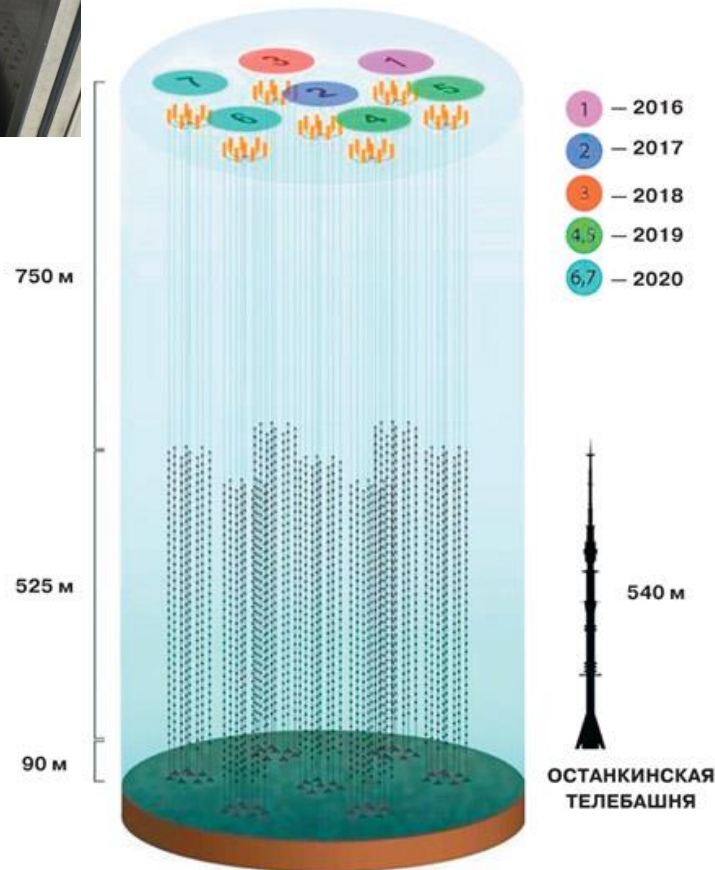
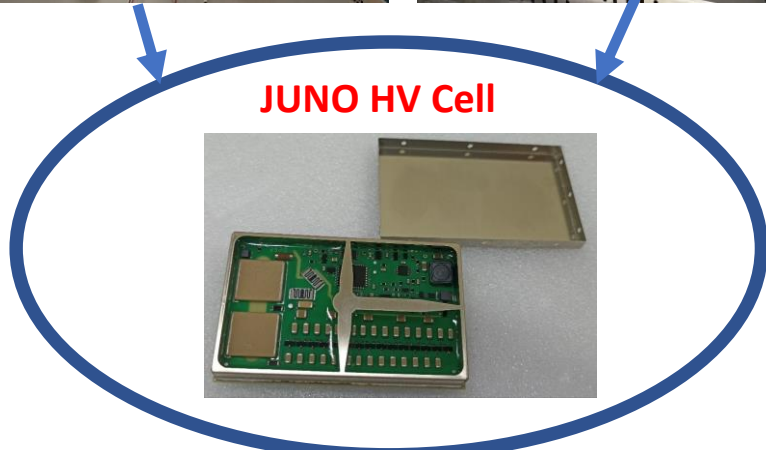
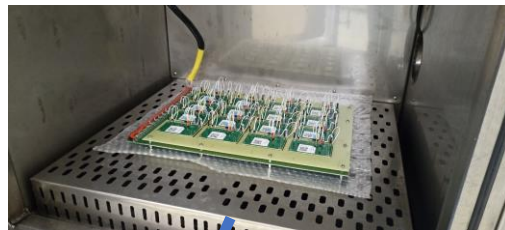
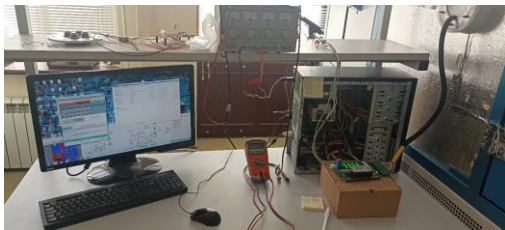
Вклад группы из НИИЯФ МГУ (2022-2023 гг.):

- 1) Расчёт фона от (α, n) реакций, протекающих в материалах детектора из-за наличия урана и тория; разработка ПО для расчётов (NeuCBOT); анализ доступности и качества данных по (α, n) реакциям (Ядерная физика, 2023, Т. 86, № 2, стр. 353-360, ещё одна публикация готовится)
- 2) Поиск лёгких частиц тёмной материи с массами около $1 \text{ ГэВ}/c^2$ путём учёта атомных эффектов (эффект Мигдала и тормозное излучение) при ожидаемом рассеянии частиц тёмной материи на ядрах мишени. Используются данные DarkSide-50. (*Phys. Rev. Lett.* **130**, 101001 (2023))
- 3) Разработка компактного генератора нейтронов для калибровки детектора
- 4) Создание технологии получения ультранизкофонового титана в промышленных масштабах в России с целью изготовления из него элементов низкофоновых детекторов, в частности, криостата установки DarkSide-LowMass



Финальная версия конструкции

TeV-PeV нейтринный телескоп Baikal-GVD



Расширено число участников экспедиции Baikal-GVD в 2024г. от НИИЯФ МГУ (Брусницын А.А.)

Состав группы (февраль 2024 г) :

- Чепурнов А.С., Широков Е.В., Громов М.Б., Николаев А.С., Брусницын А.А.
- 2 аспиранта 3 года физфака,
- 4 студента специалитета
- 2 студент магистратуры
- 1 магистрант Бакинского филиала МГУ

при тесном сотрудничестве с НТЦП НИИЯФ

Работы ведутся в тесной кооперации с коллегами из следующих организаций :

- Объединённый институт ядерных исследований – Borexino, DarkSide, Baikal-GVD
- Институт ядерных исследований РАН Baikal-GVD
- Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» - Borexino, DarkSide, iDREAM
- Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева – DarkSide
- Белгородский государственный национальный исследовательский университет – DarkSide

Спасибо за внимание!