

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
"МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ"

**Форма спектров антинейтрино от делящихся  
изотопов по результатам эксперимента  
Double Chooz**

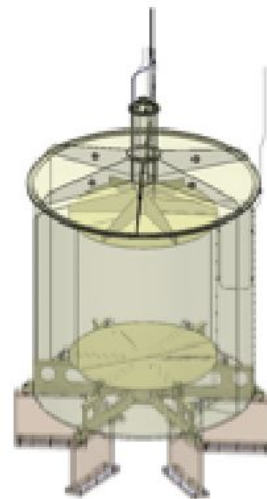
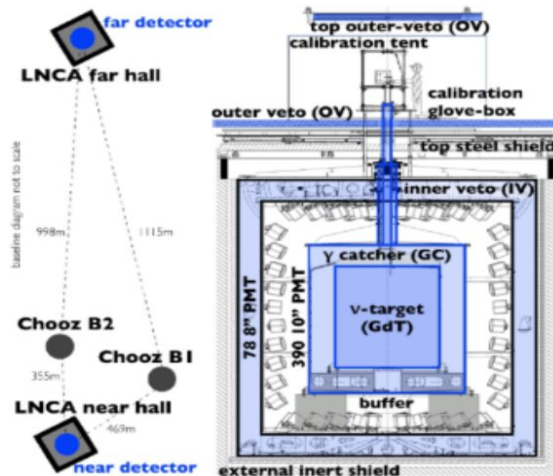
**ВЛАСЕНКО**  
Артемий Павлович

Научный руководитель  
доктор физико-математических наук, в.н.с. ИЯИ РАН В.В. Синев

# Актуальность исследования.

- ❖ Ядерный реактор является интенсивным источником электронных антинейтрино ( $\sim 10^{21} \bar{\nu}_e/c$ ), что позволяет использовать его для исследования свойств нейтрино (Abe Y. et al., 2012; Koreikin V.I. et al., 2004).
- ❖ Энергетический спектр реакторных антинейтрино является характеристикой реактора и зависит от мощности, изотопного состава топлива и его выгорания (Koreikin V.I. et al., 2004; Huber P., 2016).
- ❖ Измеряемый спектр позитронов реакции ОБР определяется не только спектром антинейтрино, но и сечением реакции, эффективностью регистрации и откликом детектора (Abe Y. et al., 2012).
- ❖ Остаточное антинейтринное излучение после остановки реактора и вклад ОЯТ могут искажать низкоэнергетическую часть спектра, что требует разработки методов восстановления спектра антинейтрино (Koreikin V.I., Mikaelyan L.A., Sinev V.V., 2006).

# Эксперимент Double Chooz.



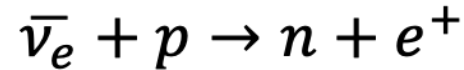
Эксперимент Double Chooz проводился во Франции в 2010-2017 годах. Показано расположение реакторов АЭС и красными точками положение детекторов.

Схема детектора Double Chooz в виде вложенных объемов

Оргстеклянные корпуса мишени и гамма-кэтчера детектора Double Chooz

## Основной канал регистрации.

Регистрация событий велась при помощи реакции обратного бета-распада (ОБР)

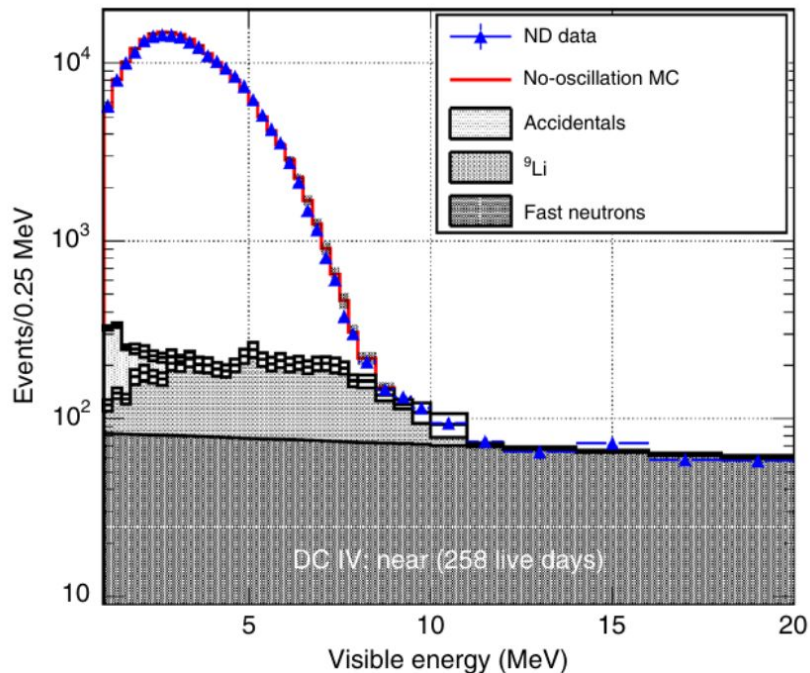


Вся энергия антинейтрино передается позитрону за вычетом энергии порога и малой добавки энергии нейтрона

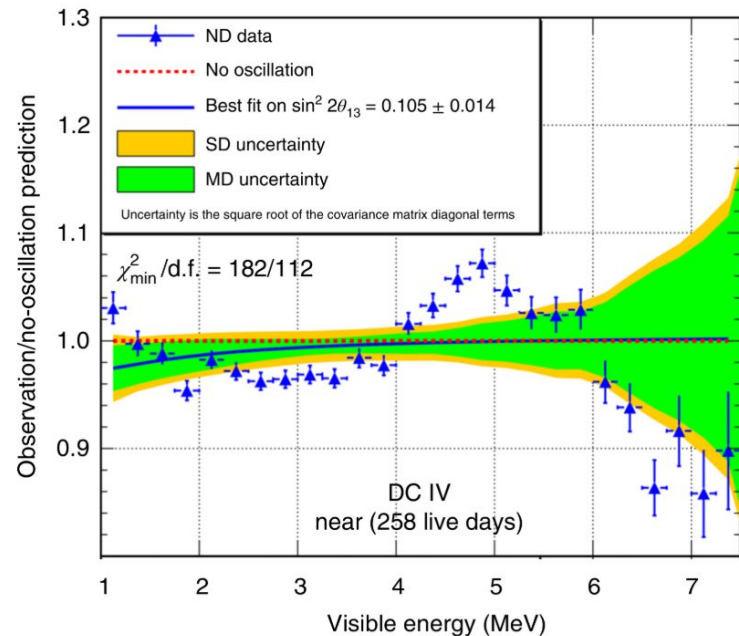
$$T = E_\nu - \Delta - o(E_n)$$

$$\Delta = \frac{(m_n + m_e)^2 - m_p^2}{2m_p} = 1.806 \text{ МэВ}$$

# Измеренный DC спектр позитронов вместе с фонами.



Приведены фоны случайных совпадений, космогенный фон от радиоактивных изотопов  $^8\text{He}/^9\text{Li}$ , образующихся при прохождении мюона и фон от быстрых нейтронов



Отношение измеренного спектра позитронов к предсказываемому на основе расчетных спектров Хьюбера-Мюллера.

# Постановка задачи.

В эксперименте измеряется не сам спектр антинейтрино, а продукты реакции ОБР

- ❖ Реакторный поток задается в основном изотопами  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ .
- ❖ Double Chooz дает экспериментальную базу для проверки метода на реальных данных.

**Задача анализа** — перейти от наблюдаемого позитронного спектра к исходному антинейтринному спектру с минимальными искажениями.

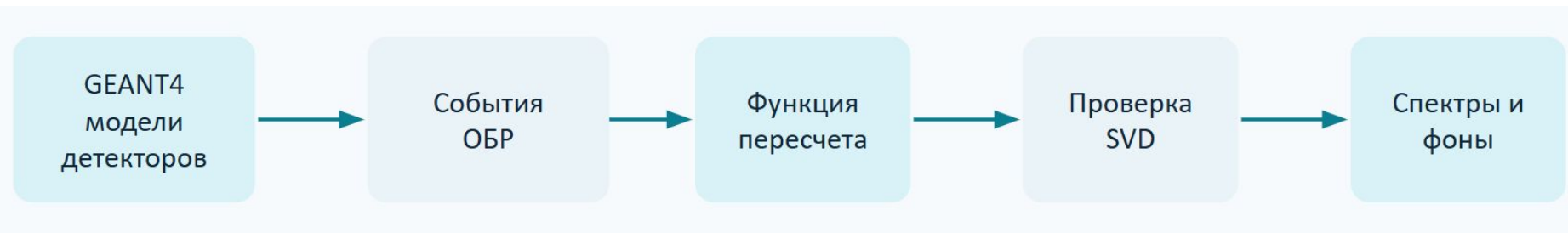
## **Цель исследования.**

*Разработка и применение метода математической обработки экспериментальных данных антинейтринного детектора Double Chooz, основанного на моделировании отклика детектора, для получения и анализа формы спектров антинейтринно делящихся изотопов, входящих в состав ядерного топлива.*

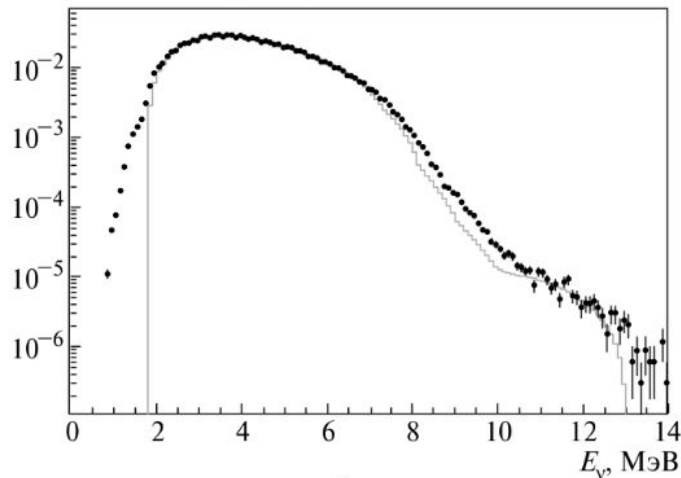
# Задачи исследования:

1. Обосновать метод перевода экспериментального энергетического спектра позитронных событий реакции обратного бета-распада (ОБР) в энергетический спектр потока антинейтрино при помощи рассчитанной методом Монте Карло функции отношения спектров;
2. Получить спектр антинейтрино ядерного реактора при использовании метода с применением найденной функции;
3. Проанализировать данные фоновых измерений эксперимента Double Chooz, сделанные во время выключения всех ядерных реакторов атомной станции.

# Логика исследования.

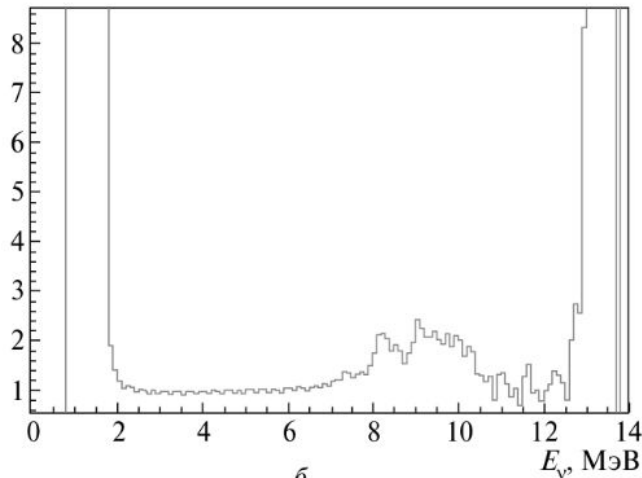


Относительные единицы



*a*

Относительные единицы



*б*

## Получение функции пересчета спектра позитронных событий в спектр событий антинейтрино

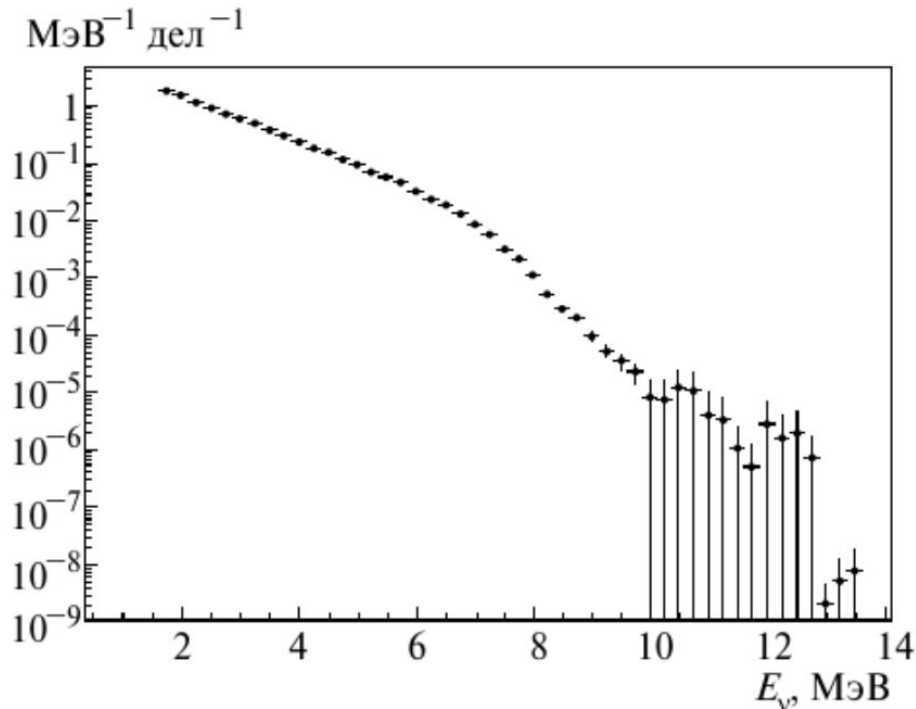
$$f(E_\nu) = \frac{S_e(E_{vis})}{S_\nu(E_\nu) * \sigma_{\nu p}(E_\nu)}, E_\nu = E_{vis} + \Delta E$$

$\Delta E = 0.784$  МэВ – смещение модельного спектра позитронных событий по оси абсцисс.

(а) Смоделированный спектр событий реакции ОБР – черные точки с ошибкой. Идеальный спектр позитронов, получаемый сворачиванием антинейтринного спектра с сечением реакции ОБР – серая сплошная линия.

(б) Функция пересчета спектра позитронных событий в спектр событий антинейтрино.

# Восстановленный с помощью полученной функции спектр антинейтрино экспериментальных данных Double

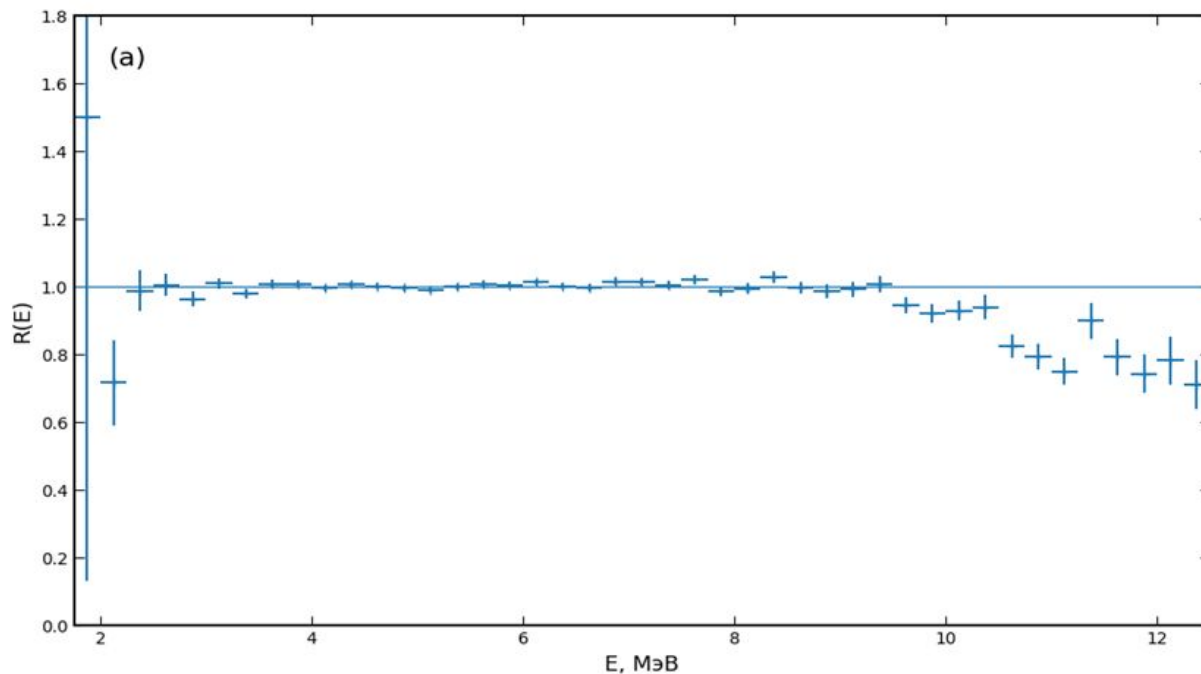


Наблюдается характерная аномалия в районе  $6 \text{ МэВ}$ .

Спектр антинейтрино соответствует составу активной зоны реактора:  
 $^{235}\text{U} - 0.52$ ,  $^{238}\text{U} - 0.087$ ,  
 $^{239}\text{Pu} - 0.333$ ,  $^{241}\text{Pu} - 0.06$

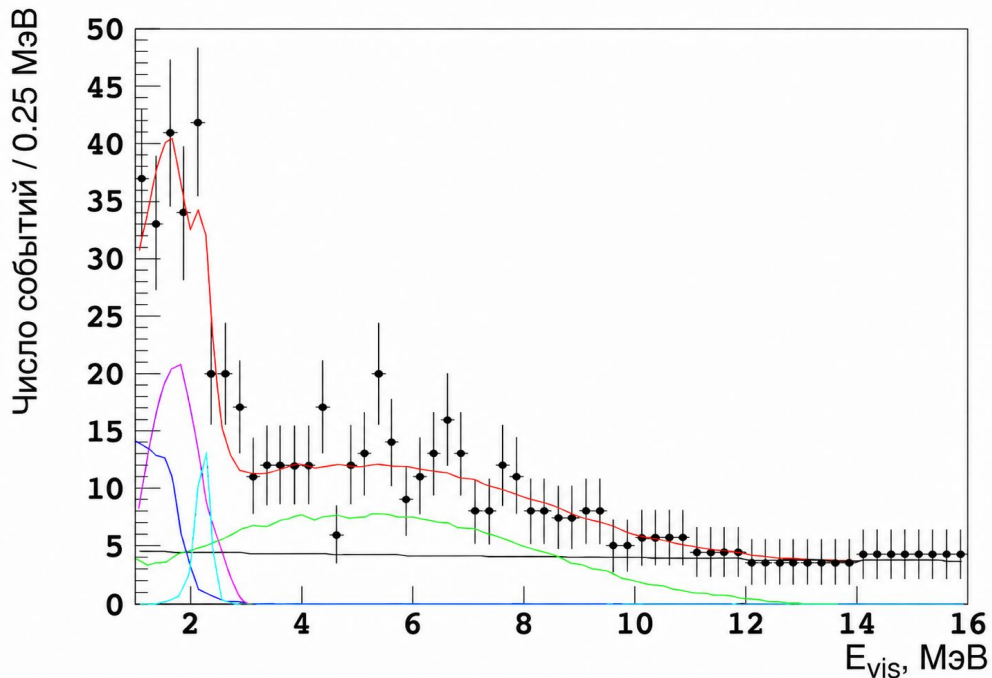
*Спектр антинейтрино, полученный из экспериментального спектра позитронов, измеренного Double Chooz, путем применения функции перевода и деления на сечение реакции ОБР.*

# Проверка методом сингулярного разложения.



*Отношение спектров  $R(E)$ , полученных методом SVD и методом функции пересчета.*

# Антинейтринные спектры изотопов отработанного ядерного топлива

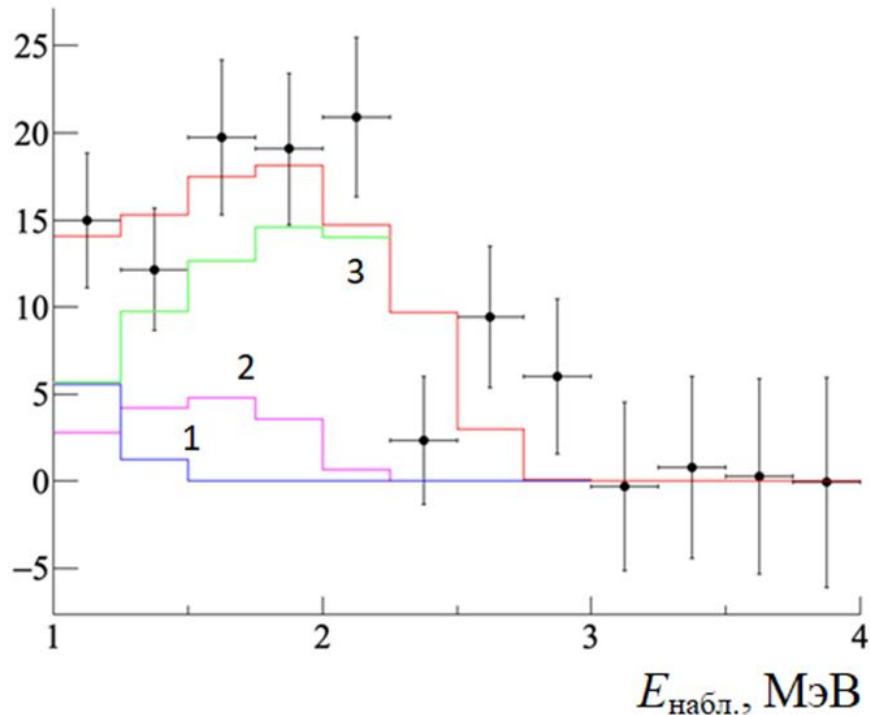


Черные точки с ошибкой – измерение на протяжении примерно 20 суток. Начиная с 8 МэВ до 10 МэВ бин был удвоенный, поэтому он представлен двумя одинаковыми точками, а от 10 до 12 МэВ бин составлял 1 МэВ и представлен 4-мя точками. Последние 2 бина были по 2 МэВ.

Показаны составляющие данного спектра: черная – спектр быстрых нейтронов, зеленая – спектр  $^8\text{He}/^9\text{Li}$ , фиолетовая – случайные совпадения, сиреневая – спектр антинейтрино остановленного реактора и голубая – регистрация двух нейтронов.

## Результат фитирования экспериментальных данных.

$N_{\text{собр.}} / 0.25 \text{ МэВ}$



*Спектр остаточного излучения,  
подогнанный функцией пересчета.*

*Точки с ошибкой –*

*экспериментальные данные,*

*1 –  $^{90}\text{Y}$ ,*

*2 –  $^{144}\text{Pr}$ ,*

*3 –  $^{106}\text{Rh}$ ,*

*Сумма всех изотопов (красная линия)  
с весами подгонки.*

Найденные доли изотопов:

$^{90}\text{Y} - 7 \pm 5,$

$^{106}\text{Rh} - 54 \pm 13,$

$^{144}\text{Pr} - 31 \pm 15$

# Научная новизна и практическая значимость.

1. Впервые получен энергетический спектр антинейтрино, взвешенный с сечением ОБР эксперимента Double Chooz при помощи функции, рассчитанной методом Монте-Карло вплоть до энергии нейтрино 12 МэВ.
2. Впервые выполнен анализ спектра фона, измеренного в эксперименте Double Chooz при двух остановленных ядерных реакторах атомной станции и выделен спектр антинейтрино из остановленного реактора и бассейна-отстойника отработанного топлива по данным фоновых измерений Double Chooz
3. Разработан оригинальный метод преобразования экспериментального спектра позитронов в спектр антинейтрино на базе функции, рассчитываемой методом Монте Карло для данного типа детектора.
4. Полученный в работе спектр антинейтрино от ядерного реактора может быть использован при анализе других экспериментов, например, связанных с изучением космических нейтрино, солнечных нейтрино, геонейтрино и других, где реакторные нейтрино являются фоном.

# Основные положения, выносимые на защиту.

1. Разработанная модель детектора антинейтринного эксперимента Double Chooz для GEANT4, позволяет моделировать сбор света в сцинтилляторе мишени при детектировании позитронов реакции ОБР.
2. Разработан метод преобразования экспериментального спектра позитронов в спектр антинейтрино на базе функции, рассчитываемой методом Монте Карло для данного детектора и применен к спектру, полученному в детекторе Double Chooz.
3. Впервые получен спектр антинейтрино, взвешенный с сечением реакции ОБР эксперимента Double Chooz при помощи рассчитанной функции преобразования до энергии 12 МэВ.
4. Впервые определен состав совместного спектра антинейтрино от долгоживущих изотопов из остановленного реактора и бассейна-отстойника отработанного топлива по данным фоновых измерений Double Chooz.

# Публикации по теме диссертации

1. А.П. Власенко, П.Ю. Наумов, С.В. Силаева, В.В. Синева, «Новые спектры антинейтрино делящихся изотопов ядерного топлива: эксперимент и расчет», Ядерная физика, 86, № 1, с. 24-34, 2023; A.P. Vlasenko, P.Yu. Naumov, S.V. Silaeva, and V.V. Sinev, Physics of Atomic Nuclei, V. 85 (6), P. 690-700, 2022.

2. А.П. Власенко, П.Ю. Наумов, С.В. Силаева, В.В. Синева, «Спектры антинейтрино  $^{235,238}\text{U}$  и  $^{239,241}\text{Pu}$  из измерения эксперимента Double Chooz», Ядерная физика, т. 87, № 1, с. 18-26, 2024; A.P. Vlasenko, P.Yu. Naumov, S.V. Ingerman, and V. V. Sinev, Physics of Atomic Nuclei, V. 87 (1), P. 1178-1188, 2024. DOI: 10.1134/S1063778824010599.

3. А.П. Власенко, В.В. Синева, «Определение компонент фона в детекторах Double Chooz при остановке реакторов: анализ остаточного спектра реакторных антинейтрино», Ядерная физика, т. 89, № 2, 2026; A.P. Vlasenko, V. V. Sinev, Physics of Atomic Nuclei, V. 89 (2), 2026.

# Апробация

1. P. Naumov, S. Silaeva, V. Sinev, A. Vlasenko, «New Reactor antineutrino spectrum on base of Double Chooz experimental data», устный доклад на International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2022).
2. А. Власенко, П. Наумов, С. Силаева, В. Синева, «Новые спектры антинейтрино тяжелых делящихся изотопов урана и плутония», устный доклад на молодежной конференции, 16-18 ноября Гатчина 2022. <https://openscience.pnpi.nrcki.ru/os2022program/>.
3. P. Naumov, S. Silaeva, V. Sinev, A. Vlasenko, «Fissile isotopes antineutrino spectra: summation method and direct experiment» стендовый доклад (постер) на 2022 EUROPEAN SCHOOL OF HIGH-ENERGY PHYSICS, 30 November 2022 to 13 December 2022 (Israel, Jerusalem) <https://espace.cern.ch/ESHEP2022/Lists/Students/AllItems.aspx>.
4. С.В. Ингерман, В.В. Синева, А.П. Власенко, «Новые спектры антинейтрино урана и плутония, полученные из эксперимента DOUBLE CHOOZ». Саров, <https://vniief.ru/scienceevents/nuclerstruct/>.
5. С. Ингерман, В. Синева, П. Наумов, А. Власенко, «Новые спектры антинейтрино делящихся изотопов ядерного топлива: эксперимент и расчет», 65-я Всероссийской научной конференции МФТИ в честь 115-летия Л.Д.Ландау, 3–8 апреля 2023 г. <https://conf.mipt.ru/view/conference/viewdivision/3049816>.
6. XII Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», НИЯУ «МИФИ, Москва. 03-05 апреля 2025 г., устный доклад: “Разложение спектра реакторных антинейтрино на энергетические спектры делящихся изотопов активной зоны”.

**Личный вклад** автора заключается в выполнении полного цикла работ по моделированию детекторов, получении функции перевода позитронного спектра в антинейтринный и анализу экспериментальных данных, приведших к основным результатам диссертации, а именно:

- Разработаны программные средства для генерации спектров реакторных антинейтрино и моделирования позитронных событий реакции обратного бета-распада;
- Реализованы Монте-Карло модели детекторов Double Chooz и POHC в GEANT4 (геометрия, материалы, оптика, сбор света), проведены расчёты матриц отклика и получена функция пересчёта от спектра позитронов к спектру антинейтрино;
- Выполнена проверка методики восстановления спектра независимым методом SVD и проведено сравнение результатов;
- Проведён анализ экспериментальных данных Double Chooz, включая задачи, связанные с оценкой фоновых компонент при остановках реакторов, а также спектральные исследования, направленные на получение спектров делящихся изотопов;