

Регистрация реакторных антинейтрино с помощью черенковского детектора

Geant4-моделирование prompt-сигнала IBD и асимметрии отклика

Панфилов П. А.

НИЯУ МИФИ

24 декабря 2025 г.

Научный руководитель
(старший преподаватель)

Мачулин И. Н.

Научный консультант
(к.ф.-м.н.)

Долганов Г. Д.

Цель и задачи работы

Реакторные антинейтрино $\bar{\nu}_e$ — интенсивный источник частиц с энергиями порядка нескольких MeV.

Цель: разработать Geant4-модель черенковского детектора для регистрации реакторных $\bar{\nu}_e$ и изучить отклик по свету.

В работе решались задачи:

- разыгрывание спектра позитронов от реакции обратного бета-распада (IBD);
- учёт спектральных оптических свойств воды $n(\lambda)$ и $L_{abs}(\lambda)$;
- учёт спектральной квантовой эффективности фотоумножителей $QE(\lambda)$;
- получение зависимости $\langle N_{pe} \rangle$ (числа фотоэлектронов) от энергии e^+ .

Физика сигнала: IBD

Классический канал регистрации реакторных антинейтрино:



Кинематика (первое приближение, без отдачи нейтрона):

$$T_{e^+} \approx E_{\bar{\nu}} - 1.806 \text{ MeV}. \quad (2)$$

Prompt + delayed:

- *prompt*: позитрон (и аннигиляция $\gamma\gamma$) \Rightarrow электроны \Rightarrow черенковский свет;
- *delayed*: захват нейтрона (на H или на добавке с большим сечением, например Cd/Gd) \Rightarrow γ -каскад.

Черенковское излучение: что фиксирует детектор

Условие возникновения:

$$\nu > \frac{c}{n(\lambda)} \Leftrightarrow \beta n(\lambda) > 1. \quad (3)$$

Угол конуса:

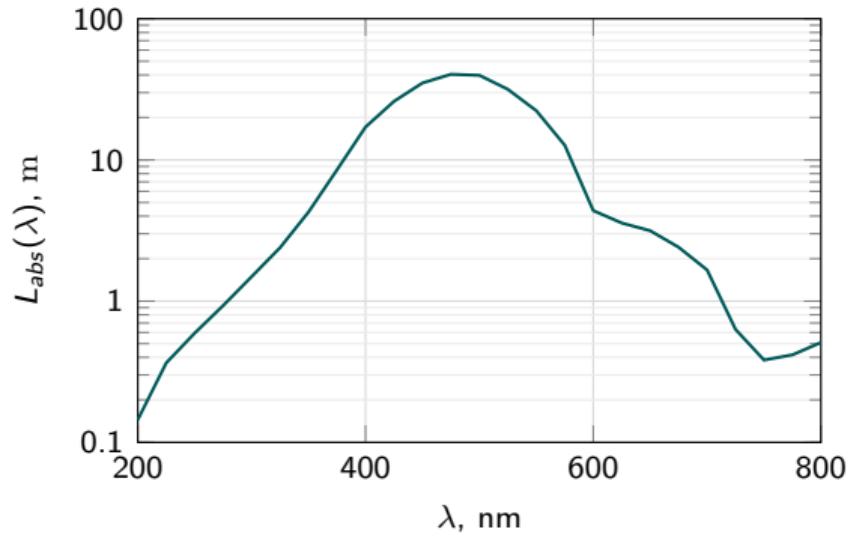
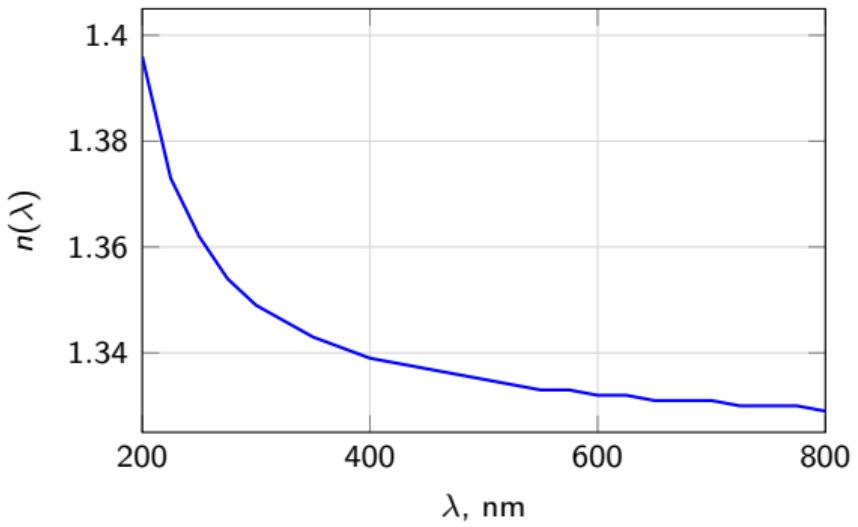
$$\cos \theta_C(\lambda) = \frac{1}{\beta n(\lambda)}. \quad (4)$$

Спектр (формула Франка–Тамма):

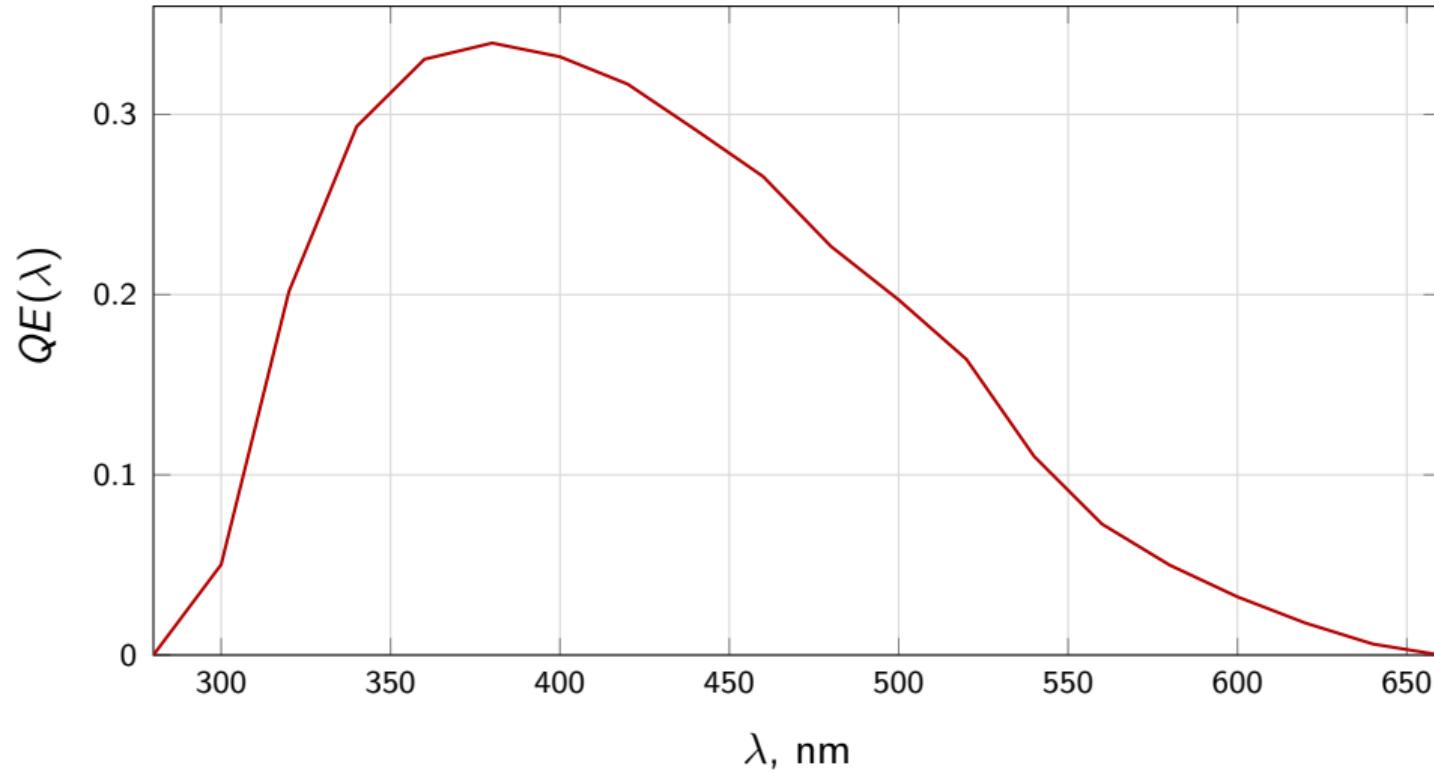
$$\frac{d^2N}{dx d\lambda} = 2\pi\alpha \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)}\right) \frac{1}{\lambda^2}. \quad (5)$$

Вывод: для реалистичны критичны именно спектральные зависимости $n(\lambda)$, $L_{abs}(\lambda)$ и $QE(\lambda)$.

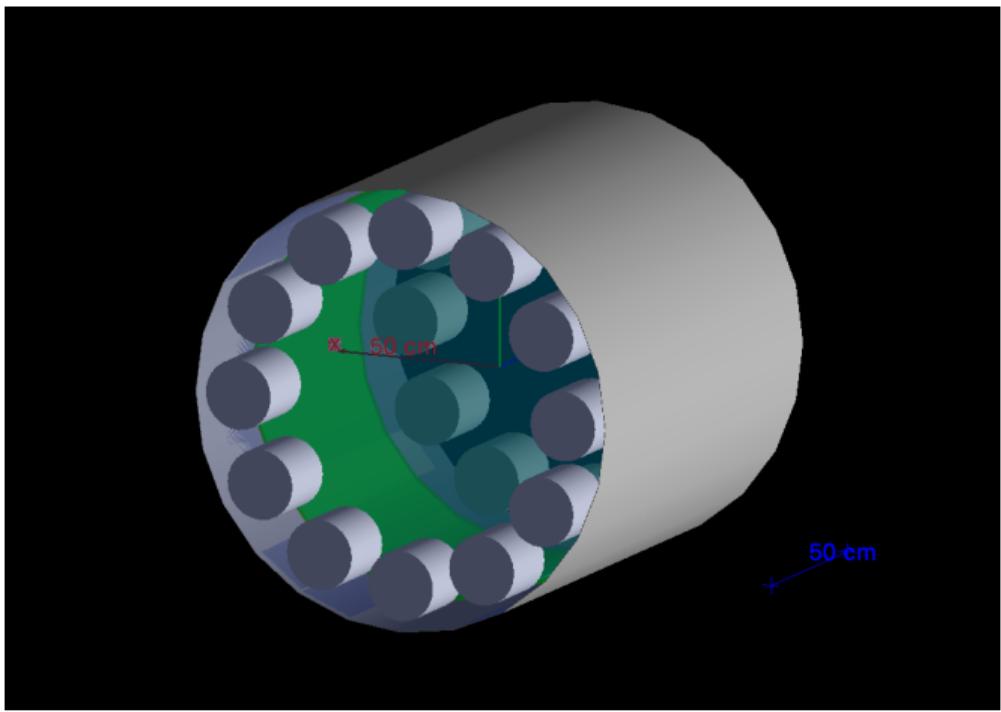
Оптические свойства воды: $n(\lambda)$ и $L_{abs}(\lambda)$



Квантовая эффективность ФЭУ: $QE(\lambda)$



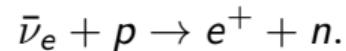
Geant4-модель детектора: 3D-визуализация и параметры



Параметр	Значение
Внутренний радиус стально-го бака	630 mm
Высота бака	1300 mm
Внутренний радиус PMMA-сосуда	590 mm
Высота PMMA-сосуда	700 mm
Число ФЭУ	24 (12+12)
Радиус ФЭУ	100 mm

Как моделировалась энергия позитрона

Энергия позитрона в реакции IBD задаётся энергией антинейтрино и кинематикой



В модели разыгрывание выполнялось так:

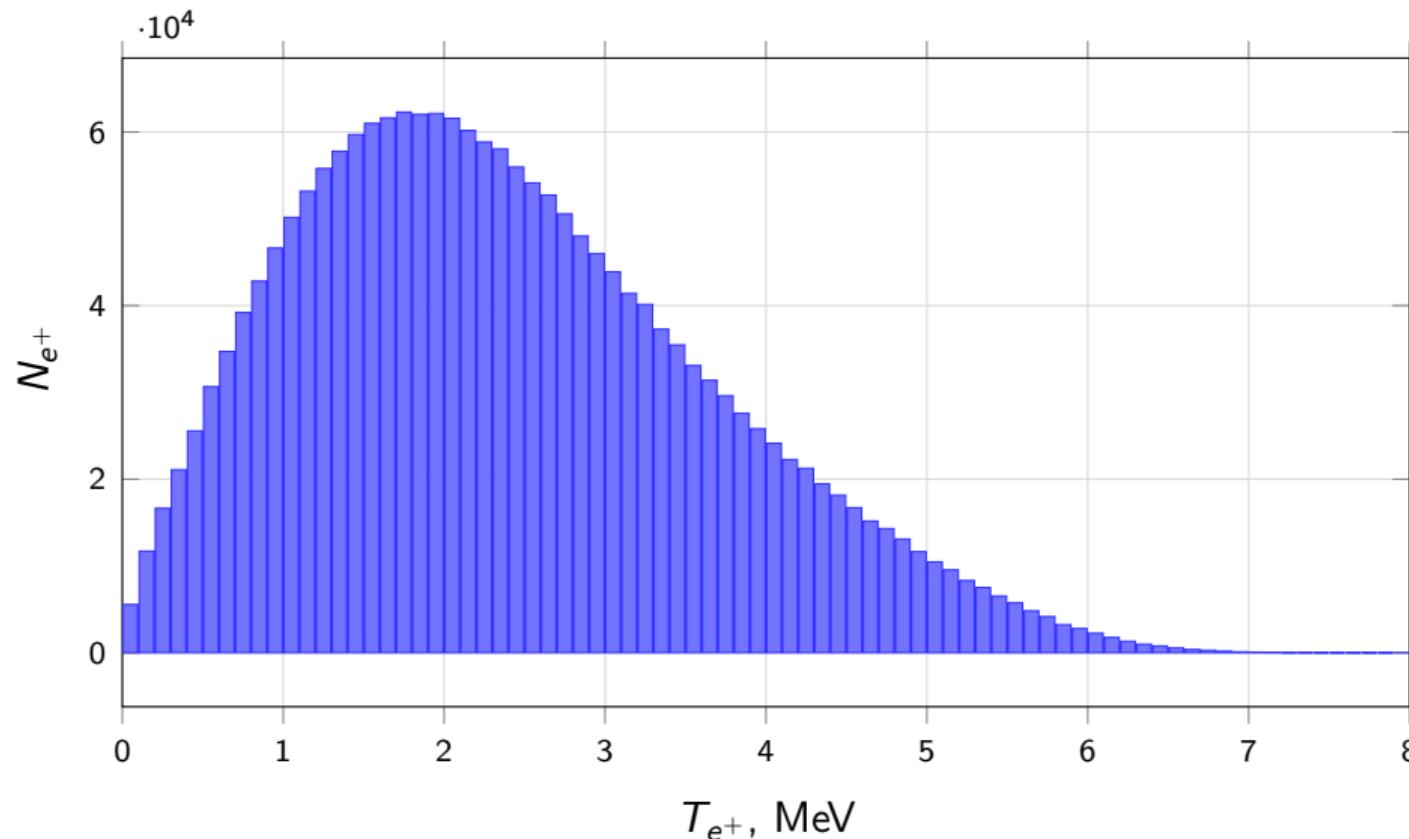
- выбирается энергия антинейтрино $E_{\bar{\nu}}$ по распределению $w(E_{\bar{\nu}}) \propto \phi_{\text{НМ}}(E_{\bar{\nu}}) \cdot \sigma_{\text{IBD}}(E_{\bar{\nu}})$;
- $\phi_{\text{НМ}}(E_{\bar{\nu}})$ — спектр Huber–Mueller (поток реакторных $\bar{\nu}_e$);
- σ_{IBD} в первом приближении берётся как $\sigma(E_{\bar{\nu}}) \propto p_e E_e$ (где $E_e \approx E_{\bar{\nu}} - \Delta$, $p_e = \sqrt{E_e^2 - m_e^2}$);
- затем рассчитывается кинетическая энергия позитрона:

$$T_{e^+} \approx E_{\bar{\nu}} - 1.806 \text{ MeV},$$

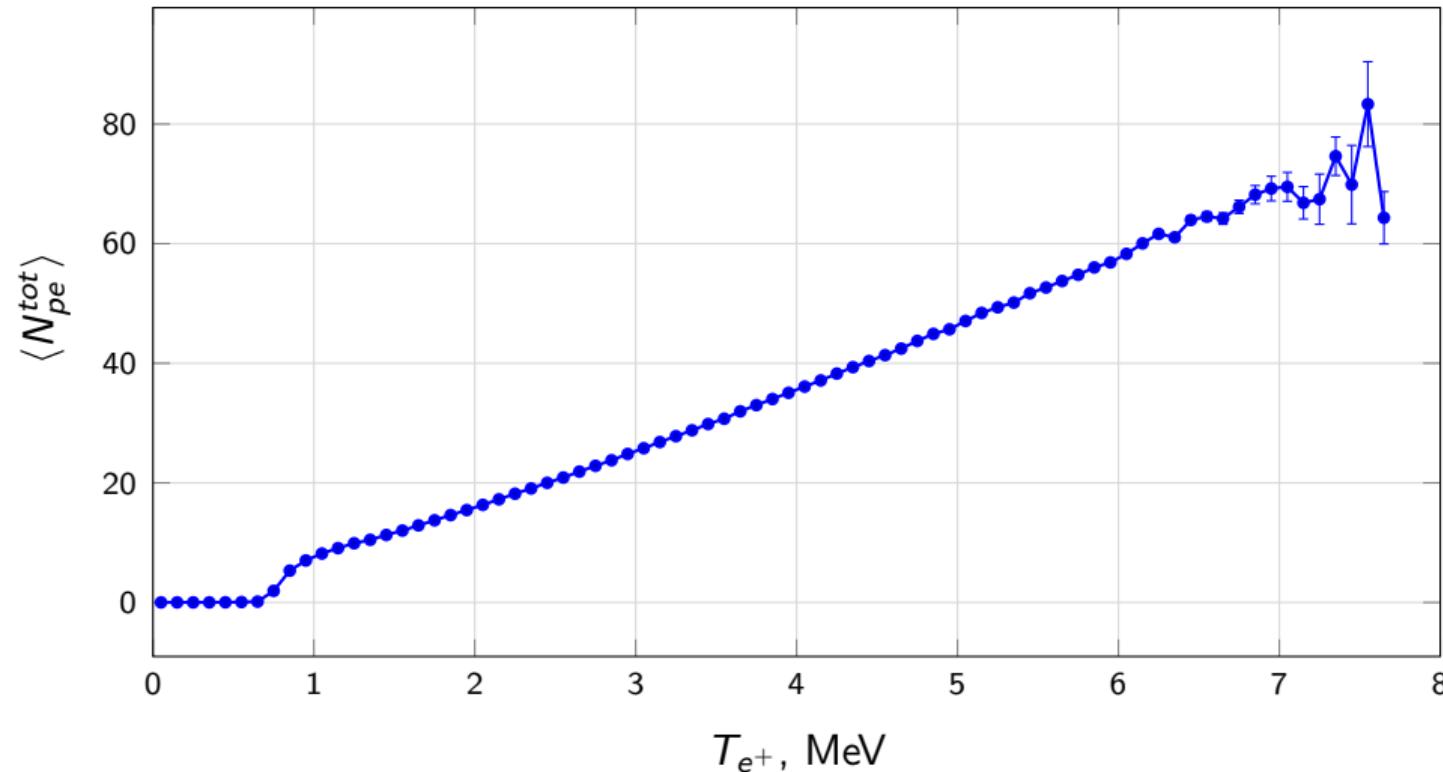
где 1.806 MeV — порог реакции.

Для контроля спектра в файл `ibd_positron_spectrum.txt` записывались $E_{\bar{\nu}}$ и T_{e^+} .

Результат 1: спектр кинетической энергии позитронов



Результат 2: $\langle N_{pe} \rangle$ от энергии позитрона



Видна пороговая область (порог Чerenкова) и рост числа фотоэлектронов с энергией

Выводы и дальнейшая работа

Итоги:

- реализована Geant4-модель черенковского детектора для prompt-компоненты IBD;
- добавлены спектральные свойства воды ($n(\lambda)$, $L_{abs}(\lambda)$) и $QE(\lambda)$ ФЭУ;
- рассчитаны спектры позитронов и фотоэлектронов.

Дальнейшая работа:

- добавить нейтрон IBD и delayed-сигнал (захват на Cd и γ -каскад);
- учесть угловое распределение позитронов в модели;
- оптимизировать геометрию и количество ФЭУ для роста числа PE и снижения фона.