

# 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  $e^+$ .

Классический канал регистрации реакторных антинейтрино:

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n. \quad (1)$$

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)  $\Rightarrow$   $\gamma$ -каскад.

# Черенковское излучение: что фиксирует детектор

Условие возникновения:

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

Угол конуса:

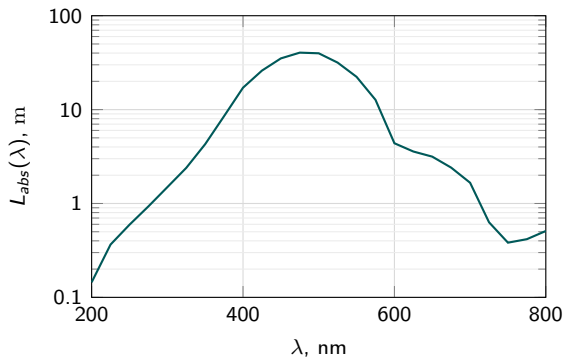
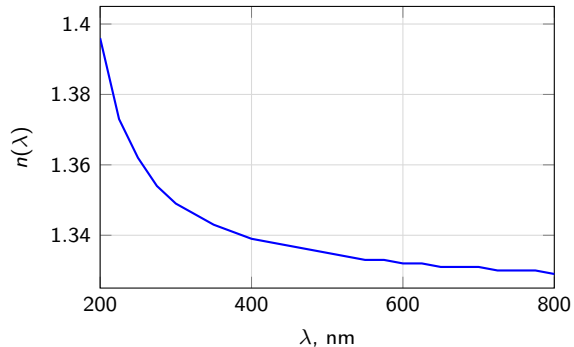
$$\cos \theta_c(\lambda) = \frac{1}{\beta n(\lambda)}. \quad (4)$$

Спектр (формула Франка–Тамма):

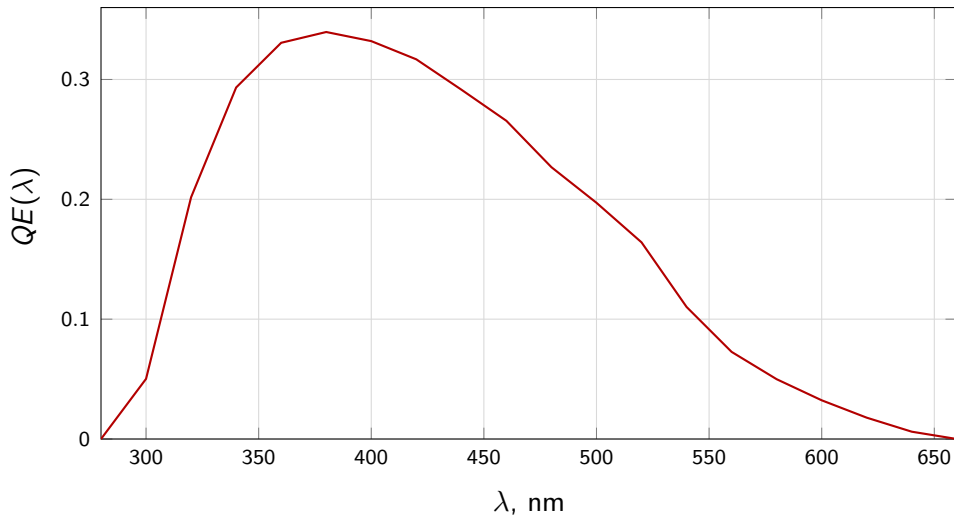
$$\frac{d^2 N}{dx d\lambda} = 2\pi\alpha \left( 1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)} \right) \frac{1}{\lambda^2}. \quad (5)$$

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

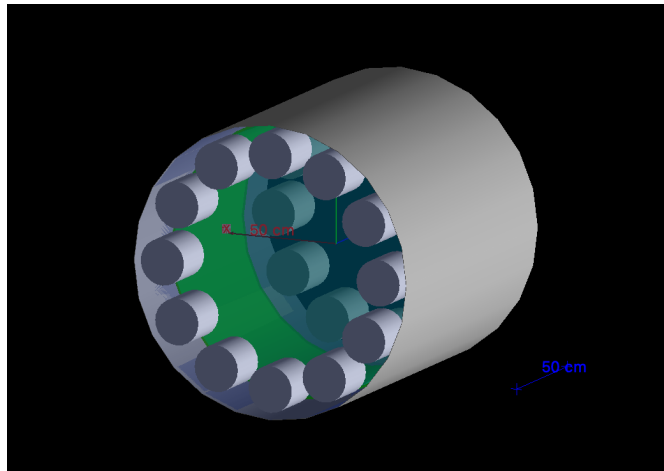
# Оптические свойства воды: $n(\lambda)$ и $L_{abs}(\lambda)$



# Квантовая эффективность ФЭУ: $QE(\lambda)$



# Geant4-модель детектора: 3D-визуализация и параметры



Параметр	Значение
Внутренний радиус стального 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

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n.$$

В модели разыгрывание выполнялось так:

- выбирается энергия антинейтрино  $E_{\bar{\nu}}$  по распределению  $w(E_{\bar{\nu}}) \propto \phi_{\text{HM}}(E_{\bar{\nu}}) \cdot \sigma_{\text{IBD}}(E_{\bar{\nu}})$ ;
- $\phi_{\text{HM}}(E_{\bar{\nu}})$  — спектр Huber–Mueller (поток реакторных  $\bar{\nu}_e$ );
- $\sigma_{\text{IBD}}$  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:

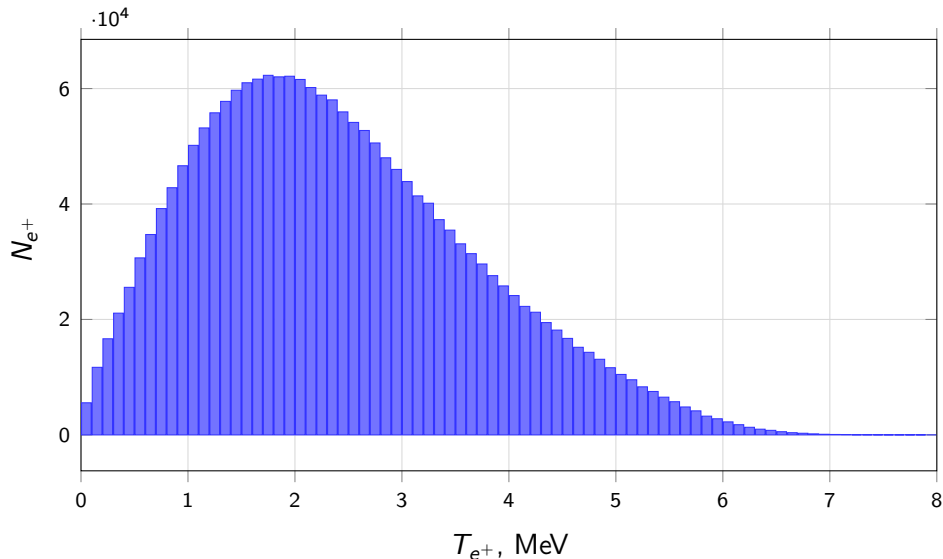
$$T_{e^+} \approx E_{\bar{\nu}} - 1.806 \text{ MeV},$$

где 1.806 MeV — порог реакции.

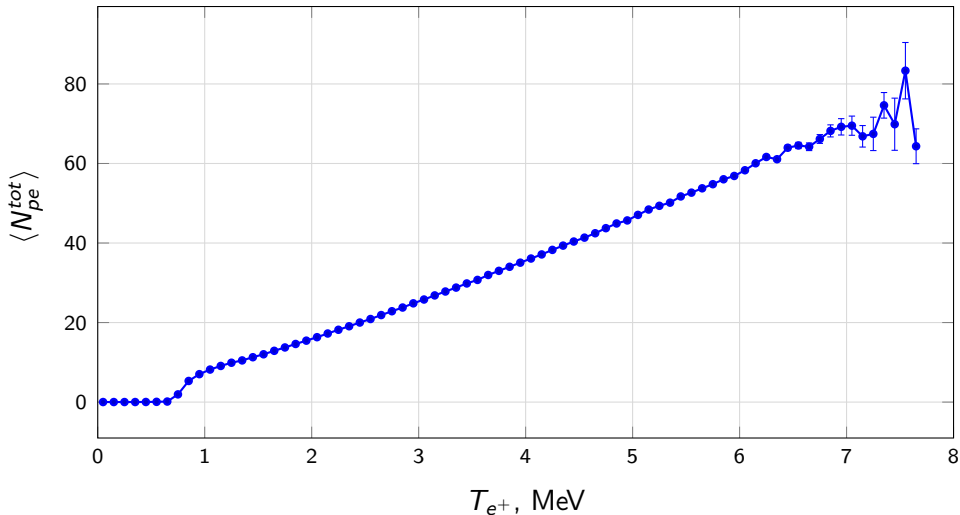
Для контроля спектра в файл `ibd_positron_spectrum.txt` записывались  $E_{\bar{\nu}}$  и  $T_{e^+}$ .



# Результат 1: спектр кинетической энергии позитронов



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



Видна пороговая область (порог Черенкова) 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  $\gamma$ -каскад);
- учесть угловое распределение позитронов в модели;
- оптимизировать геометрию и количество ФЭУ для роста числа РЕ и снижения фона.