

Регистрация реакторных антинейтрино с помощью черенковского детектора Geant4-моделирование prompt-сигнала IBD и сравнение допантов Cd/Gd

Панфилов П. А.

НИЯУ МИФИ

7 мая 2026 г.

Научный руководитель
(старший преподаватель)

Мачулин И. Н.

Научный консультант
(к.ф.-м.н.)

Долганов Г. Д.

Цель и задачи работы

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

В работе решались задачи:

- разыгрывание спектра позитронов от реакции обратного бета-распада (IBD);
- учёт спектральных оптических свойств воды $n(\lambda)$, $L_{abs}(\lambda)$ и $QE(\lambda)$ ФЭУ;
- моделирование термализации и захвата тепловых нейтронов на допантах Cd и Gd;
- сравнение допантов по времени до захвата t_{cap} и числу фотоэлектронов N_{pe} от γ -каскада.

Физика сигнала: IBD prompt + delayed

Классический канал регистрации реакторных антинейтрино:

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n, \quad T_{e^+} \approx E_{\bar{\nu}} - 1.806 \text{ MeV.} \quad (1)$$

Сигнал состоит из двух компонент:

- *prompt*: позитрон + аннигиляция $\gamma\gamma \Rightarrow$ прямой черенковский свет;
- *delayed*: термализация нейтрона + захват на H, Cd или Gd \Rightarrow γ -каскад \Rightarrow комптоновские электроны \Rightarrow вторичный черенковский свет.

Энергетический бюджет «в свет»:

Компонента	Энергия	Множественность
e^+ (prompt, средн.)	$T_{e^+} + 2 \cdot 0.511 \approx 3.4 \text{ MeV}$	—
γ -каскад на ^{113}Cd	$\approx 9 \text{ MeV}$	$\bar{M}_\gamma \approx 2-3$
γ -каскад на ^{157}Gd	$\approx 8 \text{ MeV}$	$\bar{M}_\gamma \approx 4-5$

Захват тепловых нейтронов на Cd и Gd

После термализации на протонах воды нейтрон достигает тепловой энергии $E_{th} \sim k_B T \approx 0.025$ eV ($v_{th} \approx 2200$ m/s) и захватывается одним из ядер допанта.

Сечения радиационного захвата (n, γ) на тепловых нейтронах:

- ^1H : $\sigma \approx 0.33$ b ($E_\gamma = 2.22$ MeV);
- ^{113}Cd : $\sigma \approx 2.0 \cdot 10^4$ b ($\sum E_\gamma \approx 9$ MeV);
- ^{157}Gd : $\sigma \approx 2.55 \cdot 10^5$ b ($\sum E_\gamma \approx 8$ MeV).

Среднее время до захвата:

$$\tau_{cap} = \frac{1}{n_{dop} \sigma_{cap} v_{th}}. \quad (2)$$

Ожидание: $\sigma_{Gd} > \sigma_{Cd}$ при той же массовой доле \Rightarrow Gd должен давать значительно более короткое τ_{cap} и более узкое coincidence-окно для выделения IBD.

Черенковское излучение: что фиксирует детектор

Условие возникновения и угол конуса:

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

Спектр (формула Франка–Тамма):

$$\frac{d^2 N}{dx d\lambda} = 2\pi\alpha \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)} \right) \frac{1}{\lambda^2}. \quad (4)$$

Для реалистичности модели критичны:

- $n(\lambda)$ воды — задаёт порог и угол излучения;
- $L_{abs}(\lambda) = \lambda/(4\pi k(\lambda))$ — определяет дальность транспорта;
- $QE(\lambda)$ ФЭУ — вероятность преобразования $\gamma \rightarrow$ фотоэлектрон.

Цилиндрическая компоновка:

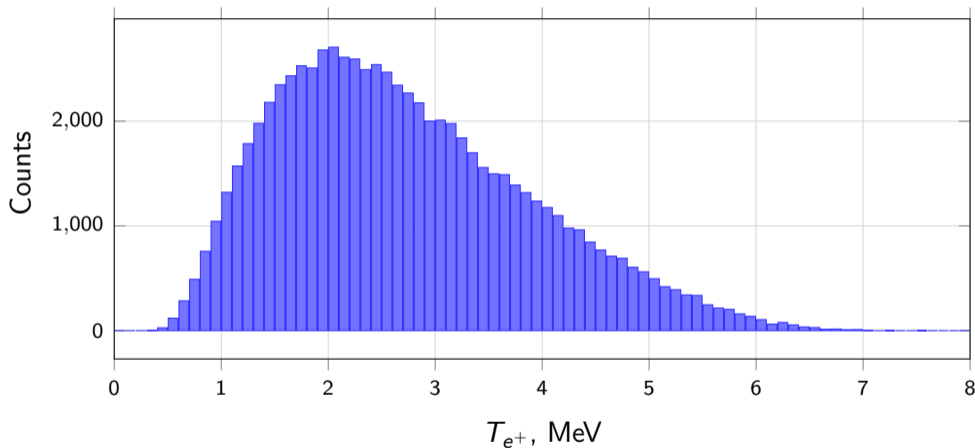
- стальной бак $R = 630$ мм, $H = 1300$ мм, отражающие стенки ($R_{refl} = 0.9$);
- внешний слой воды;
- внутренний PMMA-сосуд $R = 590$ мм, $H = 700$ мм;
- мишень — вода + допант (Cd или Gd, массовая доля 0.1%).

ФЭУ:

- всего **38** ФЭУ;
- по **19** на верхней и нижней крышках;
- схема концентрических колец 1 + 6 + 12;
- радиус ФЭУ 100 мм.

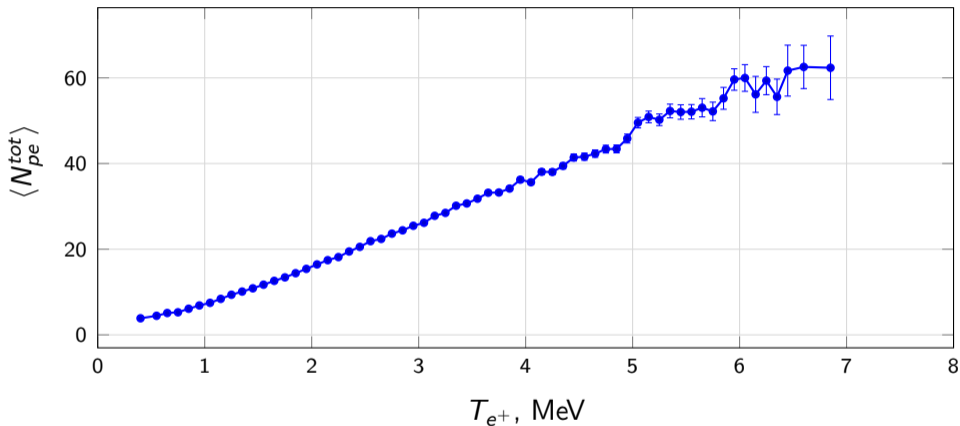
Измеряемая величина: суммарное число фотоэлектронов N_{pe}^{tot} во всех ФЭУ за событие.

Результат 1: спектр кинетической энергии позитронов



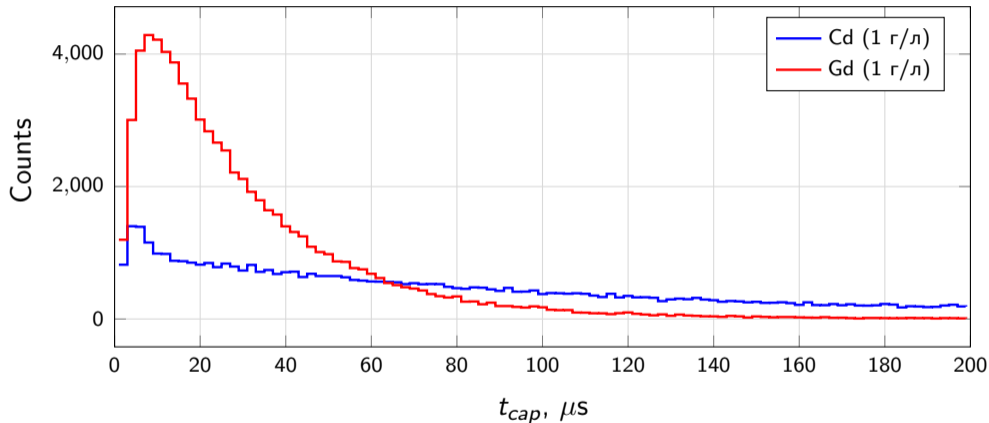
Зарегистрированный спектр позитронов IBD (условие $N_{fired} \geq 3$, 76.1% от 10^5 событий).
Среднее $\langle T_{e^+} \rangle \approx 2.72$ MeV.

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



10^5 событий IBD, условие $N_{fired} \geq 3$. Среднее по прошедшим триггер событиям:
 $\langle N_{pe}^{tot} \rangle \approx 23.4$.

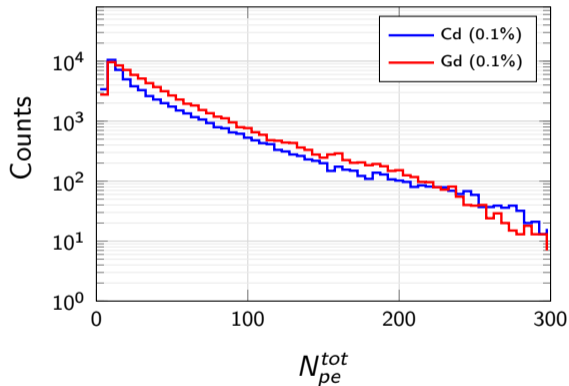
Результат 3: время жизни нейтронов Cd vs Gd



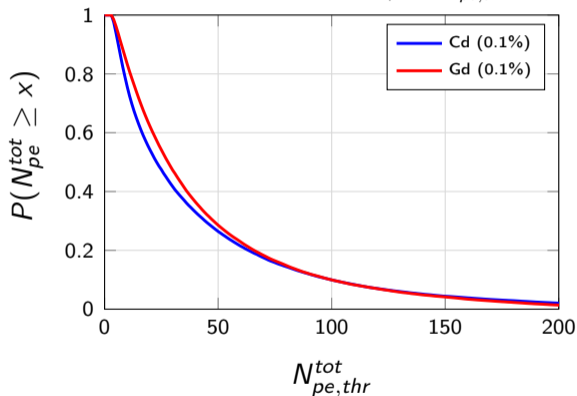
$T_n = 10$ keV, 10^5 событий, условие $N_{fired} \geq 3$. Средние времена: $\langle t_{cap}^{Cd} \rangle \approx 112.2 \mu s$,
 $\langle t_{cap}^{Gd} \rangle \approx 31.6 \mu s$.

Результат 4: N_{pe} от захвата нейтрона Cd vs Gd

Гистограмма N_{pe}^{tot} , log Y



Кривая выживания $P(N_{pe}^{tot} \geq N_{pe,thr}^{tot})$



Условие $N_{fired} \geq 3$. $\langle N_{pe}^{Cd} \rangle \approx 40.6$, $\langle N_{pe}^{Gd} \rangle \approx 42.8$. Преимущество Gd сохраняется: при $N_{pe,thr}^{tot} = 50$ — 42% vs 27%.
Причина — большая множественность γ -каскада ($\bar{M}_\gamma \approx 4-5$ у Gd vs $\sim 2-3$ у Cd).

Результат 5: ожидаемая скорость счёта на Калининской АЭС

Реперная точка — проект iDREAM¹ (Калининская АЭС): $R_{iDREAM}^{IBD} \approx 5000$ соб./сутки в $V = 860$ л LAB. Пересчёт по числу свободных протонов $N_p = n_p V$:

Среда	ρ , г/см ³	w_H	n_p , см ⁻³	V , л
LAB (C ₁₈ H ₃₀)	0.863	0.123	$6.33 \cdot 10^{22}$	860
H ₂ O	1.000	0.112	$6.69 \cdot 10^{22}$	765.5

$$\frac{N_p^{our}}{N_p^{iDREAM}} \approx 0.94 \Rightarrow R_{our}^{IBD} \approx 4.7 \cdot 10^3 \text{ соб./сутки.}$$

Эффективность регистрации coincidence prompt+delayed ($N_{fired} \geq 3$, $\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{prompt} \cdot \varepsilon_{delayed}$):

- Gd: $\varepsilon_{tot} = 0.76 \cdot 0.74 \approx 0.56 \Rightarrow R_{Gd}^{reg} \approx 2.6 \cdot 10^3$ соб./сутки;
- Cd: $\varepsilon_{tot} = 0.76 \cdot 0.57 \approx 0.43 \Rightarrow R_{Cd}^{reg} \approx 2.0 \cdot 10^3$ соб./сутки.

¹Gromov et al. (iDREAM Coll.), *Phys. Atom. Nucl.* **85** (2022) 1393.

Выводы и дальнейшая работа

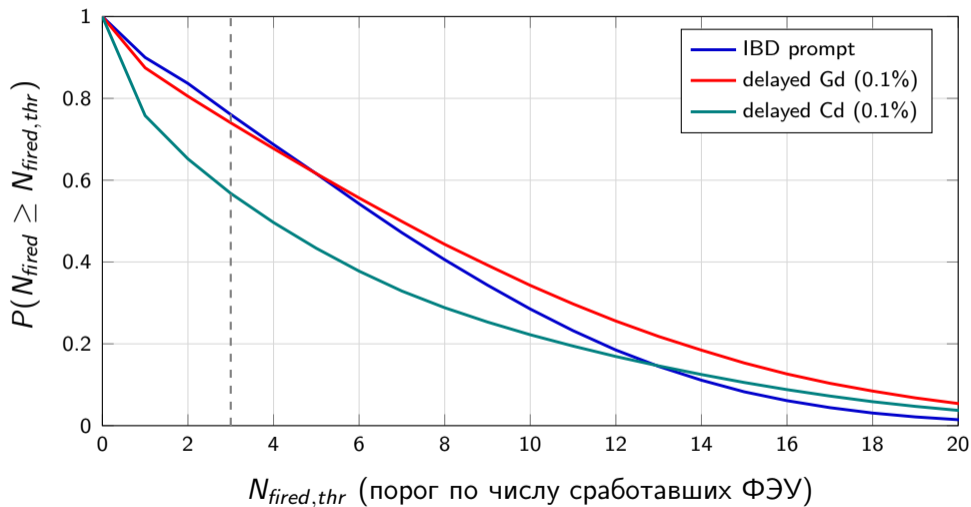
Итоги:

- реализована Geant4-модель водного черенковского детектора с prompt+delayed-компонентами IBD; учтены $n(\lambda)$, $L_{abs}(\lambda)$, $QE(\lambda)$;
- prompt ($N_{fired} \geq 3$, 76%): $\langle N_{pe}^{tot} \rangle \approx 23$, $\langle T_{e+} \rangle \approx 2.7$ MeV;
- delayed: **Gd** \succ **Cd** — t_{cap} короче (31.6 vs 112.2 μs), $\langle N_{pe} \rangle$ (42.8 vs 40.6), ε_{trig} (74% vs 57%);
- ожидаемая скорость регистрации на Калининской АЭС: $R_{Gd}^{reg} \approx 2.6 \cdot 10^3$,
 $R_{Cd}^{reg} \approx 2.0 \cdot 10^3$ соб./сутки.

Дальнейшая работа:

- учёт углового распределения продуктов реакции IBD (формализм Vogel–Beacom);
- учёт фонов
- оптимизация числа и расположения ФЭУ.

Приложение: кривые выживания по N_{fired}



Пунктир — выбранный рабочий порог $N_{fired} = 3$.