

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

Панфилов П. А.

НИЯУ МИФИ

23 июня 2026 г.

Научный руководитель

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  $t_{cap}$ ,  $N_{pe}$  и эффективности регистрации;
- исследование асимметрии prompt-сигнала и чувствительности к направлению  $\bar{\nu}_e$ ;
- оценка ожидаемой скорости счёта IBD-событий на Калининской АЭС.

# 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  $\Rightarrow$   $\gamma$ -каскад  $\Rightarrow$  комптоновские электроны  $\Rightarrow$  вторичный черенковский свет.

**Энергетический бюджет «в свет»:**

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

# 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 ( $n, \gamma$ ) на тепловых нейтронах:**

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

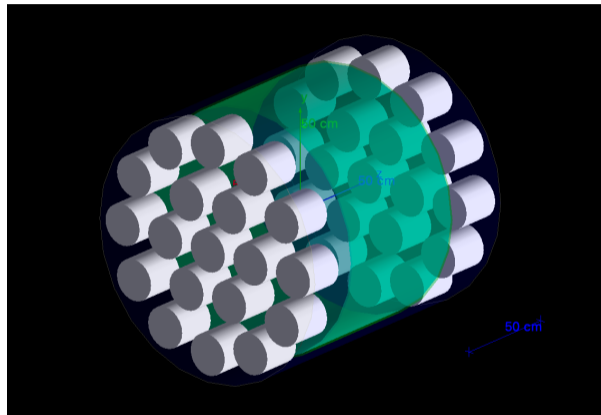
# Geant4-модель: геометрия

## Цилиндрическая компоновка:

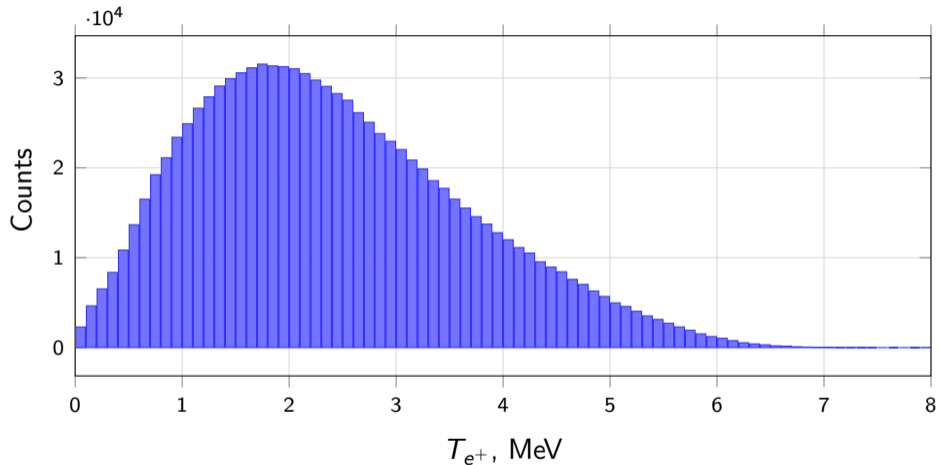
- стальной бак  $R = 630$  мм,  $H = 1300$  мм, отражающие стенки ( $R_{refl} = 0.9$ );
- внешний слой воды;
- внутренний PMMA-сосуд  $R = 590$  мм,  $H = 700$  мм;
- мишень — вода + допант (Cd или Gd, 1 г/л).

**ФЭУ:** 38 шт. (19 сверху + 19 снизу),  
кольца 1+6+12,  $R_{PMT} = 100$  мм.

**Триггер:**  $N_{fired} \geq 3$ ; **отклик:**  $N_{pe}^{tot}$ ,  
асимметрия  $A$ .

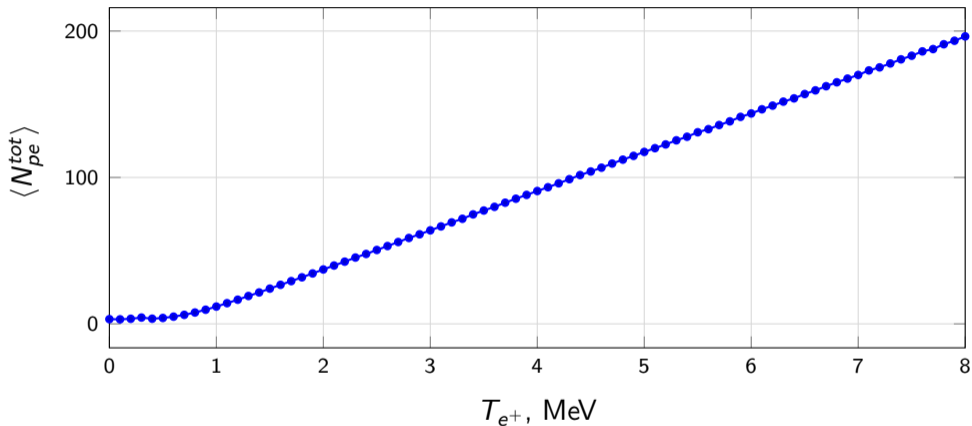


# Результат 1: спектр кинетической энергии позитронов



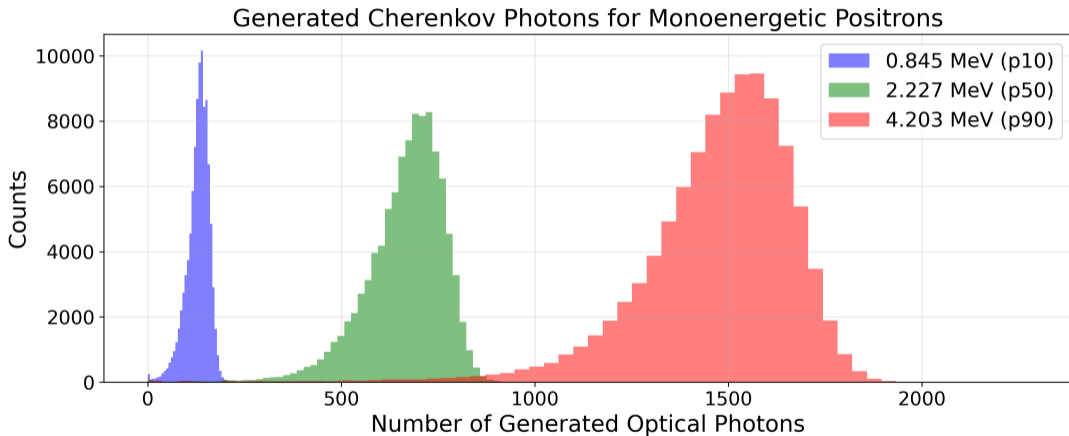
Зарегистрированный спектр позитронов IBD (условие  $N_{fired} \geq 3$ , 98.8% от  $10^6$  событий).  
Среднее  $\langle T_{e^+} \rangle \approx 2.40$  MeV.

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



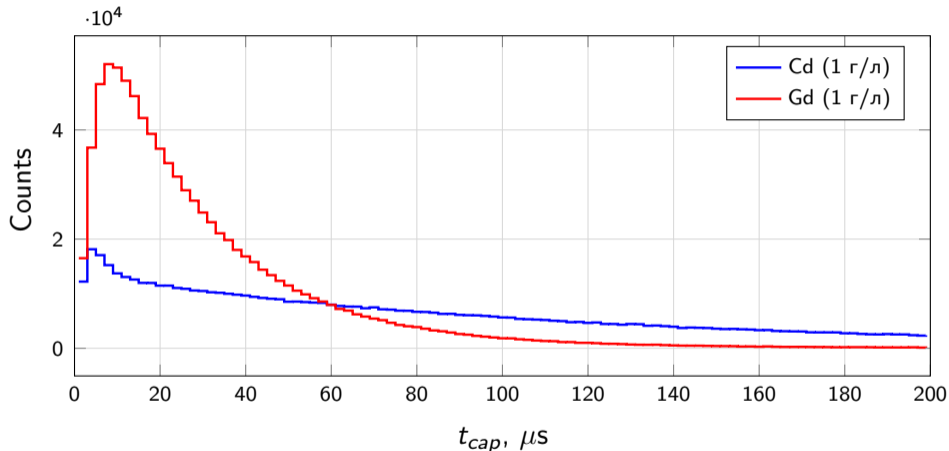
Моноэнергетические позитроны на равномерной сетке  $T_{e^+}$  ( $2 \times 10^4$  событий/точка),  $N_{fired} \geq 3$ . Среднее по IBD-событиям:  $\langle N_{pe}^{tot} \rangle \approx 106.6$ .

# Распределения числа черенковских фотонов



Моноэнергетические позитроны при 10-, 50- и 90-м перцентилях спектра IBD ( $T_{e^+} \approx 0.85, 2.23, 4.20$  MeV). С ростом  $T_{e^+}$  растёт число сгенерированных фотонов.

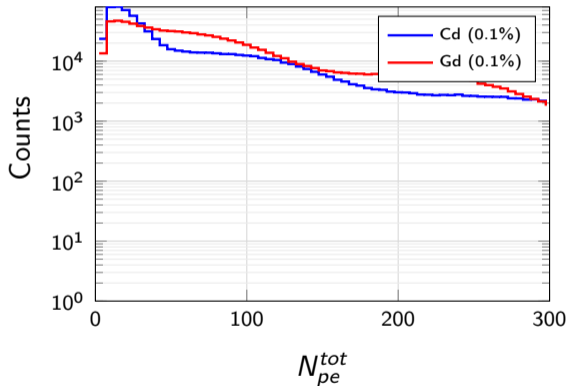
# Результат 3: время жизни нейтронов Cd vs Gd



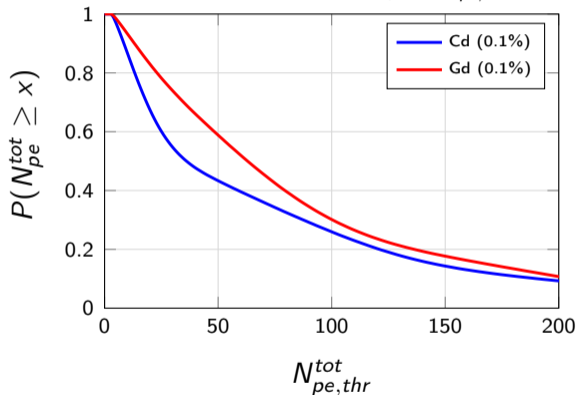
$T_n = 10$  keV,  $10^6$  событий, условие  $N_{fired} \geq 3$ . Средние времена:  $\langle t_{cap}^{Cd} \rangle \approx 113.5 \mu s$ ,  
 $\langle t_{cap}^{Gd} \rangle \approx 32.2 \mu s$ .

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

Гистограмма  $N_{pe}^{tot}$ , log Y



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



$10^6$  событий,  $N_{fired} \geq 3$ .  $\langle N_{pe}^{Cd} \rangle \approx 72.1$ ,  $\langle N_{pe}^{Gd} \rangle \approx 84.8$ . При  $N_{pe,thr}^{tot} = 50$ : 58.8% (Gd) vs 43.3% (Cd). Причина — большая множественность  $\gamma$ -каскада ( $\bar{M}_\gamma \approx 4-5$  у Gd vs  $\sim 2-3$  у Cd).

# Асимметрия prompt-сигнала и направление $\bar{\nu}_e$

Реакция IBD сохраняет угловую корреляцию (модель Vogel–Beacom): направление позитрона связано с потоком  $\bar{\nu}_e$ . Для детектора с двумя крышками ФЭУ вводится *событийная асимметрия*:

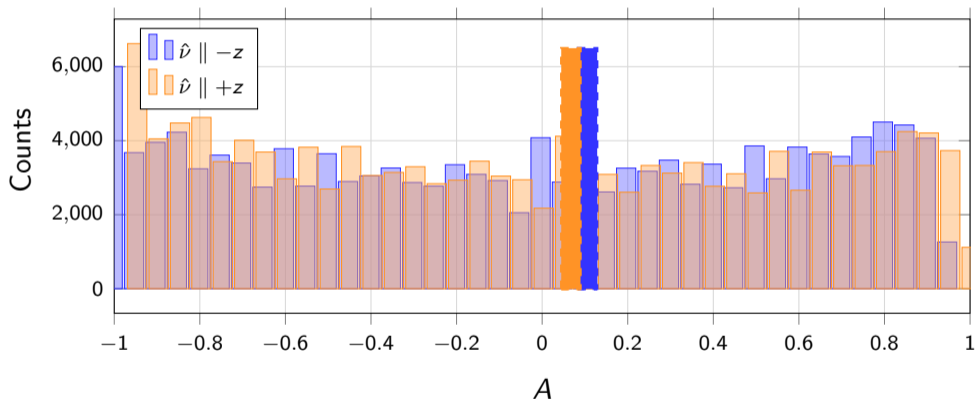
$$A \equiv \frac{N_{pe}^{top} - N_{pe}^{bottom}}{N_{pe}^{top} + N_{pe}^{bottom}}. \quad (5)$$

Моделирование: prompt IBD без нейтрона,  $\hat{\nu} \parallel \pm z$ ,  $1.5 \cdot 10^5$  событий/направление,  $N_{fired} \geq 3$  (93.8%,  $\sim 1.4 \cdot 10^5$  после триггера):

$$\langle A \rangle_{\hat{\nu} \parallel -z} = +0.0204 \pm 0.0017, \quad \langle A \rangle_{\hat{\nu} \parallel +z} = -0.0186 \pm 0.0017. \quad (6)$$

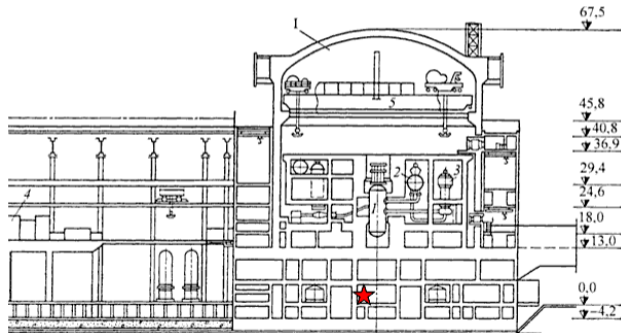
Различение направлений:  $\Delta \langle A \rangle \approx 0.039$ , значимость  $\sim 17\sigma$ .

# Распределение асимметрии $A$ для $\hat{\nu} \parallel \pm z$



# Калининская АЭС: размещение детектора iDREAM

Калининская АЭС (3-й энергоблок, ВВЭР-1000,  $P_{th} = 3$  ГВт). Детектор iDREAM размещён в помещении под реактором.



- расстояние до центра активной зоны  $r \sim 20\text{--}30$  м; консервативно  $r = 20$  м;
- естественная защита от космического фона  $\sim 15\text{--}20$  м водного эквивалента;
- то же место и условия, что и у детектора iDREAM.

# Ожидаемая скорость счёта на Калининской АЭС

Скорость IBD-реакций при постоянной мощности реактора:

$$R^{IBD} = \frac{N_p}{4\pi L^2} \frac{P_{th}}{\langle E_f \rangle} \langle \sigma \rangle, \quad N_p^{our} \approx 5.12 \cdot 10^{28}. \quad (7)$$

Изотоп	$\alpha_i$	$\sigma_i, \text{см}^2$	$E_i, \text{МэВ}$
$^{235}\text{U}$	0.70	$6.30 \cdot 10^{-43}$	201.9
$^{238}\text{U}$	0.08	$9.38 \cdot 10^{-43}$	205.5
$^{239}\text{Pu}$	0.20	$4.33 \cdot 10^{-43}$	210.0
$^{241}\text{Pu}$	0.02	$6.01 \cdot 10^{-43}$	213.6
Ср.	—	$6.15 \cdot 10^{-43}$	204.0

$$R_{our}^{IBD} \approx 4.97 \cdot 10^3 \text{ реакций/сутки } (\varepsilon = 1)$$

$$\varepsilon_{tot}^{Gd} = 0.988 \cdot 0.892 \approx 0.881$$

$$\varepsilon_{tot}^{Cd} = 0.988 \cdot 0.783 \approx 0.774$$

$$R_{Gd}^{reg} \approx 4.4 \cdot 10^3 \text{ соб./сутки}$$

$$R_{Cd}^{reg} \approx 3.8 \cdot 10^3 \text{ соб./сутки}$$

Оценка оптимистична: фоны не учтены.

# Время накопления статистики для направленной асимметрии

Для значимости  $S = |\langle A \rangle| / \sigma_{\langle A \rangle}$  при  $\sigma_A = 0.62$ ,  $|\langle A \rangle| \approx 0.020$ :

$$t = \frac{S^2 \sigma_A^2}{|\langle A \rangle|^2 R_{\text{trig}}}, \quad R_{\text{trig}} \approx 4.2 \cdot 10^3 \text{ соб./сутки.} \quad (8)$$

Одно направление (отличие от изотропного случая):

- $3\sigma$ :  $t \approx 2$  сут;
- $5\sigma$ :  $t \approx 6$  сут.

Оценки — нижние границы; фоны и конечный размер активной зоны увеличат необходимое время.

# Выводы и дальнейшая работа

## Итоги:

- Geant4-модель водного черенковского детектора IBD; учтены  $n(\lambda)$ ,  $L_{abs}(\lambda)$ ,  $QE(\lambda)$ ;
- prompt ( $N_{fired} \geq 3$ , 98.8%):  $\langle N_{pe}^{tot} \rangle \approx 107$ ,  $\langle T_{e+} \rangle \approx 2.4$  MeV;
- delayed: **Gd**  $\succ$  **Cd** —  $t_{cap}$  (32.2 vs 113.5  $\mu s$ ),  $\langle N_{pe} \rangle$  (84.8 vs 72.1),  $\varepsilon_{trig}$  (89.2% vs 78.3%);
- асимметрия A: чувствительность к направлению  $\bar{\nu}_e$  ( $\sim 17\sigma$  при  $1.4 \cdot 10^5$  событий);
- Калининская АЭС ( $r = 20$  м):  $R_{Gd}^{reg} \approx 4.4 \cdot 10^3$ ,  $R_{Cd}^{reg} \approx 3.8 \cdot 10^3$  соб./сутки; направление — за 2–6 сут.

## Дальнейшая работа:

- учёт фонов;
- оптимизация геометрии детектора.

Триггер во всех результатах:  $N_{fired} \geq 3$ .

## Prompt (быстрый сигнал IBD)

- $\langle T_{e^+} \rangle \approx 2.40$  MeV;
- $\langle N_{pe}^{tot} \rangle \approx 107$ ;
- $\varepsilon_{IBD} = 98.8\%$ .

## Направление $\bar{\nu}_e$ (асимметрия $A$ )

- $\Delta\langle A \rangle \approx 0.039$ ,  $\sim 17\sigma$  при  $1.4 \cdot 10^5$  соб.;
- направление на реактор:  $\sim 2$ – $6$  сут.

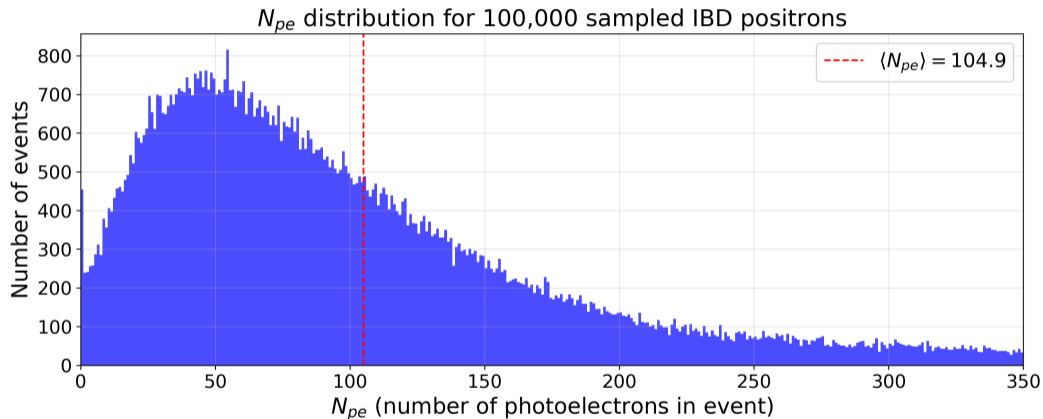
## Delayed: Gd vs Cd

	Gd	Cd
$\langle t_{cap} \rangle$ , мкс	32.2	113.5
$\langle N_{pe} \rangle$	84.8	72.1
$\varepsilon_{trig}$	89.2%	78.3%

## Калининская АЭС ( $r = 20$ м)

- $R_{Gd}^{reg} \approx 4.4 \cdot 10^3$  соб./сутки;
- $R_{Cd}^{reg} \approx 3.8 \cdot 10^3$  соб./сутки.

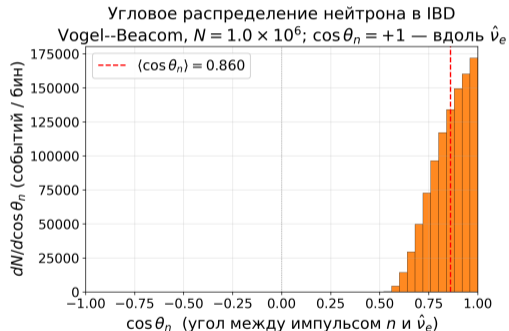
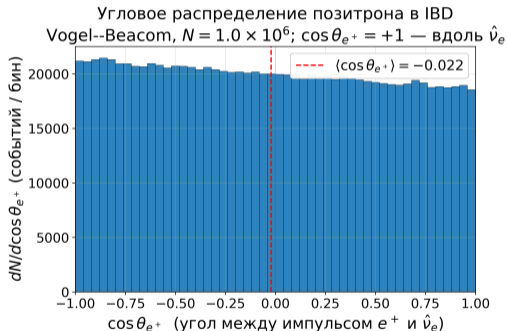
# Приложение: распределение $N_{pe}$ по спектру IBD



Распределение наблюдаемой величины — числа фотоэлектронов  $N_{pe}$  — по  $10^5$  позитронам, разыгранным из спектра IBD (per-event IBD). Среднее  $\langle N_{pe} \rangle \approx 105$ , медиана  $\approx 82$ .

# Приложение: направление позитрона и нейтрона (IBD)

Угол  $\theta$  между импульсом продукта и направлением  $\hat{\nu}_e$ ; модель Vogel–Beacom,  $10^6$  событий IBD.



Нейтрон испускается преимущественно *вперёд* ( $\langle \cos\theta_n \rangle \approx 0.86$ ), позитрон в реакторном диапазоне слабо *назад* ( $\langle \cos\theta_{e^+} \rangle \approx -0.02$ ).