



Расчет ожидаемого эффекта от упругого когерентного рассеяния реакторных антинейтрино в детекторе на основе NaI

Научный руководитель: Литвинович Е.А.

(доц., к.ф.-м.н.)

Студент:

Крапля В.М.

Москва 2025г



Введение - УКРН

$$\frac{d\sigma}{dT} = \frac{G_F^2}{4\pi} M \left(2 - \frac{MT}{E^2} \right) N^2$$

Формула дифференциального сечения УКРН, где

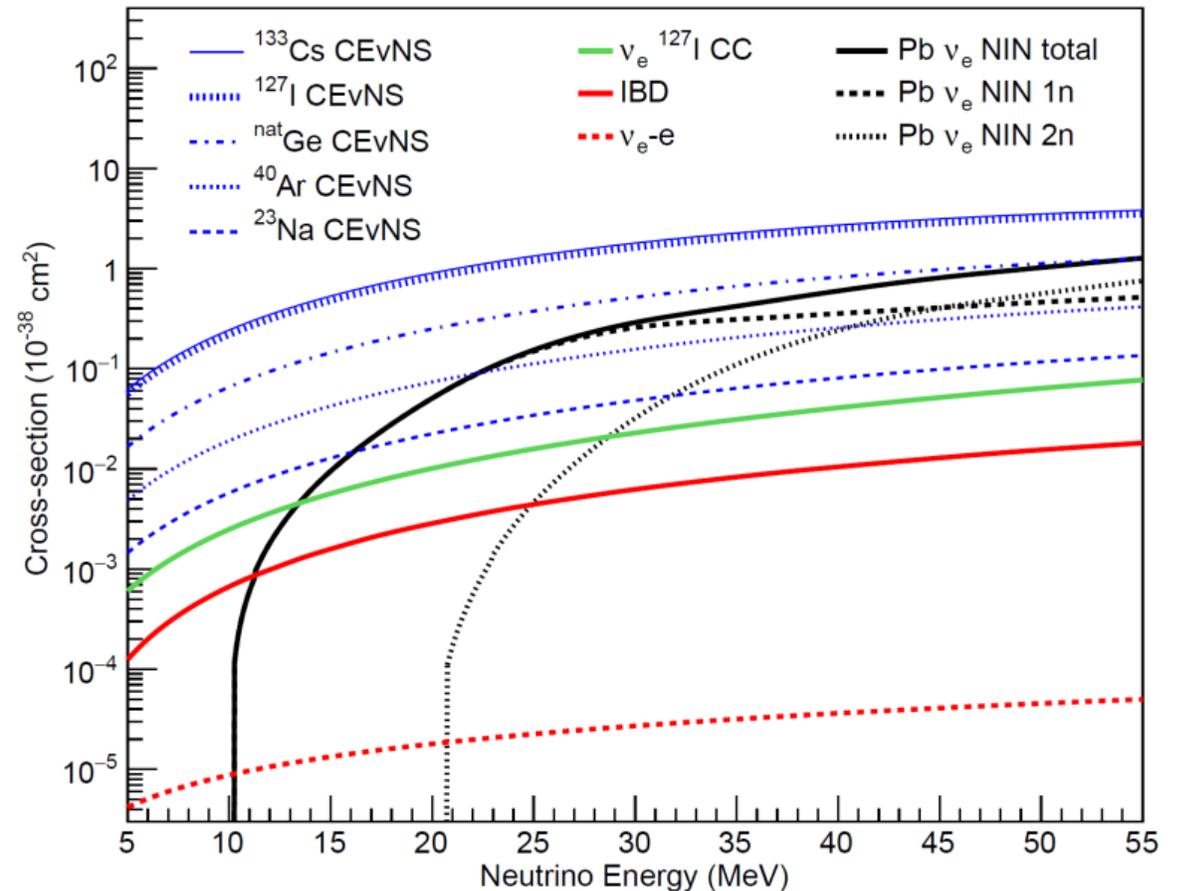
T – энергия отдачи ядра [кэВ]

Gf – постоянная ферми [ГэВ⁻²]

M – масса ядра [МэВ]

E – энергия нейтрино [МэВ]

N – число нейтронов



Сечение УКРН на несколько порядков больше чем у Обратного бета распада, что позволяет создавать детекторы с меньшей массой мишени.

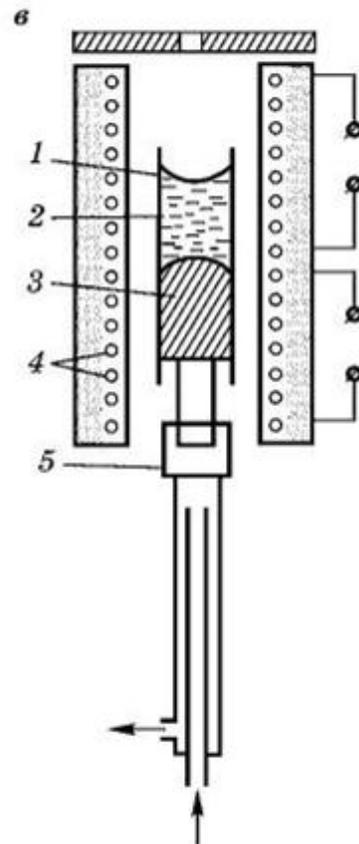
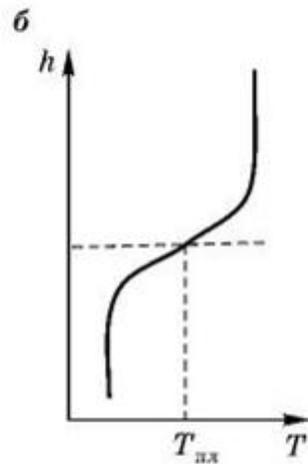
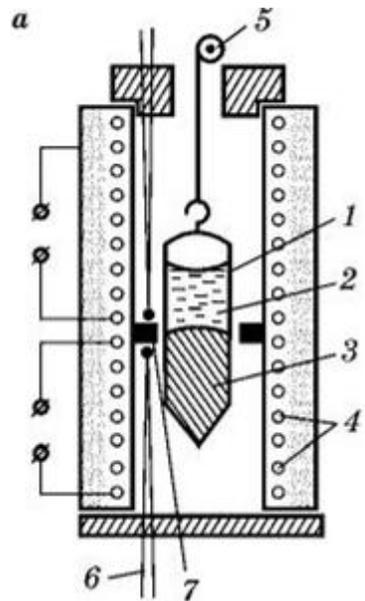
Цель и задачи работы

- **Цель:** вычисление ожидаемого эффекта УКРН в сцинтилляторе NaI(Tl)
- **Задачи:**
 1. Изучение методов производства свежестых сцинтилляторов NaI(Tl)
 2. Построение спектра реакторных антинейтрино
 3. Расчет спектров кванч-факторов для различных атомов
 4. Расчет и построение спектров ядер отдачи для NaI(Tl)

- **УКРН позволяет определять неточности параметров в рамках стандартной модели (СМ), например угол электрослабого смешивания.**
- **Также УКРН позволяет искать новую физику за рамками СМ: стерильные нейтрино, нестандартные нейтринные взаимодействия, аномальный магнитный момент нейтрино.**
- **УКРН открывает возможность к объективному мониторингу ядерных реакторов (их мощности и относительно топливного состава)**

Производство сверхчистых кристаллов NaI(Tl)

Подготовка шихты -> Кристаллизация -> Пост-обработка
(очистка, сушка) (нарезка, чистка)



Схемы метода Бриджмена (а, в) и распределение температуры по высоте печи (б).

- 1** — тигель;
 - 2** — расплав шихты;
 - 3** — кристалл;
 - 4** — на-греватель;
 - 5** — устройство для перемещения контейнера;
 - 6** — термопара;
 - 7** — экран;
- стрелки — поток хладагента

Элемент	Обычные Кристаллы	Кристаллы NEON	Кристаллы COSINE200	DAMA
U_{238}	0.1-1 ppm	-	<3.1 ppt	-
Th_{232}	0.1-1 ppm	-	<3.6 ppt	0.5-7.5 ppt
K_{40}	1-10 ppm	22-137 ppb	<20 ppb	<20 ppb

Таблица 1 - Степень чистоты кристаллов NaI(Tl)

Где **ppm**- количество частей частицы загрязнителя на миллион частей вещества, **ppb** - на миллиард частей вещества, **ppt** - на триллион частей вещества.

Расчет скорости счета полезных событий в 1 кг вещества от УКРН

$$\Phi_{\nu}(E_{\nu}) = \frac{1}{32} \times \frac{10^{20}}{4\pi L^2} \times f(E_{\nu})$$

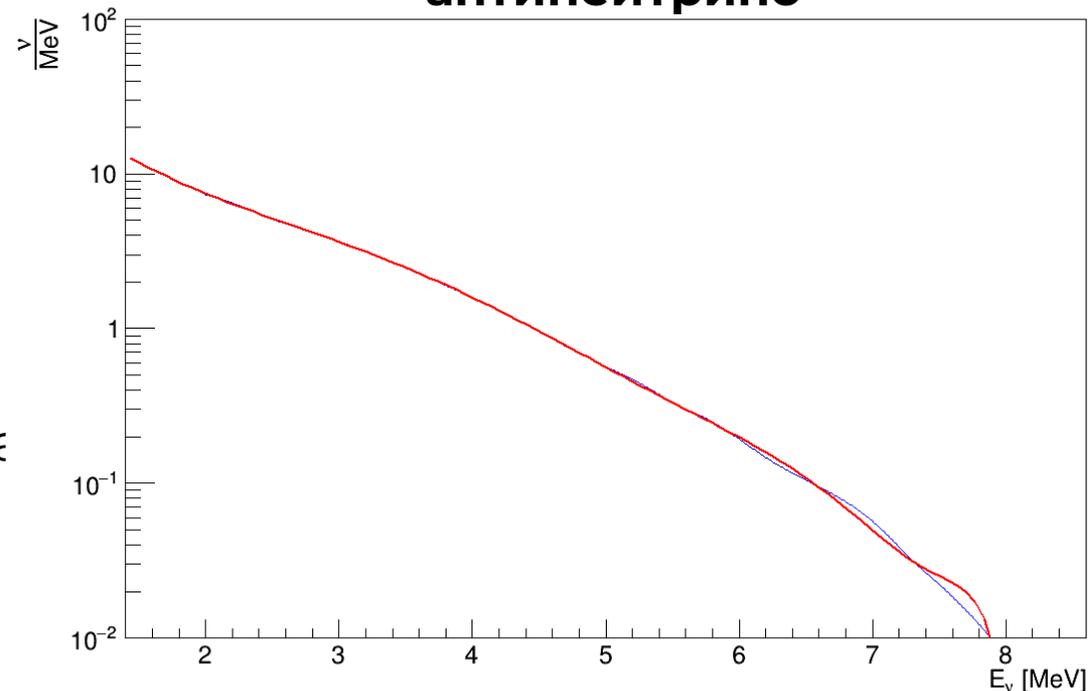
Формула потока нейтрино

L – расстояние от активной зоны реактора до детектора [см]

10²⁰ – поток нейтрино в секунду от реактора тепловой мощностью 3 ГВт [$\frac{\nu}{c}$]

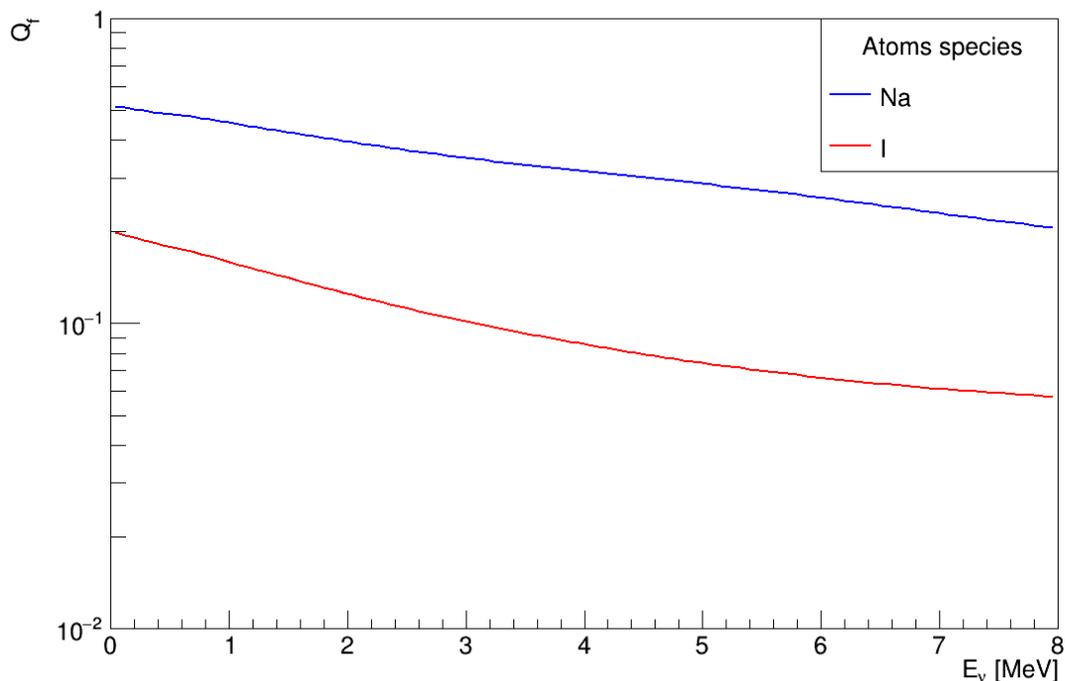
f(E_ν) – суммарный энергетический спектр нейтрино от всех делящихся изотопов [$\frac{\nu}{\text{МэВ}}$]

Энергетический спектр реакторных антинейтрино



$$Q(E) = \frac{L_i(E)}{L_e(E)} = \frac{\int_0^E \frac{dE}{1 + kB\left(\frac{dE}{dr}\right)_i}}{\int_0^E \frac{dE}{1 + kB\left(\frac{dE}{dr}\right)_e}}$$

Квенч-фактор для атомов Йода и Натрия



Q(E) – **квенч-фактор**, описывает гашение энергии передаваемой нейтрино к ядрам, влияет на наблюдаемую T. [%]

Li(E)- Световыход для ионов $\left[\frac{\text{см}^2 \text{МэВ}}{\Gamma}\right]$

Le(E)- Световыход для электронов $\left[\frac{\text{см}^2 \text{МэВ}}{\Gamma}\right]$

kB – фактор Биркса (зависит от материала) $\left[\frac{\Gamma}{\text{см}^2 \text{МэВ}}\right]$

dE/dr – тормозящая способность (взята из ESTAR,SRIM)

E – энергия частицы [МэВ]

$$\frac{dN}{dT} = N_{\alpha} \sum_i \int_{E_{\nu}^{min}}^{E_{\nu}^{max}} \Phi_i(E_{\nu}) \frac{d\sigma}{dT_{obs}} dE_{\nu}$$

Формула для определения числа событий УКРН:

N_{α} – количество атомов в мишени

Φ_i – поток нейтрино сорта i $\left[\frac{\nu}{\text{см}^2 \text{с МэВ}}\right]$

$d\sigma/dT_{obs}$ – дифференциальное сечение $\left[\frac{\text{см}^2}{\text{МэВ}}\right]$

T_{obs} – энергия ядра отдачи с учетом квенч-фактора [МэВ]

E_{ν} – энергия нейтрино [МэВ]

T – энергия ядра отдачи [кэВ]

$$N_{\alpha} = \frac{m_{delector}}{\sum_{\alpha} M_{\alpha} \eta_{\alpha}} N_A \eta_{\alpha}$$

где **α** -вид атома,

M_{α} -молярная масса $\left[\frac{\text{г}}{\text{моль}}\right]$

η_{α} -стехиометрическая доля [%]

соответствующего атома

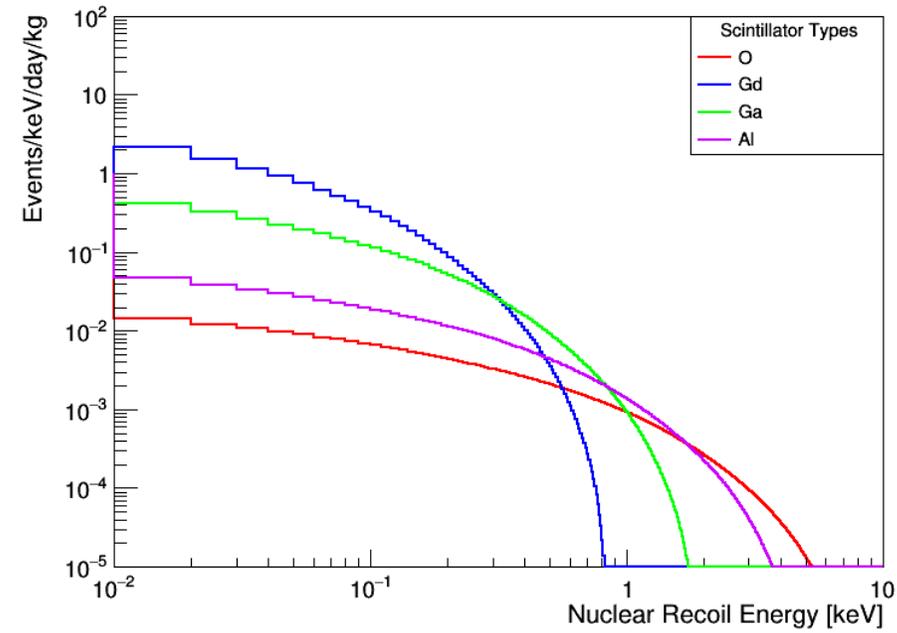
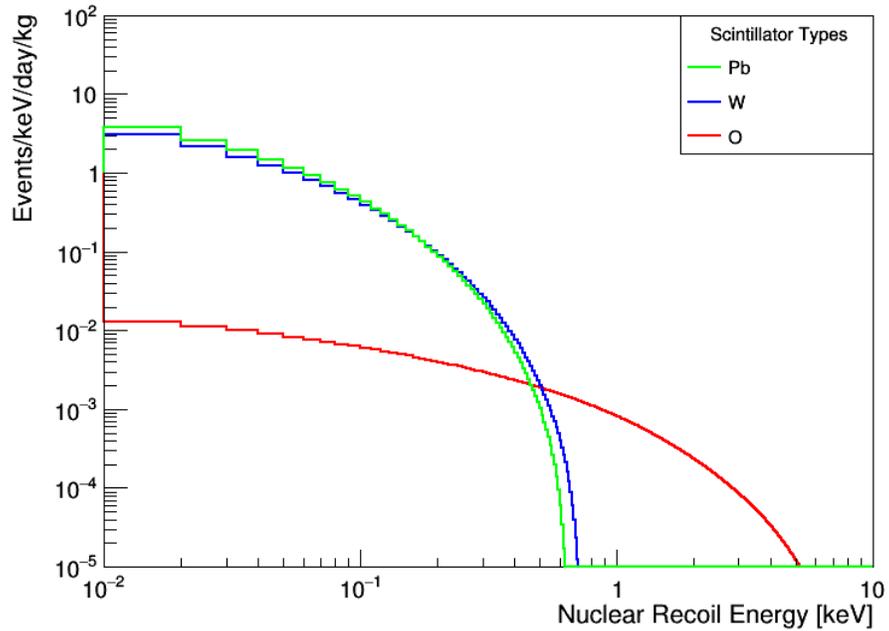
N_A -число Авогадро $\left[\frac{1}{\text{моль}}\right]$

Результаты

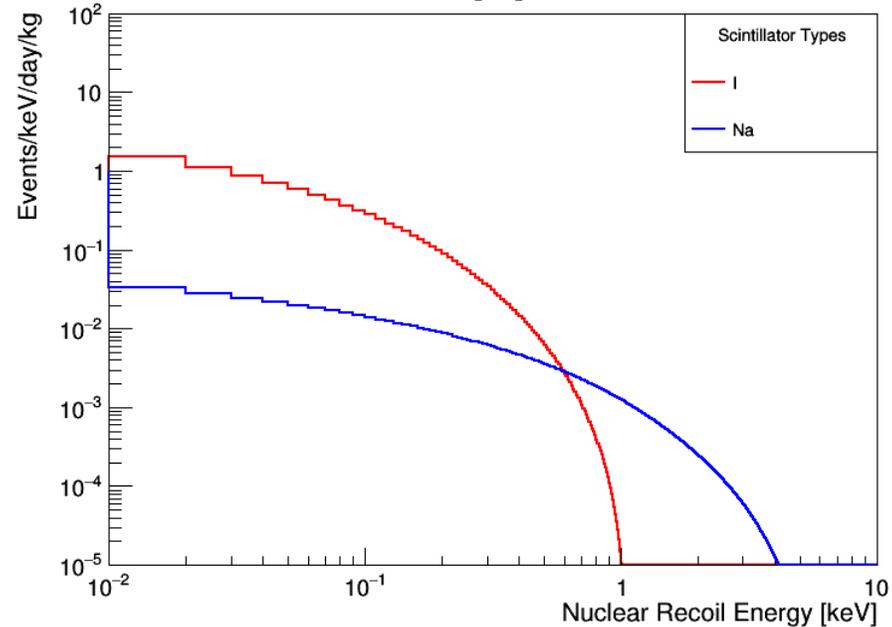
Ожидаемый эффект УКРН в GAGG



Ожидаемый эффект УКРН в RWO4

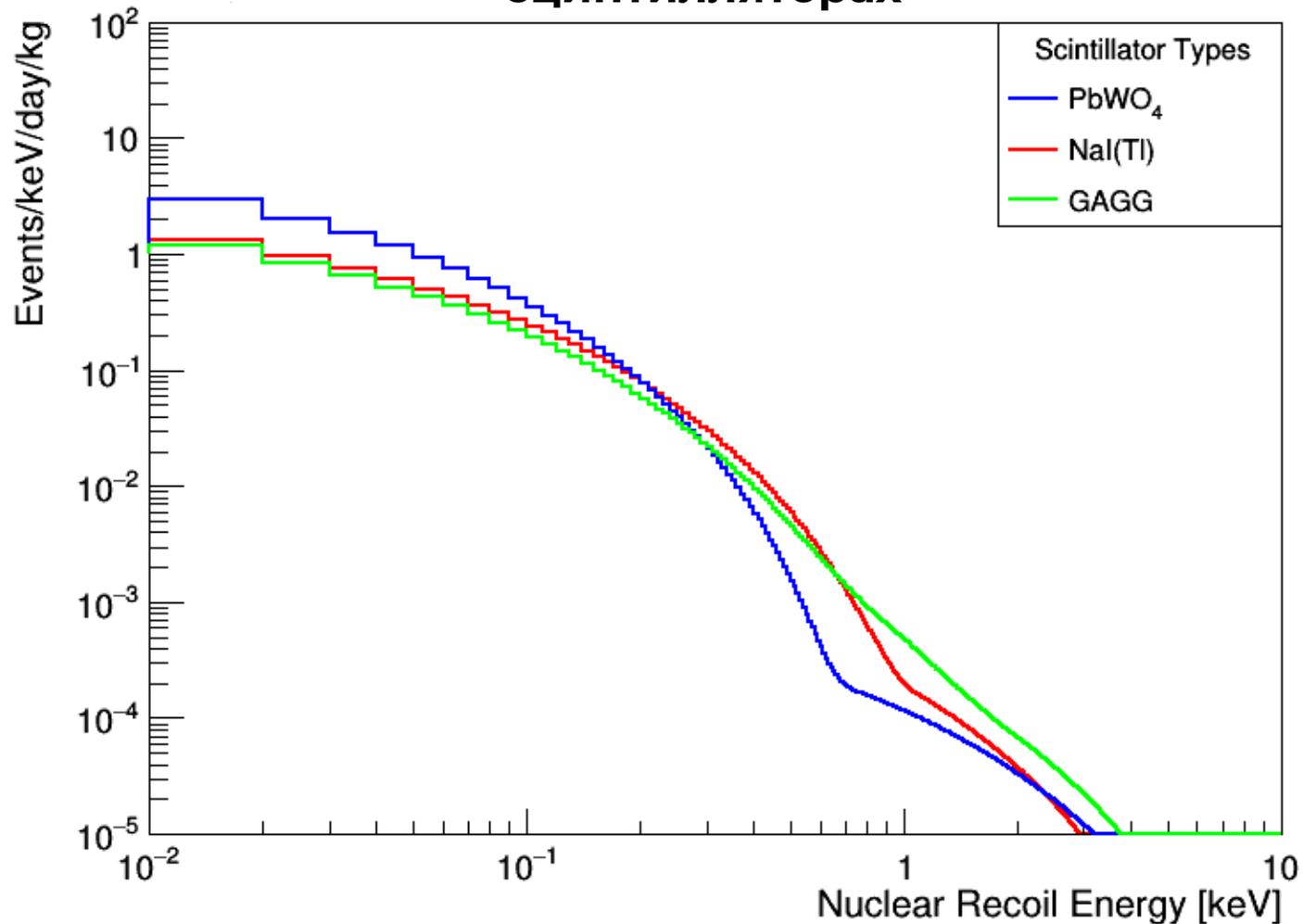


Ожидаемый эффект УКРН в NaI



Результаты

Ожидаемый эффект УКРН в различных сцинтилляторах



- Суммирование предыдущих гистограмм производилось с учетом стехиометрических коэффициентов для различных материалов
- **NaI(Tl)** имеет наибольший эффект УКРН в регионе от **200 до 600 эВ** ядерной отдачи

Заключение

- 1. Чистота от примесей непосредственно самого кристалла сцинтиллятора накладывает основные ограничения на величину энергии порога детектирования.**
- 2. Наблюдение эффекта УКРН от реакторных антинейтрино требует субкэвных порогов детектирования и массы активного вещества больше килограмма.**
- 3. Ввиду малости эффекта УКРН необходимо точно знать значения фоновых «шумов» для успешного наблюдения эффекта**