

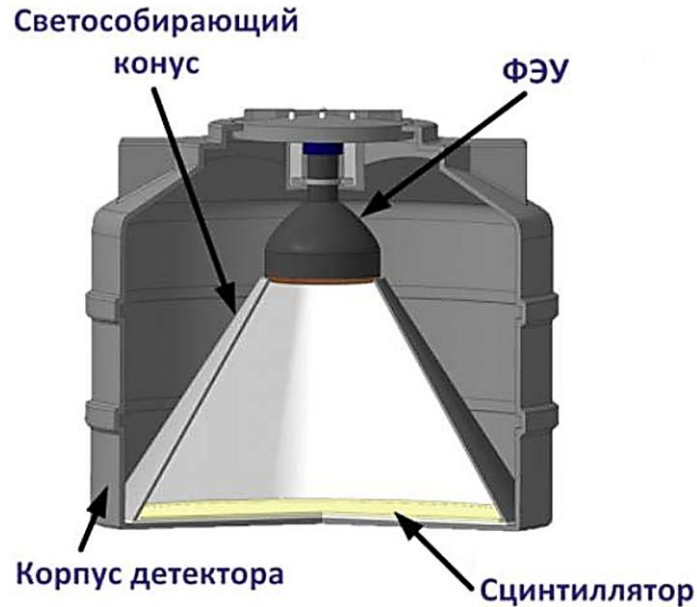
# Моделирование сцинтиллятора на основе оксида Бора для регистрации тепловых нейтронов и электронов электронно-нейтронными детекторами

**Д.А. Кулешов<sup>1\*</sup>, Ю.В. Стенькин<sup>1,2</sup>, О.Б. Щеголев<sup>1,2</sup>, К.О. Куринов<sup>1</sup>, А.А. Лагуткина<sup>2</sup>**

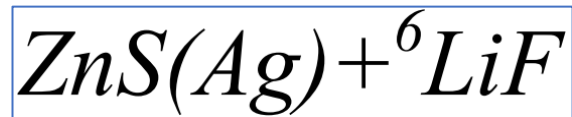
**<sup>1</sup> Институт ядерных исследований РАН**

**<sup>2</sup> Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)**

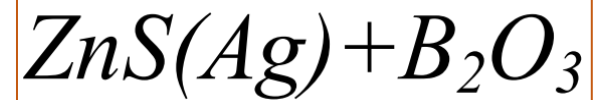
# Электронно-нейтронный детектор



Электронно-нейтронные детекторы были разработаны коллективом сотрудников ИЯИ РАН для изучения широких атмосферных ливней (ШАЛ). Уникальной особенностью данных детекторов является возможность регистрации как электронной, так и основной – адронной компоненты ШАЛ, посредством регистрации вторичных тепловых нейтронов, образующихся в грунте под детекторами. Ключевой элемент детекторов – тонкий диск из неорганического сцинтиллятора, состоящего из сульфида цинка, активированного серебром ( $ZnS:Ag$ ) и соединений изотопа литий-6, либо бор-10.



Сцинтиллятор на основе фторида лития, обогащённого литием-6 (ПРИЗМА-32, МИФИ)

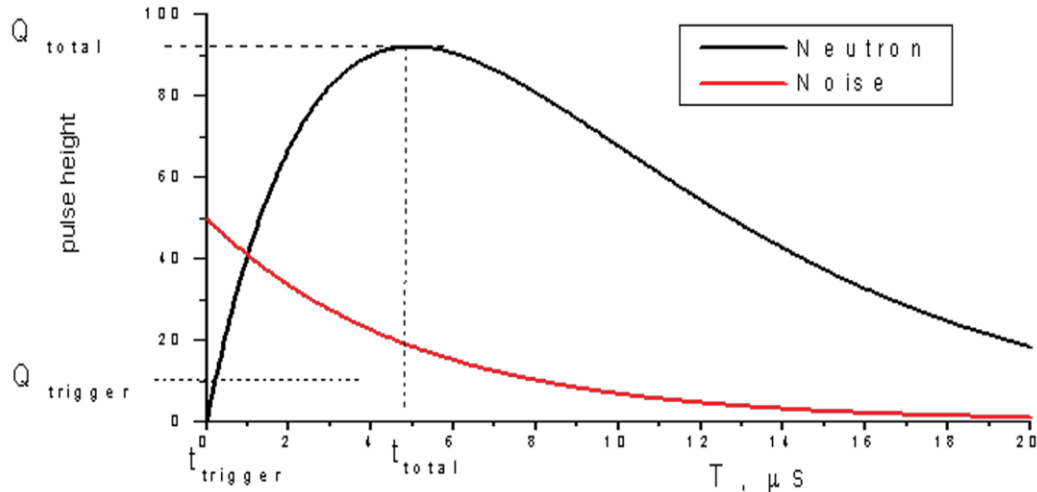


Сцинтиллятор на основе природного бора в высокогорных установках PRISMA-YBJ и ENDA-LHAASO в Китае, а также их московского прототипа ENDA-INR на территории ИЯИ РАН. Ранняя версия борного светосостава (УРАН, МИФИ).

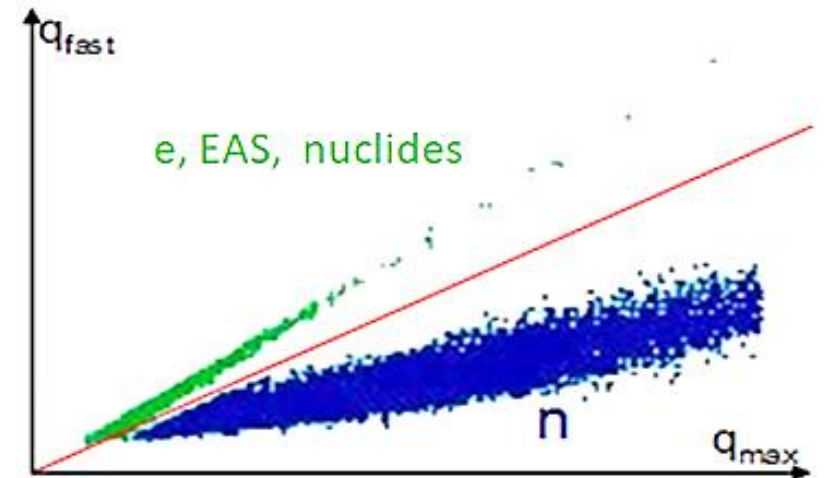
# Электронно-нейтронный детектор

Сигналы с ФЭУ проходят через интегральный дискриминатор-усилитель (ДИУ) с временами интегрирования 1 мкс и 5 мкс, либо 22 мкс.

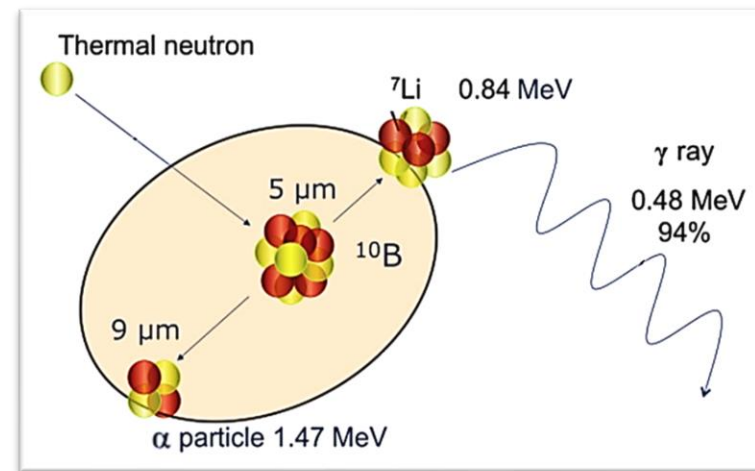
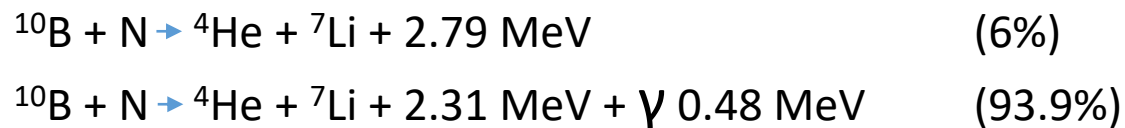
Используя большее время интегрирования и дольше собирая заряд (энергия, выделяемая при захвате нейтрона на боре меньше), мы увеличиваем полезный сигнал (подавляя при этом более короткие фоновые) и, тем самым, минимизируем потери в амплитуде сигнала.



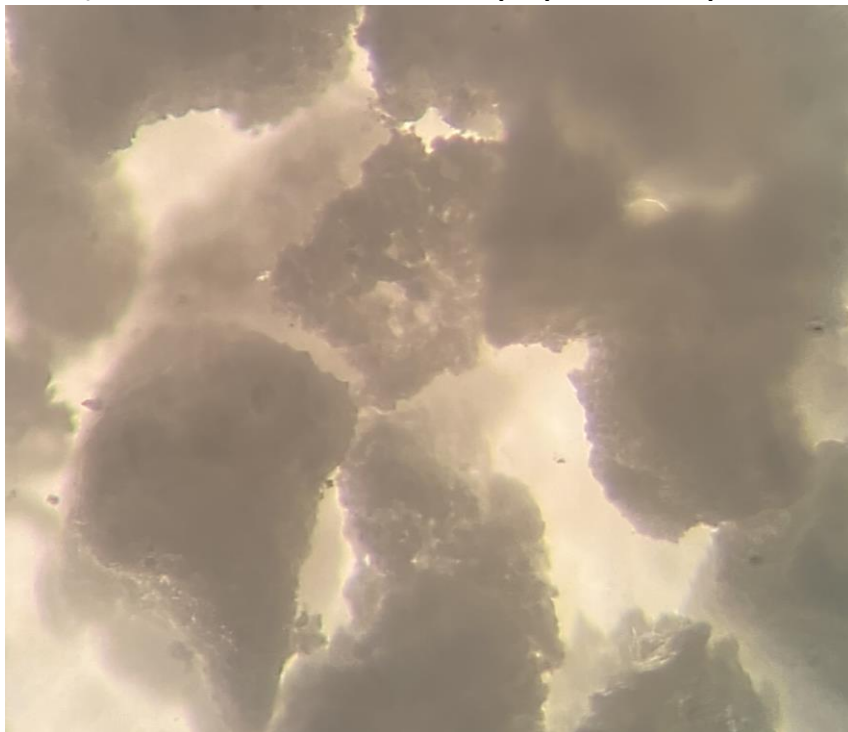
Сигналы отбираются по форме импульса либо как **нейтронный** «медленный», либо как шумовой «быстрый», куда попадают шумы ФЭУ, либо одновременное прохождение через сцинтиллятор нескольких заряженных частиц или гамма-квантов.



# Сцинтиллятор на основе природного бора



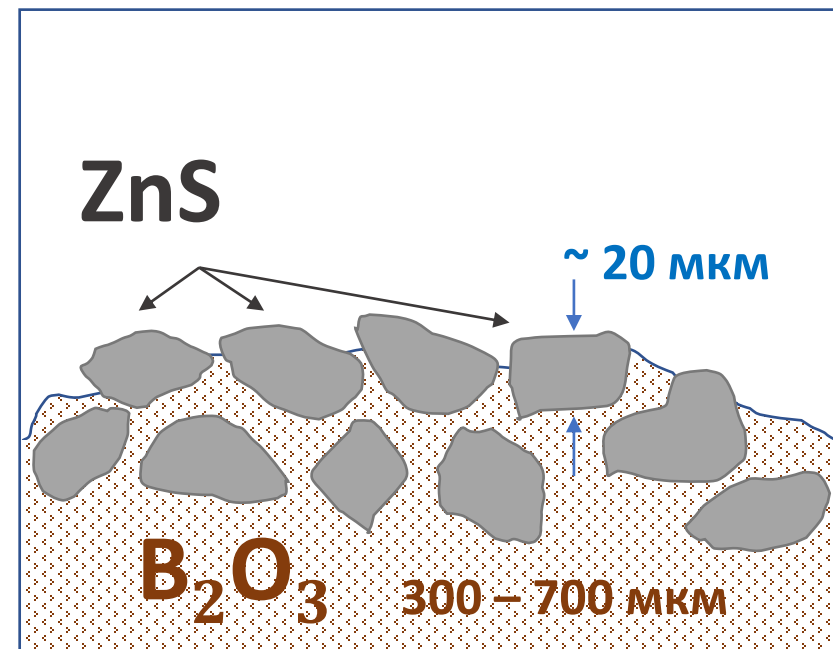
Структура сцинтиллятора **ЛРБ-2** на основе природного бора  
(ЗАО НПФ «Люминофор», Ставрополь)



Модель сцинтиллятора



Сцинтиллятор произведён путём спекания кристаллов  
**ZnS** ( $T_{\text{плавления}} = 1185 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varnothing 20 \text{ мкм}$ ) и  
**B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** ( $T_{\text{плавления}} = 480 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varnothing 300\text{-}700 \text{ мкм}$ )



толщина **50 мг/см<sup>2</sup>**, весовое соотношение **ZnS:B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 13:7**  
теоретическая эффективность **~ 20%**

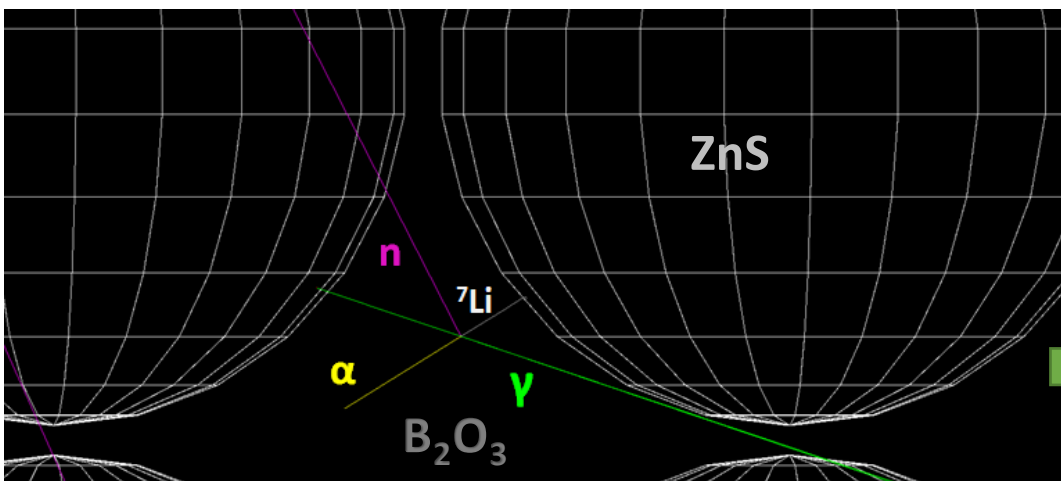
# Сцинтиллятор на основе природного бора

Моделирование в GEANT4 сцинтиллятора **ЛРБ-2**:

- а) Тонкий диск составного вещества из **ZnS** и **B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** в пропорции 13:7 по массе
- б) Несколько примыкающих друг к другу слоёв **ZnS** и **B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** с большой суммарной площадью поверхности
- в) Шары из **ZnS** ( $\varnothing$  20 мкм), погружённые в кубические кристаллы **B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** (500 мкм)

Особенность регистрации взаимодействия  $^{10}\text{B}$  с нейтроном заключается в том, что выделяемая энергия реакции захвата теплового нейтрона должна выделиться именно в кристалле **ZnS(Ag)**, и впоследствии преобразоваться в сцинтилляционные фотоны.

Пробеги  $\alpha$ -частицы и  $^7\text{Li}$  составляют всего несколько микрон, что позволяет сделать вывод о довольно частых случаях потери сцинтилляционного света и предположить, что эффективность регистрации тем выше, чем больше площадь соприкосновения сплавленных зёрен сульфида цинка и оксида бора.

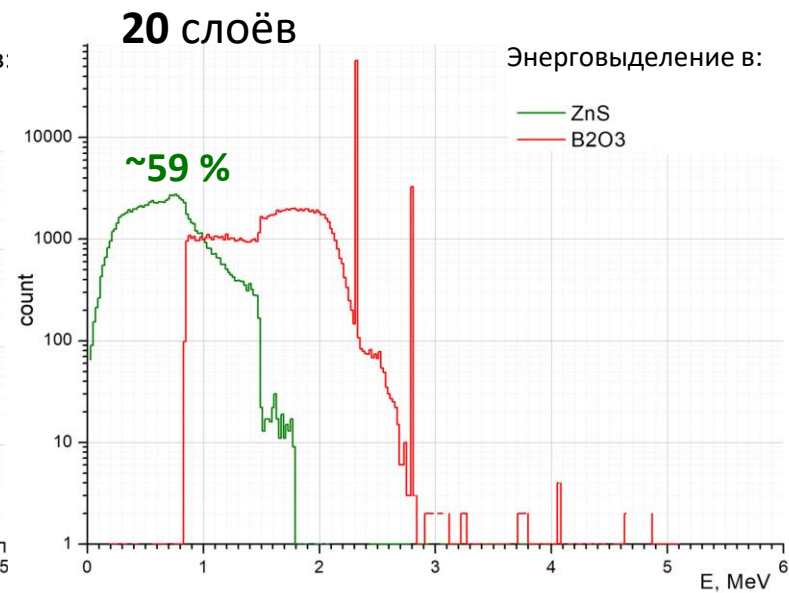
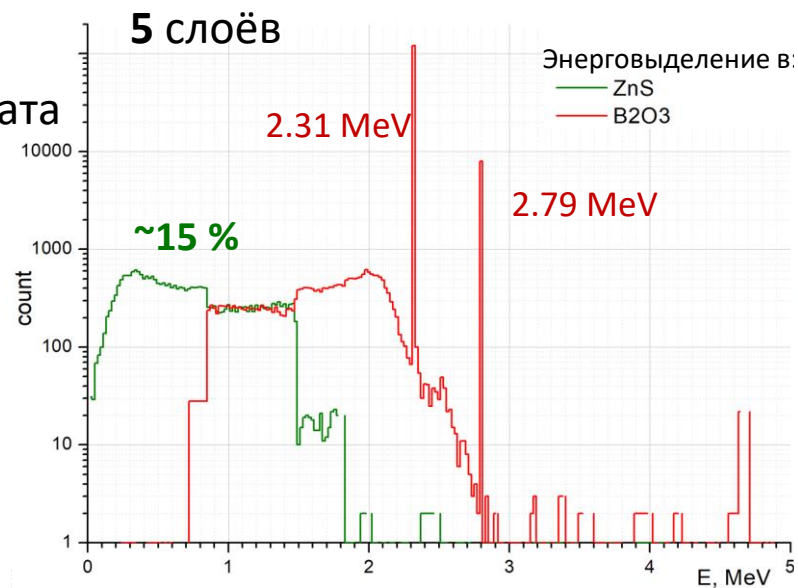
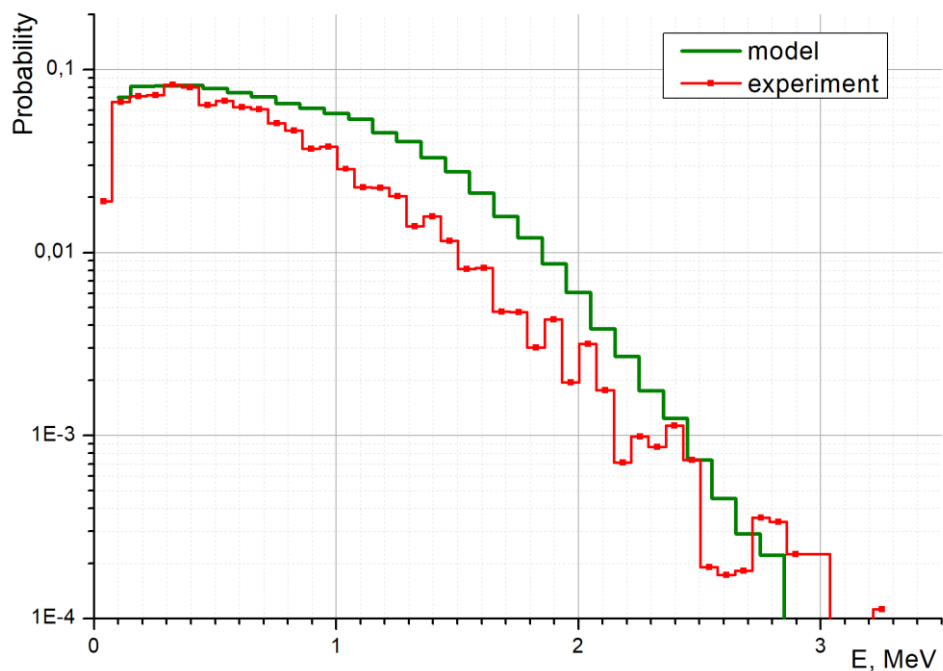


Модель **а)** сцинтиллятора с тонким диском составного вещества из **ZnS** и **B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** не позволяет выяснить долю потерянных событий захватов тепловых нейтронов

модель **в)** - захват теплового нейтрона, визуализация в GEANT4, использован QGSP\_BIC\_HP

# Моделирование сцинтиллятора

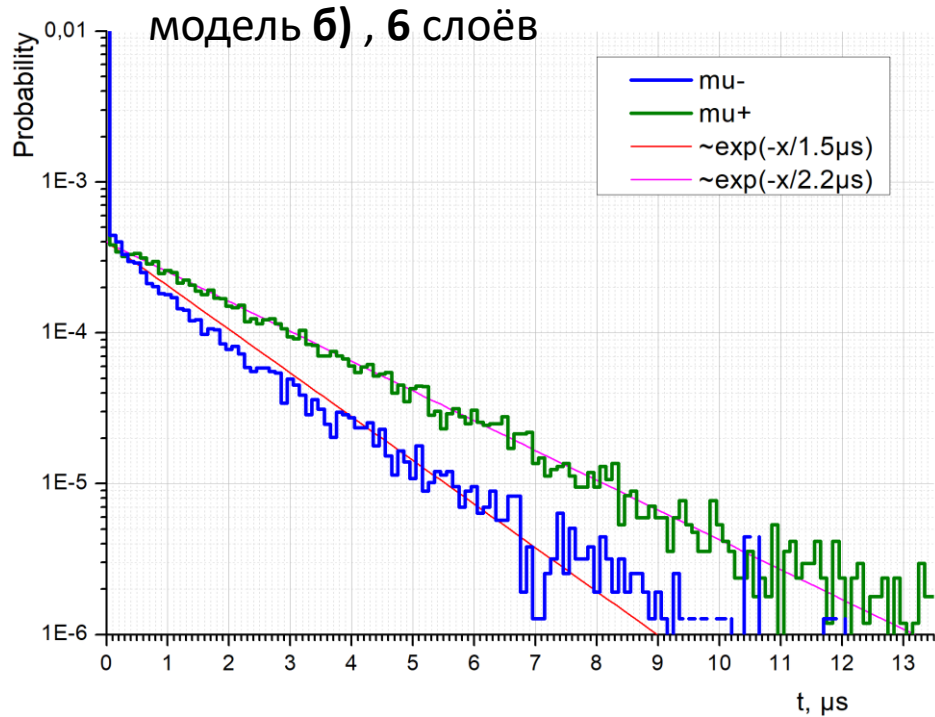
**Модель б)** со слоями **ZnS** и **B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**, доля выделившейся в **ZnS** энергии реакции захвата теплового нейтрона пропорциональна количеству слоёв (а значит  $\Sigma$  площади **ZnS**)



Энерговыведение в **ZnS**, модель **в)** с шарами из **ZnS** ( $\varnothing$  20 мкм), погружёнными в кристаллы **B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** (500 мкм). Экспериментальные данные получены с источником нейтронов <sup>252</sup>Cf, в моделировании также закладывался данный источник. В расчётную модель закладывалось полное окружение лабораторной установки.

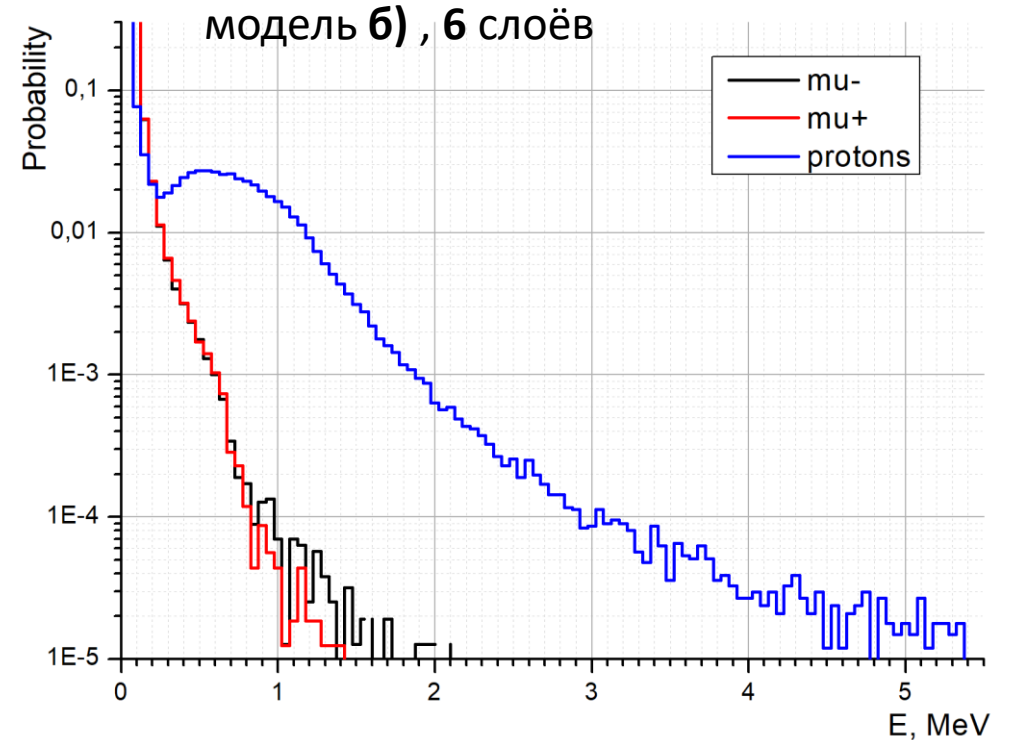


# Моделирование сцинтиллятора



Временной спектр зарегистрированных сцинтиллятором мюонов (100 MeV), модель б) с 6 слоями  $\text{ZnS}$  и  $\text{B}_2\text{O}_3$ . В модель заложено полное окружение лабораторной комнаты.

Энерговыведение в слоях  $\text{ZnS}$  сцинтиллятора, модель б) с 6 слоями  $\text{ZnS}$  и  $\text{B}_2\text{O}_3$ . Мюоны 100 MeV, протоны отдачи от источника  $^{252}\text{Cf}$ .



# Заключение

- Представлена модель сцинтиллятора в программном пакете Geant4 на основе природного бора, разработанная с учётом его сложной внутренней структуры, согласующаяся с экспериментальными данными, полученными в ходе лабораторных работ с радиоактивными источниками,
- в дальнейшем предполагается увеличение статистики МК-моделирования и дополнительное, более тщательное, сопоставление отклика эн-детектора на обновлённый источник нейтронов  $^{252}\text{Cf}$  и бета-источник,
- полученные численные модели эн-детектора будут использоваться для повышения точности восстановления параметров ПКЛ уникальной шаловской установкой ENDA-LHAASO в международном высокогорном эксперименте LHAASO в Китае.