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

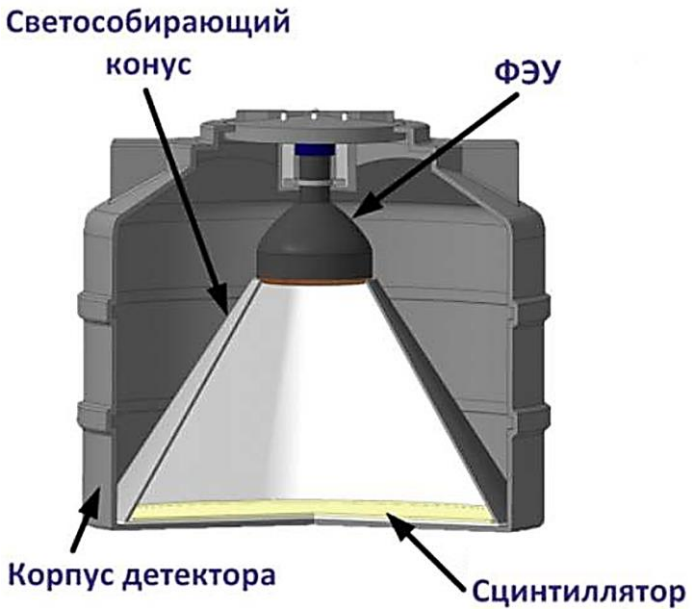
Д.А. Кулешов[1*], Ю.В. Стенькин[1,2], О.Б. Щеголев[1,2], К.О. Куринов[1], А.А. Лагуткина[2]

[1] Институт ядерных исследований РАН

[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

*ИЯИ РАН, Москва, * den_kuleshov481@mail.ru*

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.

$$ZnS(Ag)+{}^{6}LiF$$

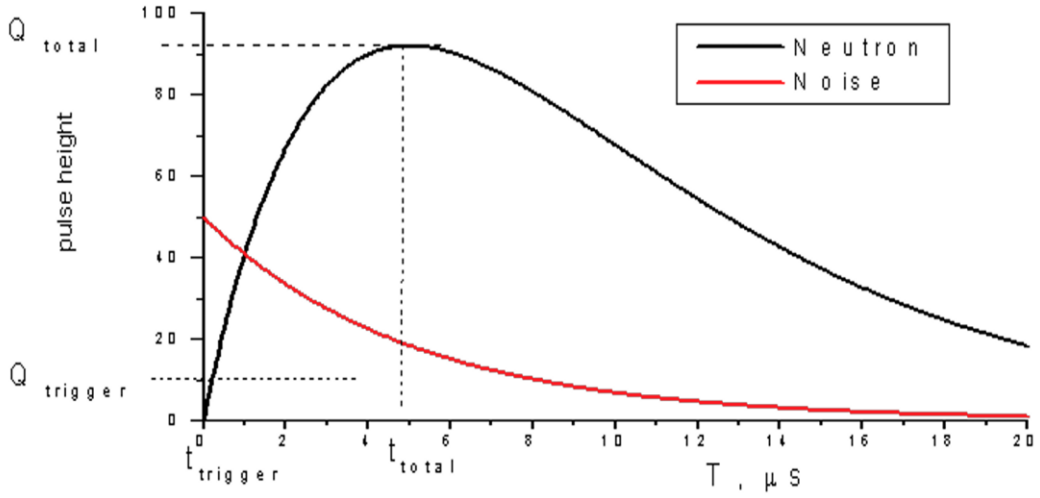
Сцинтиллятор на основе фторида лития, обогащённого литием-6 (ПРИЗМА-32, МИФИ)

$$ZnS(Ag)+B_2O_3$$

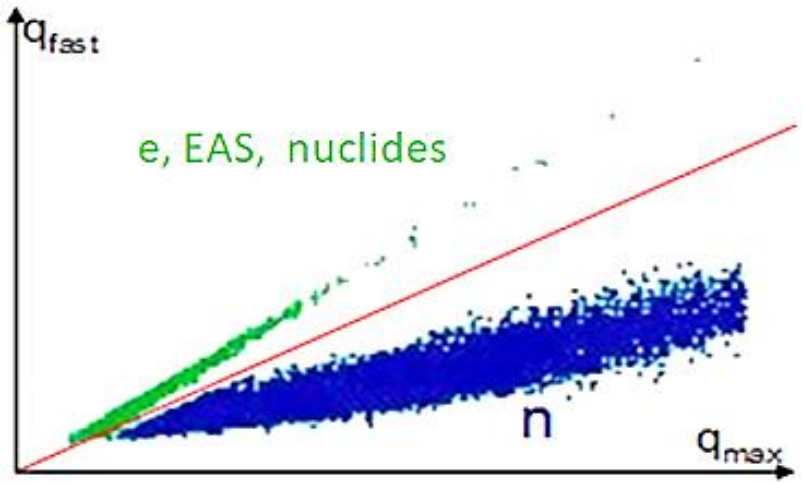
Сцинтиллятор на основе природного бора в высокогорных установках PRISMA-YBJ и ENDA-**LHAASO** в Китае, а также их московского прототипа ENDA-INR на территории ИЯИ РАН. Ранняя версия борного светосостава (УРАН, МИФИ).

Электронно-нейтронный детектор

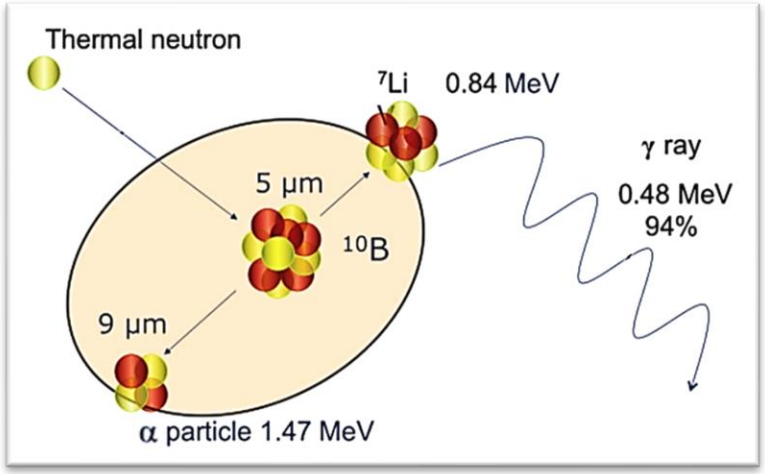
Сигналы с ФЭУ проходят через интегральный дискриминатор-усилитель (ДИУ) с временами интегрирования 1 мкс и 5 мкс, либо 22 мкс.
Используя большее время интегрирования и дольше собирая заряд (энергия, выделяемая при захвате нейтрона на боре меньше), мы увеличиваем полезный сигнал (подавляя при этом более 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.



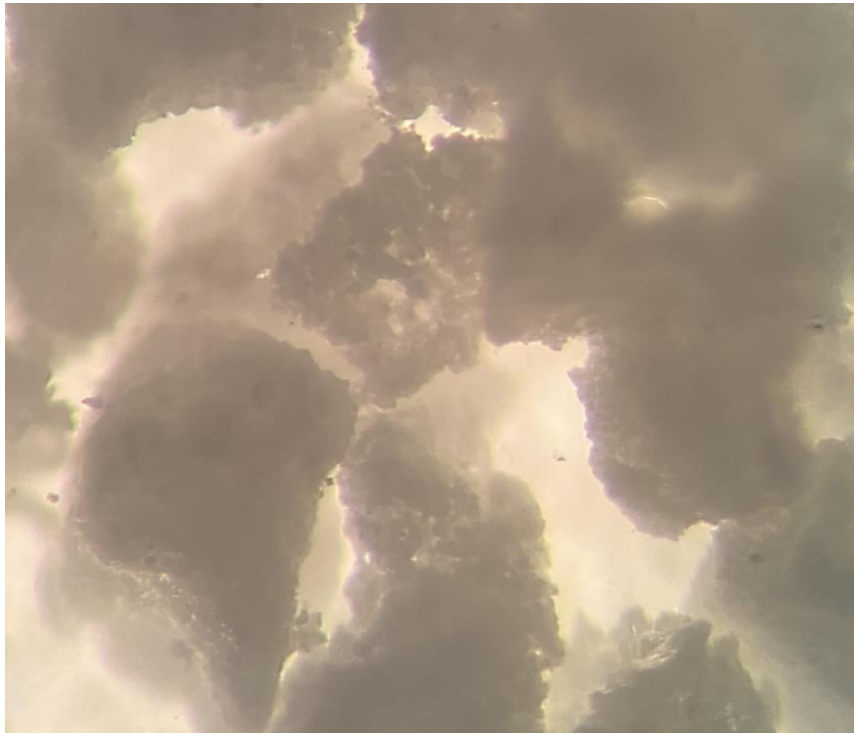
Сцинтиллятор на основе природного бора



$^{10}B + N \rightarrow {}^4He + {}^7Li + 2.79$ MeV (6%)

$^{10}B + N \rightarrow {}^4He + {}^7Li + 2.31$ MeV + γ 0.48 MeV (93.9%)

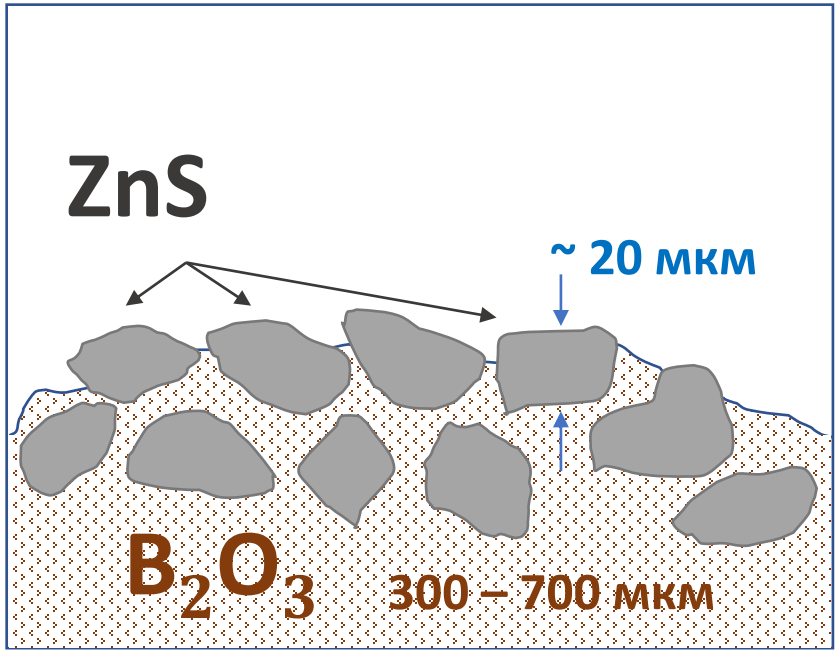
Структура сцинтиллятора **ЛРБ-2** на основе природного бора
(ЗАО НПФ «Люминофор», Ставрополь)



толщина **50** мг/см^2, весовое соотношение **ZnS**:**B_2O_3** = **13**:**7**
теоретическая эффективность ~ **20%**

Сцинтиллятор произведён путём спекания кристаллов
ZnS ($T_{плавления}$ = **1185** °C, Ø 20 мкм) и
B_2O_3 ($T_{плавления}$ = **480** °C, Ø 300-700 мкм)

Модель сцинтиллятора



Сцинтиллятор на основе природного бора

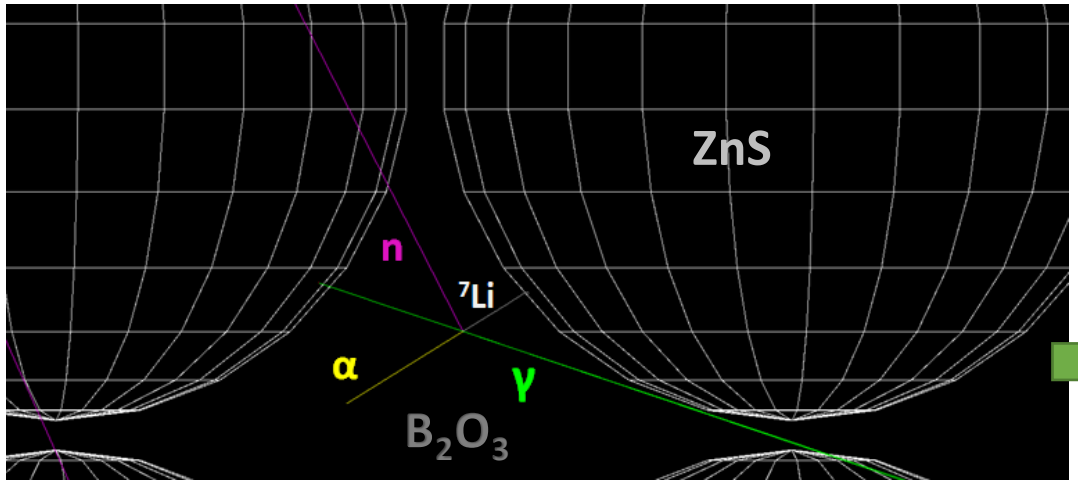
Моделирование в GEANT4 сцинтиллятора **ЛРБ-2**:

а) Тонкий диск составного вещества из **ZnS** и B_2O_3 в пропорции 13:7 по массе

б) Несколько примыкающих друг к другу слоёв **ZnS** и B_2O_3 с большой суммарной площадью поверхности

в) Шары из **ZnS** (Ø 20 мкм), погружённые в кубические кристаллы B_2O_3 (500 мкм)

Особенность регистрации взаимодействия ^{10}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 **α**-частицы и ^{7}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.

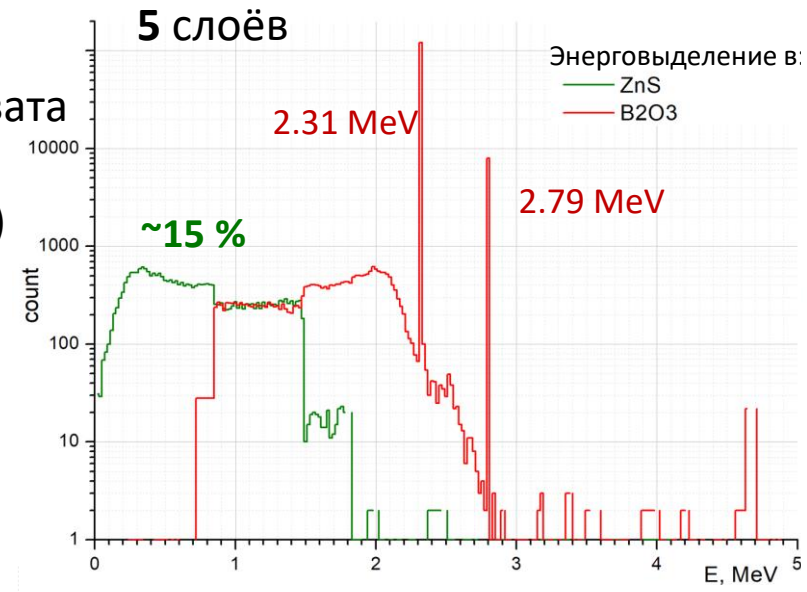


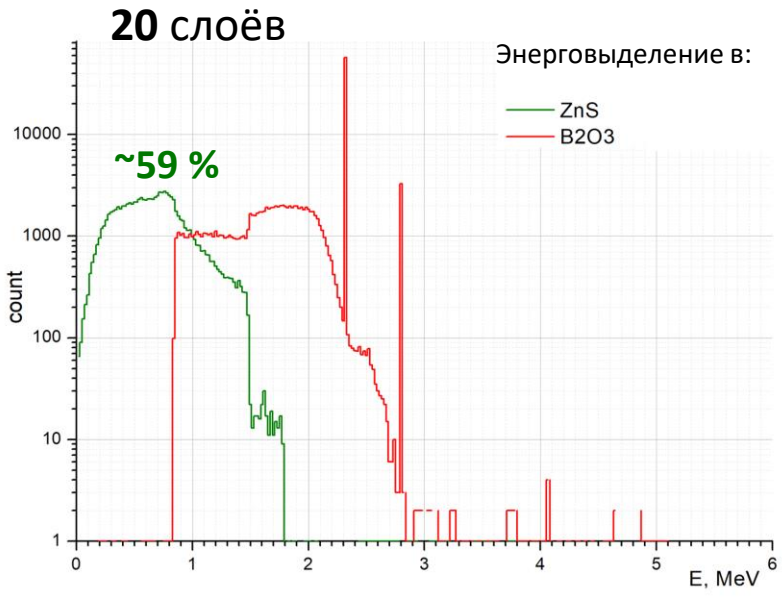
Модель **а)** сцинтиллятора с тонким диском составного вещества из **ZnS** и B_2O_3 в не позволяет выяснить долю потерянных событий захватов тепловых нейтронов

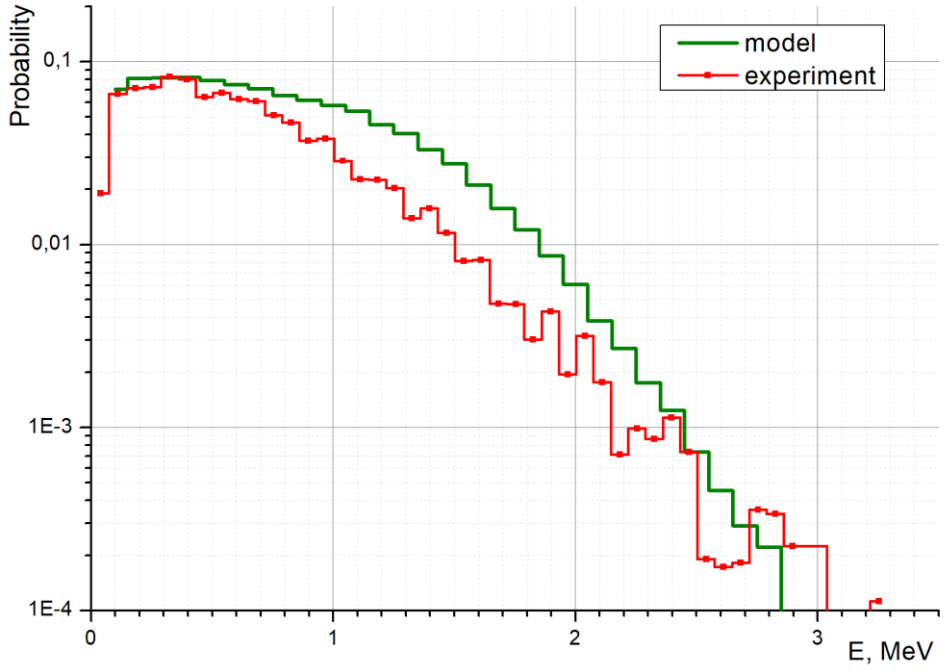
модель **в)** - захват теплового нейтрона, визуализация в GEANT4, использован QGSP_BIC_HP

Моделирование сцинтиллятора

Модель б) со слоями **ZnS** и **B_2O_3,** доля выделившейся в **ZnS** энергии реакции захвата теплового нейтрона пропорциональна количеству слоёв (а значит ∑ площади **ZnS**)

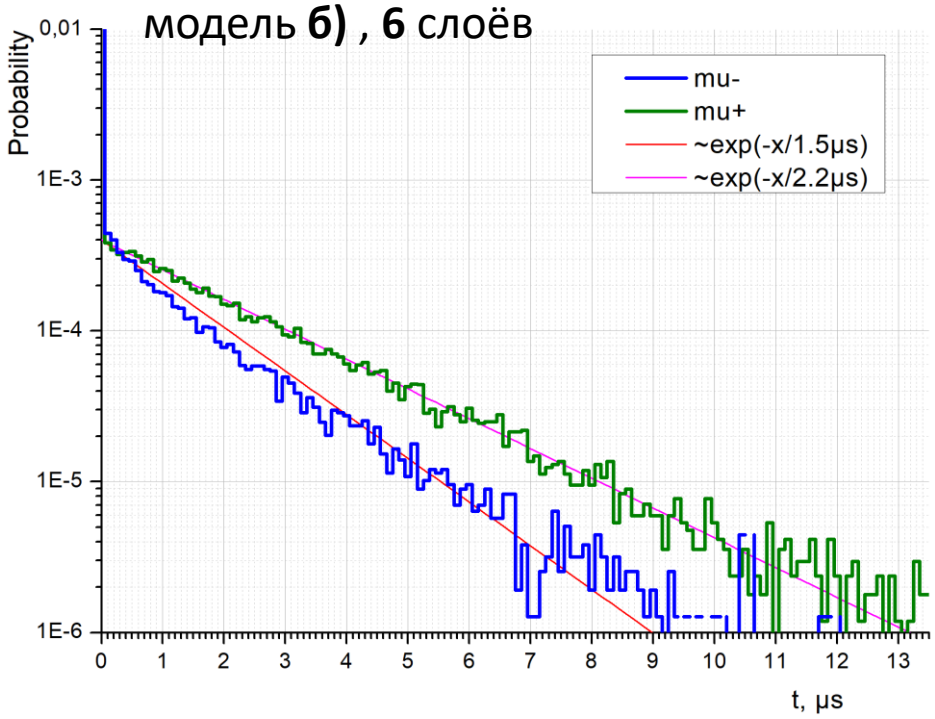




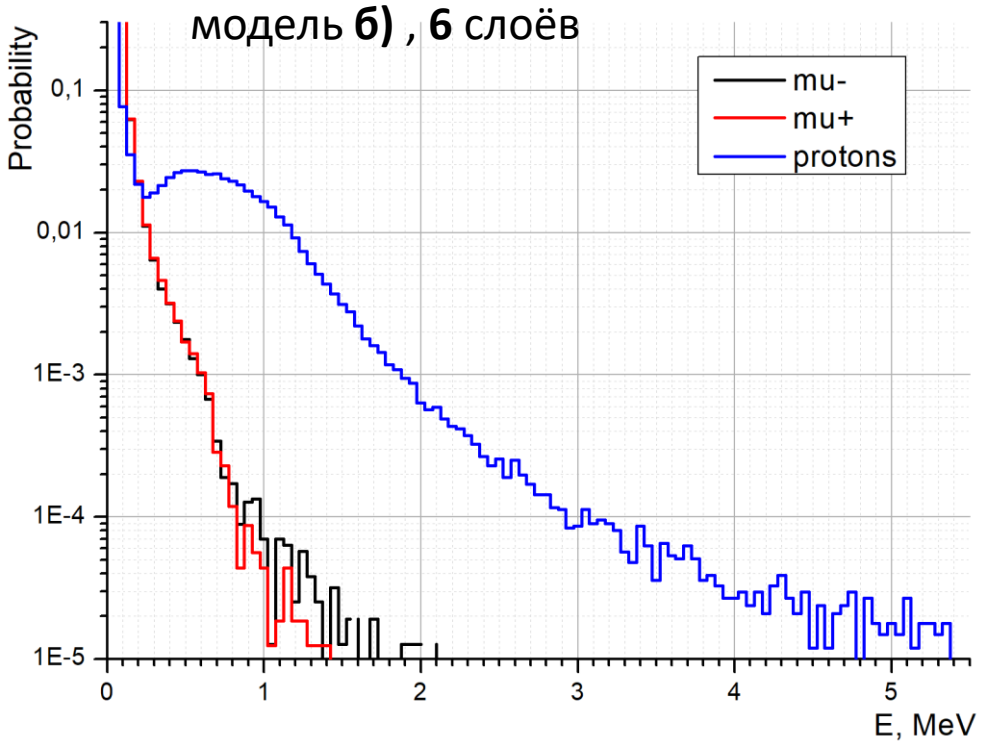


Энерговыделение в **ZnS,** модель **в)** с шарами из **ZnS** (Ø 20 мкм), погружёнными в кристаллы **B_2O_3** (500 мкм). Экспериментальные данные получены с источником нейтронов ^{252}**Cf**, в моделировании также закладывался данный источник. В расчётную модель закладывалось полное окружение лабораторной установки.

Моделирование сцинтиллятора



Временной спектр зарегистрированных сцинтиллятором мюонов (100 MeV), модель **б)** с **6** слоями **ZnS** и B_2O_3. В модель заложено полное окружение лабораторной комнаты.



Энерговыделение в слоях **ZnS** сцинтиллятора**,** модель **б)** с **6** слоями **ZnS** и B_2O_3. Мюоны 100 MeV, протоны отдачи от источника ^{252}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}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.