



Изучение отклика прототипа Высокогранулярного нейтронного детектора HGND в реакции $\text{Xe} + \text{CsI}$ при энергии 3 ГэВ/нуклон в эксперименте BM@N

Студент: Душпанов Дмитрий Андреевич

Научный консультант: инженер ИЯИ Зубанков Александр Александрович

Научный руководитель: д.ф.-м.н., проф. Салахутдинов Гаяр Харисович

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

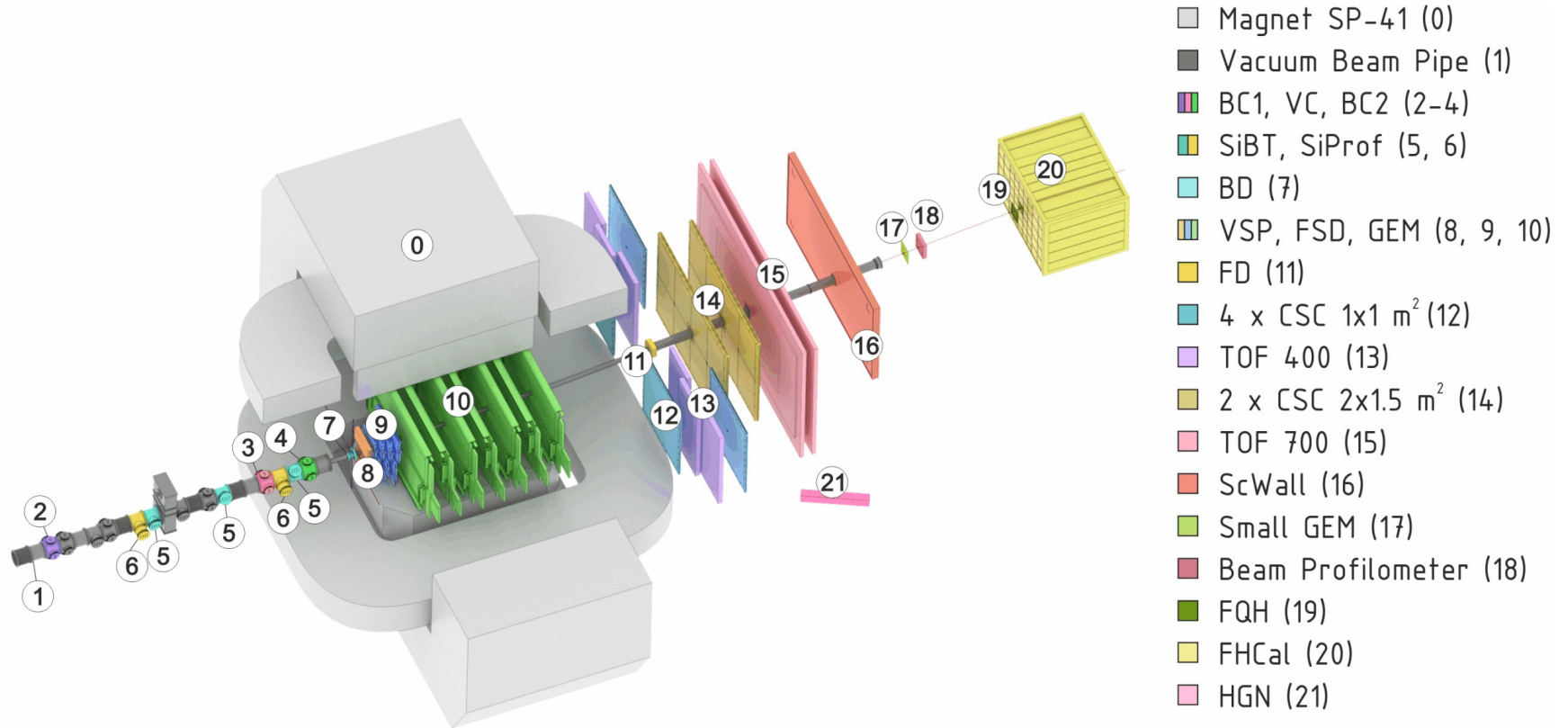
План

- Детектор HGND в эксперименте VM@N
- Конструкция прототипа детектора HGND
- Сравнение экспериментальных данных
- Заключение

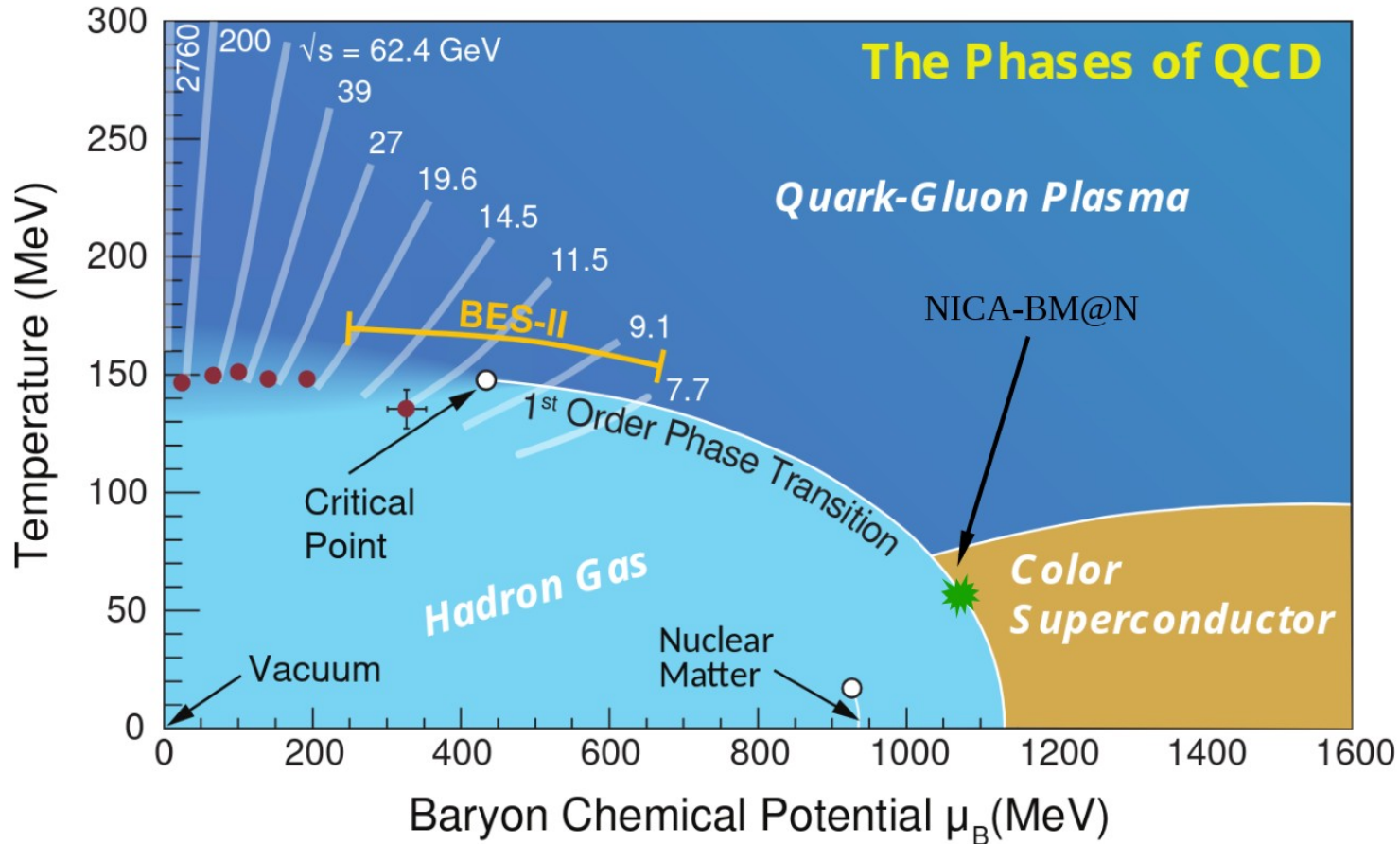
Комплекс установок NICA в ОИЯИ, Дубна



Установка VM@N



Исследовательская программа BM@N

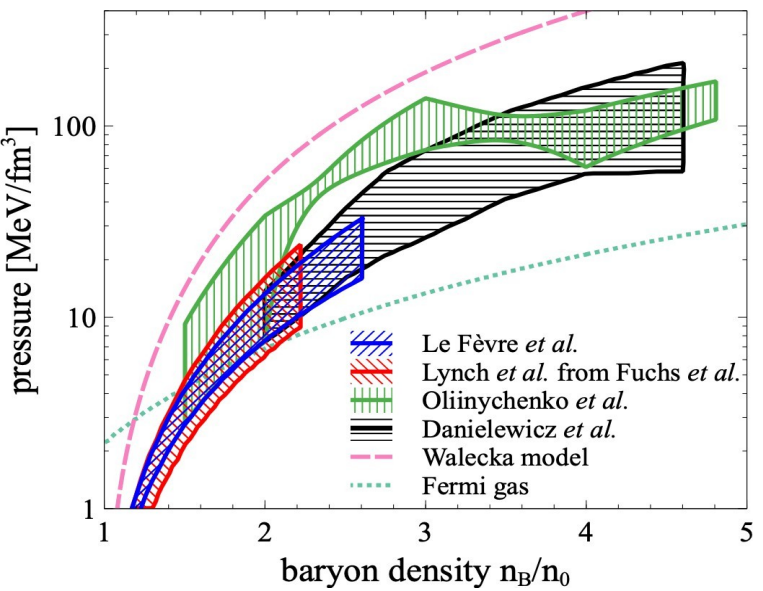


Исследовательская программа VM@N

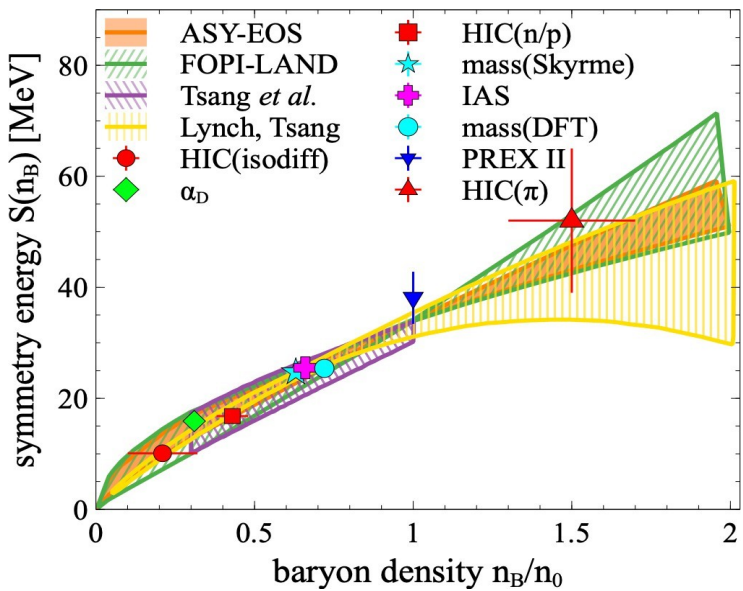
Энергия связи на нуклон: $E_A(\rho, \delta) = E_A(\rho, 0) + E_{sym}(\rho)\delta^2 + O(\delta^4)$

$$\delta = (\rho_n - \rho_p) / \rho$$

Симметричная материя



Энергия симметрии



Изоспиновая асимметрия

•Изучение EoS необходимо для понимания свойств таких астрофизических объектов как нейтронные звезды.

•Отношение выходов и направленных потоков нейтронов к протонам чувствительно к вкладу энергии симметрии в уравнение состояния ядерной материи.

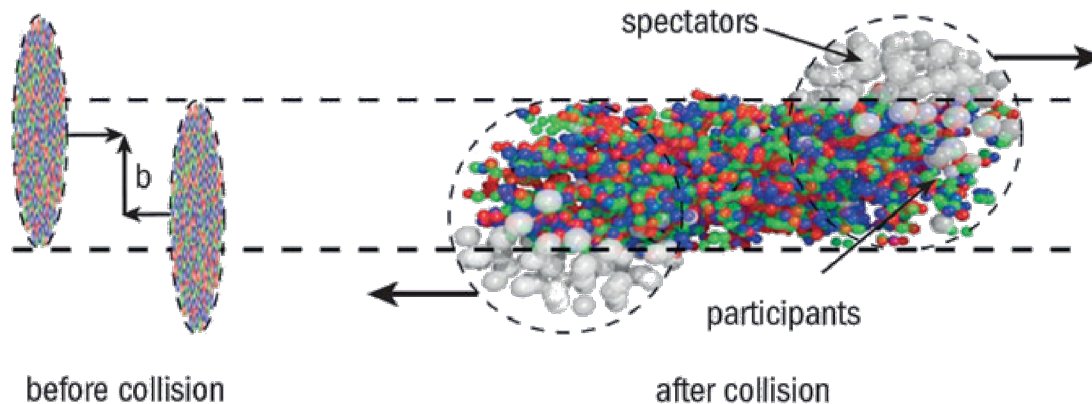
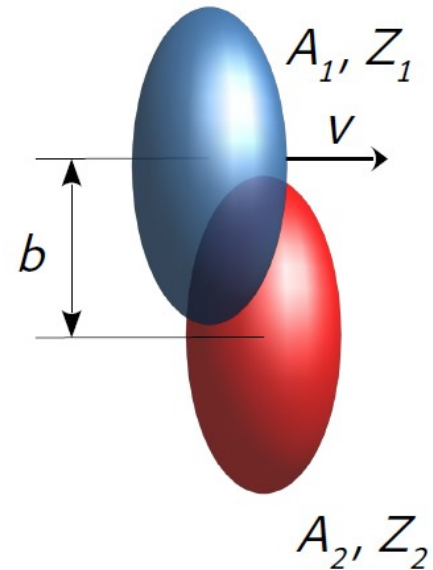
Взаимодействия ядер

Цель исследования:

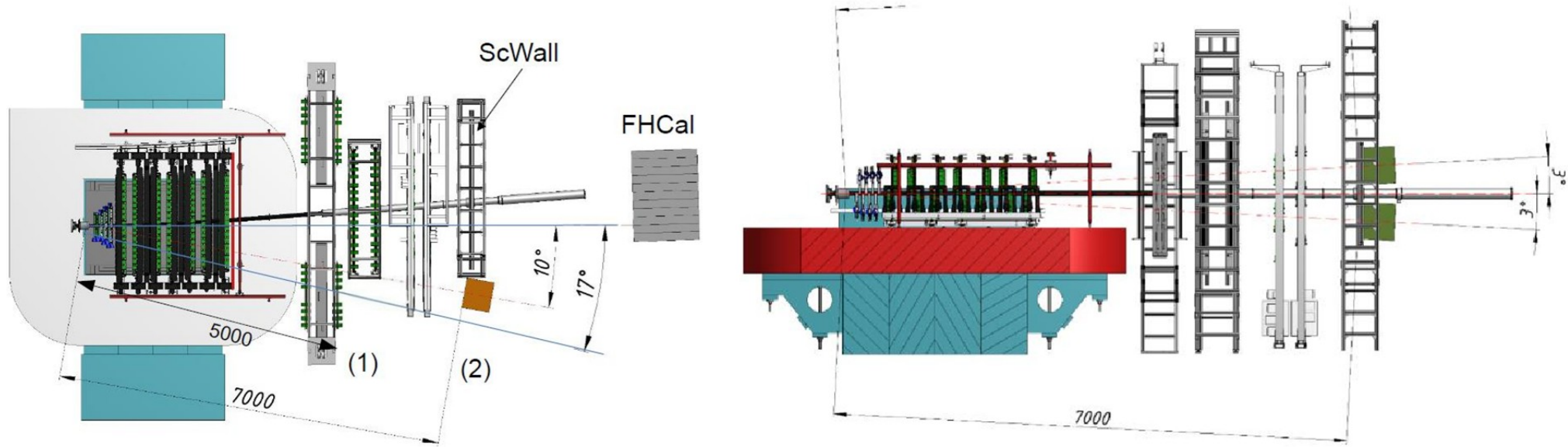
Изучение характеристик и возможности калибровки прототипа HGND на нейтронах-спектаторах в реакции $^{124}\text{Xe} + \text{CsI}$ при энергии ионов ксенона 3,0А ГэВ в эксперименте BM@N в целях подготовки к будущим сеансам, а также сравнение с ранее полученными данными при энергии пучка 3,8А ГэВ.

Адронные взаимодействия:

$$b < R_1 + R_2$$



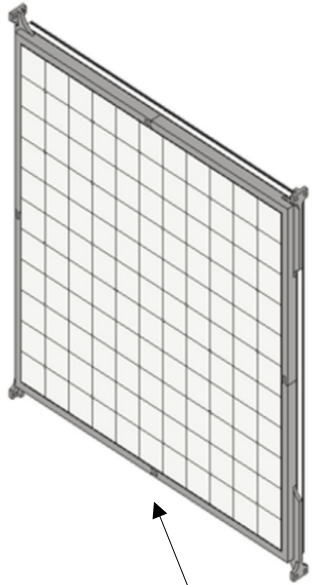
Положение HGND в эксперименте BM@N



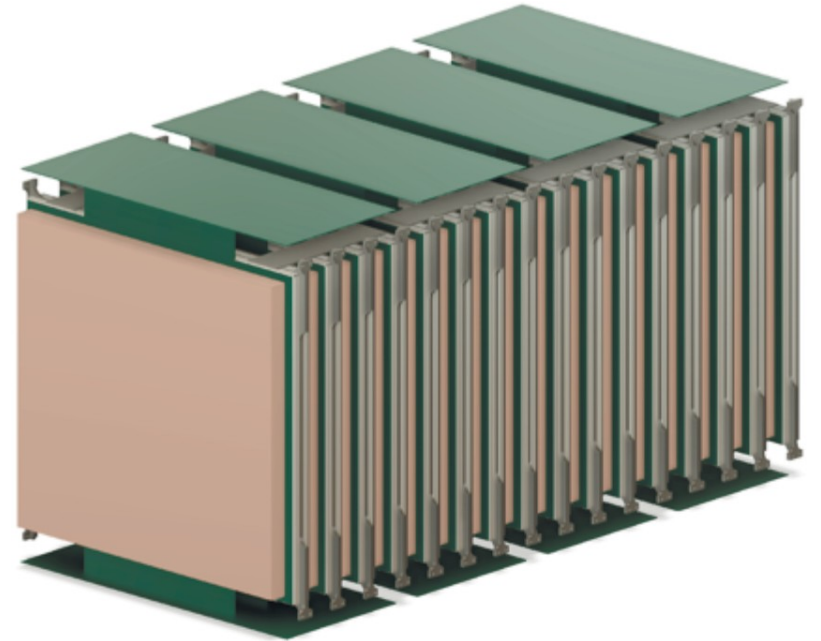
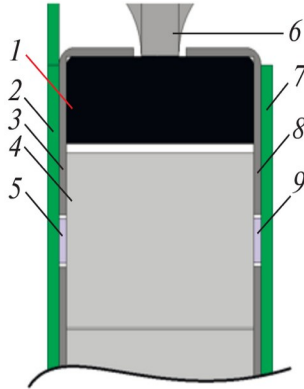
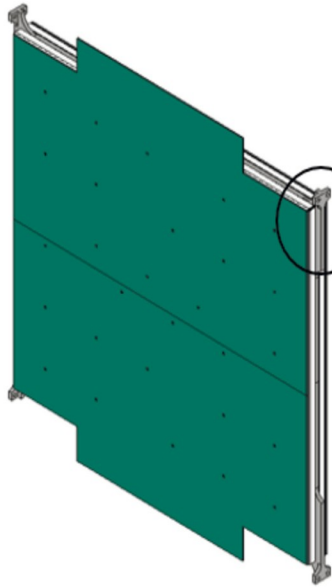
- ТоF метод с T0 в качестве «стартового» времени
- Времяпролетная база ~ 7 м
- Детектор разделён на два «плеча» для увеличения акцептанса

Высокогранулярный нейтронный детектор HGND

11x11 ячеек

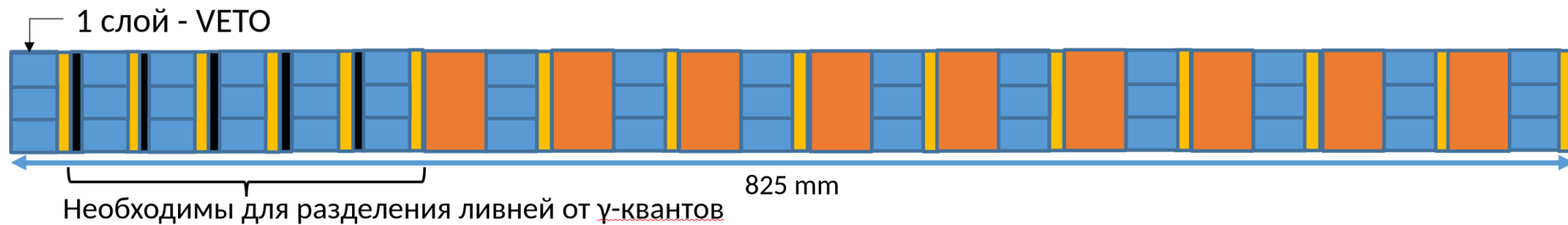
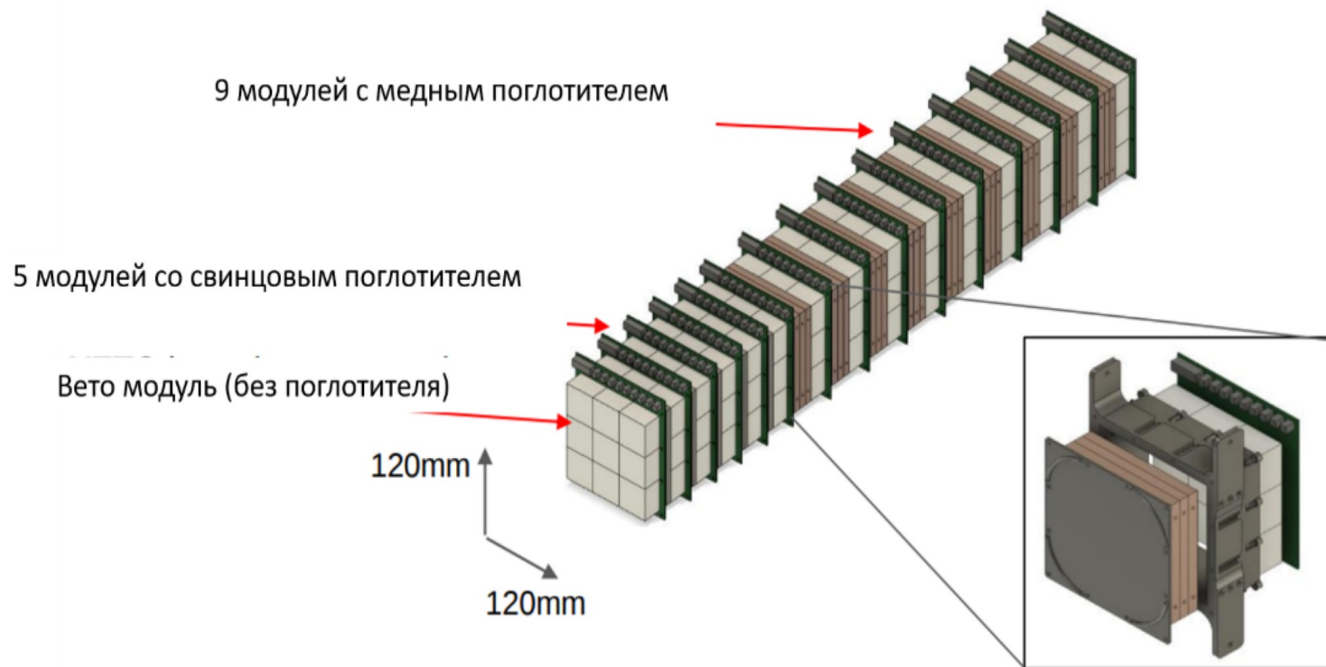
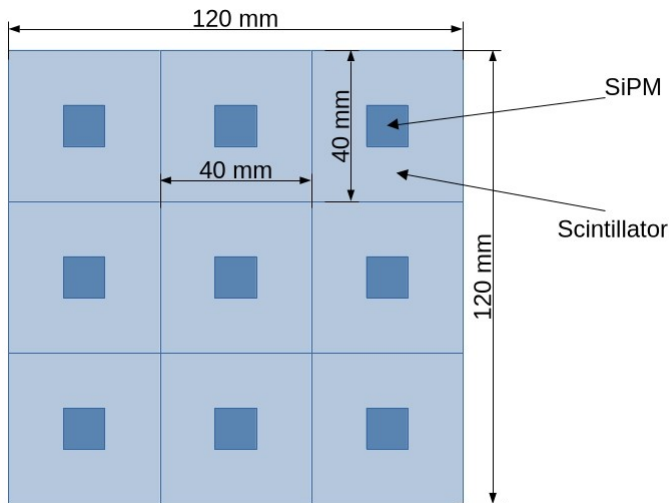


Сцинтилляционный модуль



Сборка детектора: 2 плеча по 8 слоев

Прототип HGND



Характеристики прототипа HGND

SiPM

Hamamatsu S13360- 6050PE

Активн. площадь – $6 \times 6 \text{ mm}^2$

Число пикселей – 14400

Размер пикселя – $50 \text{ }\mu\text{m}$

Усиление – 1.7×10^6

PDE – 40%

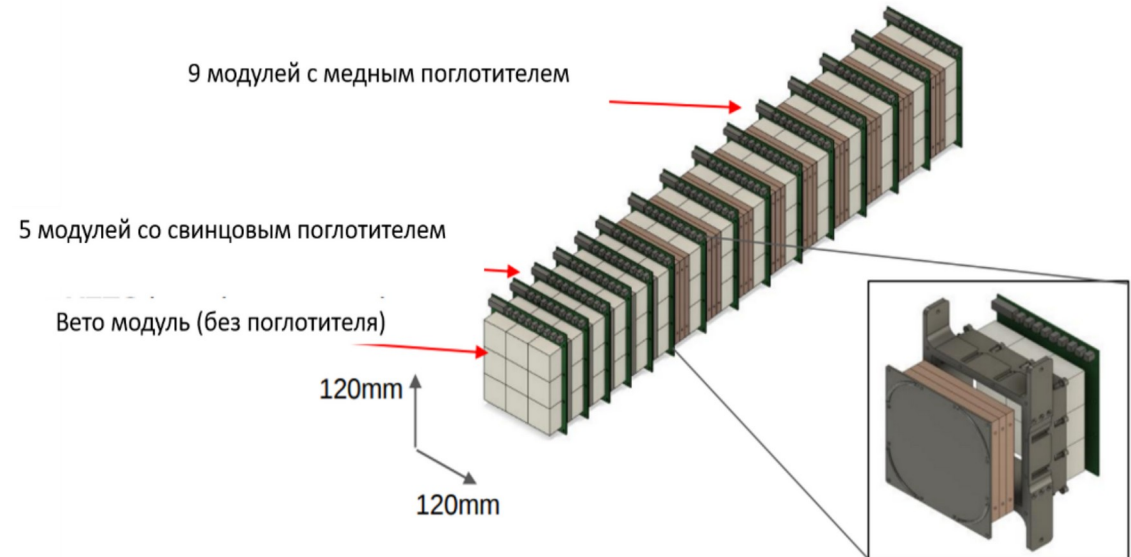
Сцинт. ячейка – $40 \times 40 \times 25 \text{ mm}^3$

Общее число ячеек – 135

Общий размер – $12 \times 12 \times 82.5 \text{ cm}^3$

Общая длина $\sim 2.5 \lambda_{\text{int}}$

Временное разрешение ячеек $\sim 200 \text{ пс}$,
+ с неравномерностью светосбора $\sim 240 \text{ пс}$,
+ с другими факторами (таких как
ненулевое разрешение триггера) $\sim 270 \text{ пс}$



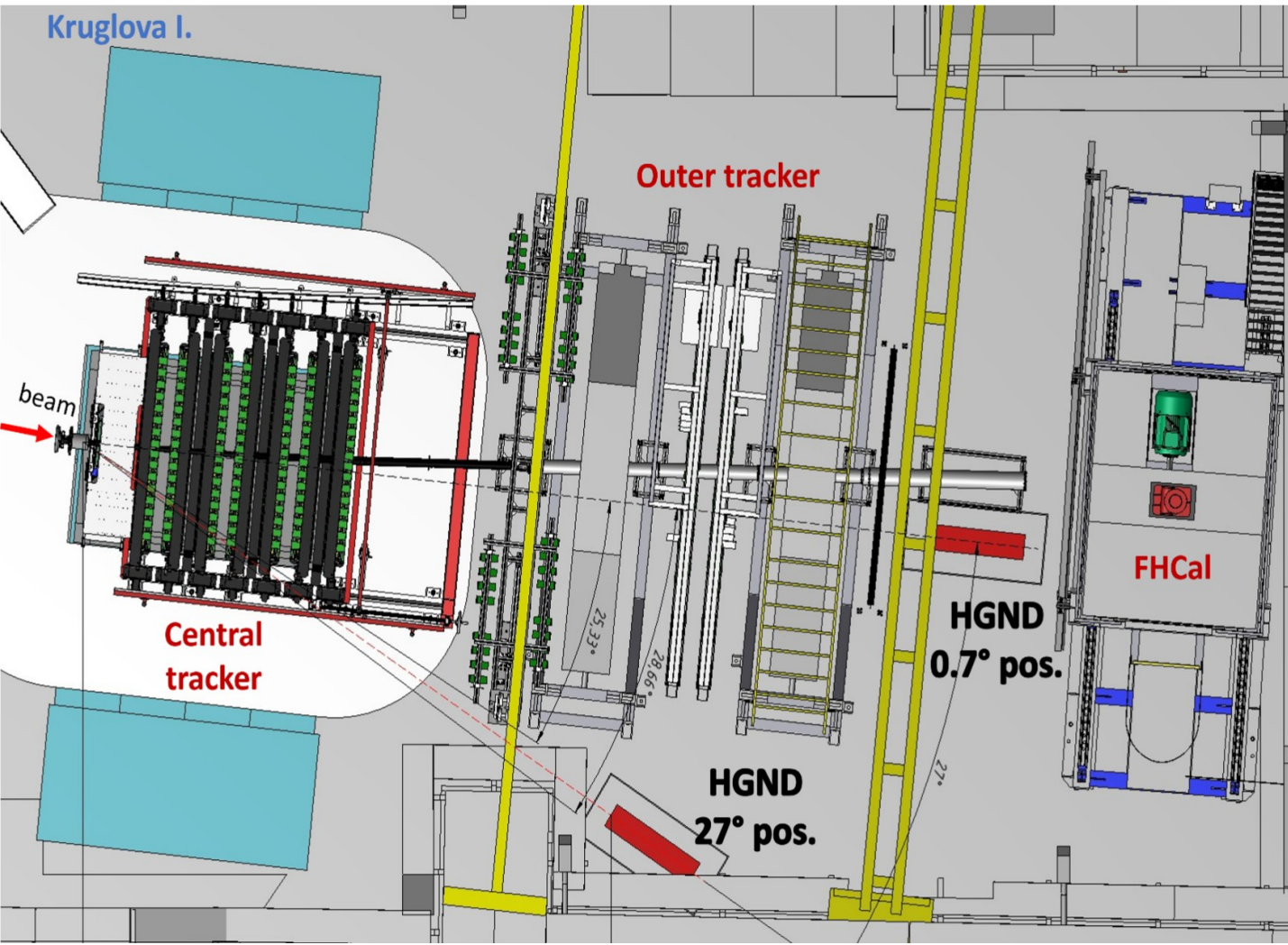
Положение прототипа HGND в установке BM@N

Положение 0.7°:

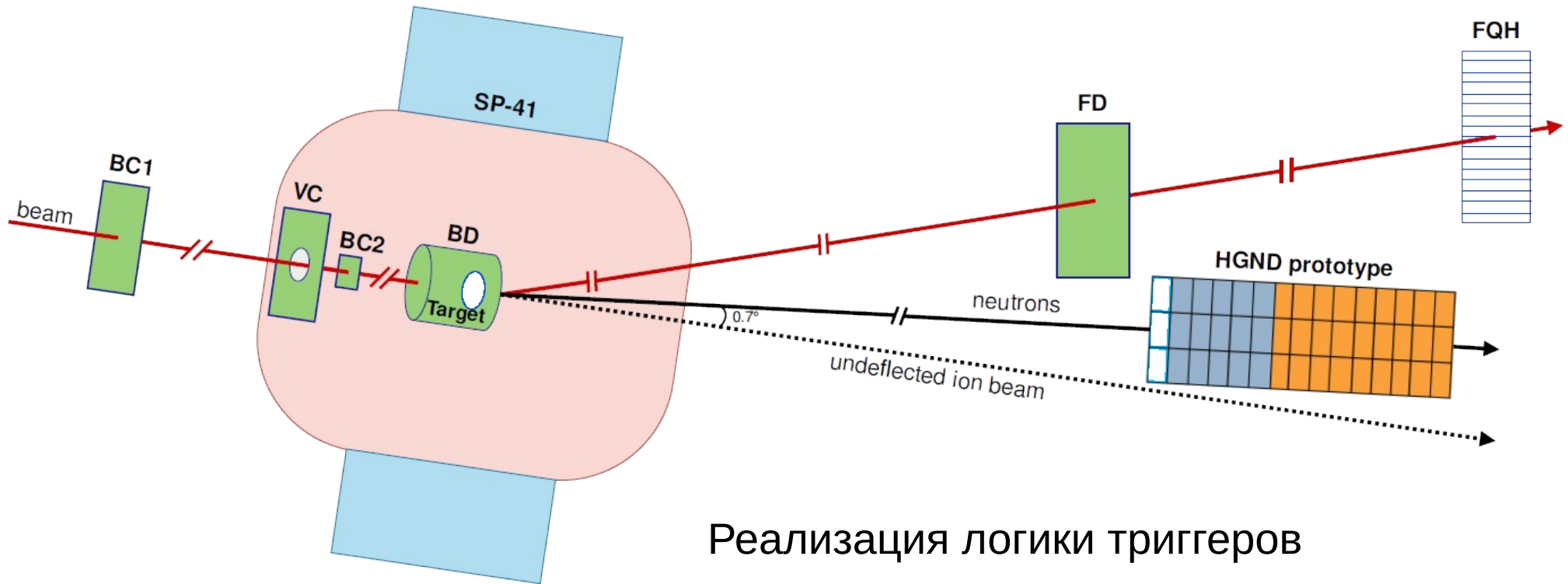
Тестирование с известной энергией нейтронов (нейтроны-спектаторы) – 3.8 ГэВ.

Положение 27°:

Измерения спектров нейтронов в области ~ midrapidity.



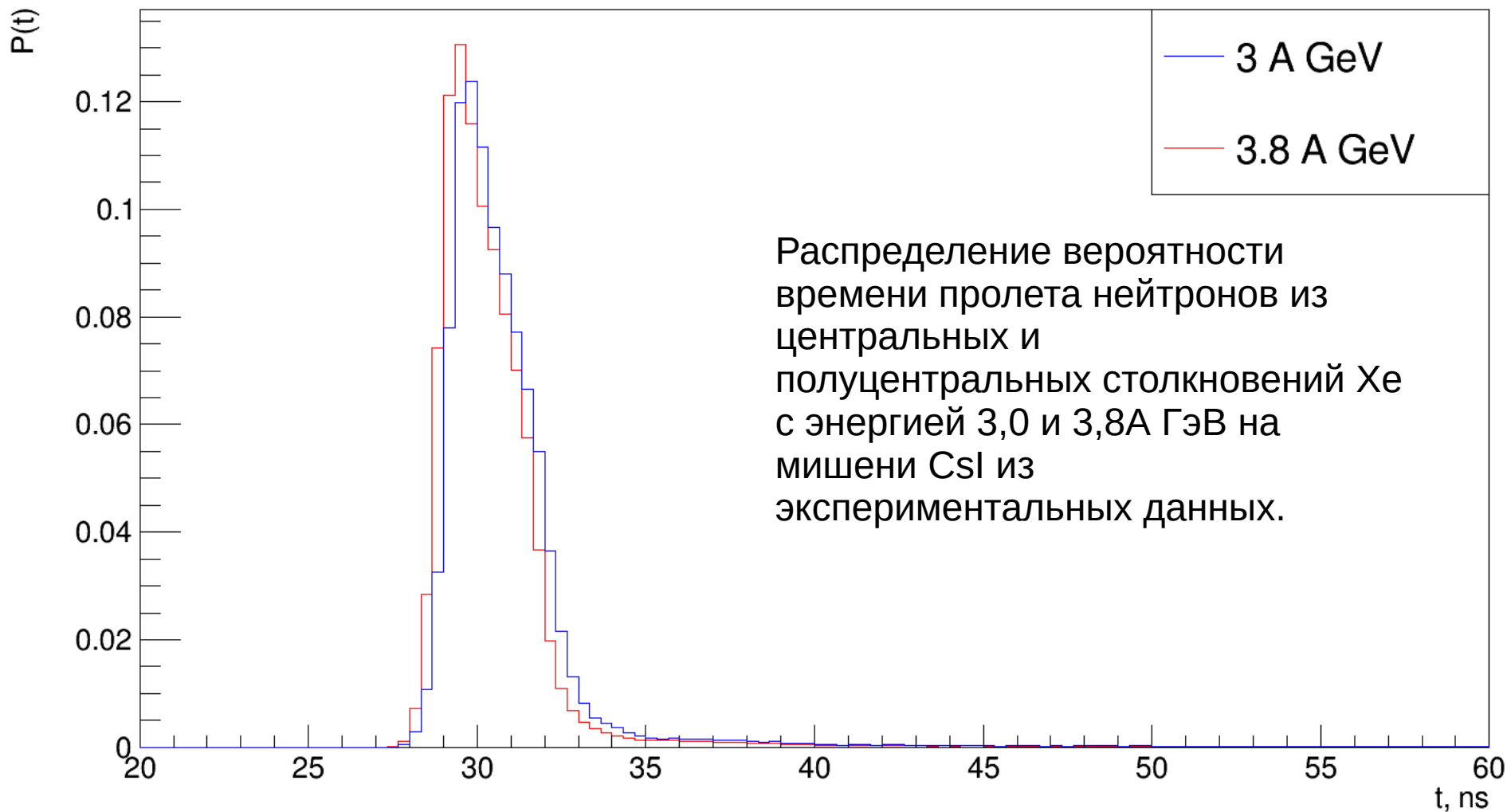
Триггерная система эксперимента VM@N



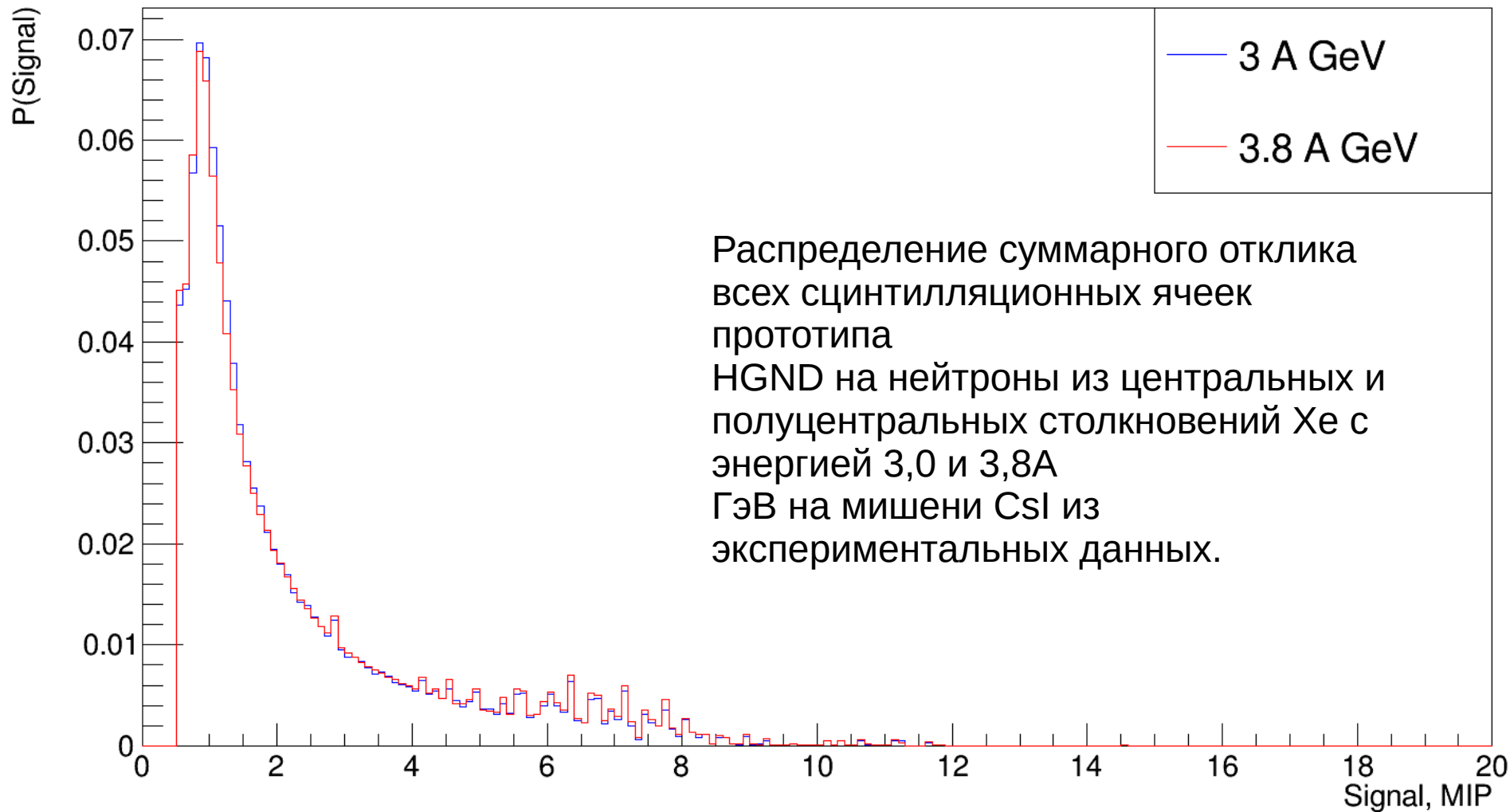
Реализация логики триггеров

BT	$BC1 \times BC2 \times \neg VC$
ССТ	$BT \times \neg FD \times BD (\geq 4)$

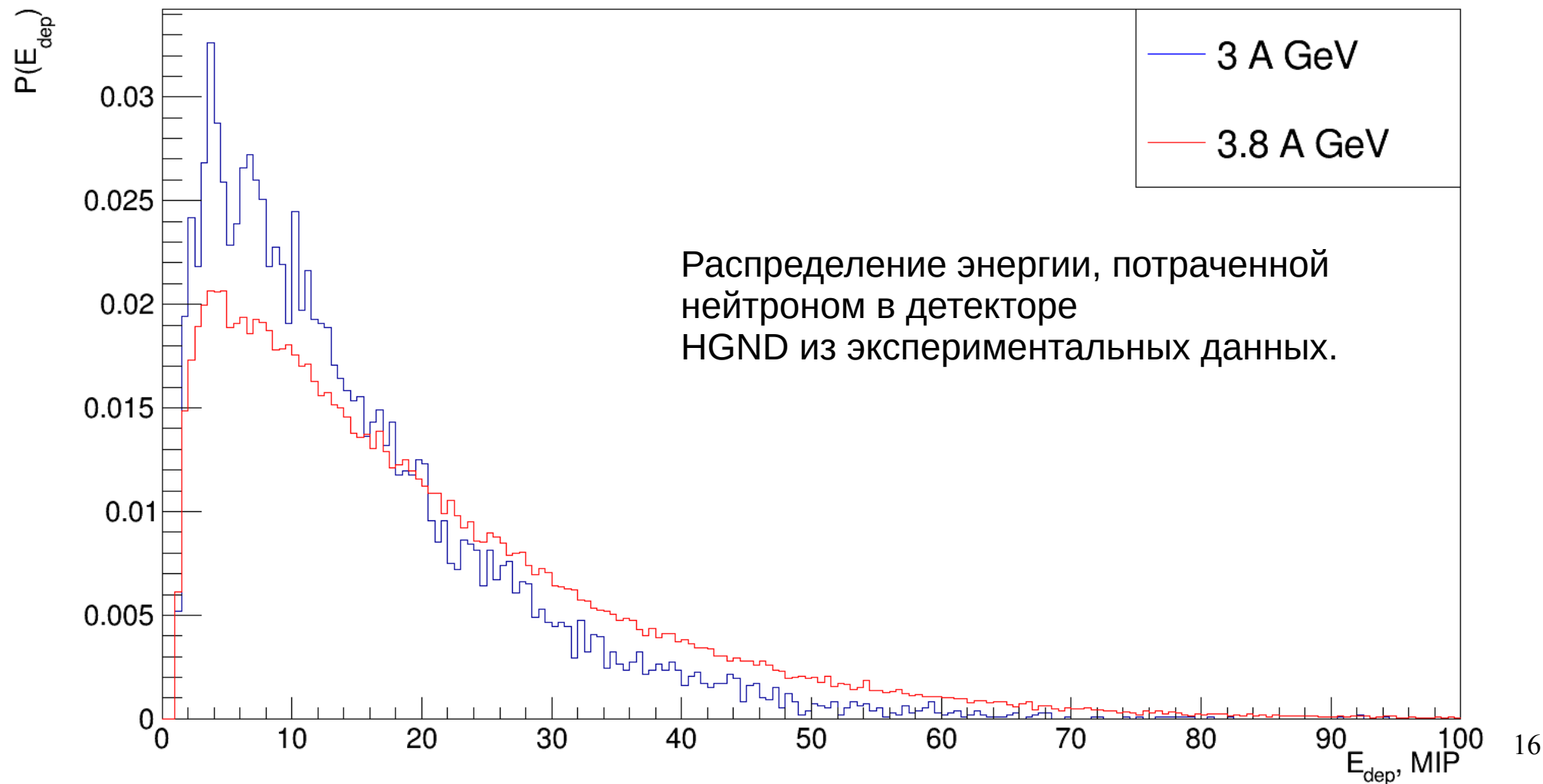
Сравнение экспериментальных данных для 3.0 и 3.8А ГэВ



Сравнение экспериментальных данных для 3.0 и 3.8А ГэВ

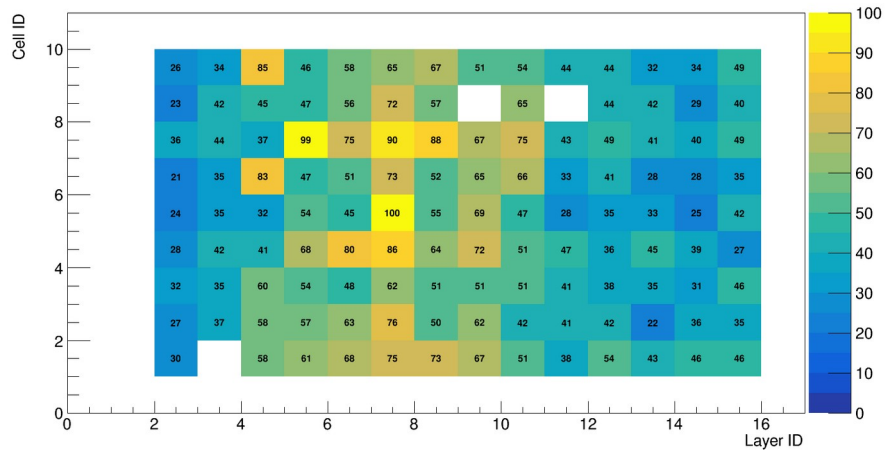


Сравнение экспериментальных данных для 3.0 и 3.8А ГэВ

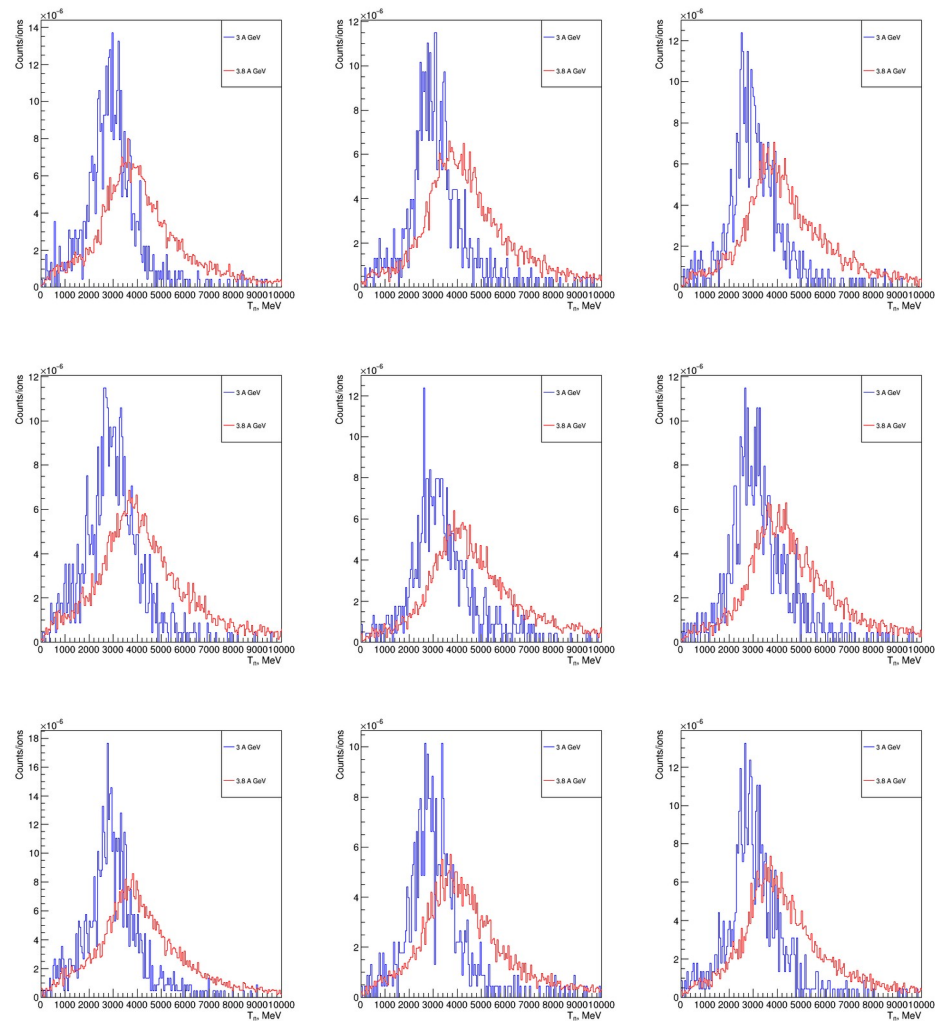
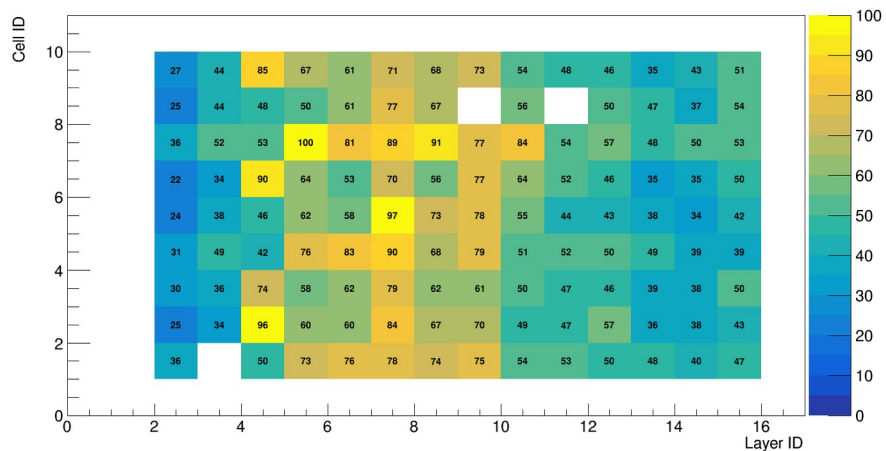


Сравнение экспериментальных данных для 3.0 и 3.8А ГэВ

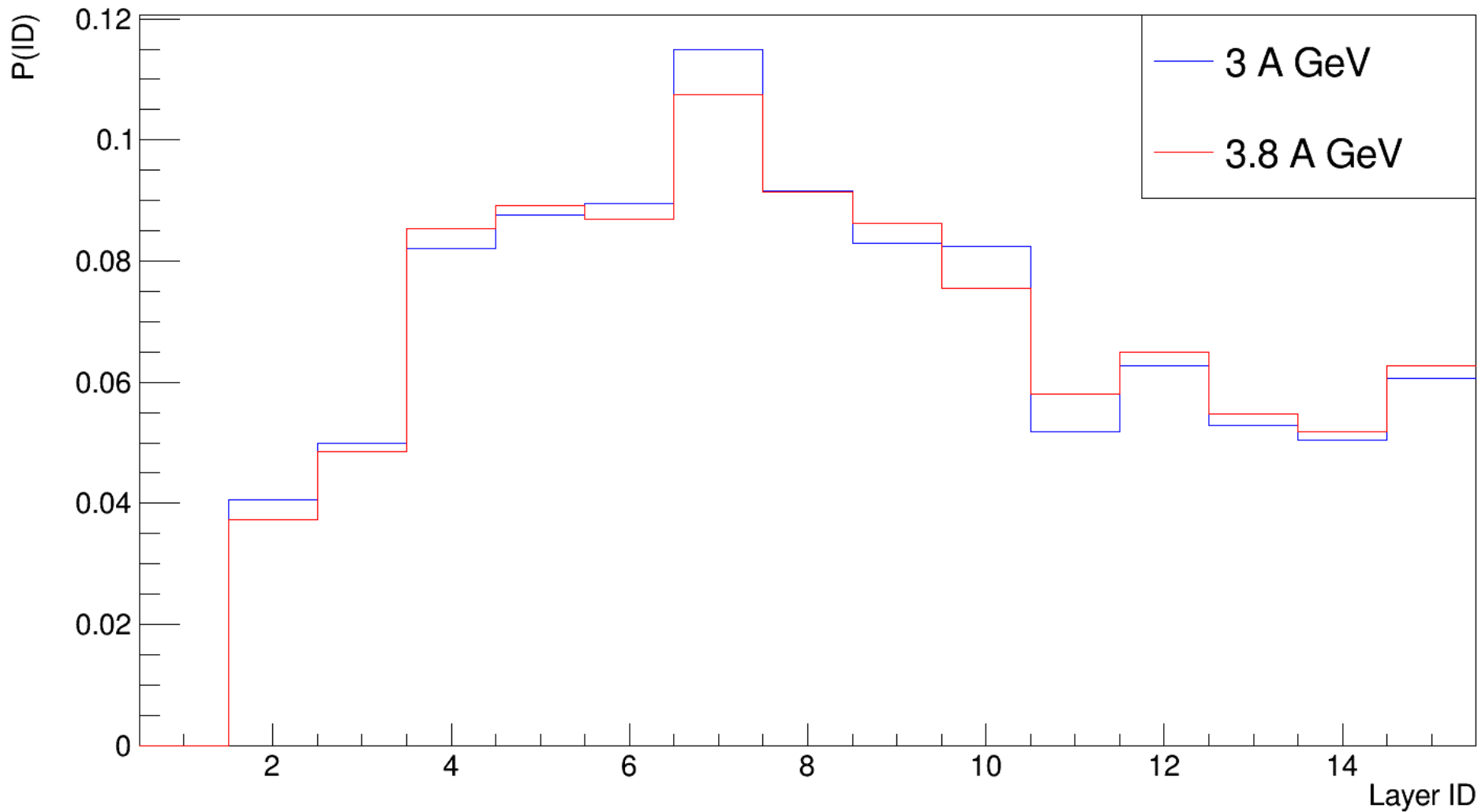
Fastest Layer Cell 3 A GeV



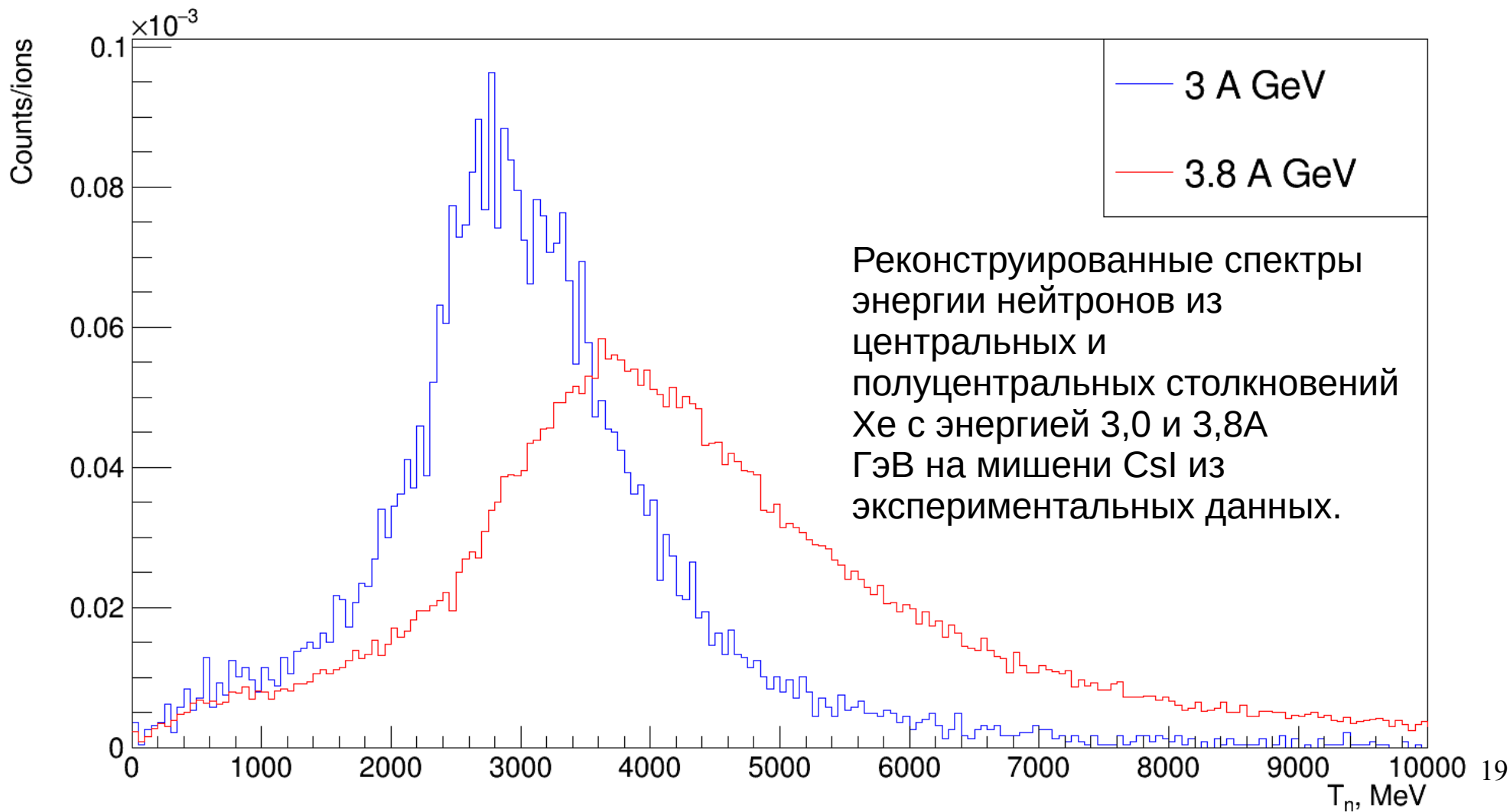
Fastest Layer Cell 3.8 A GeV



Сравнение экспериментальных данных для 3.0 и 3.8А ГэВ

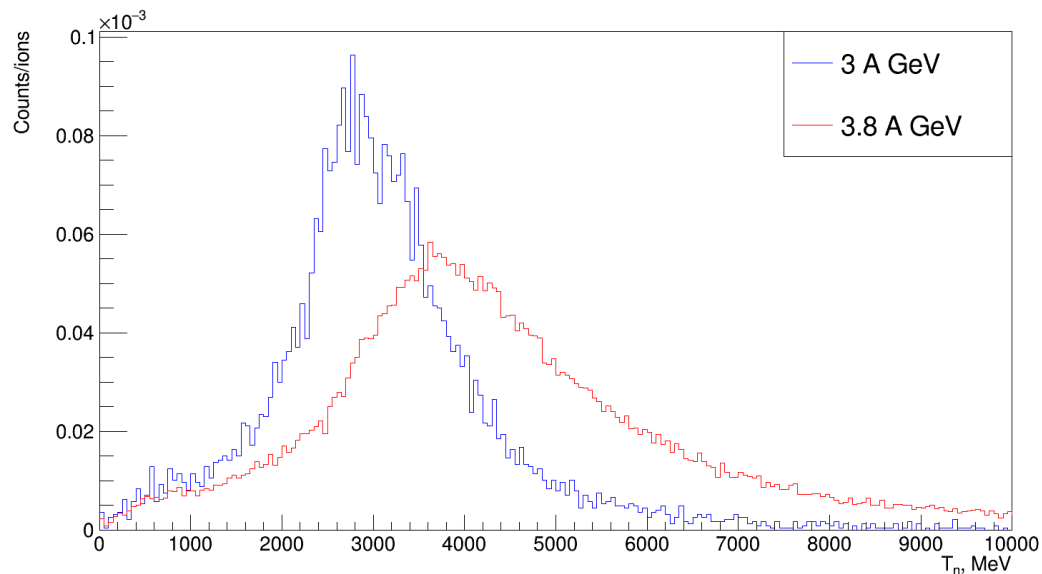


Сравнение экспериментальных данных для 3.0 и 3.8А ГэВ



Оценка энергетического разрешения

Энергия	3,0А ГэВ	3,8А ГэВ
FWHM, МэВ	1800±20	2600±20
$\sigma_E = 2\sqrt{2\ln(2)} \times \text{FWHM}$, МэВ	764±8	1104±8
σ_E/E , %	25,5±0,3	29,1±0,2



Заключение

- Для 3.0А ГэВ результаты схожи с 3.8А ГэВ, что говорит о возможности использования прототипа HGND в будущих сеансах без существенного изменения критериев отбора для измерения нейтронов.
- Энергетическое разрешение при 3А ГэВ улучшилось по сравнению с 3,8А ГэВ, как и ожидалось, что говорит о возможности улучшения калибровки детектора в следующих сеансах и уменьшения неопределенностей при измерении выходов нейтронов.
- Произведена оценка энергетического разрешения для двух энергий:

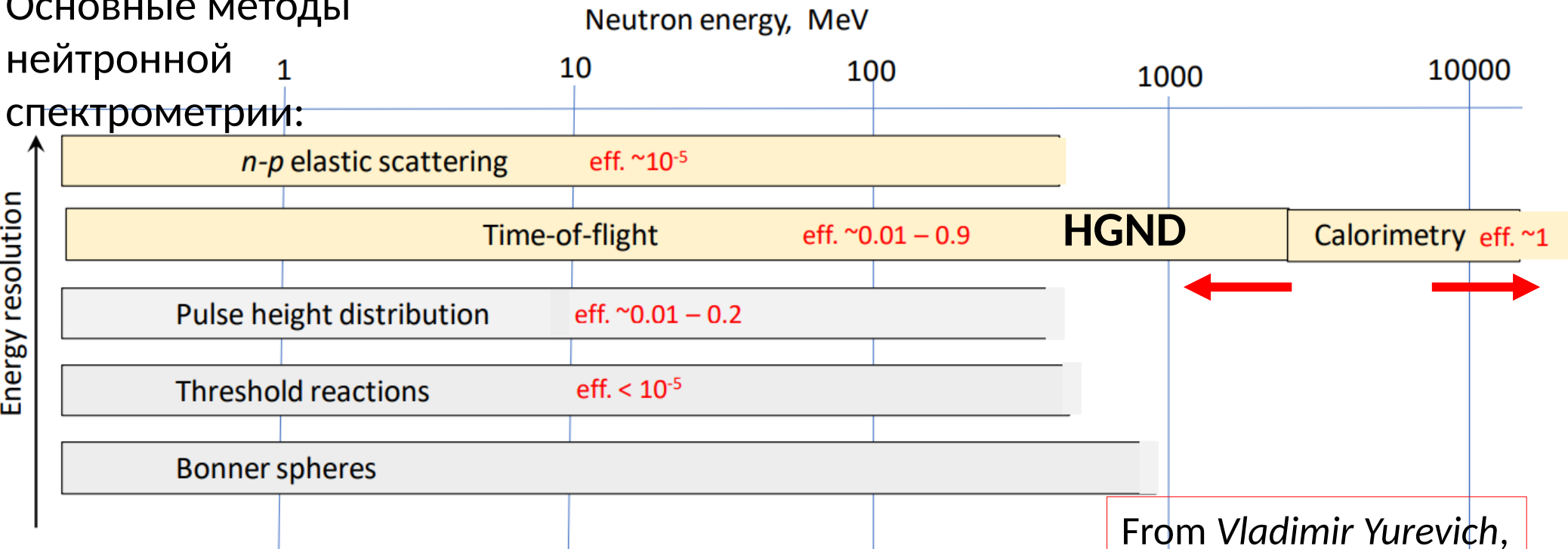
Энергия	3,0А ГэВ	3,8А ГэВ
σ_E/E , %	25,5±0,3	29,1±0,2

backup

Нейтронные детекторы



Основные методы
нейтронной
спектрометрии:



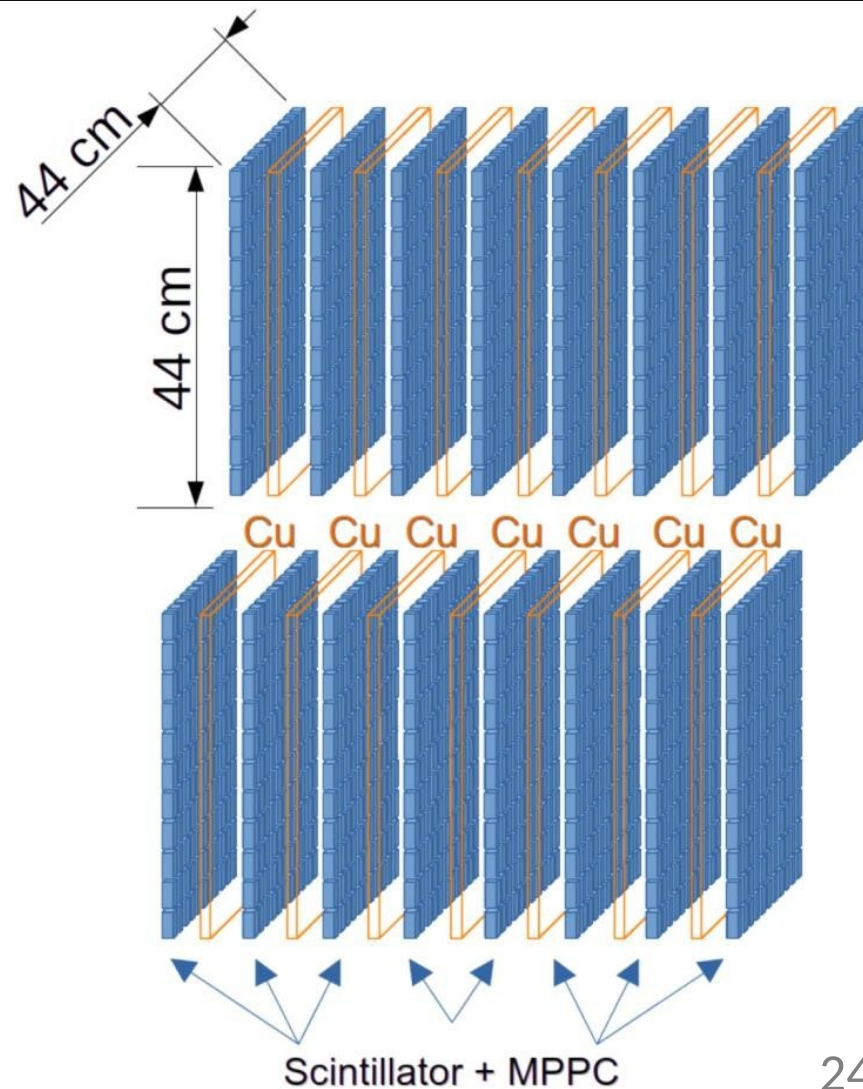
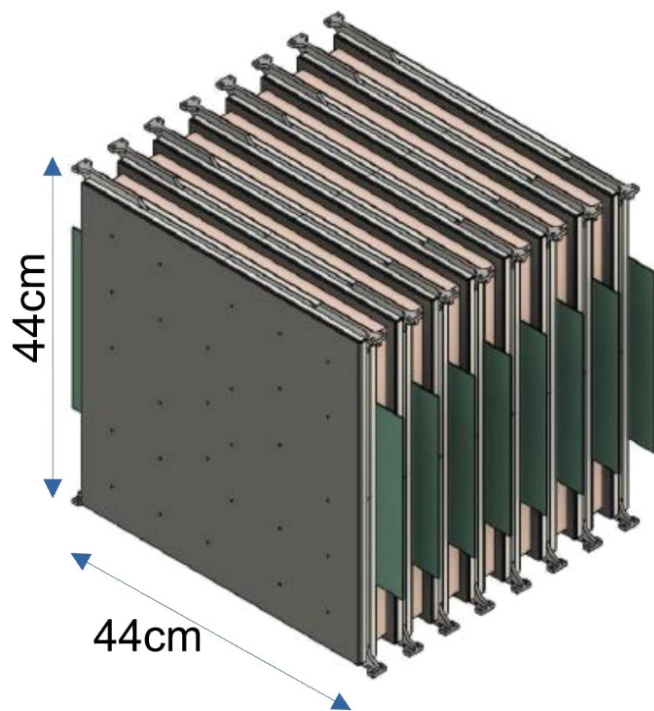
- definite correspondence between energy and measured value
- complicated unfolding procedure with well-known response functions and some a priori information about neutron spectrum is required

From Vladimir Yurevich,
Study of neutron
production in nucleus-
nucleus collisions,
BM@N collaboration
meeting, 3–8 Oct. 2021

Конструкция HGND

2 плеча по 8 слоев:

- 3 см Cu (поглотитель)
- 11x11 матрица сцинт. ячеек 2.5 см
- 0.5 см PCB
- Поперечный размер 44x44 см²

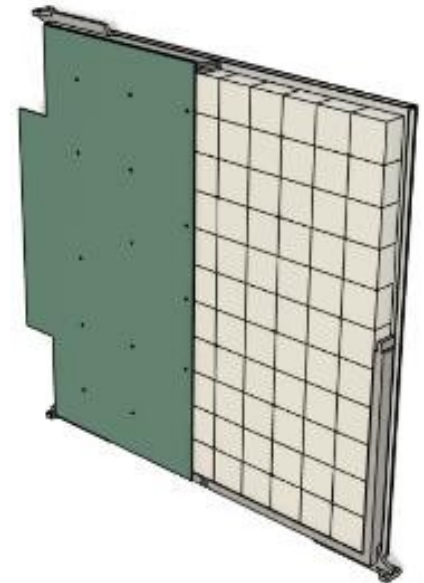
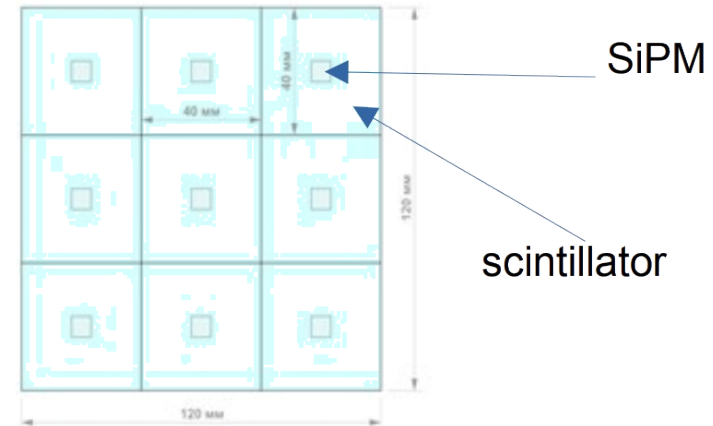


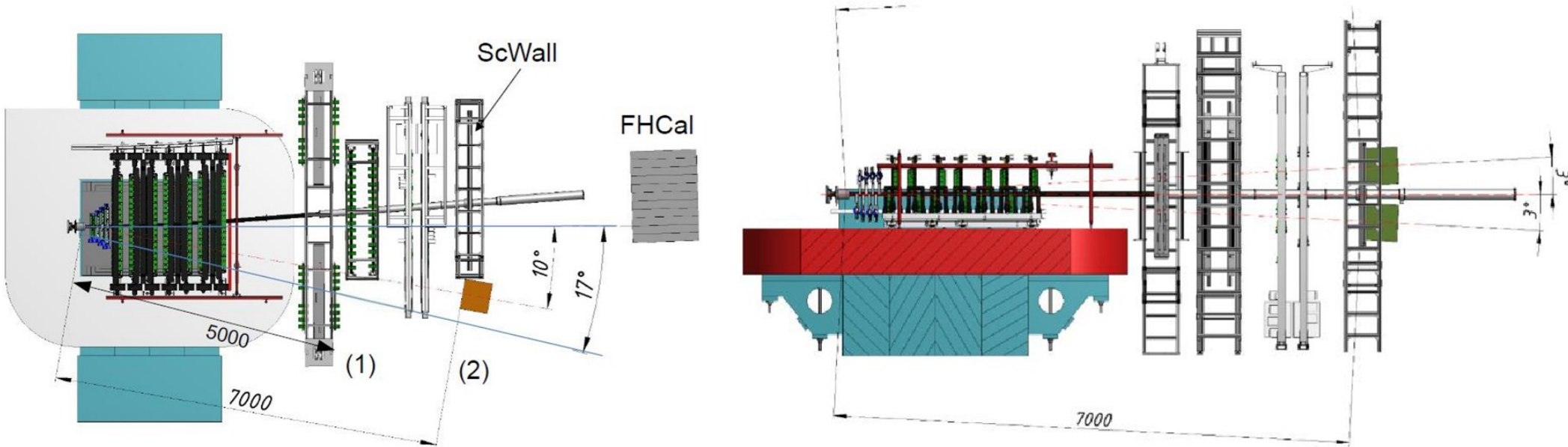
EQR15 11-6060D-S MPPC

- Активная площадь: $6 \times 6 \text{ мм}^2$
- Квантовая эффективность: 45% (420 нм)
- Усиление примерно 4×10^5

Сцинтилляторы на основе полистирола с РОРОР

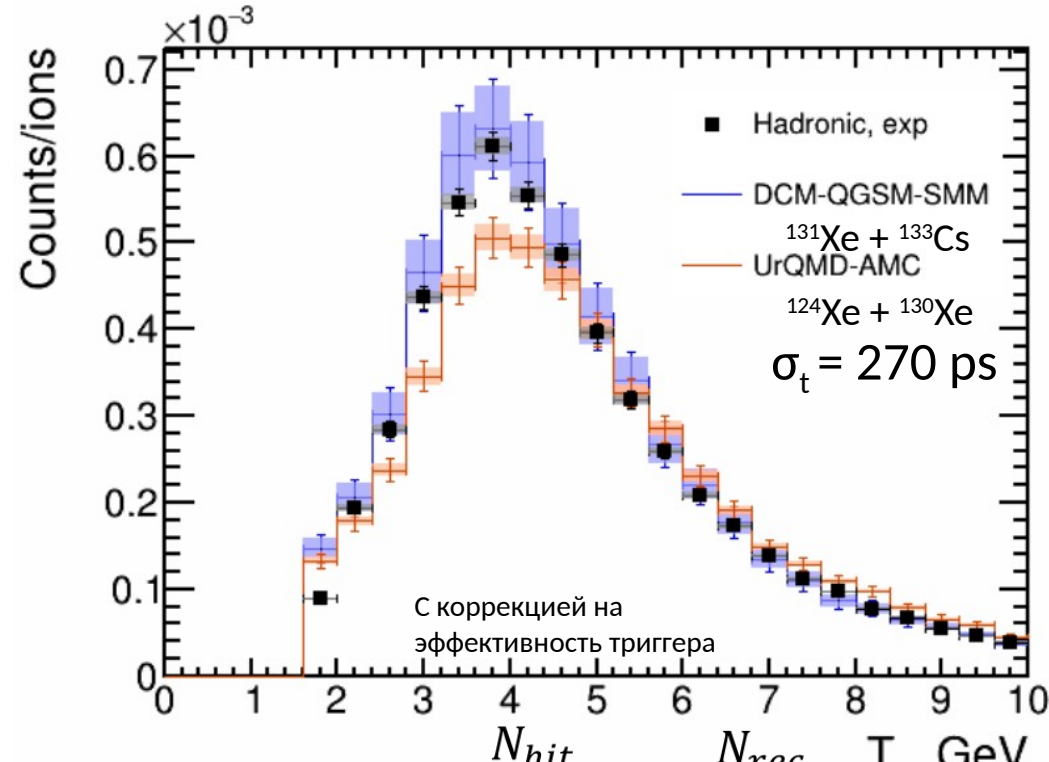
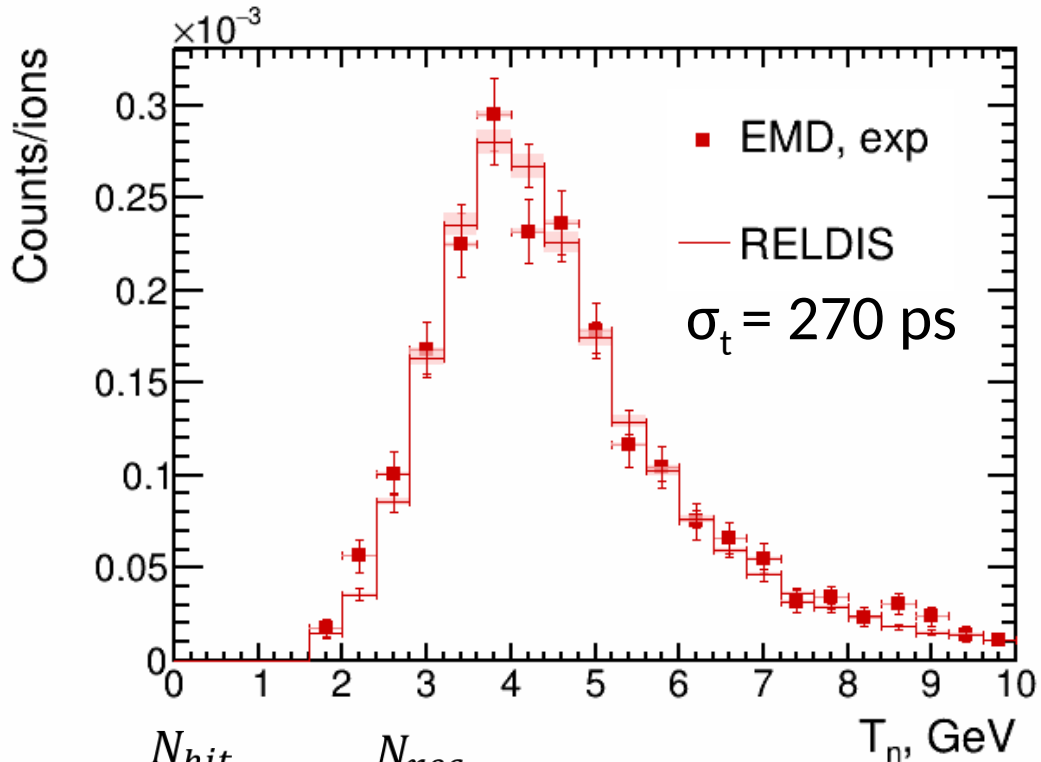
- Время высвечивания: $3,9 \pm 0,7 \text{ нс}$.
- Временное разрешение ячеек: 150 пс
- Полная длина детектора: $\sim 0.5 \text{ м}$, $\sim 1.5 \lambda_{\text{int}}$
- Эффективность детектирования нейтронов: $\sim 50\% @ 1 \text{ GeV}$
- Энергетическое разрешение: - 2% (0.3 GeV); 20% (4 GeV)
- Световыход на MIP: $158 \pm 9 \text{ ф.э.}$
- Динамический диапазон: 1 – 8 MIP





- ТоF метод с T0 в качестве «стартового» времени
- Времяпролетная база ~ 7 м
- Детектор разделён на два «плеча» для увеличения акцептанса

Сравнение измерений и моделирования



$$\Omega_n = \frac{N_{hit}}{N_{gen}} \quad \varepsilon_n = \frac{N_{rec}}{N_{hit}}$$

$$\Omega_n = \frac{N_{hit}}{N_{gen}} \quad \varepsilon_n = \frac{N_{rec}}{N_{hit}}$$

Реконструированные спектры из моделирования хорошо согласуются с данными.

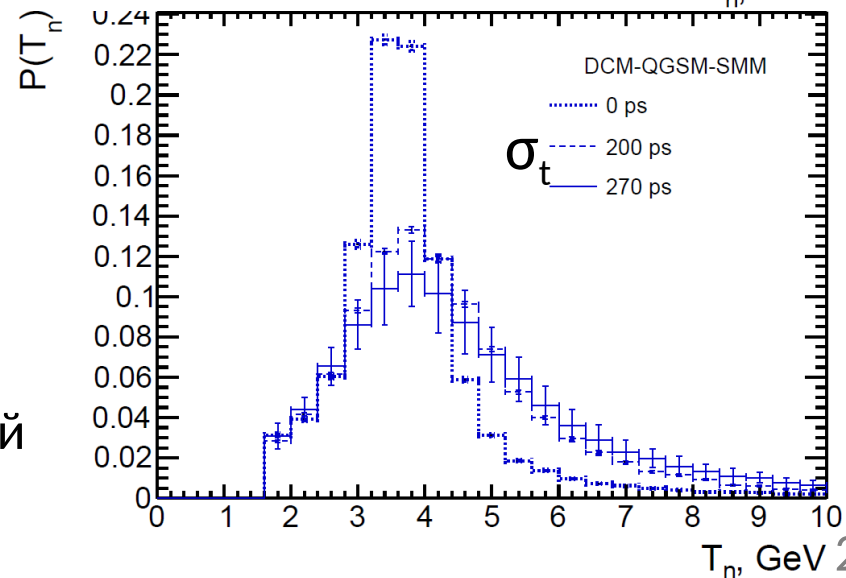
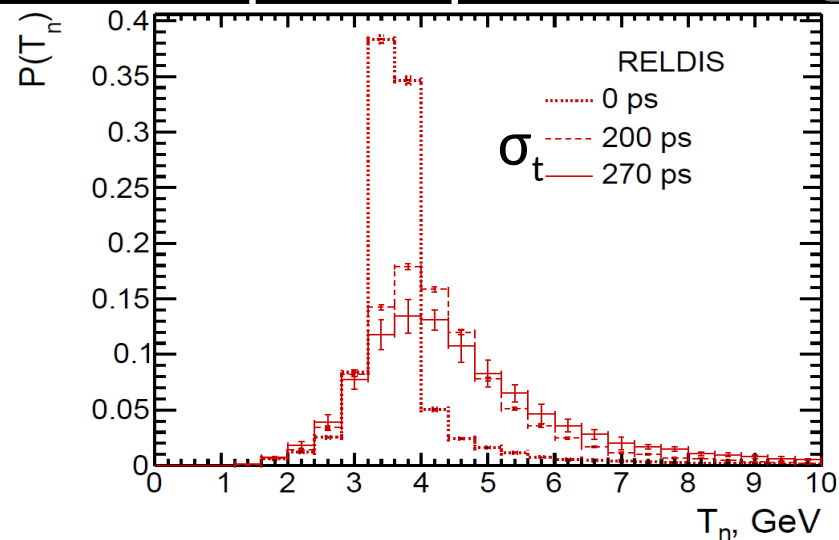
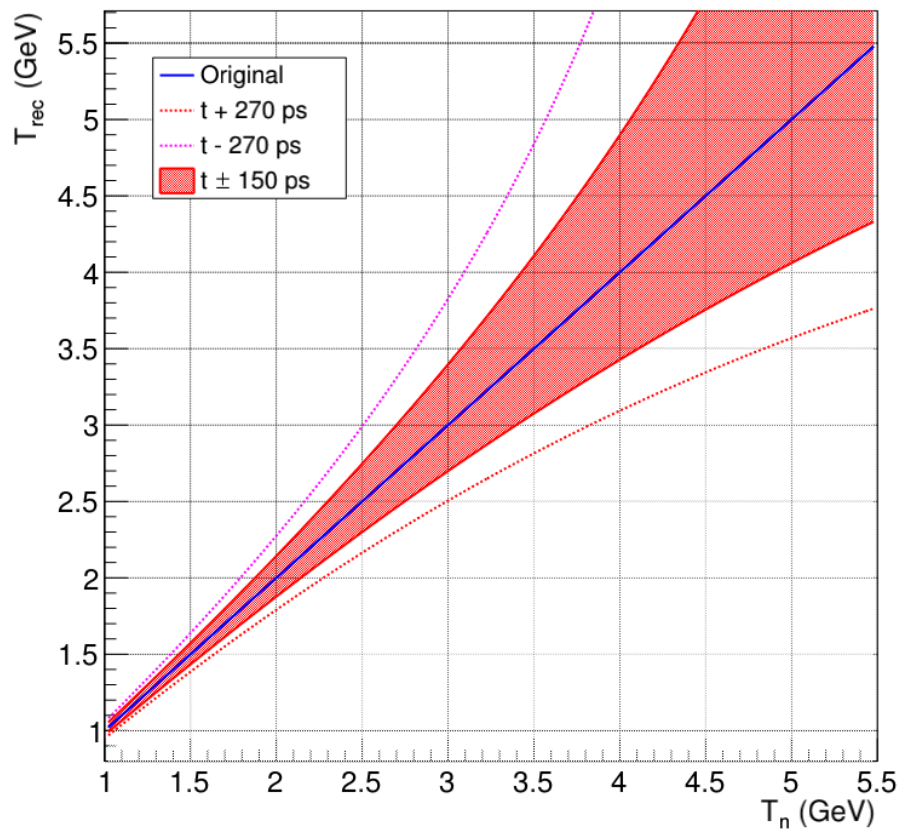
$\Omega_n, \%$	$\varepsilon_n, \%$	$\Omega_n \times \varepsilon_n, \%$
34.21	60.06	20.55
± 0.25	± 0.44	± 0.21

$\Omega_n, \%$	$\varepsilon_n, \%$	$\Omega_n \times \varepsilon_n, \%$
3.87 ± 0.02	37.33 ± 0.17	1.45 ± 0.01
2.63 ± 0.01	45.09 ± 0.25	1.19 ± 0.01

Влияние временного разрешения на спектр нейтронов



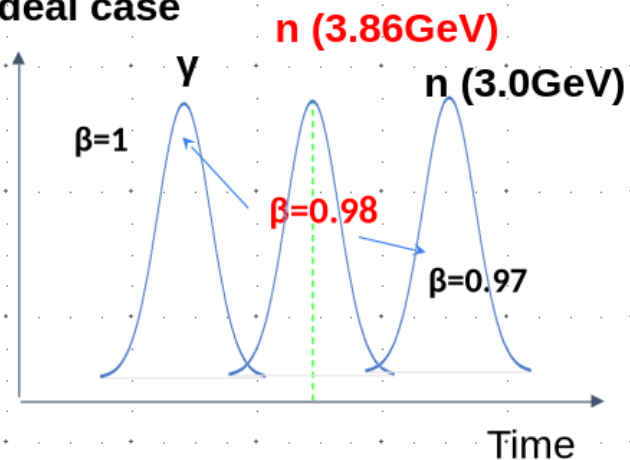
T_{rec} vs T_n with ± 270 and 150 ps shifts



Спектры размазываются в сторону высоких энергий из-за временного разрешения ~ 270 ps.

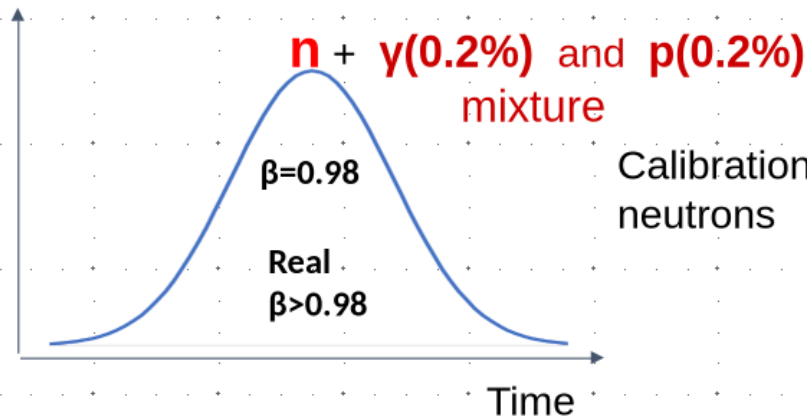


Ideal case

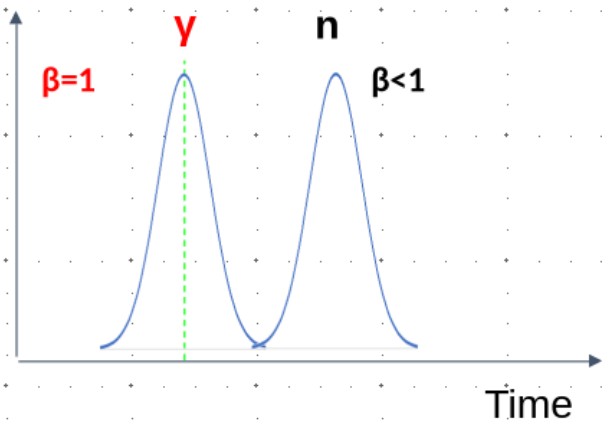


Calibration on neutrons

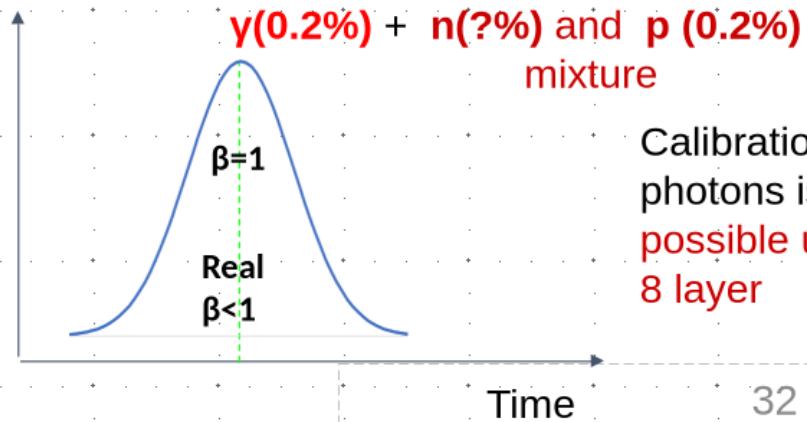
Real data



Calibration on neutrons



Calibration on photons

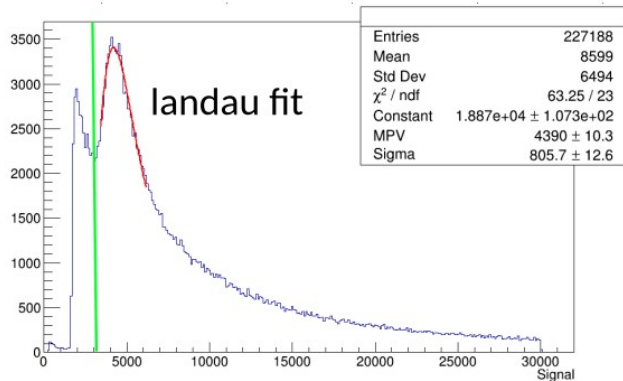


Calibration on photons is possible up to 8 layer

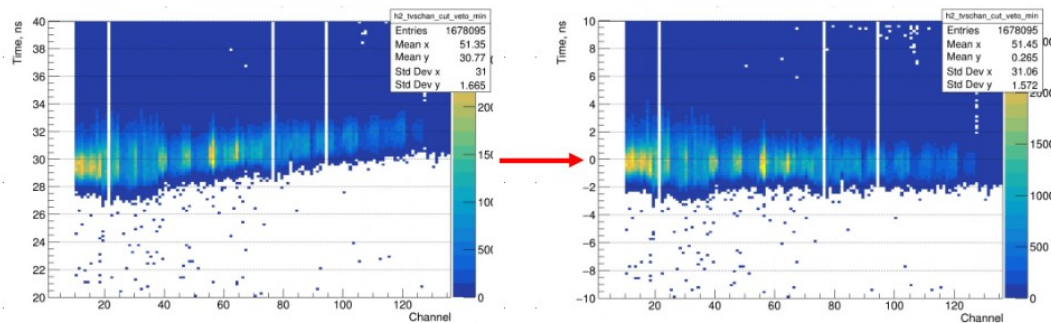
HGND calibration

1. Amplitude normalization

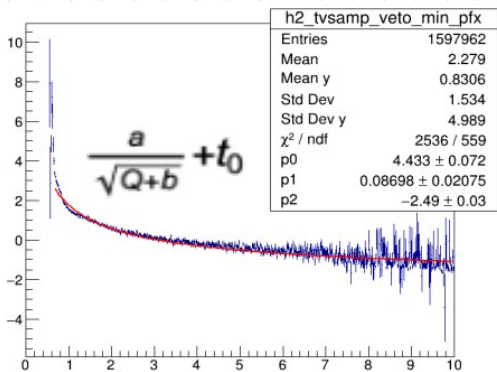
$$Ampl = Ampl \cdot \frac{1}{MPV}$$



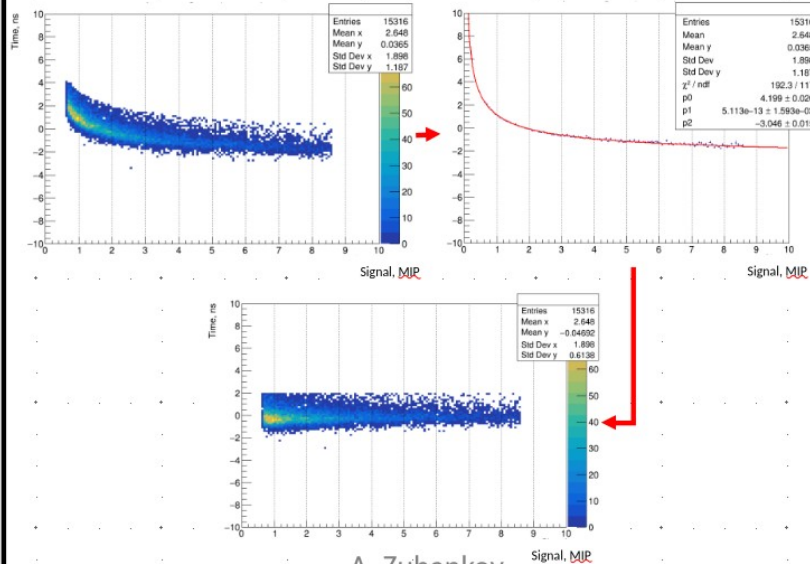
2. Time shift for all channels by the average fit value



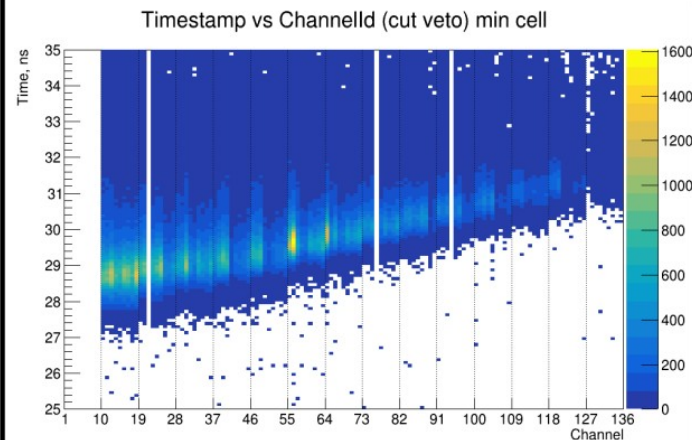
3. Determination of parameters of the approximating function for all channels & time limit



4. Time-amplitude correction



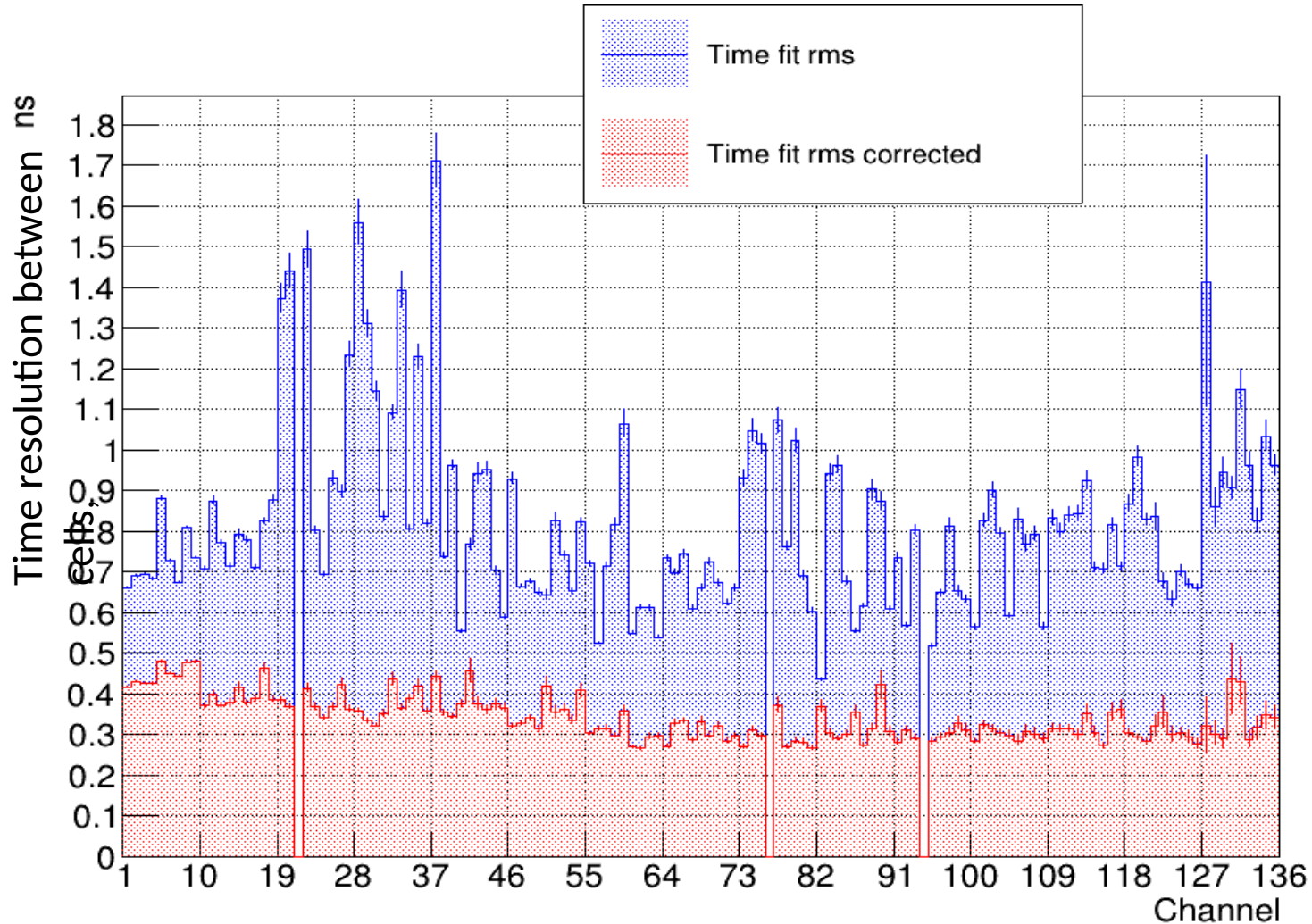
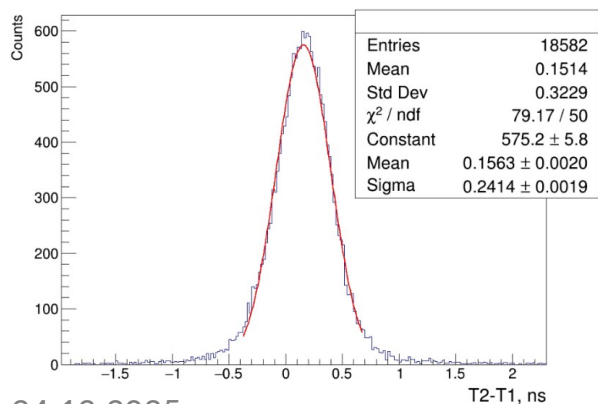
5. Time shift



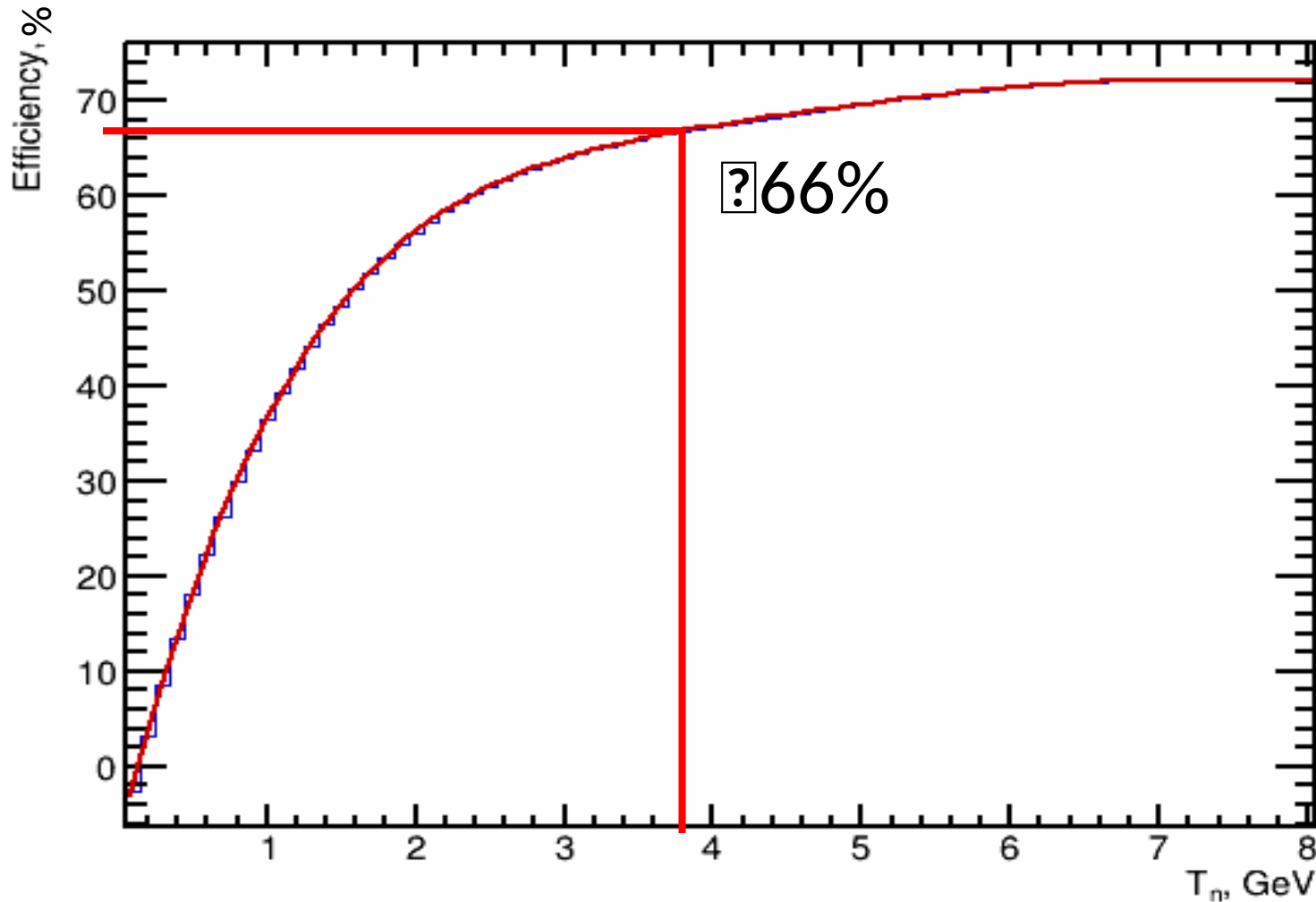
HGND calibration



Time-amplitude correction of signals made it possible to get rid of the dependence of time on signal amplitude, which improved the time resolution by ~ 2.4 times.



Efficiency of HGND prototype



Geant4 simulation:
Particle source, only
neutrons

- VETO-cut
- γ -cut
- ToF cut