



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

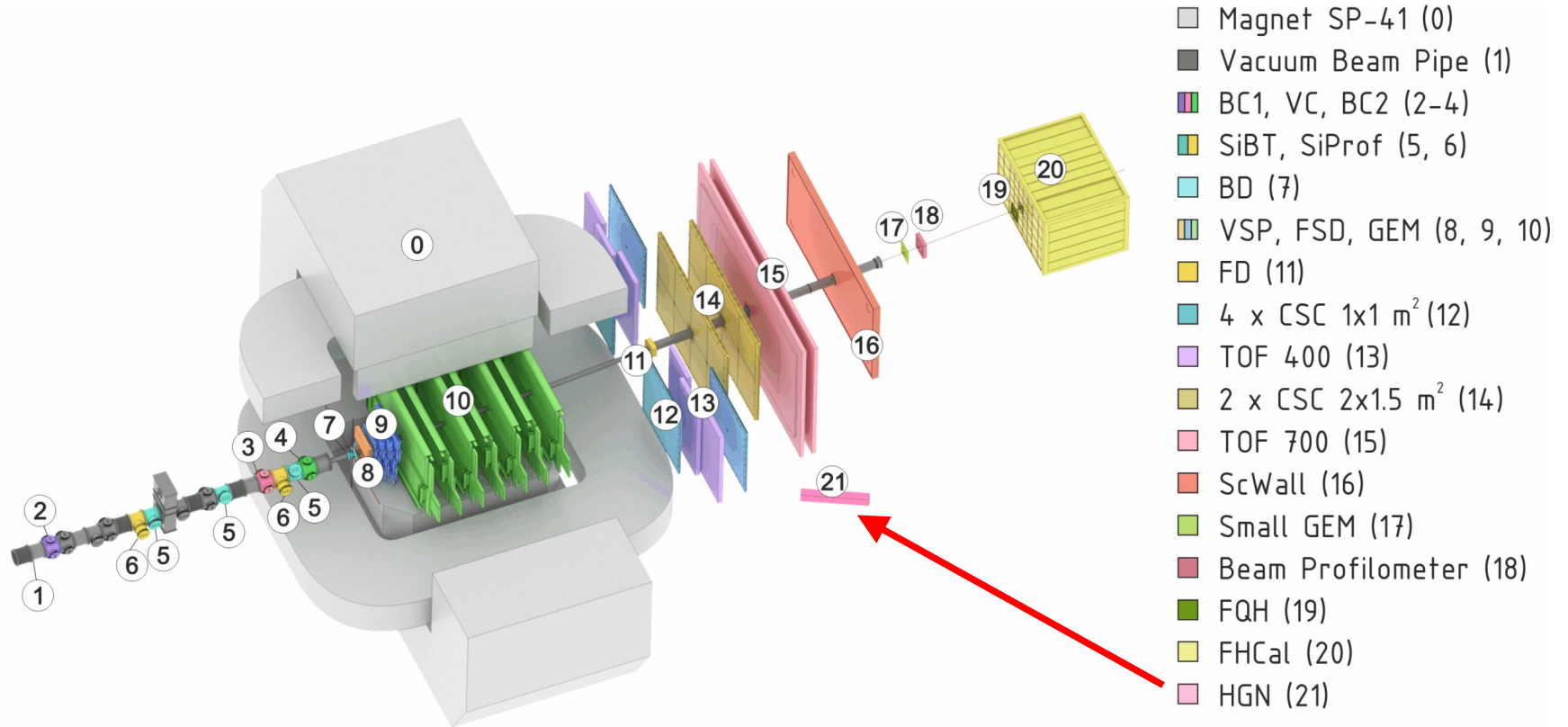
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

Комплекс установок NICA в ОИЯИ, Дубна



Установка VM@N

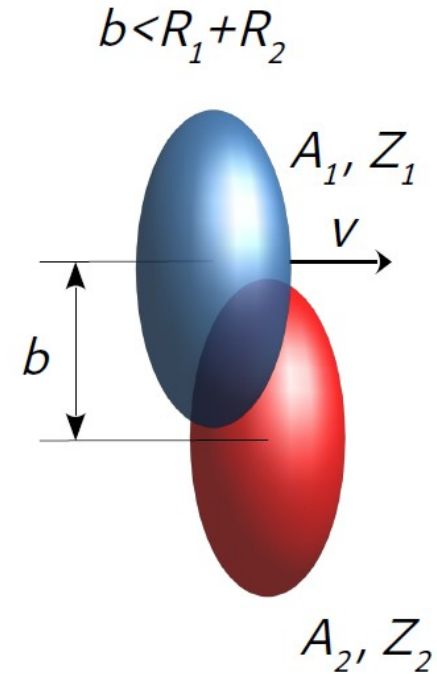
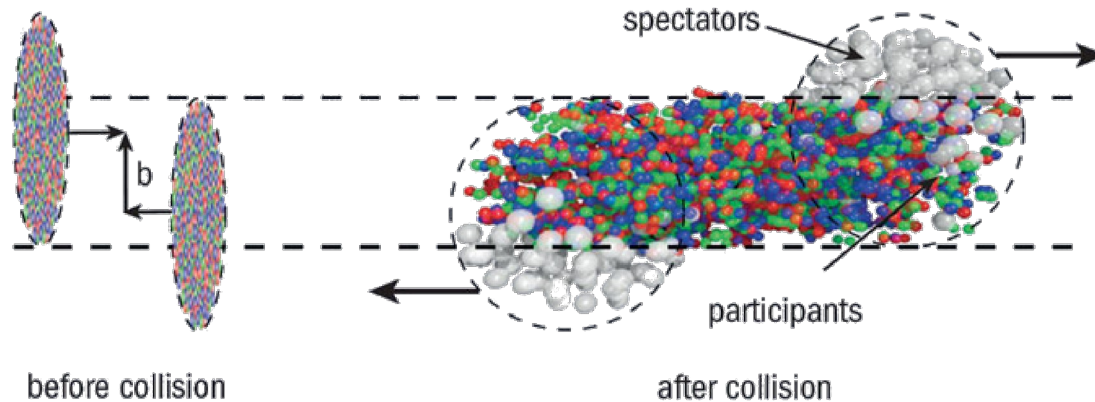


Взаимодействия ядер

Адронные взаимодействия:

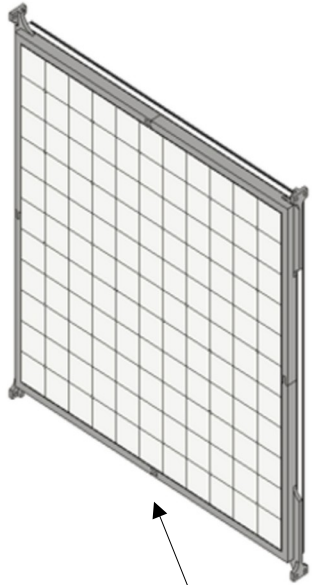
Цель:

Изучение и калибровка отклика прототипа HGND в реакции $^{124}\text{Xe} + \text{CsI}$ в эксперименте BM@N в целях подготовки к будущим сеансам, а также сравнение полученных данных при энергии пучка 3,0А ГэВ с данными при энергии пучка 3,8А ГэВ.

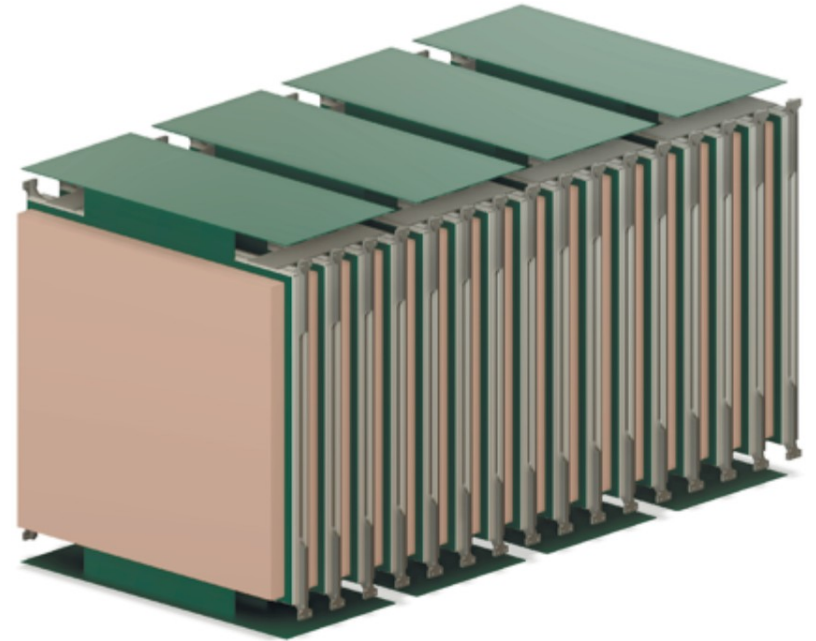
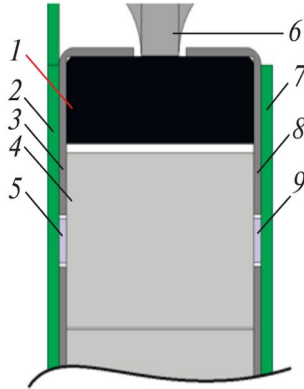
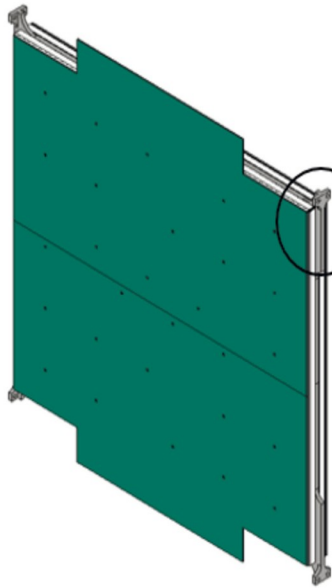


Высокогранулярный нейтронный детектор HGND

11x11 ячеек

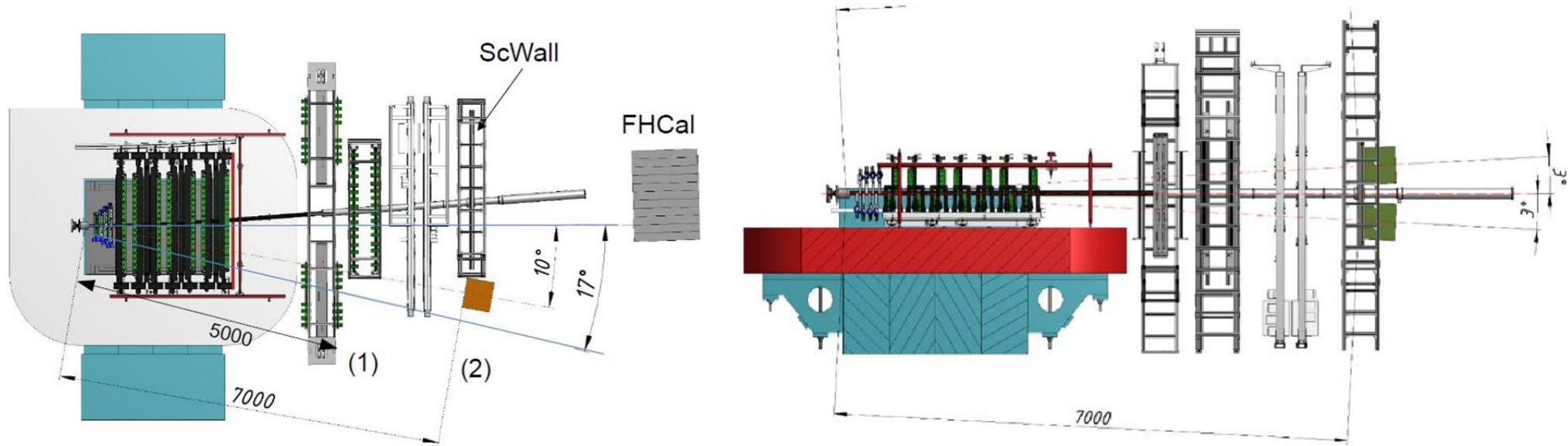


Сцинтилляционный модуль



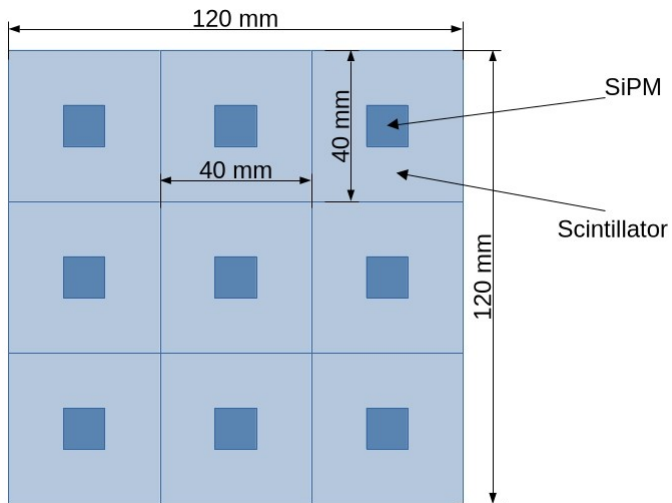
Сборка детектора: 2 плеча по 8 слоев

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

Прототип HGND



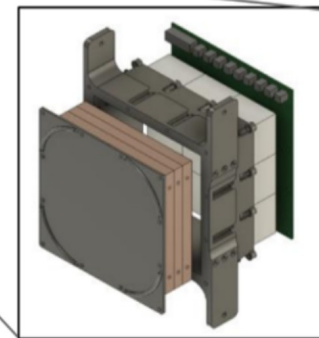
9 модулей с медным поглотителем

5 модулей со свинцовым поглотителем

Вето модуль (без поглотителя)

120mm

120mm



1 слой - VETO



Необходимы для разделения ливней от γ -квантов

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%

Временное разрешение ячеек $\sim 200 \text{ пс}$,
+ с неравномерностью светосбора $\sim 240 \text{ пс}$,
+ с другими факторами $\sim 270 \text{ пс}$

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

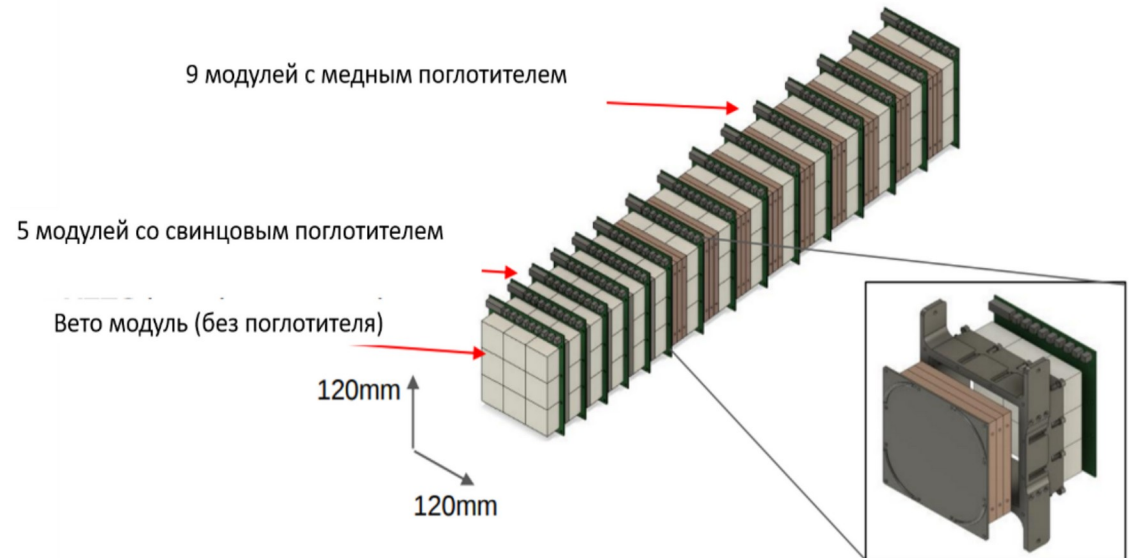
Сцинтиллятор: полистирол, 1.5%

паратерфенил, 0.01% PPOP

Общее число ячеек – 135

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

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



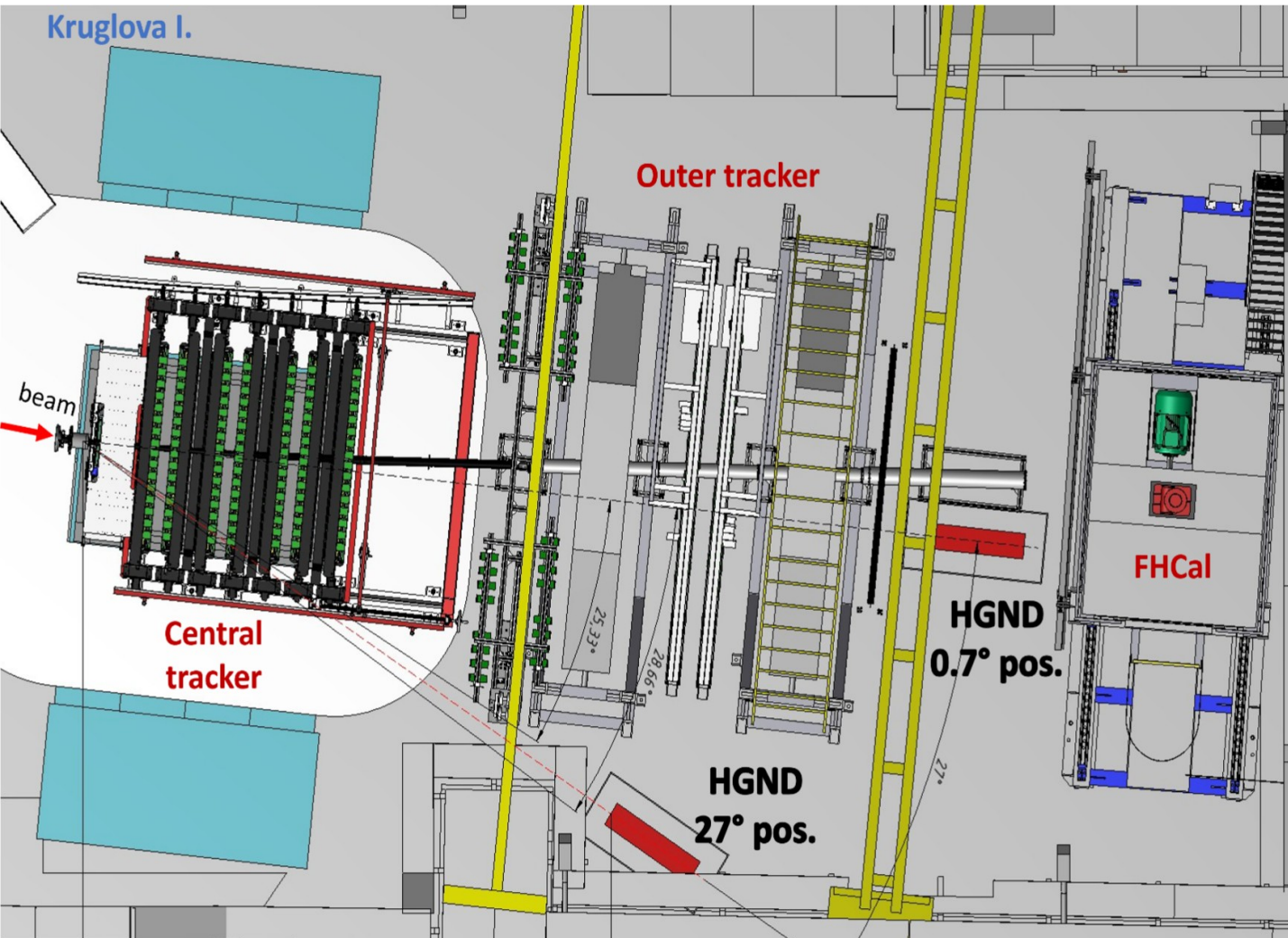
Положение прототипа HGND в установке BM@N

Положение 0.7°:

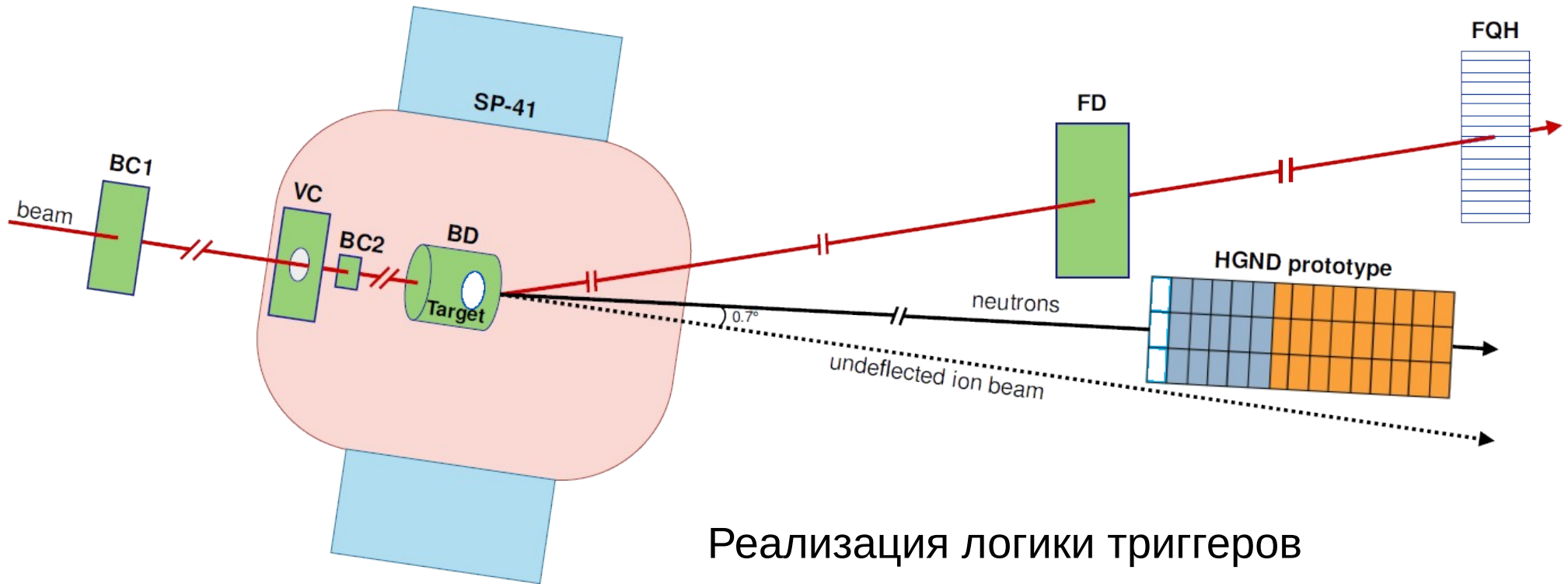
Тестирование с известной энергией нейтронов (нейтроны-спектаторы) – 3.8 ГэВ.

Положение 27°:

Измерения спектров нейтронов в области ~ midrapidity.



Триггерная система эксперимента VM@N

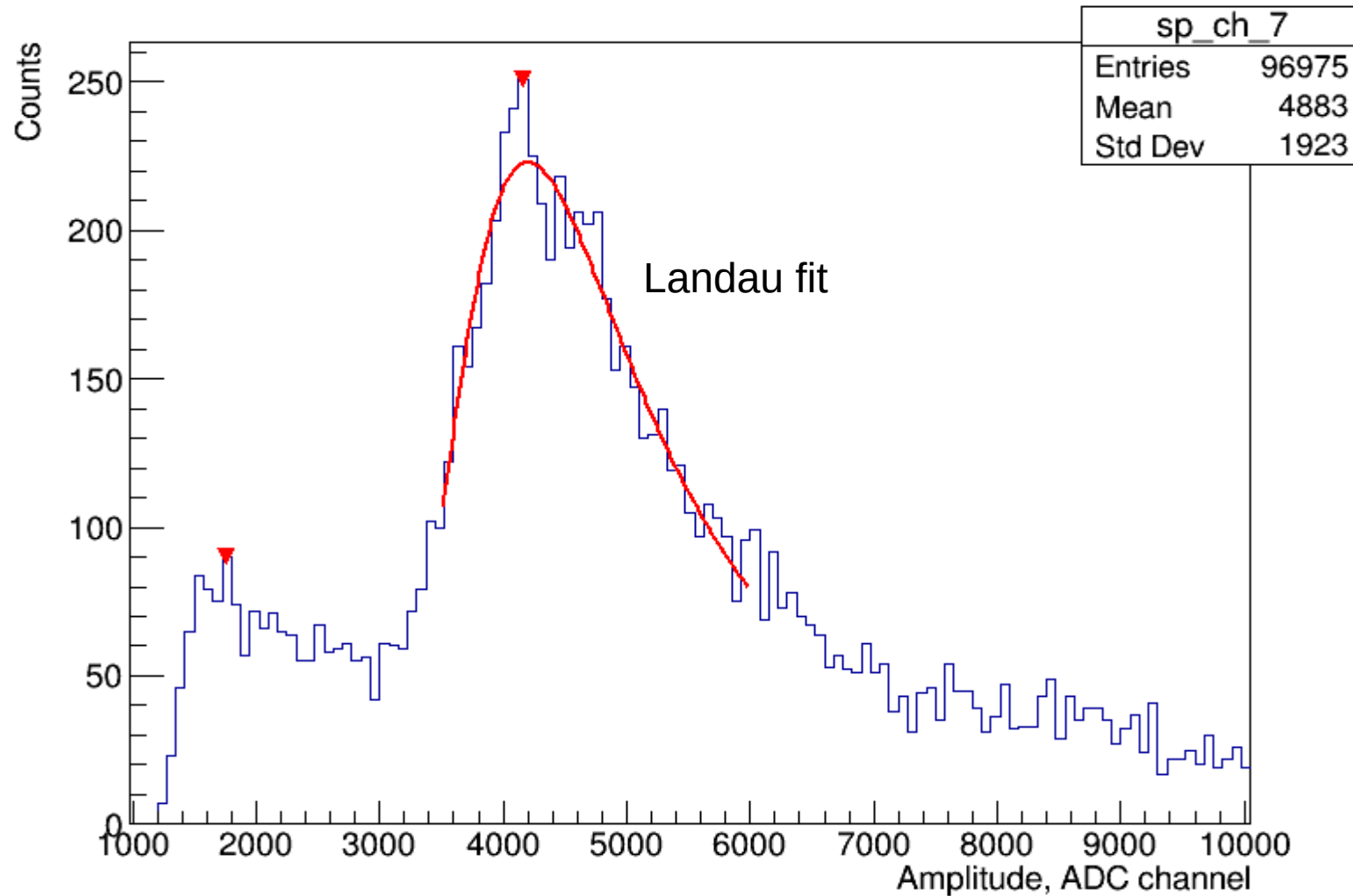


Реализация логики триггеров

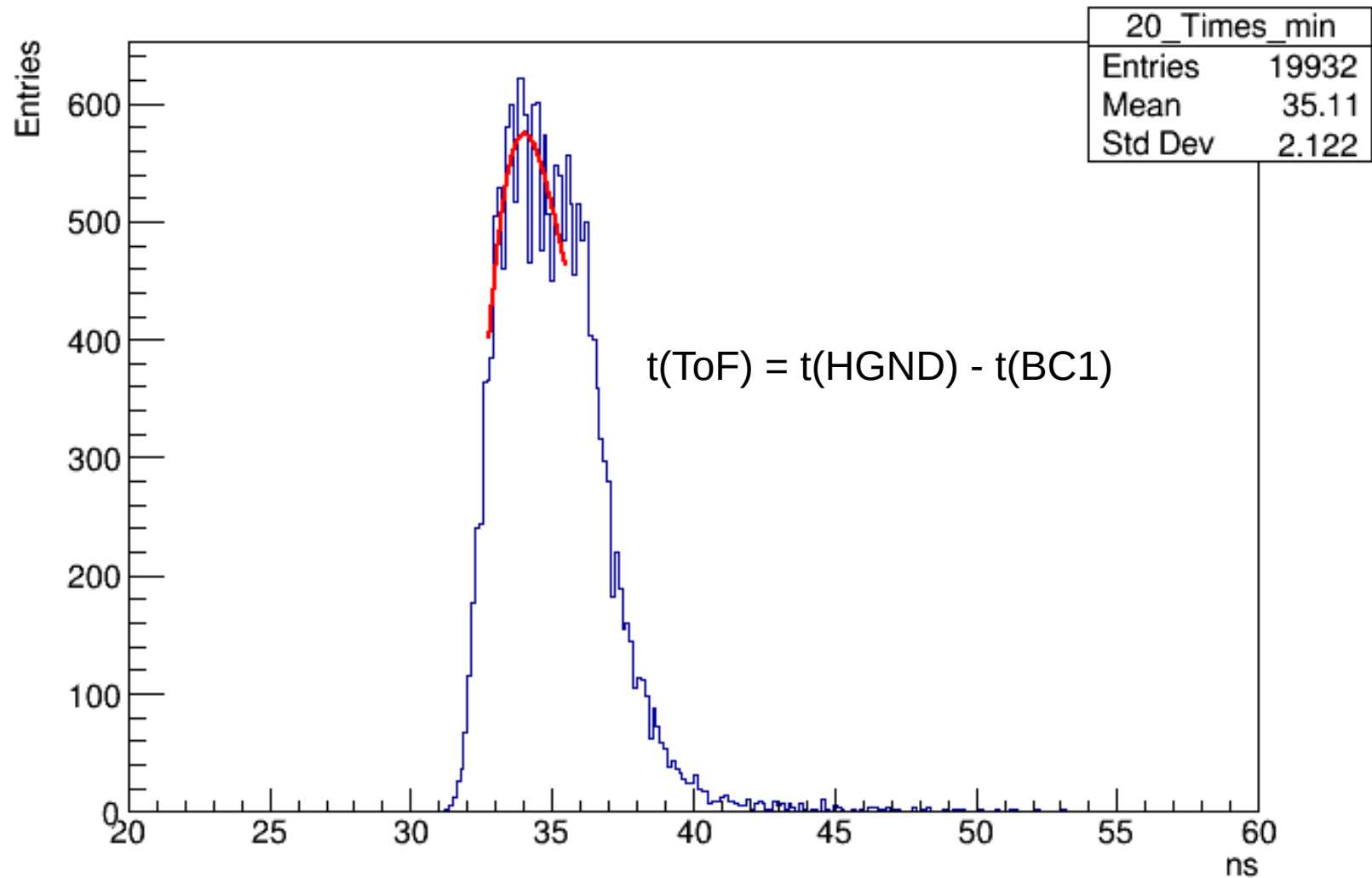
BT	$BC1 \times BC2 \times \neg VC$
ССТ	$BT \times \neg FD \times BD (\geq 4)$

Калибровка отклика детектора

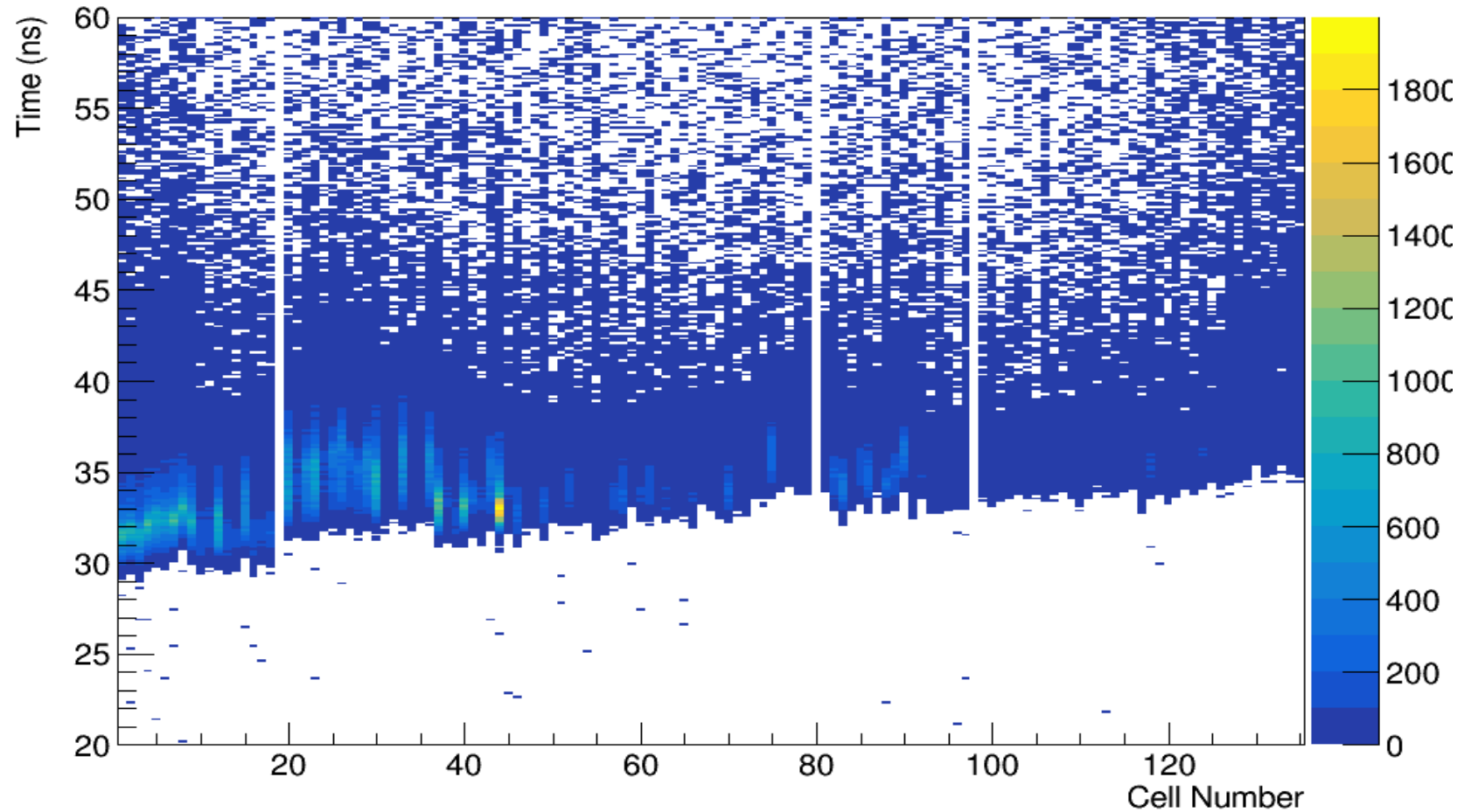
Распределение амплитуд сигналов с одной ячейки



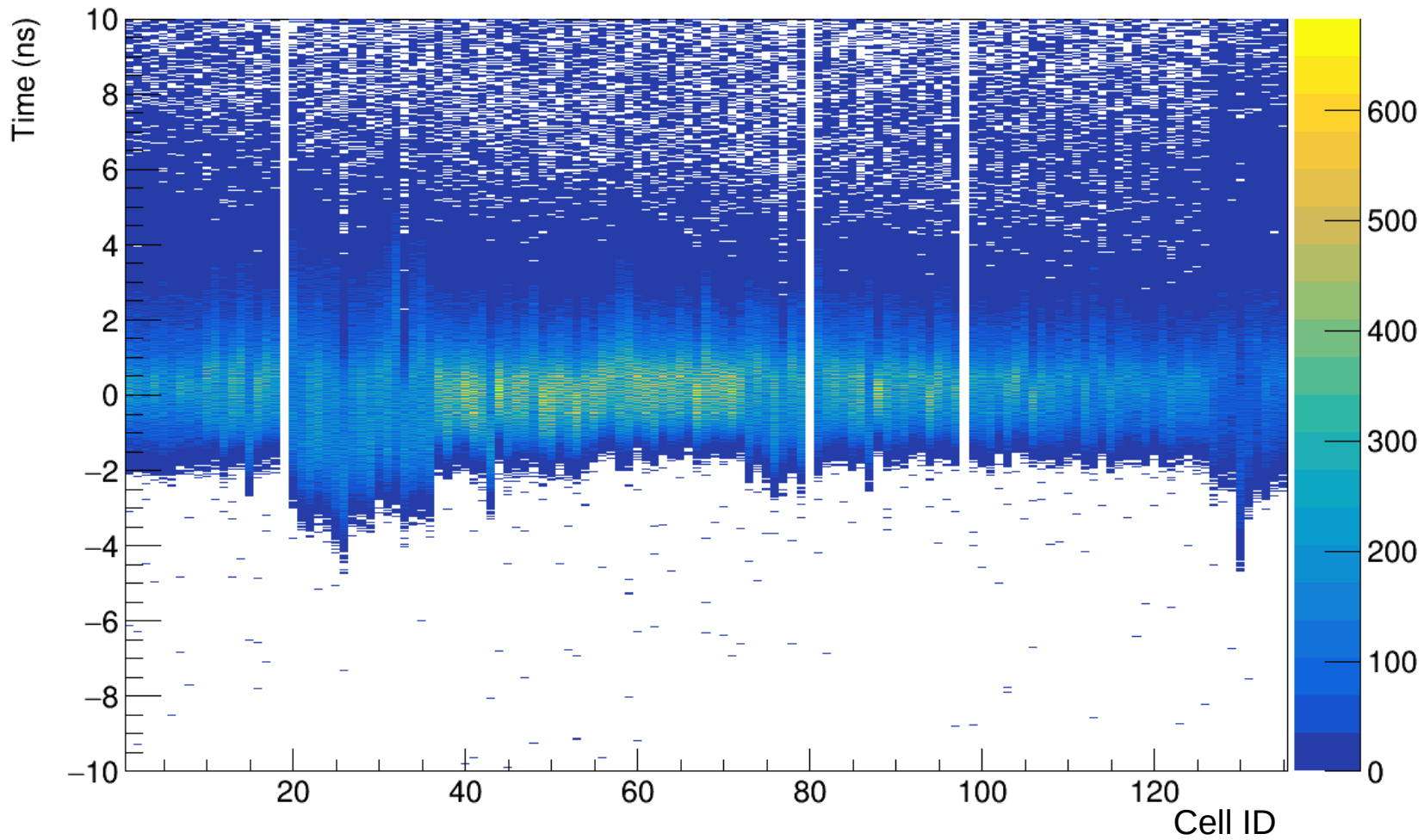
Временной отклик ячейки детектора



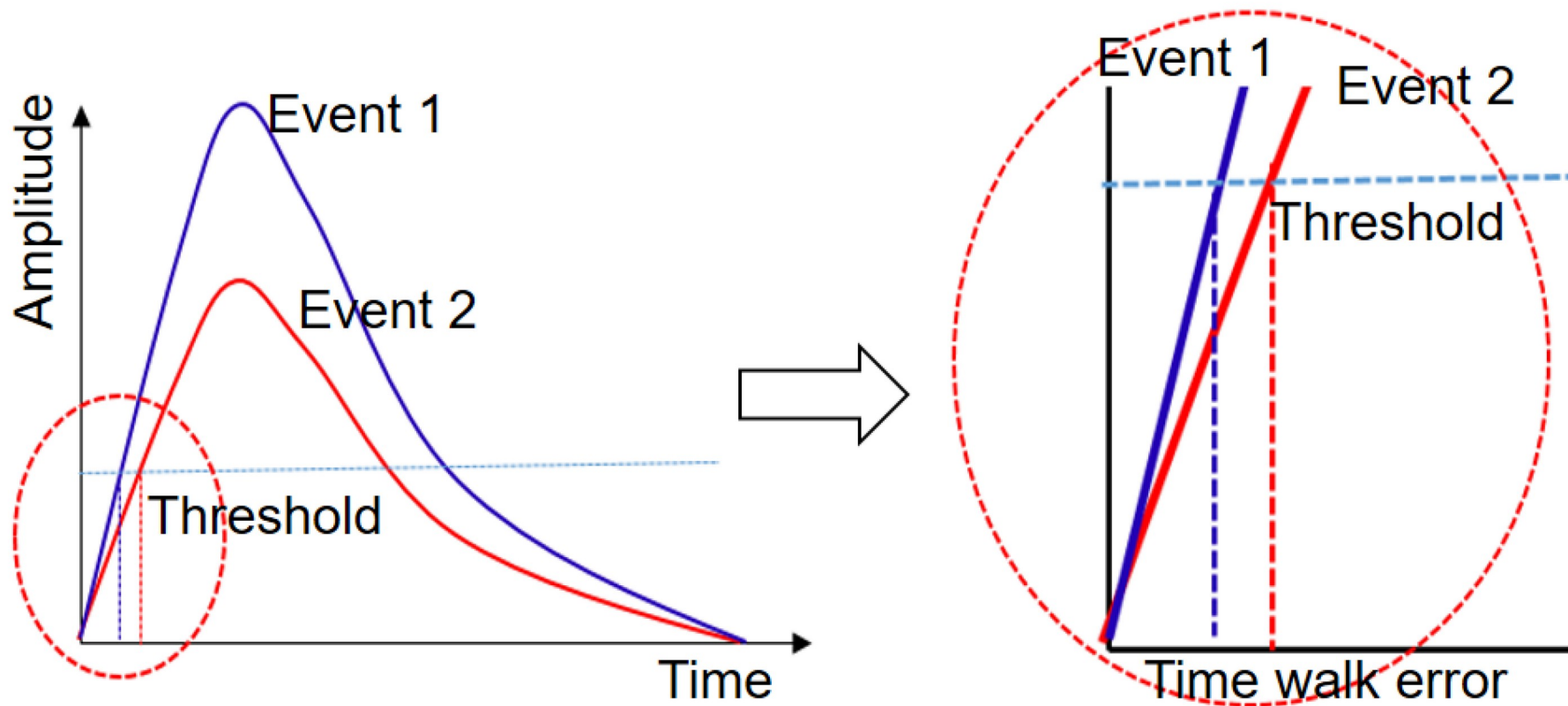
Временной отклик детектора по всем ячейкам до время-амплитудной коррекции



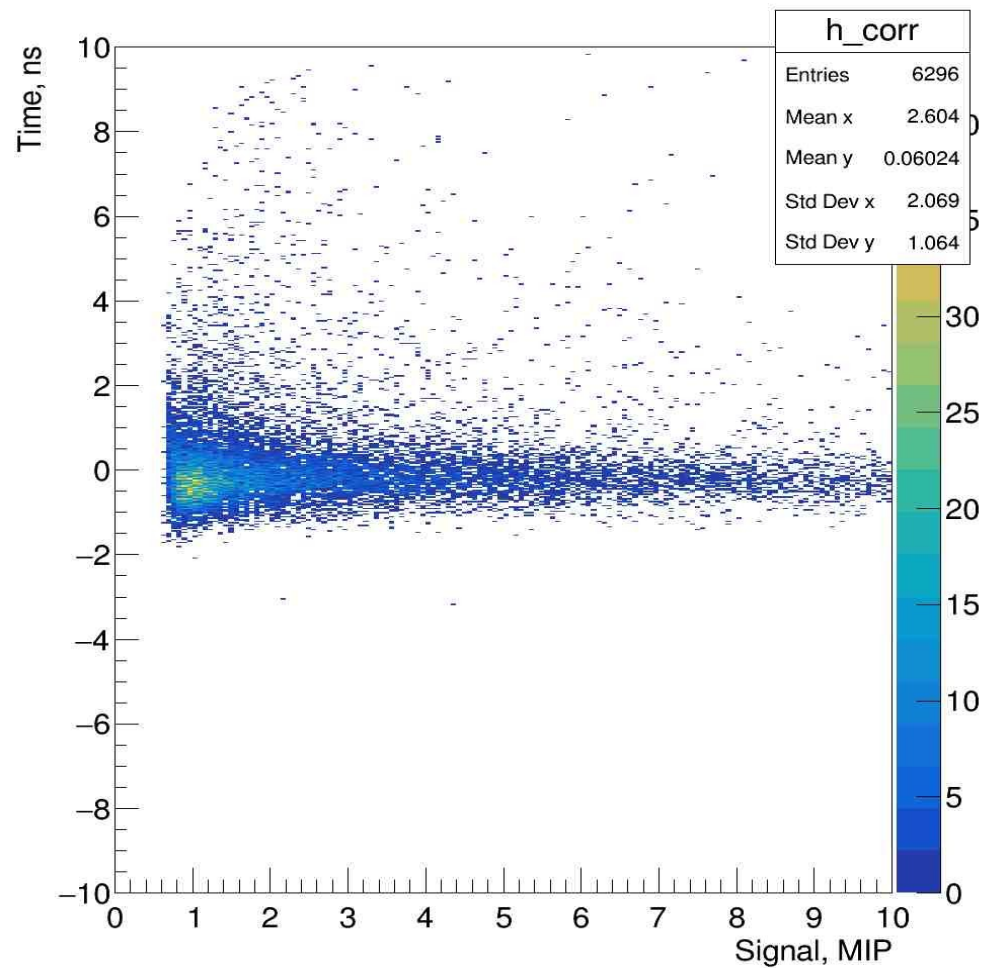
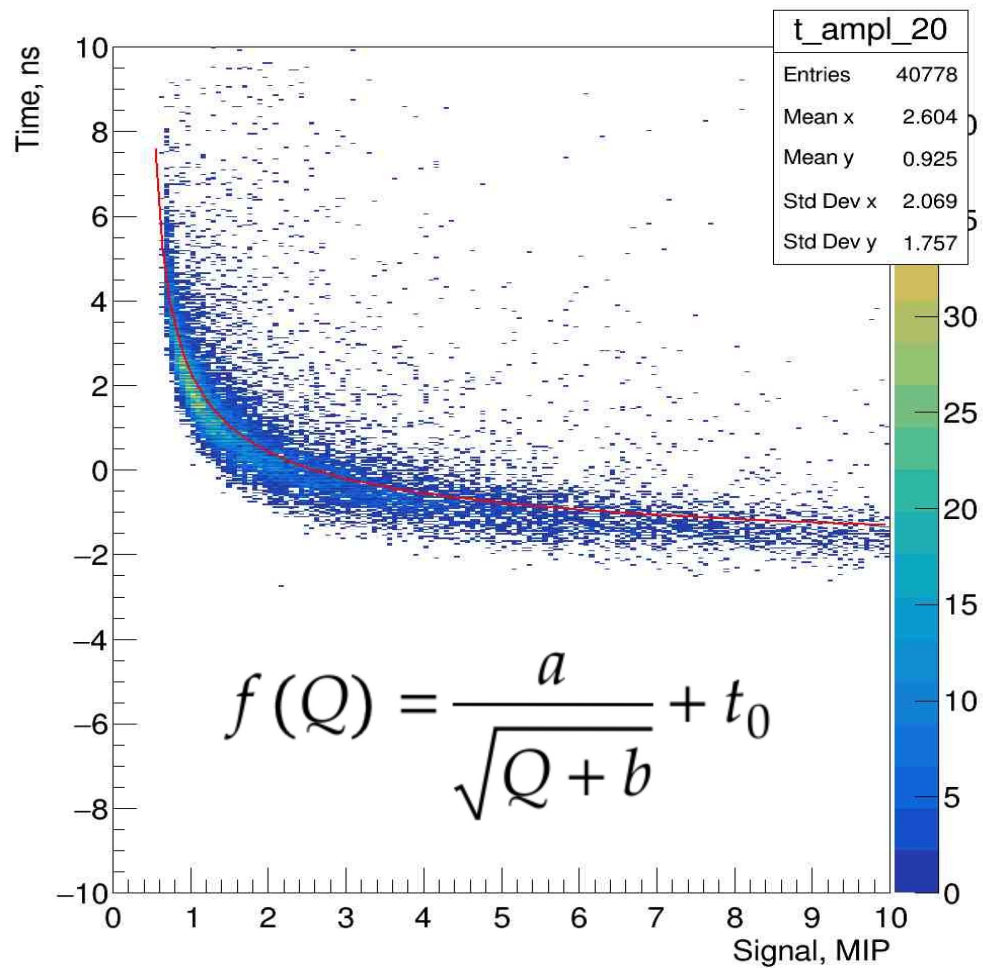
Выравнивание временного отклика ячеек в 0 нс по всем ячейкам



Эрррррр time-walk

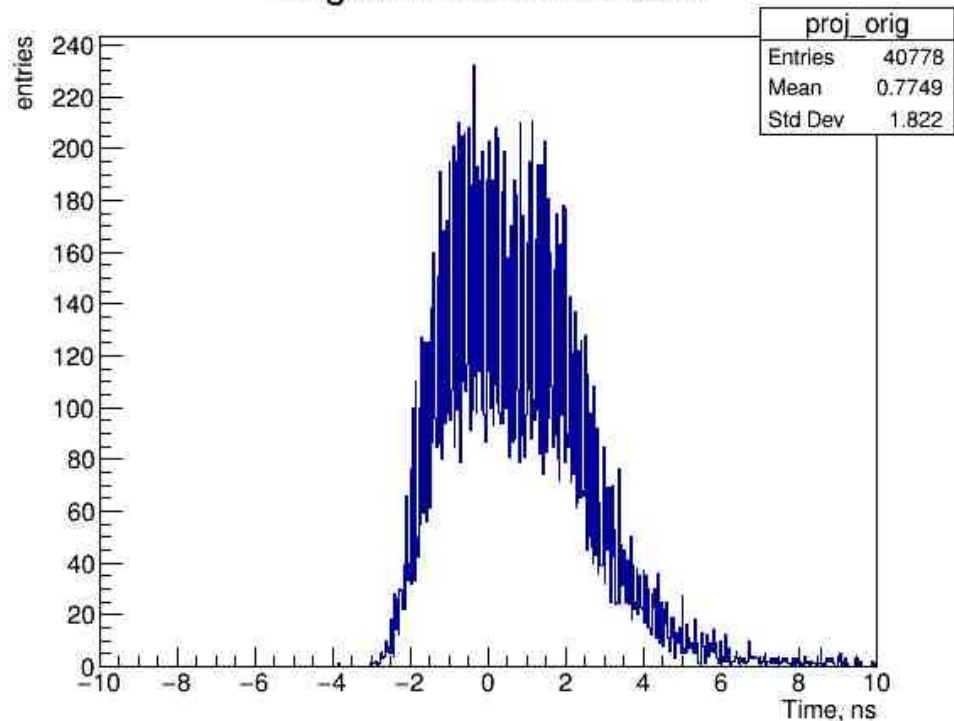


Калибровка зависимости времени отклика от амплитуды

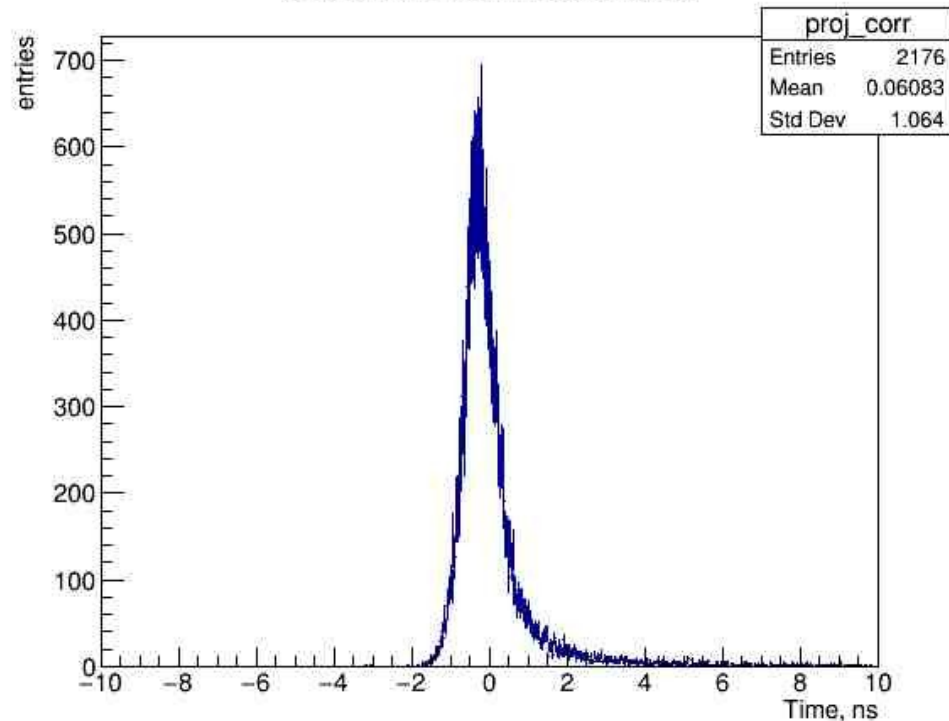


Калибровка зависимости времени отклика от амплитуды

Original Time Distribution

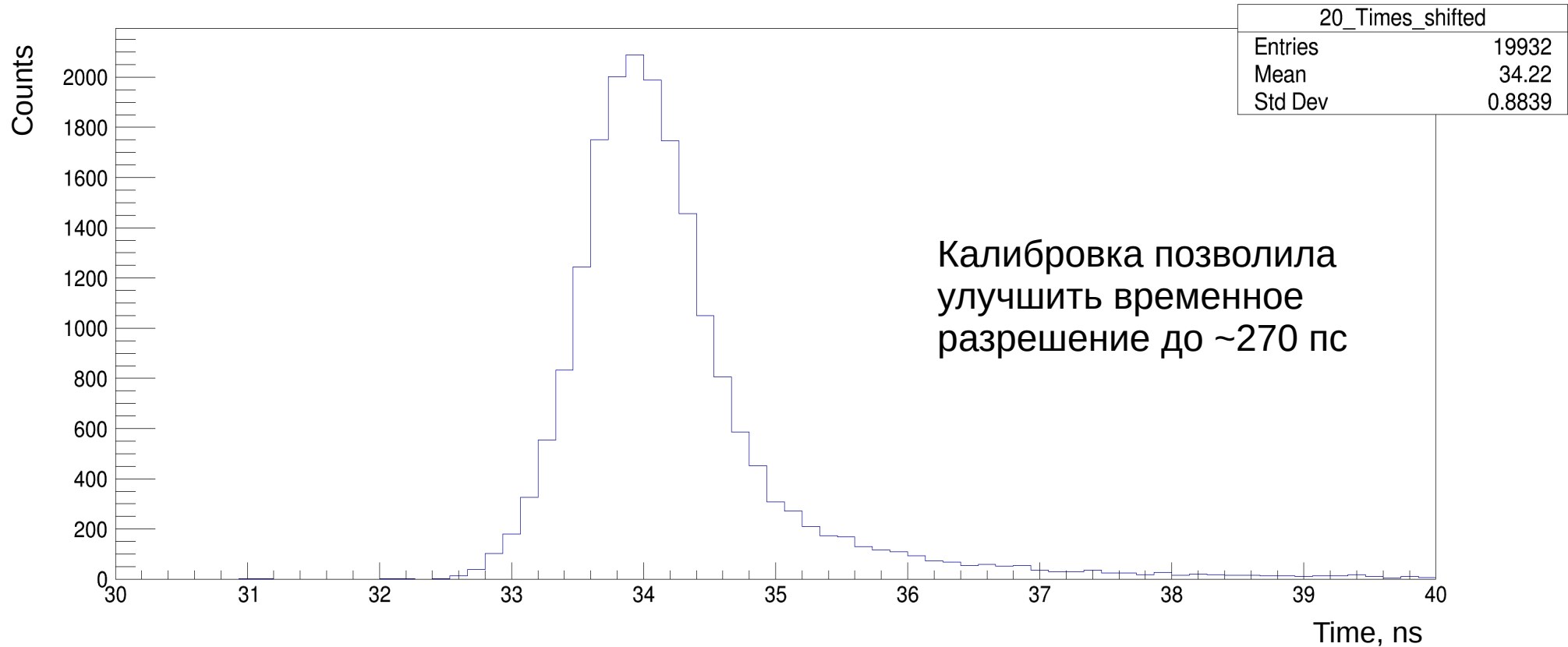


Corrected Time Distribution

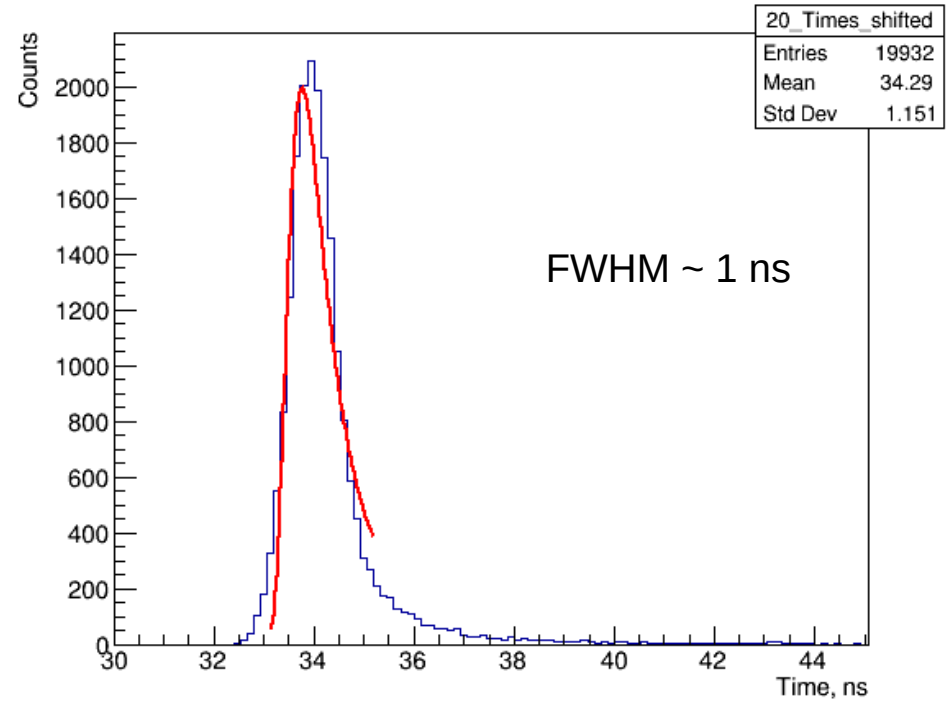
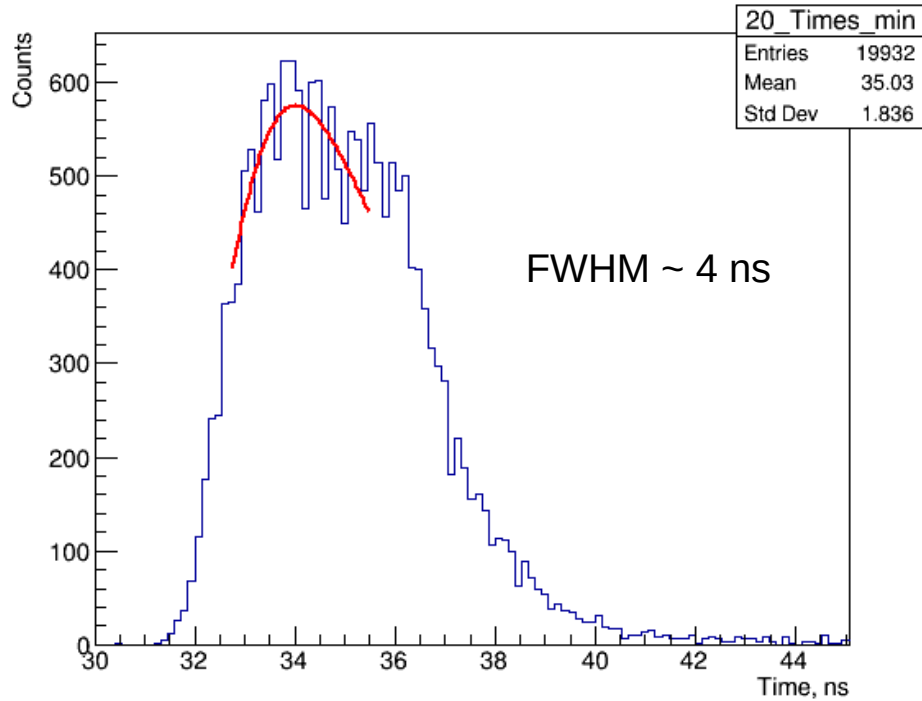


Калибровка позволяет сильно уменьшить разброс в определении времени срабатывания ячеек

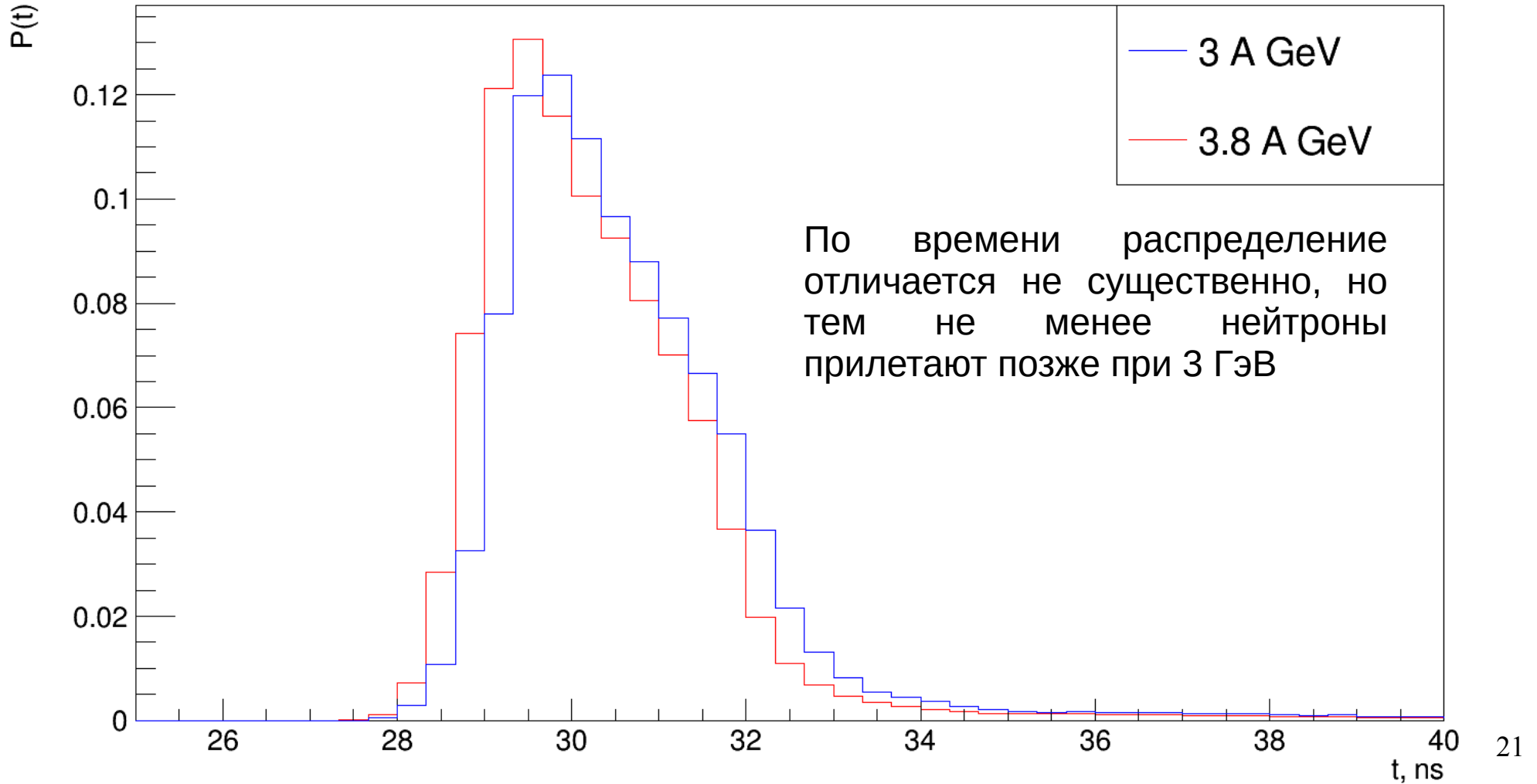
Возвращаем время из нуля в нужное положение из расчёта времени пролёта нейтрона 3.8 ГэВ



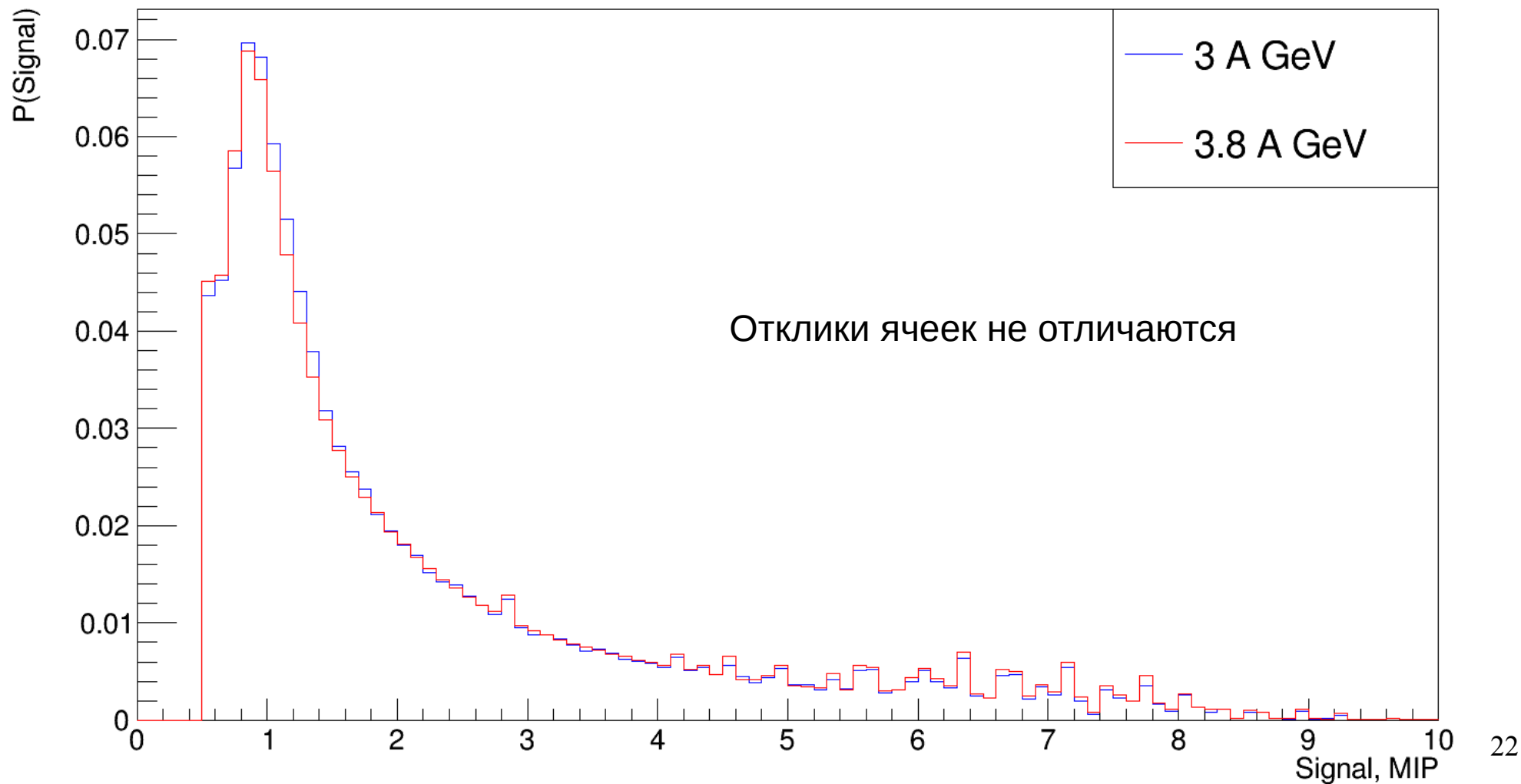
Сравнение отклика до и после калибровки



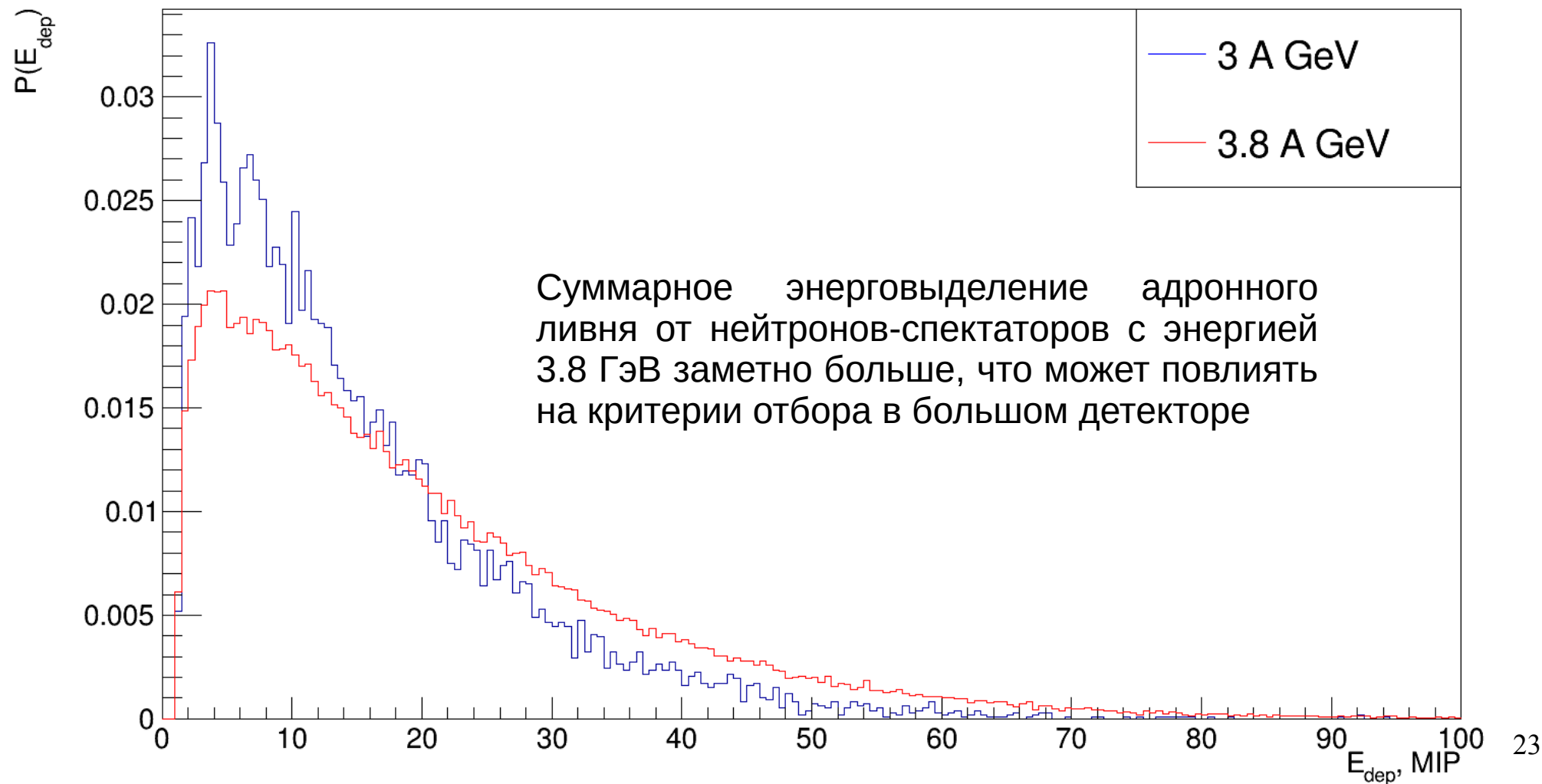
Распределение отклика по времени



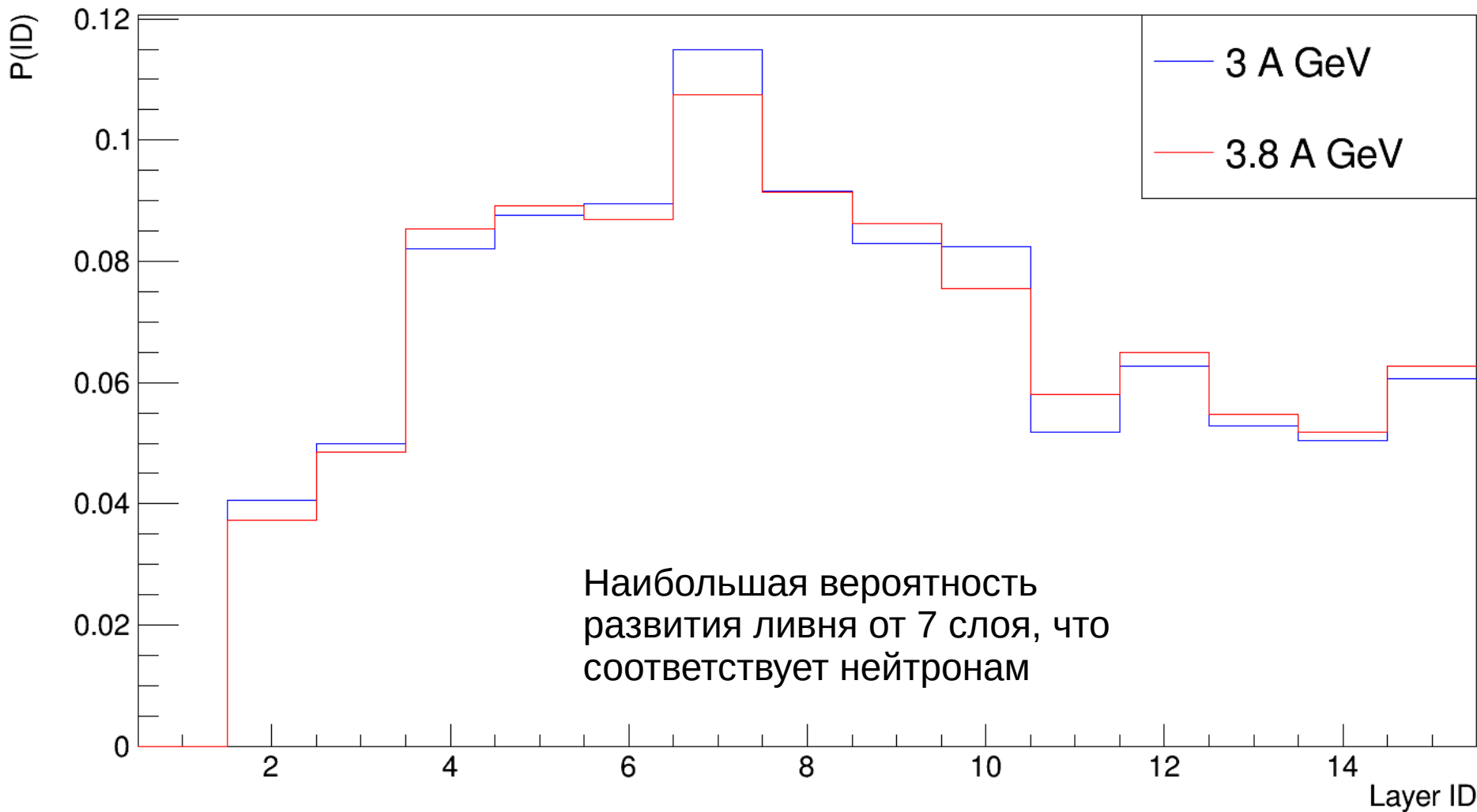
Распределение отклика ячеек в единицах MIP



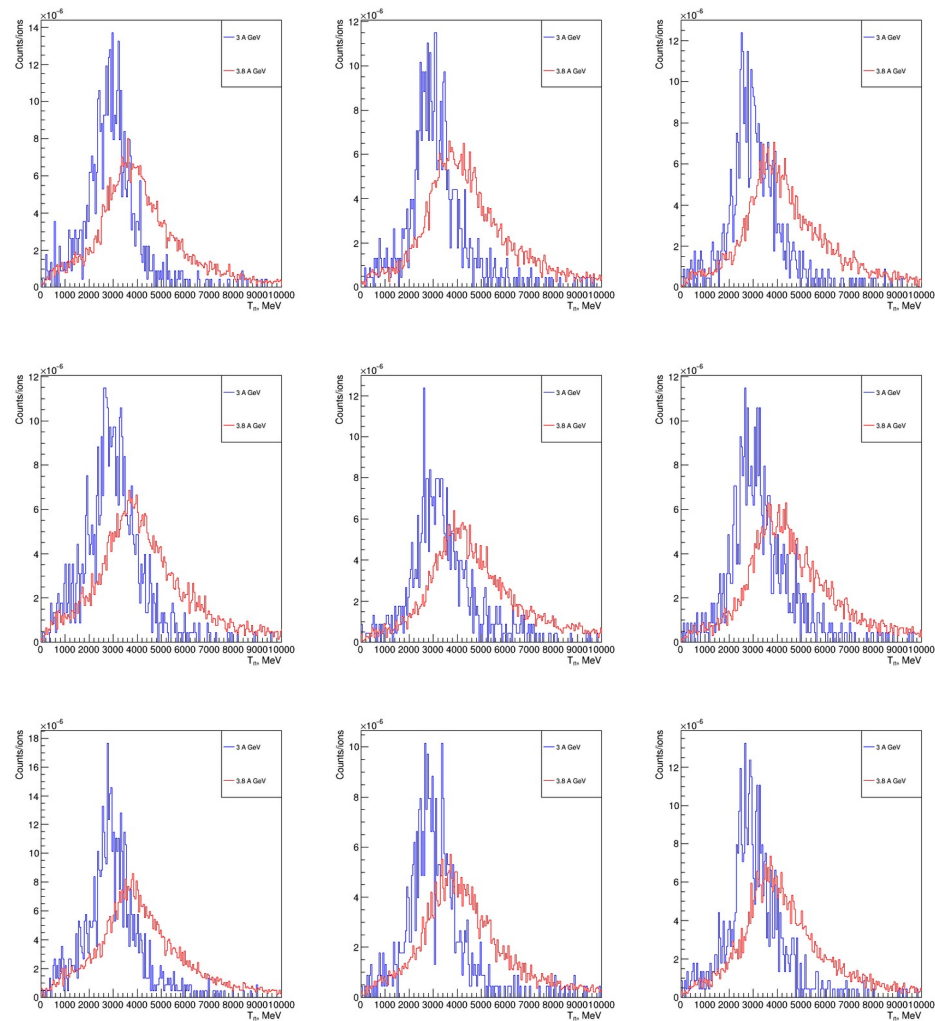
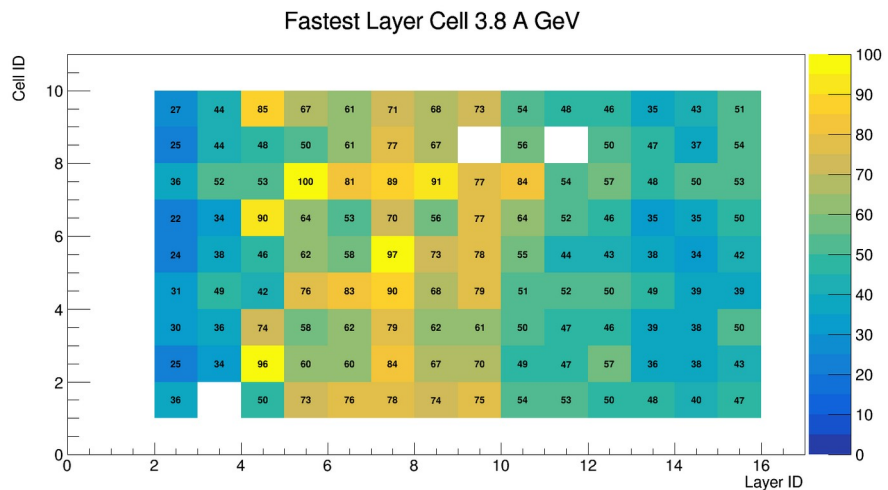
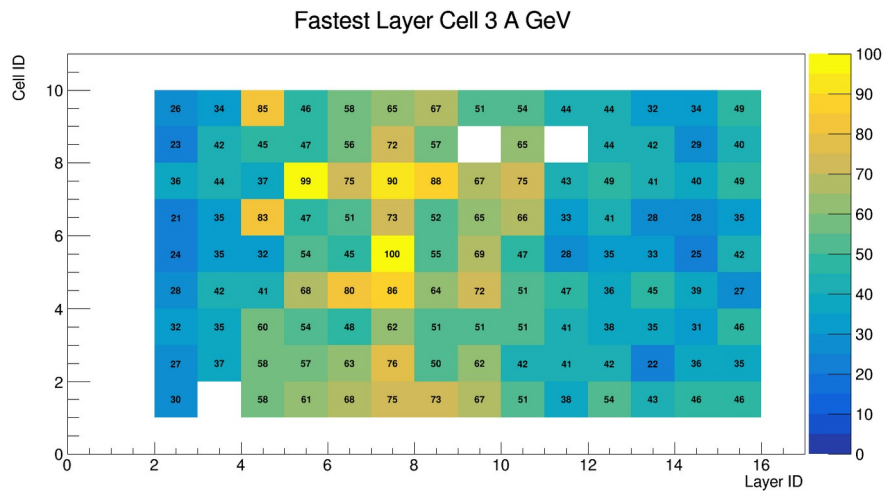
Суммарная энергия, выделенная по всем ячейкам



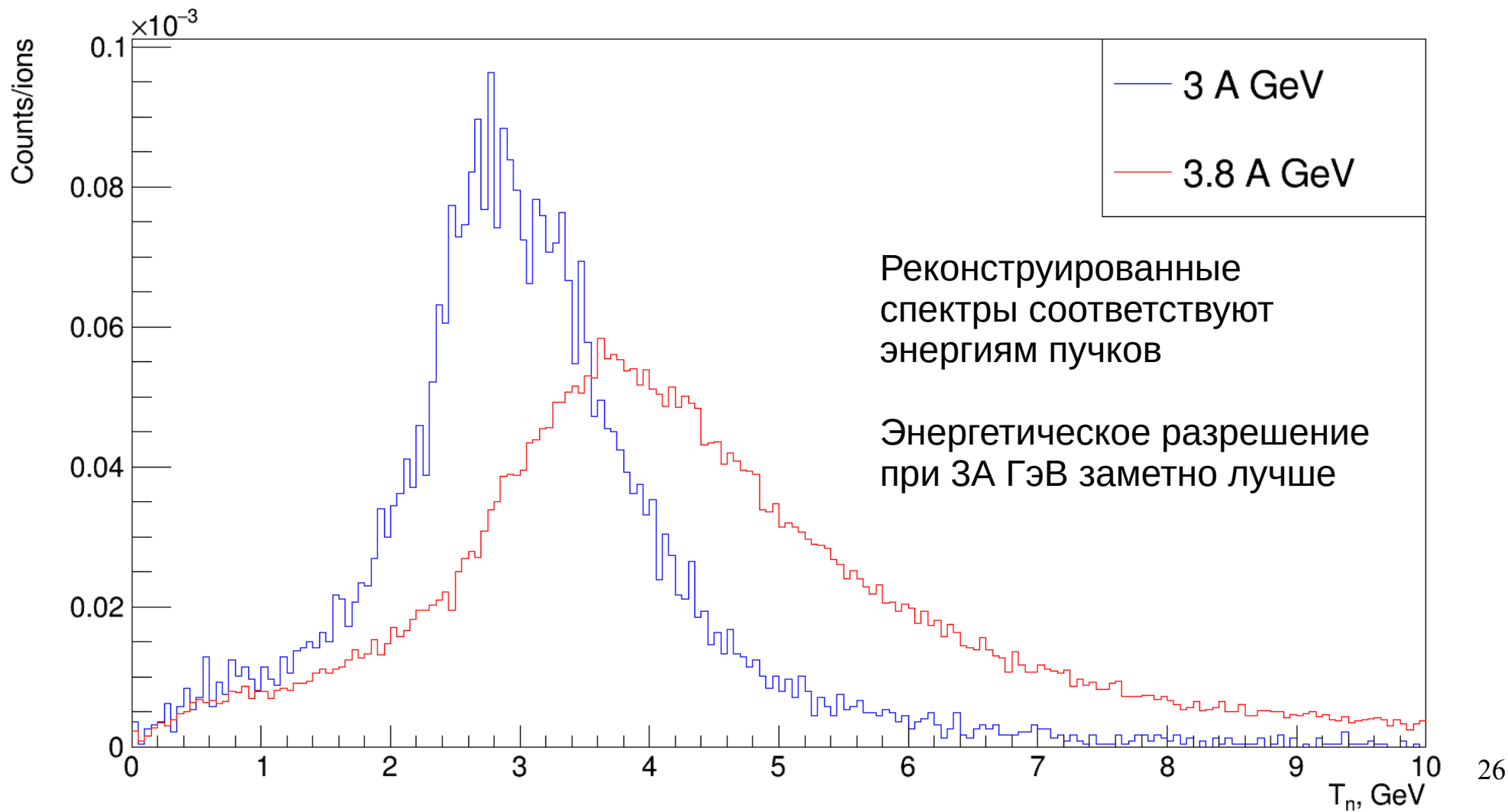
Сравнение экспериментальных данных для 3.0 и 3.8А ГэВ



Сравнение экспериментальных данных для 3.0 и 3.8А ГэВ

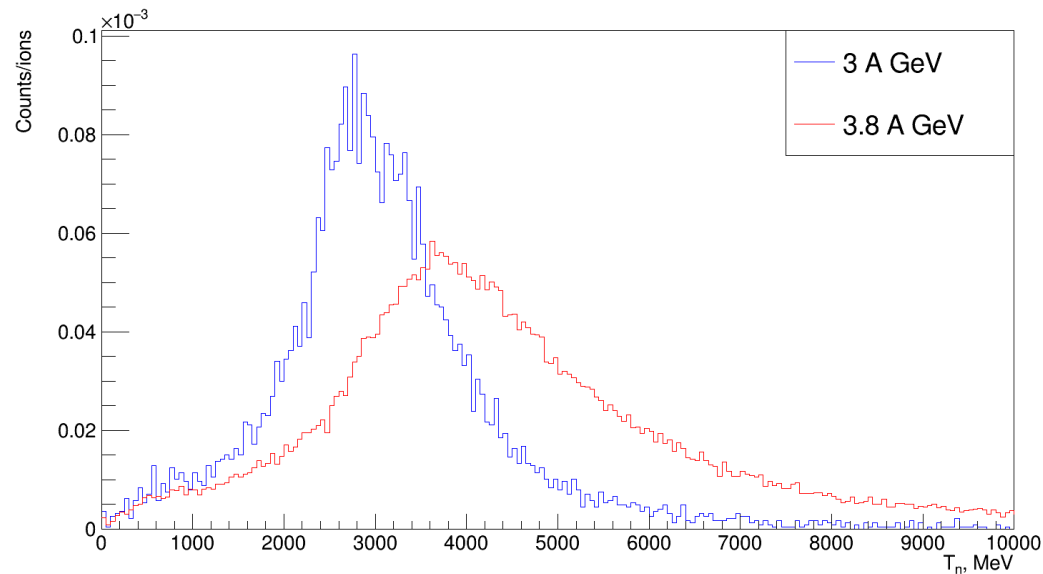


Реконструированные по времени пролета спектры кинетических энергий нейтронов



Оценка энергетического разрешения

Энергия	3,0А ГэВ	3,8А ГэВ
FWHM, МэВ	1800	2600
$\sigma_E = 2\sqrt{2\ln(2)} \times \text{FWHM}$, МэВ	764.3	1104.0
σ_E/E	0.25	0.29



Заключение

- В ходе выполнения научно-исследовательской работы была проведена калибровка прототипа HGND на нейтронах-спектаторах с энергией 3.8 ГэВ
- Несмотря на разницу в энергиях нейтронов, как временной, так и амплитудный отклики детектора достаточно близки
- Произведена оценка энергетического разрешения для двух энергий:

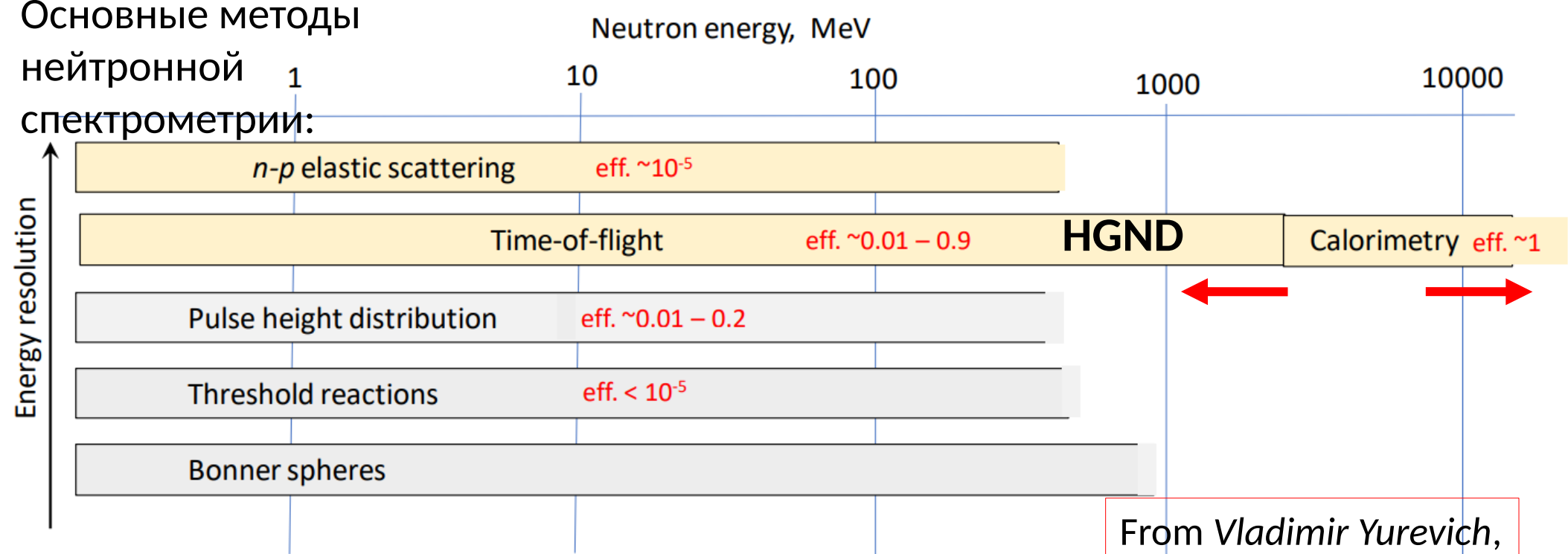
Энергия	3,0А ГэВ	3,8А ГэВ
$\sigma_E/E, \%$	25	29

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

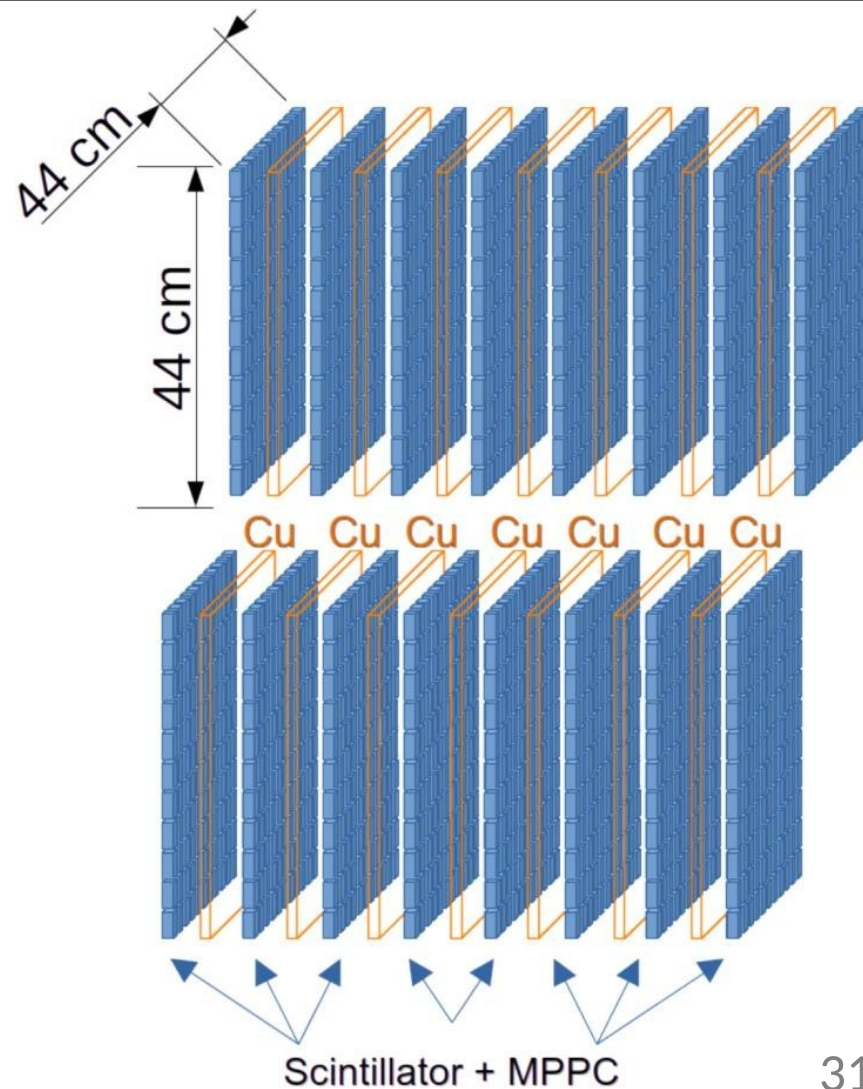
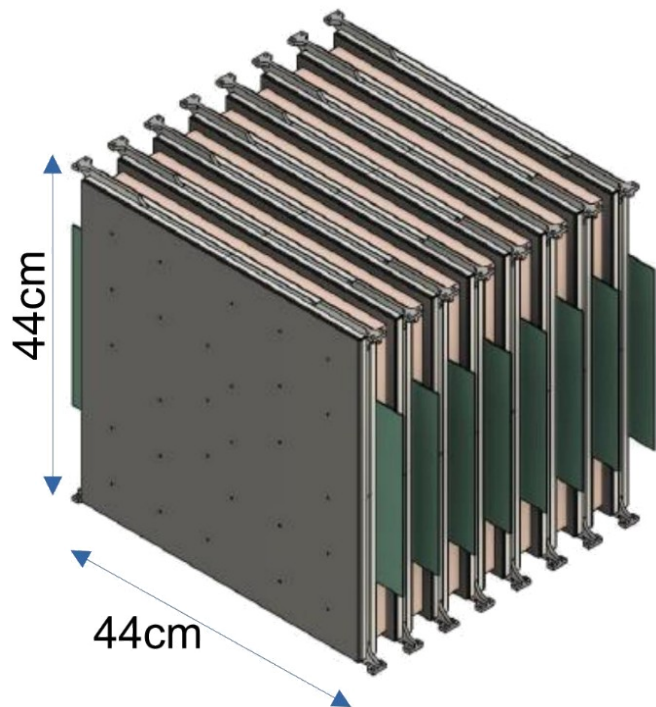
From Vladimir Yurevich,
Study of neutron
production in nucleus-
nucleus collisions,
BM@N collaboration
meeting, 3–8 Oct. 2021



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

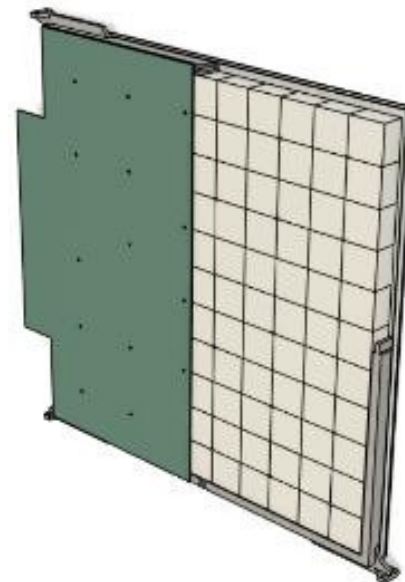
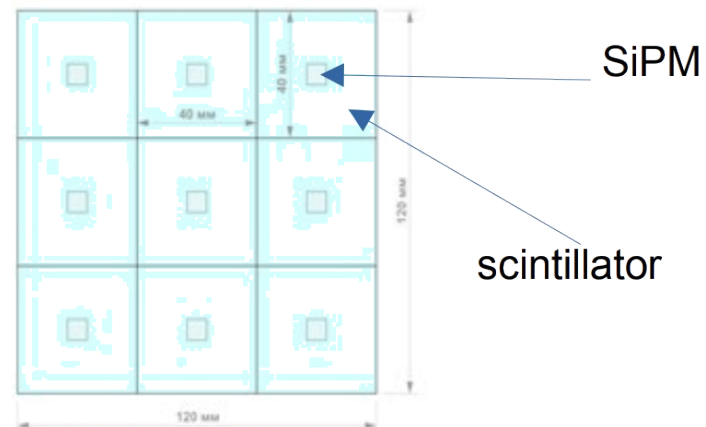


EQR15 11-6060D-S MPPC

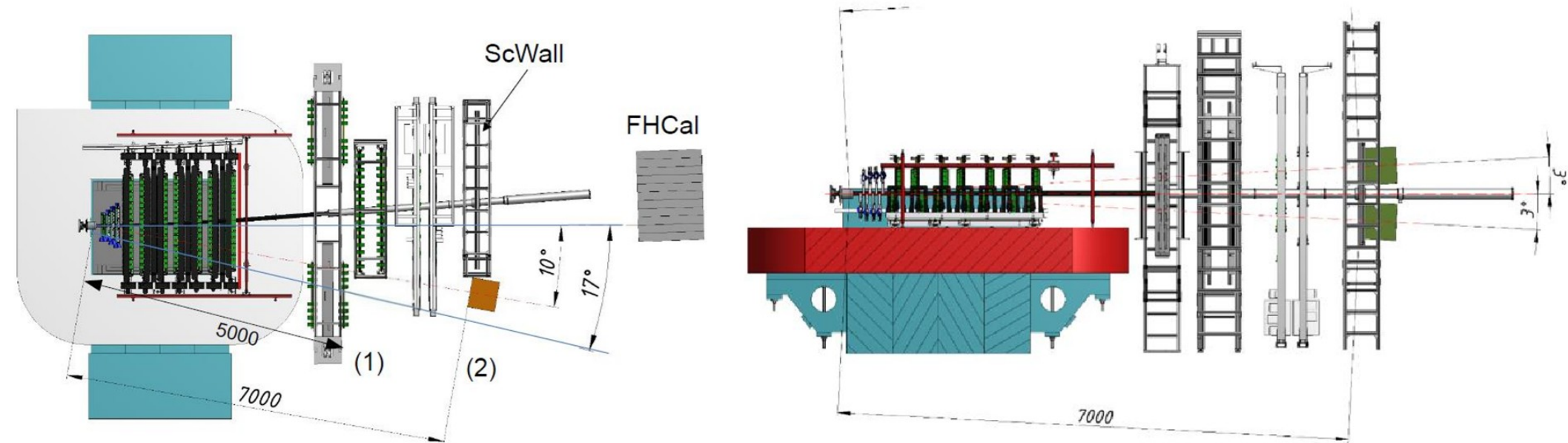
- Активная площадь: $6 \times 6 \text{ мм}^2$
- Квантовая эффективность: 45% (420 нм)
- Усиление примерно 4×10^5

Сцинтилляторы на основе полистирола с ROPOR

- 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



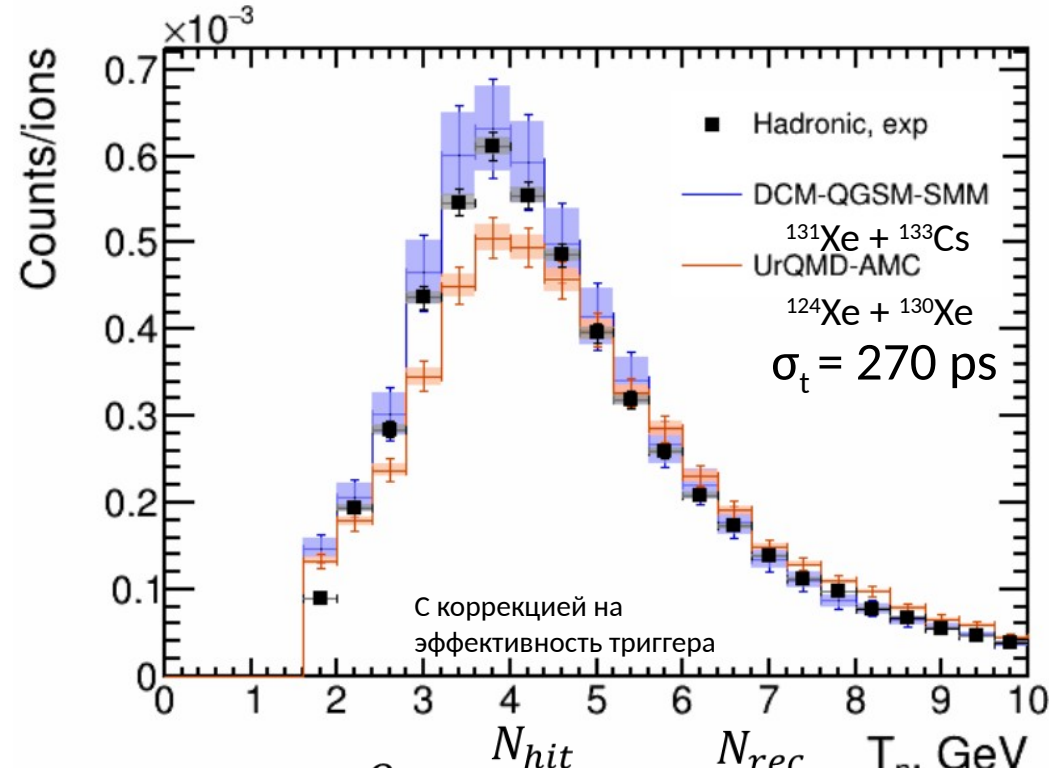
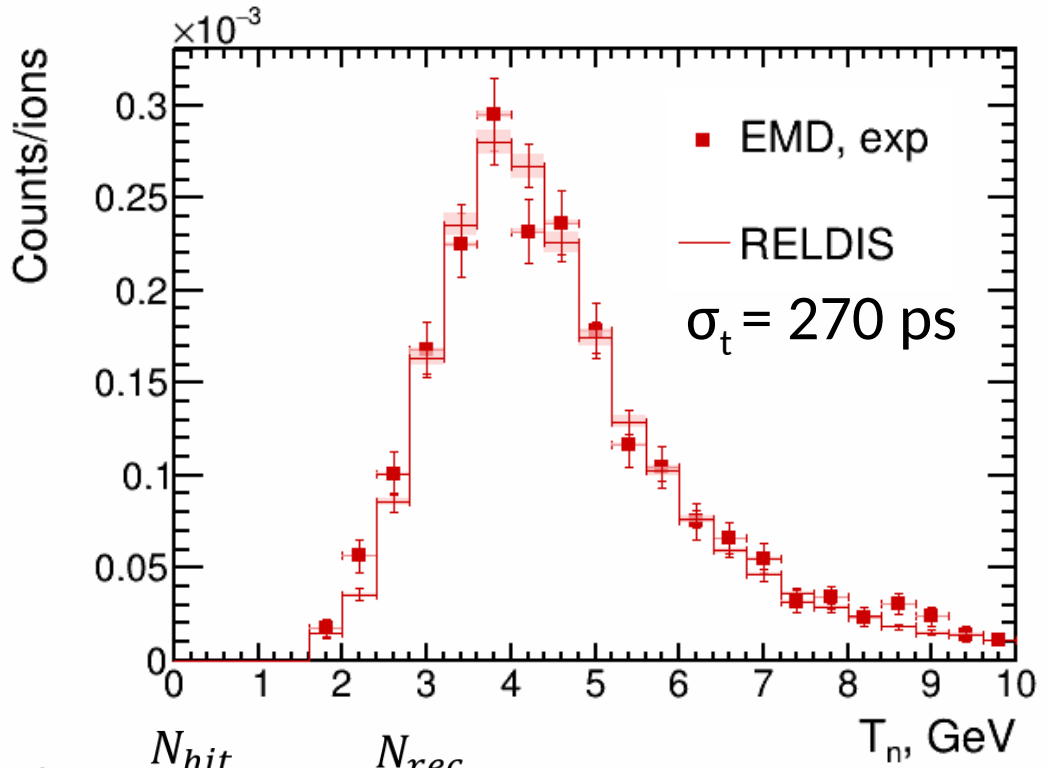
Планируемое положение HGND на BM@N



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



Сравнение измерений и моделирования



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

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

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

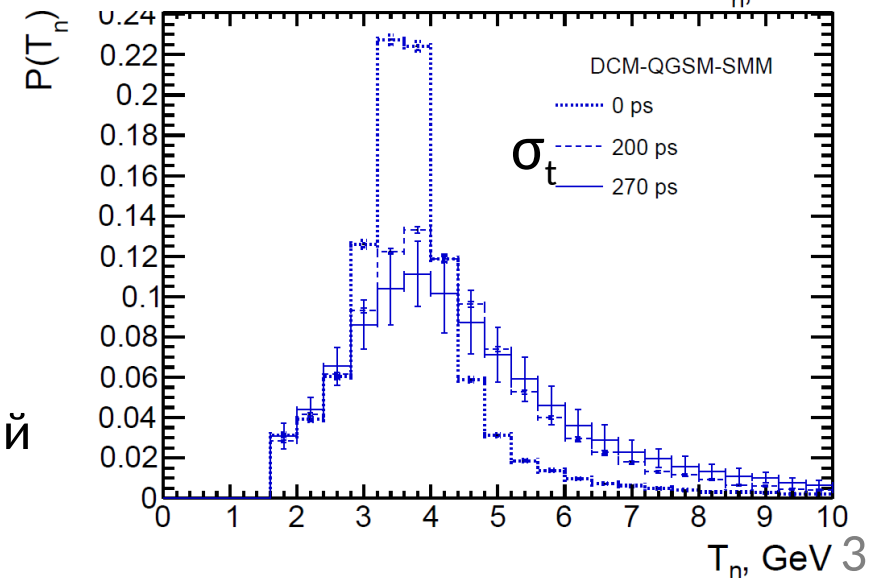
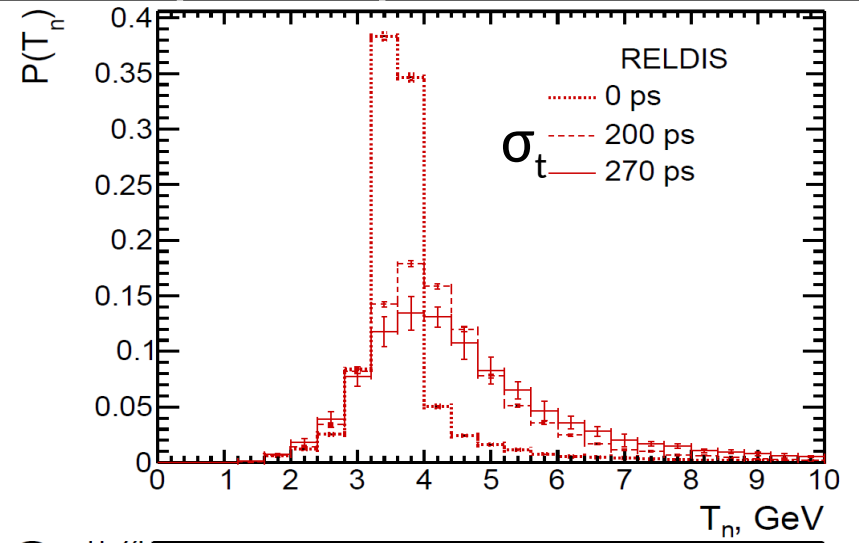
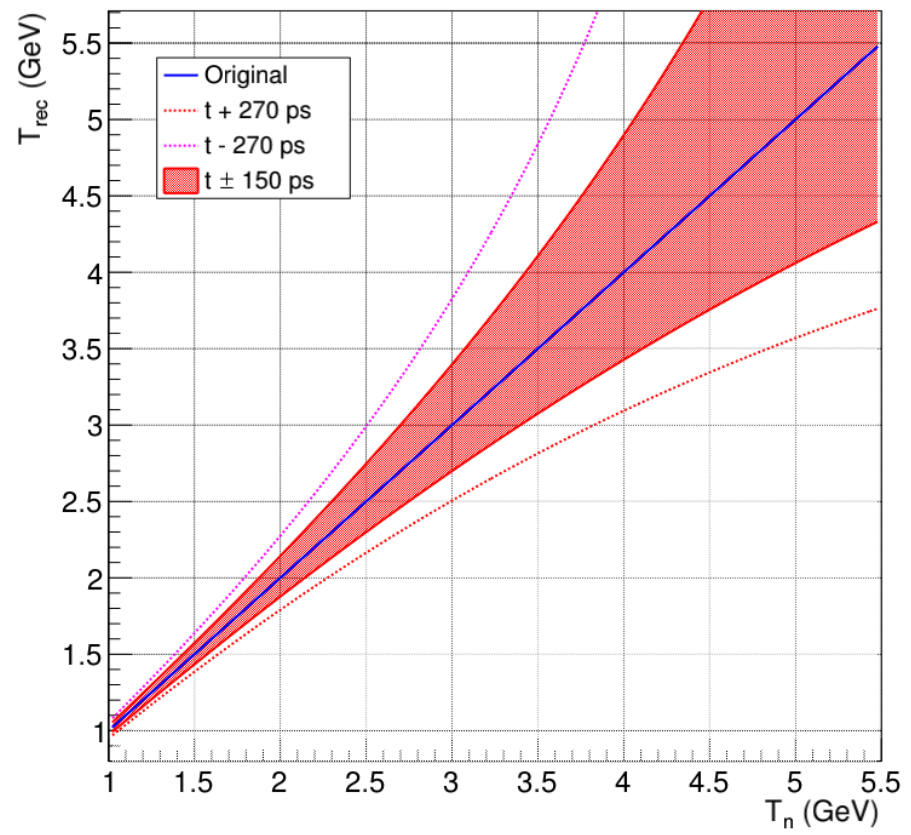
Реконструированные спектры из моделирования хорошо согласуются с данными.

$\Omega_n, \%$	$\varepsilon_n, \%$	$\Omega_n \times \varepsilon_n, \%$
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

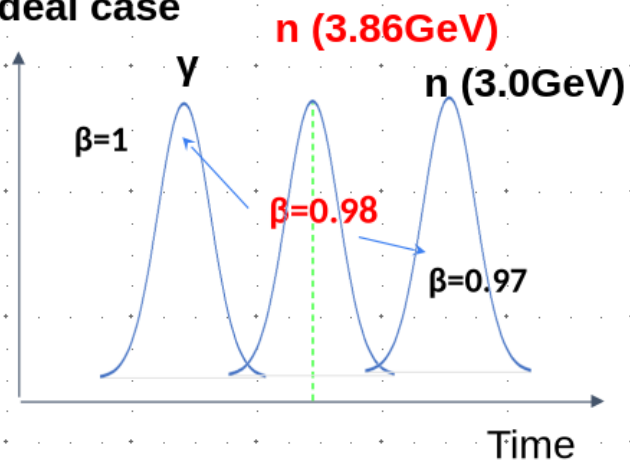
T_{rec} vs T_n with ± 270 and 150 ps shifts



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

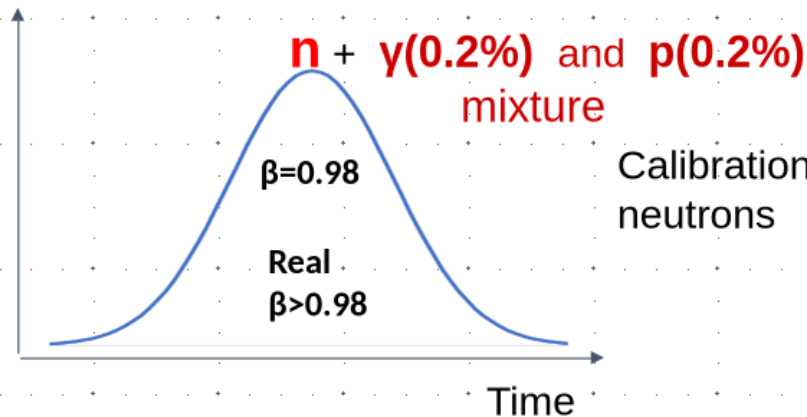


Ideal case

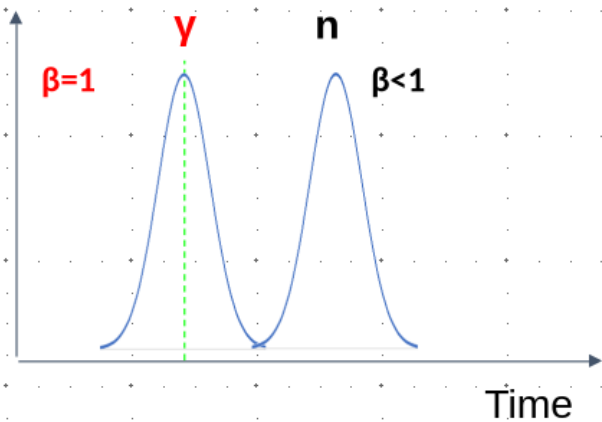


Calibration on neutrons

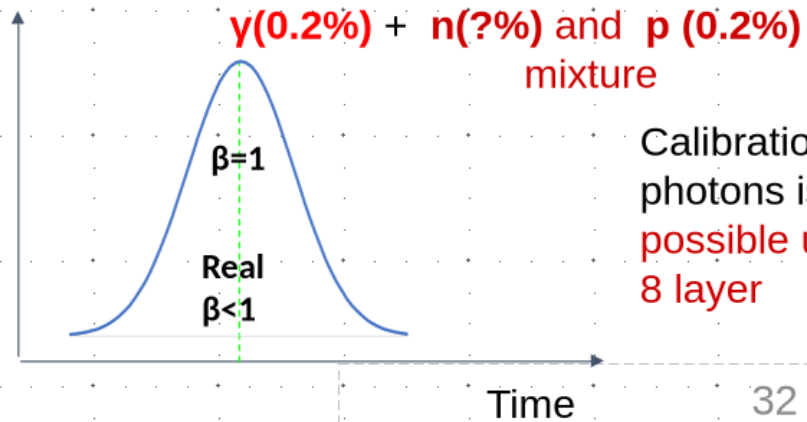
Real data



Calibration on neutrons



Calibration on photons

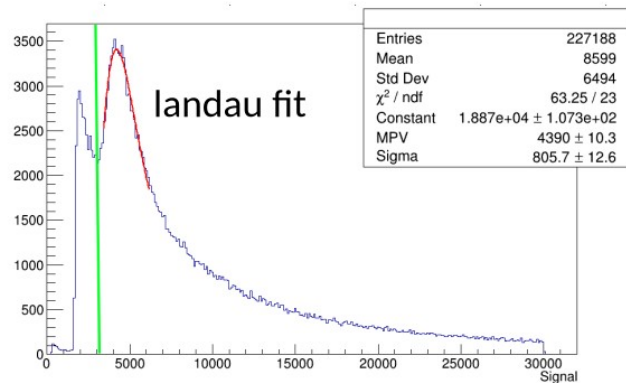


Calibration on photons is possible up to 8 layer

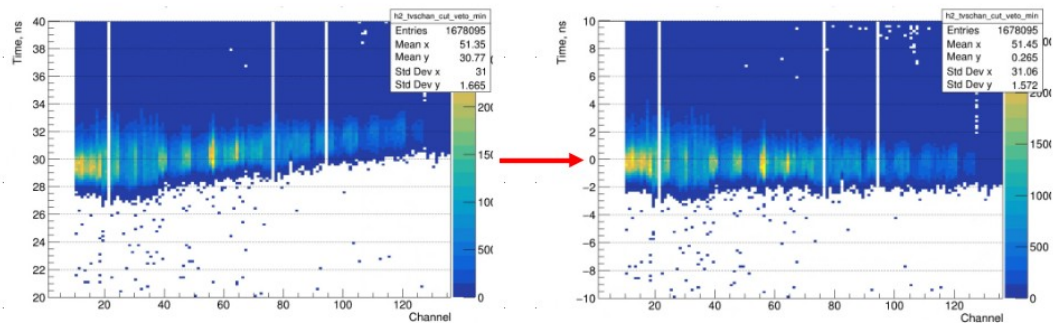
HGND calibration

1. Amplitude normalization

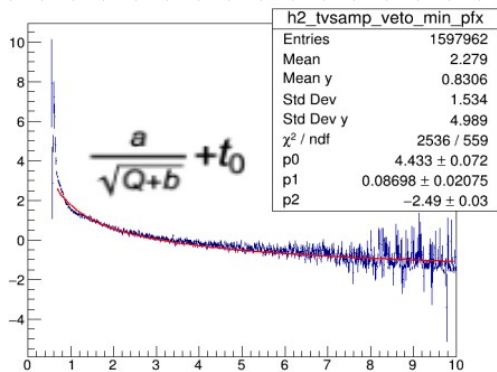
$$Ampl = Ampl \cdot \frac{1}{MPV}$$



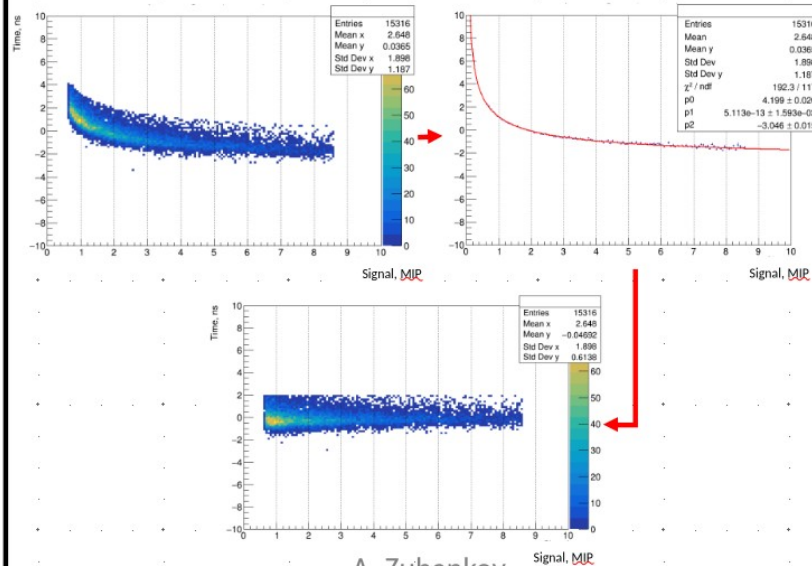
2. Time shift for all channels by the average fit value



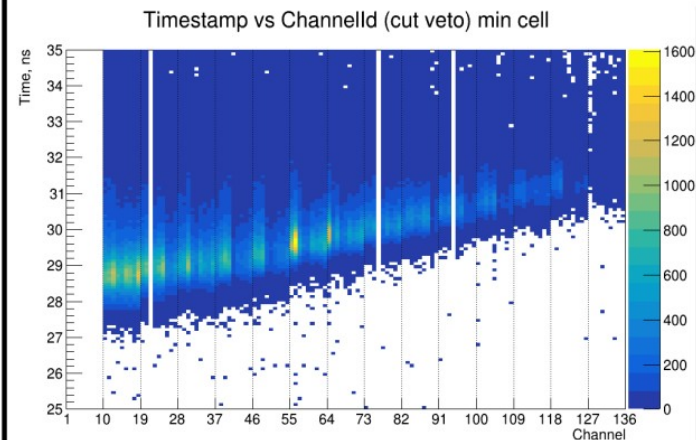
3. Determination of parameters of the approximating function for all channels & time limit



4. Time-amplitude correction



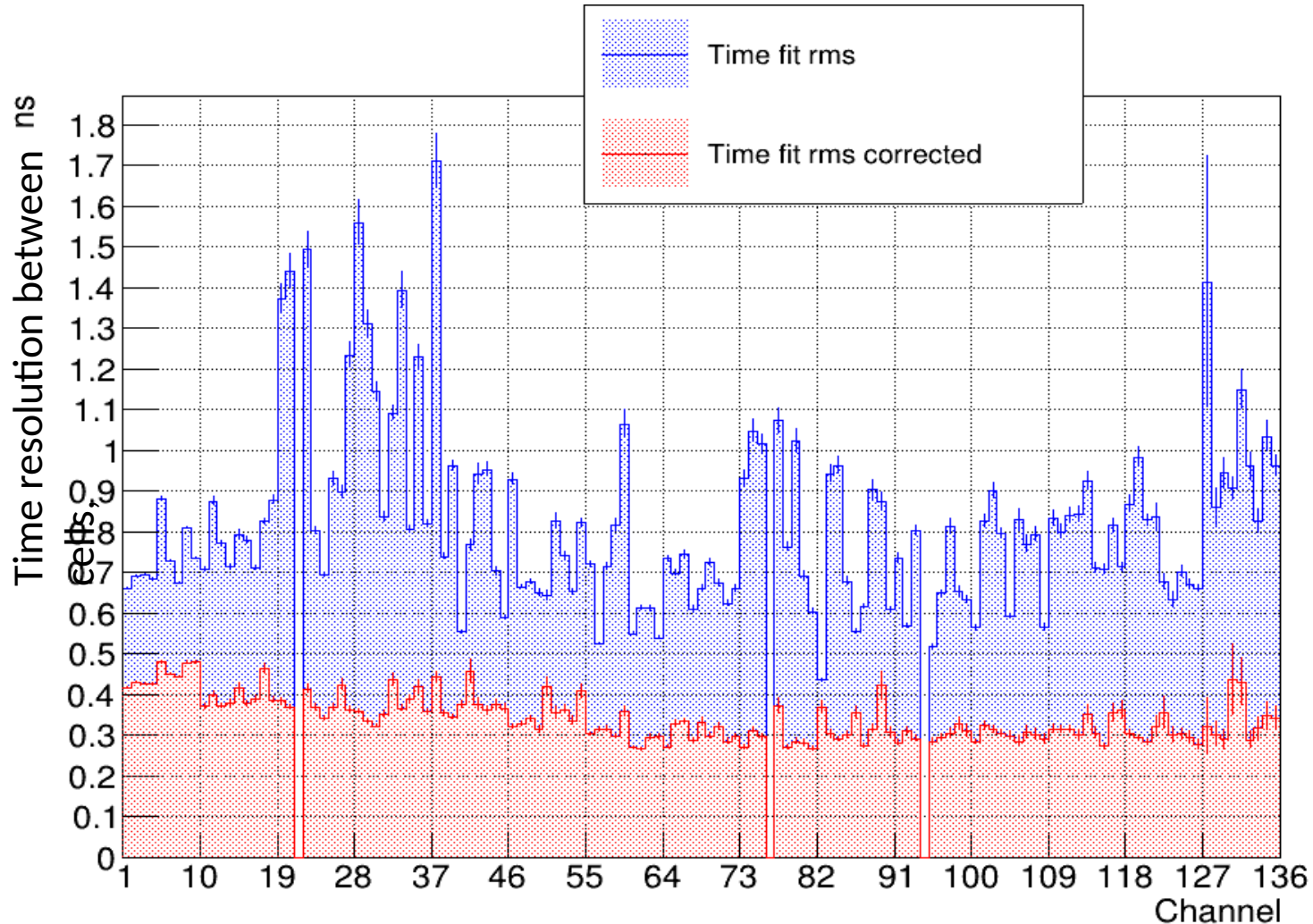
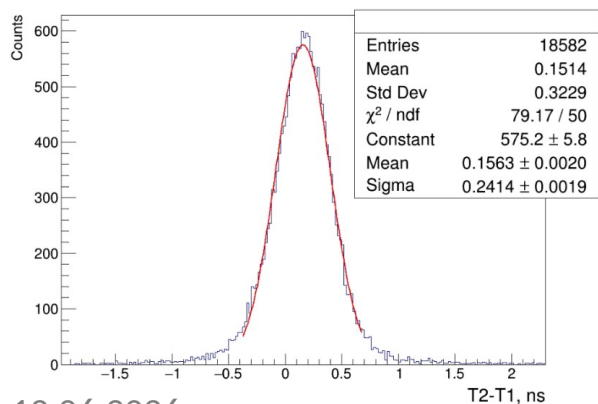
5. Time shift





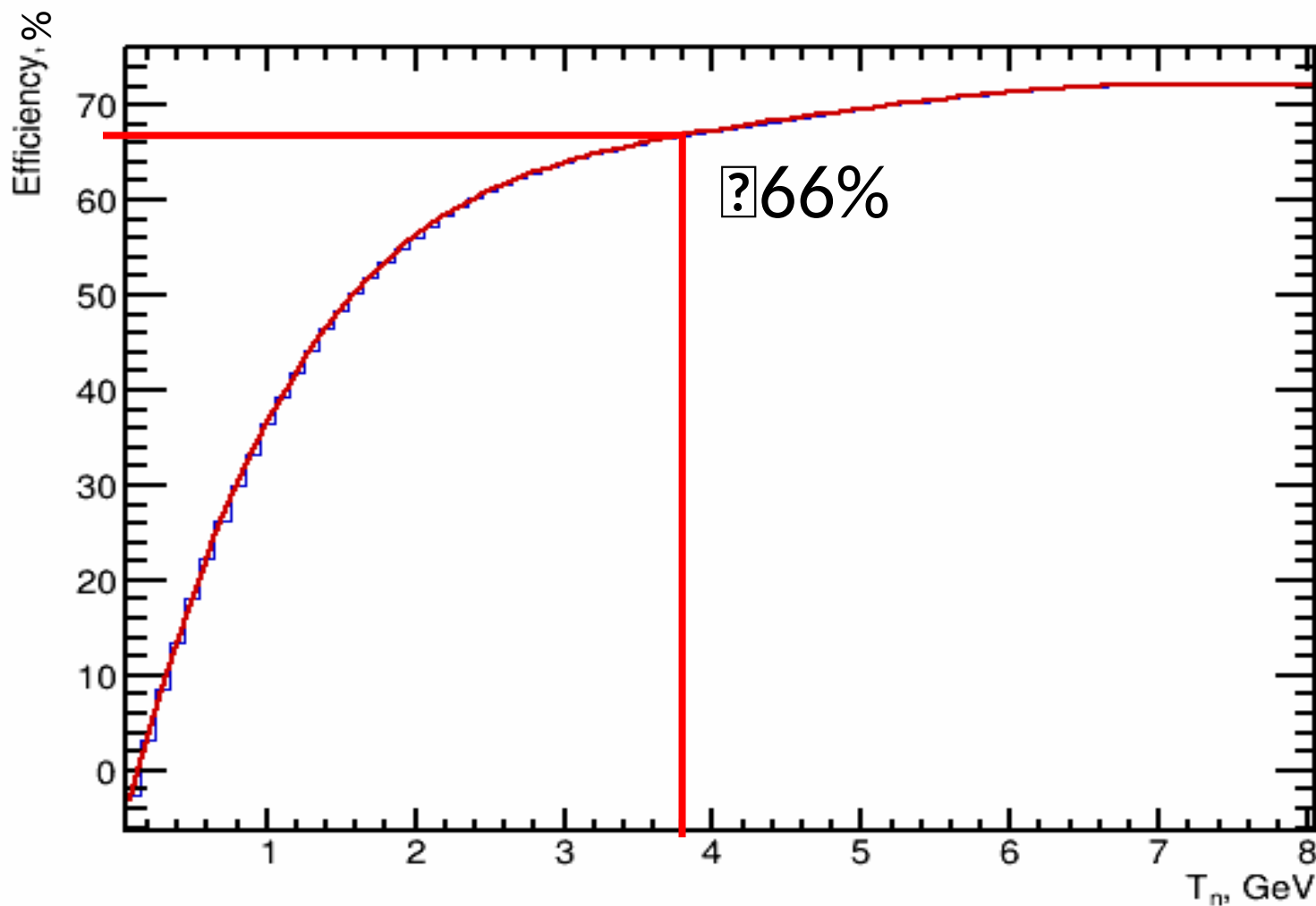
HGND calibration

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.





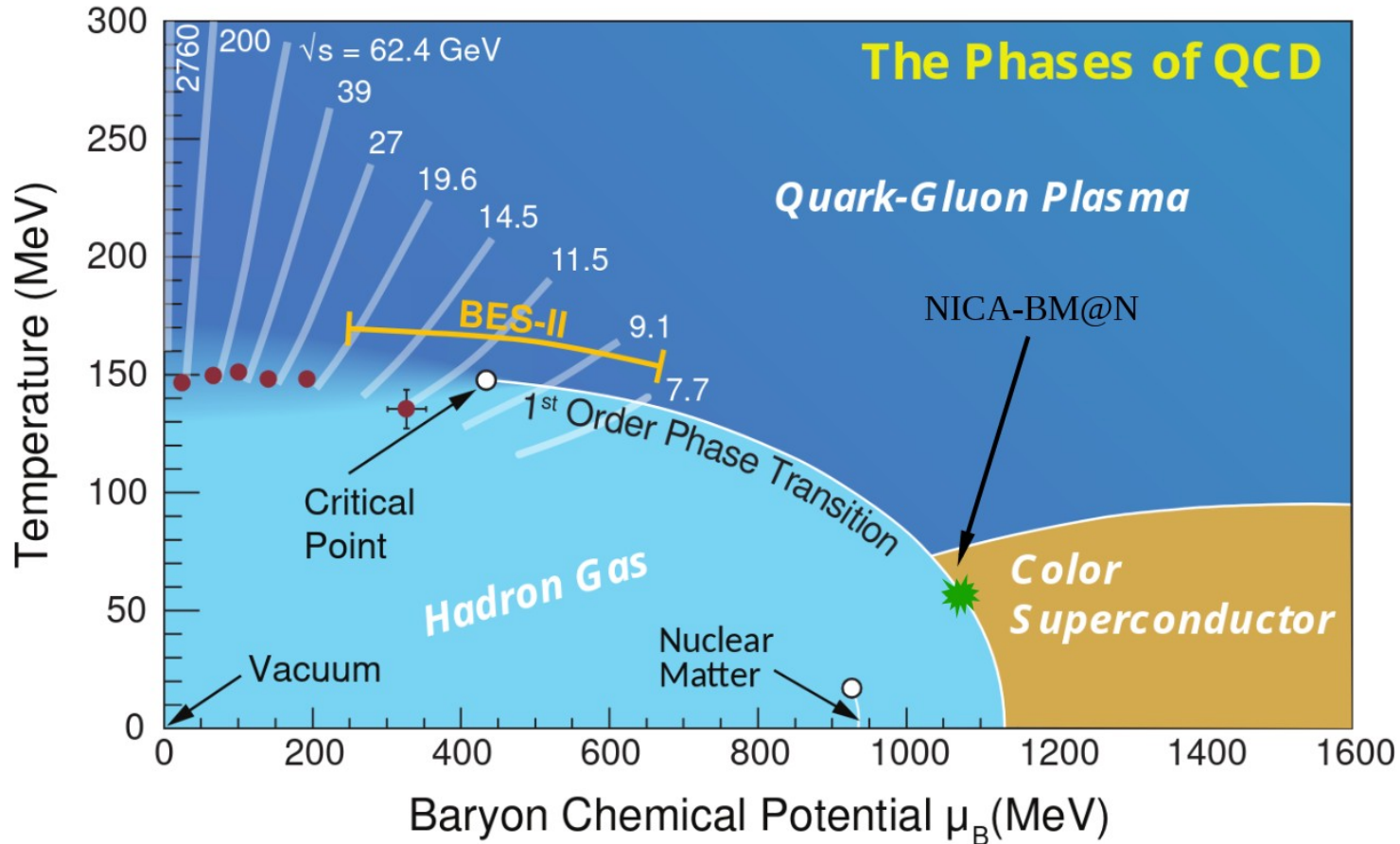
Efficiency of HGND prototype



Geant4 simulation:
Particle source, only
neutrons

- VETO-cut
- γ -cut
- ToF cut

Исследовательская программа BM@N

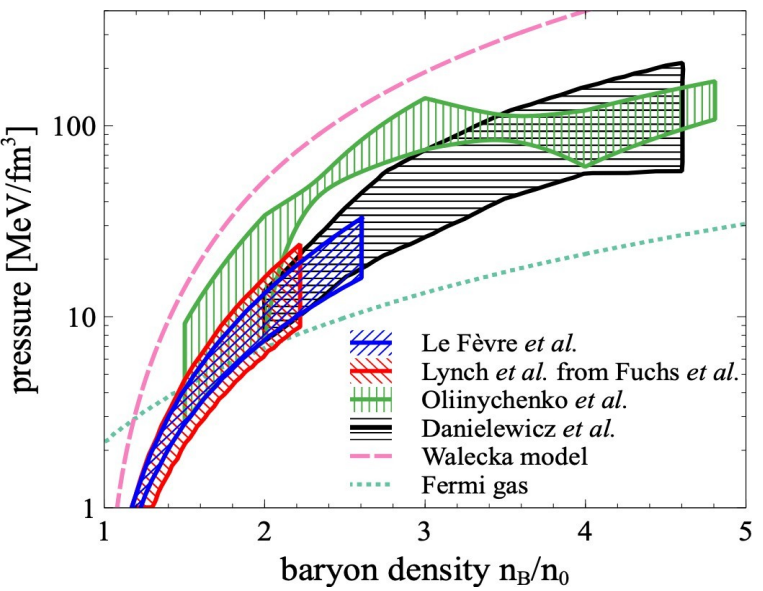


Исследовательская программа VM@N

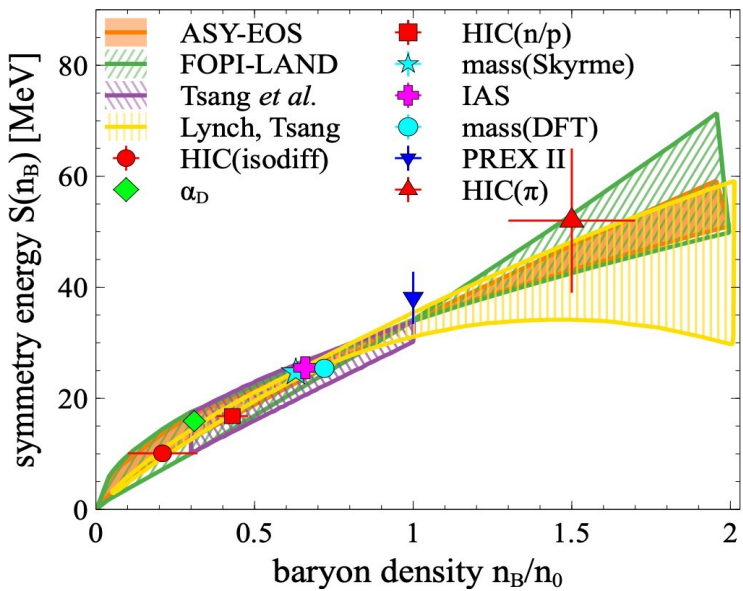
Энергия связи на нуклон: $E_A(\rho, \delta) = E_A(\rho, 0) + E_{sym}(\rho)\delta^2 + O(\delta^4)$

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

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.