

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

Представление  
на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук по специальности  
1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

*Методы анализа данных  
передних адронных калориметров  
ядро-ядерных экспериментов  
с фиксированной мишенью*

*Н. М. Карпушкин*

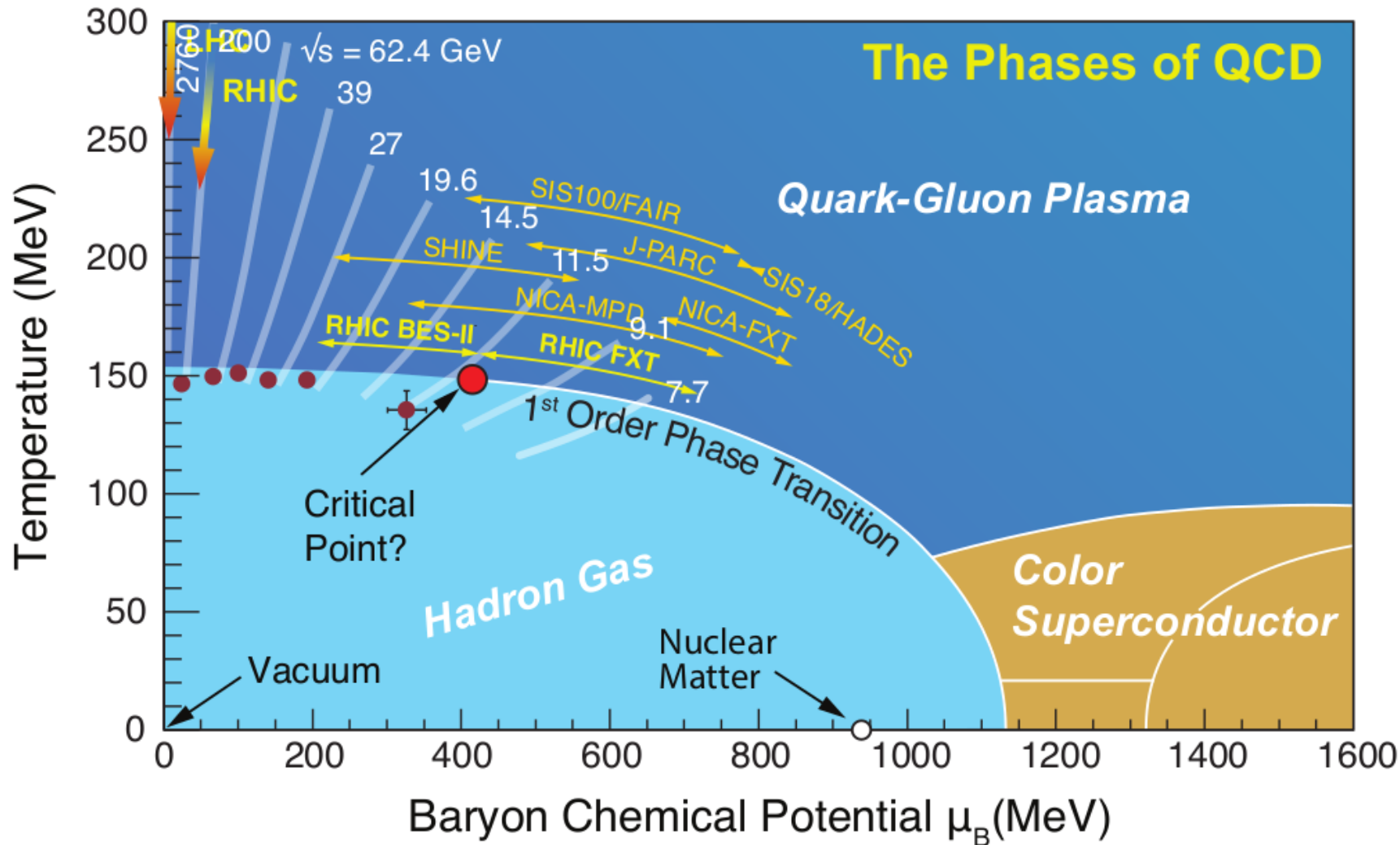
Научный руководитель: к.ф.-м.н. Ф.Ф.Губер

Москва, 2023

# Содержание доклада

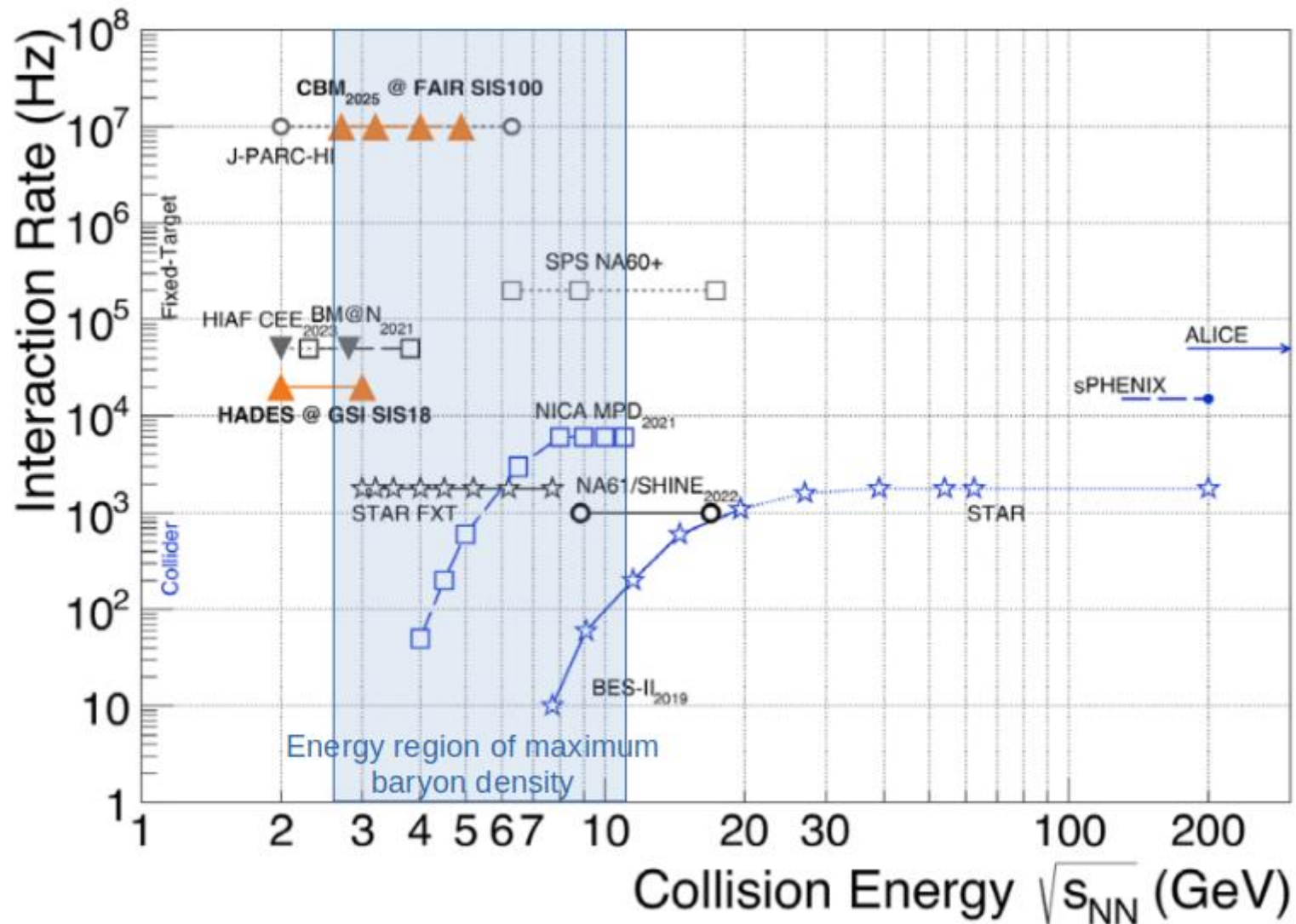
1. Введение
  - Сильновзаимодействующая ядерная материя: мотивация исследований и эксперименты по ее изучению
  - Передние адронные калориметры экспериментов NA61/SHINE, BM@N и CBM
2. Разработка методов цифровой обработки сигналов передних адронных калориметров
3. Разработка программного обеспечения для онлайн и офлайн обработки данных передних адронных калориметров экспериментов BM@N и CBM@FAIR
4. Калибровка секций адронного калориметра на космических мюонах
5. Методы, разработанные для определения центральности в экспериментах BM@N и CBM
6. Положения, выносимые на защиту
7. Список публикаций и докладов по материалам диссертации

# Сильновзаимодействующая ядерная материя: мотивация исследований



- Изучение явления деконфайнмента.
- Установление типа фазового перехода.
- Поиск критической точки фазовой диаграммы.
- Поиск восстановления киральной симметрии.
- Построение уравнения состояния материи.

# Сильновзаимодействующая ядерная материя: эксперименты по ее изучению



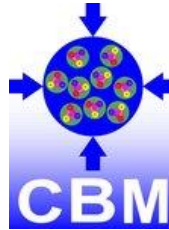
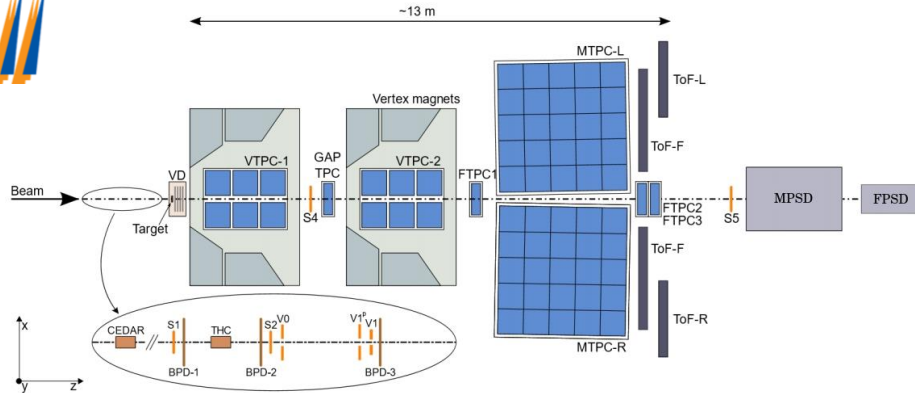
# Обзор экспериментов NA61/SHINE, BM@N и CBM@FAIR



NA61/SHINE @ SPS CERN

$\sqrt{s_{PbPb}} = 5.1 - 17.3$  АГэВ

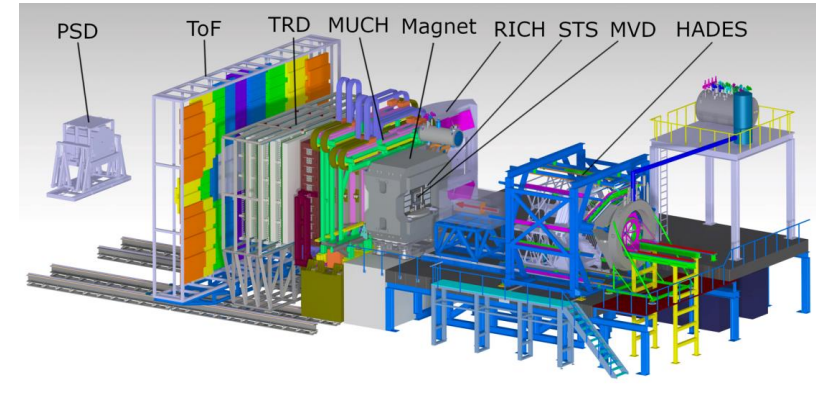
1 кГц частота взаимодействий



CBM @ FAIR

$\sqrt{s_{PbPb}} = 2.7 - 4.9$  АГэВ

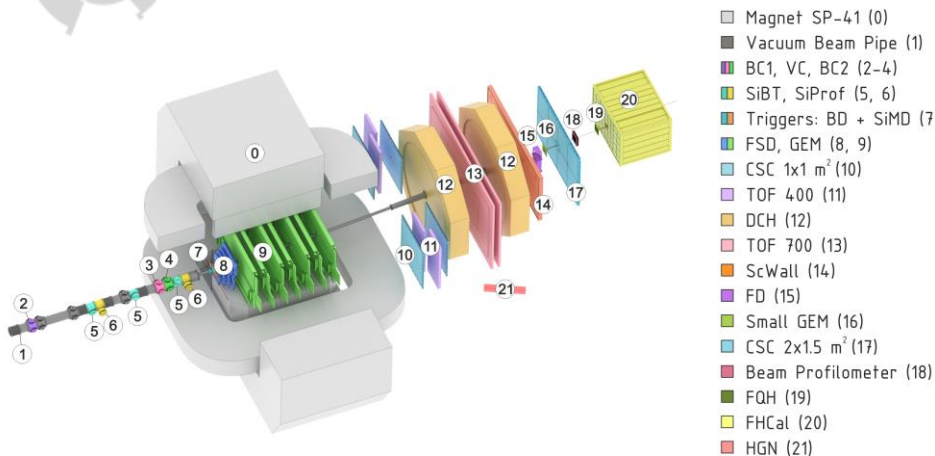
10 000 кГц частота взаимодействий



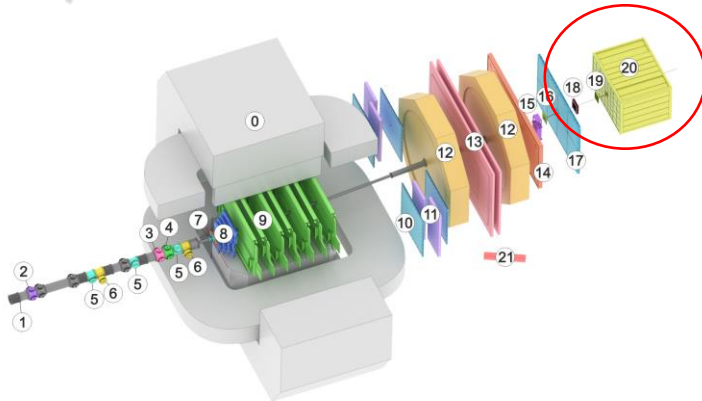
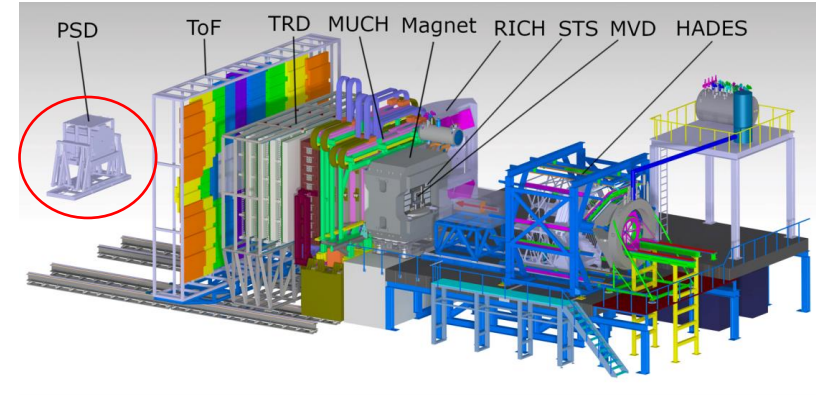
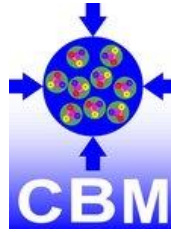
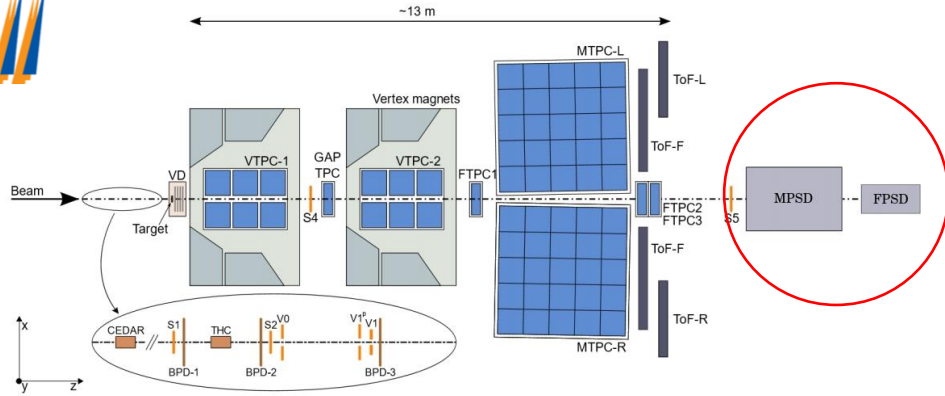
BM@N JINR Nuclotron

$\sqrt{s_{AuAu}} = 2.3 - 3.5$  АГэВ

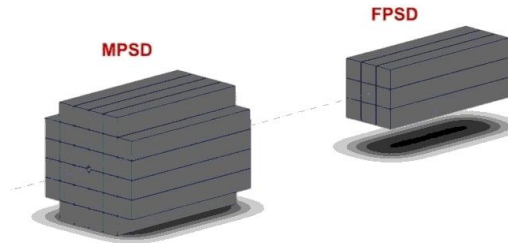
50 кГц частота взаимодействий



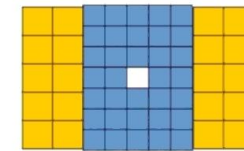
# Обзор экспериментов NA61/SHINE, BM@N и CBM@FAIR



- 0 Magnet SP-41 (0)
- 1 Vacuum Beam Pipe (1)
- 2 BC1, VC, BC2 (2-4)
- 3 SiBT, SiProf (5, 6)
- 4 Triggers: BD + SiMD (7)
- 5 FSD, GEM (8, 9)
- 6 CSC 1x1 m<sup>2</sup> (10)
- 7 TOF 400 (11)
- 8 DCH (12)
- 9 TOF 700 (13)
- 10 ScWall (14)
- 11 FD (15)
- 12 Small GEM (16)
- 13 CSC 2x1.5 m<sup>2</sup> (17)
- 14 Beam Profilometer (18)
- 15 FQH (19)
- 16 FHCat (20)
- 17 HGN (21)



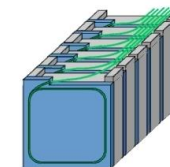
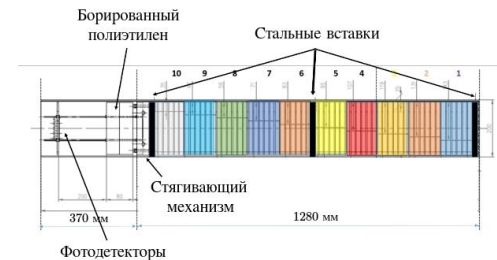
NA61/SHINE



BM@N



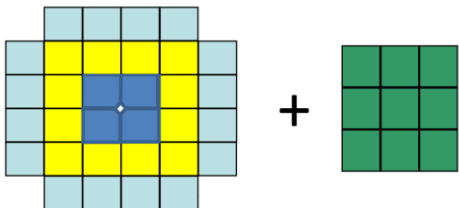
CBM@FAIR



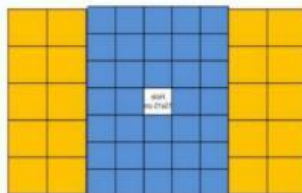
Структура  
калориметрического  
модуля

# Структура адронных калориметров

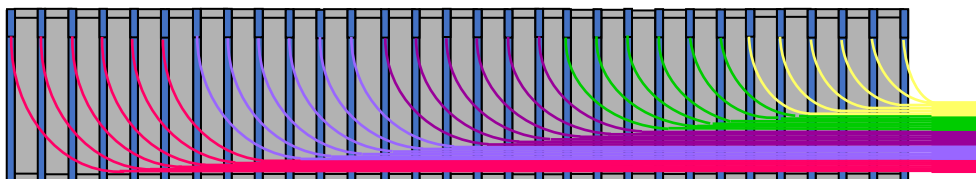
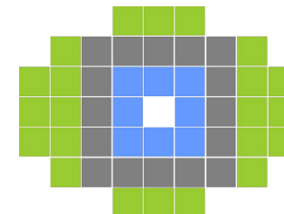
NA61/SHINE



BM@N

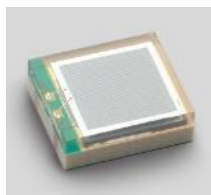
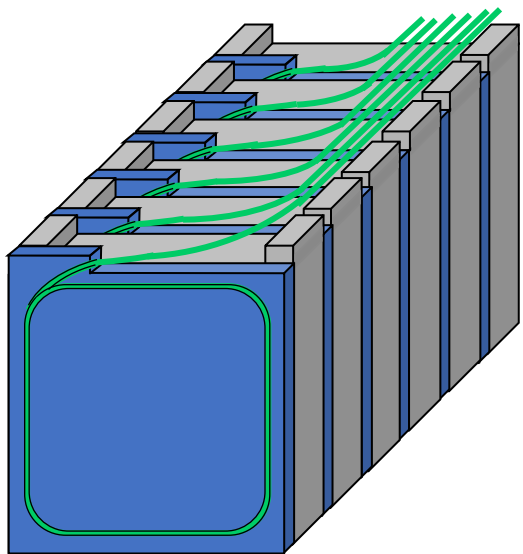


CBM@FAIR



SiPM + FEE

- чередующиеся слои свинец-сцинтиллятор
- e/h компенсация
- продольная сегментация на секции
- 6+1 оптоволокон/SiPM
- 7 или 10 SiPM/модуль
- 7 или 10 каналов считывания сигнала



Чувствительная зона 3x3мм<sup>2</sup>

Число пикселей 90 000

Номинальное усиление 1x10<sup>5</sup>

Время восстановления пикселя 10нс

Hamamatsu MPPC S12572-010P



# Методы цифровой обработки сигналов: постановка задачи

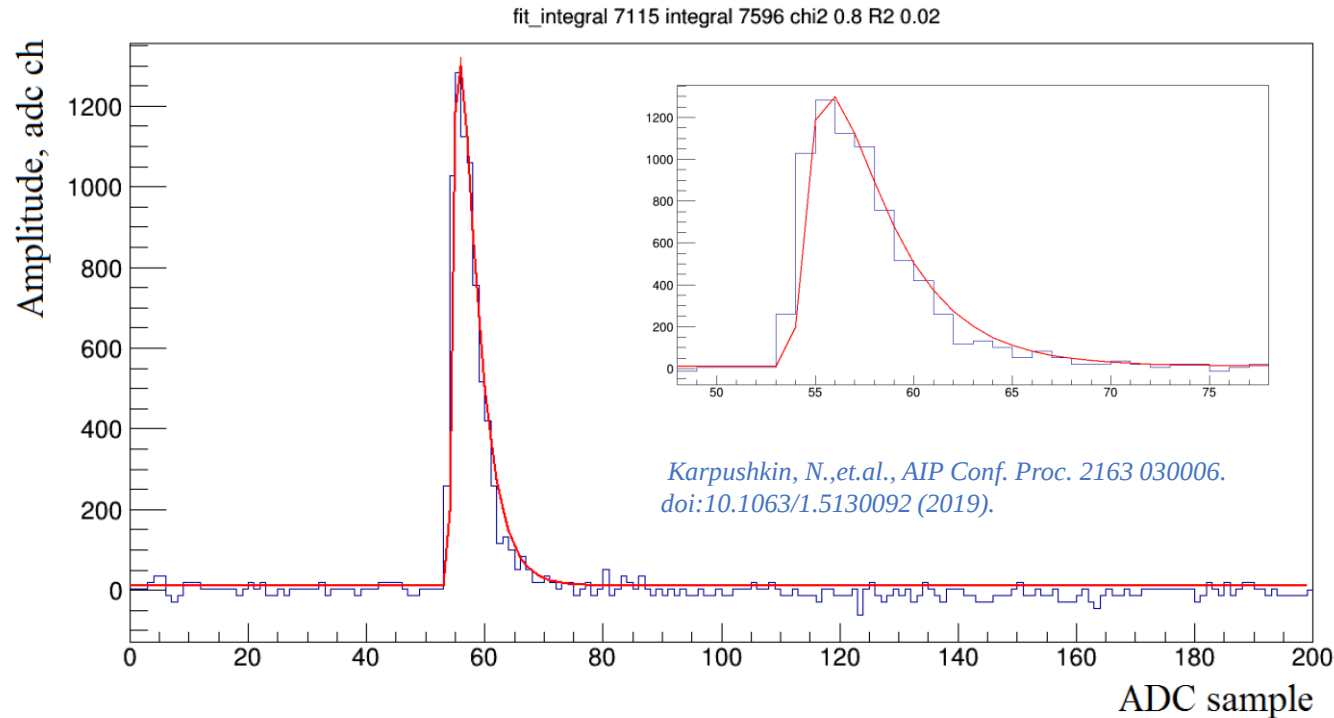
Динамический диапазон  
передних адронных калориметров широк:  
FNCal BM@N: 1-250 MIP  
PSD CBM: 1-500 MIP

Необходимо проводить калибровку адронных калориметров.  
В экспериментах BM@N и CBM единственный способ  
прокалибровать детектор – мюоны космического излучения,  
которые имеют малую амплитуду сигналов на уровне шума

Ввиду высокой частоты взаимодействий в эксперименте  
CBM, в адронном калориметре будет наблюдаться большая  
доля событий с наложением сигналов

Необходима разработка  
специальных методов цифровой  
обработки сигналов адронных  
калориметров

# Методы цифровой обработки сигналов: МНК Прони



## Преимущества метода ЦОС:

- Высокая скорость алгоритма, нетребователен к вычислительным ресурсам
- Возможность выявлять слабые сигналы вблизи уровня шума
- Эффективная идентификация шумов, помех электроники и наложений сигналов

Метод позволяет сопоставить набору эквидистантных зашумленных экспериментальных измерений амплитуды (осциллограмме) аналитическую модель из композиции экспоненциальных функций.

$$\hat{x}[n] = \sum_{k=1}^p A_k \exp[(\alpha_k + j2\pi f_k)(n-1)T + j\theta_k] = \sum_{k=1}^p h_k z_k^{n-1}$$

где  $j^2 = -1$ ,  $T$  — период дискретизации. Объекты оценивания: амплитуды экспонент  $A_k$ , коэффициенты затухания  $\alpha_k$ , гармонические частоты  $f_k$  и начальные фазы  $\theta_k$ .

# Методы цифровой обработки сигналов: МНК Прони

Критерий качества составленной аналитической модели – Коэффициент детерминации:

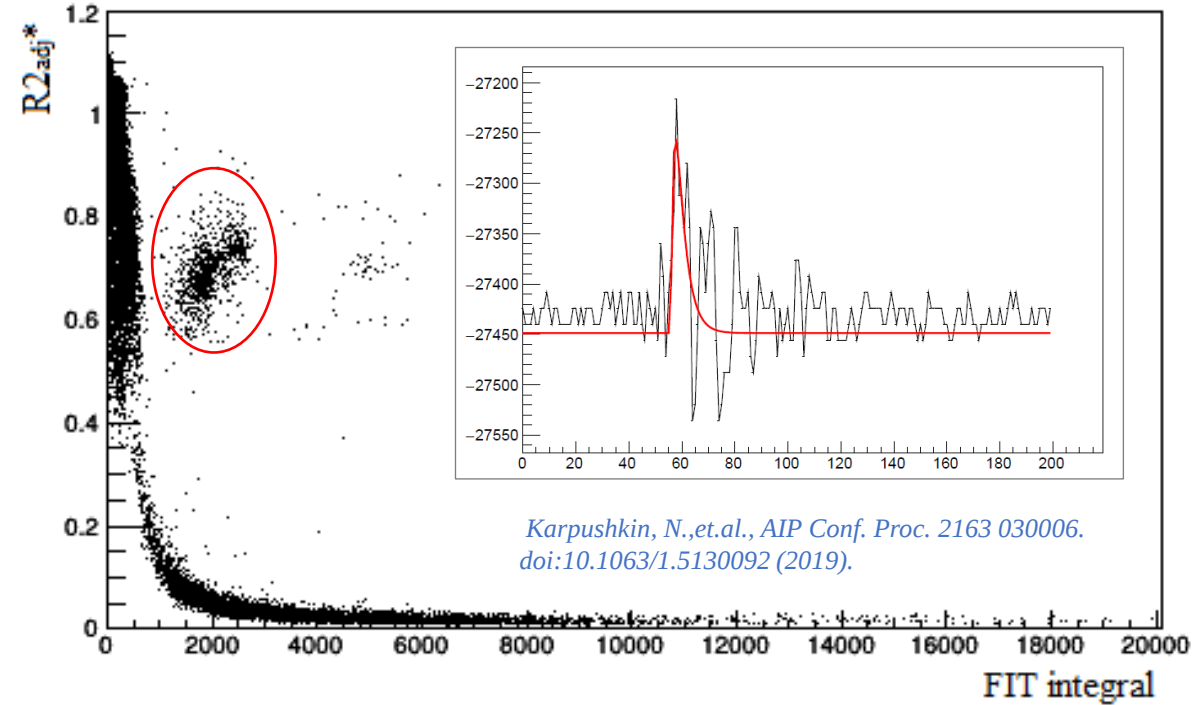
$$R^2 = \frac{\sum_{n=1}^N (x[n] - \hat{x}[n])^2}{\sum_{n=1}^N (x[n] - \bar{x})^2}$$

$x[n]$  и  $\hat{x}[n]$  – экспериментальные и модельные значения переменной, соответственно.  $\bar{x}$  среднее по экспериментальной выборке.

Скорректированный коэффициент детерминации:

$$R_{adj}^{2*} = R^2 \frac{N - 1}{N - \lambda}$$

$N$  – число измерений,  $\lambda$  – число параметров модели.

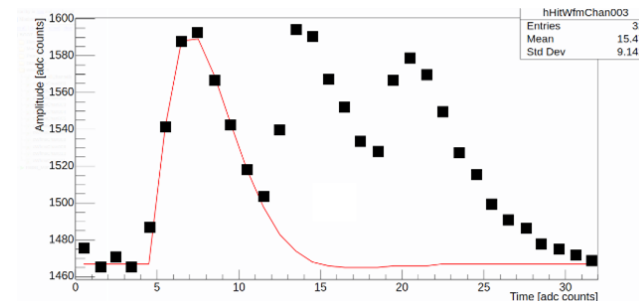


- Позволяет выявлять слабые сигналы вблизи уровня шума
- Осуществляет эффективную фильтрацию шумов, помех электроники и наложений сигналов

# Проблемы цифровой обработки сигналов в условиях высоких нагрузок

**Максимальная плановая частота** взаимодействий, при которой заявлено функционирование калориметра PSD в эксперименте CBM, составляет  $\nu = 1$  МГц.

Вероятность событий с наложением сигналов  $P = 1 - e^{-2\nu\tau} = 33\%$  событий при длительности сигналов  $\tau = 200$  нс.

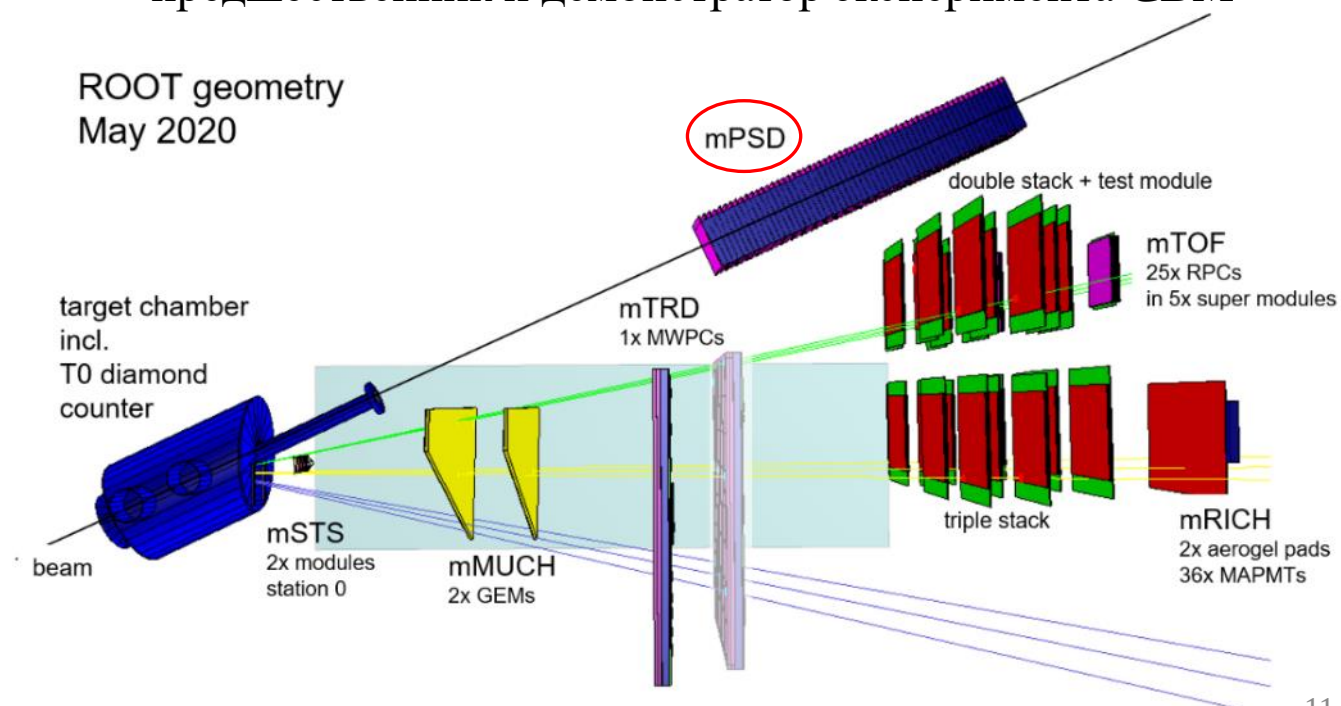


Прототип калориметра PSD@CBM – mPSD, оснащенный полной цепочкой считывающей электроники, был протестирован в экспериментальном сеансе mCBM@SIS18.

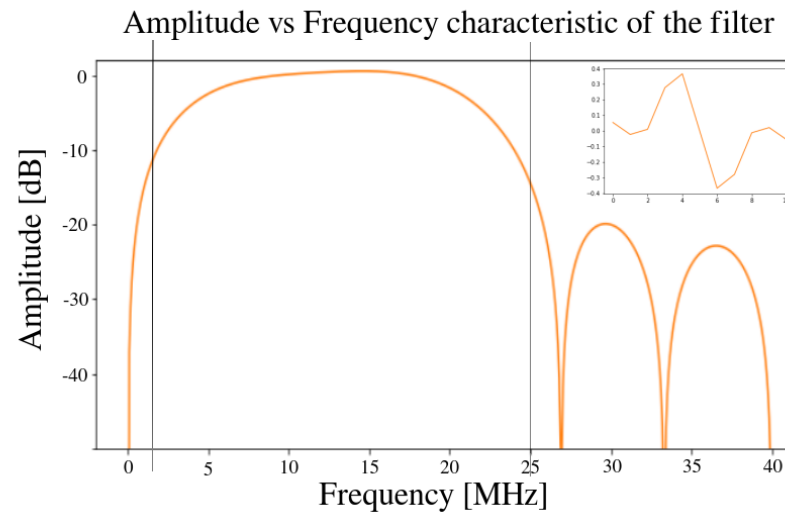
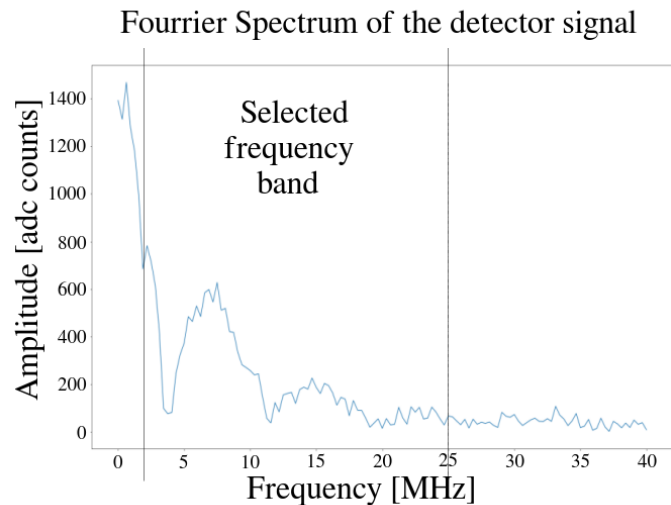
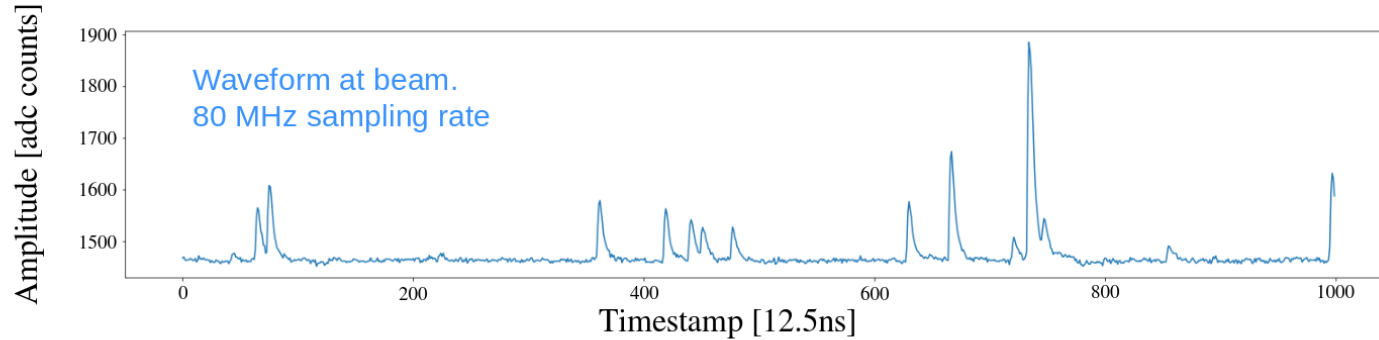
Отмеченные проблемы:

- Дрейф базовой линии
- Большая доля событий с наложением сигналов – пайлапов

Эксперимент mCBM@SIS18 (mini CBM) –  
предшественник и демонстратор эксперимента CBM

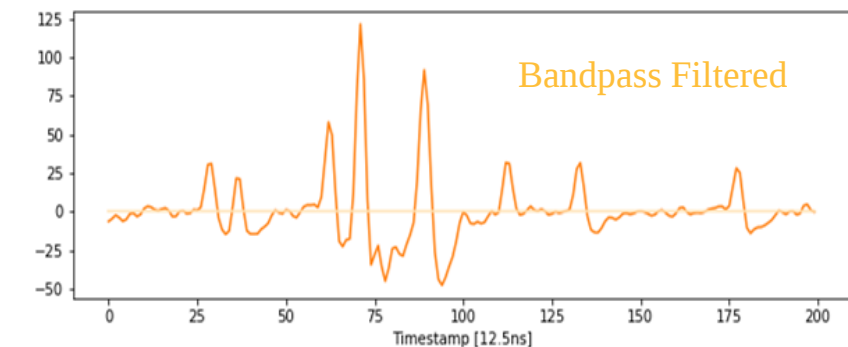
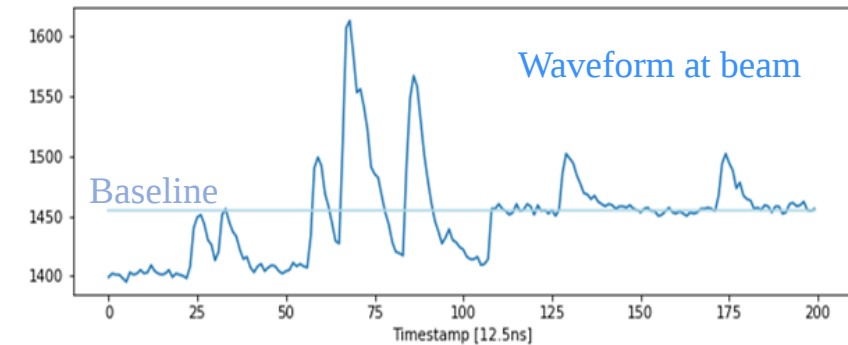


# Методы цифровой обработки сигналов: полосовой фильтр



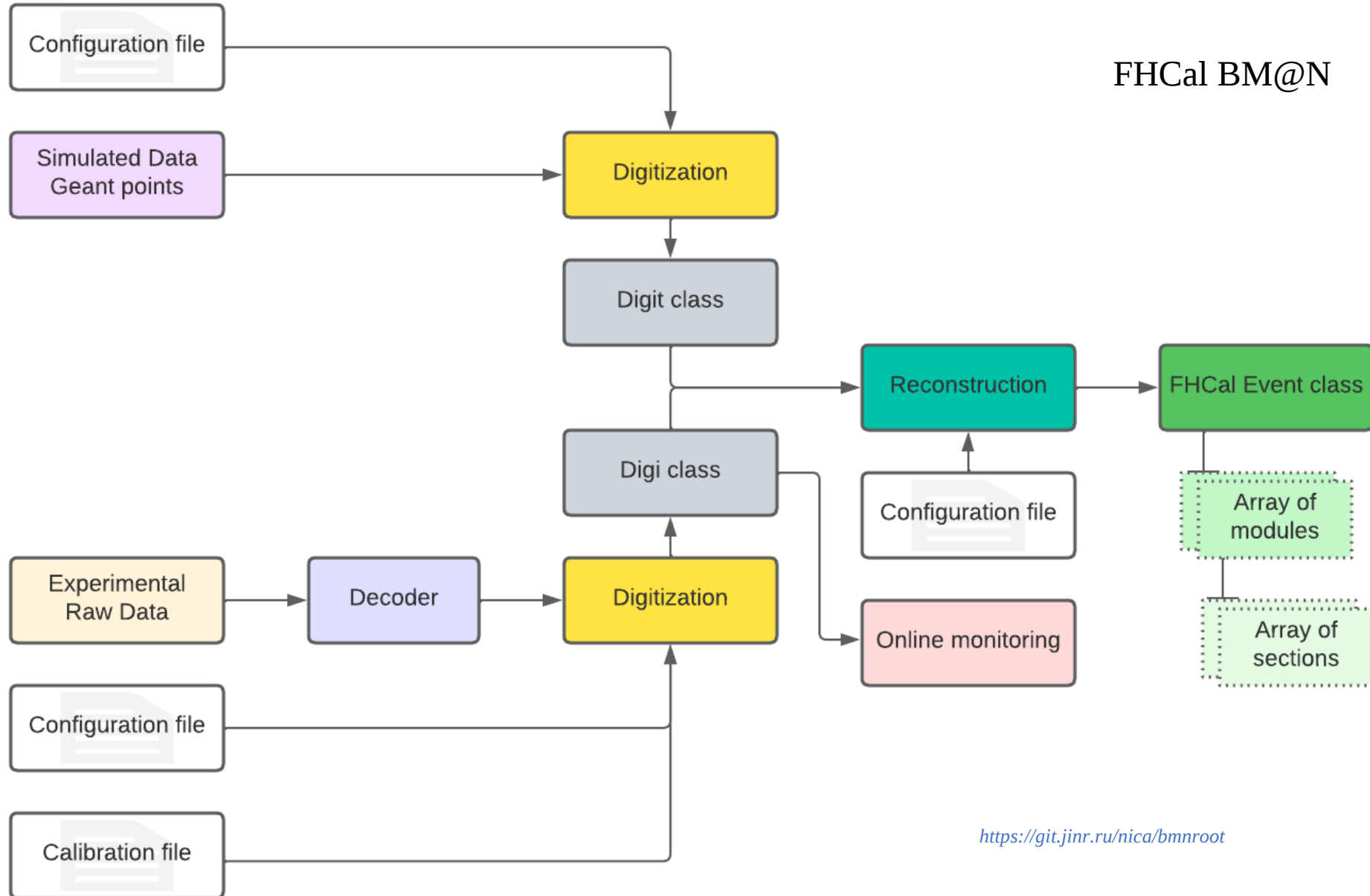
Фильтр позволяет:

- Укоротить импульсы
- Выставить в ноль базовую линию
- Избавиться от :
  - высокочастотного шума
  - низкочастотных флуктуаций



В результате применения полосового фильтра доля событий с наложением сигналов снизилась с 36% всех событий до 10% всех событий (при частоте взаимодействий  $\nu = 1$  МГц)

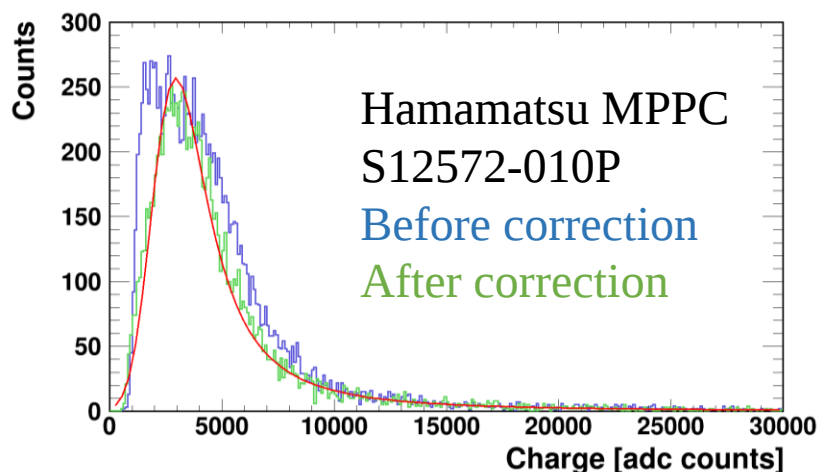
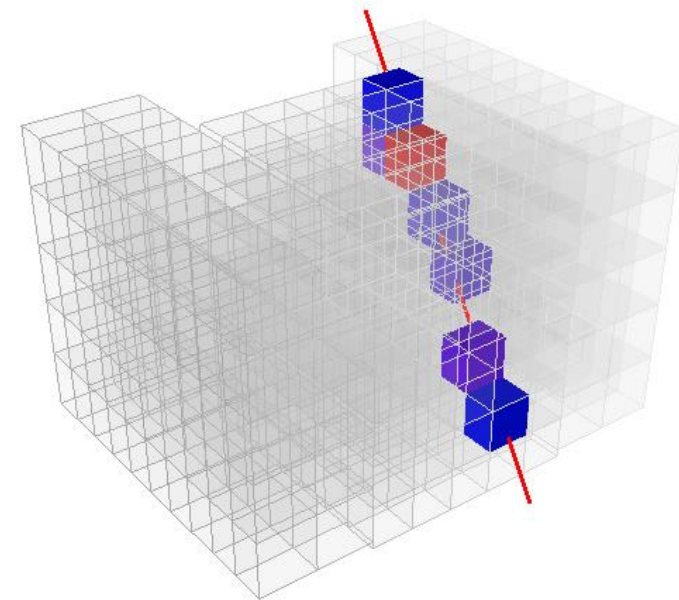
# Разработанное программное обеспечение для адронных калориметров



# Калибровка секций адронного калориметра на космических мюонах

- На ускорительных комплексах экспериментов BM@N и CBM невозможно организовать мюонный пучок
- Единственный способ калибровки – использование космических мюонов
- Энергии, теряемые мюонами в секциях адронного калориметра малы – вблизи уровня шума
- Необходимо построение надежного триггера
- Мюоны космического излучения могут пересекать секции калориметра под любыми углами – необходима амплитудная коррекция на толщину пройденного активного материала

*FHCal BM@N*



Этапы калибровки:

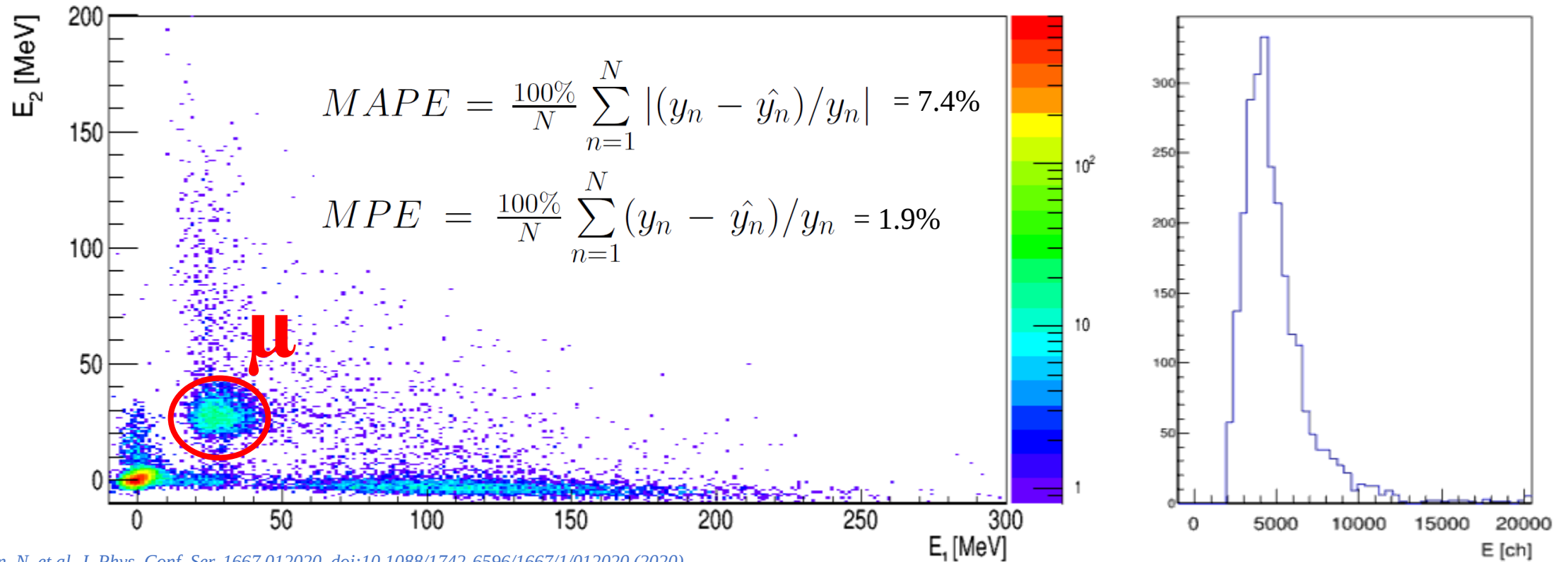
1. Фильтрация шумовых срабатываний по разработанному методу ЦОС
2. Восстановление трека космического мюона – МНК
3. Расчет точек пересечения треком сработавших секций
4. Коррекция на толщину пройденного материала

Morozov, S., ..., Karpushkin, N., et al. JINST 15, C05050. doi:10.1088/1748-0221/15/05/C05050 (2020).

Izvestnyy, A., ..., Karpushkin, N., et al. J. Phys. Conf. Ser. 1690 012060. doi:10.1088/1742-6596/1690/1/012060 (2020).

# Калибровка секций адронного калориметра: сравнение с пучковыми данными

Калибровка на вторичных пучках протонов и пионов тестового канала T9 PS в ЦЕРНе



*Karpushkin, N. et al. J. Phys. Conf. Ser. 1667 012020. doi:10.1088/1742-6596/1667/1/012020 (2020).*

Оценка статистической значимости отклонения по t-критерию Стьюдента:

- Выборка: 90 каналов считывания
- t-критерий = 0.8
- Критическое значение = 1.662 на большом уровне значимости  $p=0.1$

**Отличия** в значениях  
калибровочных параметров,  
взятых из космики и из  
пучковых данных  
**статистически незначимы**

# Методы определения центральности передними адронными калориметрами с пучковым отверстием

$$c(b) = \frac{\int_0^b \frac{d\sigma}{db'} db'}{\int_0^\infty \frac{d\sigma}{db'} db'} = \frac{1}{\sigma_{A-A}} \int_0^b \frac{d\sigma}{db'} db'.$$

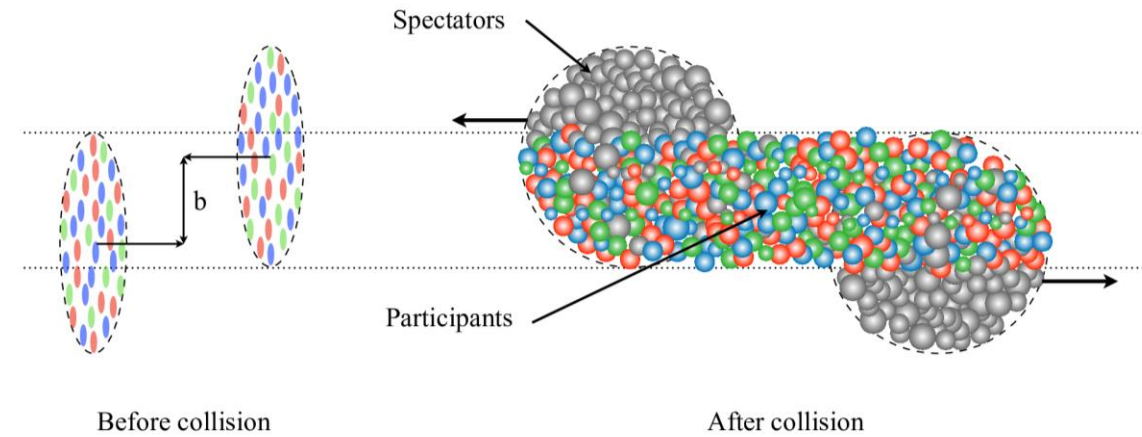


Иллюстрация: Центральность

# Методы определения центральности передними адронными калориметрами с пучковым отверстием

$$c(b) = \frac{\int_0^b \frac{d\sigma}{db'} db'}{\int_0^\infty \frac{d\sigma}{db'} db'} = \frac{1}{\sigma_{A-A}} \int_0^b \frac{d\sigma}{db'} db'.$$

Общие особенности:

- Модульная структура
- Наличие пучкового отверстия

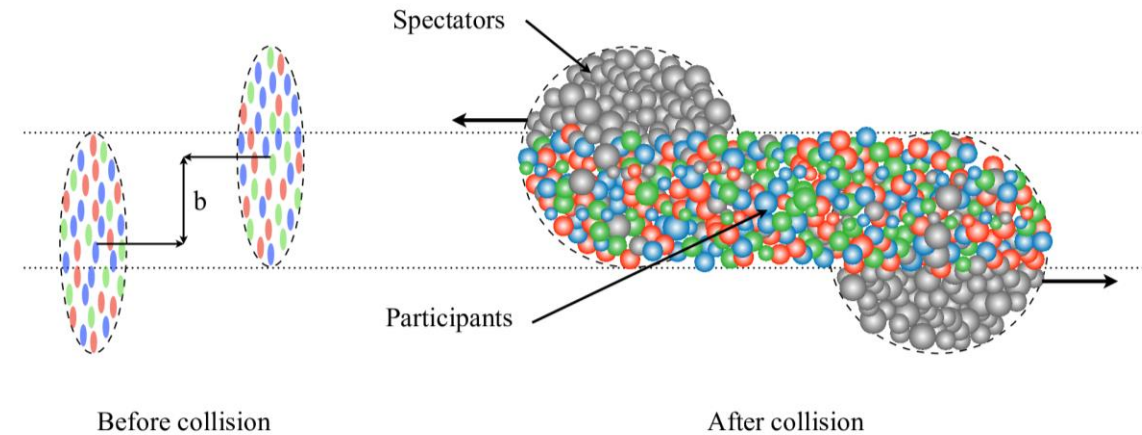
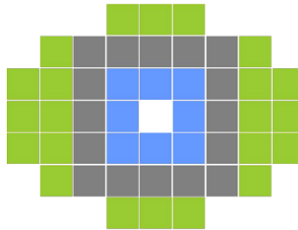
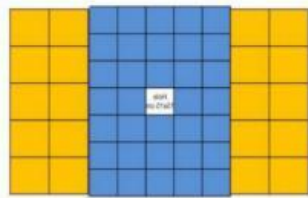
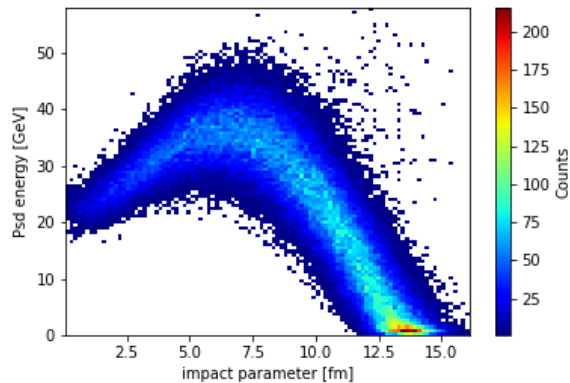
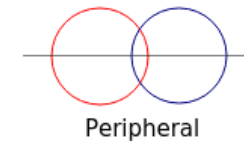
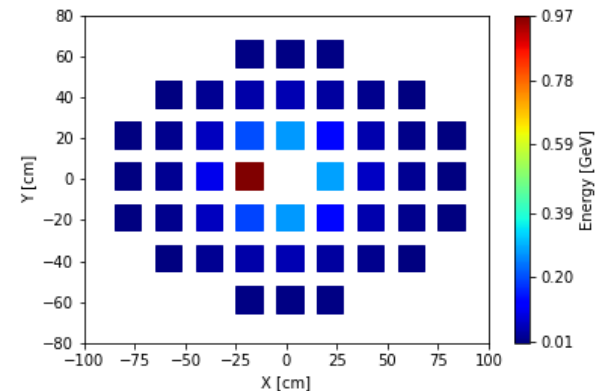
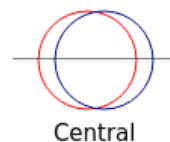
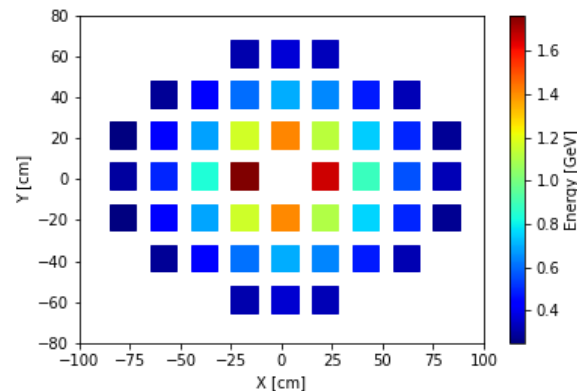


Иллюстрация: Центральность

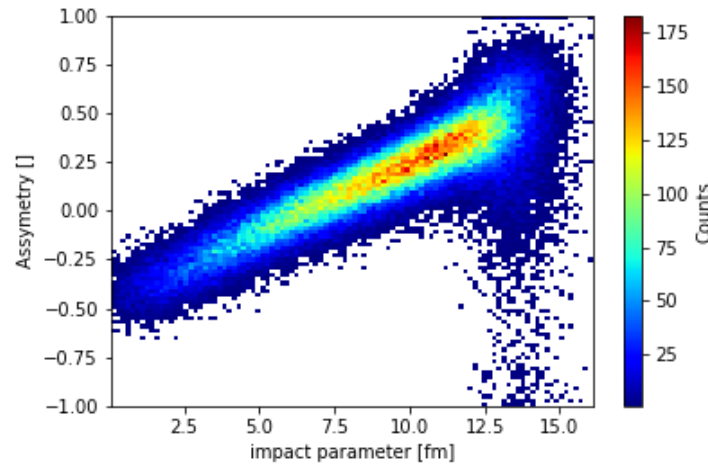
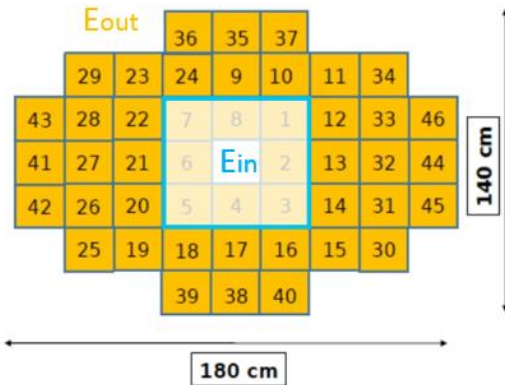


DCMQSM-SMM  
AuAu12A GeV/c  
100k events

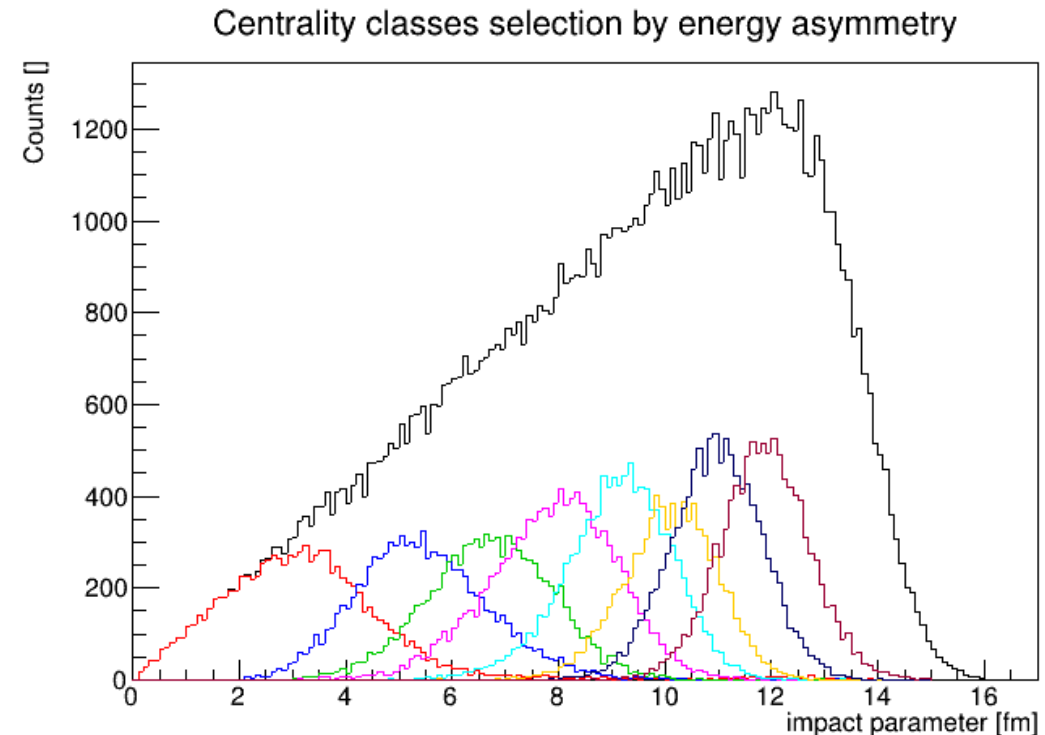
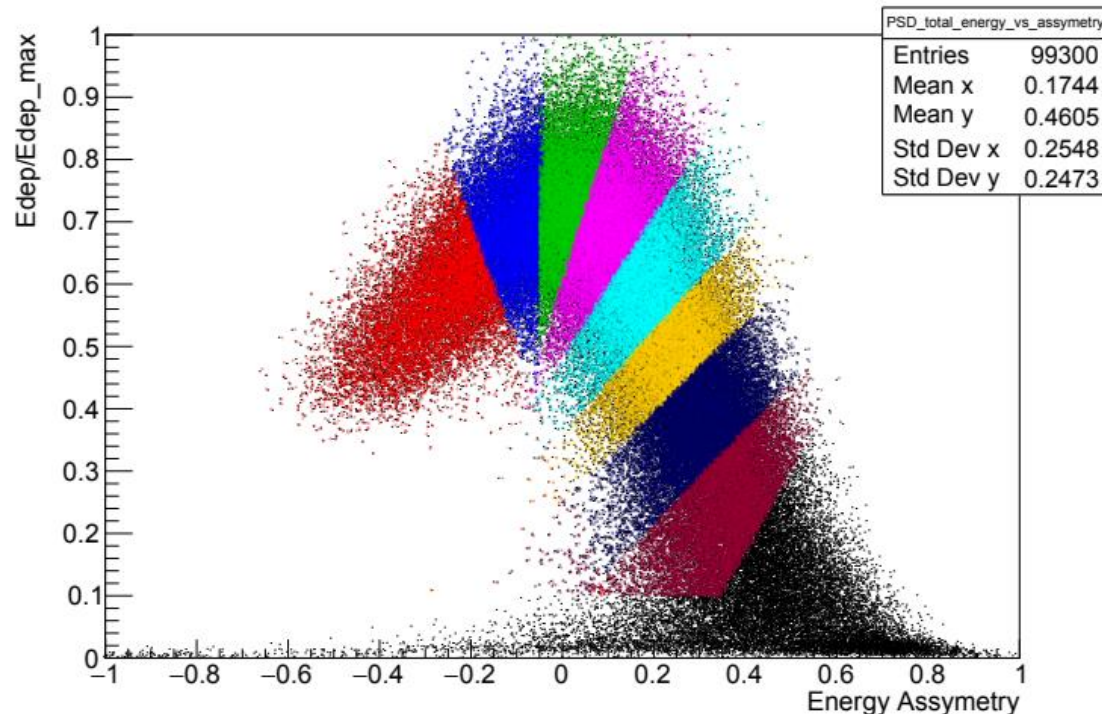


# Методы определения центральности передними адронными калориметрами с пучковым отверстием: асимметрия

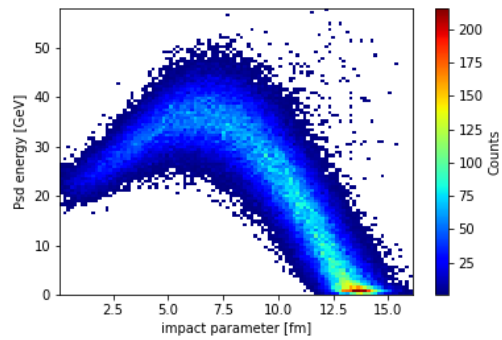
$$\text{Assymetry} = \frac{E_{in} - E_{out}}{E_{in} + E_{out}}$$



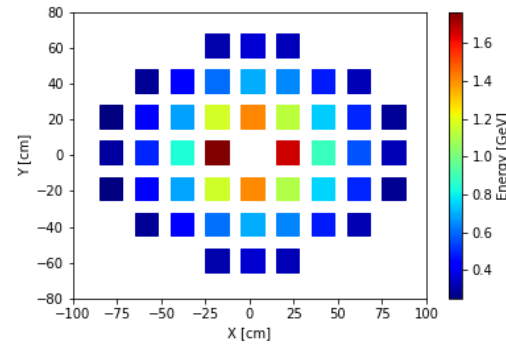
- Асимметрия выделенной энергии дает возможность учесть пространственное распределение энергии в адронном калориметре
- Асимметрия выделенной энергии линейно зависит от прицельного параметра вплоть до самых периферических столкновений



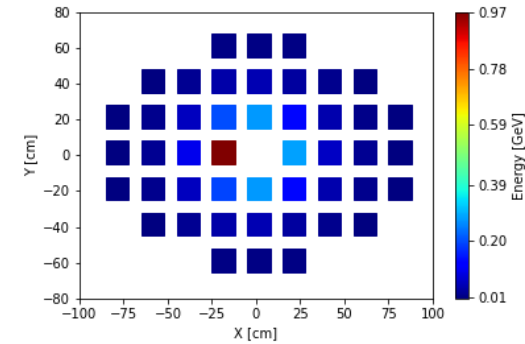
# Методы определения центральности передними адронными калориметрами с пучковым отверстием: ML



DCMQGSM-SMM  
AuAu12A GeV/c  
100k events

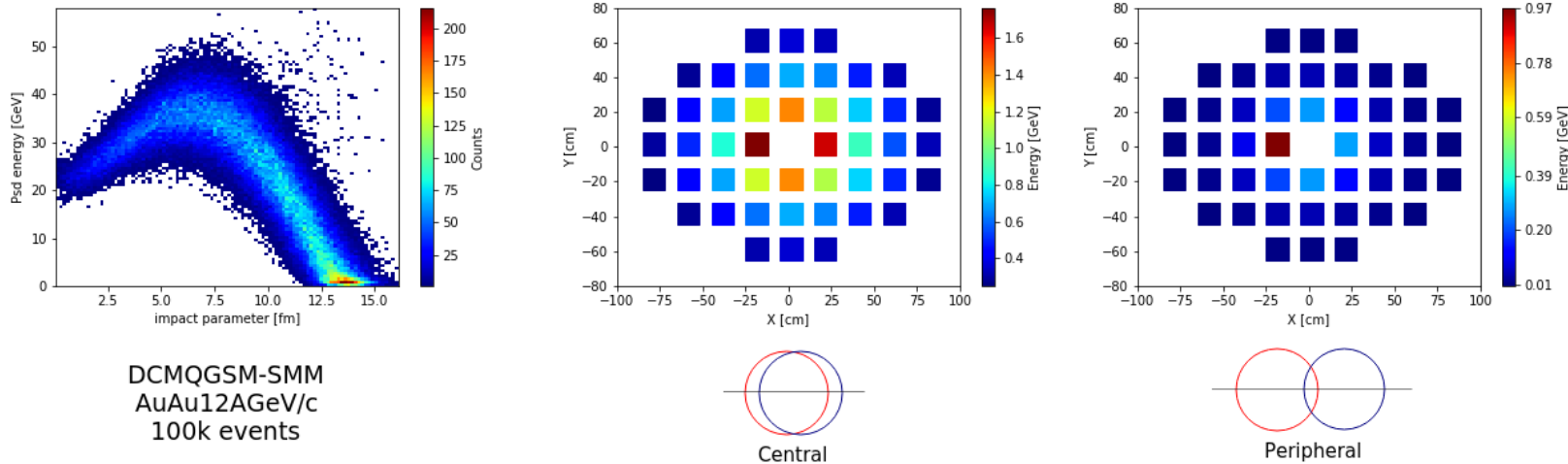


Central



Peripheral

# Методы определения центральности передними адронными калориметрами с пучковым отверстием: ML



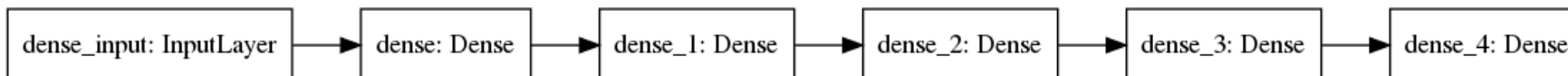
## Машинное обучение с учителем.

1. Разделение имеющихся данных на обучающую и тестовую выборки
2. Обучение модели на обучающей выборке:

Входные данные:

1. 1D массив энергоснабжений в модулях адронного калориметра (Энергетическая поверхность)
2. Целевой индекс класса центральности

Архитектура модели – плотные (полносвязные) слои нейронной сети:



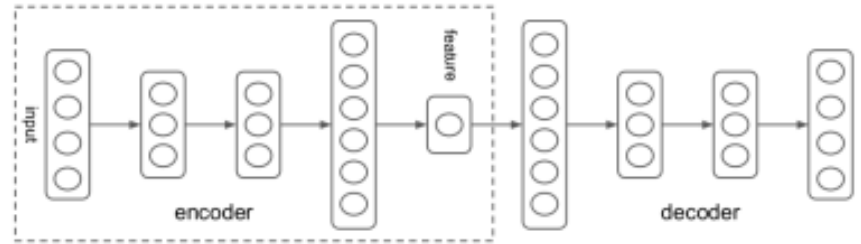
3. Проверка точности модели на неиспользованной тестовой выборке

*Karpushkin, N. et al. J. Phys. Conf. Ser. 1690 012121.  
doi:10.1088/1742-6596/1690/1/012121 (2020).*

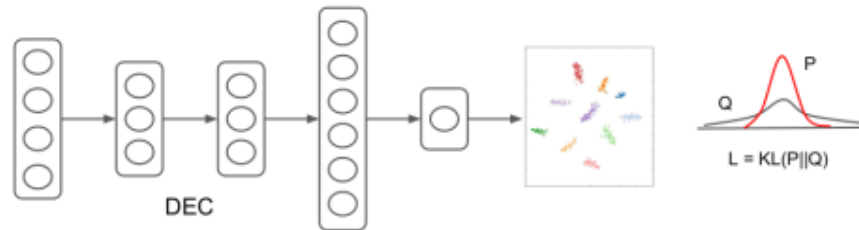
# Методы определения центральности передними адронными калориметрами с пучковым отверстием: ML

*Машинное обучение без учителя -- кластеризация.*

1. Обучение автокодировщика



2. Оценка центроид будущих кластеров: Encode data + Kmeans

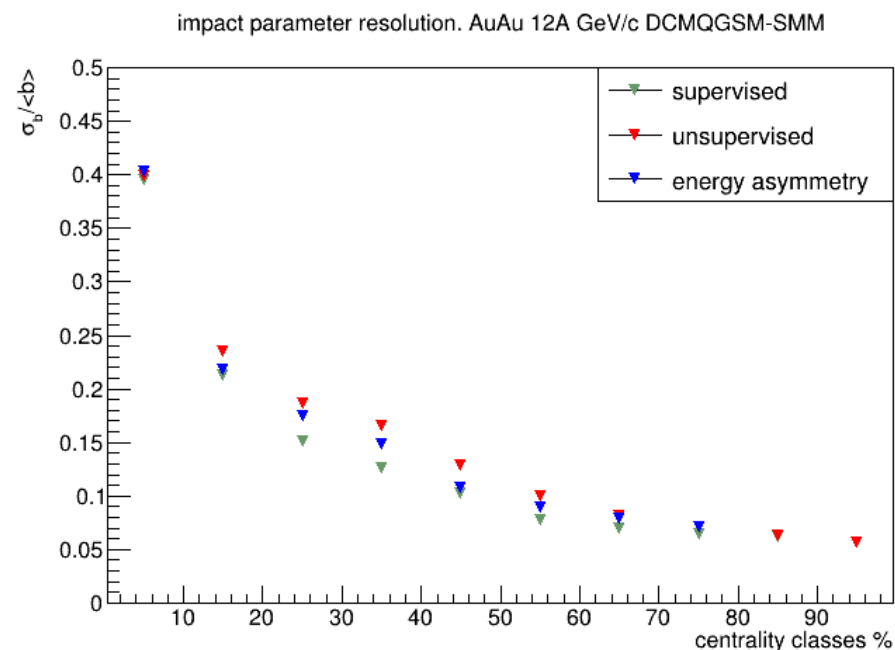
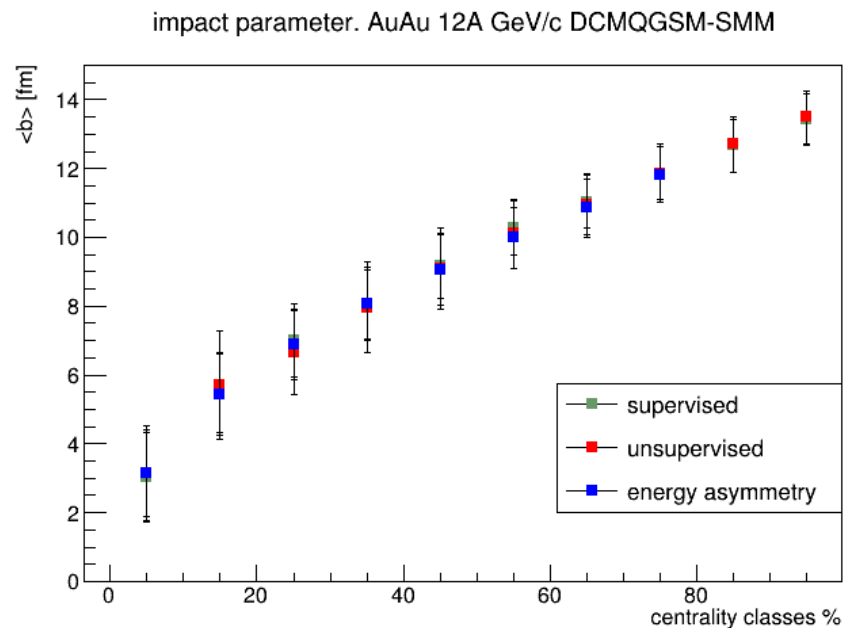
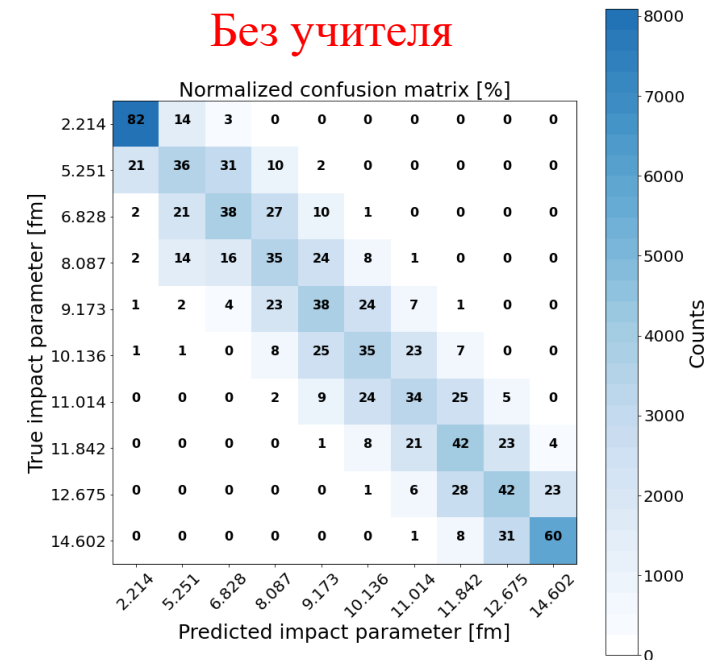
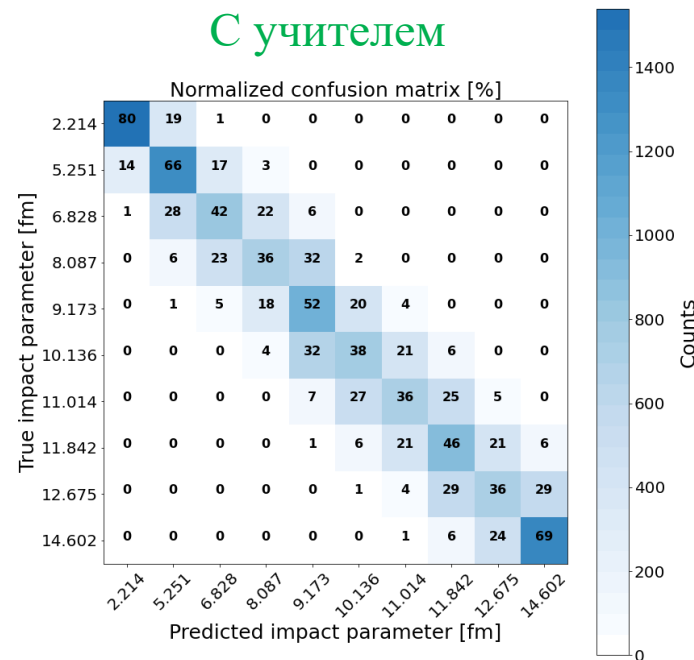


3. Deep Embedded Clustering

Xie, J., Girshick, R. B. & Farhadi, A CoRR abs/1511.06335. arXiv: 1511.06335.  
<http://arxiv.org/abs/1511.06335> (2015)

# Методы определения центральности передними адронными калориметрами с пучковым отверстием

**PSD CBM@FAIR**  
**AuAu12AGeV/c**  
**DCMQGSM-SMM**  
100k events



# Положения, выносимые на защиту

1. Разработан и впервые применен к сигналам передних адронных калориметров экспериментов BM@N и CBM@FAIR метод цифровой обработки сигналов на основе метода наименьших квадратов Прони. Разработан критерий оценки качества обработки сигналов, обеспечивающий надежную фильтрацию электронных шумов и помех электроники.
2. Разработано программное обеспечение для чтения и записи данных передних адронных калориметров экспериментов BM@N и CBM@FAIR. Программное обеспечение предназначено для преобразования записанных данных в формат данных эксперимента и для организации к ним доступа с целью последующего анализа. Разработано программное обеспечение для отслеживания в реальном времени качества данных передних адронных калориметров экспериментов BM@N и CBM@FAIR в физических сеансах.
3. Разработан метод выравнивания откликов секций передних адронных калориметров путем восстановления треков космических мюонов в материале детектора. Метод особенно актуален для передних адронных калориметров экспериментов BM@N и CBM@FAIR из-за отсутствия вторичных мюонных пучков на их ускорительных комплексах.
4. Разработан метод цифровой обработки сигналов переднего адронного калориметра эксперимента CBM на основе полосового фильтра, позволяющий существенно сократить долю событий с наложениями сигналов.
5. Разработаны методы определения центральности передними адронными калориметрами с пучковым отверстием для экспериментов BM@N и CBM@FAIR. В методах используется пространственное распределение выделенной энергии в детекторе: разработаны методы на основе средств машинного обучения и метод на основе расчета асимметрии выделенной энергии в калориметре.

## Публикации

1. Karpushkin, N., Guber, F. & Ivashkin, A. Application of the Prony least squares method for fitting signal waveforms measured by sampling ADC. AIP Conf. Proc. 2163 030006. doi:10.1063/1.5130092 (2019).
2. Finogeev, D., ..., Karpushkin, N., et al. Commissioning of the readout chain of the CBM Projectile Spectator Detector at FAIR. JINST 17, T11006. doi:10.1088/1748-0221/17/11/T11006 (2022).
3. Izvestnyy, A., ..., Karpushkin, N., et al. Calibration of FHCAL with cosmic muons at the BM@N experiment. J. Phys. Conf. Ser. 1690 012060. doi:10.1088/1742-6596/1690/1/012060 (2020).
4. Karpushkin, N. et al. ML Approaches for Centrality Determination with Forward Hadron Calorimeters in Heavy Ion Reactions. Phys. Part. Nucl. 53, 524–530. doi:10.1134/S1063779622020381 (2022).
5. Guber, F., ..., Karpushkin, N., et al. Study of the Spectator Matter in Heavy Ion Collisions at the BM@N Experiment. Phys. Part. Nucl. 53, 626–630. doi:10.1134/S1063779622020332 (2022).
6. Guber, F., ..., Karpushkin, N., et al. Measurements of Centrality in Nucleus–Nucleus Collisions at the BM@N Experiment. Phys. Part. Nucl. 52, 571–577. doi:10.1134/S1063779621040262 (2021).
7. Karpushkin, N. et al. Application of Machine Learning methods for centrality determination in heavy ion reactions at the BM@N and MPD@NICA. J. Phys. Conf. Ser. 1690 012121. doi:10.1088/1742-6596/1690/1/012121 (2020).
8. Morozov, S., ..., Karpushkin, N., et al. Methods for centrality determination in nucleus-nucleus collisions with forward hadron calorimeters at the BM@N experiment. JINST 15, C09028. doi:10.1088/1748-0221/15/09/C09028 (2020).
9. Finogeev, D., ..., Karpushkin, N., et al. The readout system of the CBM Projectile Spectator Detector at FAIR. JINST 15, C09015. doi:10.1088/1748-0221/15/09/C09015 (2020).
10. Morozov, S., ..., Karpushkin, N., et al. Methods of signal processing and cosmic muon calibration for the BM@N sampling lead/scintillator hadron calorimeter. JINST 15, C05050. doi:10.1088/1748-0221/15/05/C05050 (2020).

## Доклады на м/н конференциях

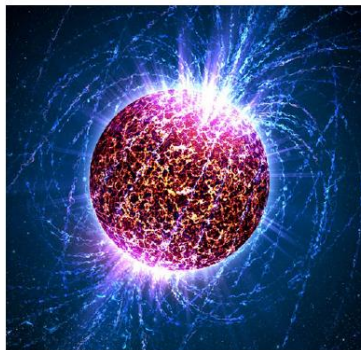
1. Karpushkin N. — Commissioning of the forward detectors of the BM@N experiment — ICPA2022: 6th International Conference on Particle Physics and Astrophysics — (2022) — <https://indico.particle.mephi.ru/event/275/contributions/3139/>
2. Karpushkin N. — Study of the mPSD response in O+Ni collisions at 2 AGeV at the mCBM — Nucleus2022: Fundamental problems and applications — (2022) — <https://events.sinp.msu.ru/event/8/contributions/425/>
3. Karpushkin N. — Machine learning approach for centrality determination in heavy ion reactions with segmented forward hadron calorimeters — 20th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics — (2021) — [https://lomcon.ru/?page\\_id=814#6](https://lomcon.ru/?page_id=814#6)
4. Karpushkin N. et al. — mPSD data monitoring at mCBM experiment — TIPP2021 International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics — (2021) — <https://indico.cern.ch/event/981823/contributions/4295600/>
5. Karpushkin N. et al. — Development of cosmic muon calibration methods for the segmented sampling lead/scintillator hadron calorimeters at the NA61/SHINE, CBM, BM@N and MPD experiments — TIPP2021 International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics — (2021) — <https://indico.cern.ch/event/981823/contributions/4295387/>
6. Karpushkin N. — New approach for centrality determination with forward hadron calorimeters in heavy ion reactions — NUCLEUS – 2020. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies — (2020) — <https://indico.cern.ch/event/839985/contributions/3983692/>
7. Karpushkin N. — Application of Machine Learning methods for centrality determination in heavy ion reactions at the BM@N and MPD@NICA — ICPA2020 5th International Conference on Particle Physics and Astrophysics — (2020) — <https://indico.particle.mephi.ru/event/35/contributions/2342/>
8. Karpushkin N. et al. — Energy calibration and signal waveform analysis of the CBM Projectile Spectator Detector — in Quark Matter 2019 the XXVIIIth International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions — (2019) — <https://indico.cern.ch/event/792436/contributions/3533787/>
9. Karpushkin N. et al. — The Projectile Spectator Detector for measuring of geometry of heavy ion collisions at the CBM experiment at FAIR — PM2018 14th Pisa Meeting on Advanced Detectors, Pisa, Italy — (2018) — <https://agenda.infn.it/event/17834/contributions/83621/>

**Спасибо за внимание!**

# BACKUP

# Сильновзаимодействующая ядерная материя: мотивация исследований II

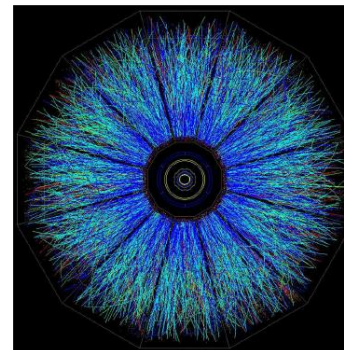
Нейтронные звезды



Слияние нейтронных звезд



Столкновение тяжелых ионов



GW170817

SIS100 energies

Температура  $T < 10 \text{ MeV}$

$T \sim 10\text{-}100 \text{ MeV}$

$T < 120 \text{ MeV}$

Плотность  $\rho < 10 \rho_0$

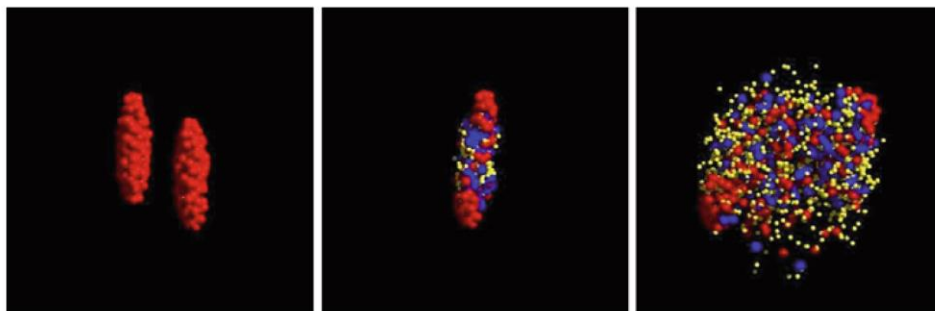
$\rho < 2 - 6 \rho_0$

$\rho < 5 - 15 \rho_0$

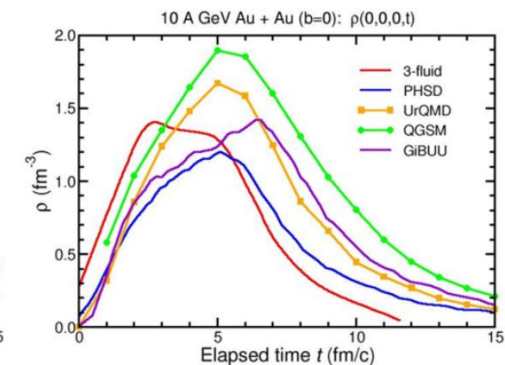
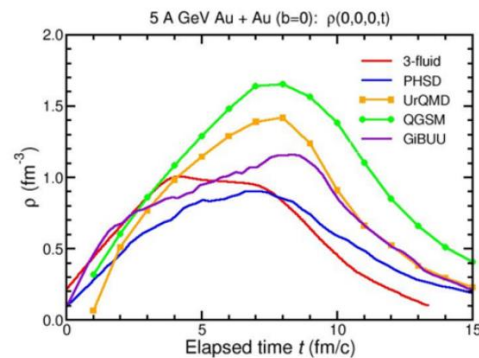
Время жизни /  
время реакции  $\sim \text{infinity}$

$T \sim 10 \text{ ms}$

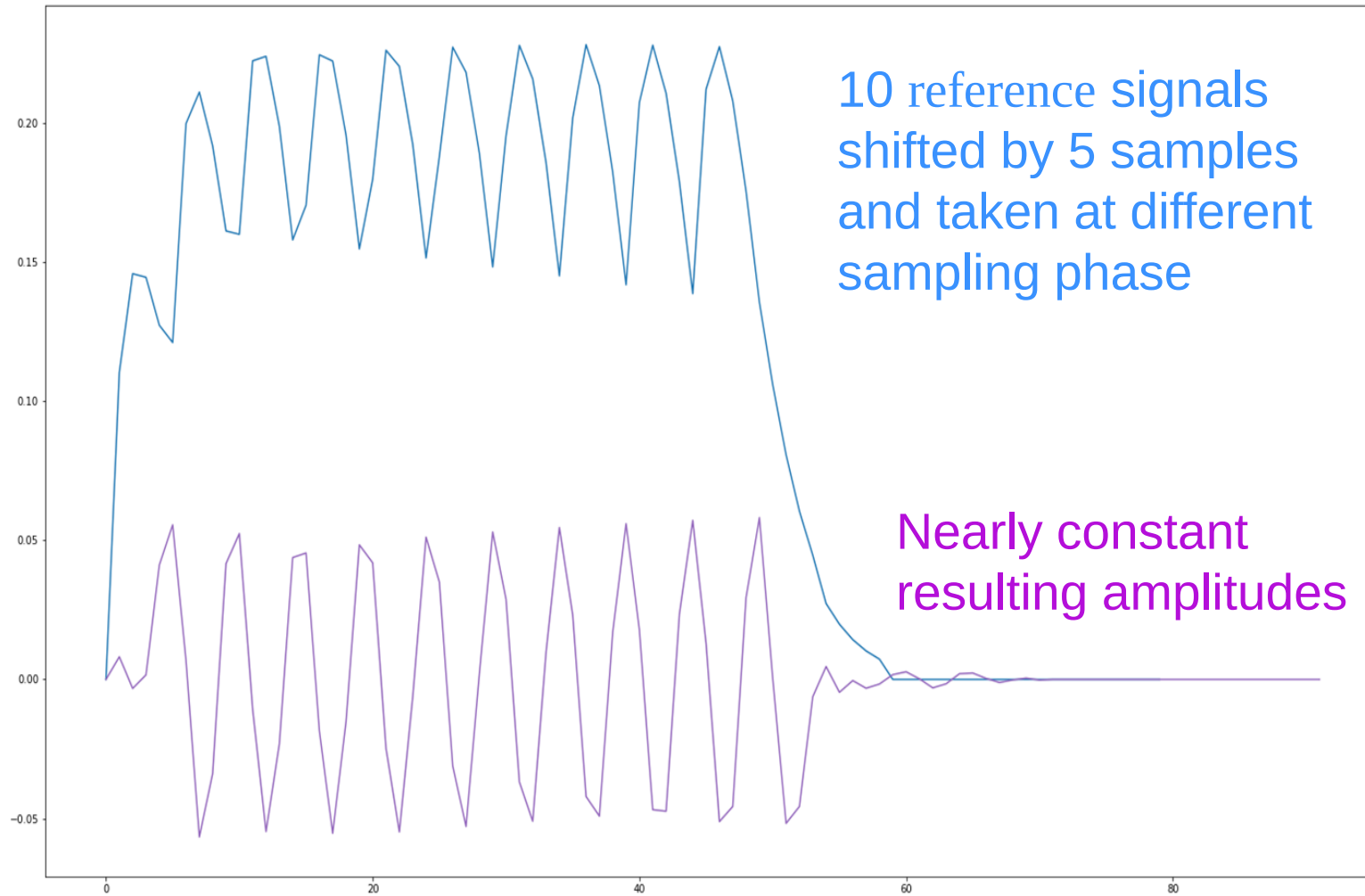
$t \sim 10^{-23} \text{ s}$



Столкновение ядер золота с энергией 10 ГэВ/нуклон



# FIR filter design: Resolving pile-ups

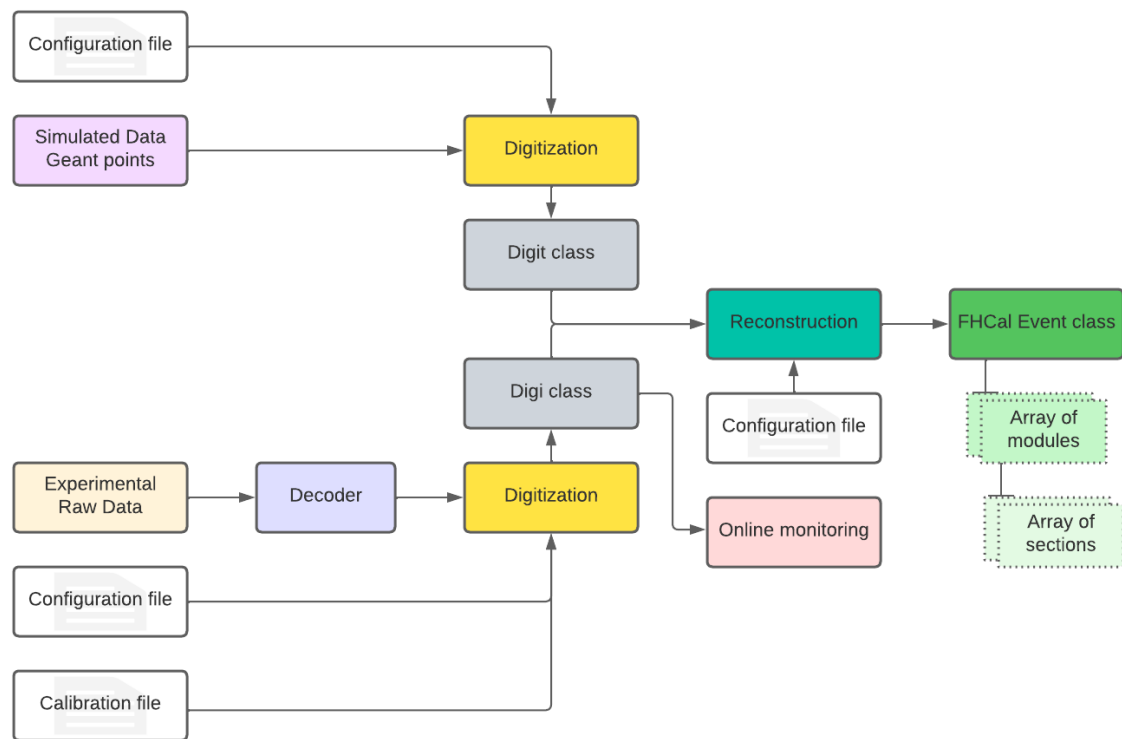


Testing FIR filter on pile-ups:

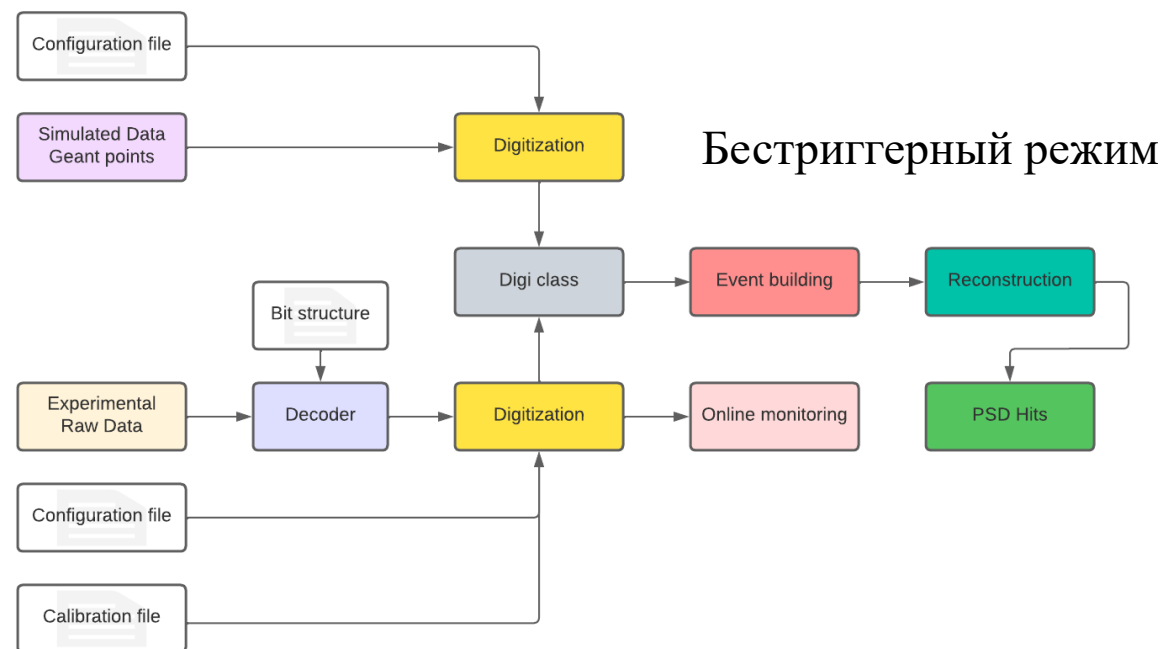
1. Take analytic description of reference signal
2. Produce 10 signals with different sampling phase
3. Shift each by  $X$  sample
4. Investigate the limit case  $X$

# Разработанное программное обеспечение для адронных калориметров

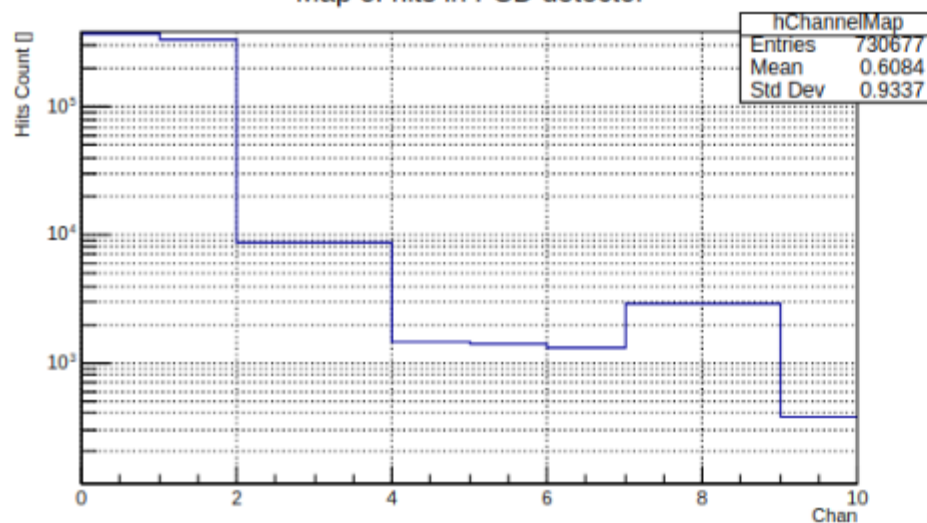
## FHCal BM@N



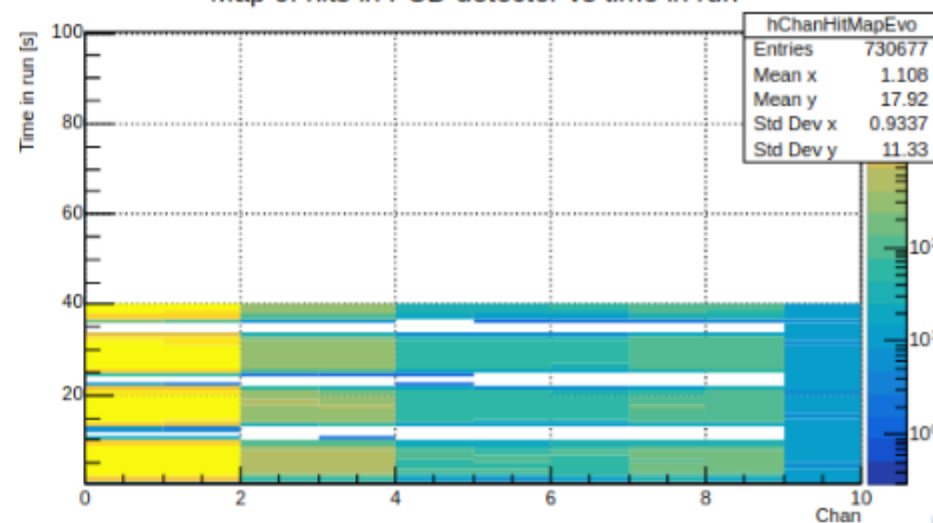
## PSD CBM



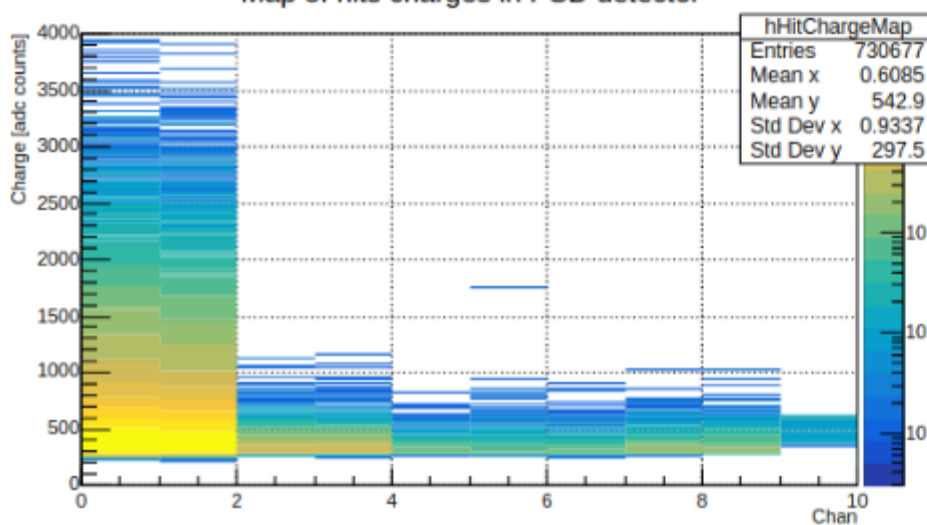
Map of hits in PSD detector



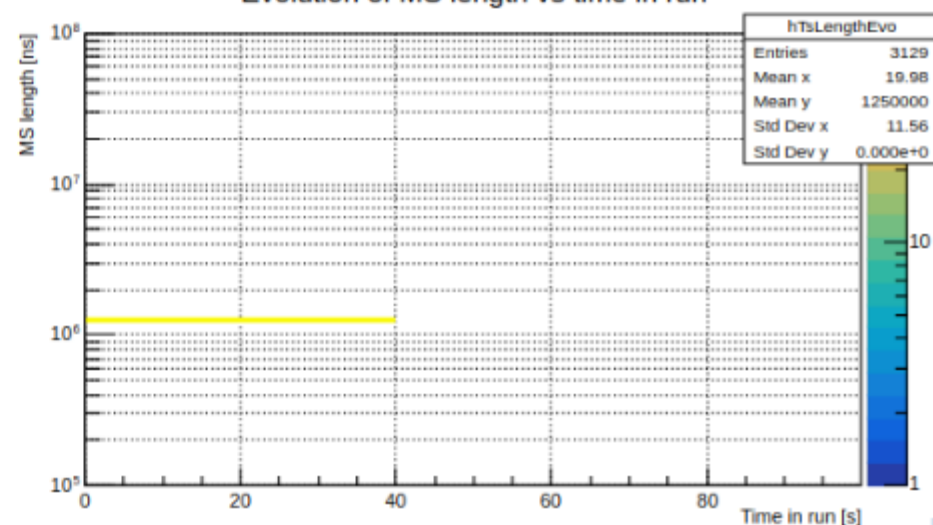
Map of hits in PSD detector vs time in run



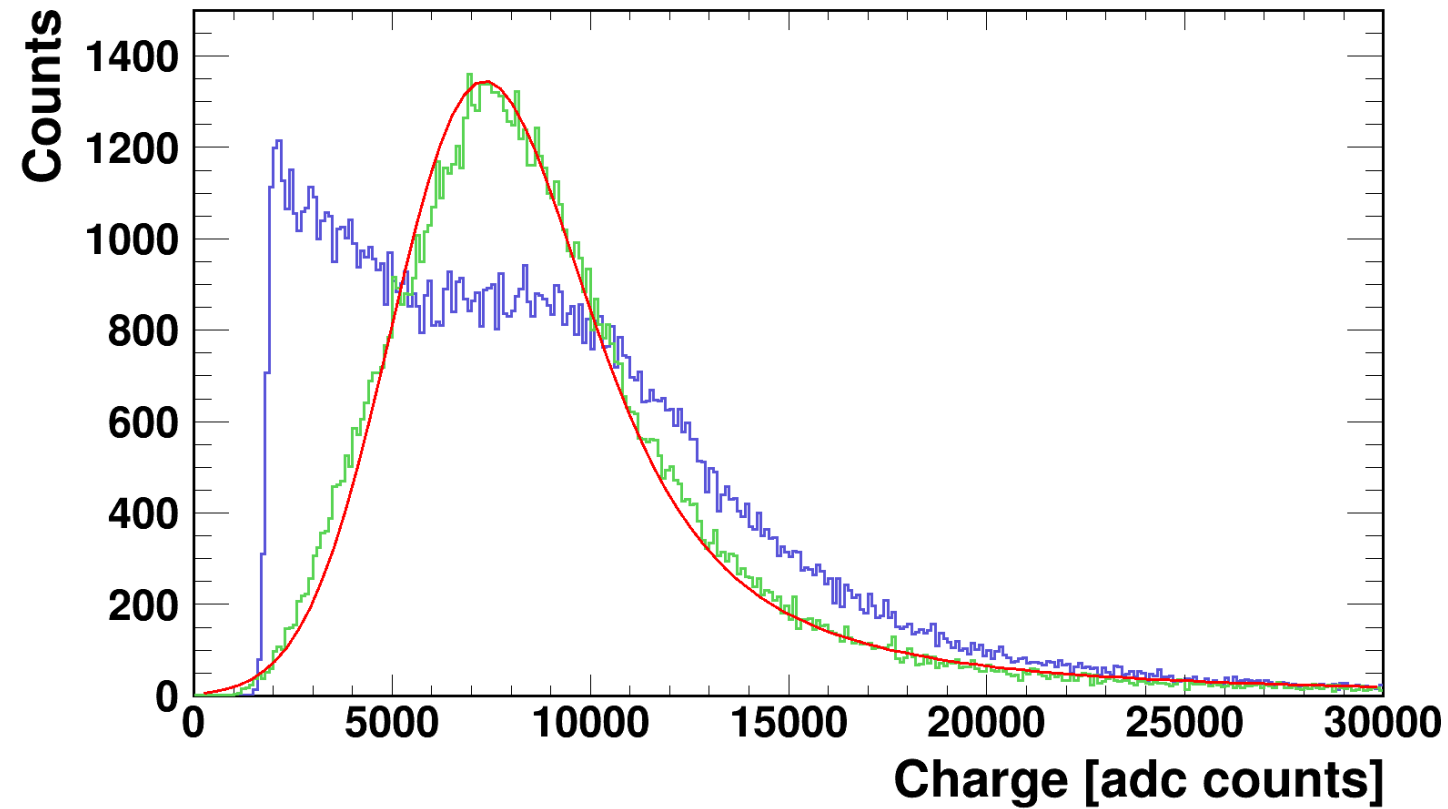
Map of hits charges in PSD detector

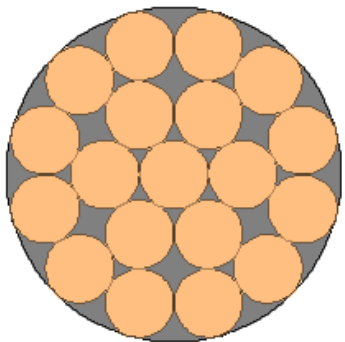


Evolution of MS length vs time in run



# Hamamatsu MPPC S1416-3010PS





Рассмотрим попадание  $N_s$  нуклонов-спектаторов с энергиями  $E_s^i$  в идеальный калориметр без отверстия

$$E = \sum_{i=1}^{N_s} E_s^i = N_s \cdot \overline{E}_s; \quad \overline{E}_s = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} E_s^i$$

$$\sigma_E^2 / E^2 = \sigma_{N_s}^2 / N_s^2 + \sigma_{\overline{E}_s}^2 / \overline{E}_s^2$$

Статистика  
Пуассона

$$\sigma_{N_s}^2 = N_s$$

ЦПТ

$$\sigma_{\overline{E}_s}^2 / \overline{E}_s^2 = \frac{1}{N_s} \sigma_{E_s}^2 / E_s^2$$

Разрешение  
на один  
нуклон

$$\sigma_{E_s}^2 / E_s^2 = a^2 / E_s$$

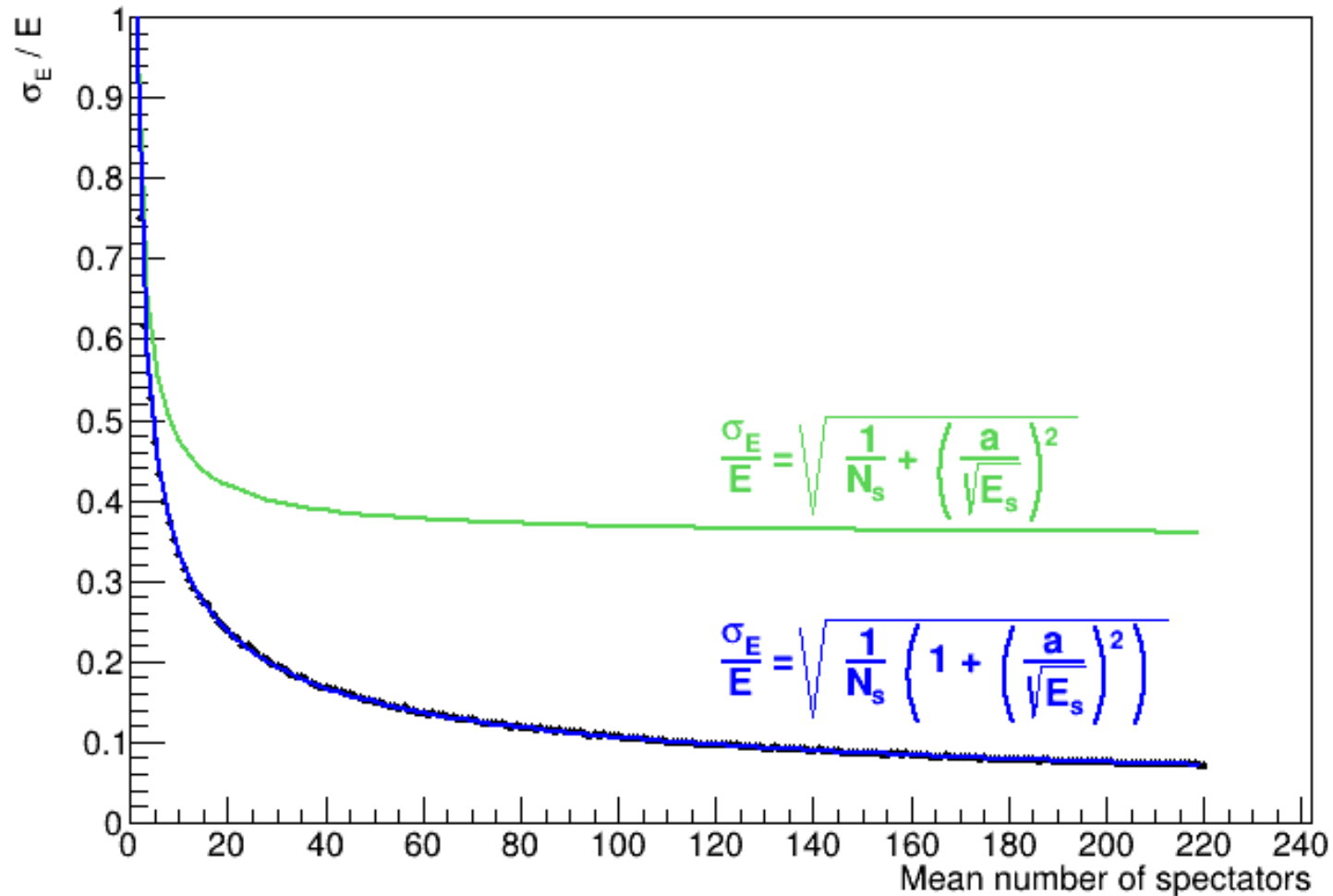
[arxiv.org/abs/2103.16899](https://arxiv.org/abs/2103.16899)

$$\sigma_E^2 / E^2 = \frac{1}{N_s} \left( 1 + \frac{a^2}{E_s} \right)$$

[arxiv.org/abs/1901.06508](https://arxiv.org/abs/1901.06508)

$$\sigma_E^2 / E^2 = \sigma_{N_s}^2 / N_s^2 = \frac{1}{N'_s} + a^2 / E_s$$

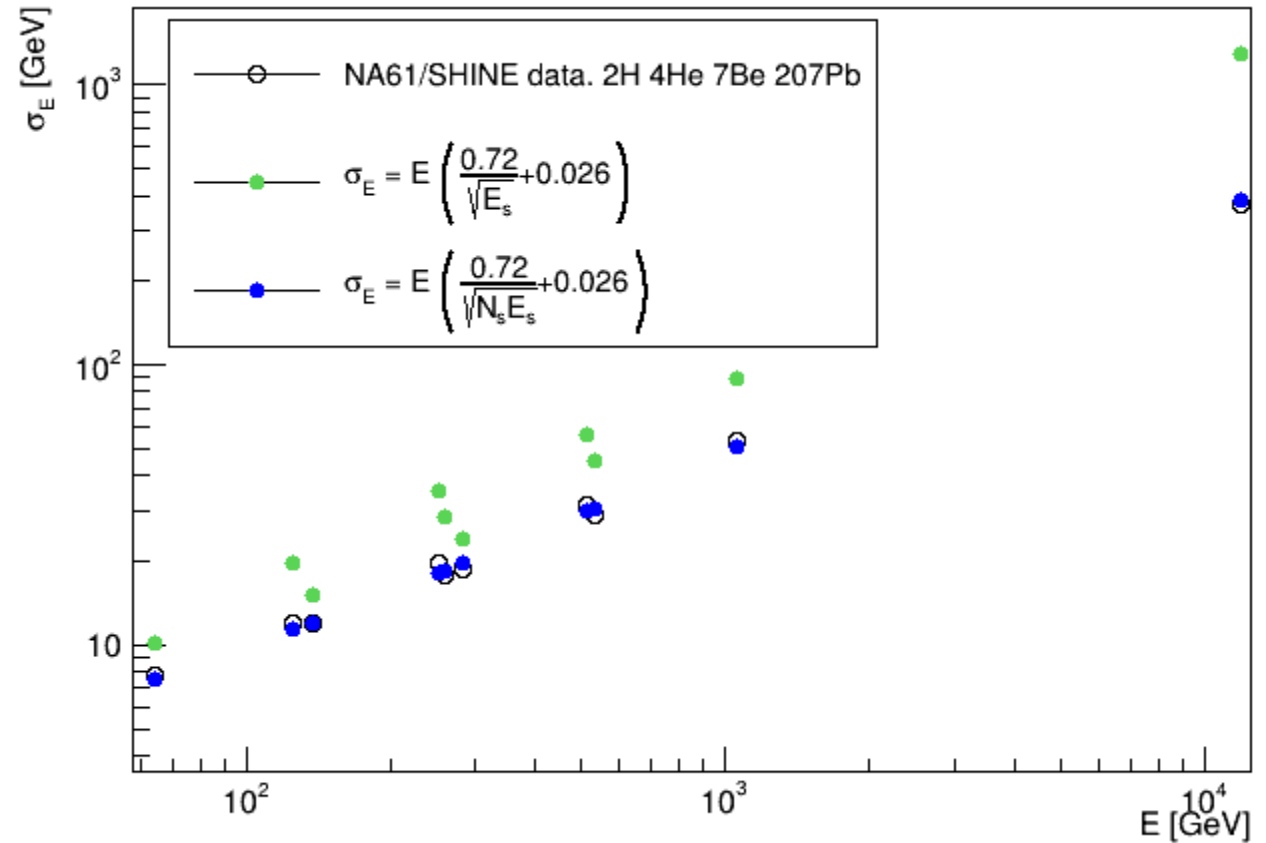
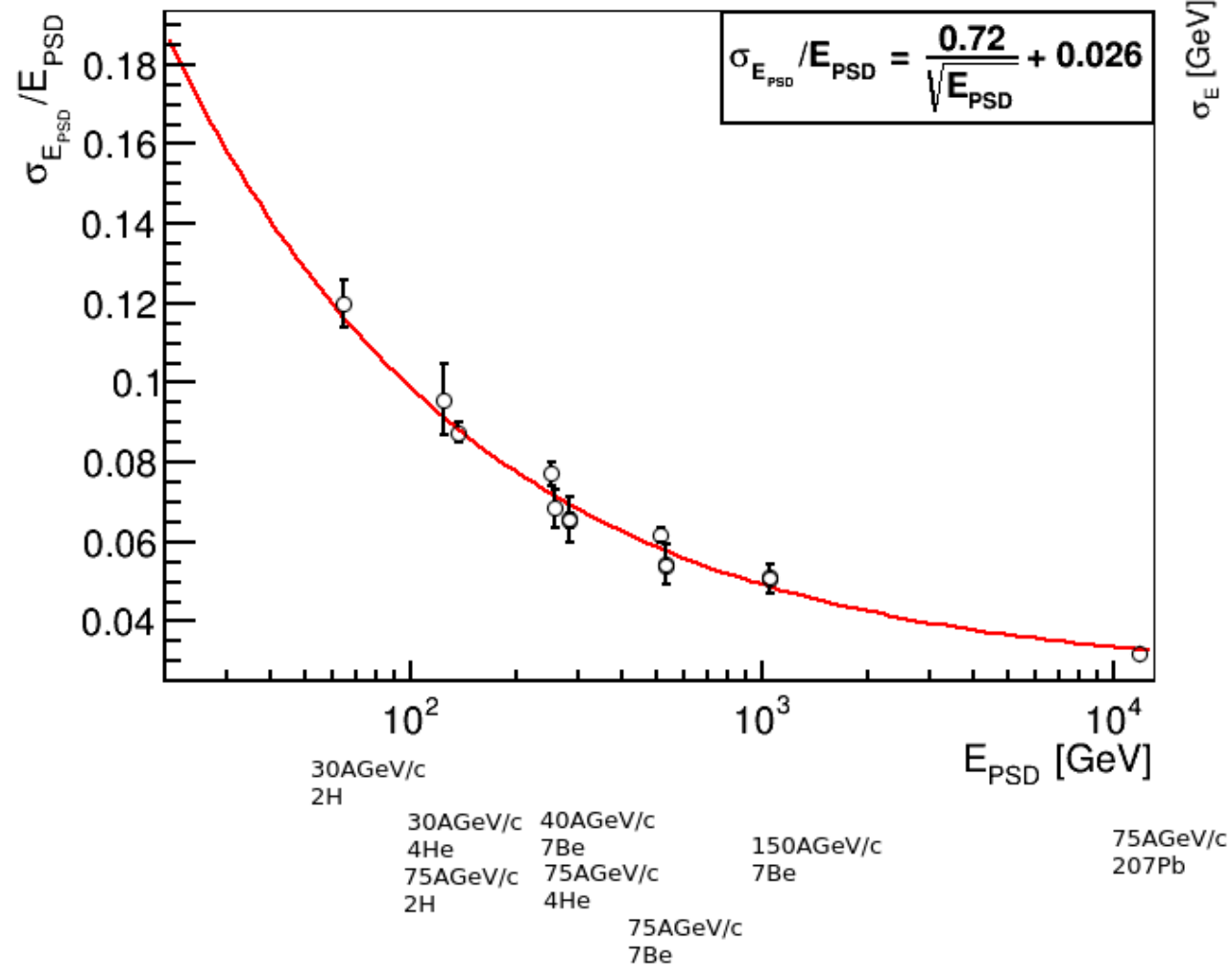
Calorimeter energy resolution.  $E_s = 2.5 \text{ GeV}$ ,  $a = 0.56$



- Рассмотрим один шаг цикла программы.
- Задаемся средним числом спектаторов  $N$ . Чтобы избежать фиксирования числа нуклонов, разыгрываем число нуклонов-спектаторов  $N_{sp}$  в данном событии по распределению Пуассона со средним  $N$ .
- Для каждого такого нуклона-спектатора разыгрываем энергию по распределению Гаусса с параметрами  $(E_s, a \cdot \sqrt{E_s})$ .
- Суммируем энергии всех нуклонов и заносим полученное значение в гистограмму.
- Повторяем процедуру iterations раз (10 000). После этого из заполненной гистограммы берется среднее значение выделенной энергии (мат.ожидание) и среднеквадратичное отклонение (корень дисперсии).
- Сохраняем в памяти среднее число спектаторов  $N$  и энергетическое разрешение  $RMS/Mean$ .
- Переходим к следующему  $N$ . Значение  $N$  ограничено  $N\_limit$ .

# Проверка на экспериментальных данных.

E.Kaptur «ANALYSIS OF COLLISION CENTRALITY AND NEGATIVE PION SPECTRA  
IN 7 Be + 9 Be INTERACTIONS AT CERN SPS ENERGY RANGE», Doctoral Thesis, 2017



## “Прямая и обратная задача”

In the experiment, it is necessary to determine the number of  $N_s$  spectator nucleons in each event. The total energy release in the calorimeter  $E'$  can, in the first approximation, be expressed in terms of the estimated number of  $N'_s$  spectator nucleons in the form  $E' = N'_s \cdot E_b$ , given that the kinetic energy of the nucleons with good accuracy is  $E_b$  of the beam energy. Then the relative variance of the number of  $N_s$  spectator nucleons can be expressed in terms of the total energy  $E'$  and the sample average energy release of the nucleon in the calorimeter  $\overline{E}'_s$  based on the following expression:

$$N_s = E' / \overline{E}'_s; \quad \overline{E}'_s = \frac{1}{N'_s} \sum_{i=1}^{N'_s} E_s^i \quad (6)$$

In our case, the relative error  $\sigma_{N_s}/N_s$  is expressed similarly to (2) as follows:

$$\sigma_{N_s}^2 / N_s^2 = \sigma_{E'}^2 / E'^2 + \sigma_{\overline{E}'_s}^2 / \overline{E}'_s{}^2 \quad (7)$$

As a result, the expression for the relative error  $\sigma_{N_s}/N_s$ , given the expression (4), can be written as follows:

$$\sigma_{N_s}^2 / N_s^2 = \frac{1}{N'_s} \left( 1 + \frac{a^2}{E_s} \right) \quad (8)$$

# **Вопросы и Замечания**

# К вопросу №1

## Гамма-функция

The gamma function used for scintillation pulse shape fitting has the form:

$$f(t) = A \cdot \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha} \cdot e^{-t/\beta}$$

Where:

- $t$  is the time after the interaction.
- $A$  is the amplitude of the pulse.
- $\alpha$  is the shape parameter.
- $\beta$  is the scale parameter.

## «Новосибирская функция»

$$f(x) = A e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln^2(1 + \Lambda \tau(x - \mu_0))}{\tau^2} + \tau^2 \right)},$$

where

$$\Lambda = \frac{\sinh(\tau \sqrt{\ln 4})}{\sqrt{\ln 4} \tilde{\sigma}},$$

is parameterized by its asymmetry ( $\tau$ ), width ( $\tilde{\sigma} \equiv \frac{FWHM}{2\sqrt{\ln 4}} \approx \frac{FWHM}{2.35}$ ) and mode ( $\mu_0$ ).

## К вопросу №3

*Karpushkin, N. et al. J. Phys. Conf. Ser. 1667 012020. doi:10.1088/1742-6596/1667/1/012020 (2020).*

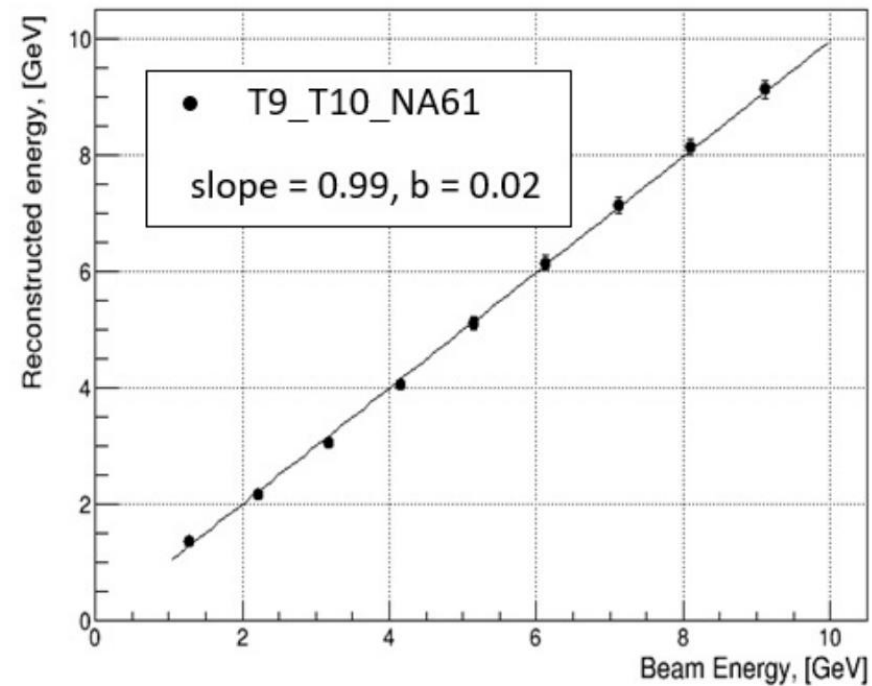
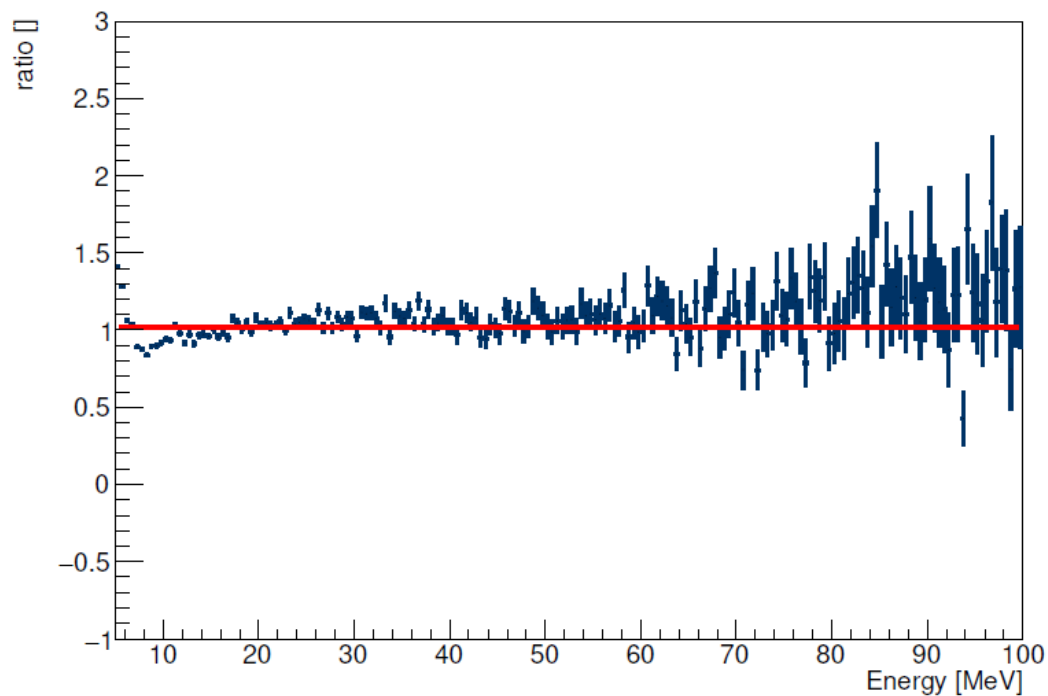
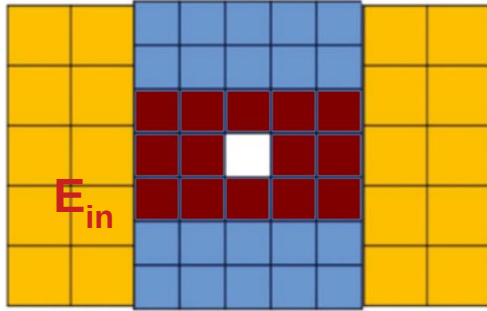


Рисунок 3.5 — Отношение спектров выделенной энергии в первой секции mPSD в моделированных (GEANT4) и экспериментальных данных для соударений O+Ni@2AГэВ.

# К вопросу №4

## Методы определения центральности передними адронными калориметрами с пучковым отверстием

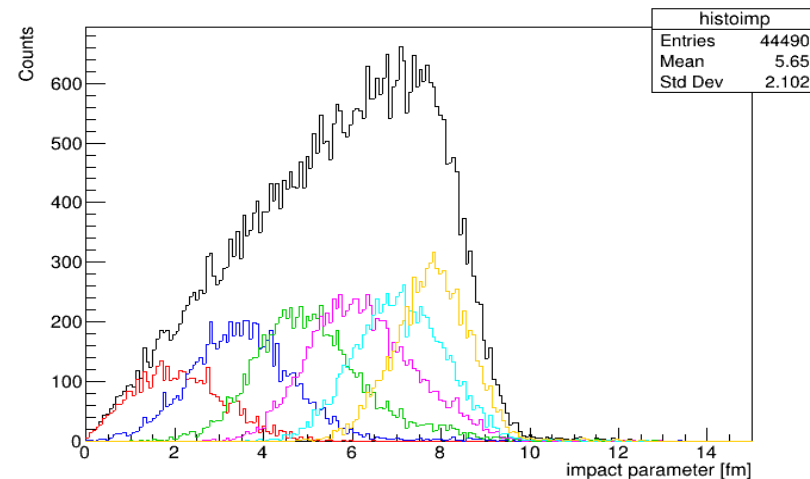
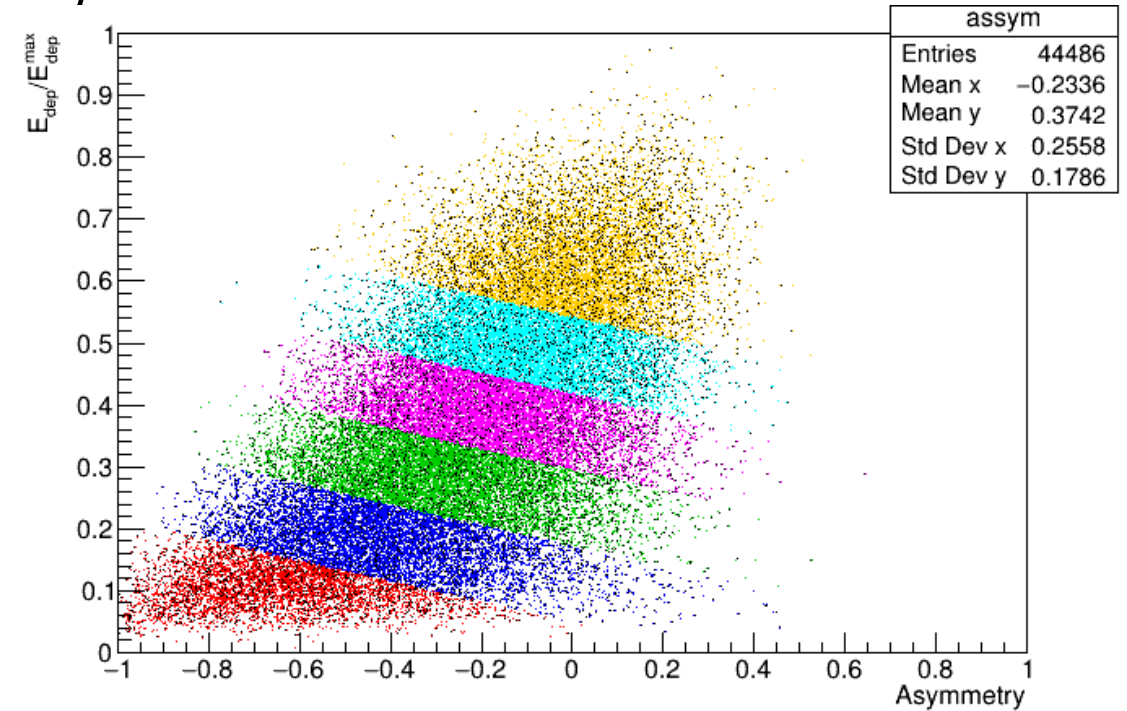
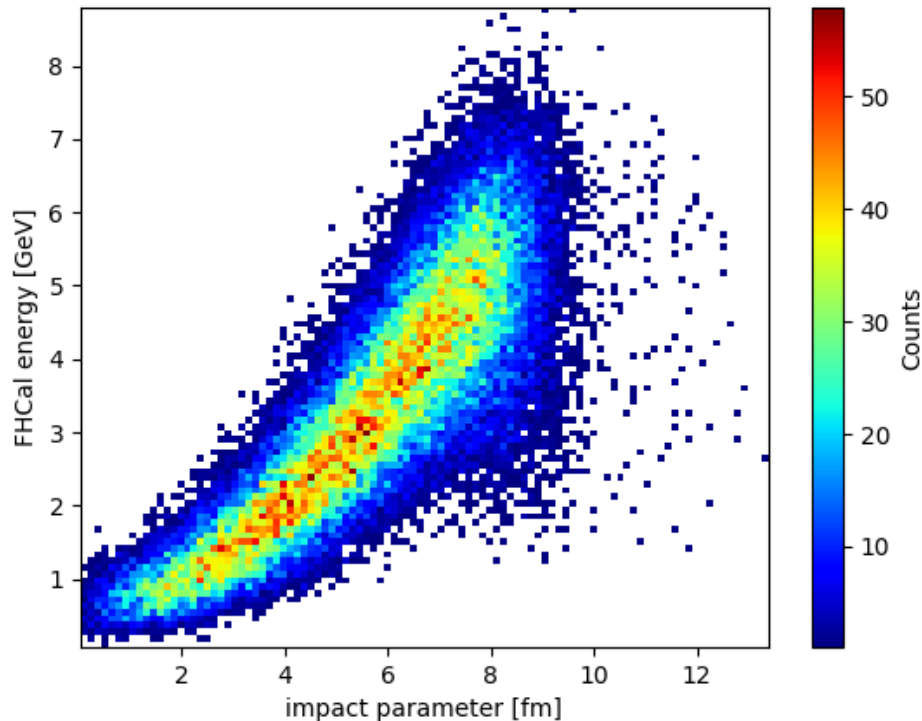
$$\text{Assymetry} = \frac{E_{in} - E_{out}}{E_{in} + E_{out}}$$



**FHCAL BM@N**  
**XeCsI 3.8A GeV**  
DCMQGSM-SMM  
Trigger CCT2

(~60% most central)

Selected by GlobalTracks mult.

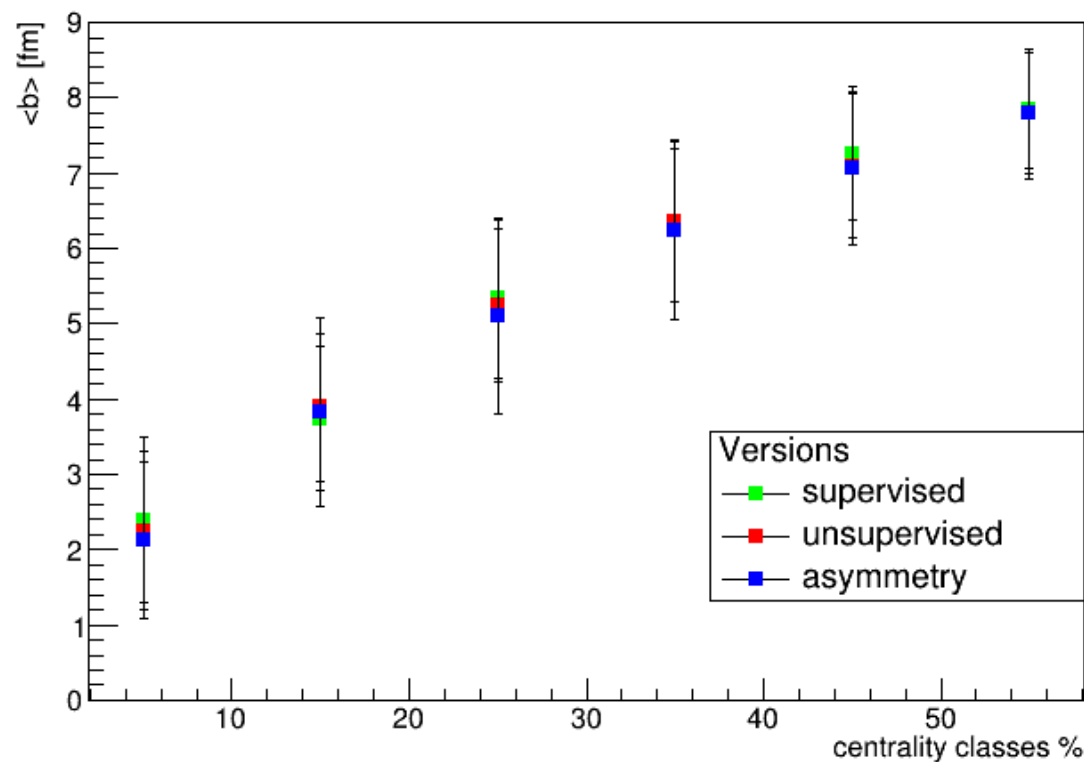


# К вопросу №4

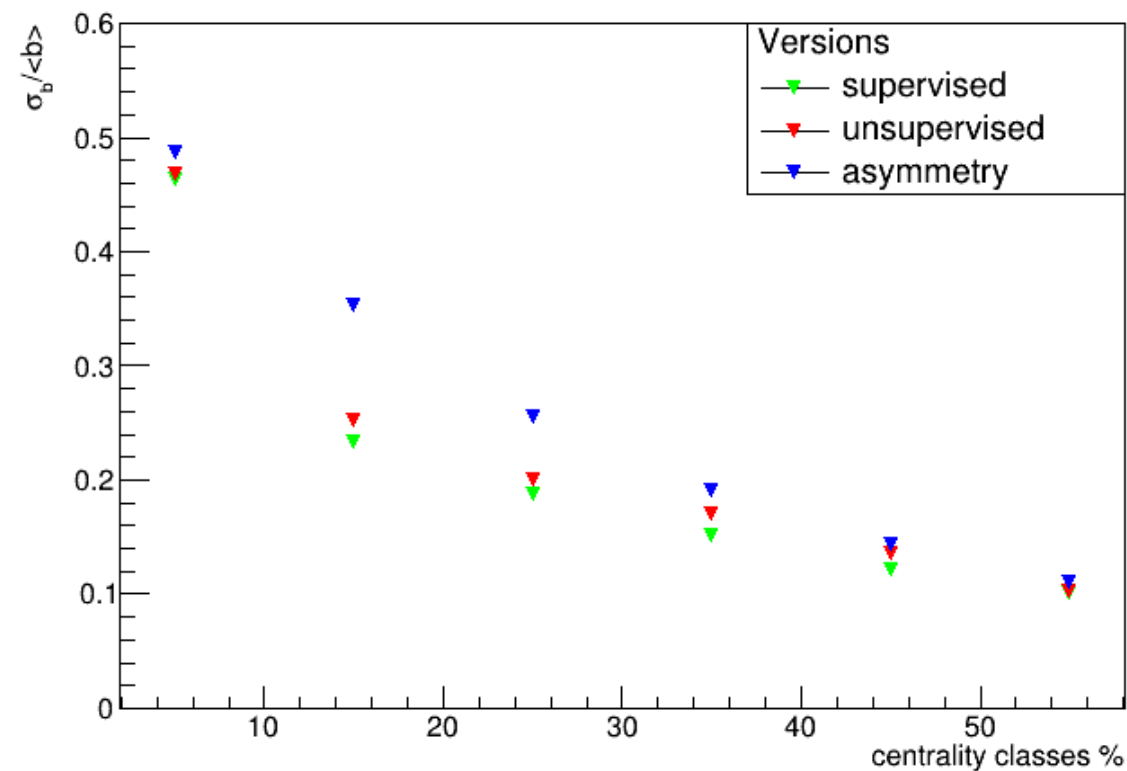
## Методы определения центральности передними адронными калориметрами с пучковым отверстием

**FHCal BM@N**  
**XeCsI 3.8A GeV**  
DCMQGSM-SMM  
Trigger CCT2  
(~60% most central)

XeCsI 3.8A GeV DCMQGSM



XeCsI 3.8A GeV DCMQGSM



## К вопросу №12

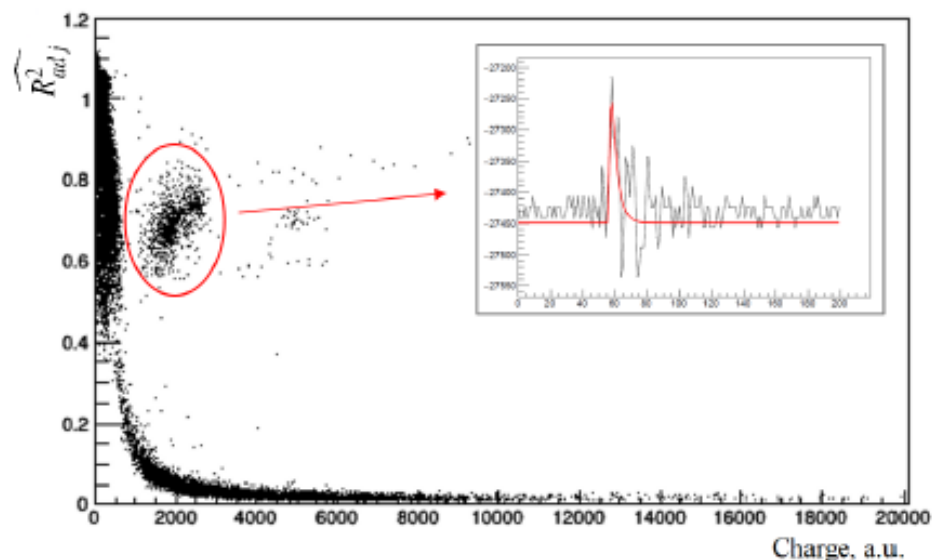


Рисунок 2.2 — Зависимость коэффициента детерминации от заряда сигнала. Истинные события расположены вблизи нуля коэффициента детерминации, группа событий с небольшим значением заряда и большим значением коэффициента детерминации соответствует шумовым срабатываниям, красным выделена группа событий с электрической наводкой. Пример осциллограммы с электрической наводкой приведен на вставке.

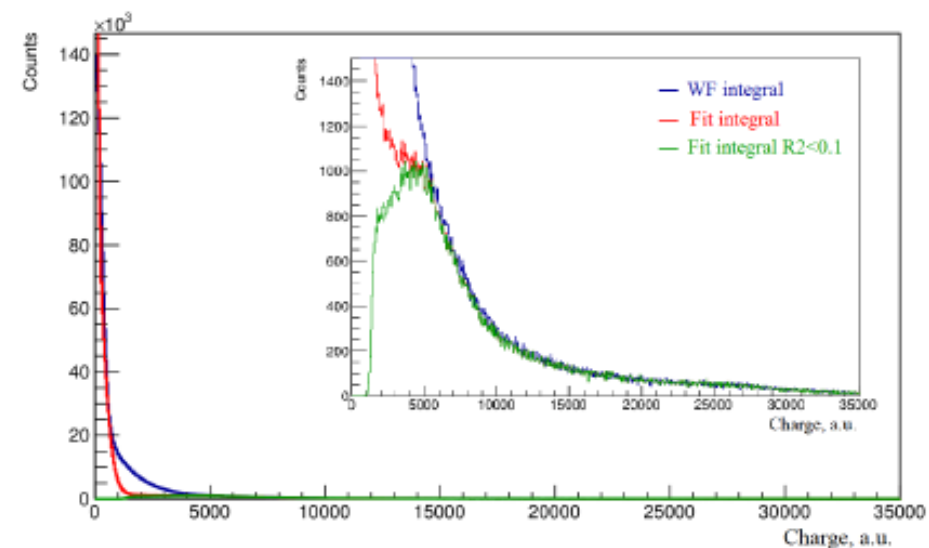


Рисунок 2.3 — Распределение заряда сигнала для разных методов подсчета величины заряда. Синим: заряд исходной осциллограммы, красным: заряд модельной функции, зеленым: заряд модельной функции с отбором  $\widehat{R}_{adj}^2 < 0.1$ . На вставке эти распределения показаны в увеличенном масштабе.