

Изучение процесса $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$
на детекторе КМД-3 коллайдера ВЭПП-2000

Амирханов Артем

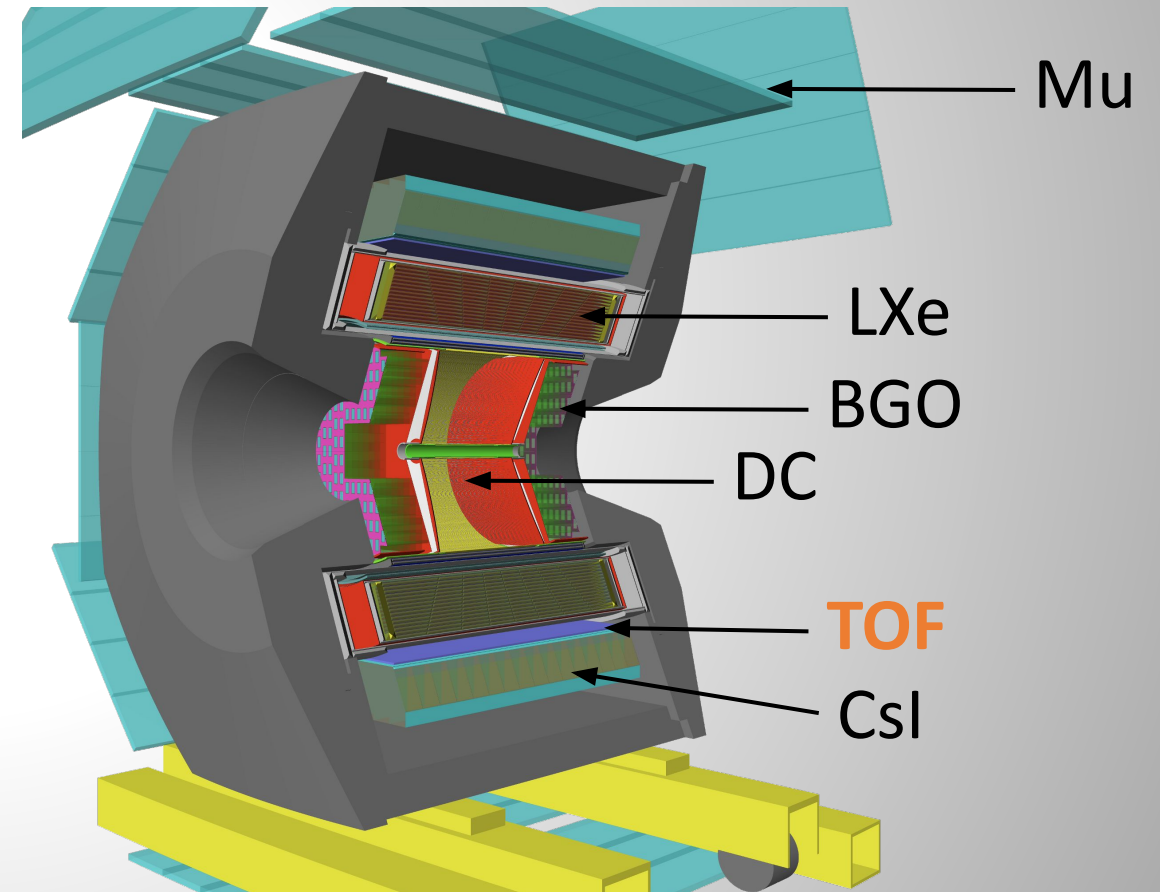
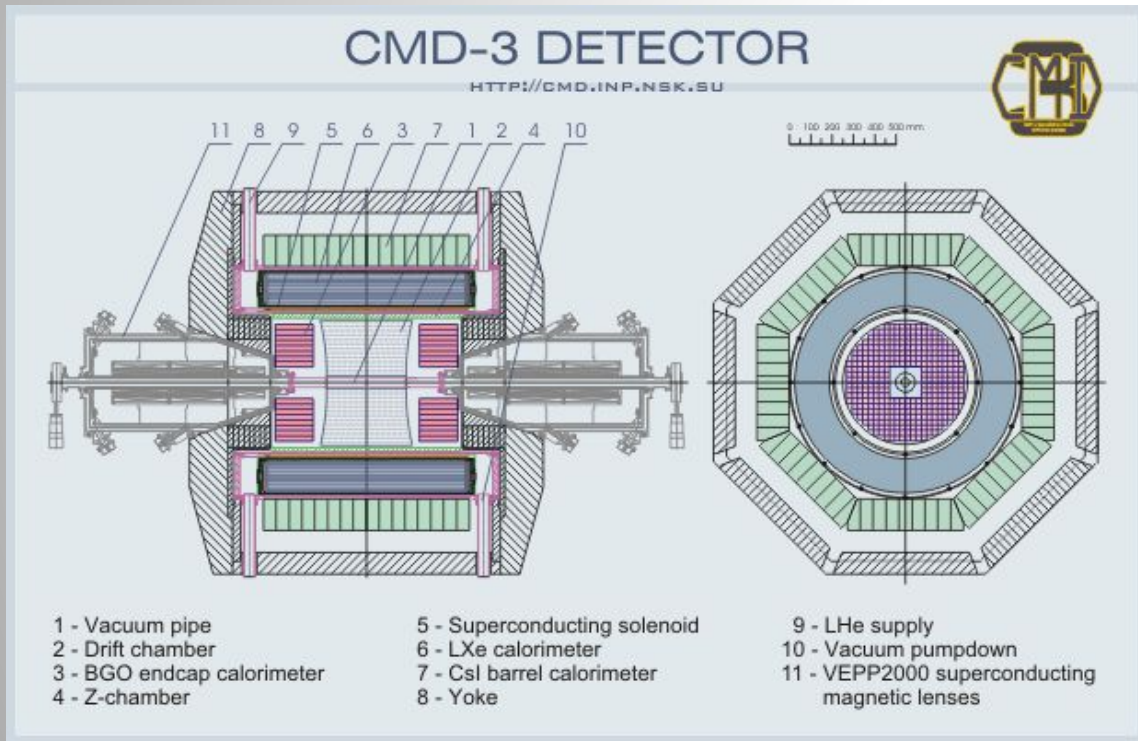
ЯДРО-2025

02.07.2025

Содержание

- Детектор КМД-3
- Описание процесса $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$
- TOF - времяпролетная система
- Алгоритм и используемые отборы
- Результаты по данным 2019 / 2020 / 2021 / 2022 г.

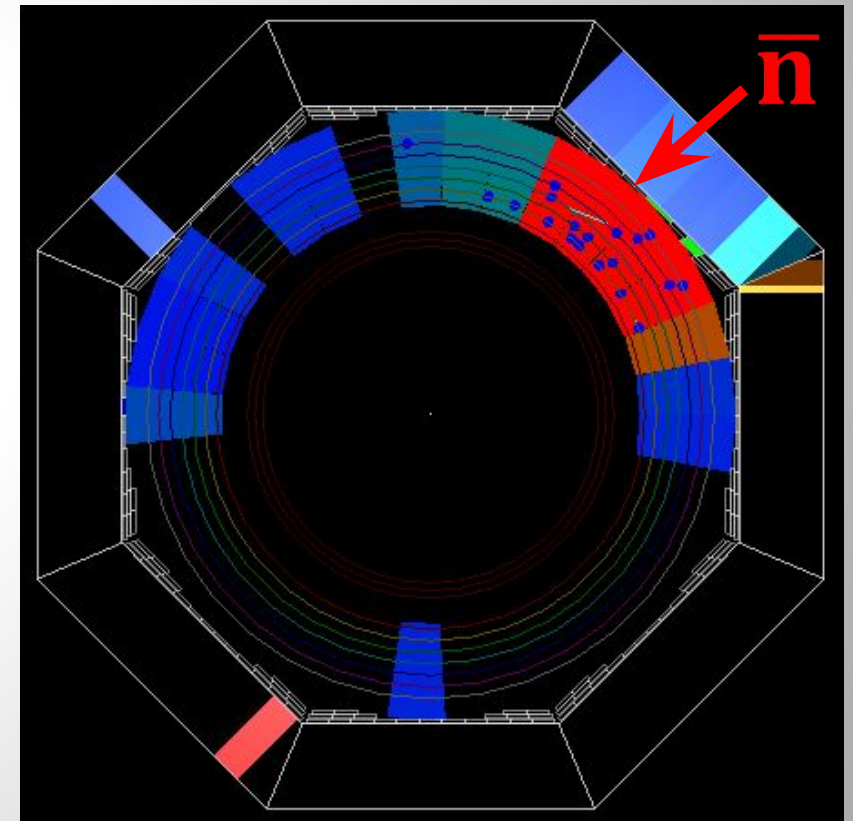
Детектор КМД-3



Общие сведения процессе $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$

Количество набранной статистики (выше порога рождения $\bar{n}n$) $\sim 233 \text{ пб}^{-1}$:

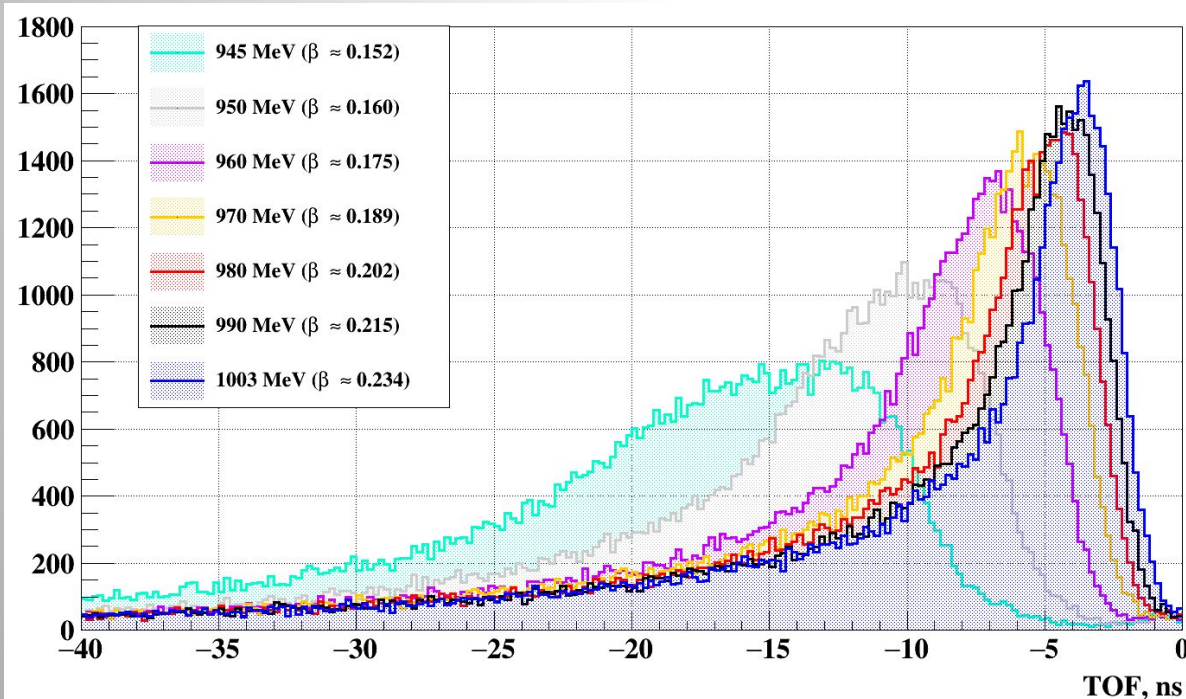
- 2017г: 27.5 пб^{-1}
- 2019г: 15.5 пб^{-1}
- 2020г: 37.7 пб^{-1}
- 2021г: 47.5 пб^{-1}
- 2022г: 105 пб^{-1}
- При идентификации процесса $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ имеется **наличие большого фона** (космический и пучковый), который отфильтровывается с помощью различных систем детектора.
- Финальный шаг – **идентификация** событий $\bar{n}n$ **по времени пролета** ($\bar{n}n$ медленные относительно пучковых событий) и здесь ключевую роль имеет **времяпролетная система** детектора.
- **Время пролета $\bar{n}n$ находится в диапазоне от 3 до 30 нс** (для $E_{\text{beam}} > 945$) в зависимости от энергии пучка



Моделирование ТОФ

Учтены все основные эффекты моделирования:

- Моделирование времени и амплитуды
- Учитывается отклик предусилителя SiPM
- Учитываются различные пороги и шумы электроники



Время пролета событий $n\bar{n}$,
зарегистрированное в ТОФ (SIM),
в зависимости от энергии пучка

Моделирование TOF - сравнение с экспериментом (1)

Amplitude

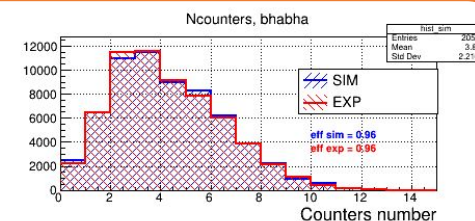
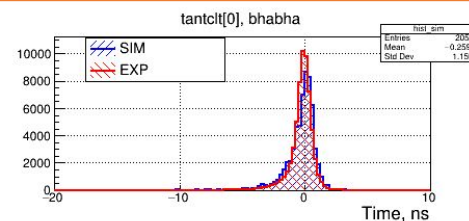
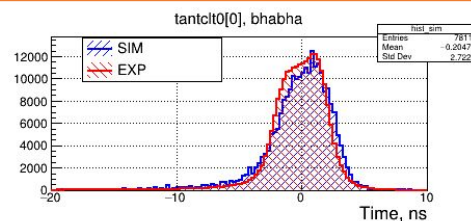
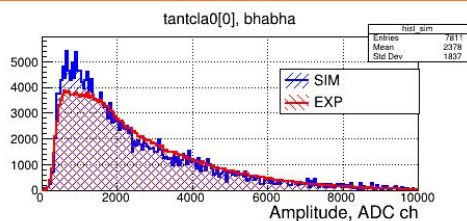
T0

(T0+T1)/2

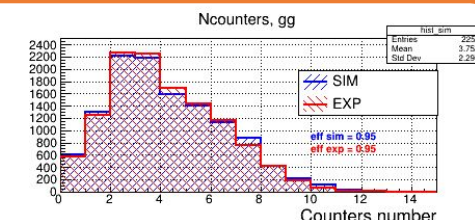
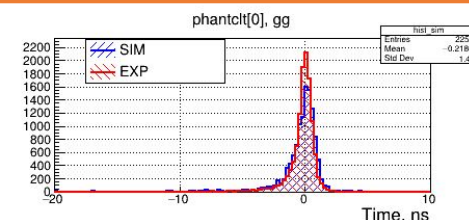
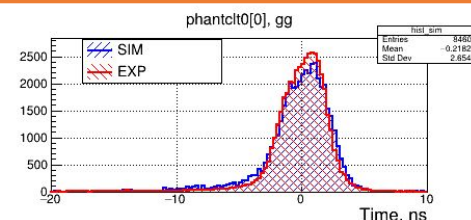
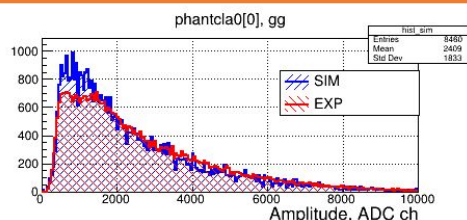
Amount of fired counters



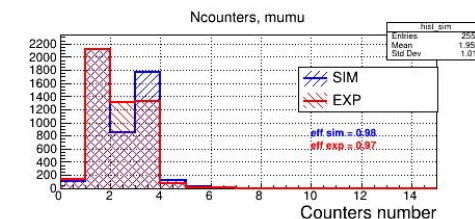
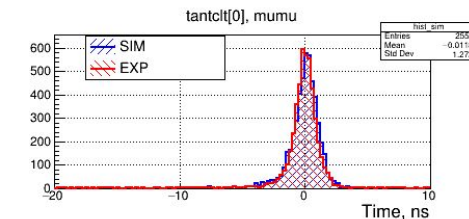
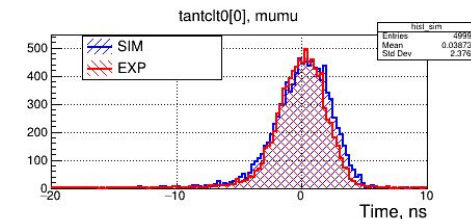
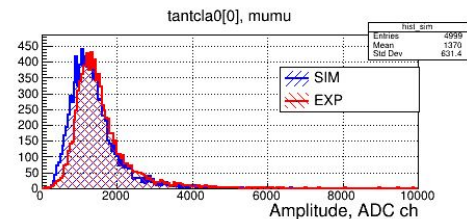
e^+e^-



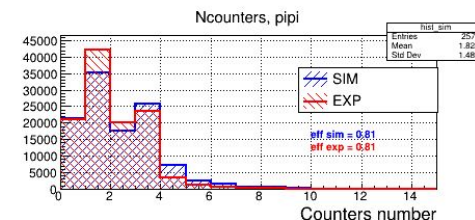
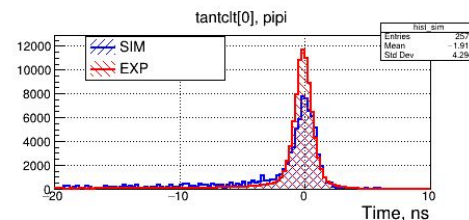
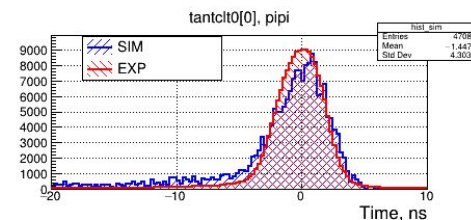
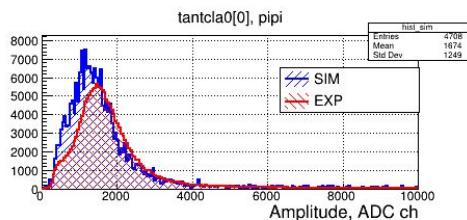
gg



$\mu^+\mu^-$



$\pi^+\pi^-$



Моделирование TOF - сравнение с экспериментом (1)

Amplitude



T0



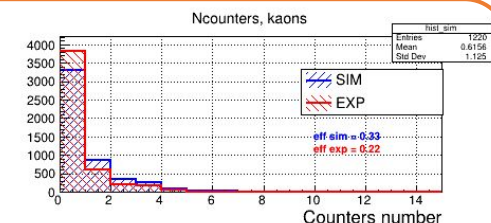
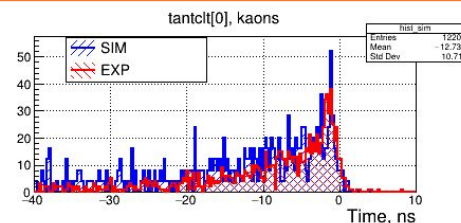
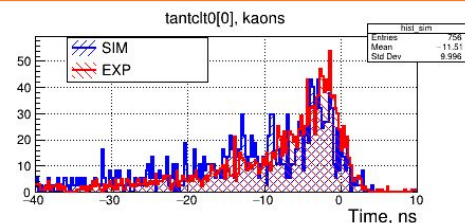
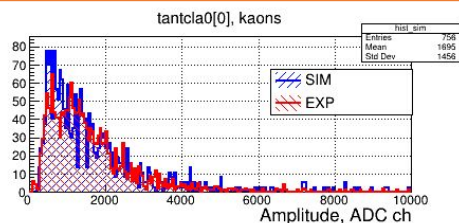
(T0+T1)/2



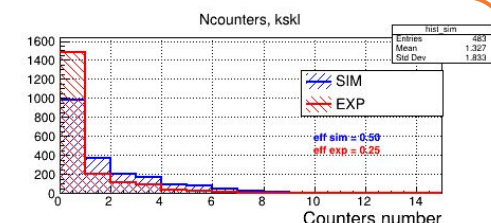
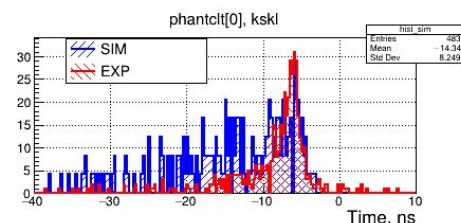
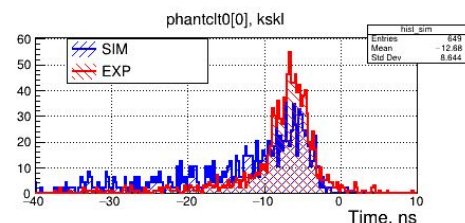
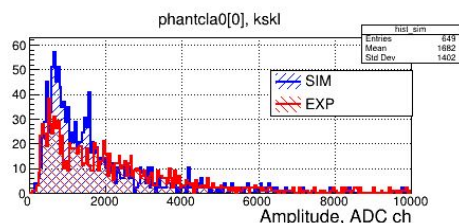
Amount of fired counters



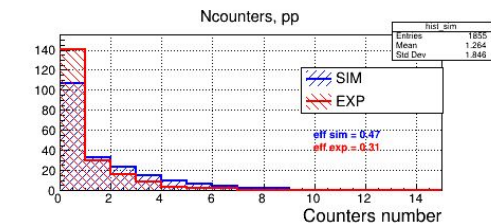
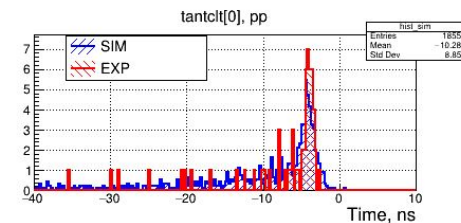
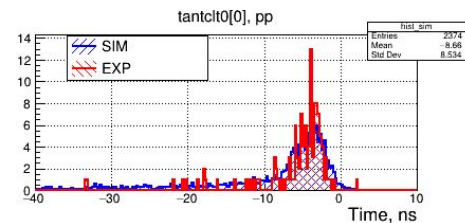
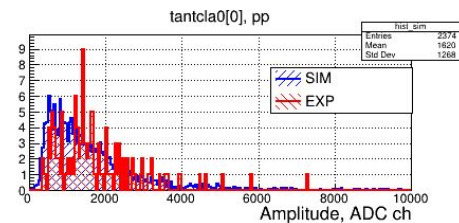
K^+K^-
600 MeV



$KsKl$
510 MeV

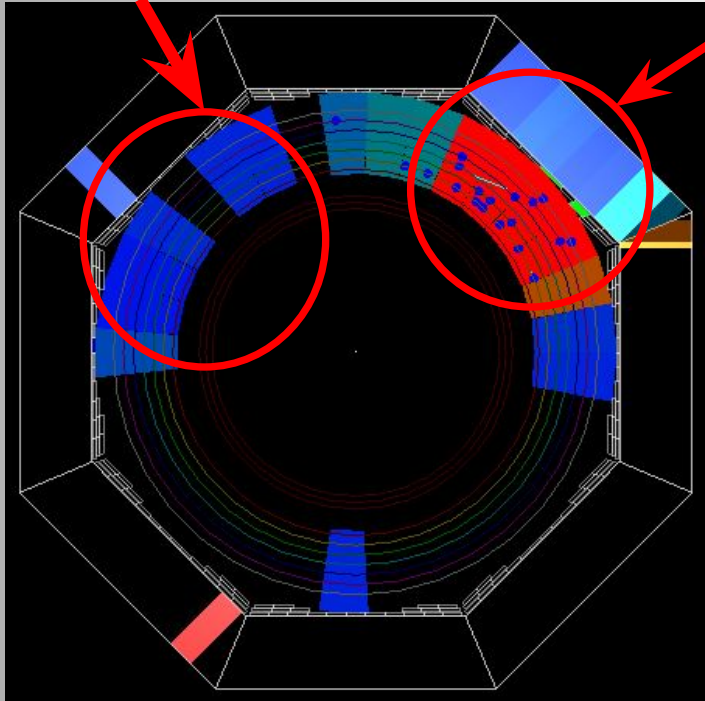


p^+p^-
970 MeV

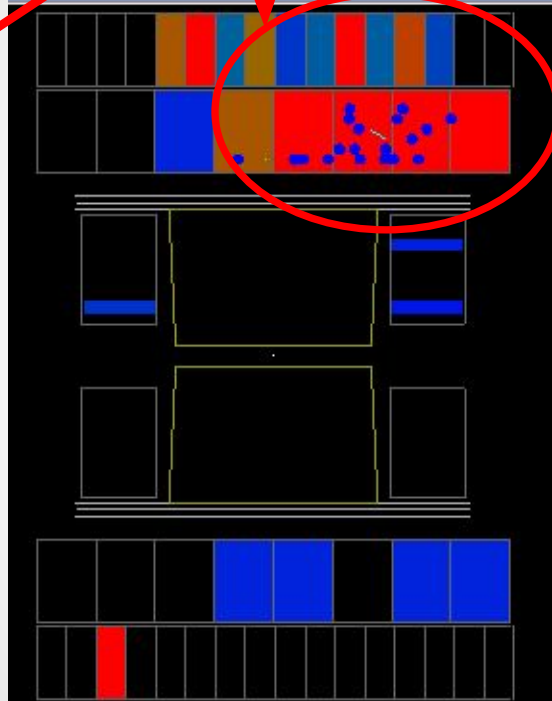


Пример события $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$

Кластер от
вторичной
частицы



$\bar{n}$



Развертка калориметра LAr



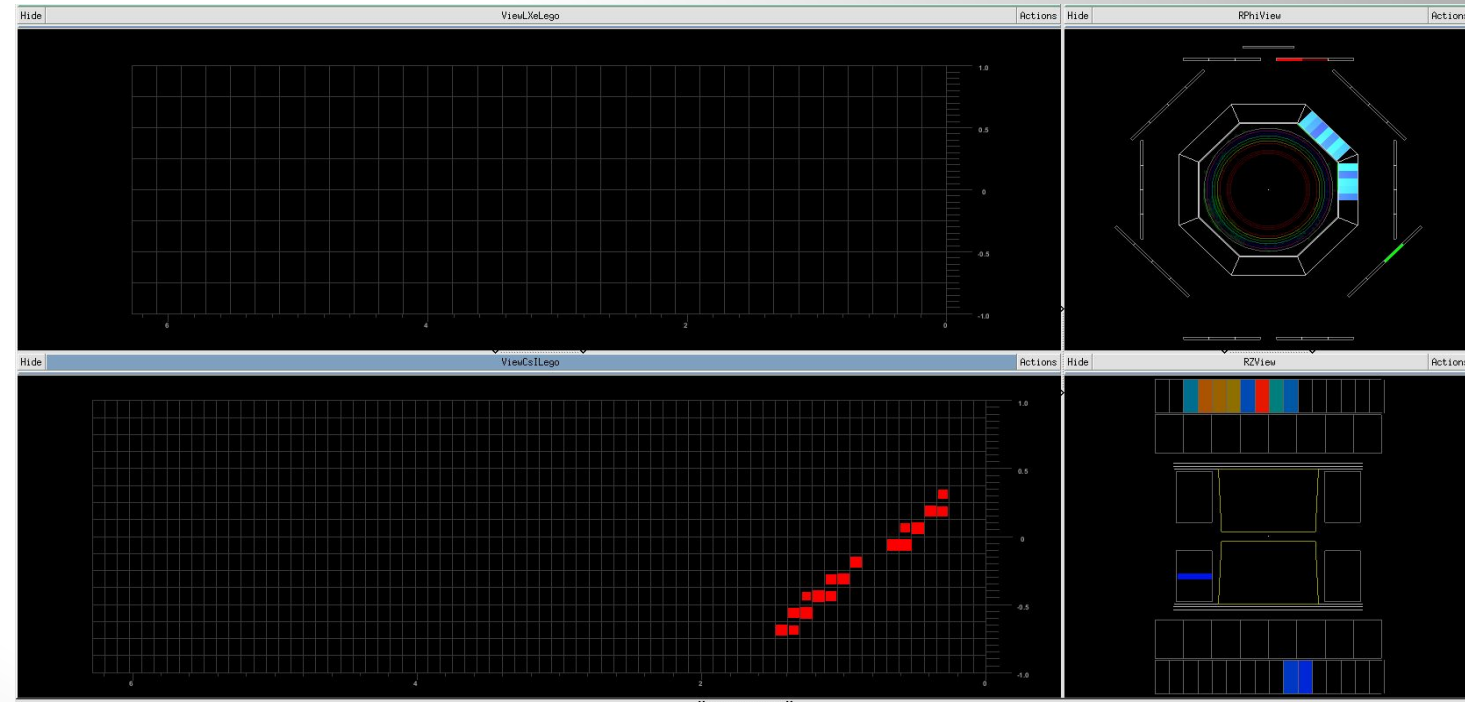
- Асимметричное взаимодействие (виден сигнал только от $\bar{n}$)
- Большое энергосодержание в калориметре

Фоновые события

Пример космического события:

Основные фоновые события:

- Пучковый фон
- Космические события

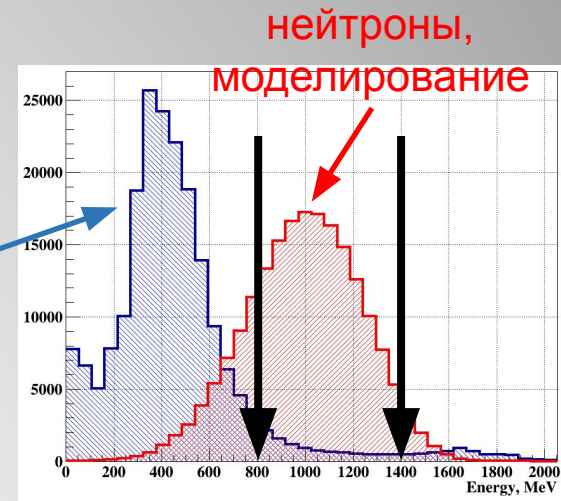


$$\left. \begin{aligned} \dot{N}(\text{cosmic}) &\approx 10^2 \text{ Гц} \\ \dot{N}(n\bar{n}) &\approx 10^{-2} \text{ Гц} \end{aligned} \right\} 4 \text{ порядка!}$$

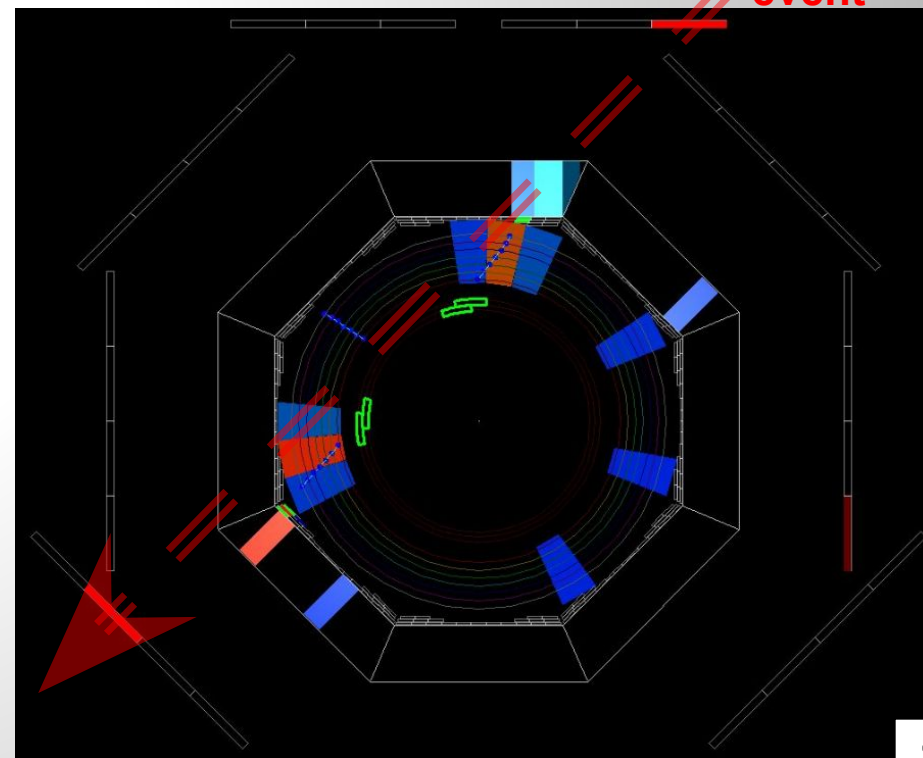
Критерии отбора событий

- Отсутствие центральных треков
- Ограничение на импульс далеких треков
- Отбор по энергосодержанию в калориметре
- Расположение относительно друг друга треков в калориметре, мюонных счетчиков и энергетического кластера
- Отбор с помощью мюонной системы (кол-во сработавших счетчиков)
- Ограничение на форму энергосодержания

все
события,
эксперимент



Cosmic
event



Построение классификатора по параметрам отбора

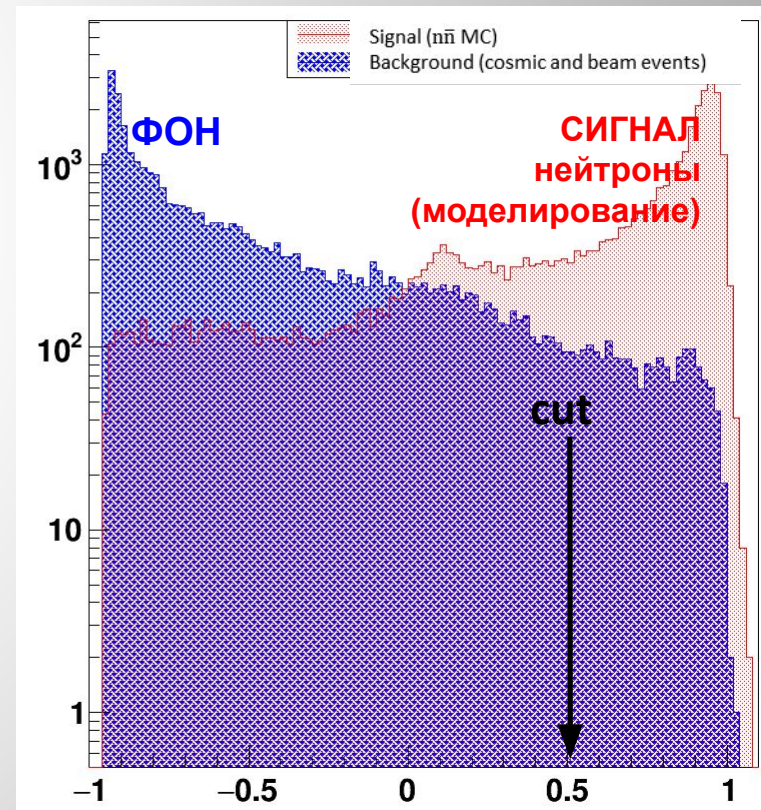
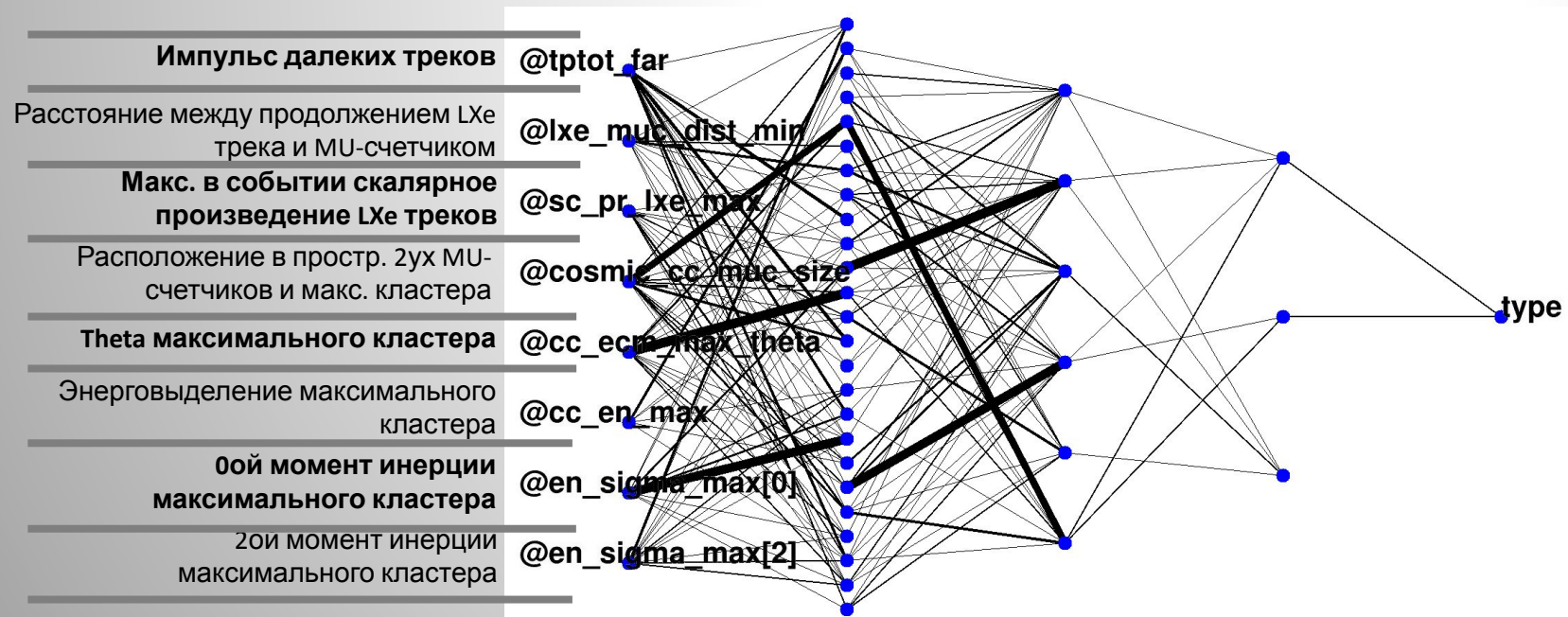
В дополнение к предыдущим параметрам была построена нейронная сеть (MLP), использующая на входе моменты инерции главного кластера и энергосодержание, а также другие параметры* с предыдущих слайдов.

Тренировочные данные:

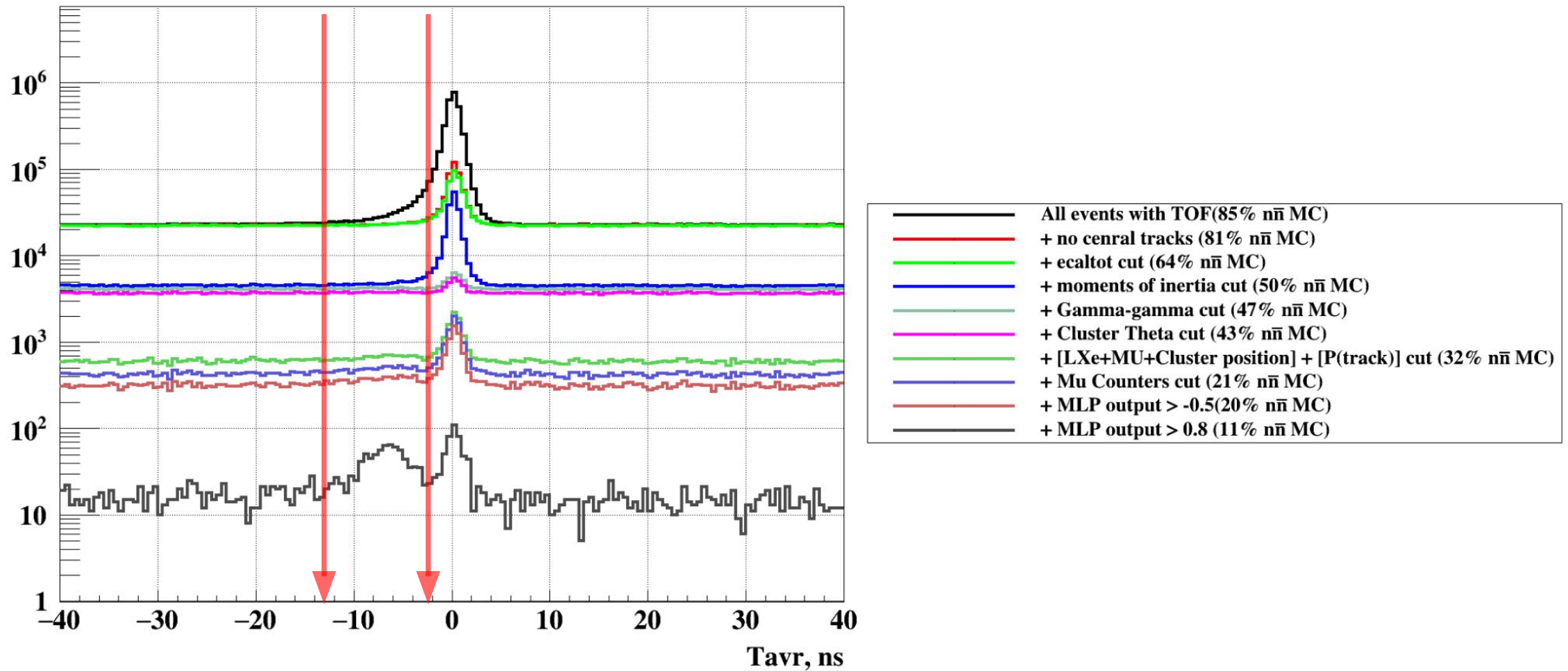
Сигнал – события $n\bar{n}$ (моделирование)

Фон – события с детектора с энергией пучка ниже порога рождения $n\bar{n}$.

Данные использовались с учетом предыдущих отборов

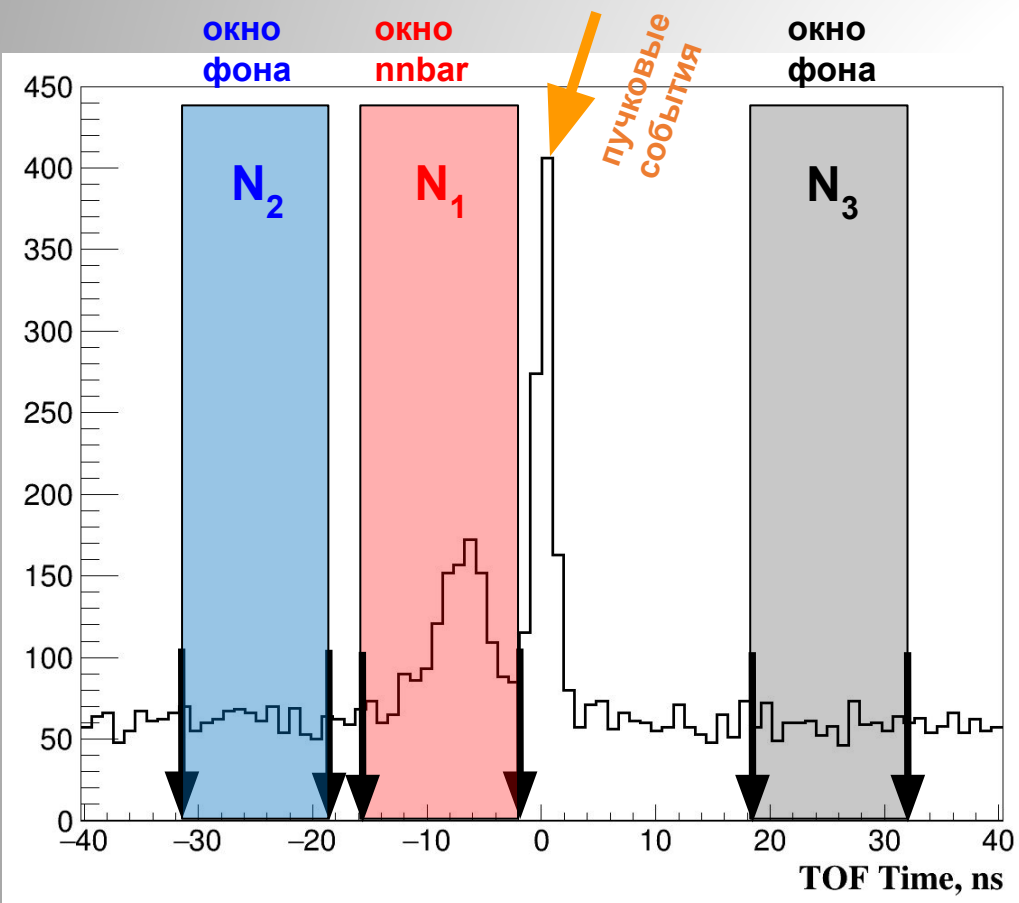


Результаты отбора



Определение числа событий

Время, измеренное в TOF, в нс



После всех отборов определяется количество событий в ожидаемом временном диапазоне пролета антинейтрона (N_1), а для подавления фона вычитается количество событий в фоновом окне (N_3).

Для контроля используется вычитание количества событий в двух фоновых окнах ($N_2 - N_3$)

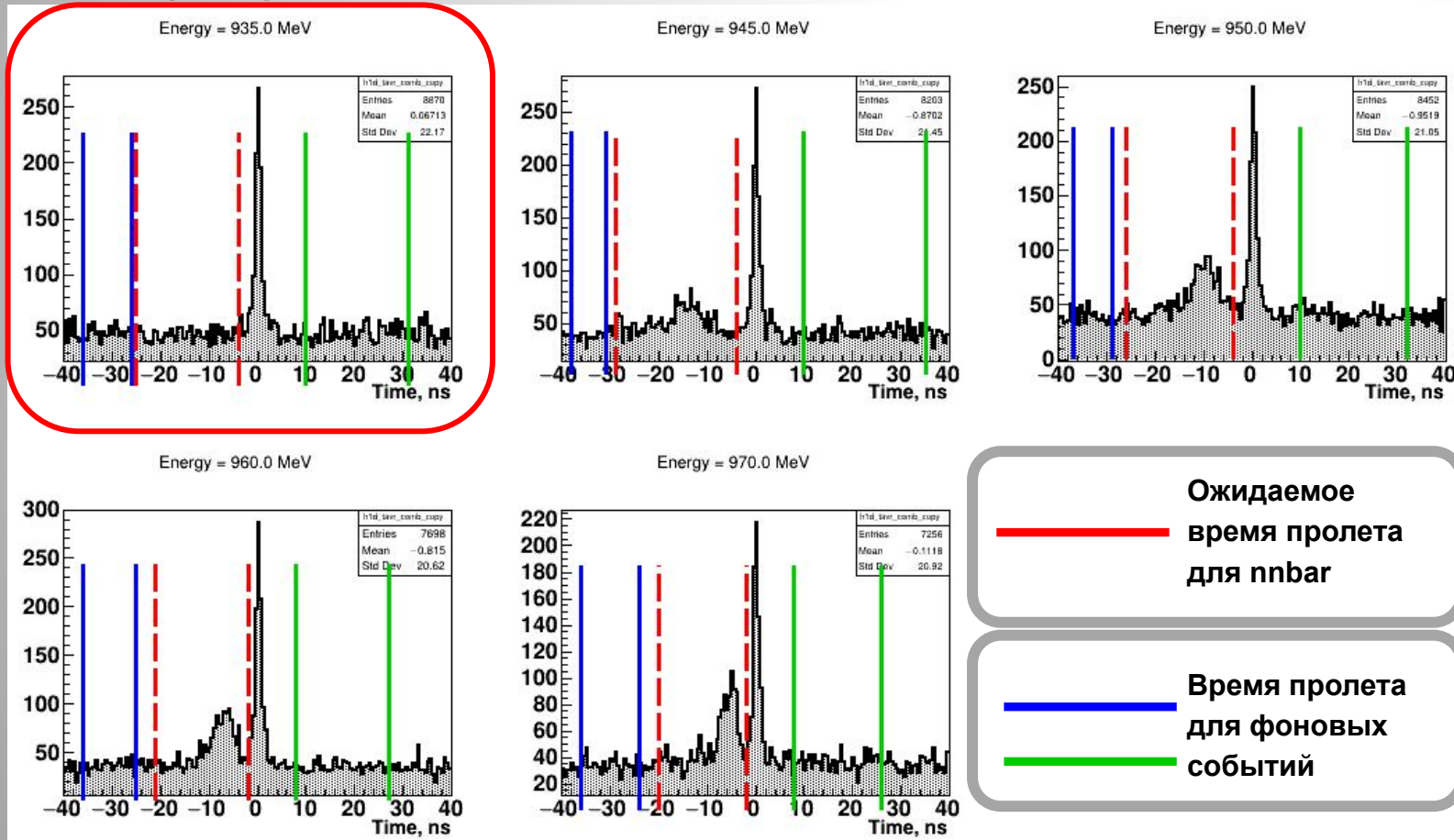
$$N(n\bar{n}) = N_1 - N_3$$

$$N(\text{stat}) = N_2 - N_3 \approx 0$$

*границы зависят от энергии пучка

Результаты отбора $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ в зависимости от энергии пучка (2020 г.)

Ниже порога рождения $n\bar{n}$

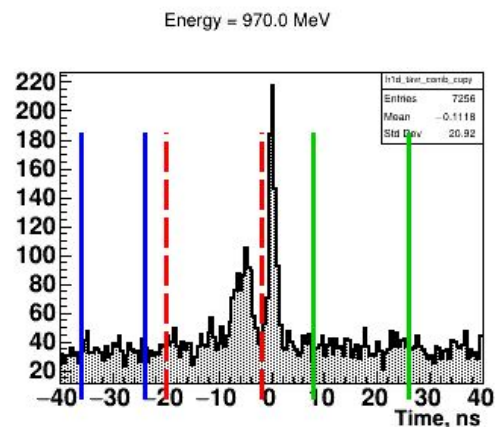
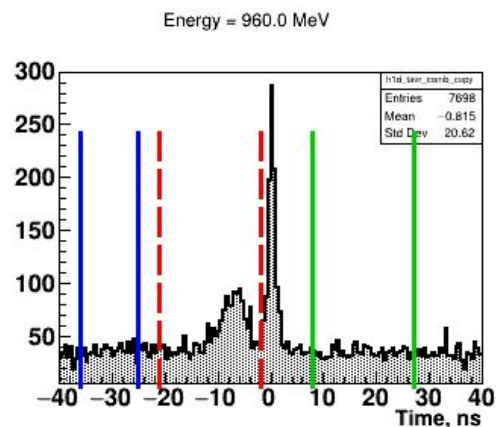
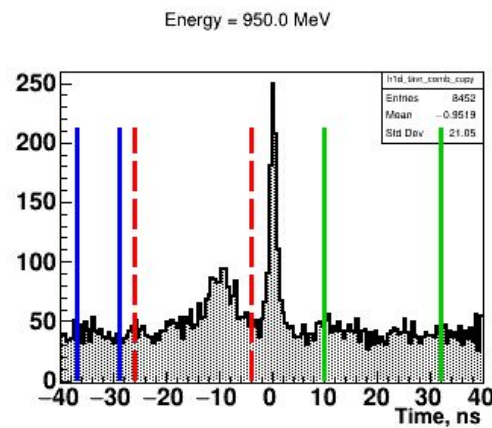
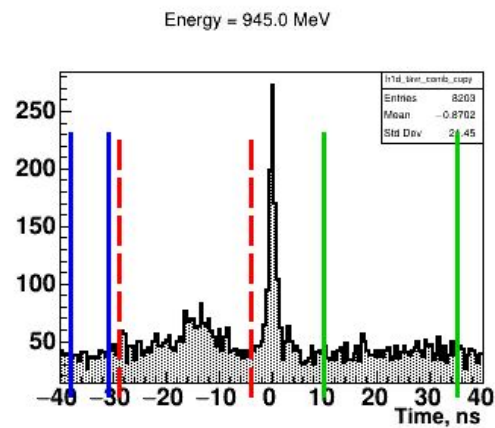
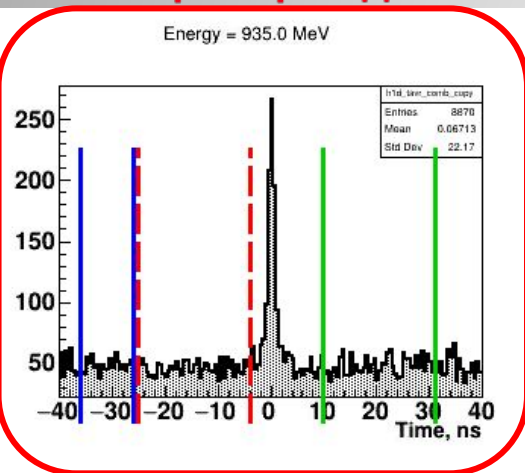


Ожидаемое
время пролета
для $n\bar{n}$ bar

Время пролета
для фоновых
событий

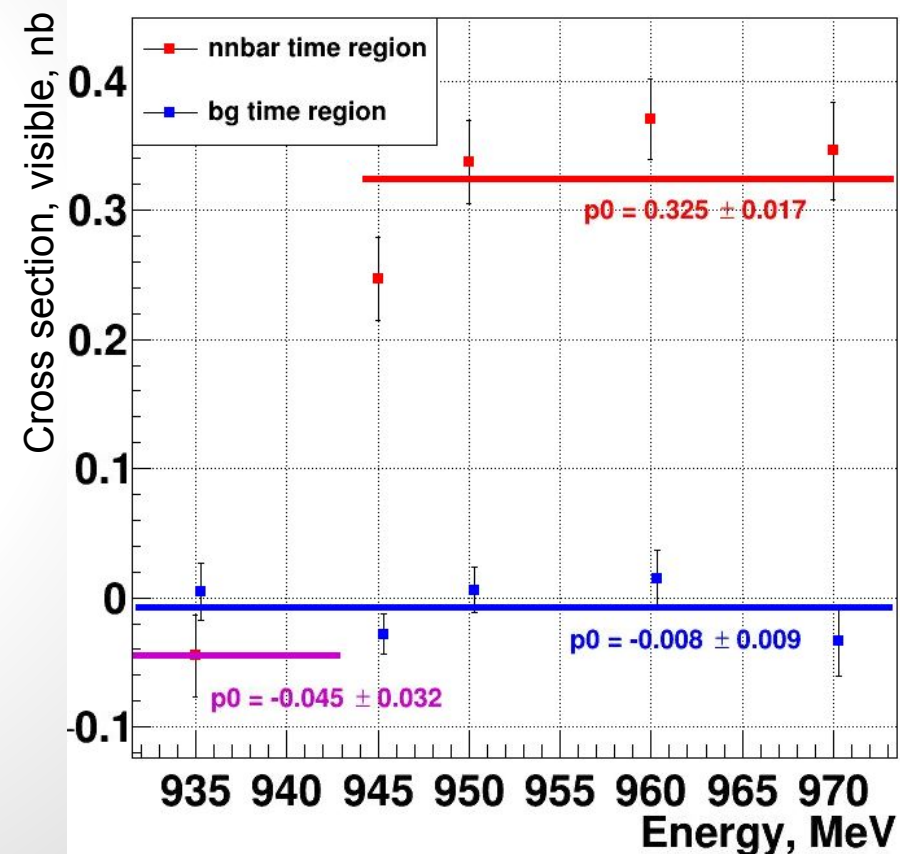
Результаты отбора $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ в зависимости от энергии пучка (2020 г.)

Ниже порога рождения $n\bar{n}$



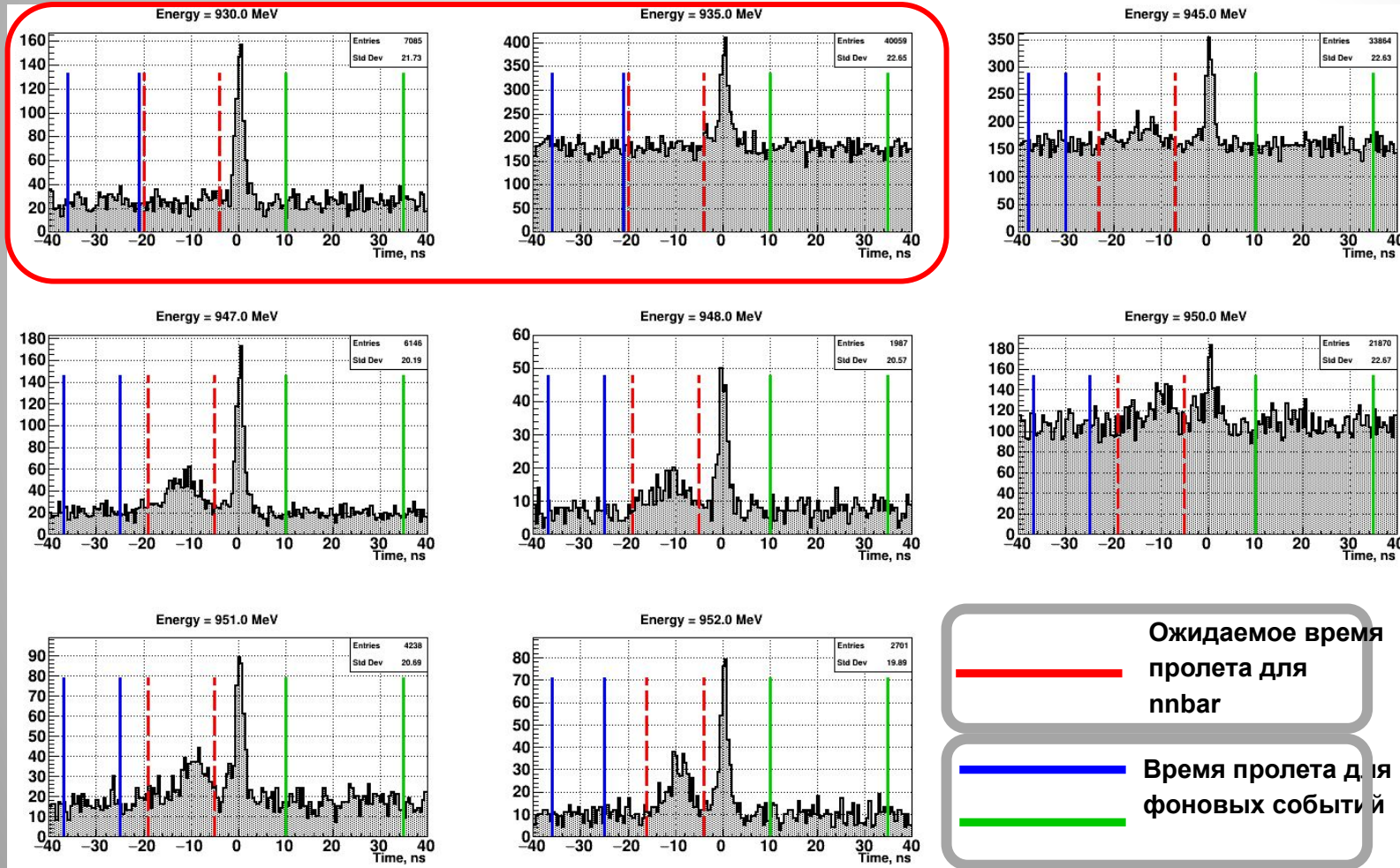
Ожидаемое
время пролета
для $n\bar{n}$

Время пролета
для фоновых
событий



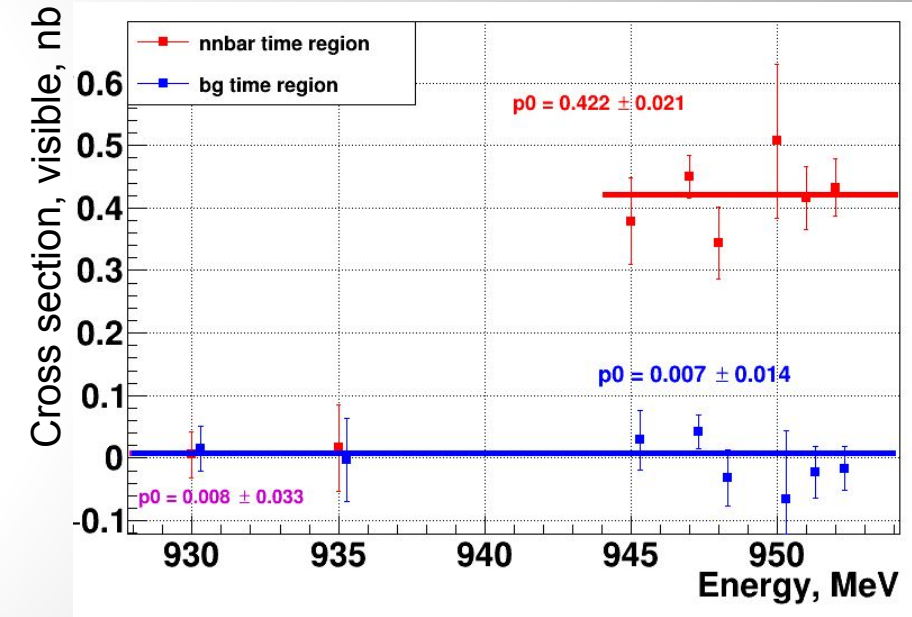
Результаты отбора $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ в зависимости от энергии пучка (2022 г.)

Ниже порога рождения $n\bar{n}$



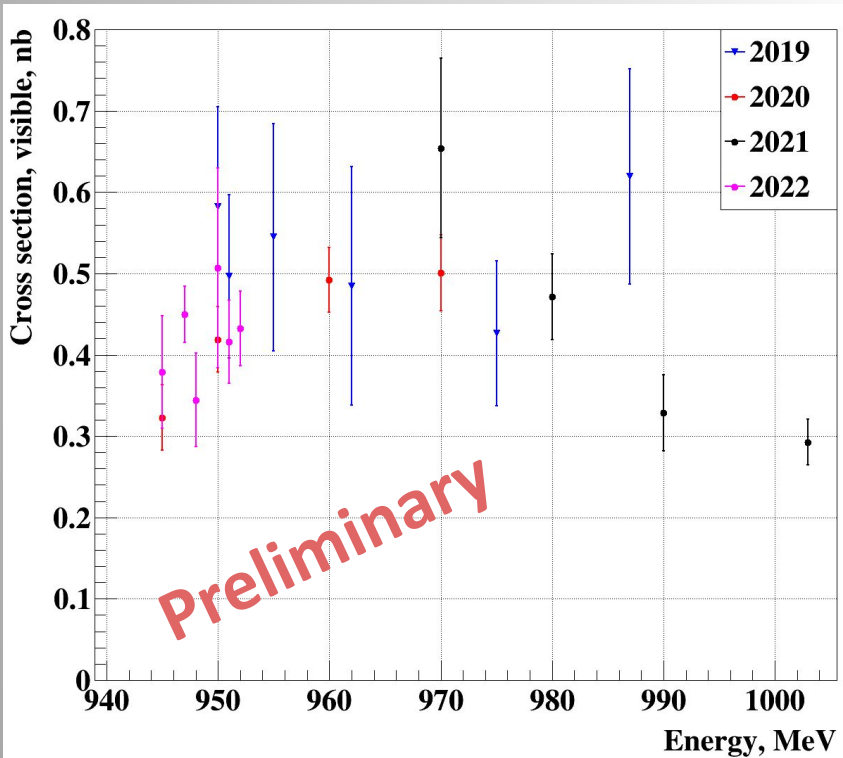
Ожидаемое время
пролета для
 $n\bar{n}$ bar

Время пролета для
фоновых событий

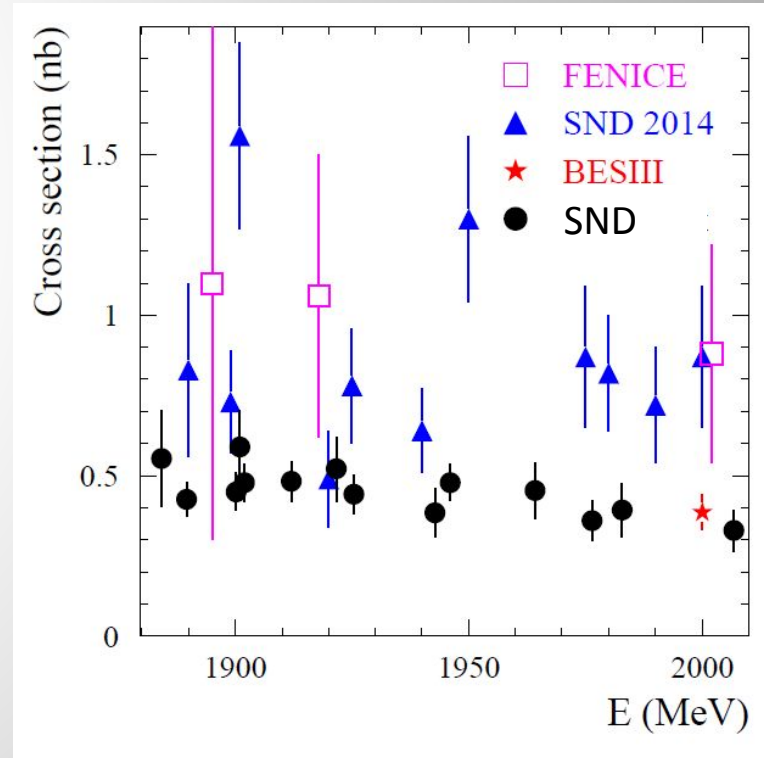
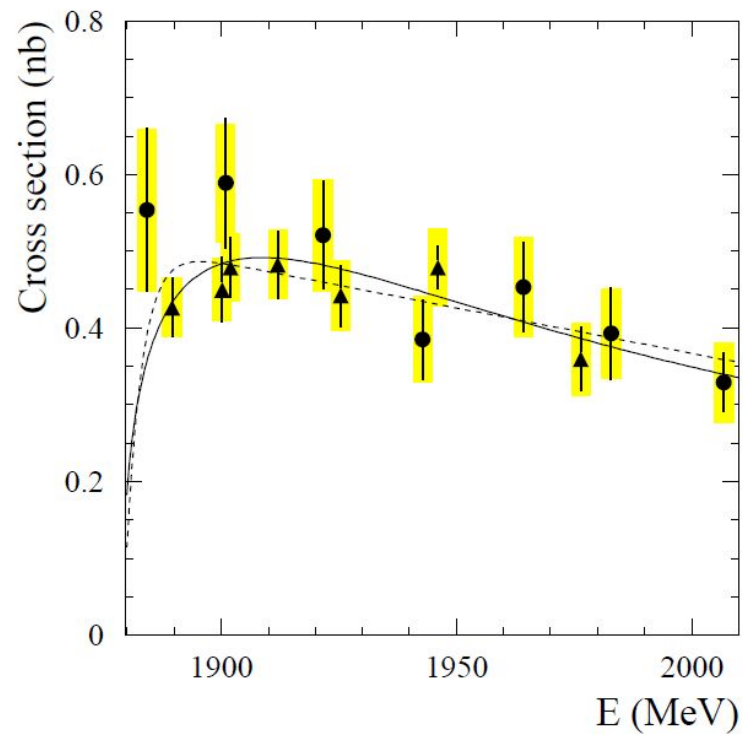


Измеренное сечение $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$

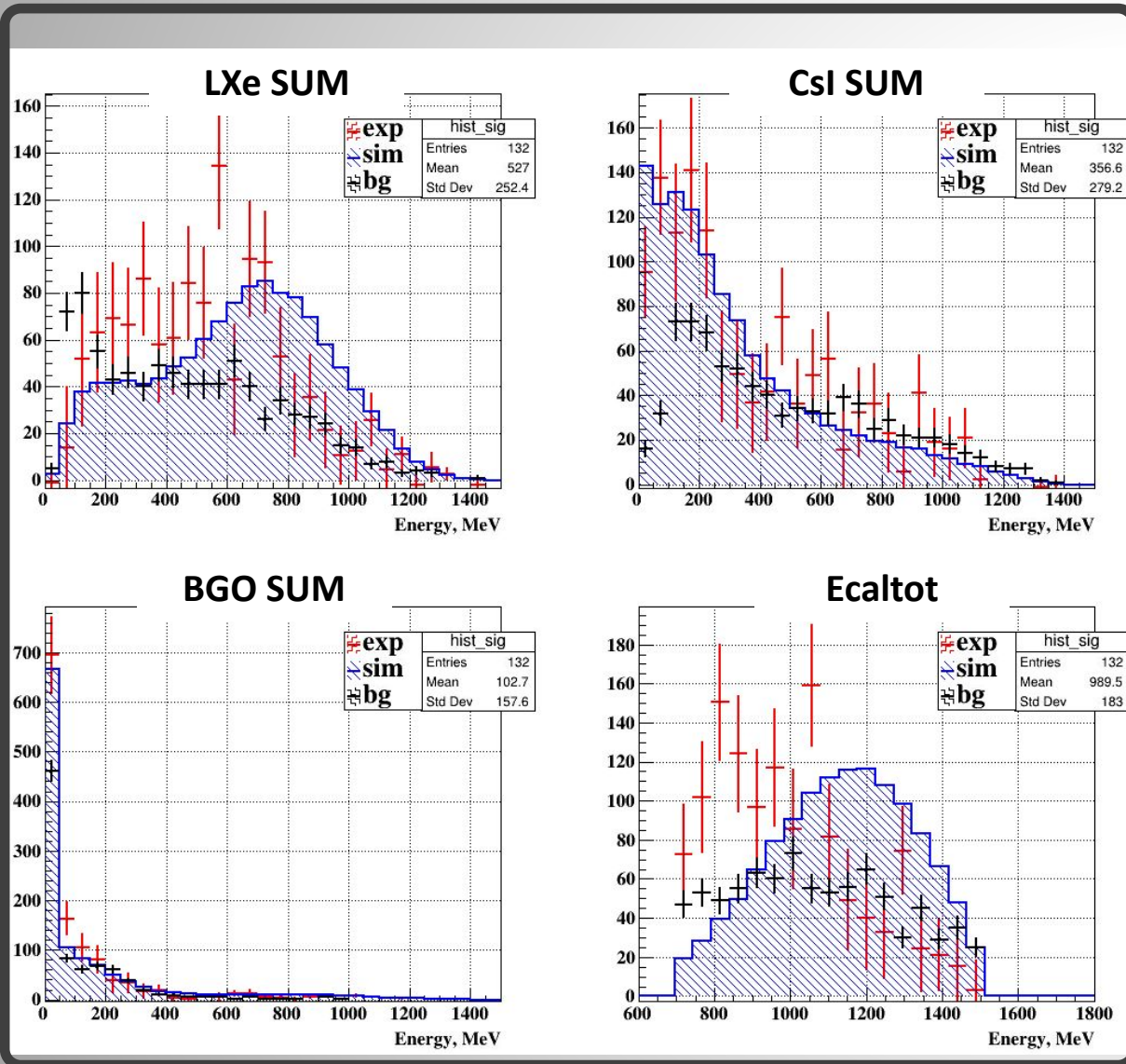
КМД-3



СНД
(данные 2017 и 2019)

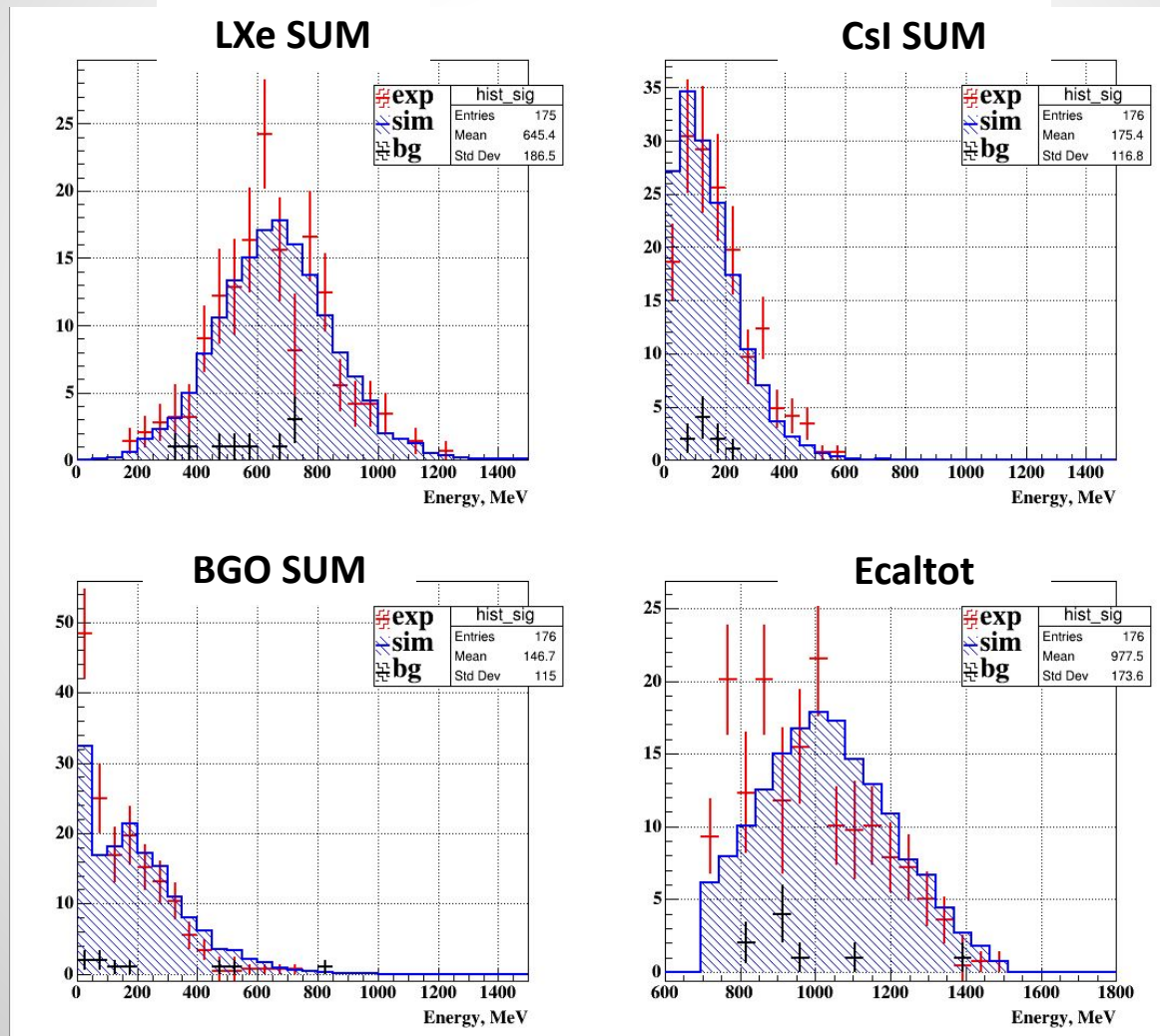


$e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$: энергоспектр SIM vs EXP



Из отобранных событий в сигнальной области (970 МэВ) вычитаются события в той же области для допороговой энергии (935 МэВ)

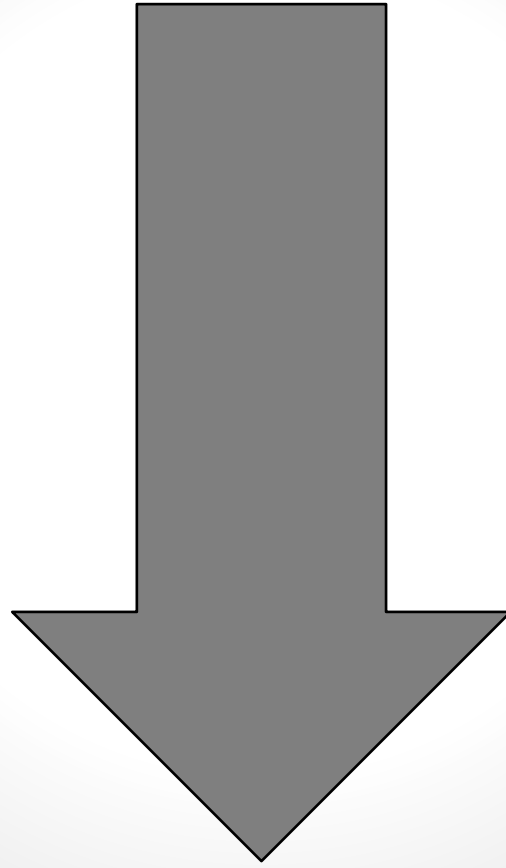
$e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$: энергосыделение SIM vs EXP



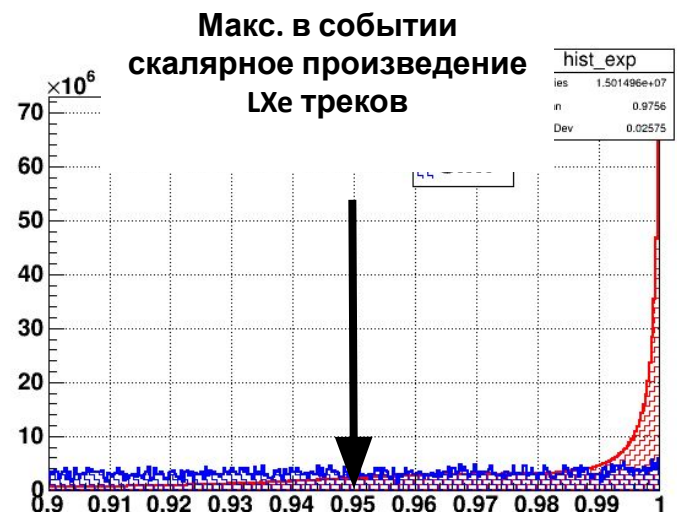
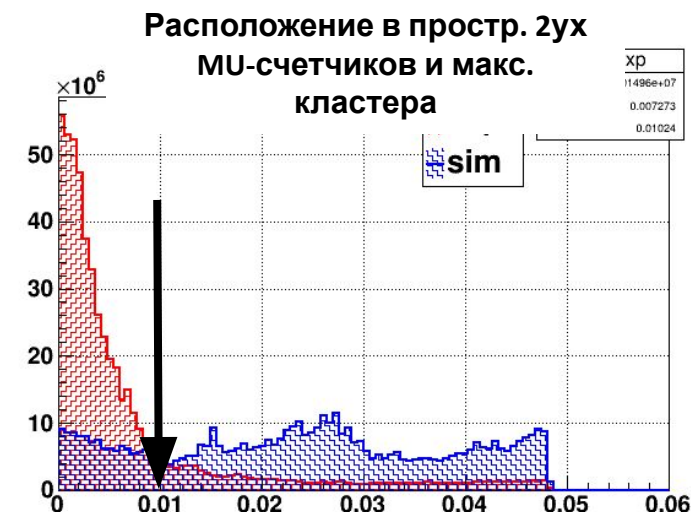
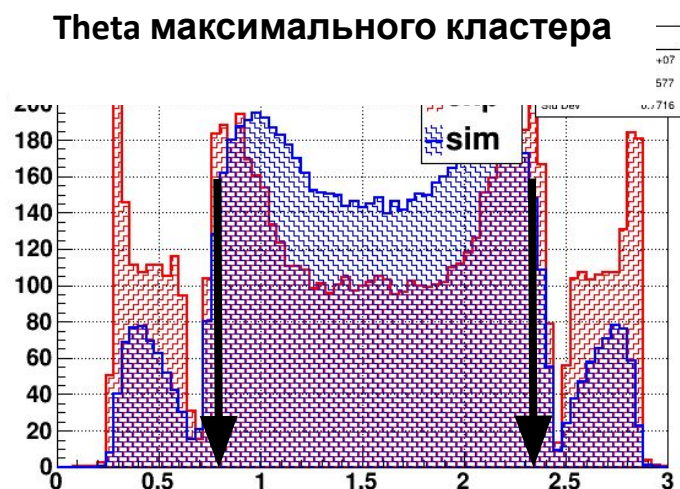
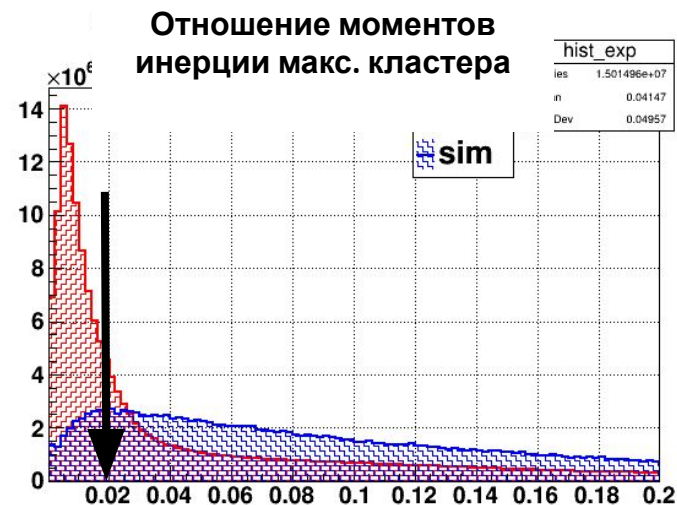
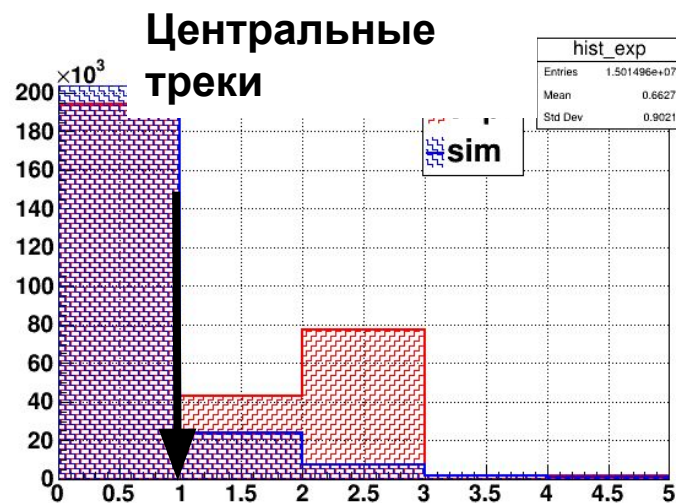
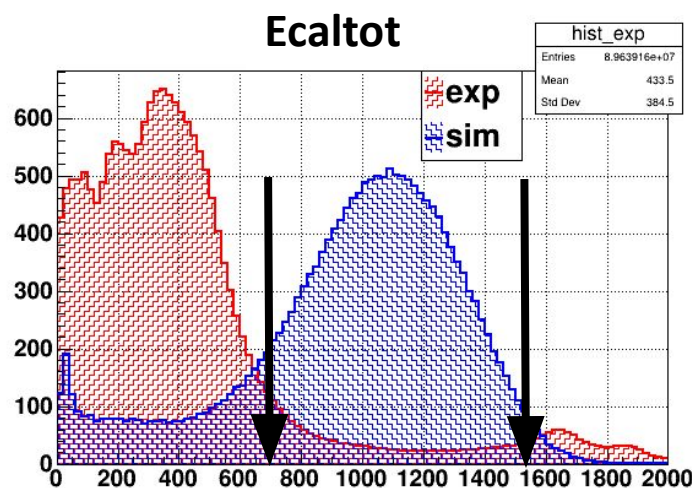
Заключение

- В области энергий коллайдера ВЭПП-2000 от порога рождения $n\bar{n}$ и до энергии пучка 1 ГЭВ получены предварительные результаты измерения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ с детектором КМД-3
- Анализ основан на статистике $\sim 205 \text{ пб}^{-1}$, набранной в сезонах 2019, 2020, 2021, 2022 годах
- Количество отобранных сигнальных событий $n\bar{n}$ составило порядка 5600 событий
- Ведется работа по улучшению систематической неопределенности связанной с моделированием взаимодействия антинейтрона с веществом

BACKUP SLIDES



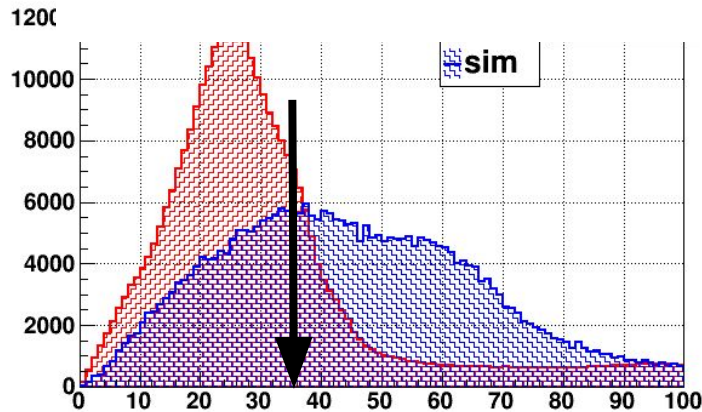
Отборы (раздельно) (1)



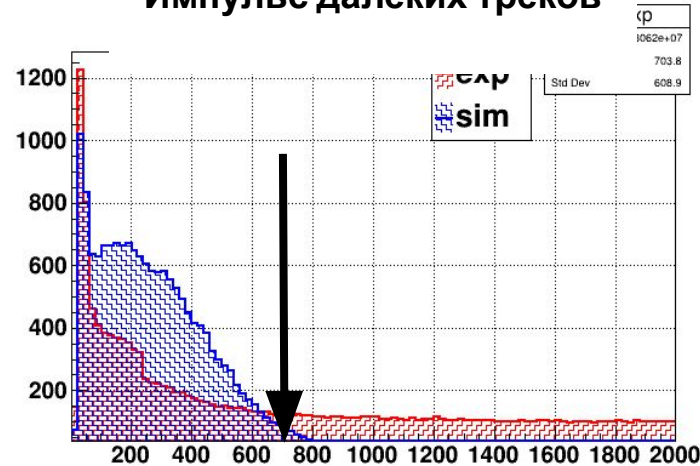
`ecaltot > 600 && ecaltot < 2000 && tptot_far < 900` (везде кроме тех отборов, где есть эти

Отборы (раздельно) (2)

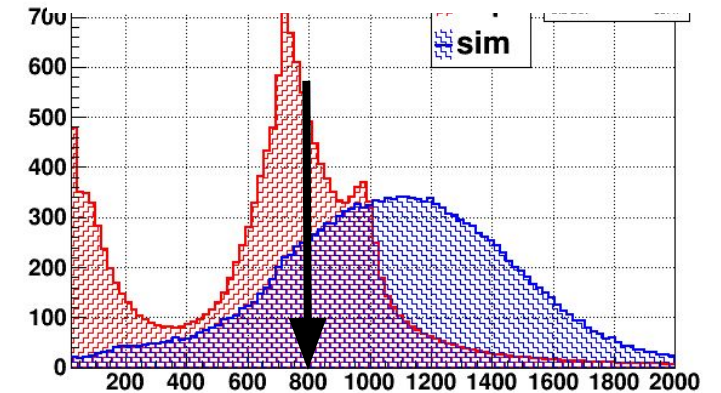
Расстояние между продолжением LHe трека и MU-счетчиком



Импульс далеких треков



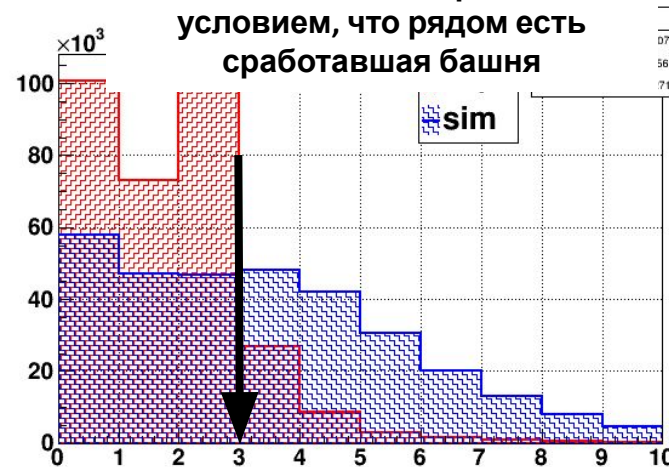
Суммарный импульс-вектор фотонов



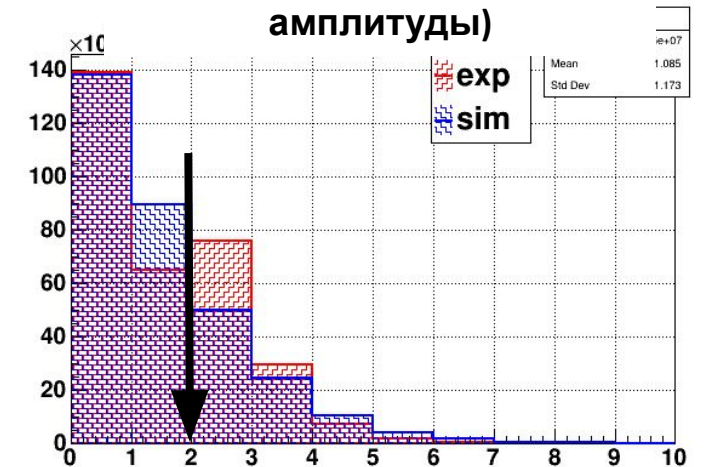
Отношение ecaltot к энергии макс. кластера



Количество LHe треков с условием, что рядом есть сработавшая башня



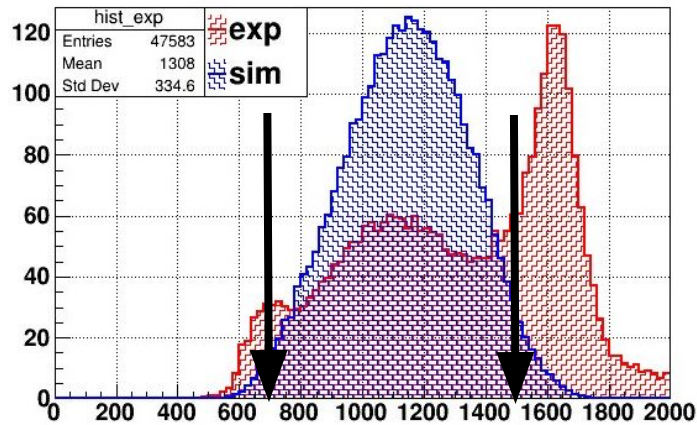
MU-счетчики (с учетом амплитуды)



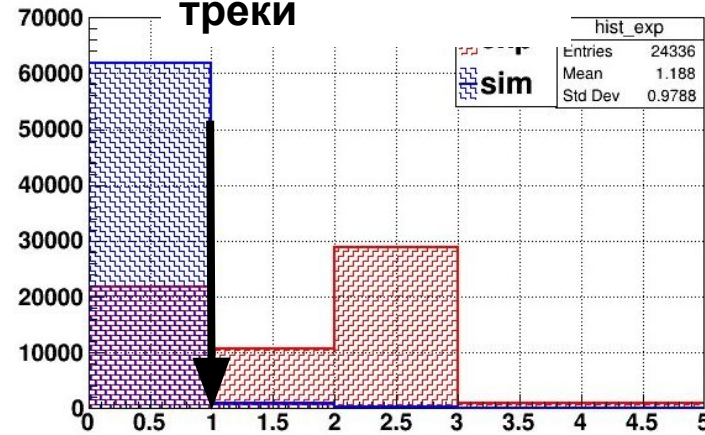
$ecal_{tot} > 600 \ \&\& \ ecal_{tot} < 2000 \ \&\& \ tptot_far < 900$ (везде кроме тех отборов, где есть эти

Отборы (с учетом других) (1)

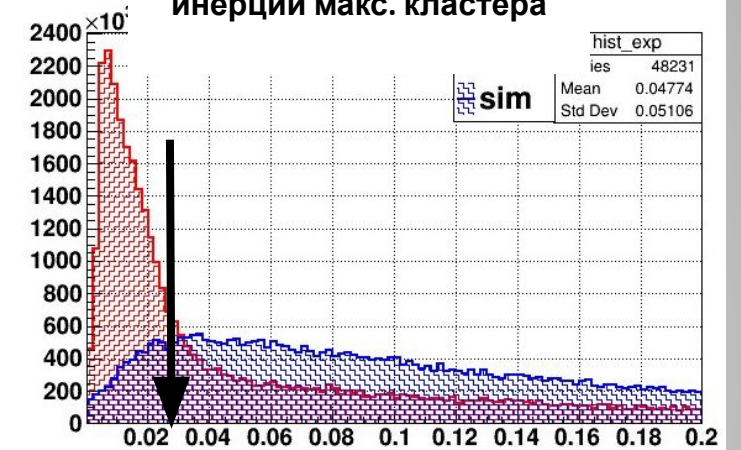
Ecaltot



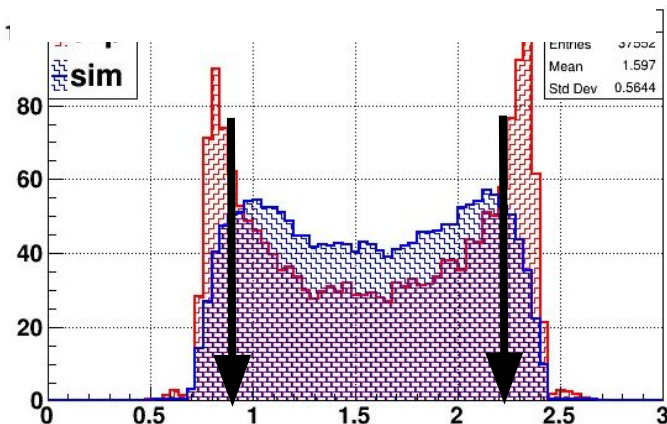
Центральные треки



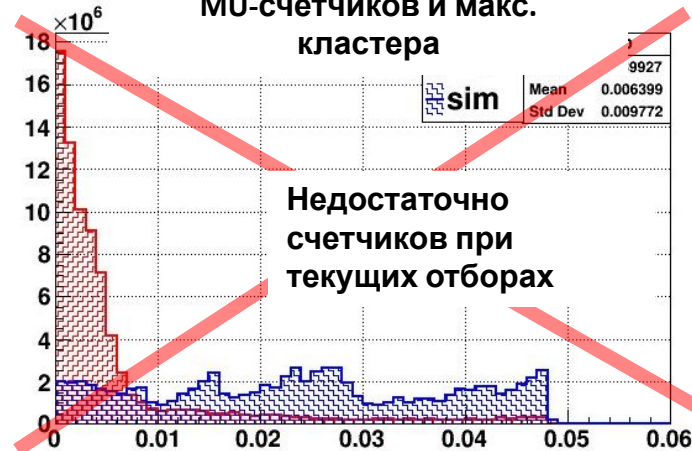
Отношение моментов инерции макс. кластера



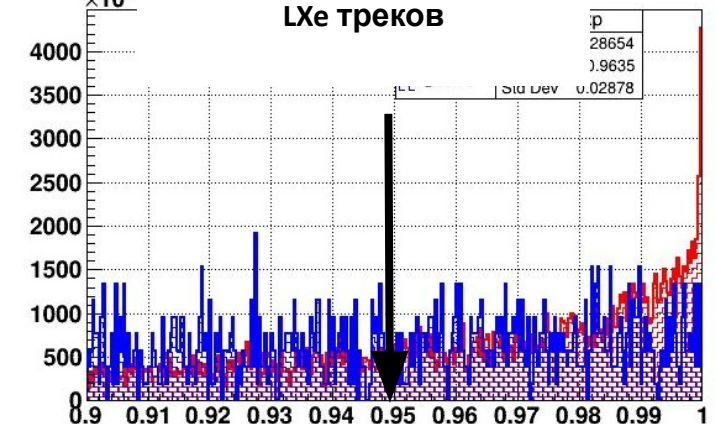
Theta максимального кластера



Расположение в простр. 2ух МУ-счетчиков и макс. кластера

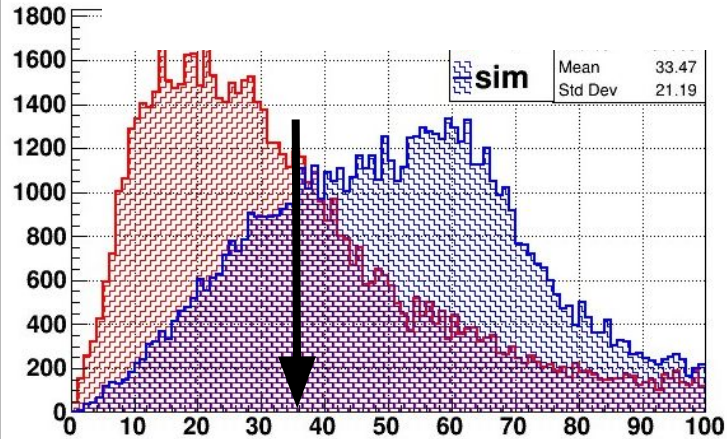


Макс. в событии скалярное произведение Lxе треков

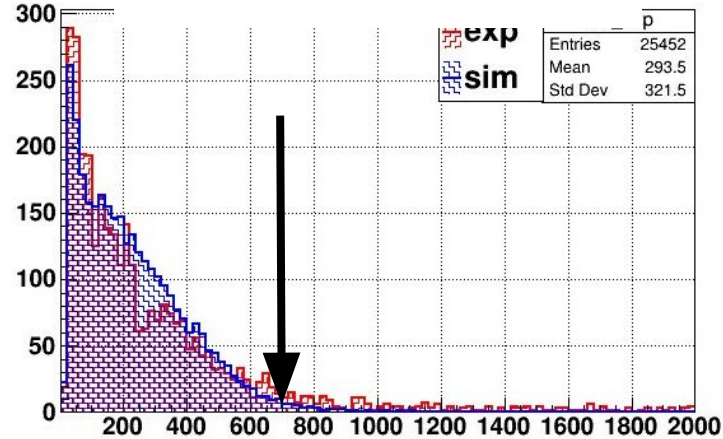


Отборы (с учетом других) (2)

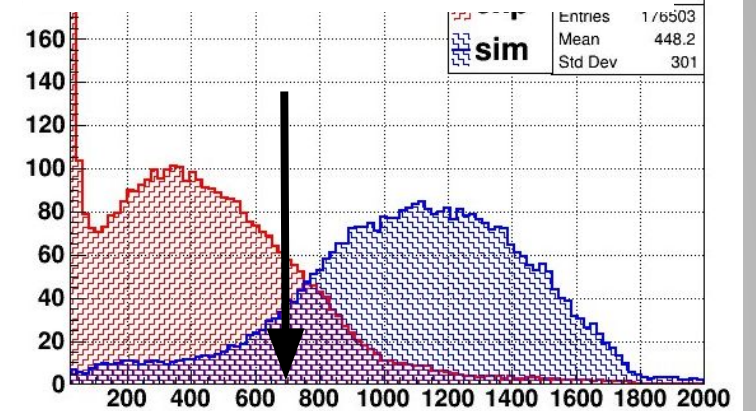
Расстояние между продолжением LHe трека и MU-счетчиком



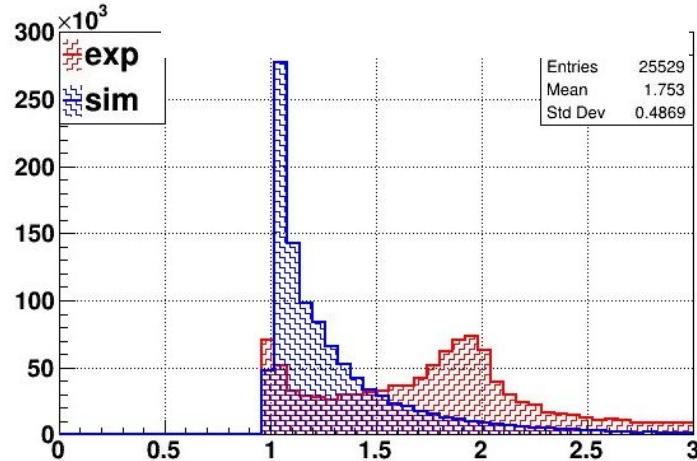
Импульс далеких треков



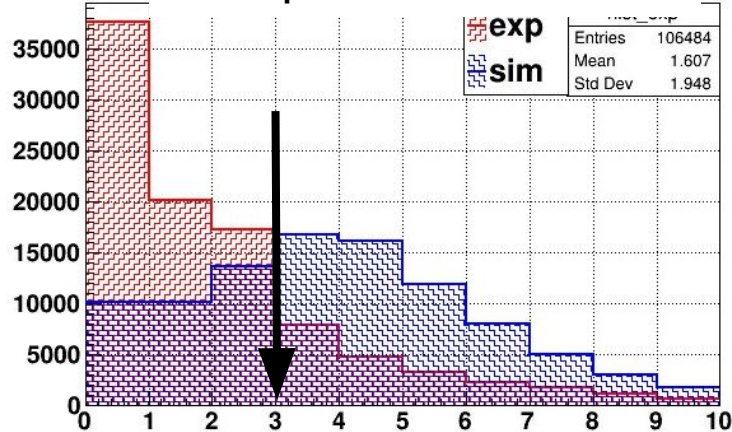
Суммарный импульс-вектор фотонов



Отношение esaltot к энергии макс. кластера



Количество LHe треков с условием, что рядом есть сработавшая башня



MU-счетчики (с учетом амплитуды)

