

Алгоритм реконструкции спектров нейтронов детектором HGND эксперимента BM@N

А. Шабанов, В. Бочарников, М. Голубева, Ф. Губер,
А. Зубанков, Н. Карпушкин, С. Морозов,
П. Парфенов, И. Пшеничнов

Институт ядерных исследований РАН

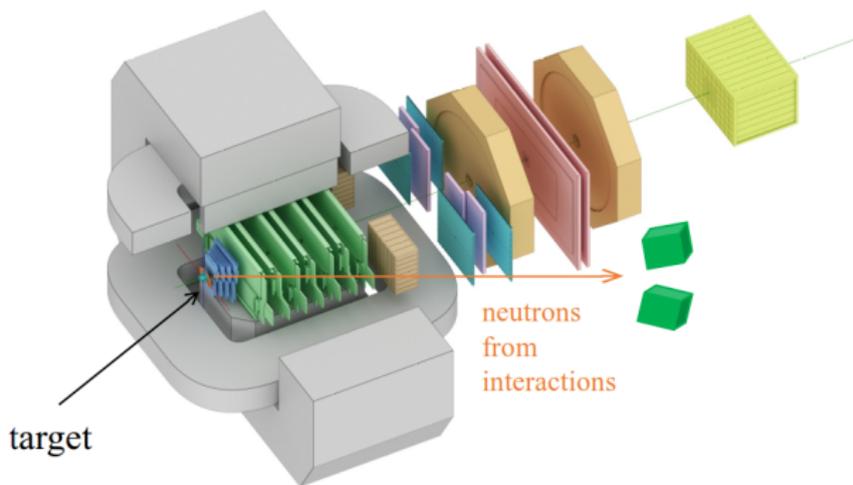
13.03.2026



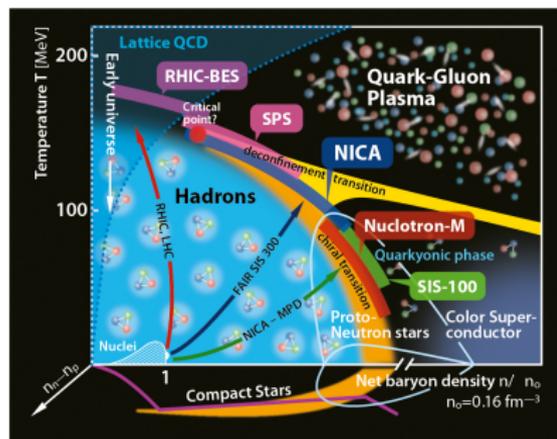
- 1 VM@N
- 2 HGND
- 3 Алгоритм
- 4 Кластеризация
- 5 Вычитание фона
- 6 Коррекции спектра
 - Обратная свертка
 - Коррекция на эффективность
- 7 Результаты
- 8 Выводы

Baryonic Matter at Nuclotron (BM@N)

- Эксперимент с фиксированной мишенью по столкновению тяжелых ионов на Нуклотроне, г. Дубна, РФ
- Энергия пучка $1 - 6 \cdot A \text{ GeV}$
- Изучение ядерной материи при высоких барионных плотностях ($2 - 4\rho_0$)



Физическая мотивация



Энергия связи на нуклон:

$$E_A(\rho, \delta) = E_A(\rho, 0) + E_{sym}(\rho)\delta^2 + O(\delta^4)$$

Изоспиновая асимметрия:

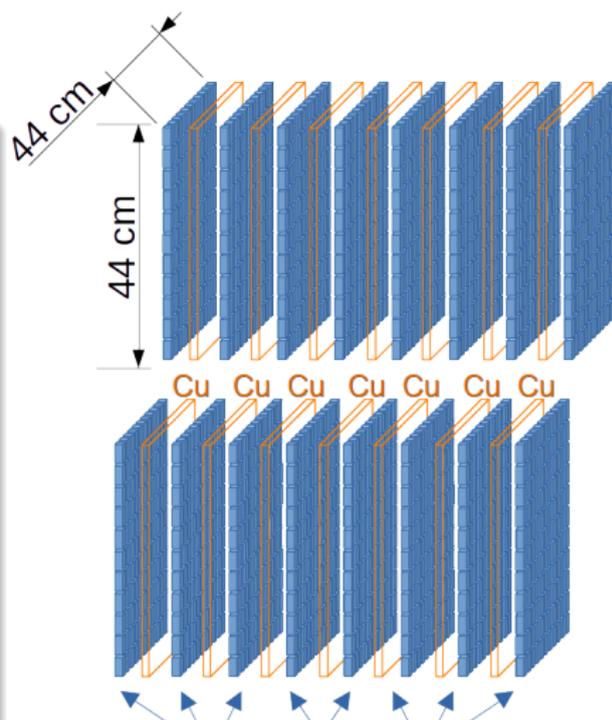
$$\delta = (\rho_n - \rho_p) / \rho$$

- Необходимо исследовать изоспиновую степень свободы уравнения состояния ядерной материи
- Нейтроны чувствительны к энергии симметрии
- Практически отсутствуют данные при $1 < T_n < 10 \cdot A \text{ GeV}$

Highly Granular Neutron Detector (HGND)

HGND был разработан в дополнение к существующим детекторам BM@N для измерения нейтронов.

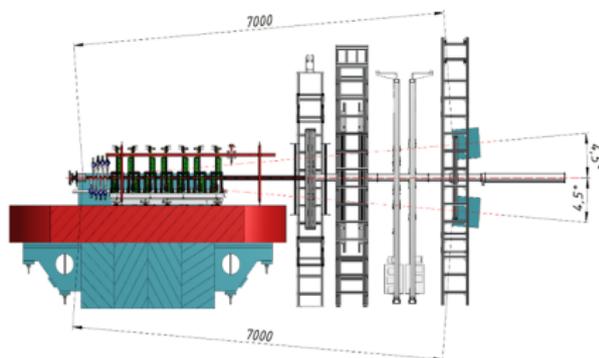
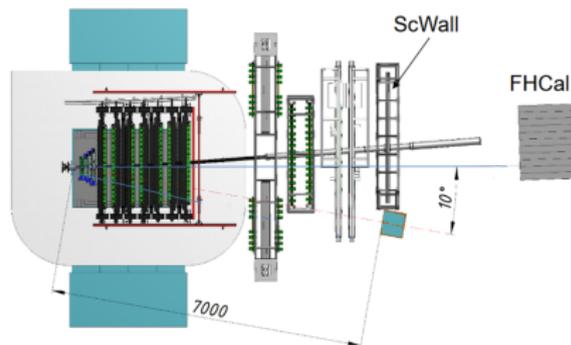
- Два плеча
- 8 слоев сцинтиллятора 11x11 ячеек
- 7 слоев медного конвертора между сцинтилляционными слоями
- MPPC и считывающая электроника присоединены непосредственно к сцинтиллятору
- Временное разрешение 130ps



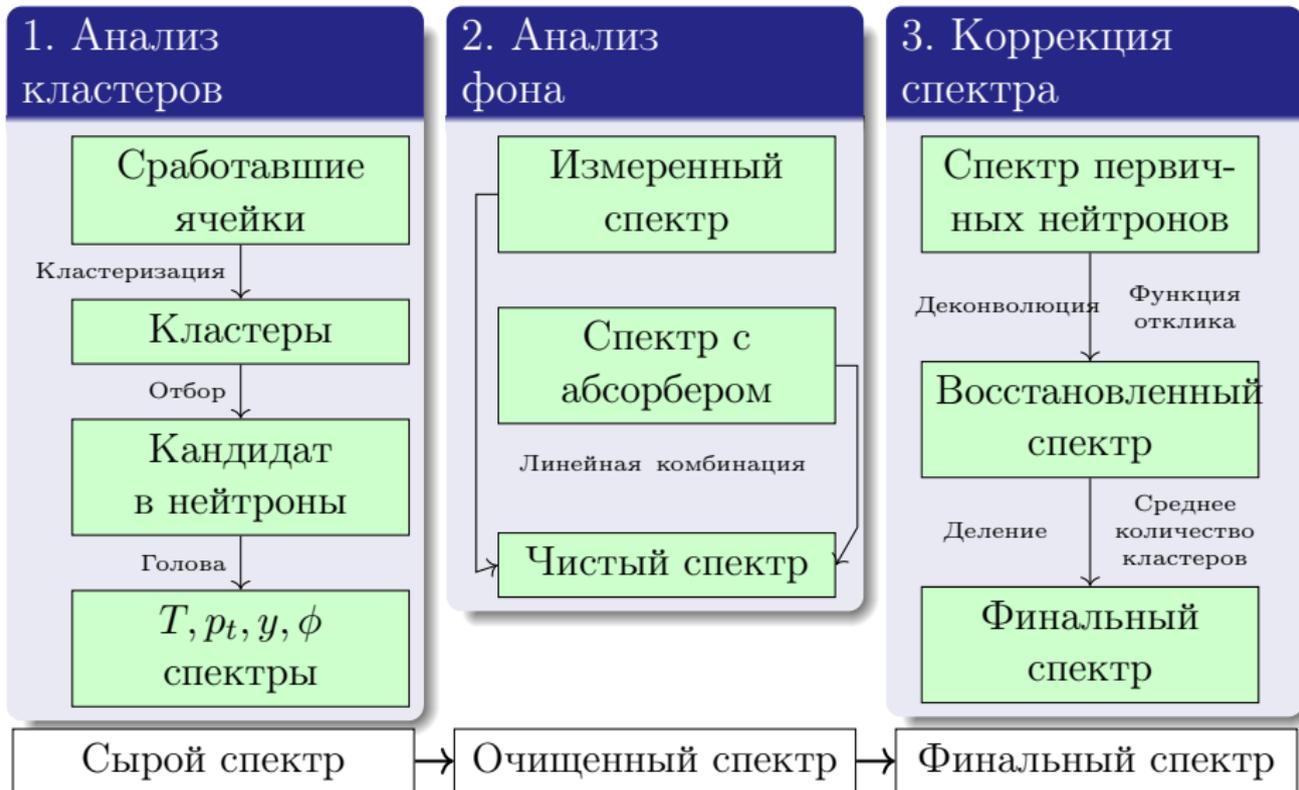
Моделирование

Для проверки алгоритма реконструкции нейтронов было проведено Монте-Карло моделирование

- Xe+Cs, энергия в СЦМ
 $\sqrt{s_{NN}} = 3.26$ ГэВ
- 500 000 событий
- Генератор DCM-QGSM-SMM
- Полная геометрия BM@N



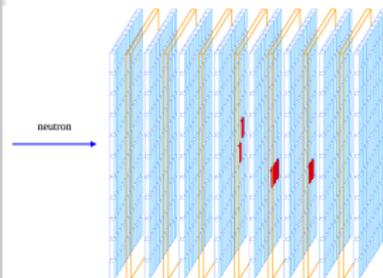
Последовательность анализа



Анализ кластеров

Алгоритм

- 1 Выбираются ячейки с $E_{dep} > 3\text{MeV}$ (образование фона)
- 2 Соседние ячейки объединяются в кластеры
- 3 Для каждой ячейки вычисляется $\beta = \frac{1}{c}d/t$; ячейка с наибольшей β помечается как "голова"
- 4 Отбор кластеров



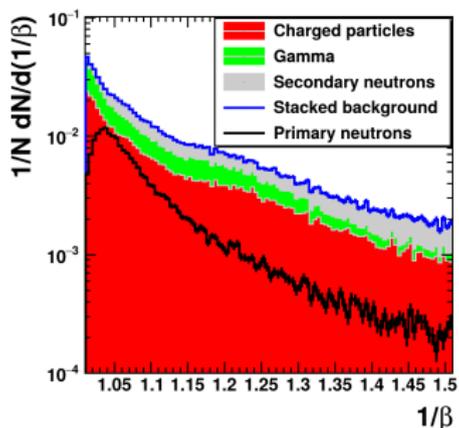
Критерии отбора кластеров

- Нет хита в слое 0 (отбрасывание заряженных частиц)
- Нет хита в слое 1 (отбрасывание γ)
- $\beta < 0.9$ (отбрасывание быстрых e^+ , e^- , γ)
- $T_{reconstructed} > 300\text{ MeV}$ (подавление вторичных нейтронов)

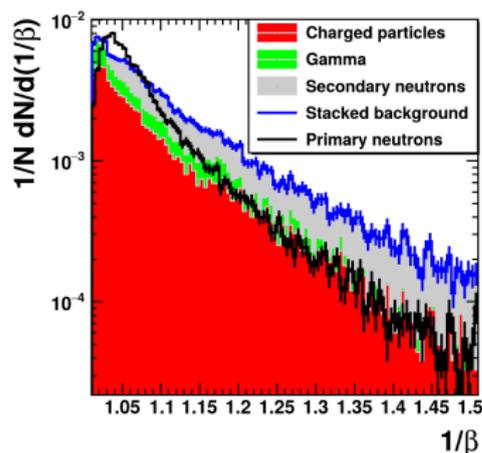
Подавление фона за счет отбора кластеров

Количество **фоновых частиц**, вызывающих срабатывание HGND, во много раз больше количества **нейтронов** вызвавших срабатывание.

До отбора



После отбора



Отбор кластеров улучшает отношение S/V в ~ 10 раз.

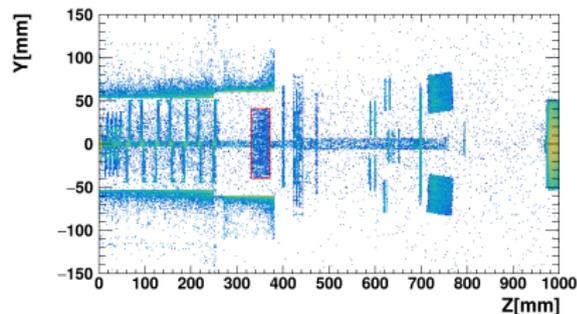
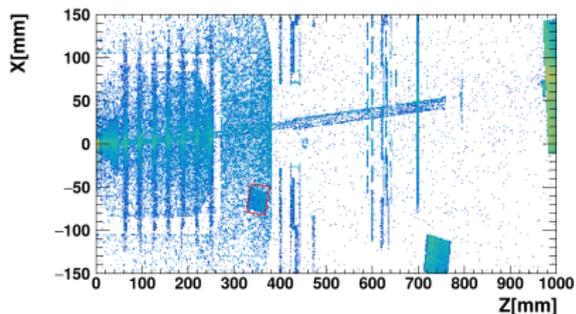
Однако сигнал остается сравнимым с фоном.

$1/\beta \sim TOF$ (время пролета) – основная величина, измеряемая HGND

Использование пластикового абсорбера для вычитания фона

Для оценки и вычитания фона предлагается провести дополнительный набор данных:

- пластиковый абсорбер, толщиной 40 см
- 320 см от мишени, на пути между мишенью и HGND

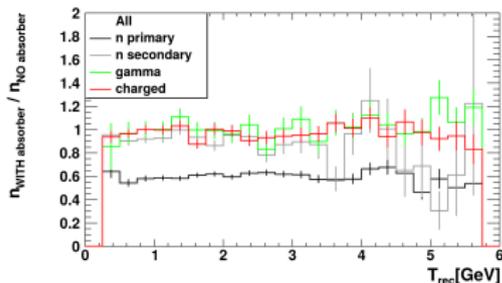


Влияние абсорбера на нейтроны и фон

Сигнал (S) - первичные нейтроны, летящие из мишени
Фон (B) - рассеянные и выбитые из материалов детекторов нейтроны, **заряженные частицы**, **γ -кванты**

Спектр без абсорбера

$$N_{NOAbs} = N_S + N_B$$



Спектр с абсорбером

$$N_{Abs} = k_S \cdot N_S + k_B \cdot N_B$$

Фон

$$k_B \simeq 1$$

Абсорбер практически не влияет на фон

Сигнал

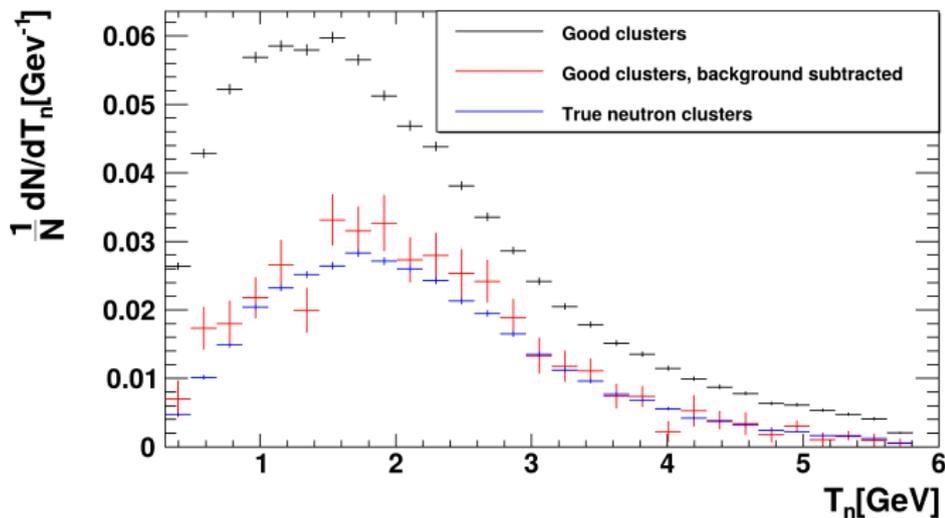
$$k_S \simeq 0.6$$

Абсорбер ослабляет поток первичных нейтронов

Вычитание фона

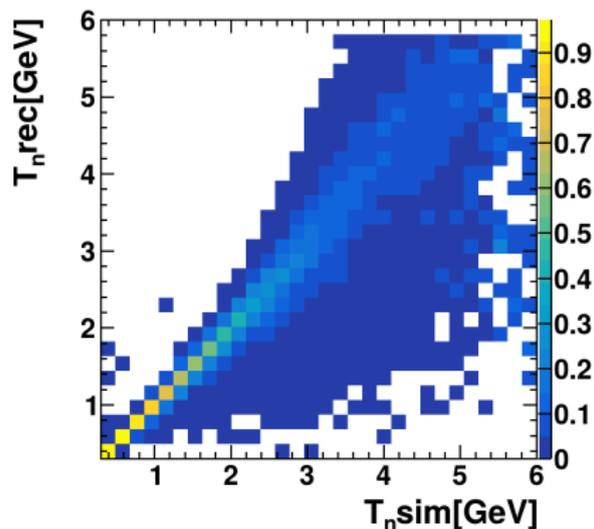
Линейная комбинация спектров с абсорбером и без абсорбера дает чистый спектр сигнала

$$N_S = \frac{N_{NO\ abs} - N_{Abs}}{1 - k_S}$$



Обратная свертка (деконволюция)

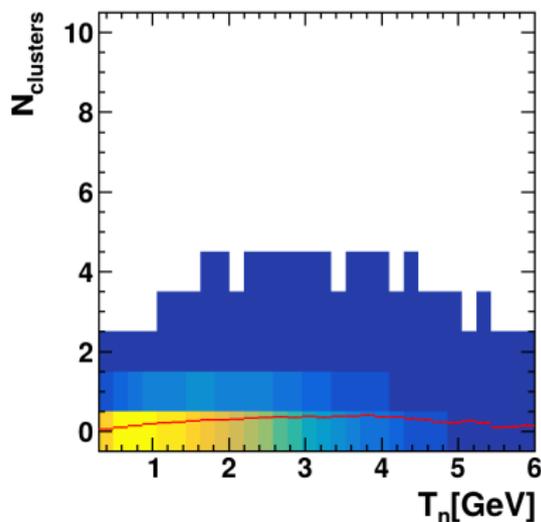
Функция отклика HGND на
первичный нейтрон.



Для деконволюции спектра
используется алгоритм
Ричардсона-Люси. Функция
отклика берется из Монте-Карло
моделирования.

Коррекция на эффективность

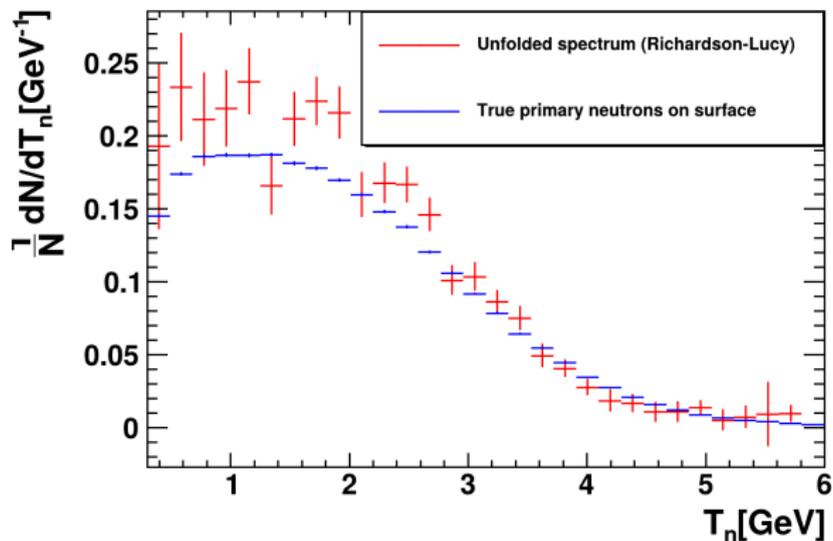
Количество кластеров,
произведенных одним нейтроном



Для коррекции спектр делится на среднее число кластеров на нейтрон, которое в данном случае является аналогом эффективности

$$N_{true} = \frac{N_{measured}}{\langle N_{clusters} \rangle}$$

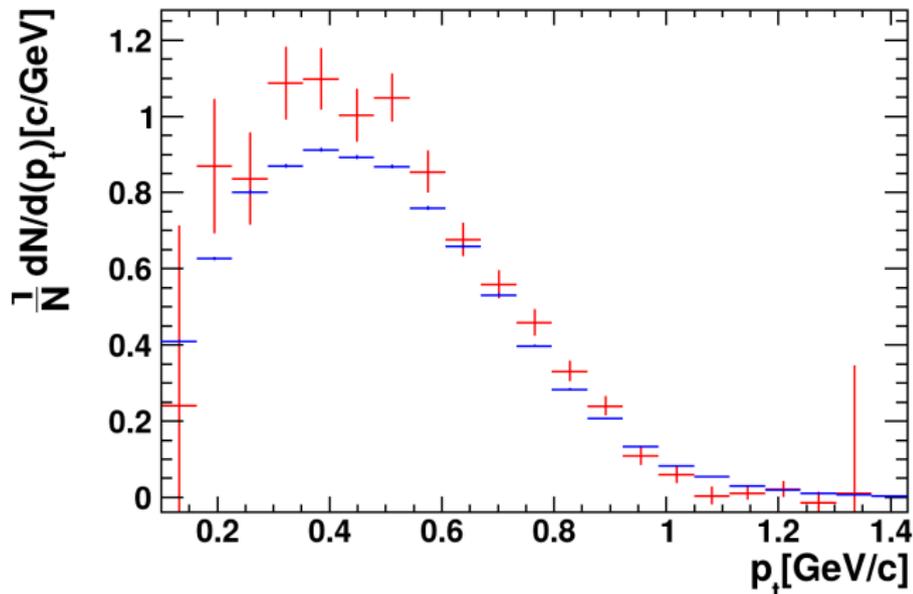
Кинетическая энергия



Истинный спектр нейтронов

Реконструированный спектр нейтронов

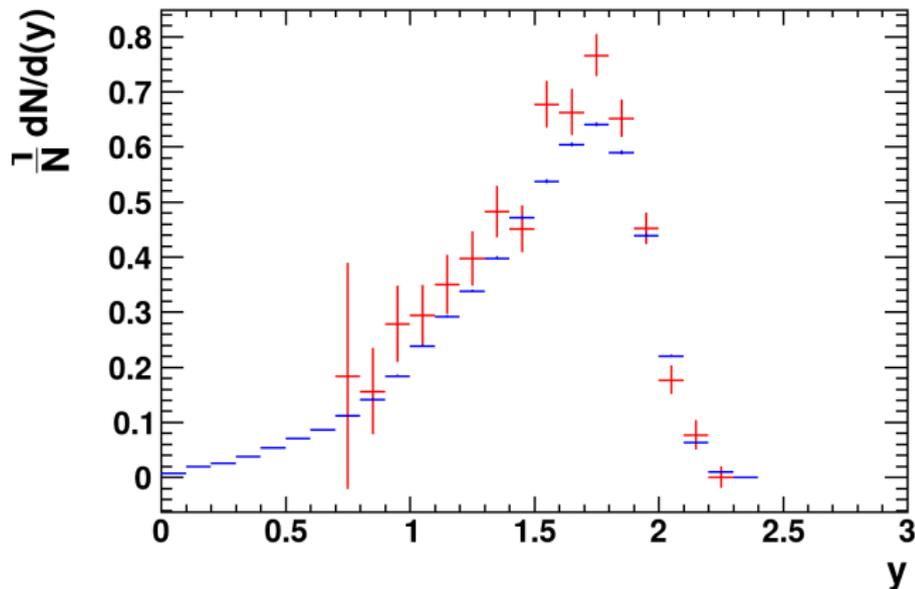
Поперечный импульс



Истинный спектр нейтронов

Реконструированный спектр нейтронов

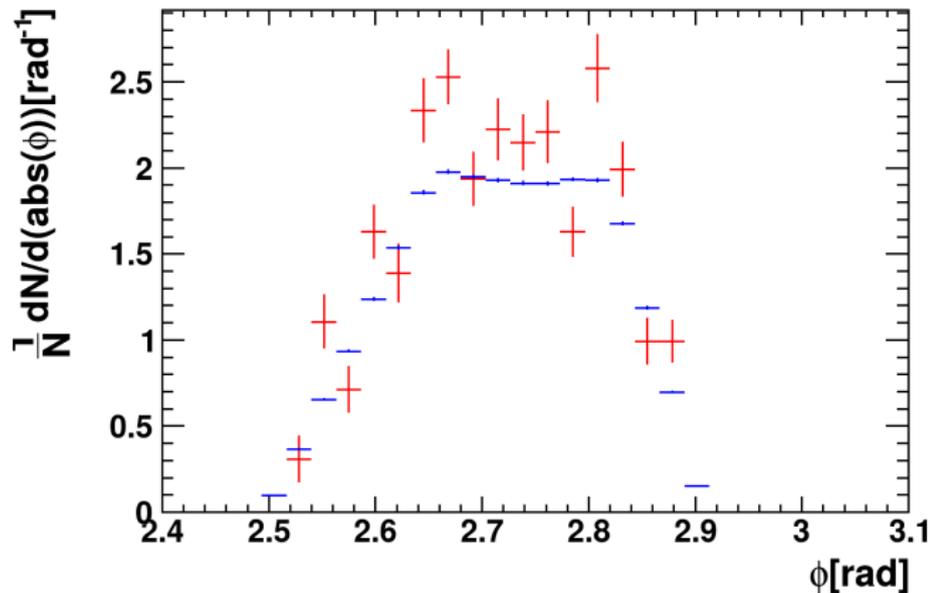
Быстрота



Истинный спектр нейтронов

Реконструированный спектр нейтронов

Азимутальный угол



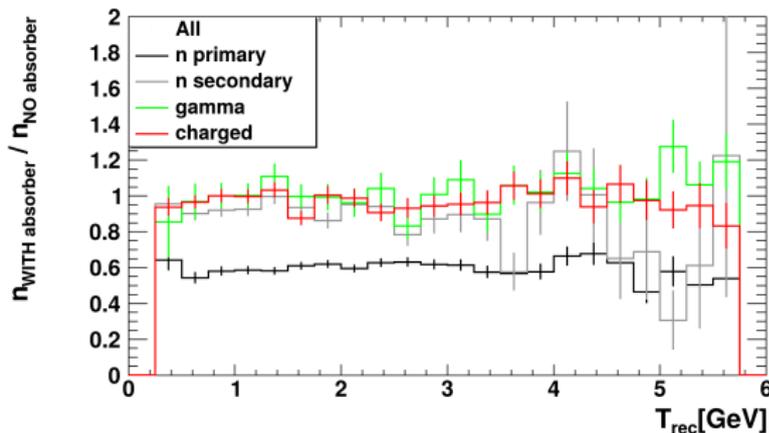
Истинный спектр нейтронов

Реконструированный спектр нейтронов

Систематическая ошибка из-за процедуры вычитания фона

$$N_S = \frac{N_{\text{NO abs}} - N_{\text{Abs}} - N_B \cdot (1 - k_B)}{1 - k_S}$$

$$\left. \begin{array}{l} N_B \simeq N_S \\ k_B \simeq 0.95 \\ 1 - k_S \simeq 0.4 \end{array} \right\} \rightarrow \Delta N_S \simeq +10\%$$



Выводы

- Работан алгоритм реконструкции спектра нейтронов в присутствии высокой загрузки фоновыми частицами.
- Алгоритм включает:
 - 1 анализ кластеров
 - 2 вычитание фона
 - 3 обратную свертку с функцией отклика
 - 4 коррекцию на эффективность и множественные срабатывания детектора.
- Систематическая ошибка из-за процедуры вычитания фона составляет $\Delta N \simeq +10\%$.
- Необходима дальнейшая отладка отдельных этапов реконструкции.

Спасибо за внимание!

Task

- True energy: E
- Measured energy: E'
- True spectrum: $f(E)$
- Measured spectrum: $g(E')$
- Response function: $R(E'|E)$
- Probability of n clusters: $P(n|E)$

$$g(E') = \int n \cdot P(n|E) \cdot R(E'|E) \cdot f(E) dE = \langle n \rangle_E \cdot R(E'|E) \cdot f(E)$$

Solution

$$f_{\text{weighted}}(E) = \langle n \rangle_E \cdot f(E)$$

$$g(E') = \int R(E'|E) \cdot f_{\text{weighted}}(E) dE$$

1)

$$f_{\text{weighted}}(E) = \text{Unfolding}(g(E'), R(E' | E))$$

2)

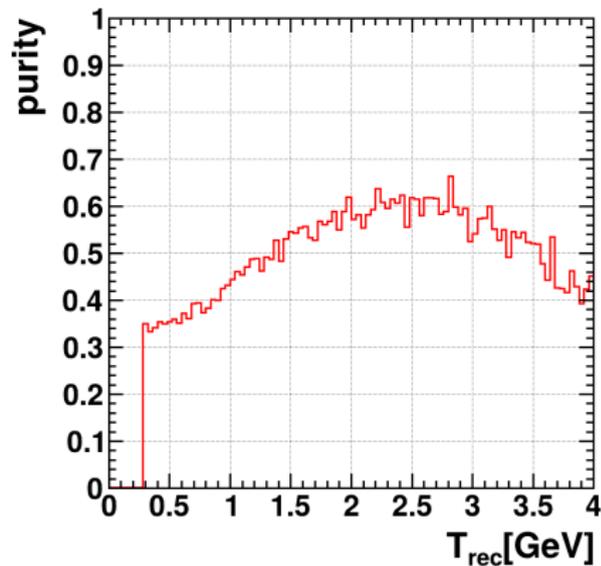
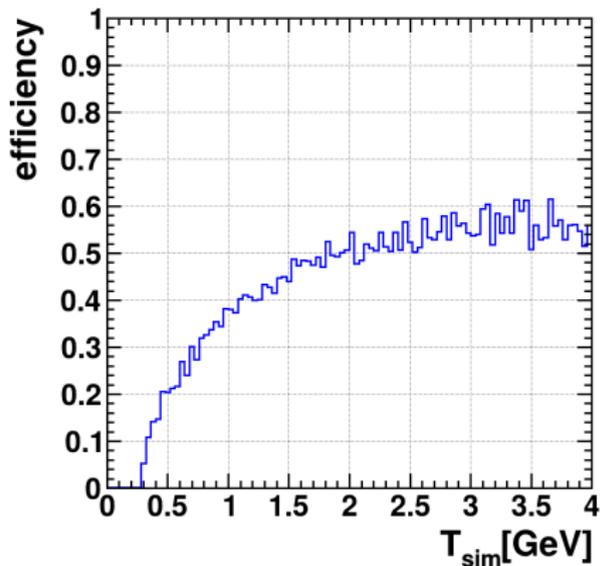
$$f(E) = \frac{f_{\text{weighted}}(E)}{\langle n \rangle_E}$$

Reconstruction Quality

Performance Metrics

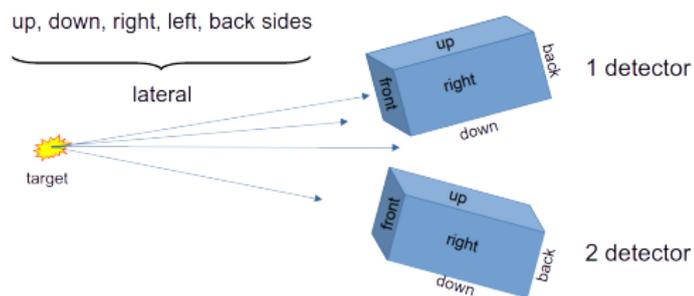
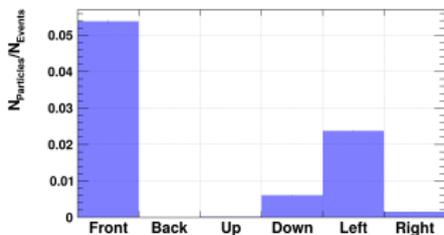
$$\text{Efficiency} = \frac{N_{\text{neutron match}}}{N_{\text{neutrons}}}$$

$$\text{Purity} = \frac{N_{\text{cluster match}}}{N_{\text{clusters}}}$$



Charged particles

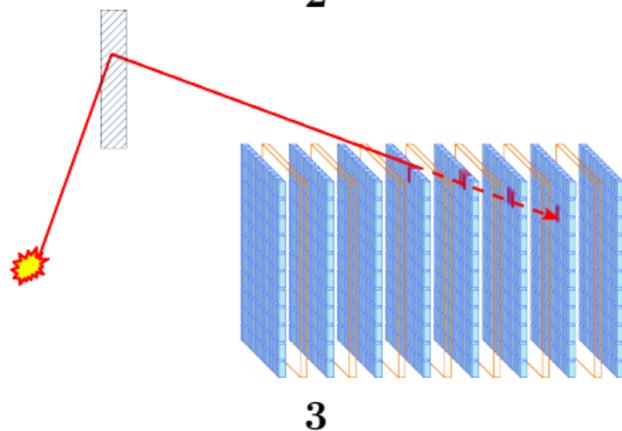
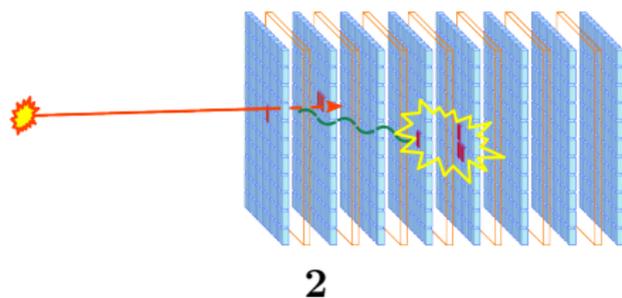
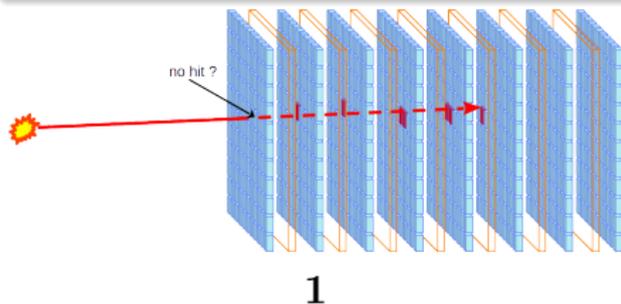
Charged particles produce clusters despite veto applied. Where do they come from?



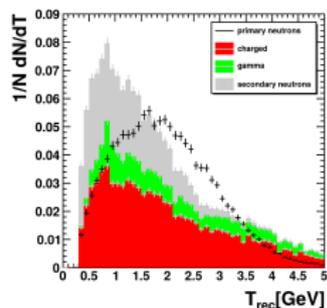
- ① Charged particles come through lateral sides
- ② Charged particles produce secondary clusters

Reasons of inefficiency of cuts

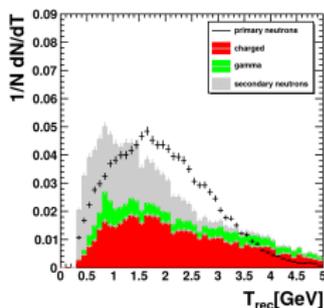
- 1 No hit in veto
- 2 Secondary cluster
- 3 Lateral hit



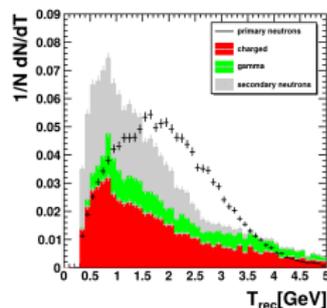
Background after additional cuts



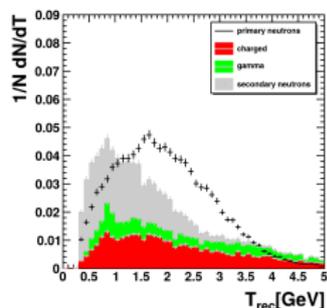
Basic selection



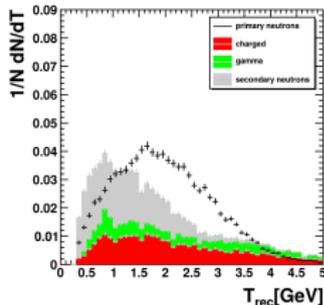
Border cut



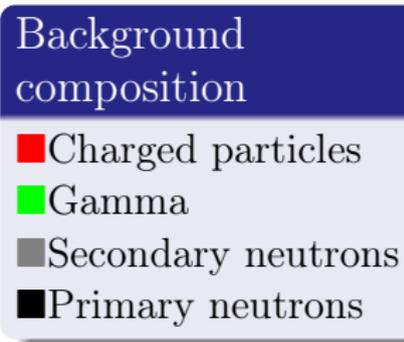
Veto coincidence check



Border cut & veto coincidence check



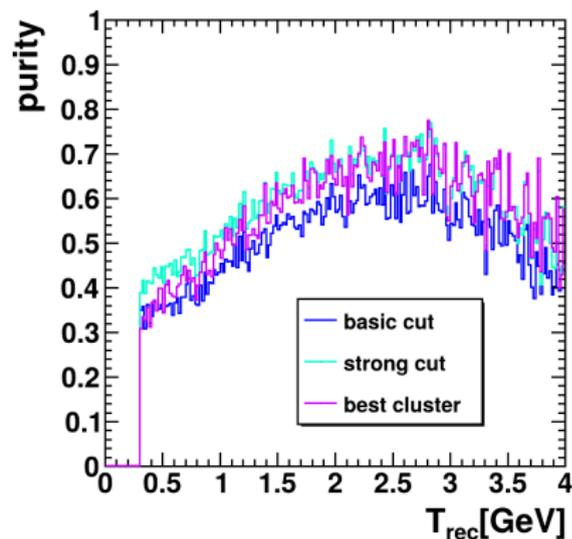
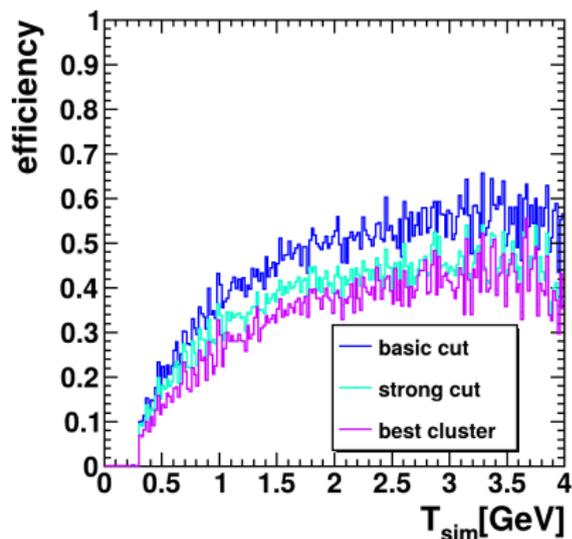
Best cluster



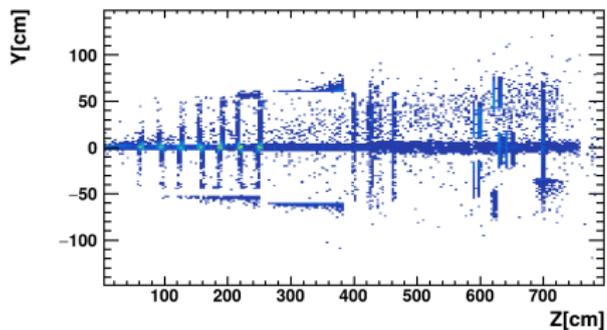
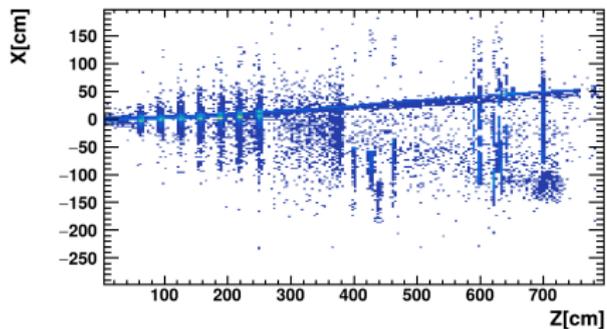
Quality after new cuts

Additional strict criteria improve purity but reduce efficiency. Strong cut:

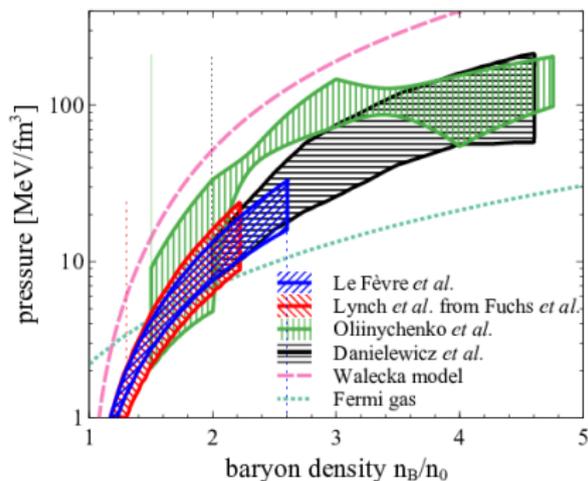
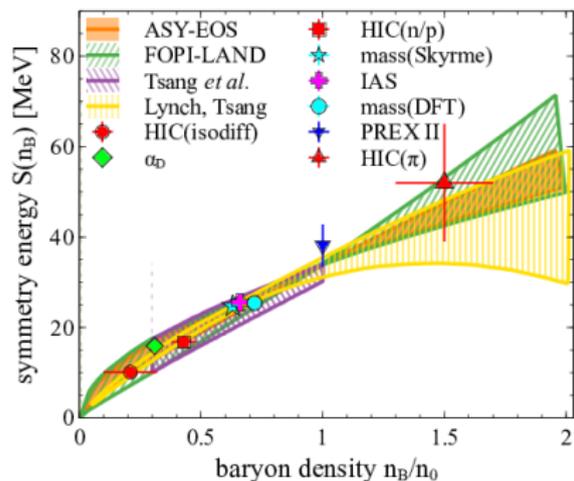
- Border cell rejection
- Veto layer coincidence check



Background sources



EOS models



A.Sorensen et al., Prog.Part.Nucl.Phys. 134 (2024), 104080

HGND geometry

