

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)»**

**«Разработка методов идентификации и реконструкции
энергии нейтронов эксперимента VM@N»**

Аспирант

Научная специальность

Научный руководитель

Должность, степень, звание

Зубанков Александр Александрович

1.3.2 Приборы и методы экспериментальной
физики

Салахутдинов Гаяр Харисович

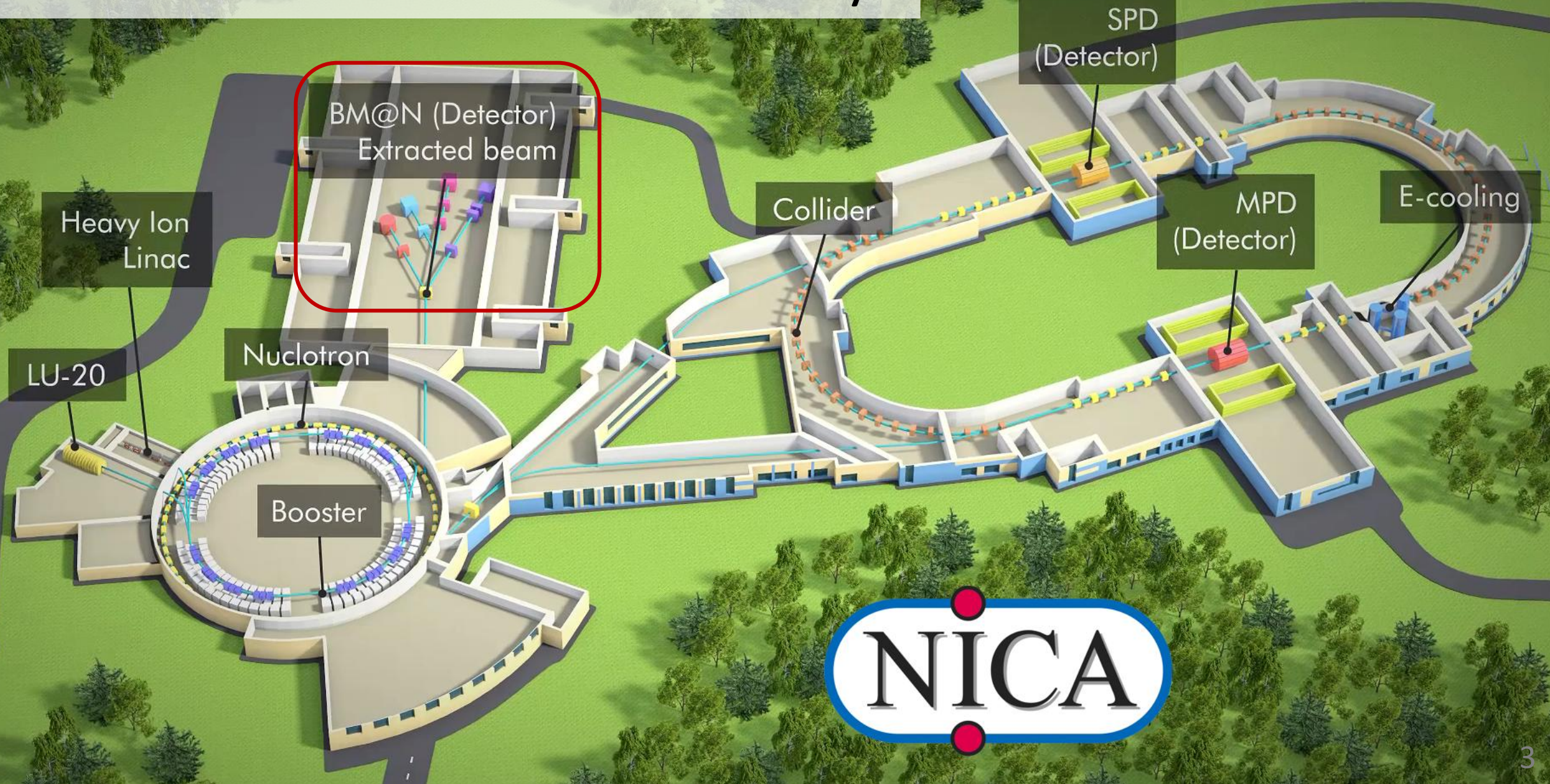
д.ф.-м.н, профессор

Москва, 2026

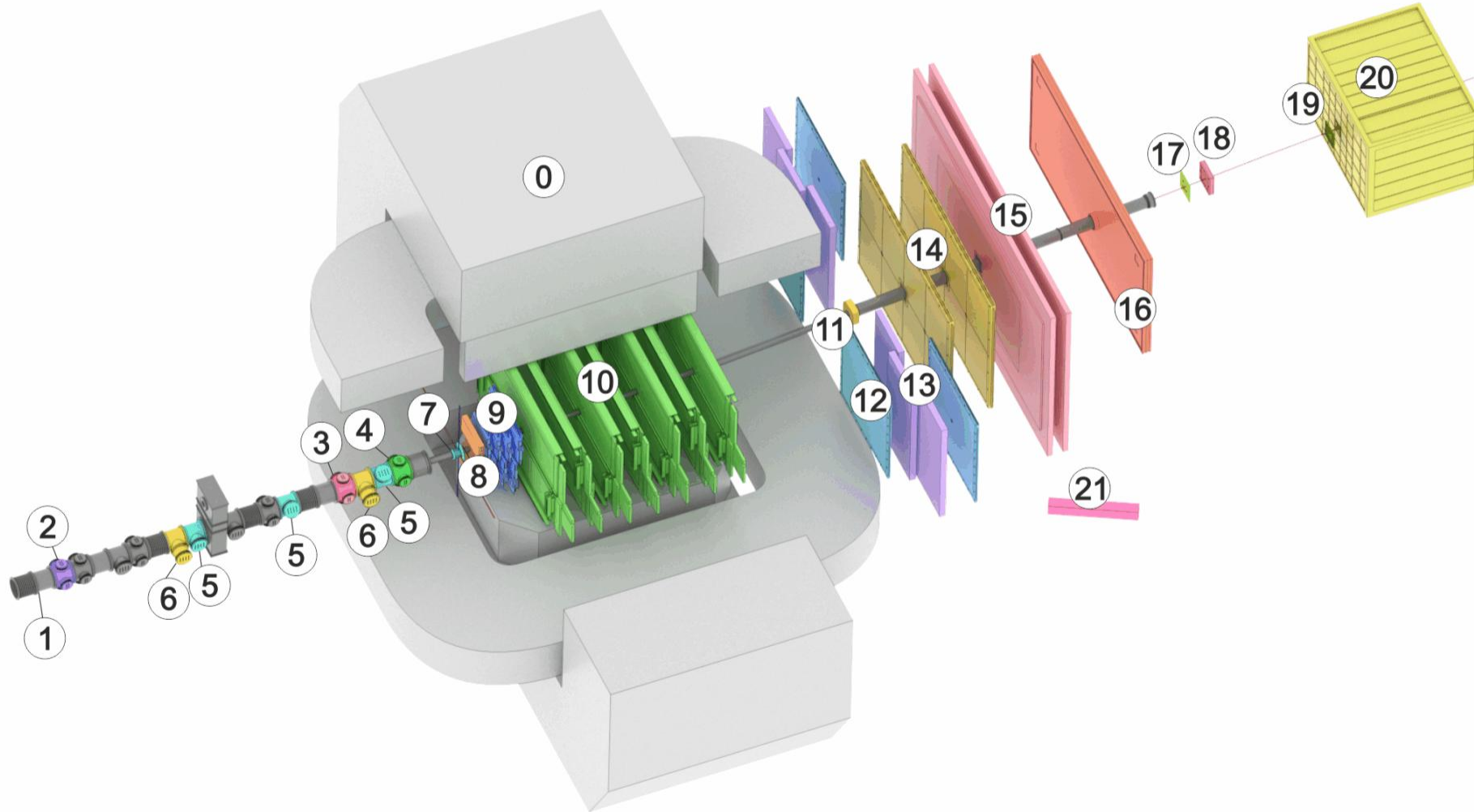
1. Конструкция прототипа **Highly Granular Neutron Detector**
2. Измерение распределений кинетической энергии нейтронов вперед
3. Деконволюция спектра кинетических энергий нейтронов
4. Валидация фона из моделирования
5. Измерение дифференциального сечения эмиссии нейтронов вперед
6. Сравнение с данными LAND ALADIN 600A MeV Sn+Sn

BM@N – первый действующий эксперимент на NICA

Nuclotron-based Ion Collider facility



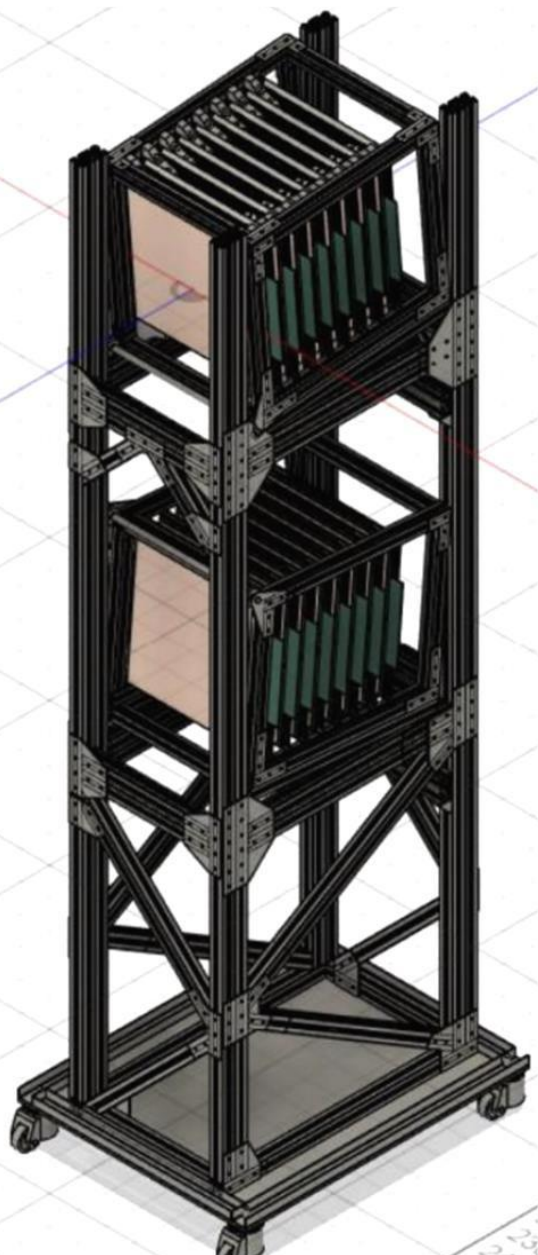
Baryonic Matter at Nuclotron



- 0 Magnet SP-41 (0)
- 1 Vacuum Beam Pipe (1)
- 2-4 BC1, VC, BC2 (2-4)
- 5, 6 SiBT, SiProf (5, 6)
- 7 BD (7)
- 8, 9, 10 VSP, FSD, GEM (8, 9, 10)
- 11 FD (11)
- 12 4 x CSC 1x1 m² (12)
- 13 TOF 400 (13)
- 14 2 x CSC 2x1.5 m² (14)
- 15 TOF 700 (15)
- 16 ScWall (16)
- 17 Small GEM (17)
- 18 Beam Profilometer (18)
- 19 FQH (19)
- 20 FHCaI (20)
- 21 HGN (21)

На BM@N измеряются анизотропные потоки протонов с помощью гибридной трекинговой системы совместно с времяпролетными детекторами TOF и передним адронным калориметром FHCaI

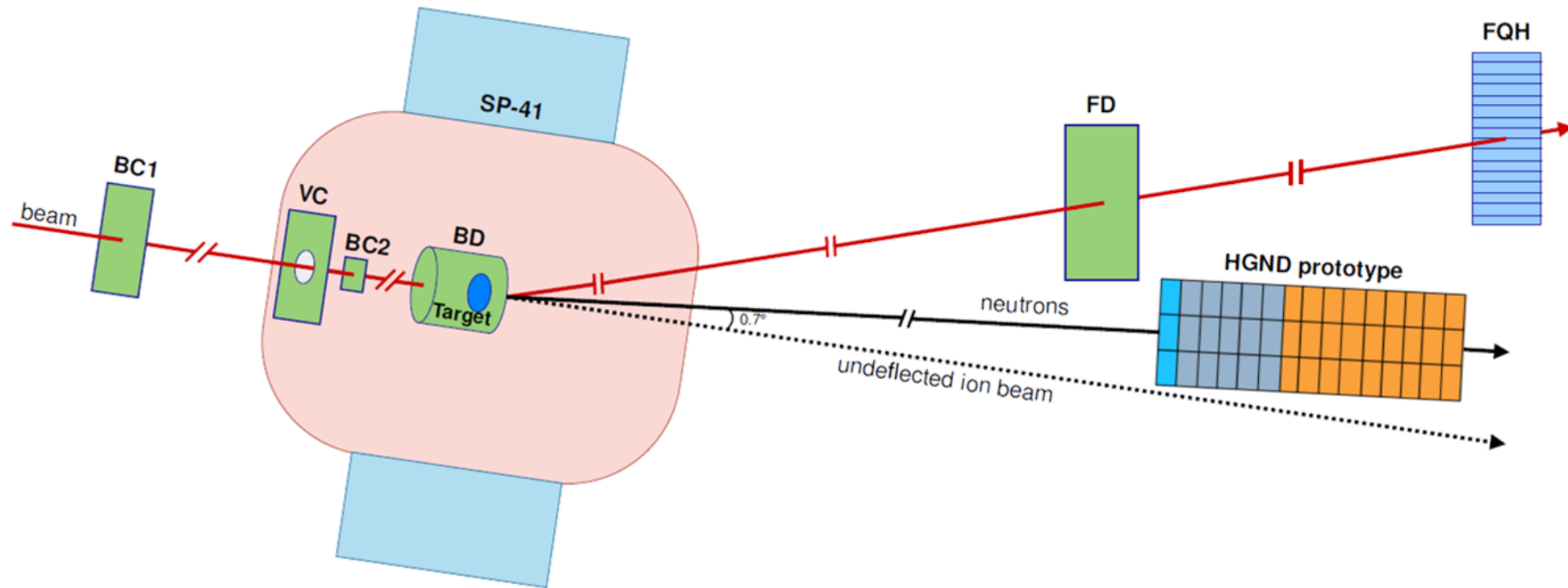
Полномасштабный HGND



- HGND разрабатывается в ИЯИ РАН для измерения **азимутальных потоков и выходов нейтронов** с энергиями от 300 МэВ до 4 ГэВ в ядро-ядерных взаимодействиях при столкновениях тяжёлых ионов с энергиями до 4А ГэВ в эксперименте с фиксированной мишенью BM@N в ОИЯИ.
- Данные о потоках и выходах нейтронов в диапазоне энергий BM@N пока отсутствуют.

S. Morozov et al., The Highly-Granular time-of-flight Neutron Detector for the BM@N experiment, NIM A **2025**, 1072, 170152

Введение



Прототип HGND был протестирован в сеансе $^{124}\text{Xe} + \text{CsI}$ 3.8A ГэВ эксперимента VM@N для валидации концепции полномасштабного HGND.

Прототип HGND может быть использован для изучения нейтронов-спектаторов и нейтронов из ультра-периферических столкновений при энергиях эксперимента VM@N.

В докладе представлены первые измерения нейтронов от фрагментации снаряда ^{124}Xe в центральных и полуцентральных столкновениях, а также нейтронов из электромагнитной диссоциации (ЭМД) снаряда ^{124}Xe .

1. Конструкция прототипа **Highly Granular Neutron Detector**

Спектрометрия нейтронов

Основные методы спектрометрии нейтронов:

Neutron energy, MeV

1

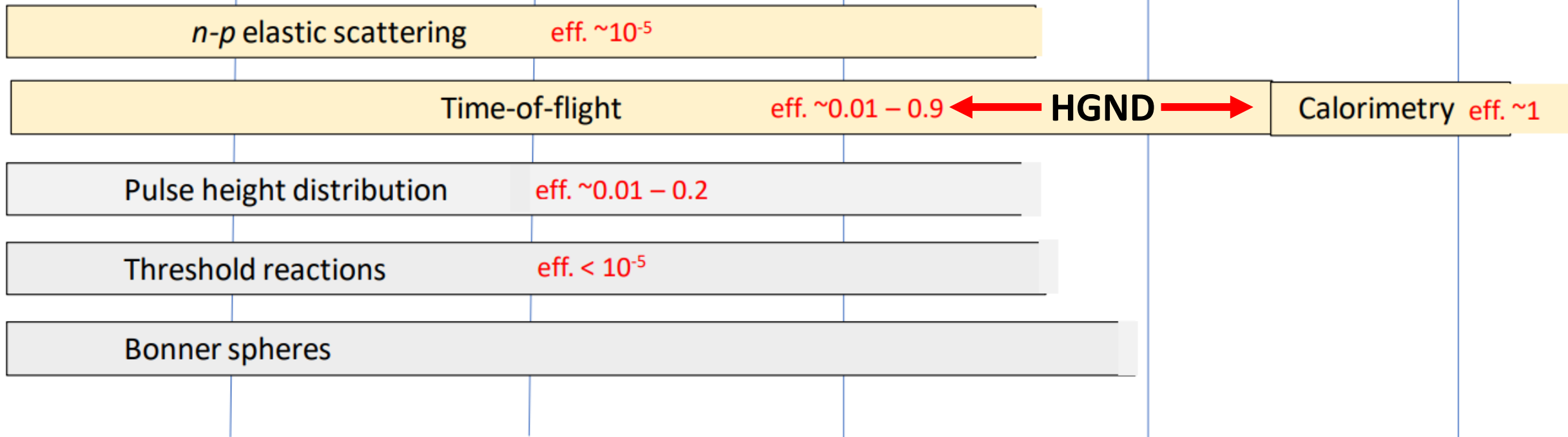
10



100

1000

10000

Energy resolution



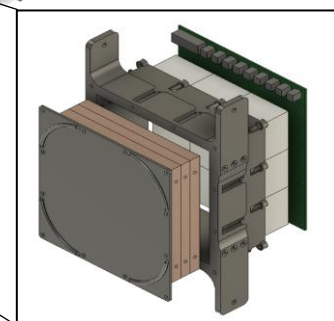
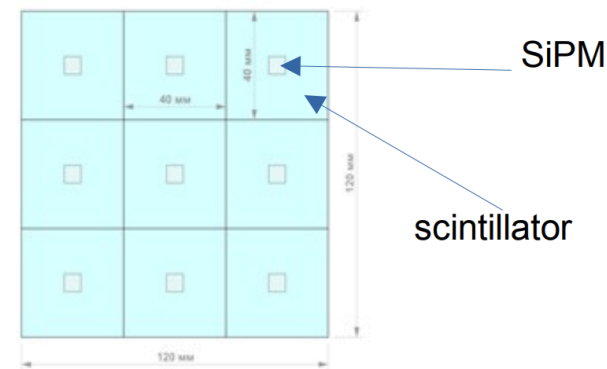
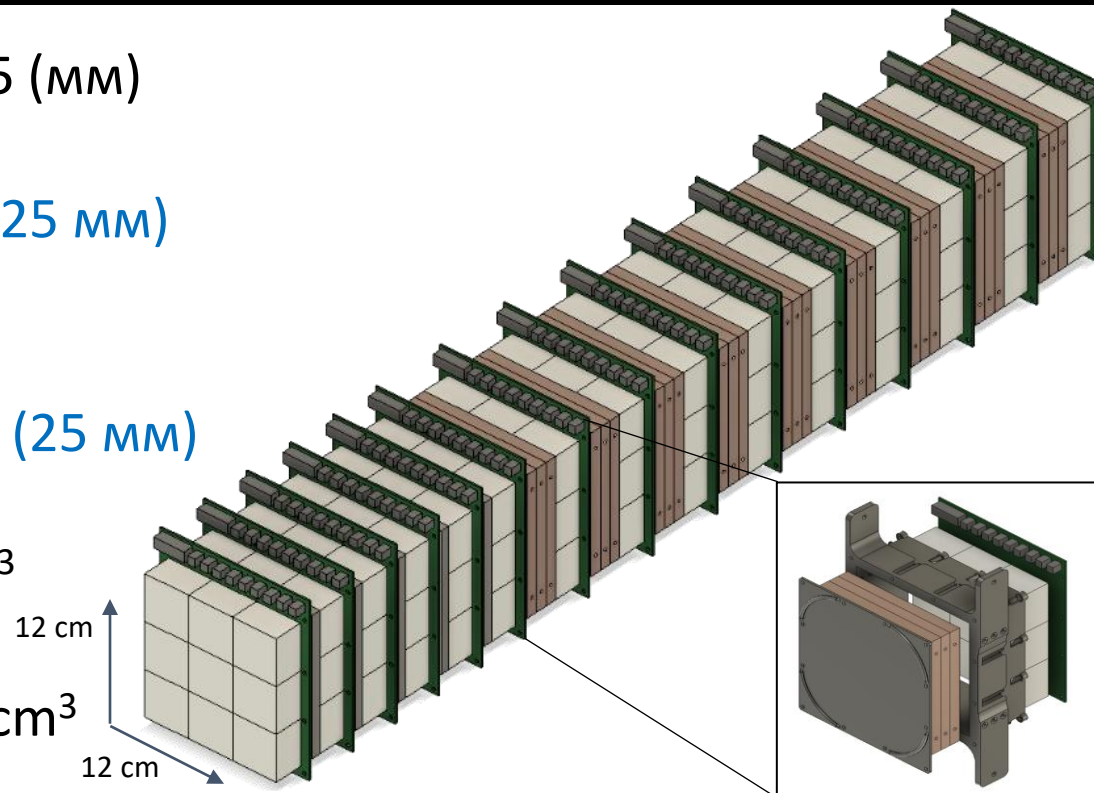
-  – definite correspondence between energy and measured value
-  – complicated unfolding procedure with well-known response functions and some a priori information about neutron spectrum is required

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

Конструкция прототипа HGND

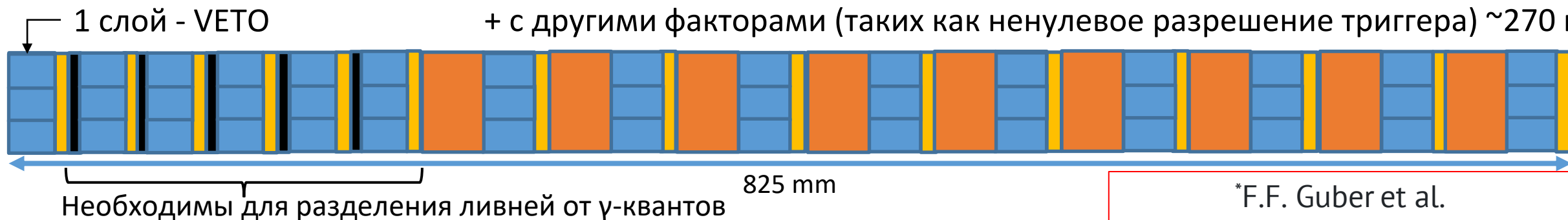
- Сцинт. слой **Veto** 120x120x25 (мм)
- 1 часть:
5 слоев: Pb (8 мм) + Сцинт. (25 мм)
+ РСВ + воздух
- 2 часть:
9 слоев: Cu (30 мм) + Сцинт. (25 мм)
+ РСВ + воздух

Сцинт. ячейка – 40 x 40 x 25 мм³
 Общее число ячеек – 135
 Общий размер – 12 x 12 x 82.5 см³
 Общая длина ~ 2.5 λ_{int}



Hamamatsu S13360- 6050PE
 Активн. площадь – 6x6 мм²
 Число пикселей – 14400
 Размер пикселя – 50 μм
 Усиление – 1.7x10⁶
 PDE – 40%

Временное разрешение ячеек ~200 пс*,
 + с неравномерностью светосбора ~240 пс,
 + с другими факторами (таких как ненулевое разрешение триггера) ~270 пс

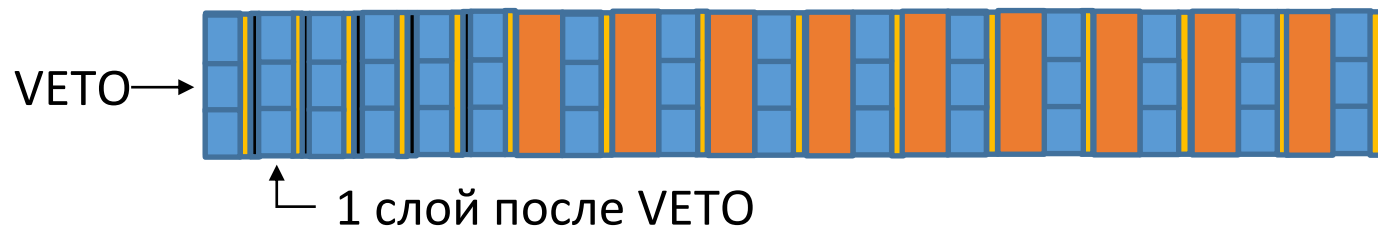
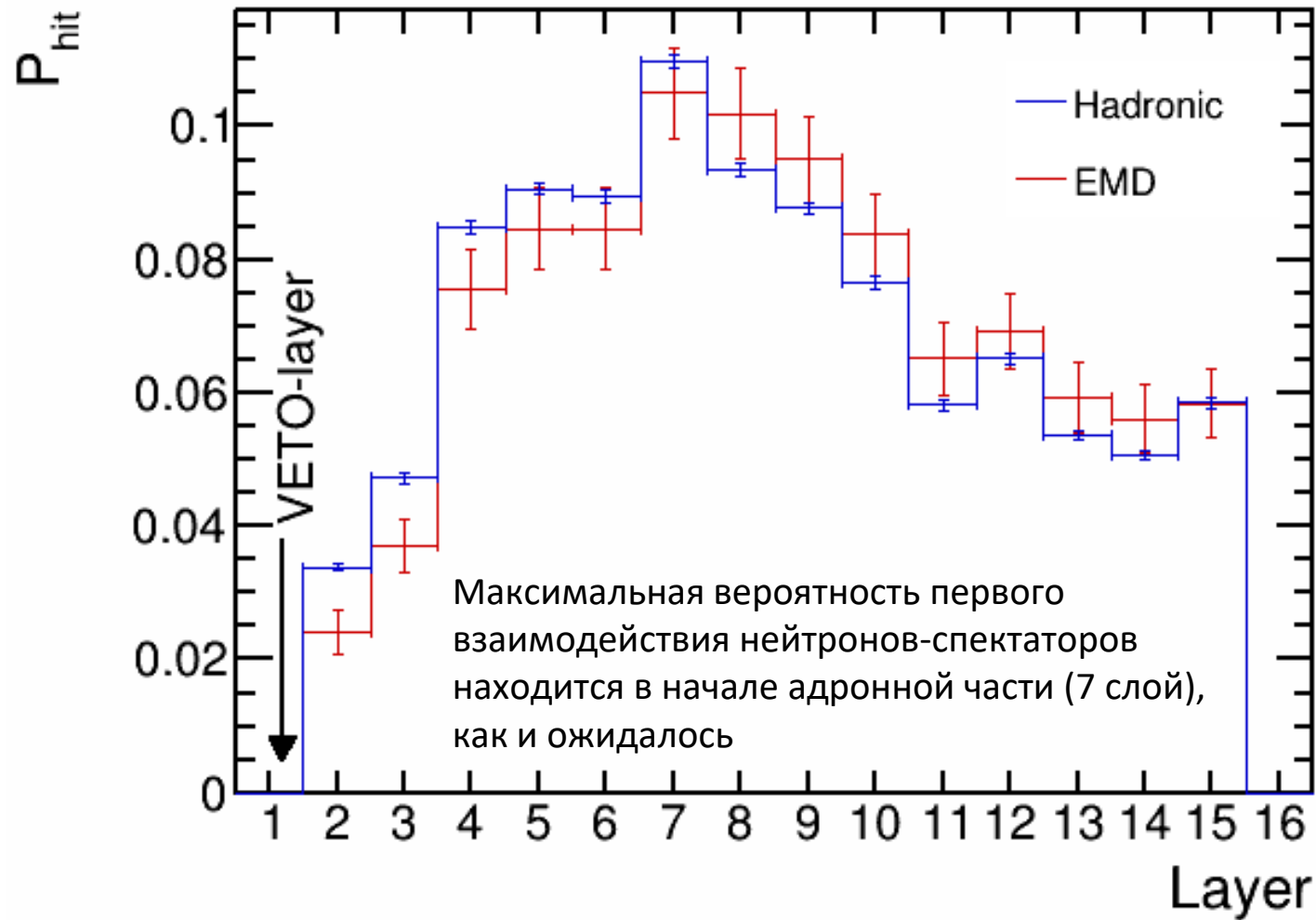


*F.F. Guber et al.
 10.1134/S0020441223030065

2. Измерение распределений кинетической энергии нейтронов вперед

Отбор нейтронов-спектаторов

- Отбор событий без заряженных частиц с помощью **VETO**
- Подавление фотонов с помощью **1 слоя после VETO** ($1.55 X_0$ или $0.11 \lambda_{int}$)
- Реконструкция энергии по **максимальной скорости**
- Нормировка на частоту падающего пучка ионов, измеряемую **Beam Trigger BT**

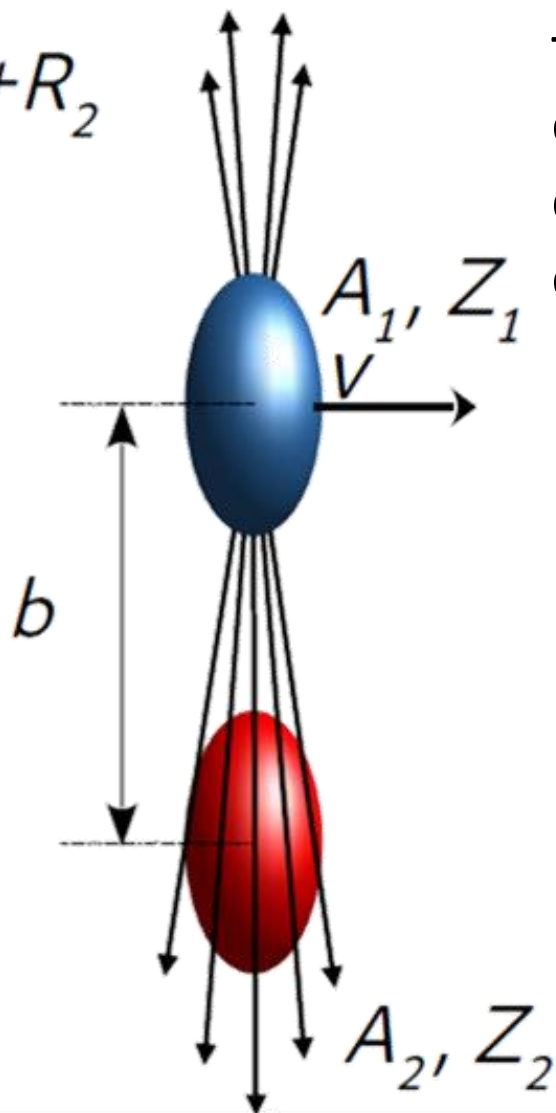


Электромагнитная диссоциация

(ЭМД):

В большинстве случаев, ЭМД тяжелых ядер приводит к эмиссии одного или нескольких нейтронов с образованием одного остаточного ядра

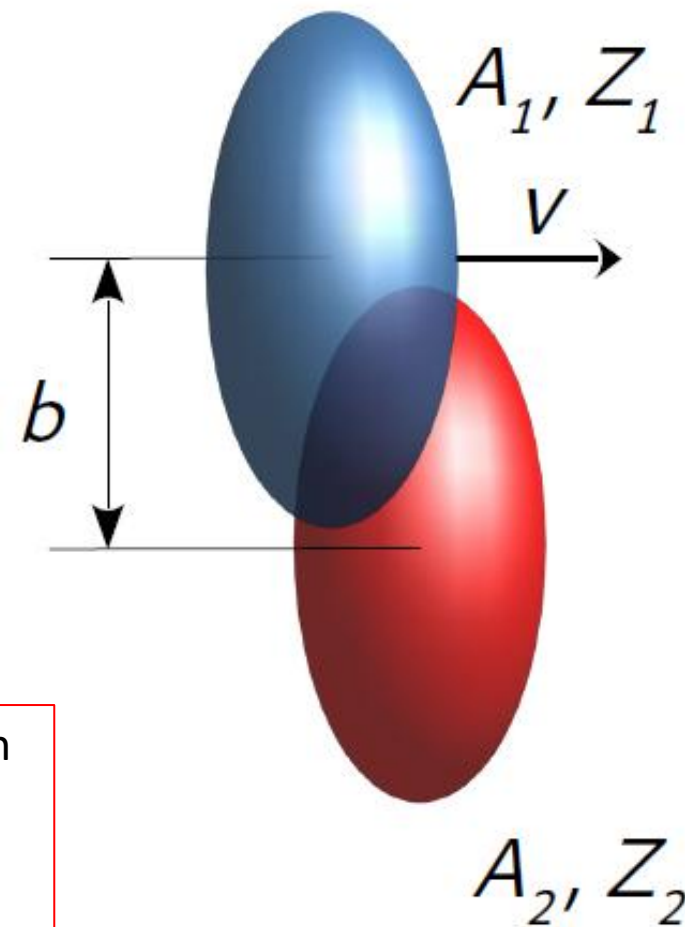
$$b > R_1 + R_2$$



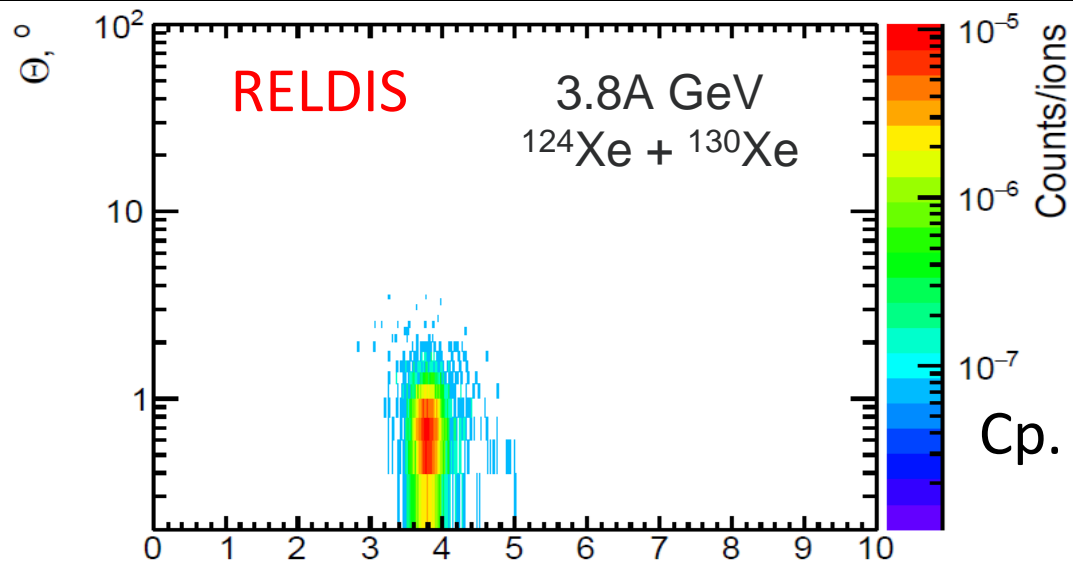
I.A. Pshenichnov et al. Electromagnetic dissociation of nuclei: From LHC to NICA. Int. J. Mod. Phys. E (2024) 33, 2441007.
<https://dx.doi.org/10.1142/S0218301324410076>

Адронные взаимодействия:

$$b < R_1 + R_2$$



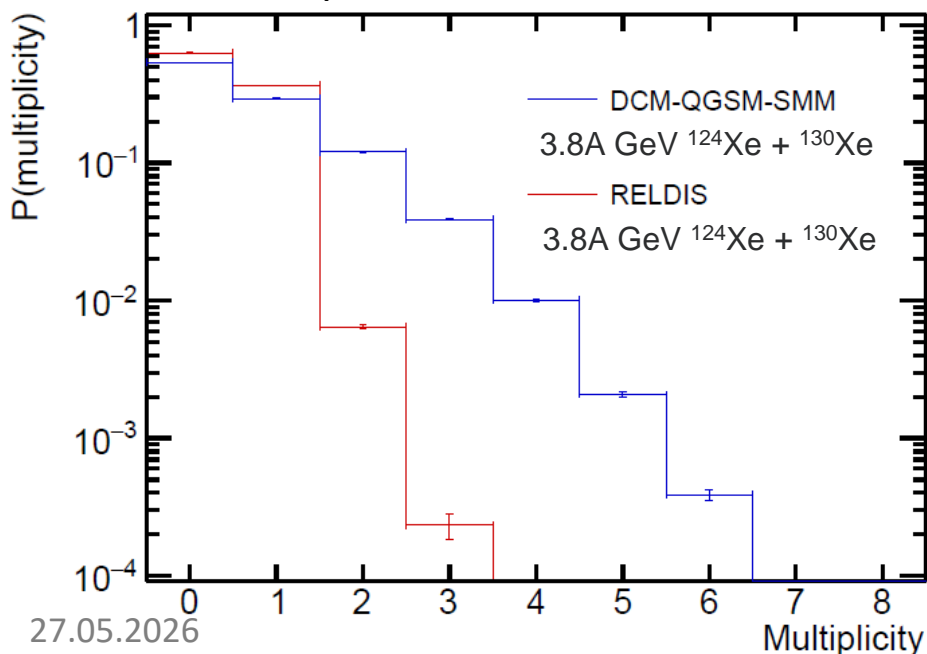
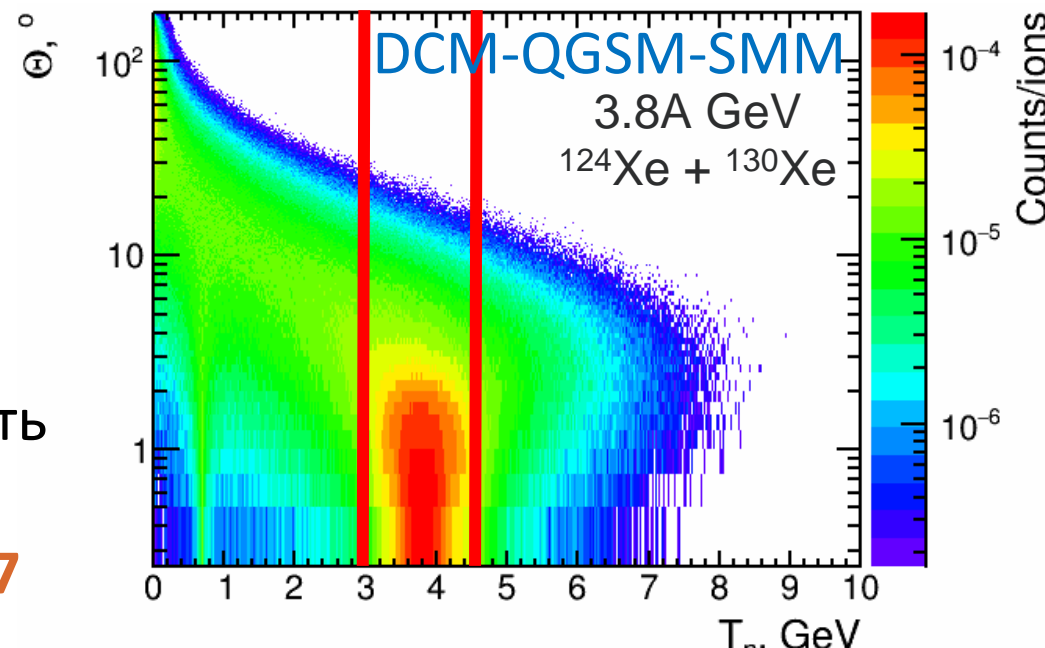
ЭМД vs адронные взаимодействия



Множественность нейтронов в
акцептансе прототипа HGND

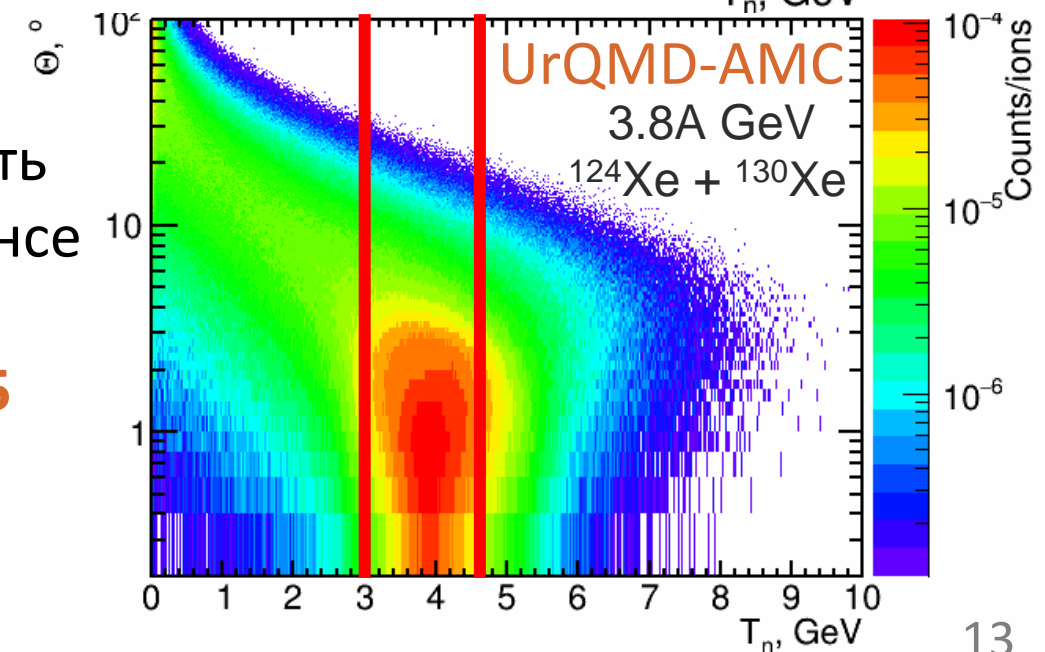
Ср. множественность
нейтронов

1.05 **13.56** **17.67**

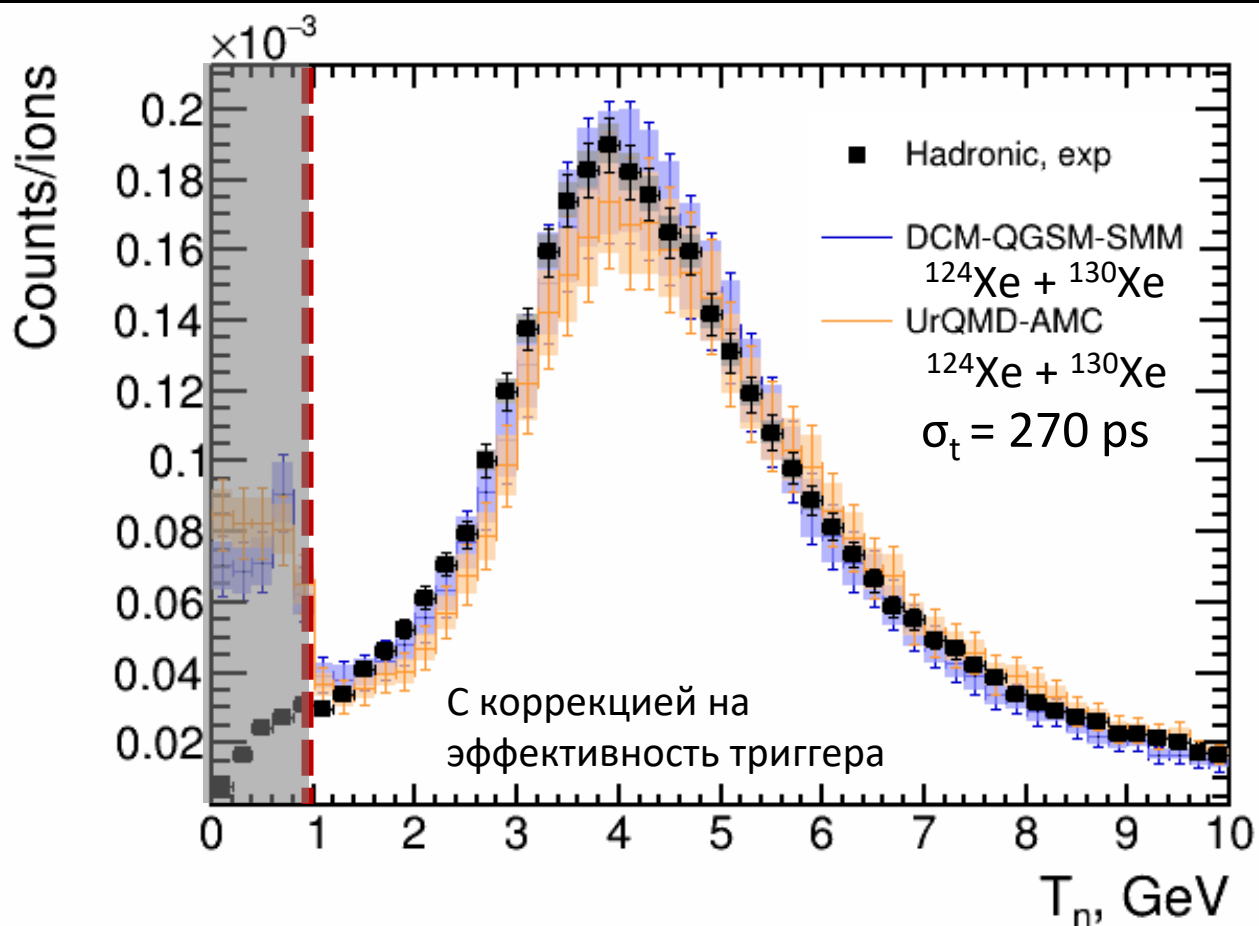
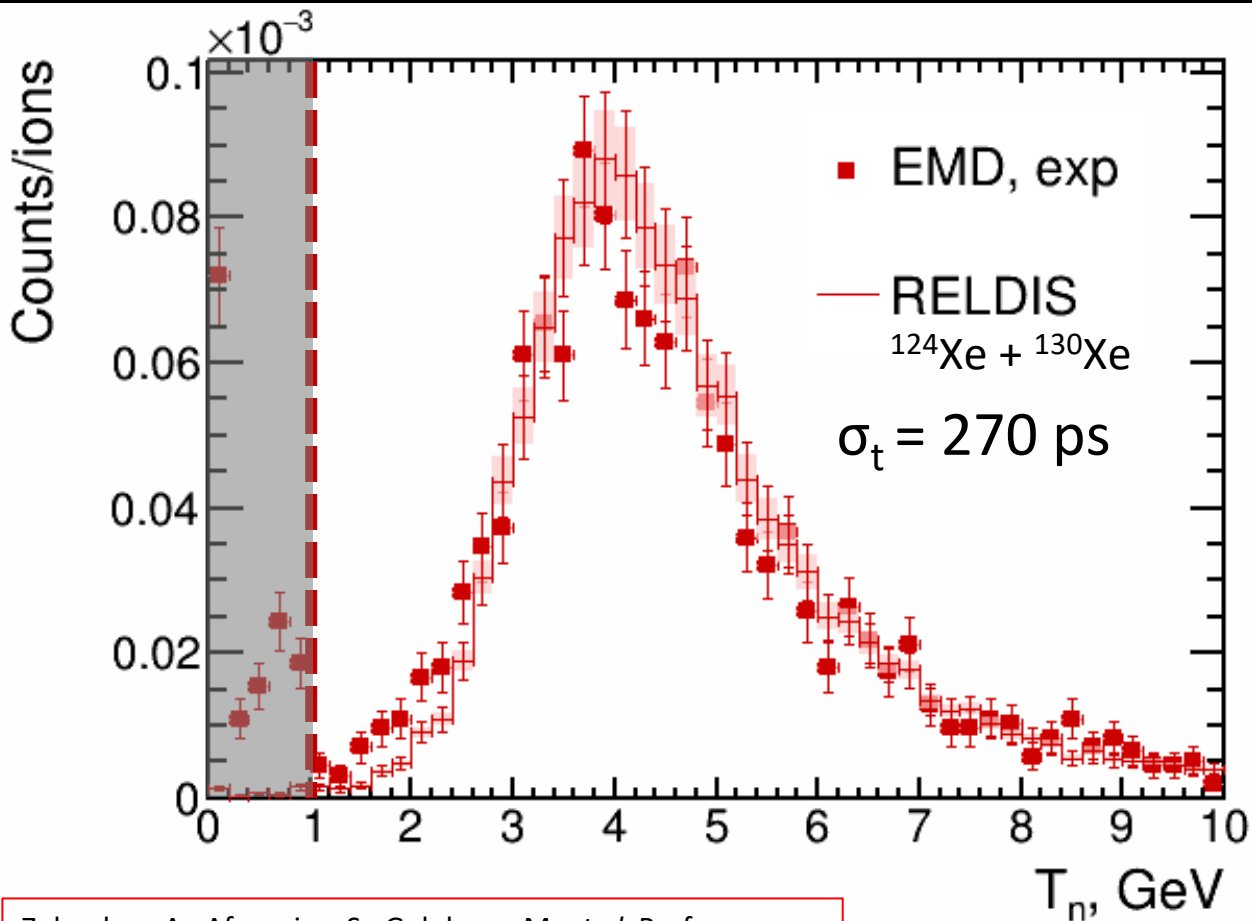


Ср. множественность
нейтронов в акцептансе
прототипа HGND

1.02 **1.38** **1.35**



Сравнение измерений и моделирования (до деконволюции)



Zubankov, A., Afanasiev, S., Golubeva, M. *et al.* Performance study of the Highly Granular Neutron Detector prototype in the BM@N experiment. *NUCL SCI TECH* **36**, 226 (2025).

Plotnikov, V.A., Kapishin, M.N. Evaluation of Trigger Efficiency in the BM@N Experiment Session with a Beam of Xenon Ions with a Kinetic Energy of 3.8 AGeV. *Phys. Part. Nuclei Lett.* **22**, 1406–1415 (2025).

$\Omega_n, \%$	$\varepsilon_n, \%$	$\Omega_n \times \varepsilon_n, \%$
34.56	55.47	19.17
± 0.26	± 0.42	± 0.15

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

$\Omega_n, \%$	$\varepsilon_n, \%$	$\Omega_n \times \varepsilon_n, \%$
3.26 ± 0.02	49.25 ± 0.16	1.61 ± 0.01
2.45 ± 0.01	50.03 ± 0.27	1.22 ± 0.01

3. Деконволюция спектра кинетических энергий нейтронов

Деконволюция распределений кинетической энергии нейтронов

Деконволюция позволяет учесть вклад ограниченного временного разрешения детекторов.

Мы используем фремворк RooUnfold ROOT для восстановления истинной кинетической энергии нейтронов.

<https://gitlab.cern.ch/RooUnfold/RooUnfold>

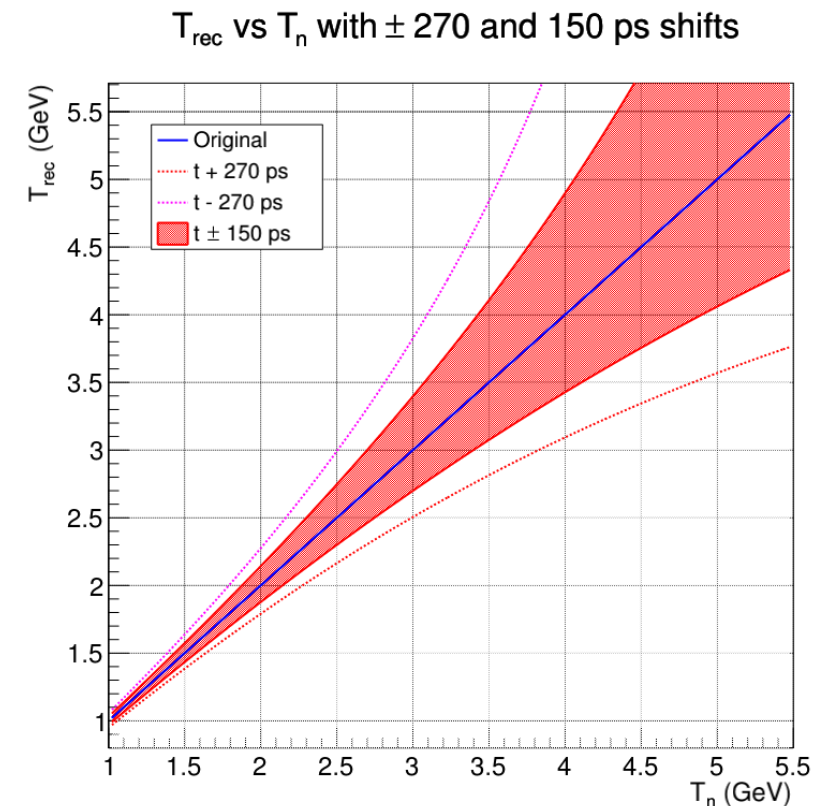
$$\mu = R^{-1} (\nu - \beta)$$

Истинная кинетическая энергия нейтронов

Матрица отклика

Реконструированная кинетическая энергия

Фон

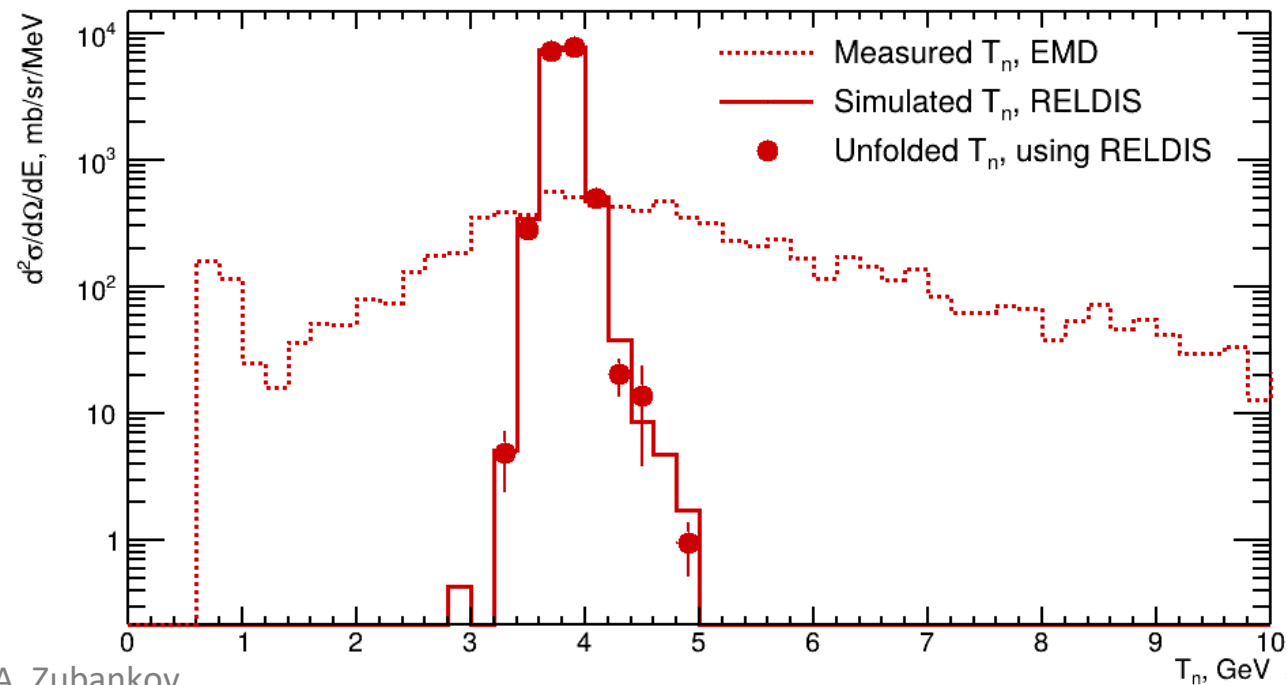
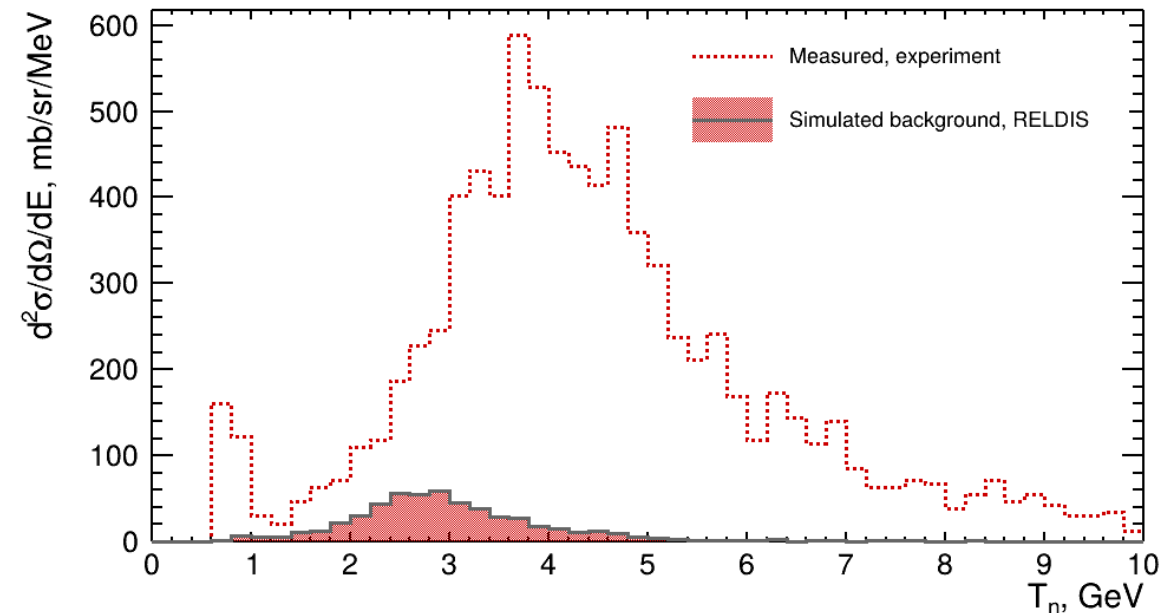
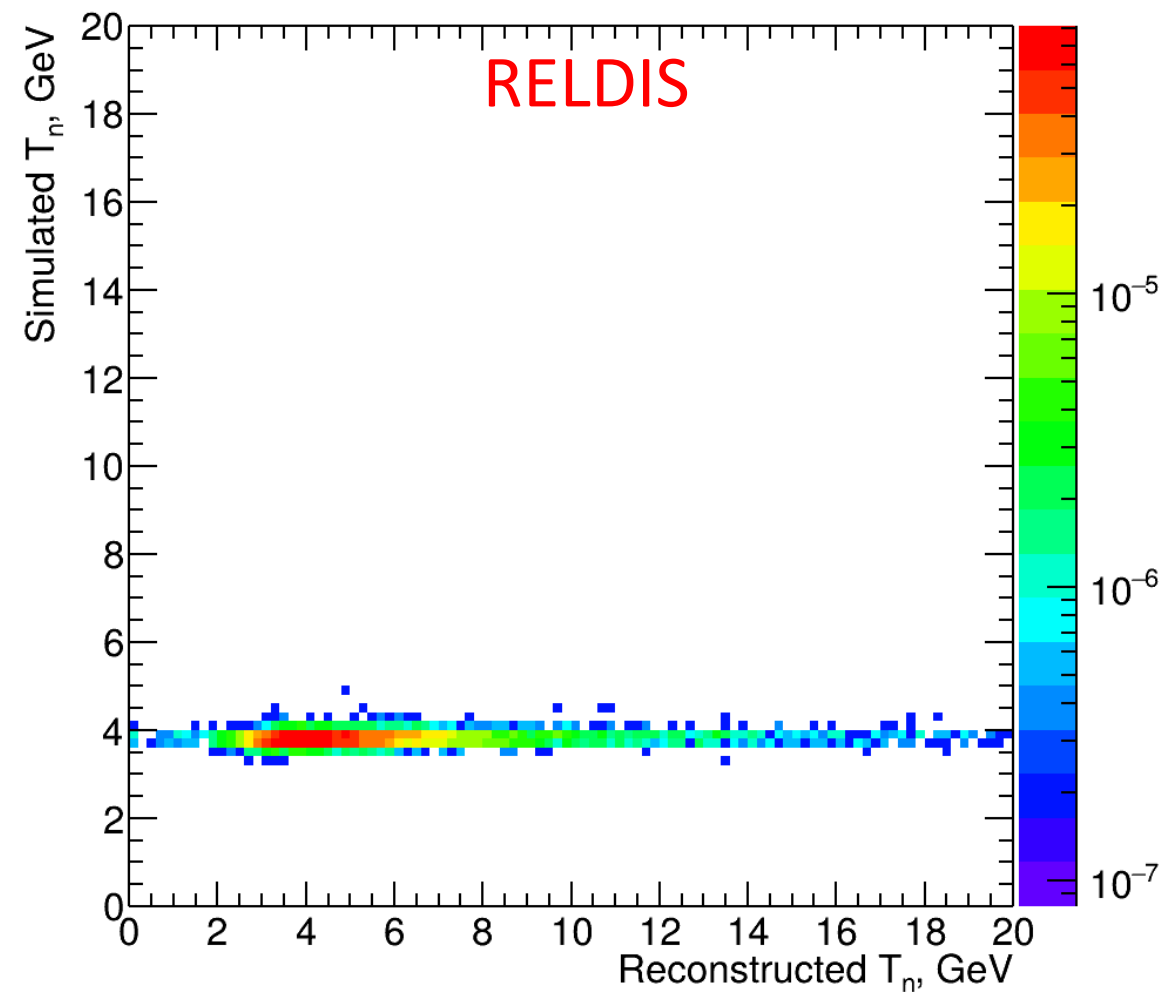


Матрица отклика \mathbf{R} получена моделированием отклика прототипа HGND на нейтроны.

Используется итеративный байесовский метод. В других областях этот подход известен как деконволюция Ричардсона-Люси.

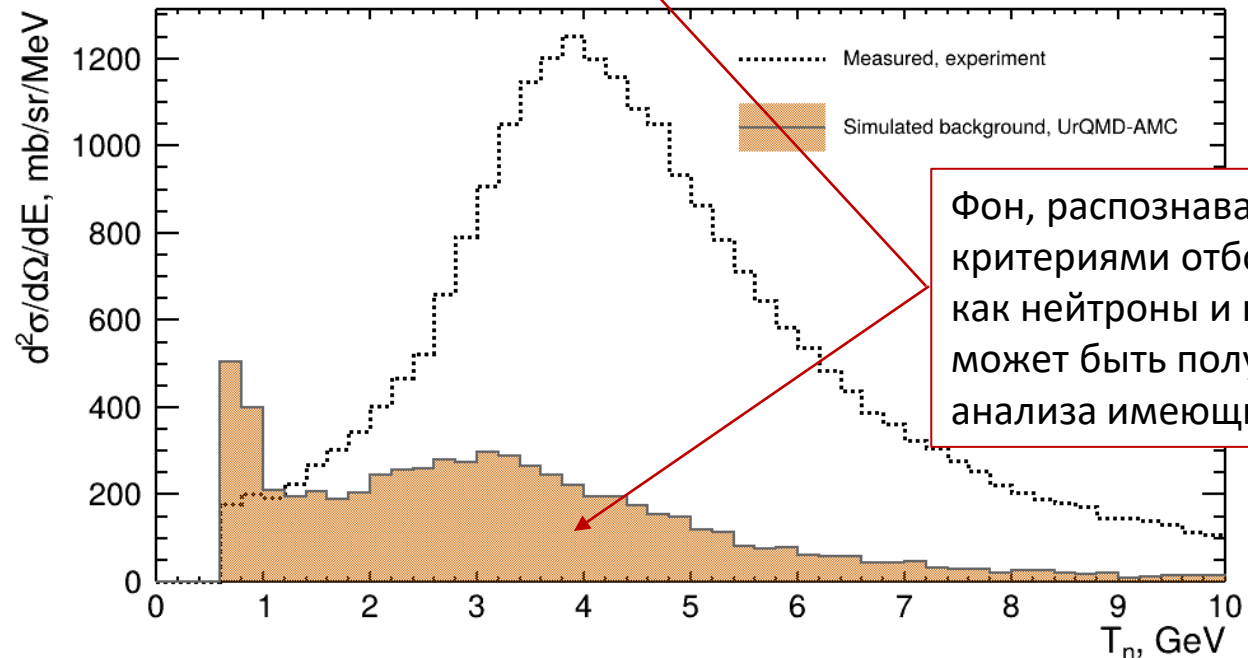
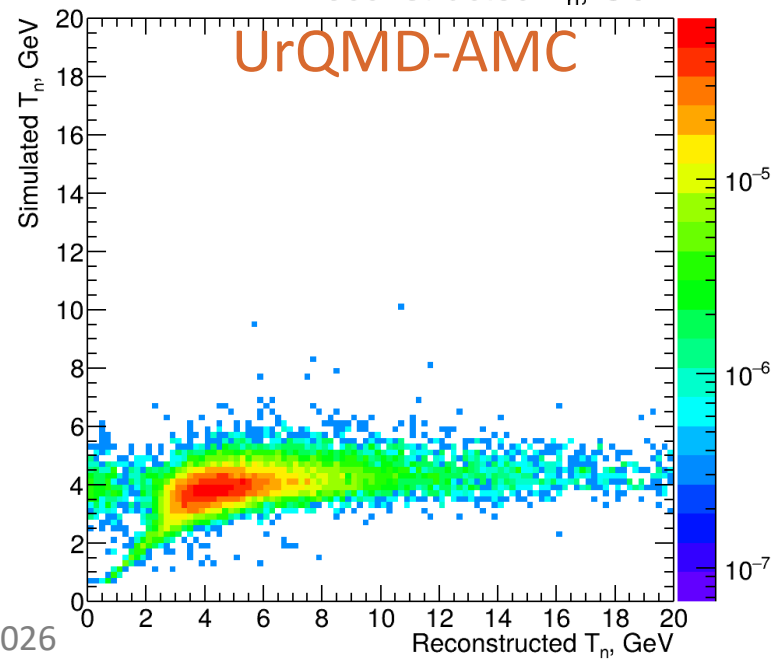
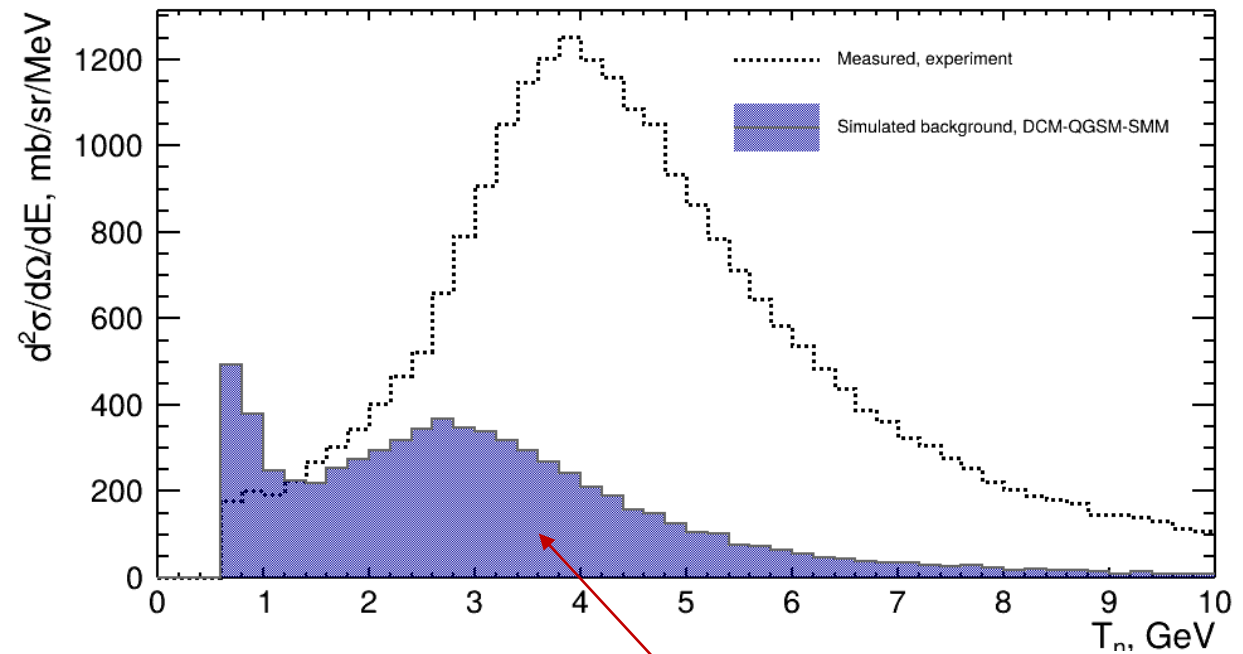
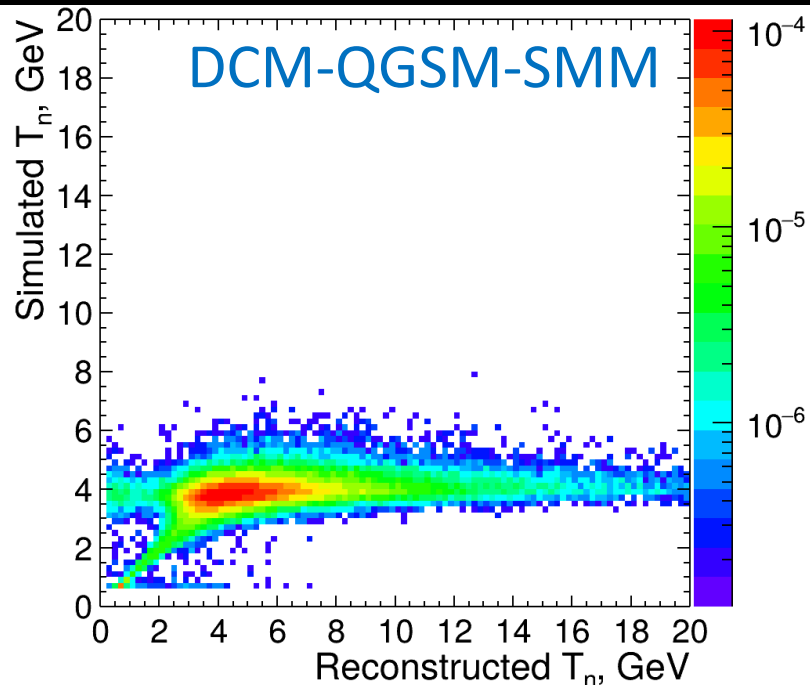
Comparison of unfolding methods using RooFitUnfold.,
L. Brenner et al., International Journal of Modern
Physics A, Vol. 35, No. 24, 2050145 (2020)

Деконволюция с матрицей отклика из RELDIS



- Хорошее согласие в области пика
- Расхождения в хвостах из-за узкой функции отклика

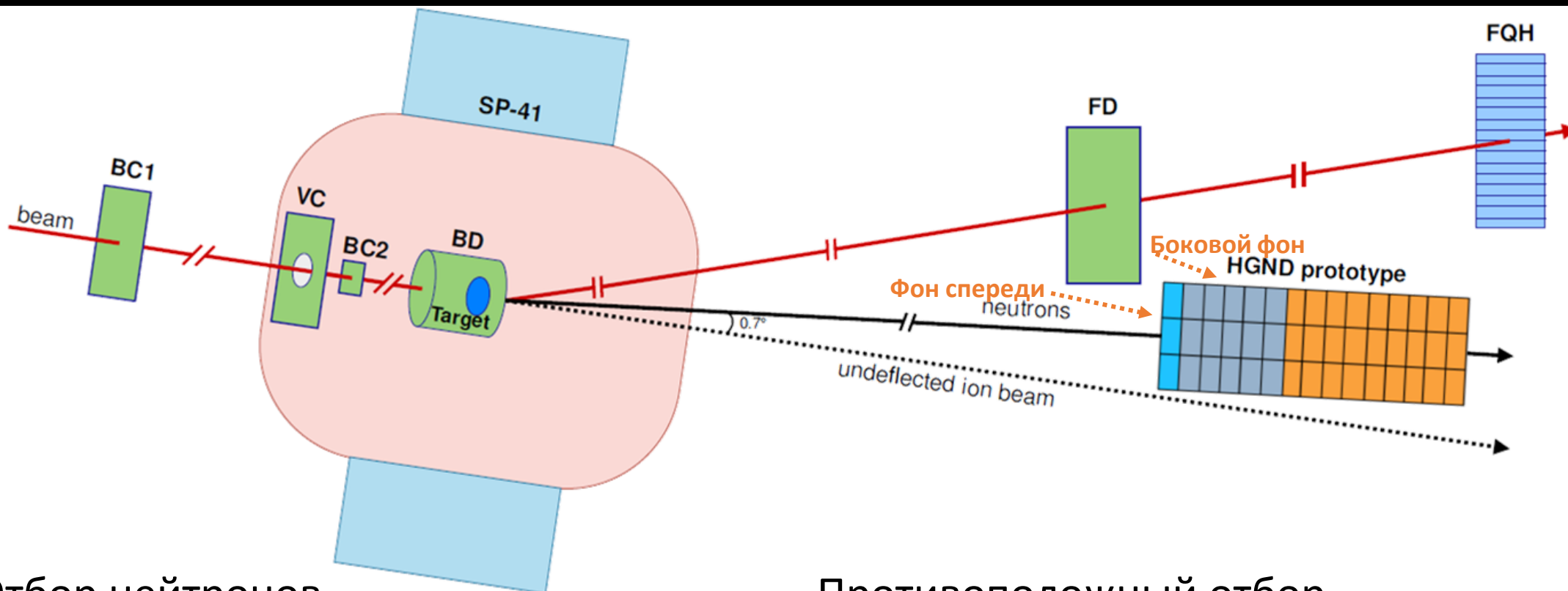
Деконволюция с матрицей отклика из DCM-QGSM-SMM & UrQMD-AMC



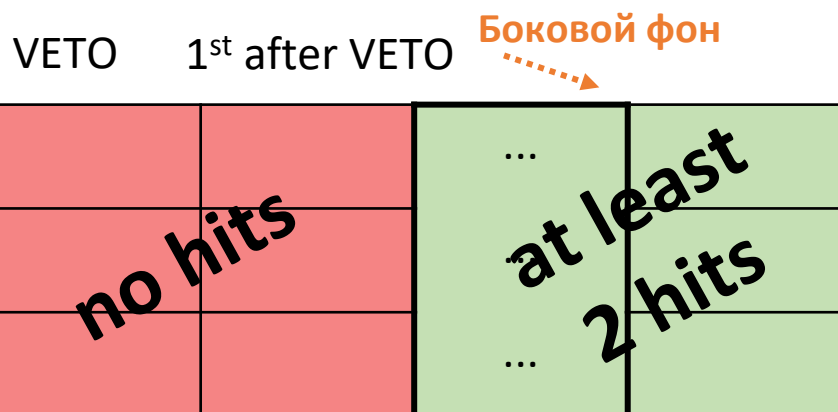
Фон, распознаваемый критериями отбора событий как нейтроны и который не может быть получен из анализа имеющихся данных

4. Валидація фона из моделювання

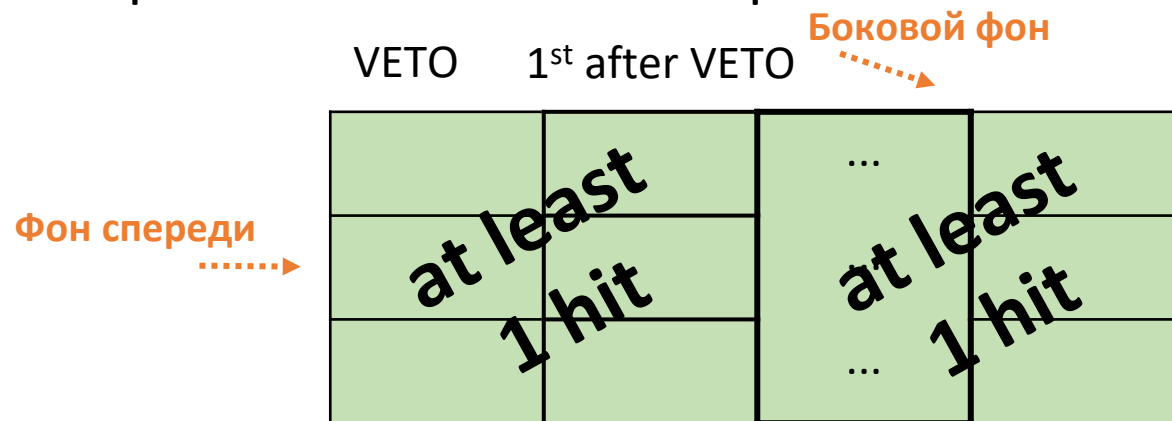
Валидация фона с помощью противоположного отбора



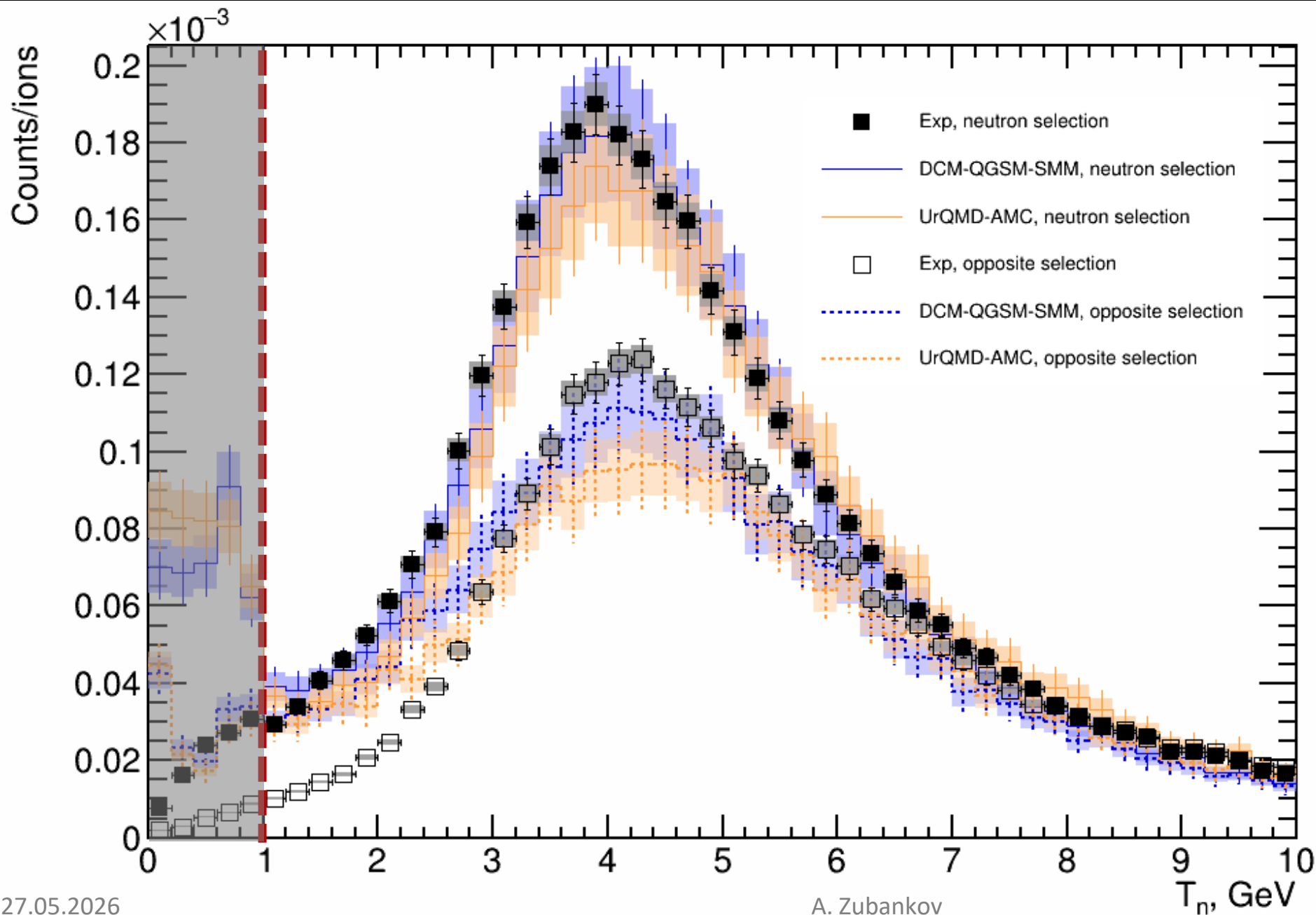
Отбор нейтронов



Противоположный отбор



Background validation from simulation using opposite selection

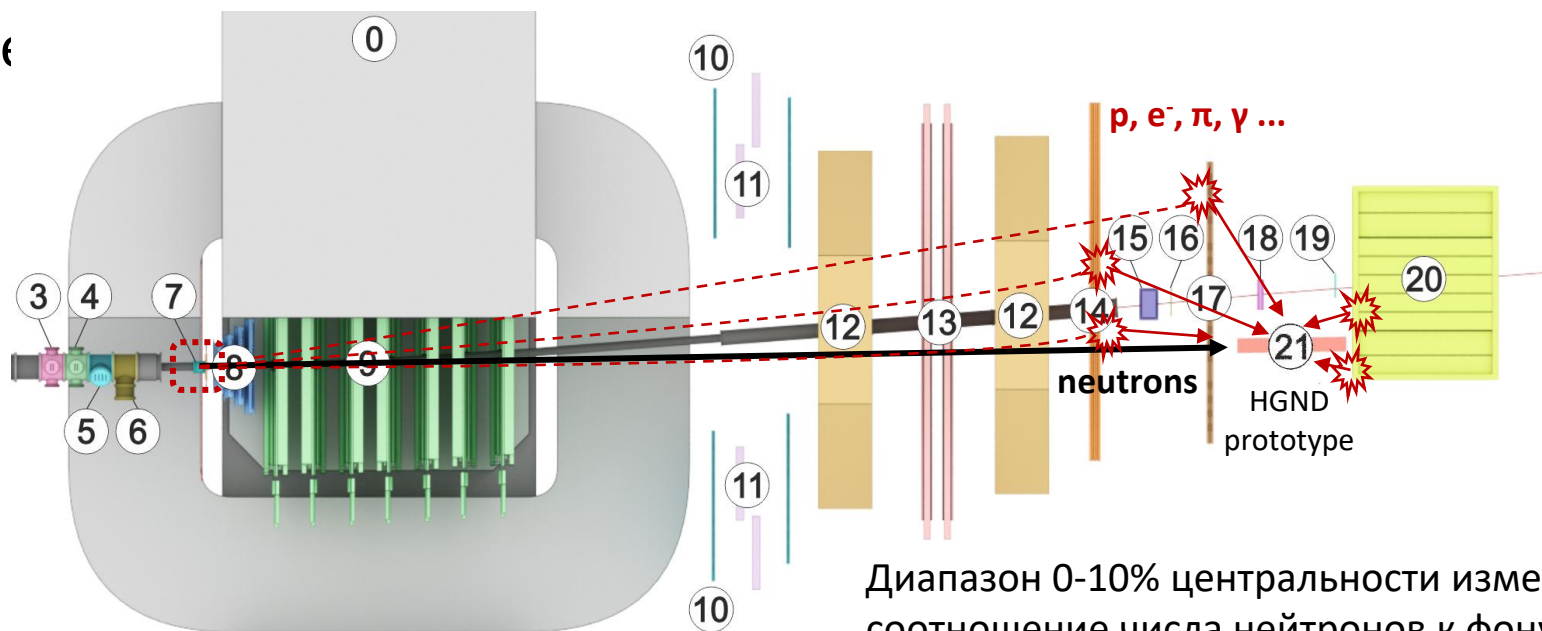
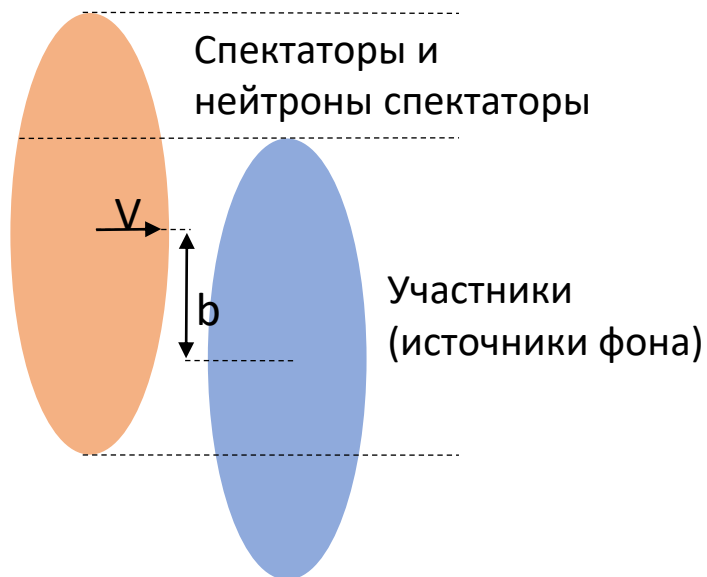


Используя противоположный отбор, мы анализируем события, которые отбрасываются при анализе нейтронов.

Анализ показывает, что распределения реконструированных кинетических энергий хорошо согласуются с моделированием, что говорит о хорошем описании фона и нейтронов в моделировании.

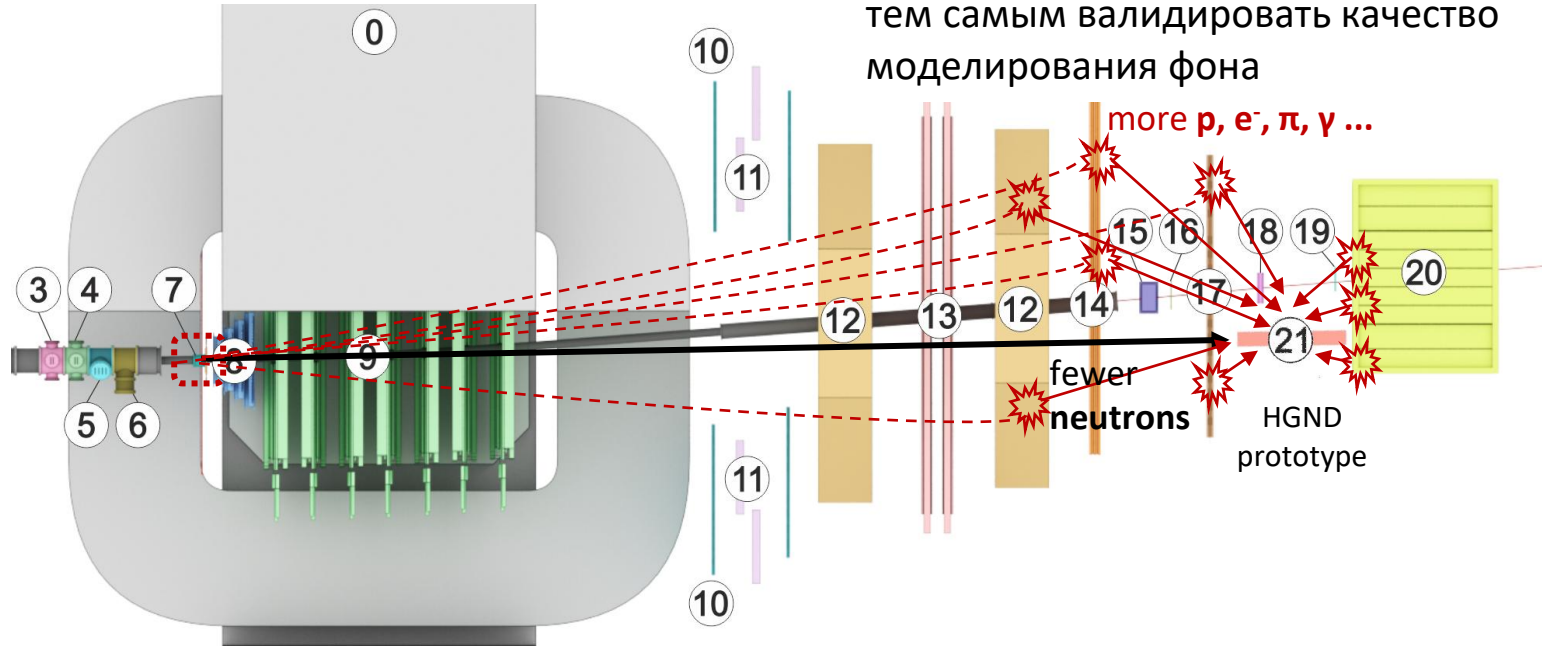
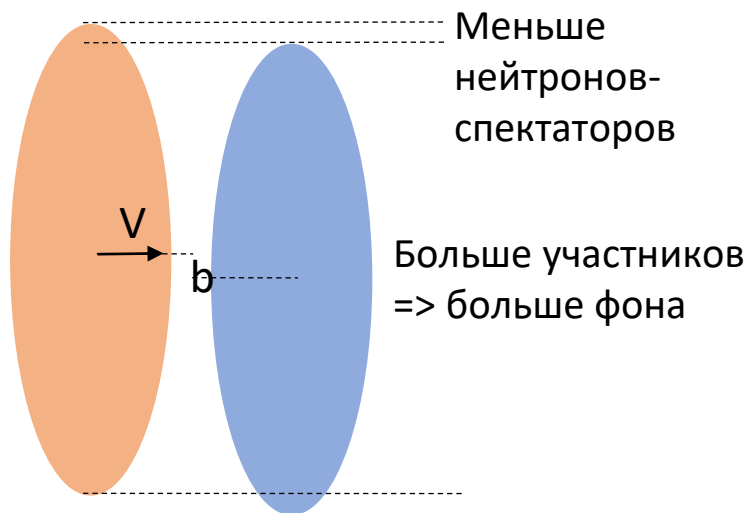
Валидация фона в наиболее центральных столкновениях

Полуцентральные столкновения



Диапазон 0-10% центральности изменит соотношение числа нейтронов к фону, позволив тем самым валидировать качество моделирования фона

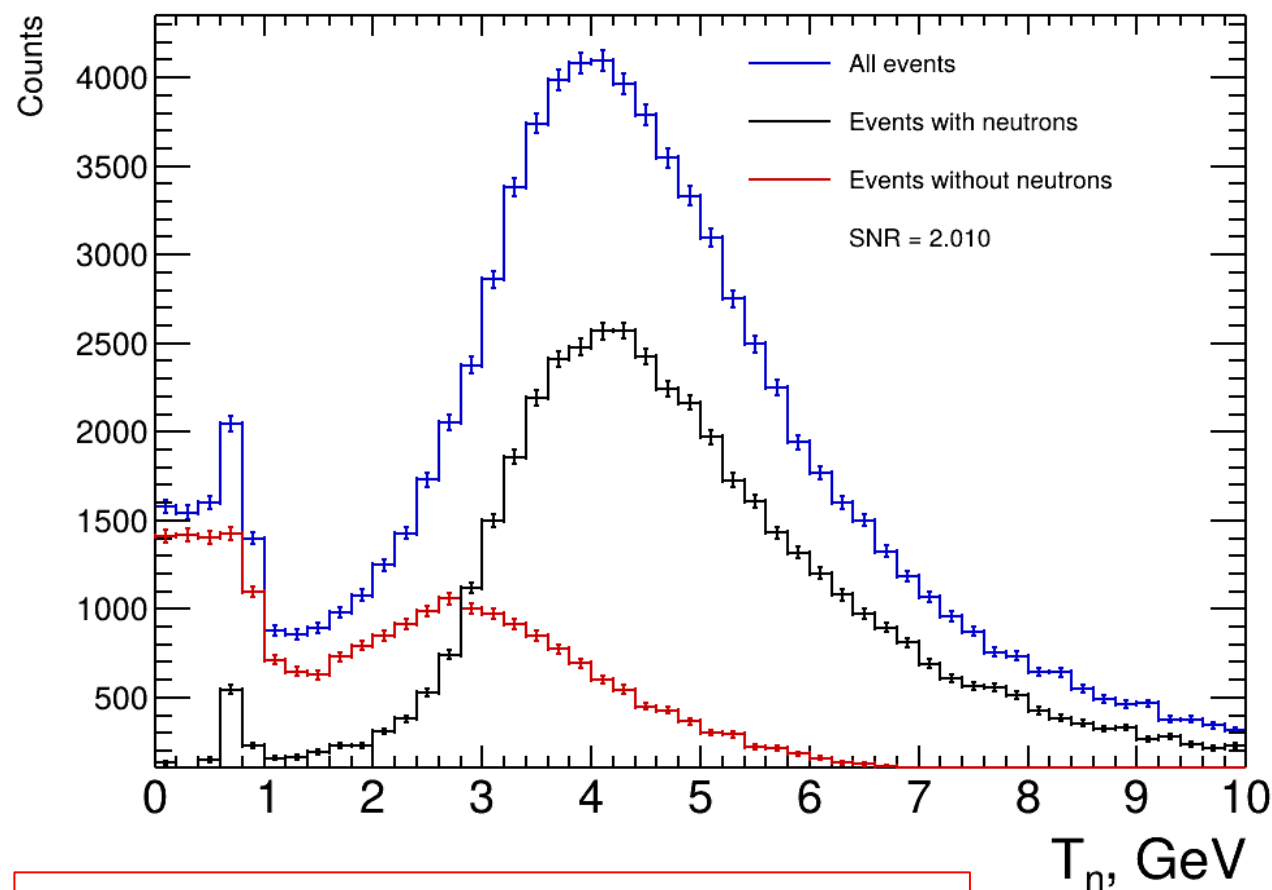
Most central collisions 0-10%



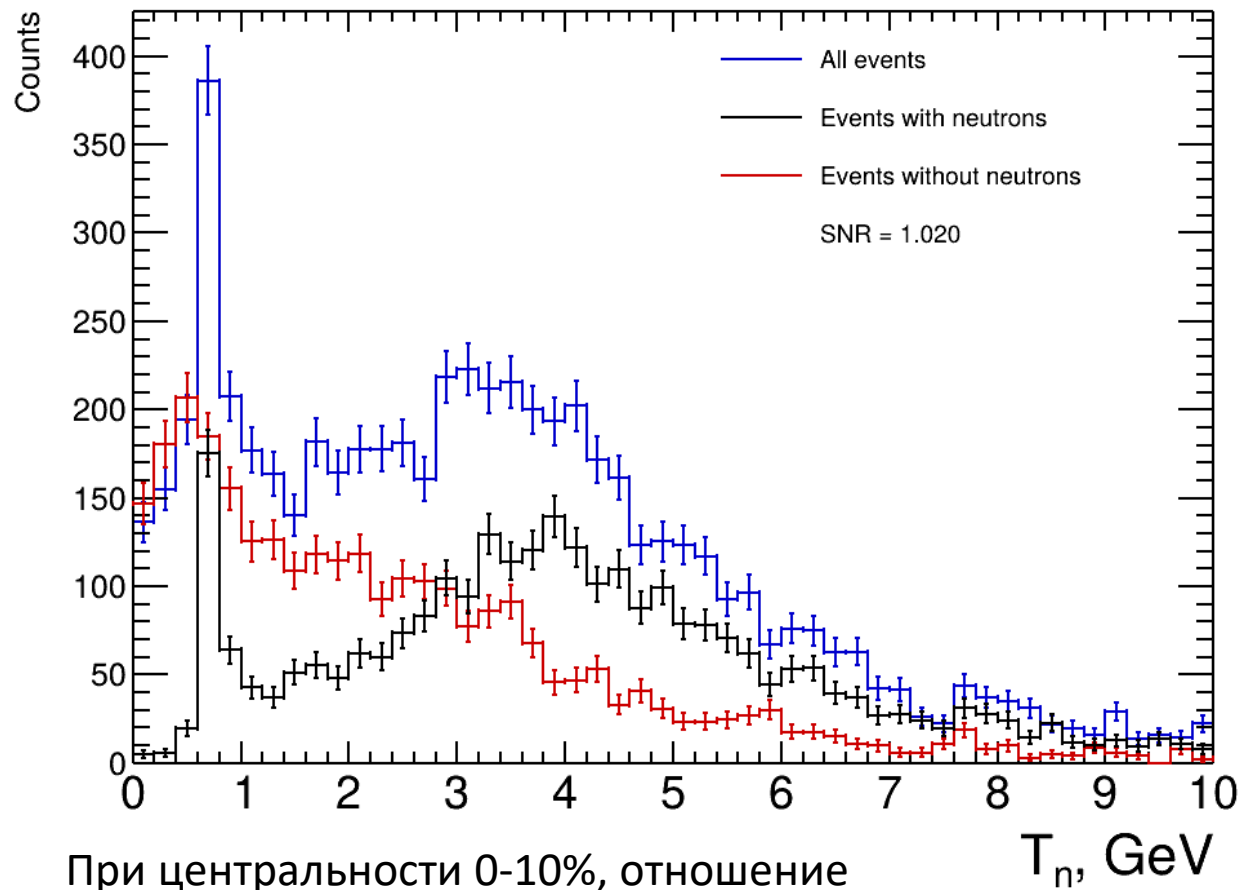
Валидация фона в наиболее центральных столкновениях

DCM-QGSM-SMM – CCT

(с коррекцией на эффективность триггера)



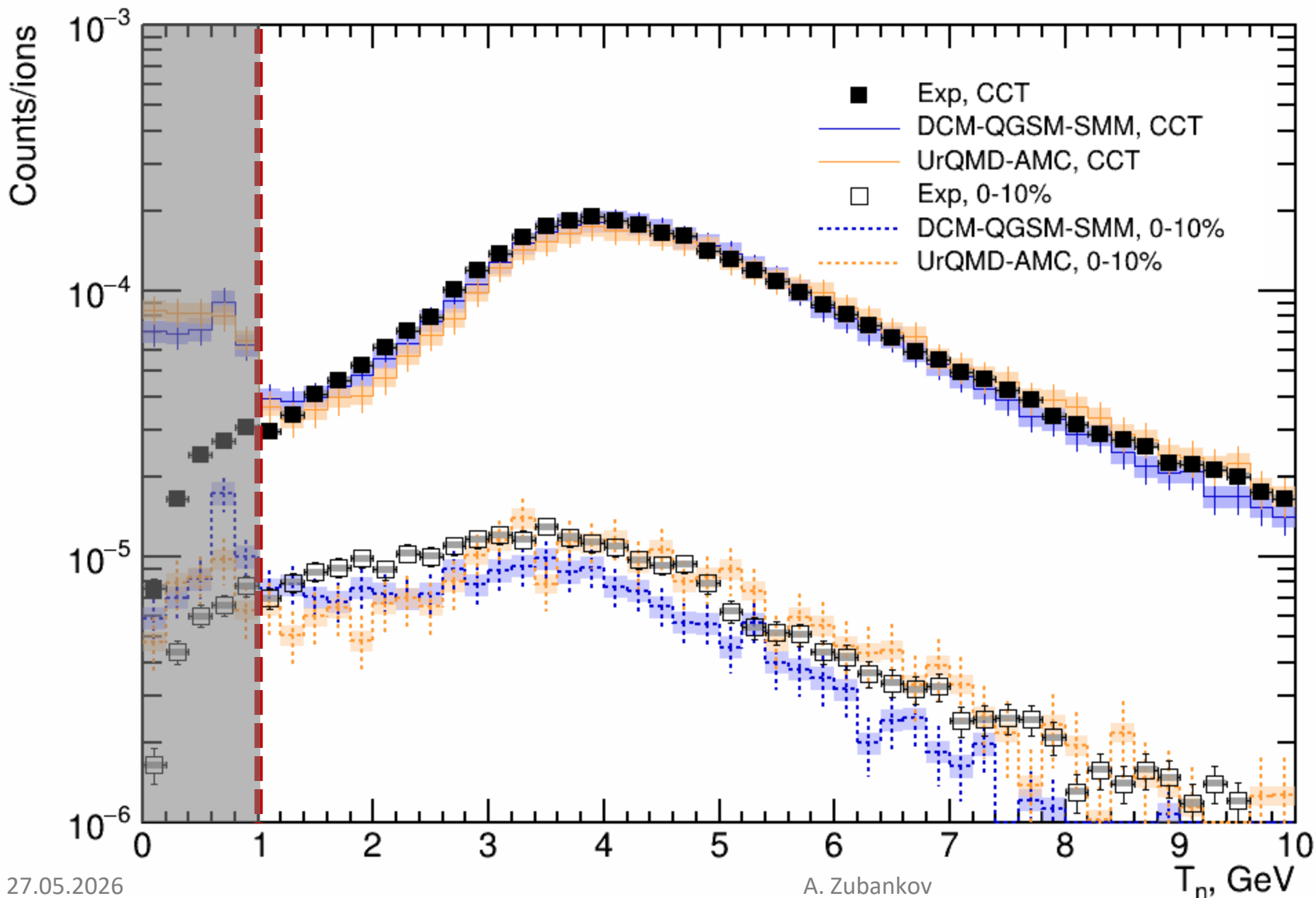
DCM-QGSM-SMM – 0-10%



При центральности 0-10%, отношение сигнал-шум (нейтронов к фону) становится почти в 2 раза хуже.

Plotnikov, V.A., Kapishin, M.N. Evaluation of Trigger Efficiency in the BM@N Experiment Session with a Beam of Xenon Ions with a Kinetic Energy of 3.8 AGeV. *Phys. Part. Nuclei Lett.* **22**, 1406–1415 (2025).

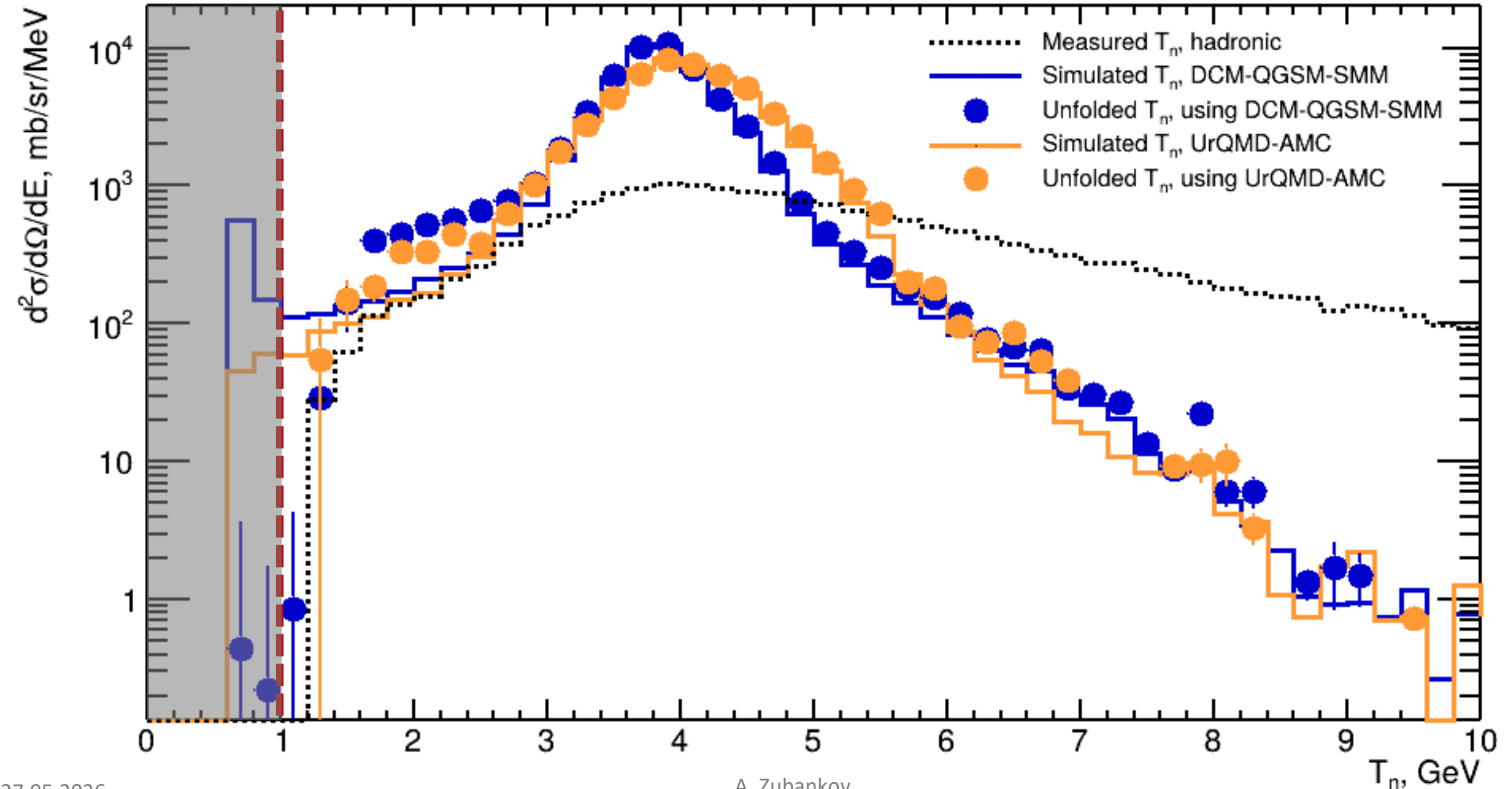
Валидация фона в наиболее центральных столкновениях



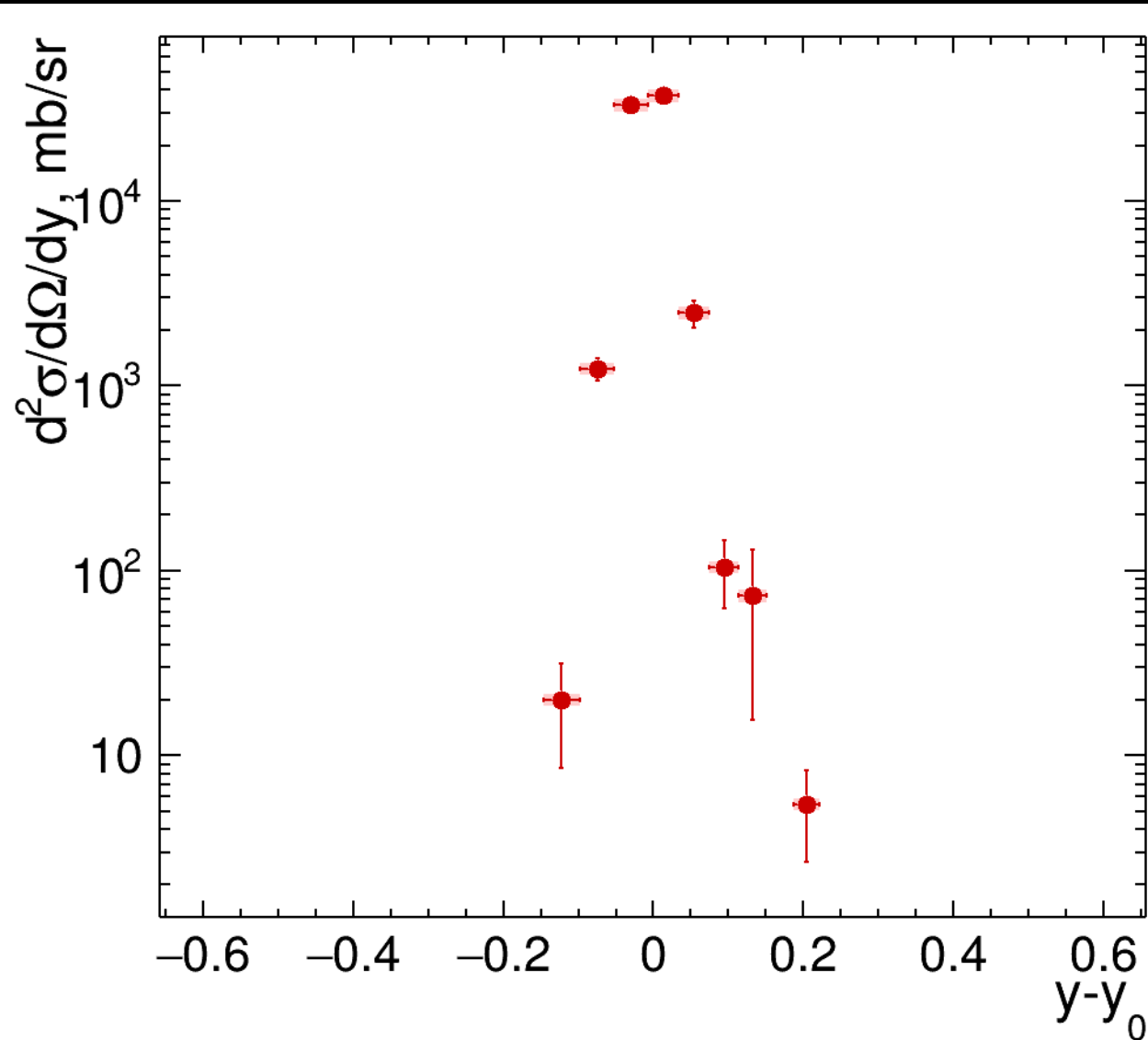
Анализ показывает, что распределения реконструированной кинетической энергии хорошо согласуются с результатами моделирования, что указывает на хорошее описание фона и нейтронов в моделировании.

5. Измерение дифференциального сечения эмиссии нейтронов вперед

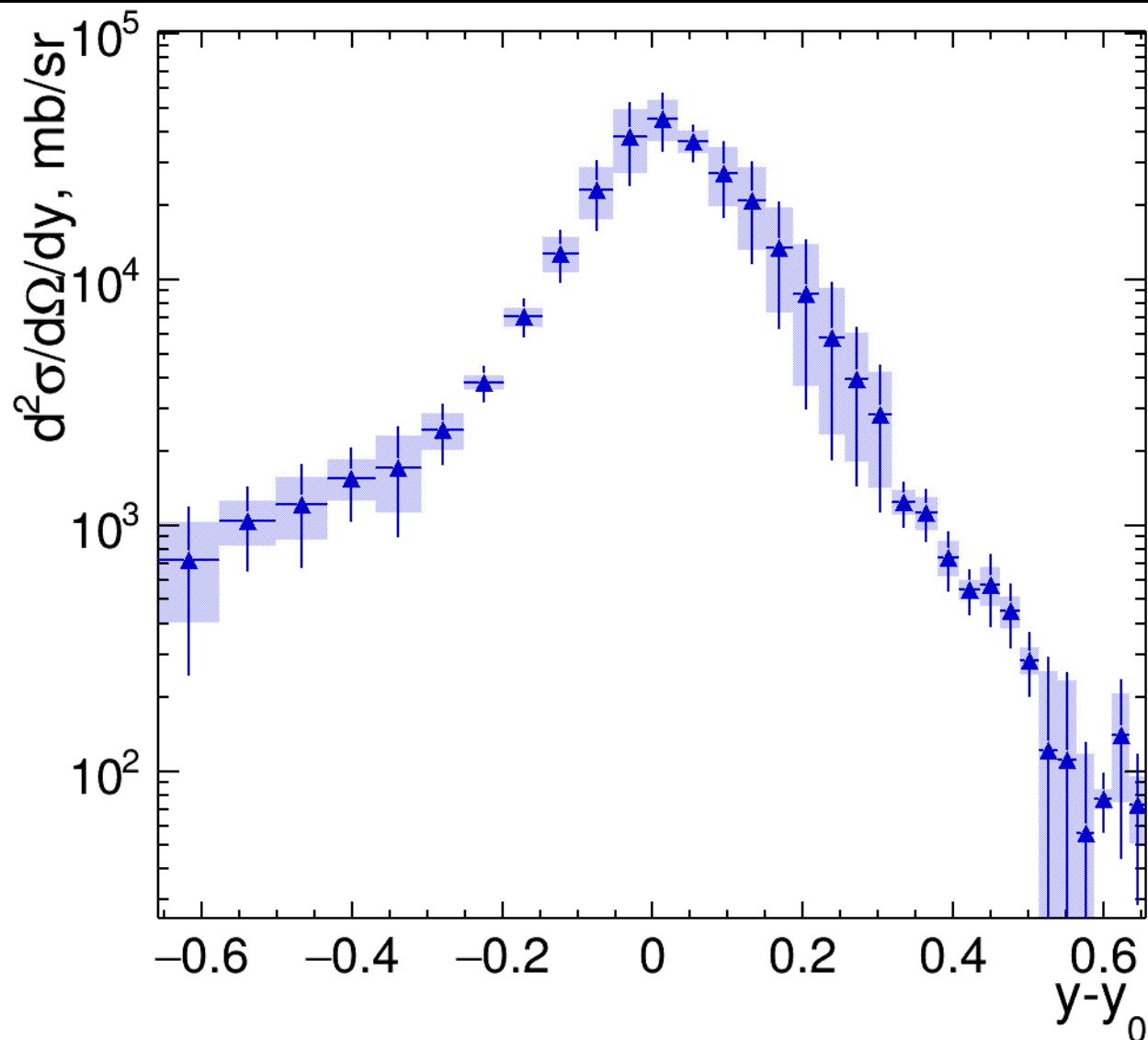
Деконволюция с матрицей отклика из DCM-QGSM-SMM и UrQMD-AMC



Дифференциальное сечение эмиссии нейтронов вперед



y – быстрота нейтронов
 y_0 – быстрота пучка

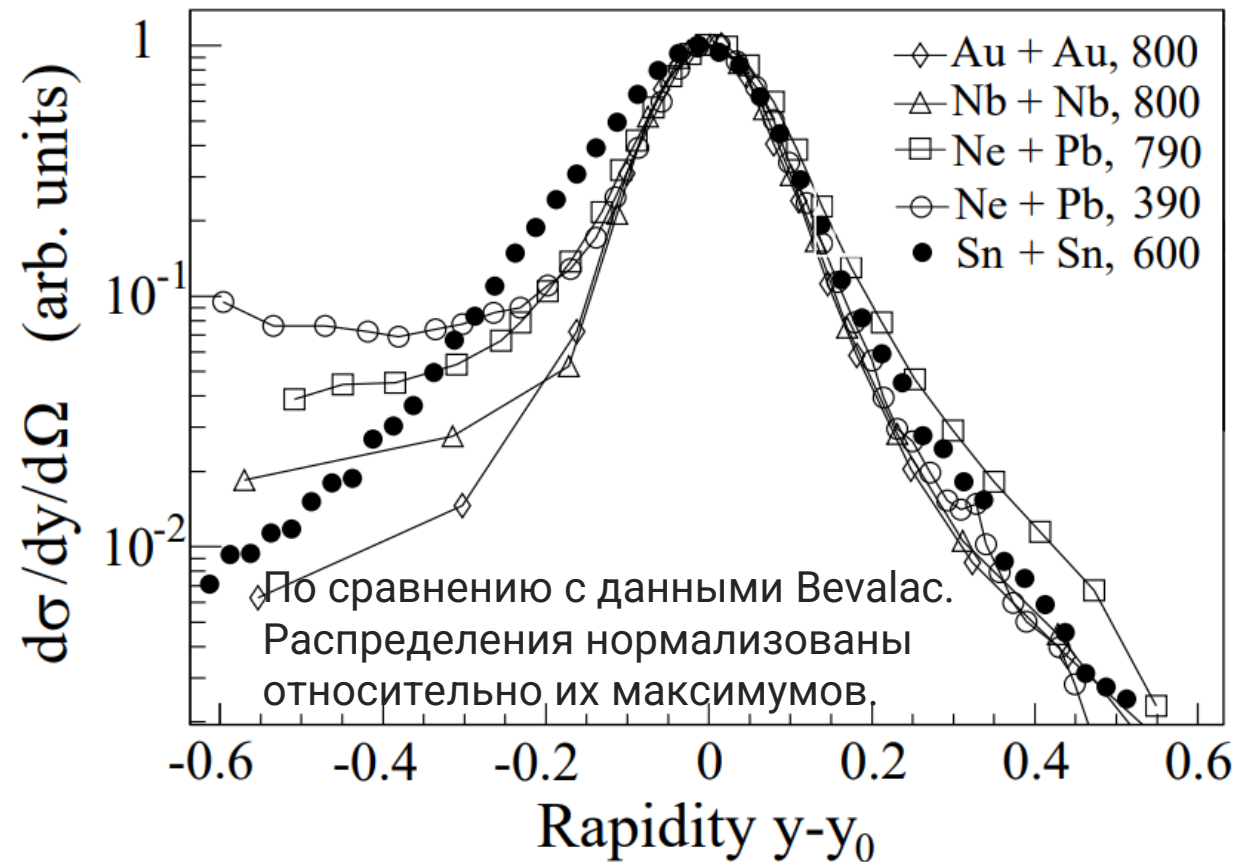
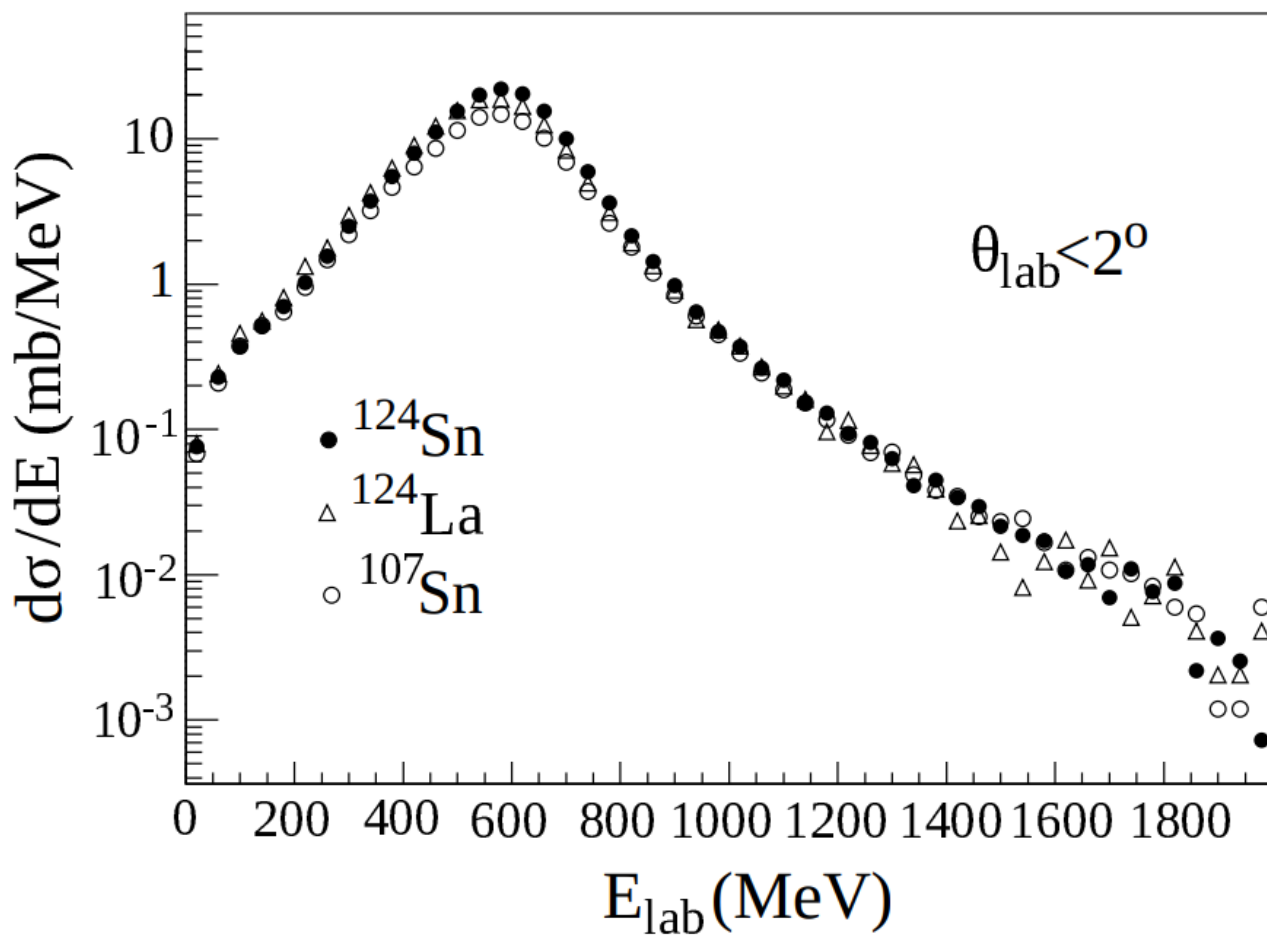


Разница между моделями использовалась в качестве дополнительного источника систематических ошибок.

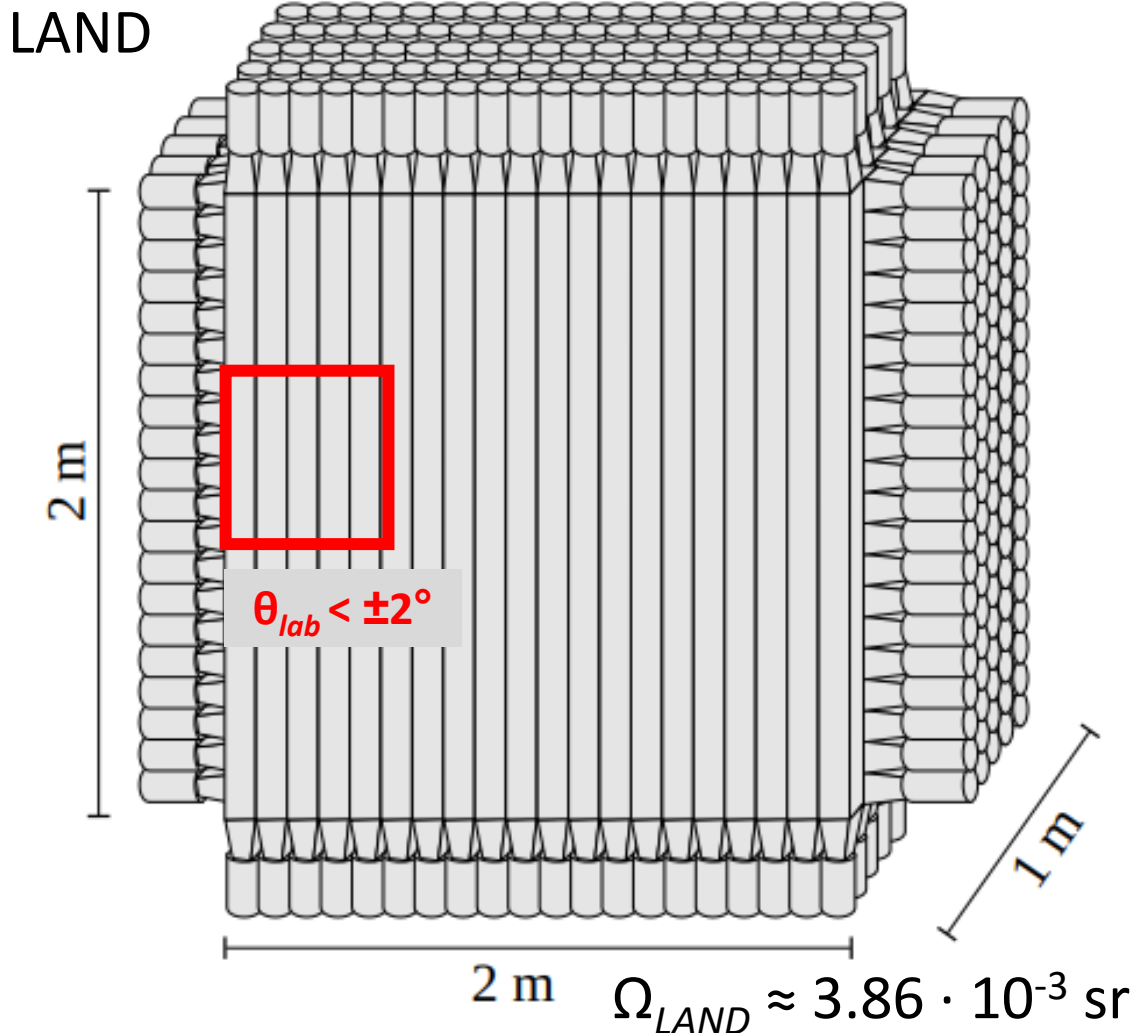
6. Сравнение с данными LAND ALADIN 600A MeV Sn+Sn

Измерения 600A MeV Sn+Sn на ALADIN LAND

P. Pawłowski et al., Neutrons from projectile fragmentation at 600 MeV/nucleon, Phys. Rev. C **108**, 044610. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.108.044610>



LAND vs HGND prototype

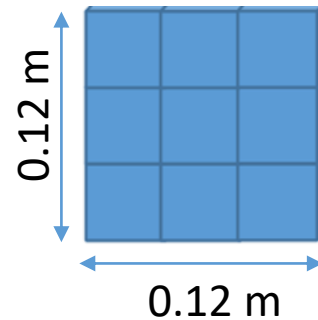


LAND (2°): Максимальный лабораторный угол эмиссии нейтронов с импульсом в системе отсчета покоя снаряда $p' \leq 100$ МэВ/с и $p' \leq 300$ МэВ/с составляет 4,69° и 13,8° соответственно.

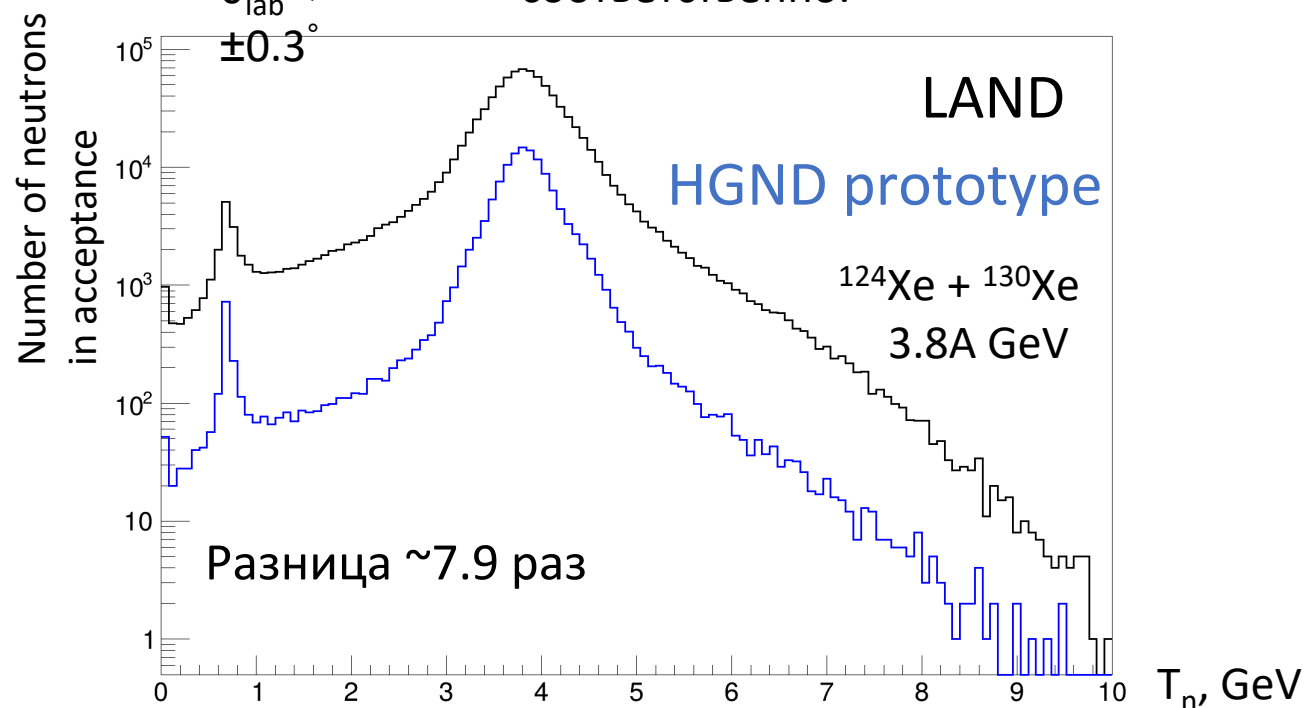
HGND prototype

$$\Omega_{HGND \text{ prototype}} \approx 2.07 \cdot 10^{-4} \text{ sr}$$

HGND prototype (0.3°): Максимальный лабораторный угол эмиссии нейтронов с импульсом в системе отсчета покоя снаряда $p' \leq 100$ МэВ/с и $p' \leq 300$ МэВ/с составляет 1,23° и 3,7° соответственно.

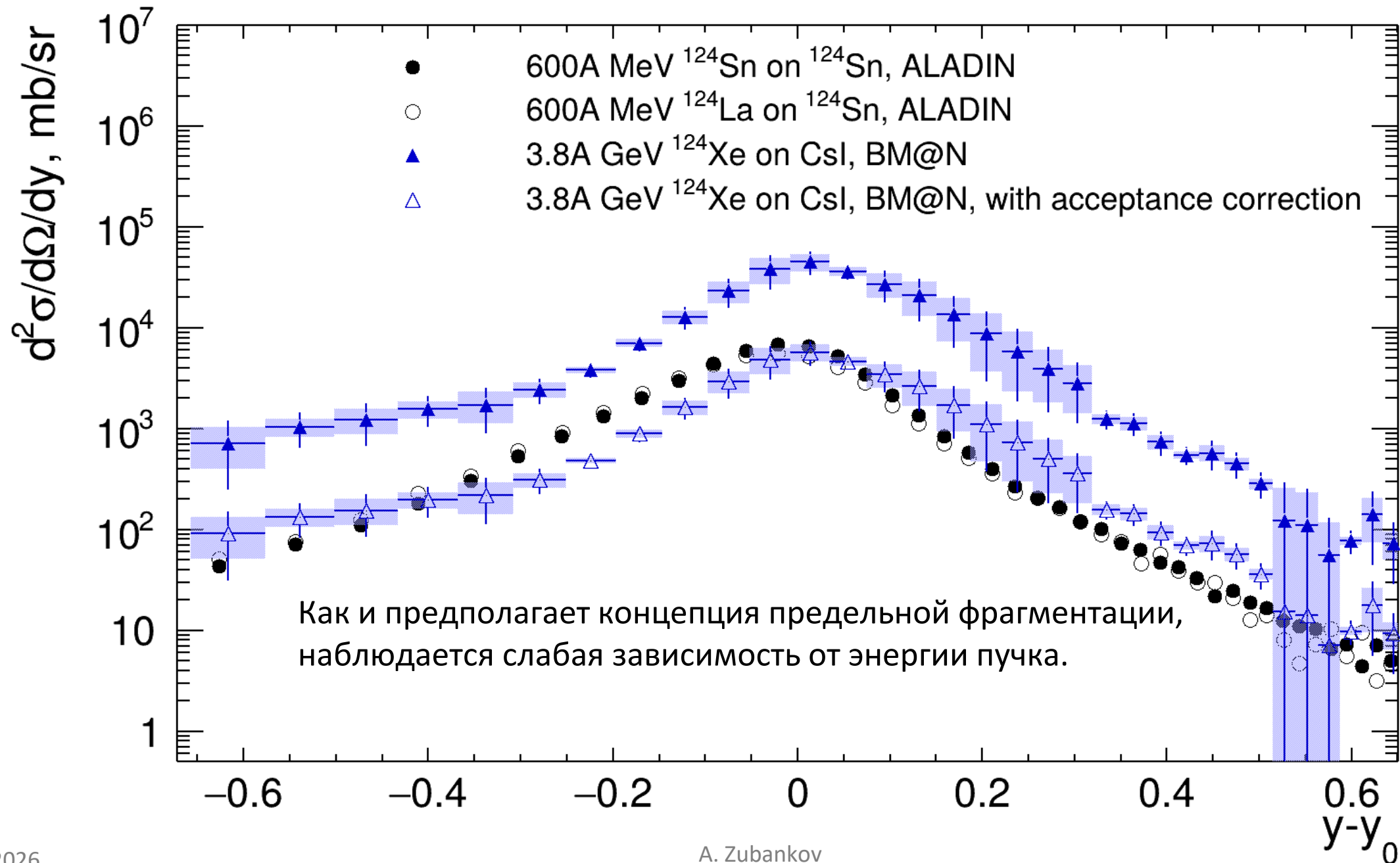


$$\theta_{lab} < \pm 0.3^\circ$$



Акцептанс детекторов в обоих экспериментах недостаточен для охвата полного распределения нейтронов.

Сравнение с данными LAND 600A MeV Sn+Sn

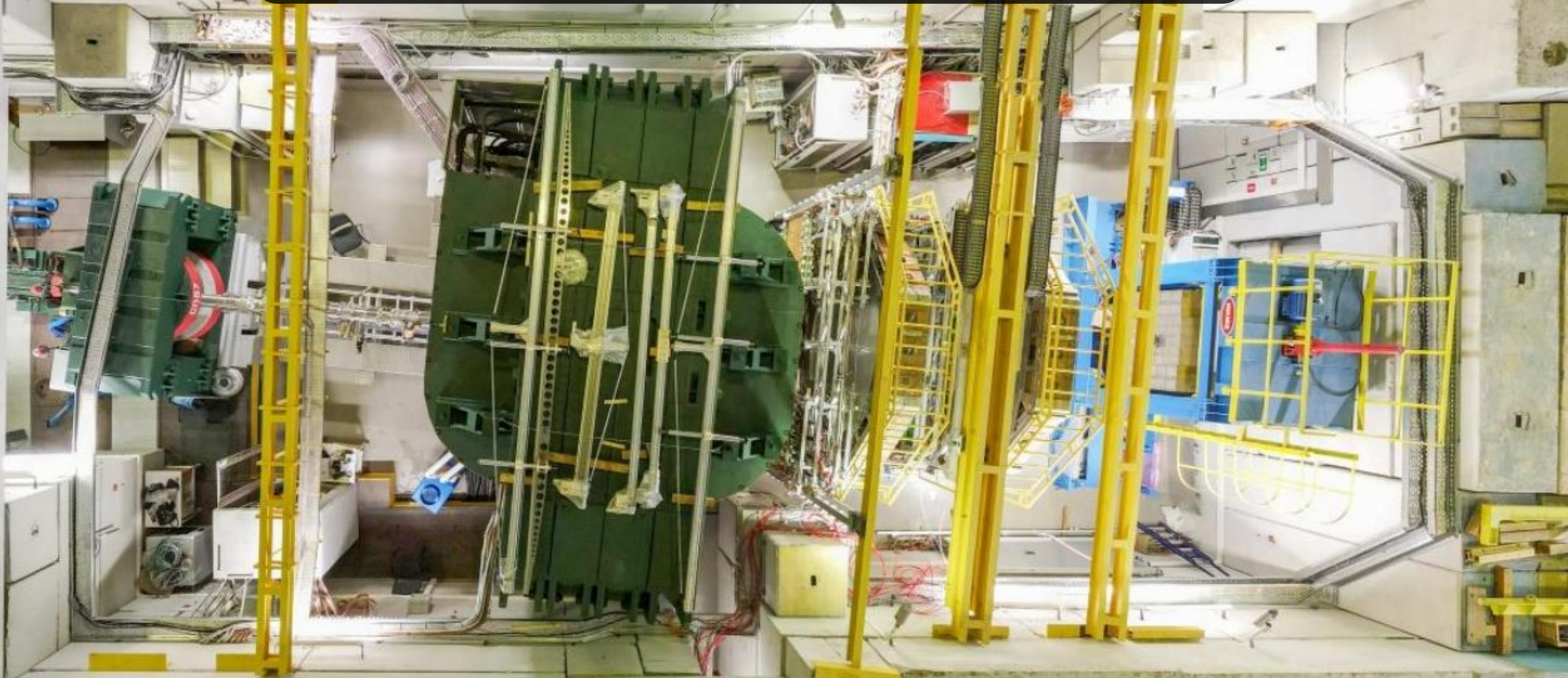


Выводы

- Измерено распределение кинетической энергии нейтронов от адронной фрагментации ^{124}Xe .
- Распределение в пределах погрешностей хорошо согласуется с результатами моделирования.
- Измерены дифференциальные сечения эмиссии нейтронов-спектаторов вперед.
- С учетом разницы в аксептансе полученные дифференциальные сечения согласуются с данными, полученными экспериментом LAND на установке ALADIN при столкновениях $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ при энергии 600А МэВ.

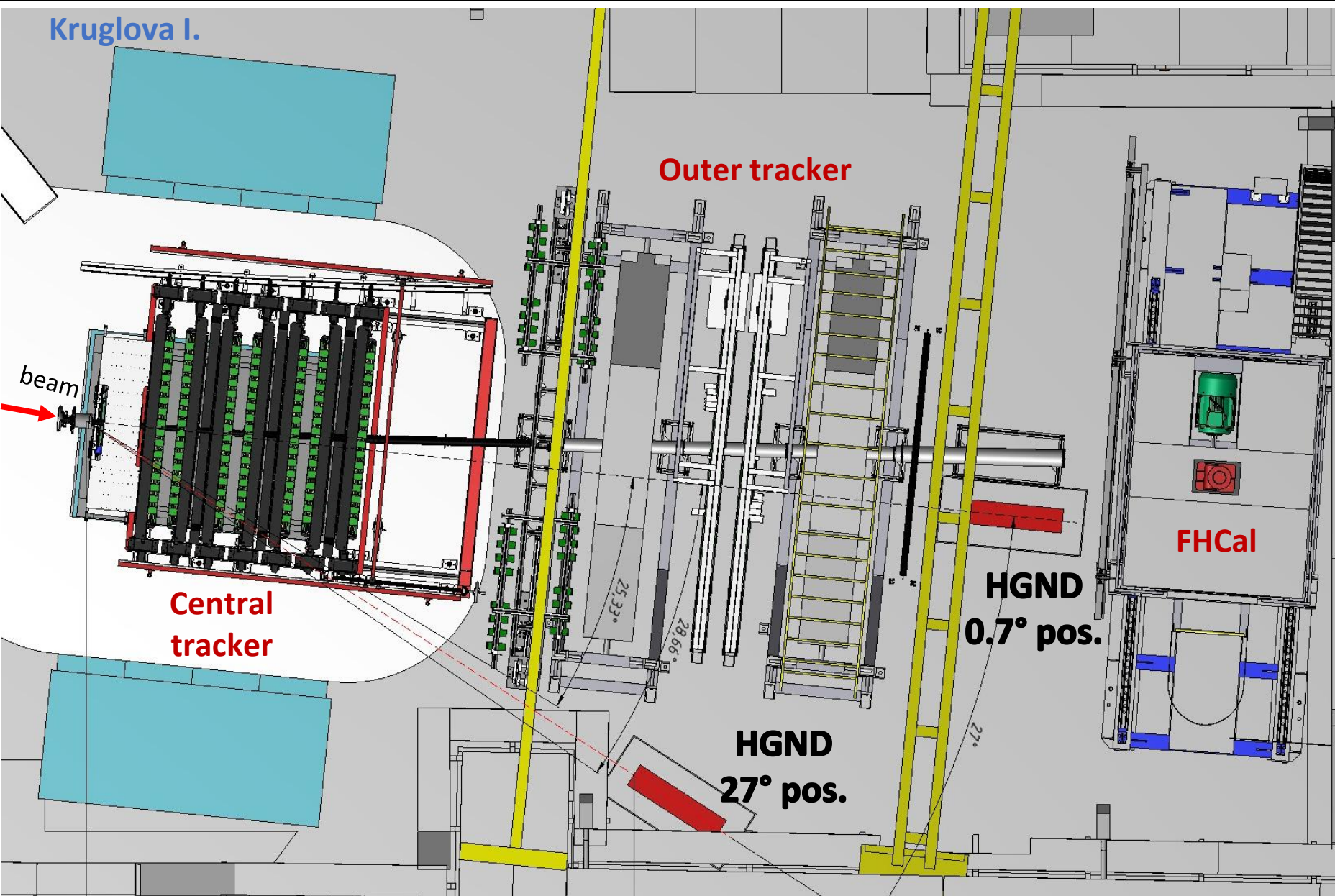
https://bmn.jinr.int/wp-content/uploads/2026/05/Note_forward_neutrons_HGND.pdf

Спасибо за внимание!



Backup

HGND prototype



Положение 0.7°:

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

Положение 27°:

Измерения спектров нейтронов в области \sim midrapidity.



Basic Methods of Neutron Spectrometry:

Neutron energy, MeV

1

10

100

1000

10000

n-p elastic scattering

eff. $\sim 10^{-5}$

Time-of-flight

eff. $\sim 0.01 - 0.9$

HGND

Calorimetry eff. ~ 1

Pulse height distribution

eff. $\sim 0.01 - 0.2$

Threshold reactions

eff. $< 10^{-5}$

Bonner spheres



– 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

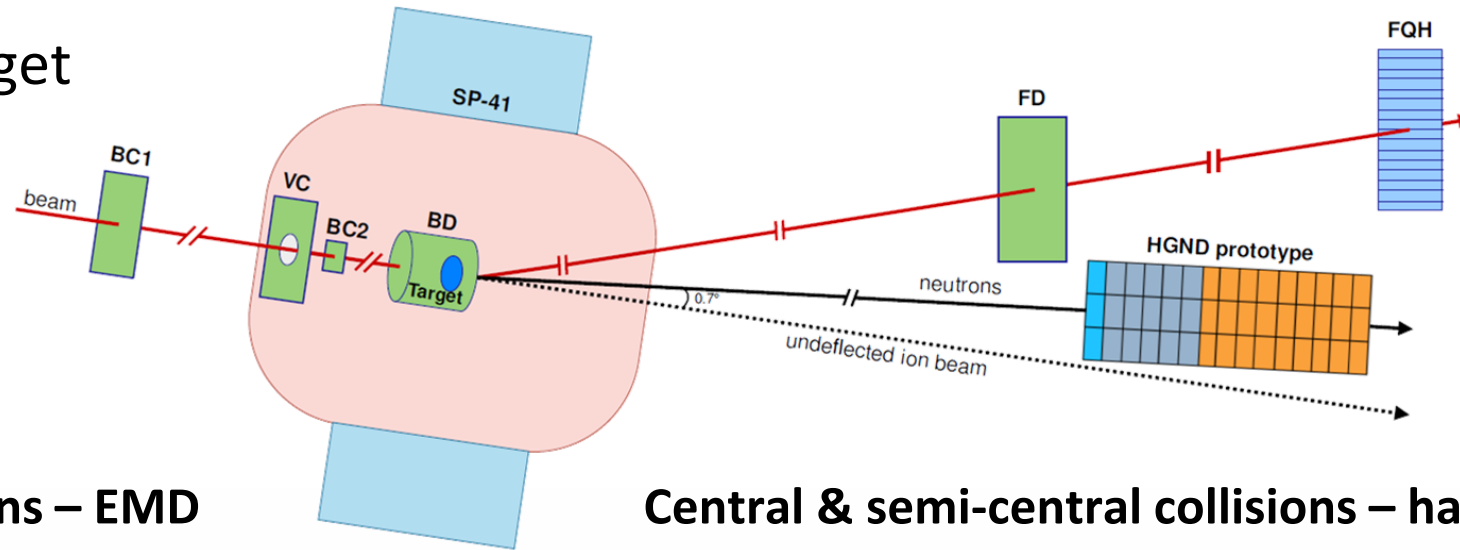


Interaction	Run	BT prescale	Target	N_{bitBT}	N_{ev}	N_n
Hadronic	8299, 8300	1999	Csl 2%	20286	522672	164872
Hadronic	8225	1999	Csl 1%	3416	46752	14183
Hadronic	8285, 8291, 8296	1999	empty	12006	2789	893
EMD	8281, 8284	1	Csl 2%	877084	694206	2266
EMD	8282, 8283	1	empty	141782	139717	160

Selection of EMD and hadronic interactions events

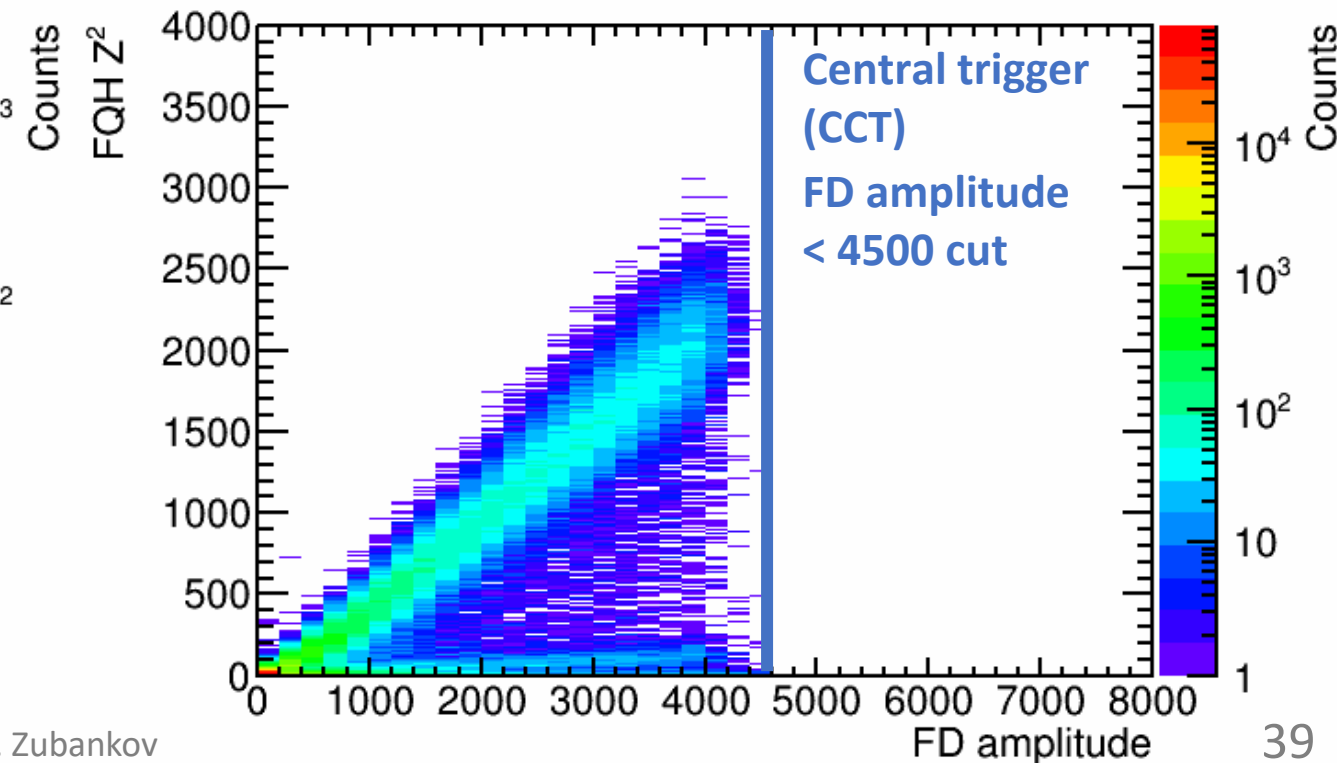
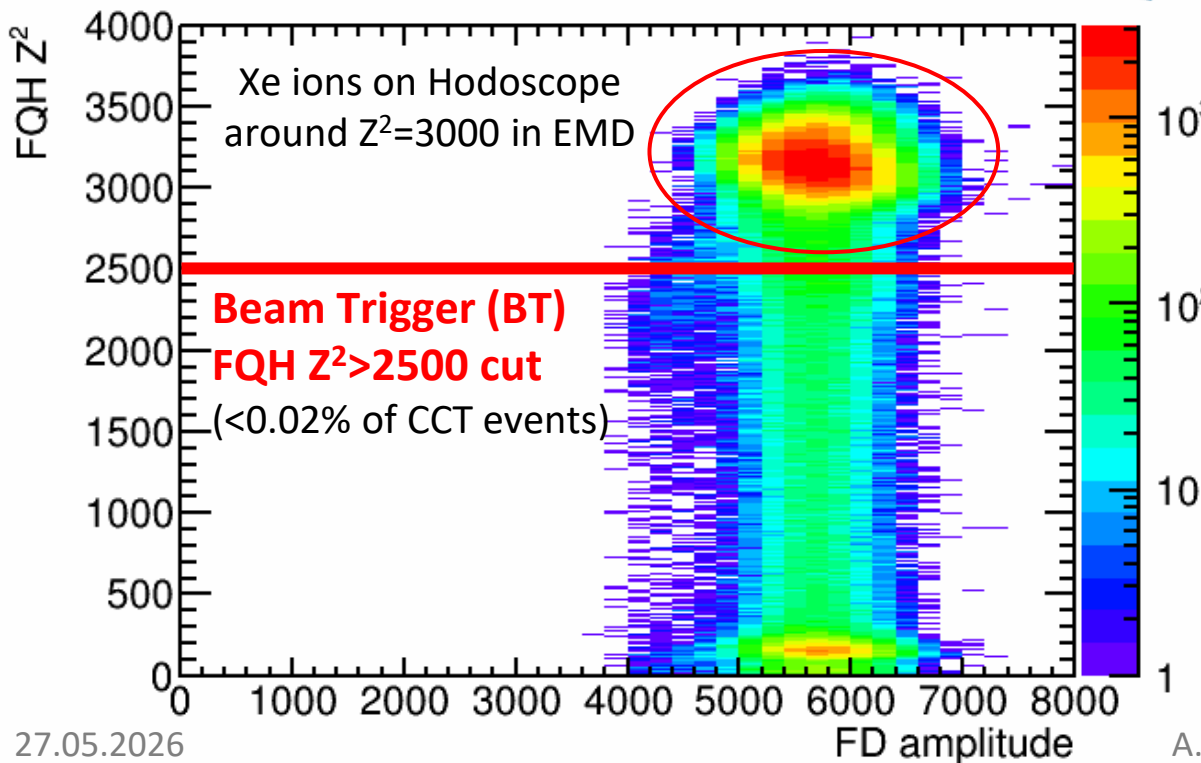


Only single Xe ion in target



Ultra-peripheral collisions – EMD

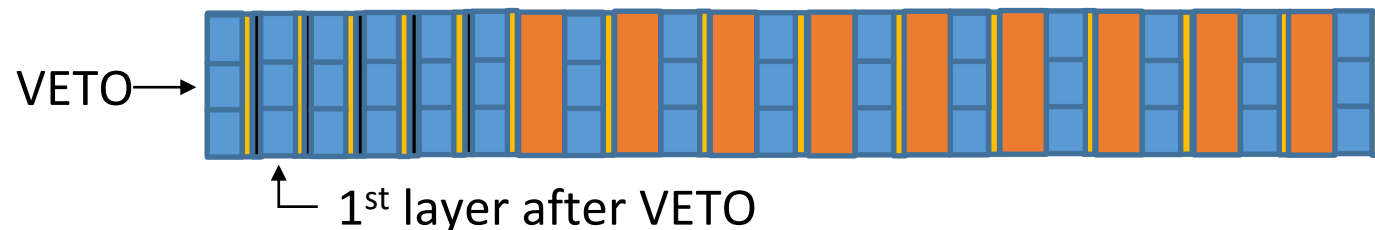
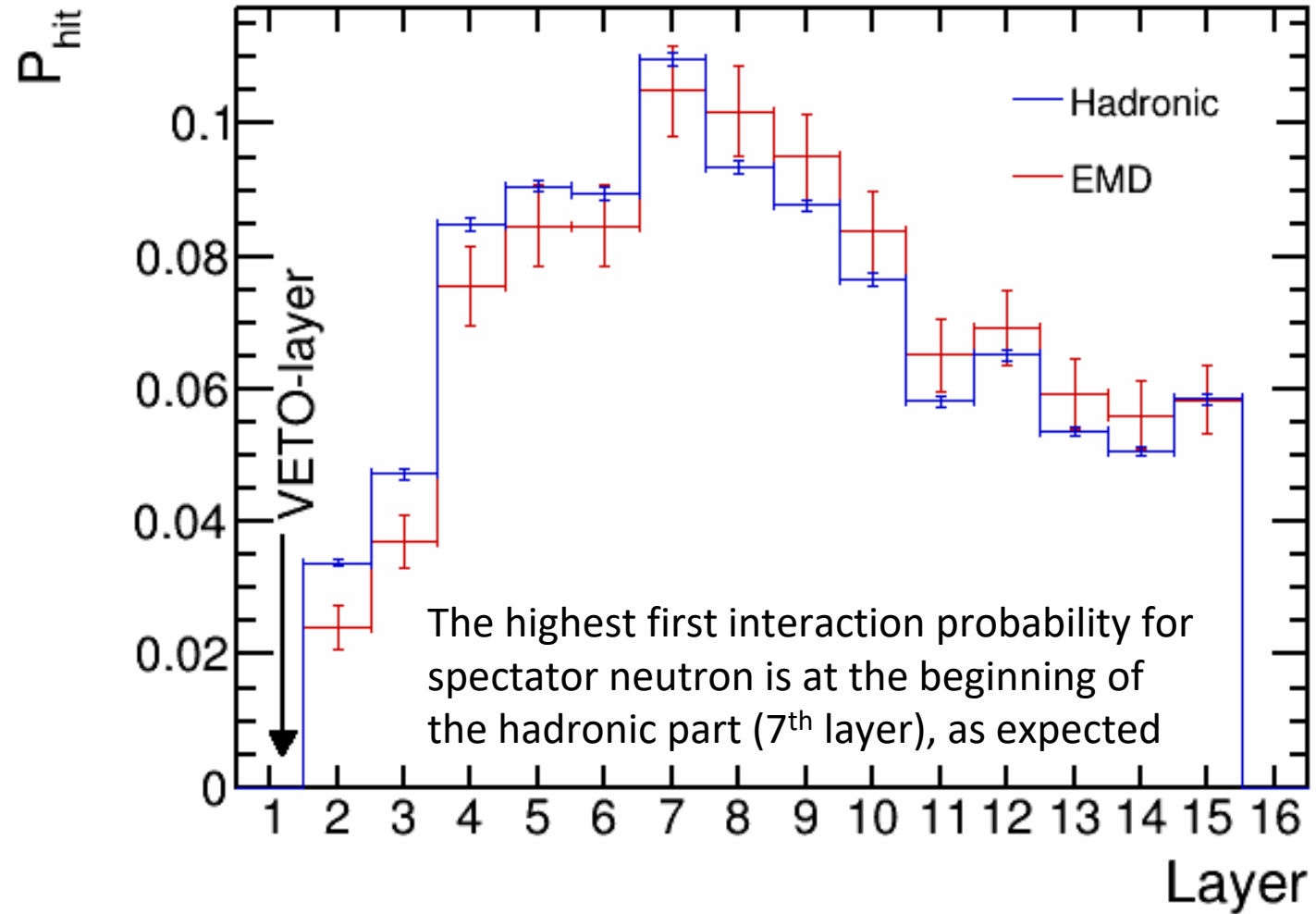
Central & semi-central collisions – hadronic interactions



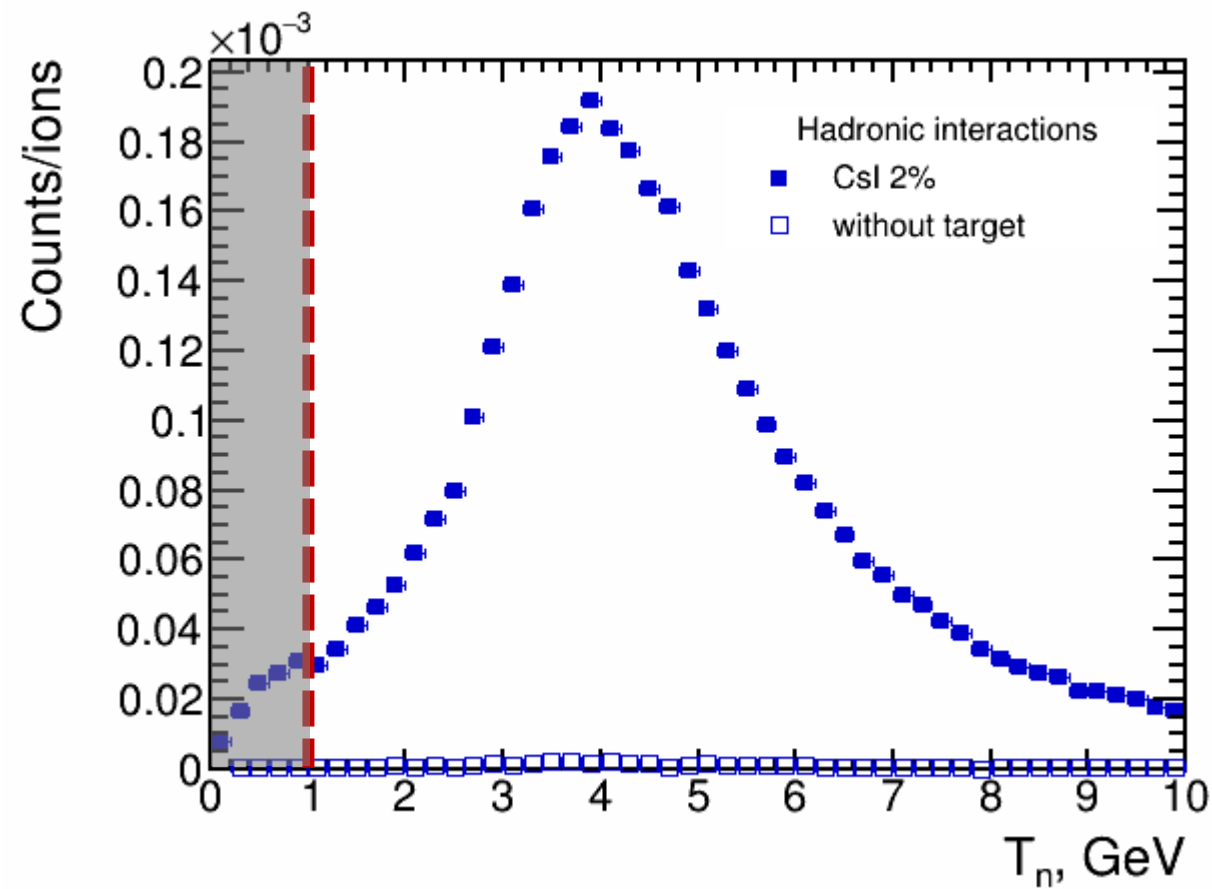
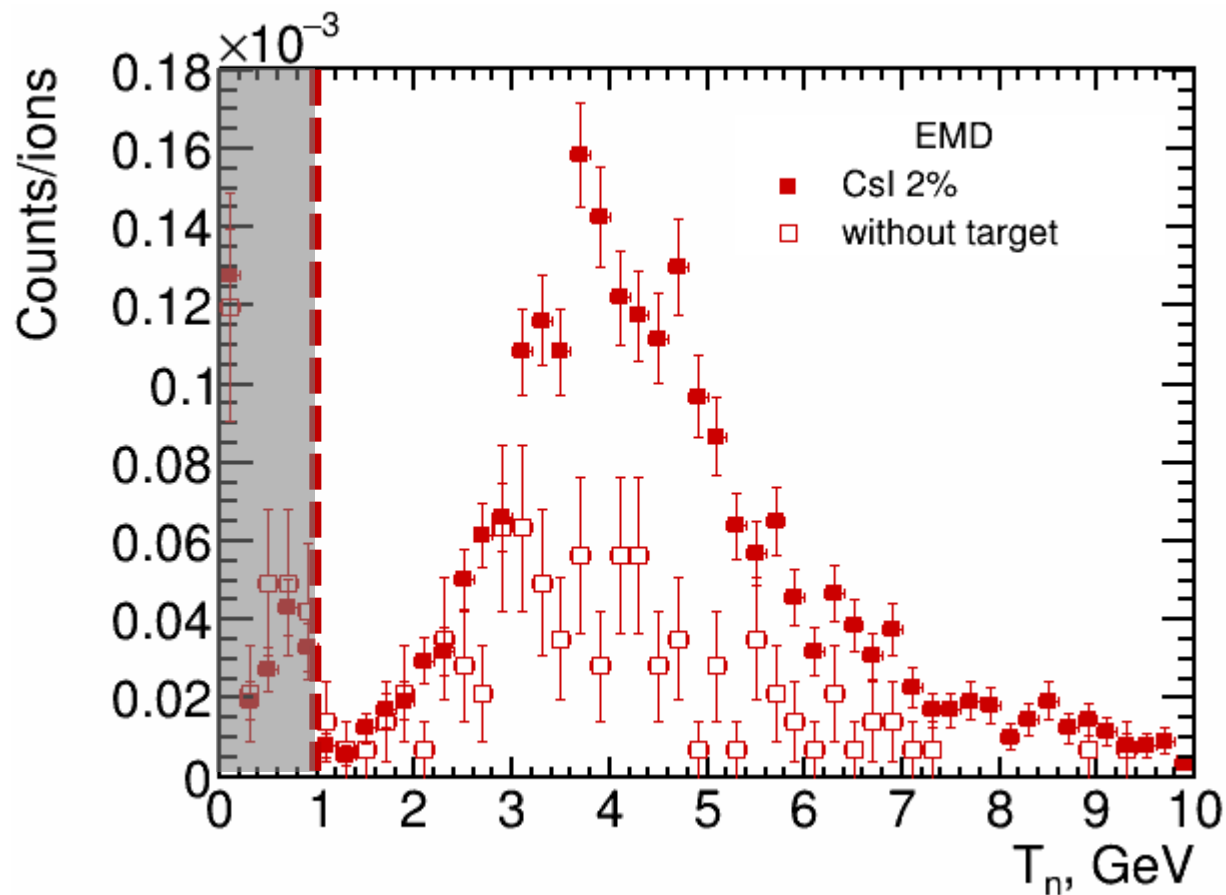
Selection of spectator neutrons



- Selection of events without charged particles using **VETO**
- Background rejection from spectator neutrons using **ToF cut**
- Photon rejection using **1st layer after VETO** ($1.55 X_0$ or $0.11 \lambda_{int}$)
- Reconstruction of energy by **maximum velocity**
- Scaled by incident ion beam rate measured by **Beam Trigger BT**



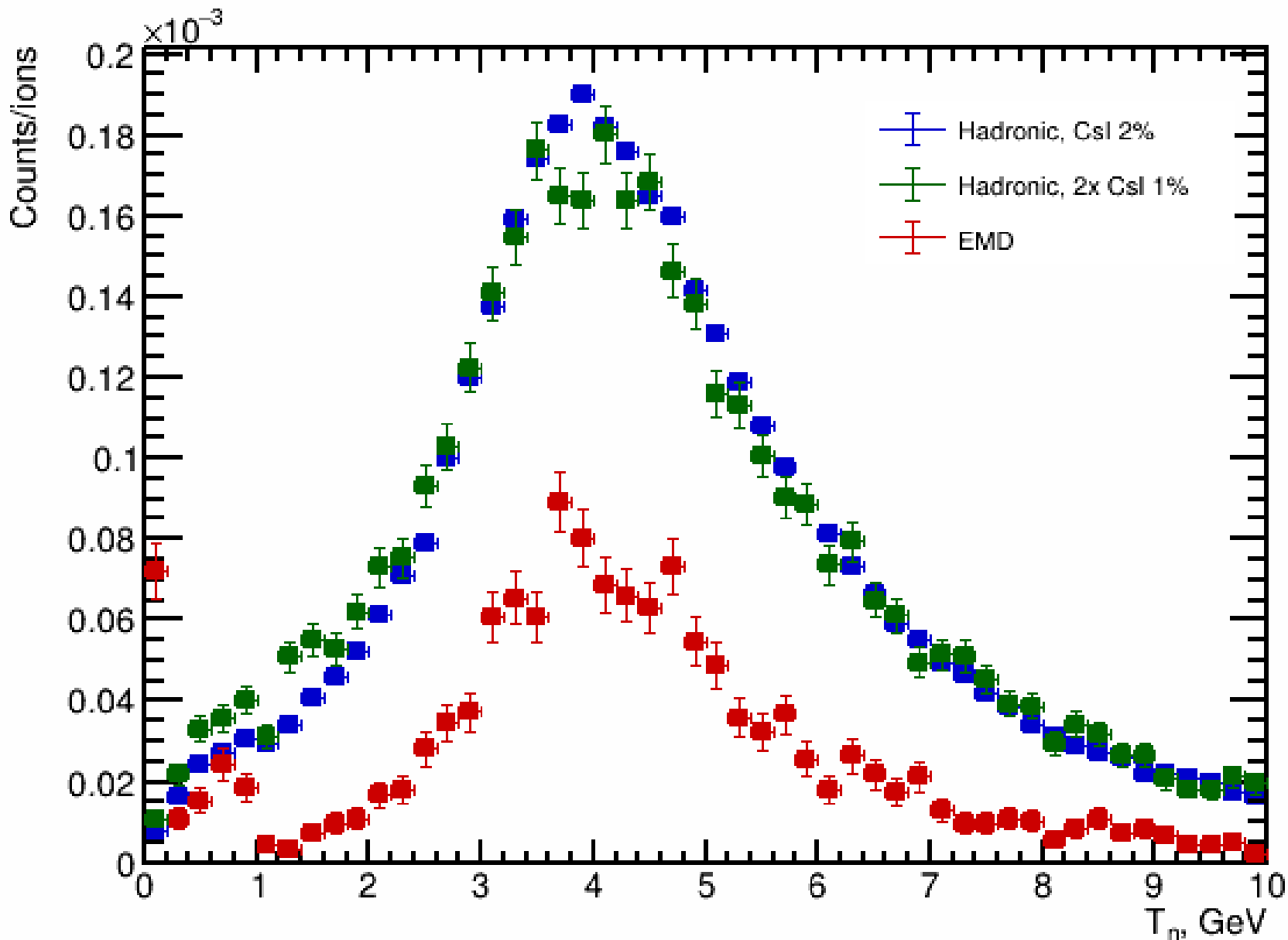
Reconstructed neutron spectra



Reconstructed spectra were obtained both for runs with CsI 2% target and without it to estimate fraction of out of target interactions.

Empty target spectra were subtracted from target spectra.

Comparison with thinner target



Corrected spectra after subtracting empty target spectra

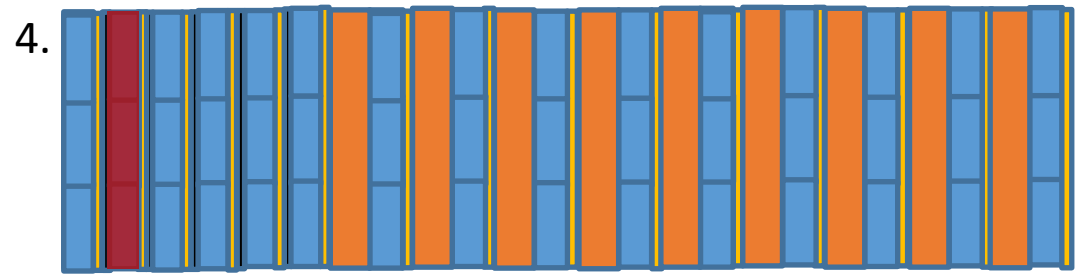
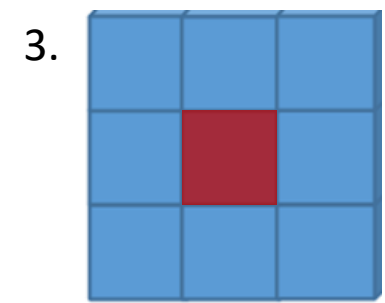
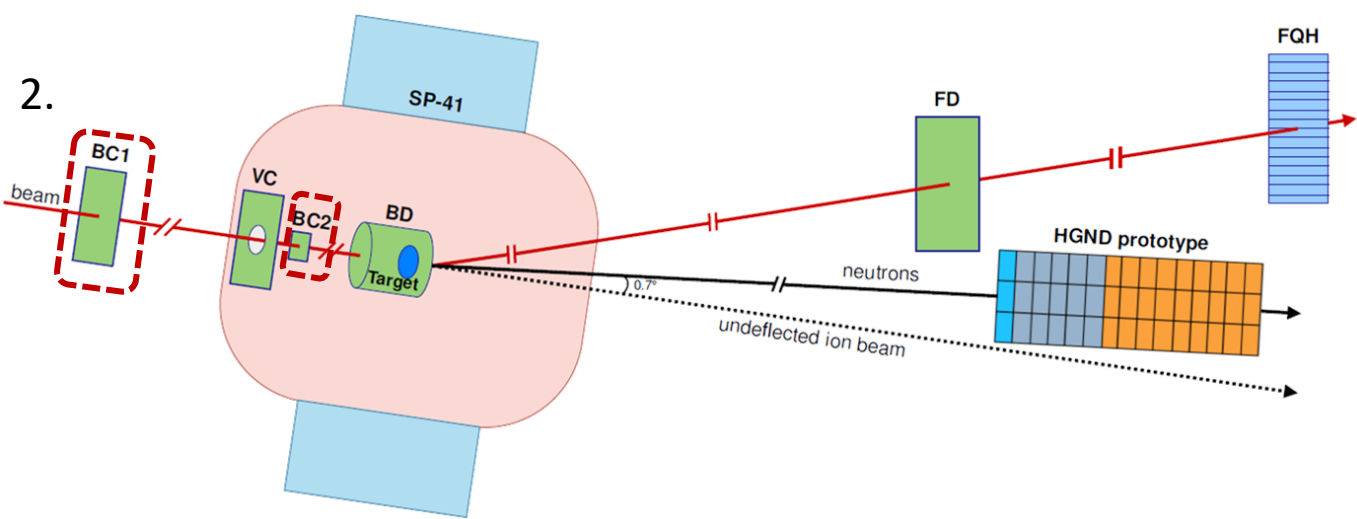
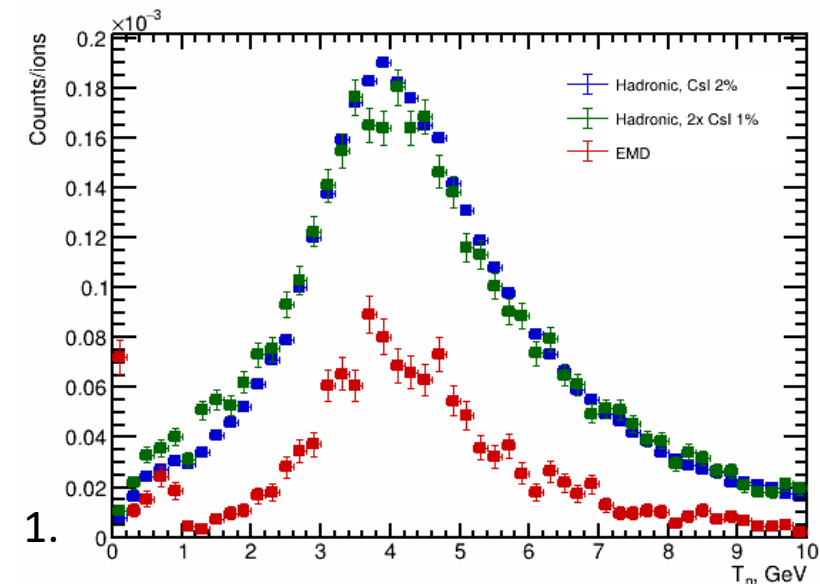
Measurements with 1% and 2% target are consistent

Sources of systematics



The sources of systematics in obtaining the number of neutrons:

1. The number of incident ions with CsI 2% or CsI 1% targets.
2. Start trigger time obtained using BC1 or BC2.
3. Unevenness of the number of neutrons on HGND prototype surface – using only the central module or all 9 modules.
4. Uncertainty in the number of neutrons estimated with or without photon rejection.

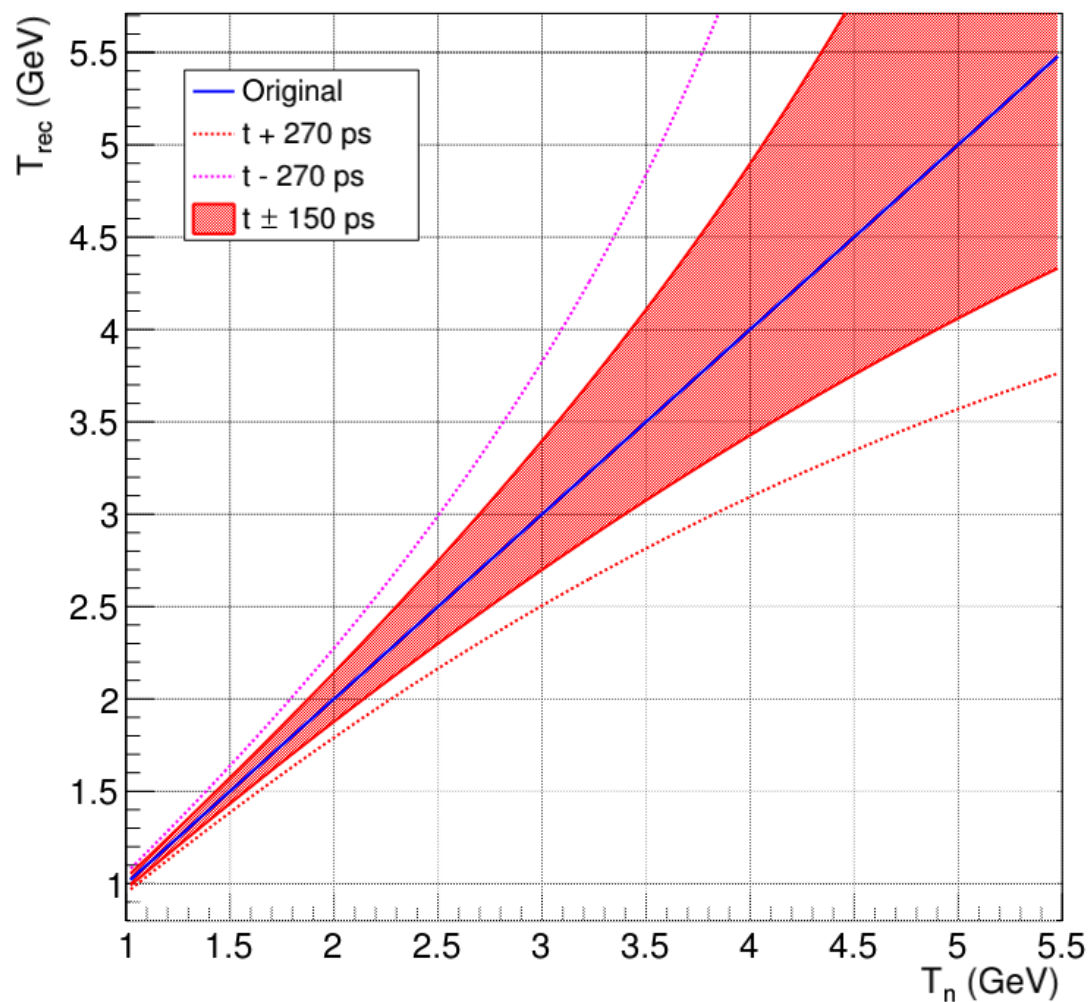


$$\delta_{syst} = \sqrt{\delta_{n/ions}^2 + \delta_{tr.time}^2 + \delta_{modules}^2 + \delta_{\gamma-rejection}^2}$$

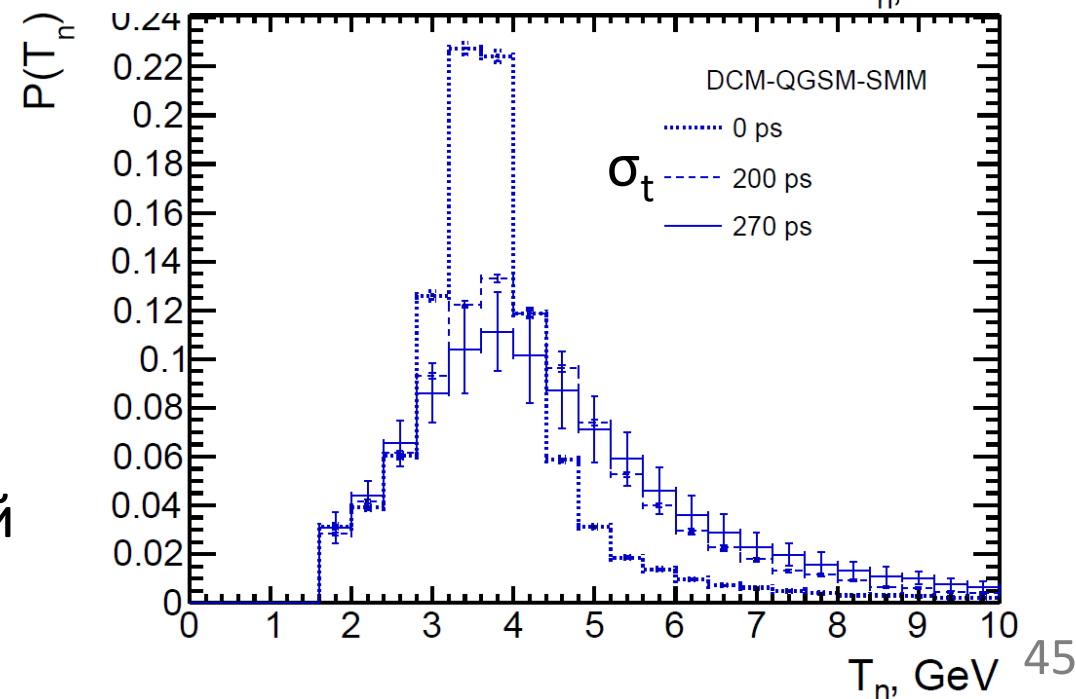
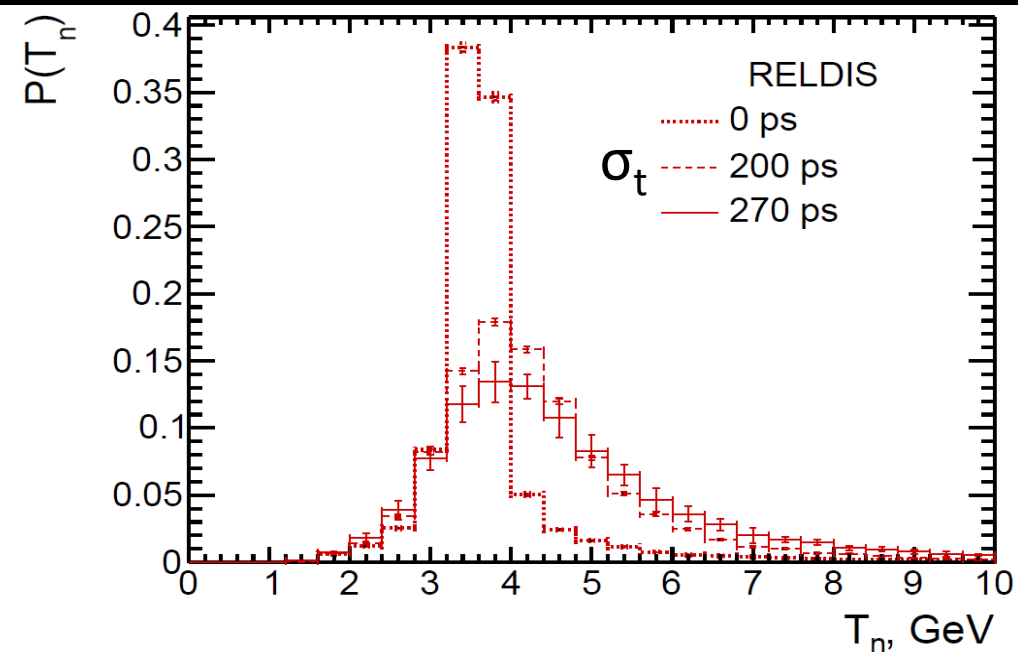
Source of systematics	EMD systematics RELDIS	Hadronic systematics	
		DCM-QGSM-SMM	UrQMD-AMC
$\delta_{n/ions}$	-	0.62%	
$\delta_{tr.time}$	0.09%	2.93%	
$\delta_{modules}$	7.47%	6.74%	4.39%
$\delta_{\gamma-rejection}$	0.66%	6.20%	6.77%
Total δ_{syst}	7.50%	9.64%	8.61%

Влияние временного разрешения на спектр нейтронов

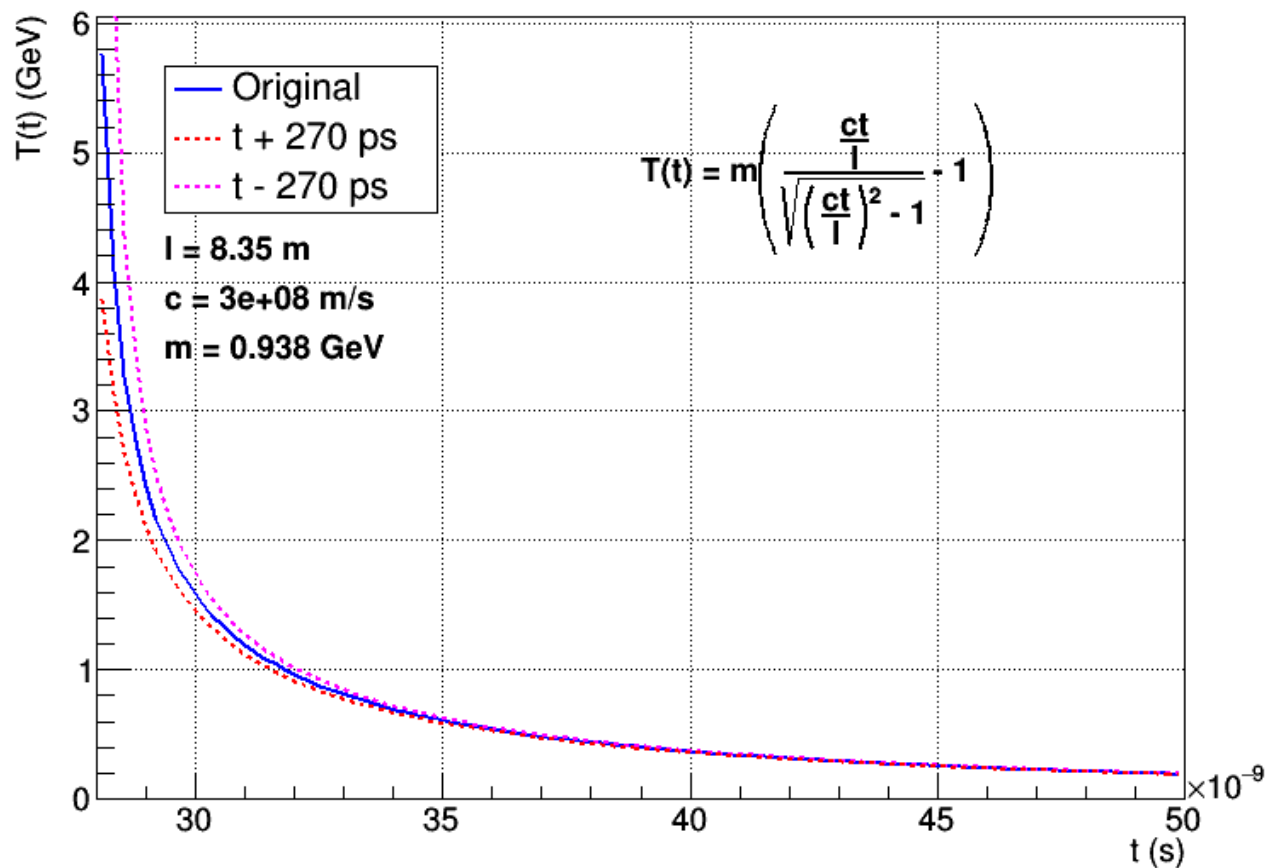
T_{rec} vs T_n with ± 270 and 150 ps shifts



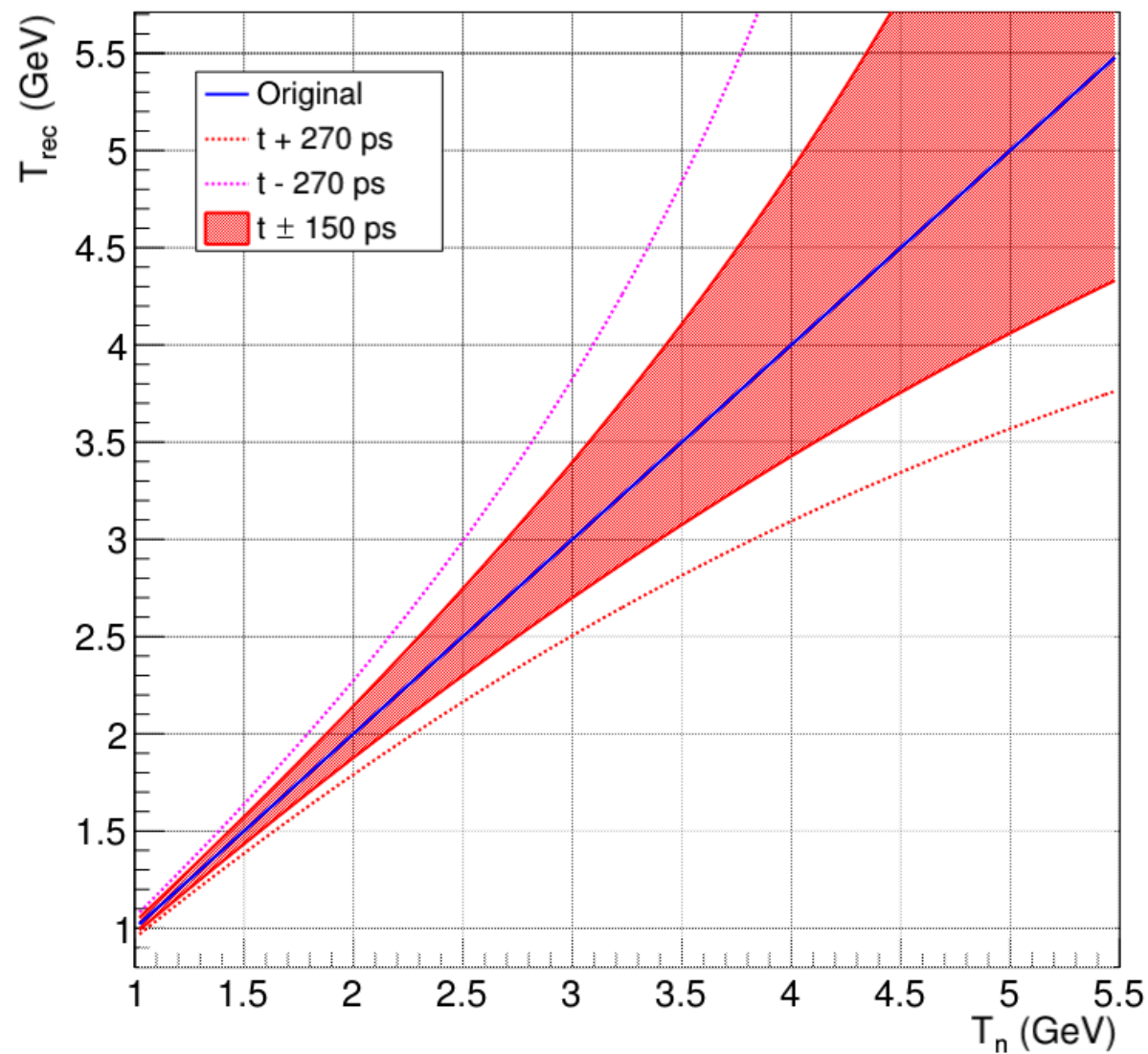
Спектры размазываются в сторону высоких энергий из-за временного разрешения ~ 270 ps.



T(t) vs t with ± 270 ps shift



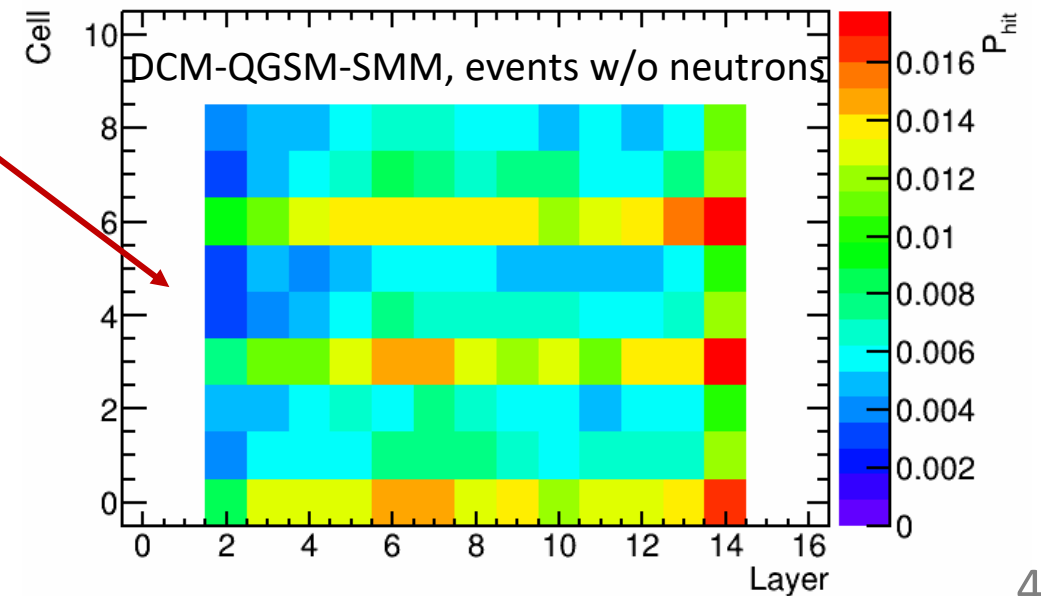
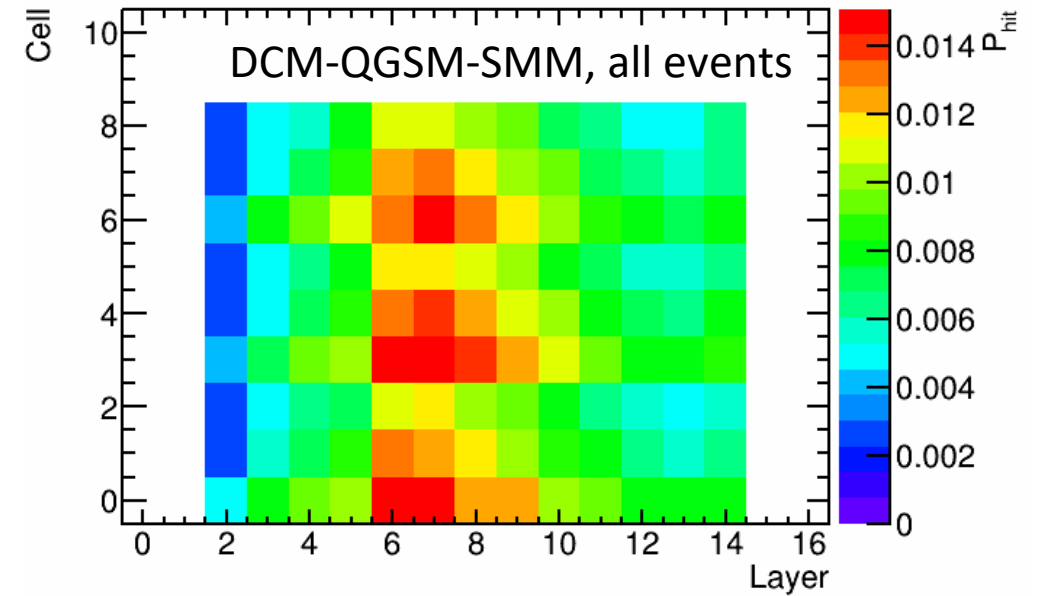
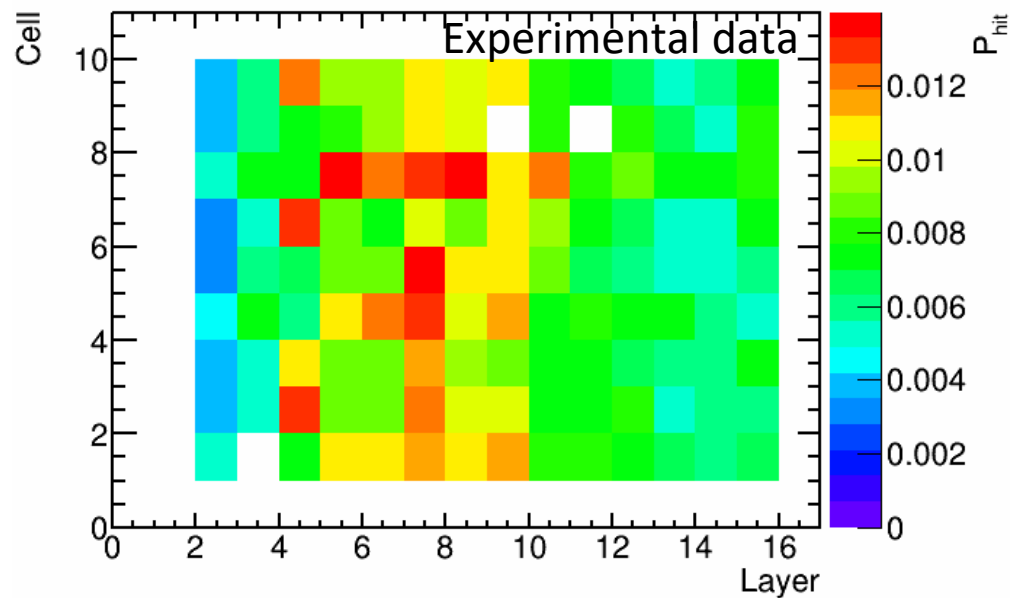
T_{rec} vs T_n with ± 270 and 150 ps shifts



Background source

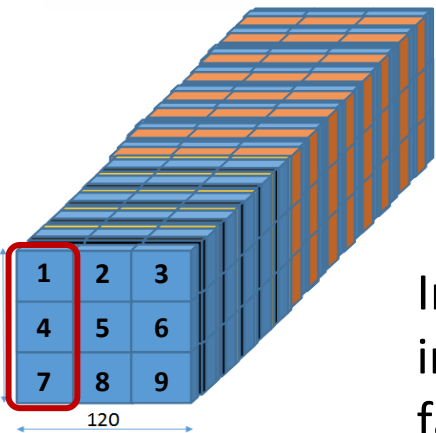


Cells for which the T_n is reconstructed

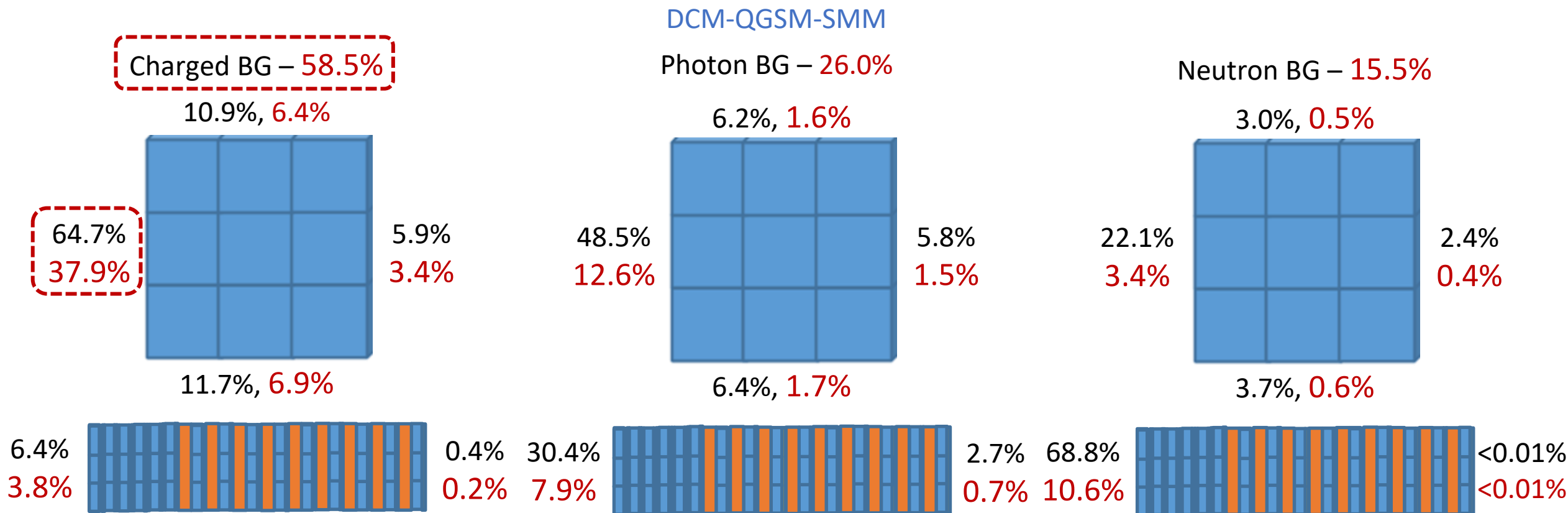


BG that passes the neutron selection criteria and cannot be obtained by analysis of existing data

In the events where neutrons were not incident on the HGND prototype but were falsely identified as neutrons, the cells closest to the beam are most often triggered

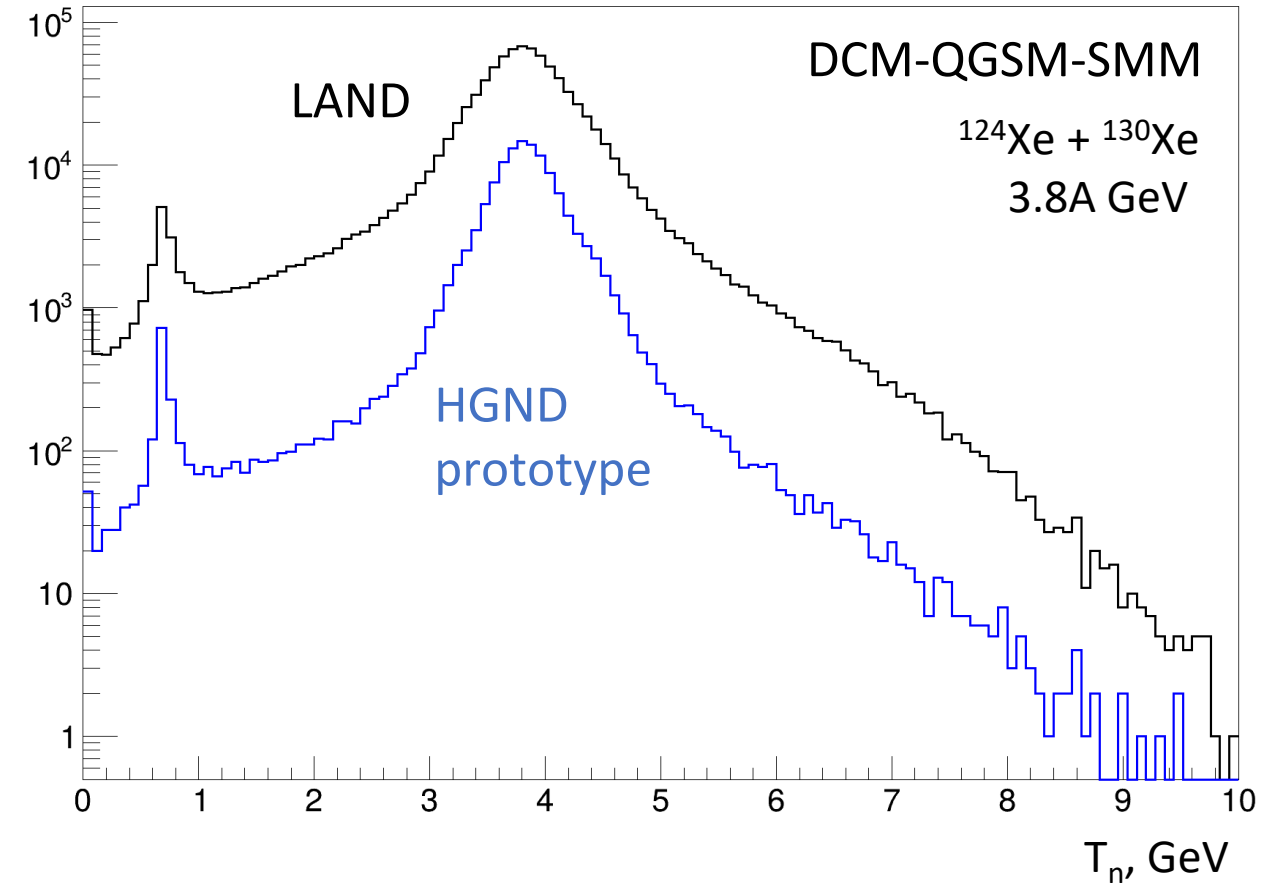
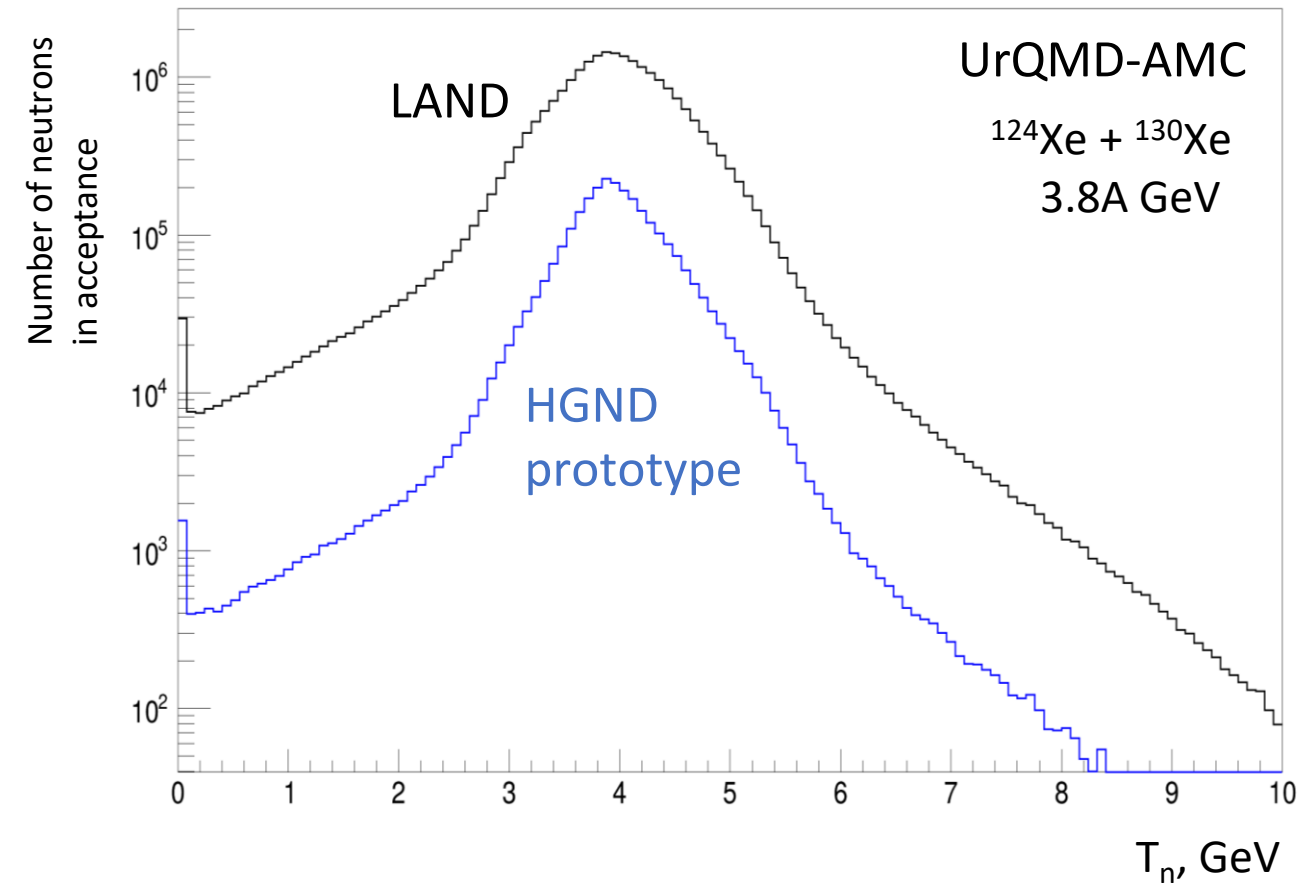


Sources of background in events without primary neutrons



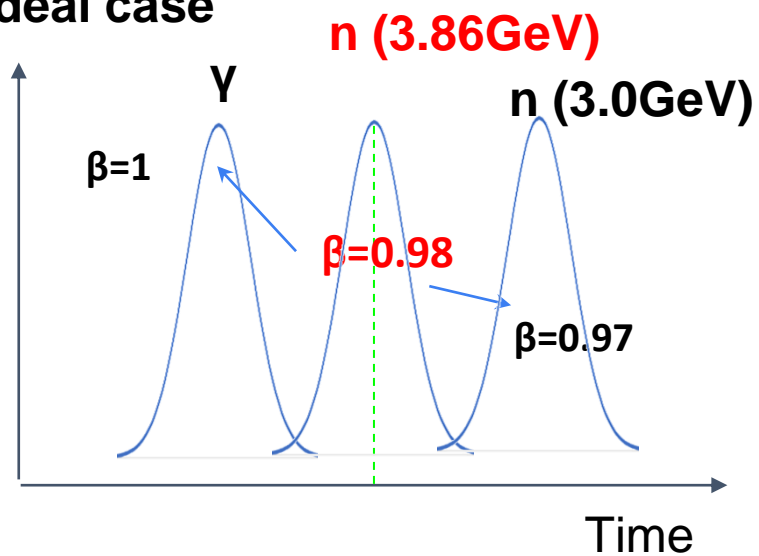
- The main source of the background is the background from charged particles – **58.5%**.
- The main direction of the background is the side closest to the beam – **53.9%**.
- Only **0.02%** of the background from charged particles on the side surface of HGND prototype closest to the beam is the background from the primary charged particles

LAND vs HGND prototype acceptance



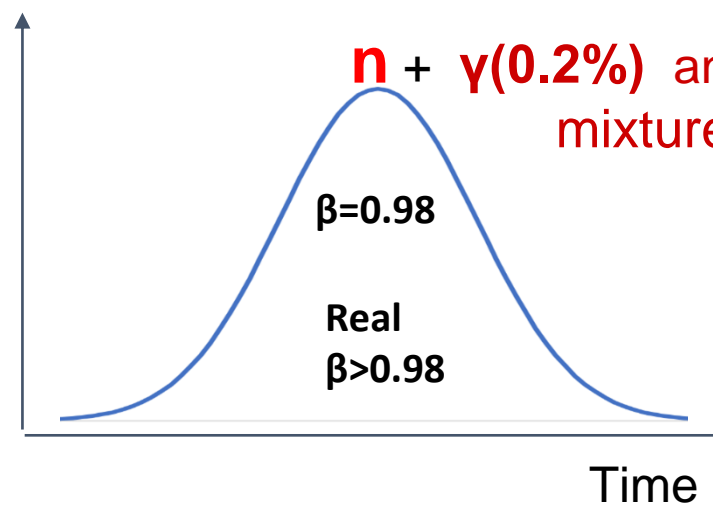
~7.9 times difference

Ideal case

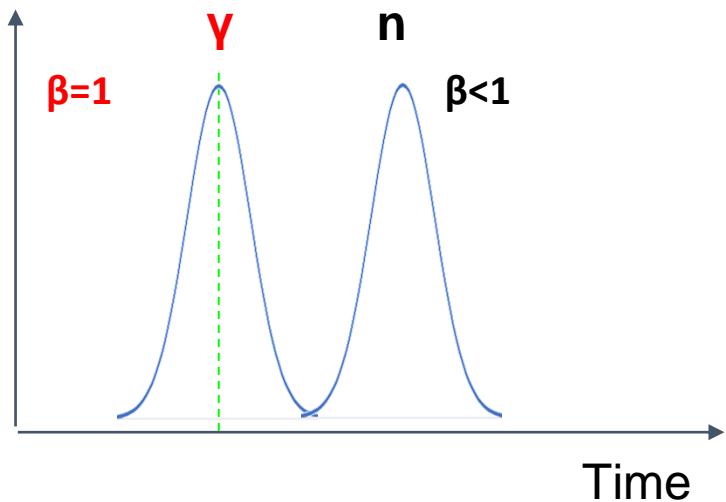


Calibration on neutrons

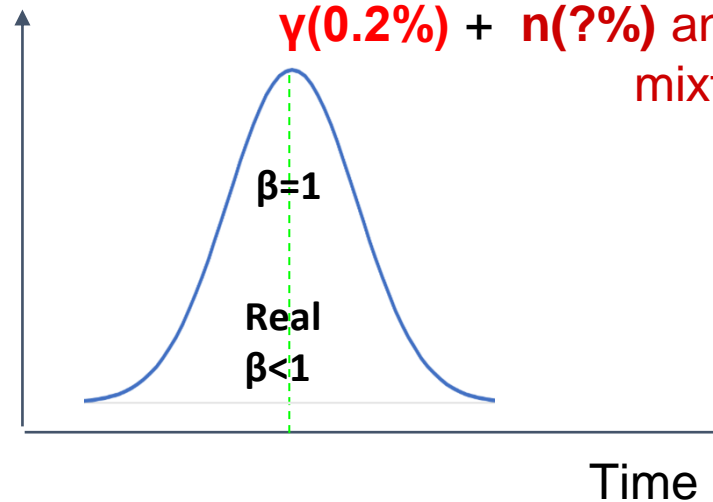
Real data



Calibration on neutrons



Calibration on photons



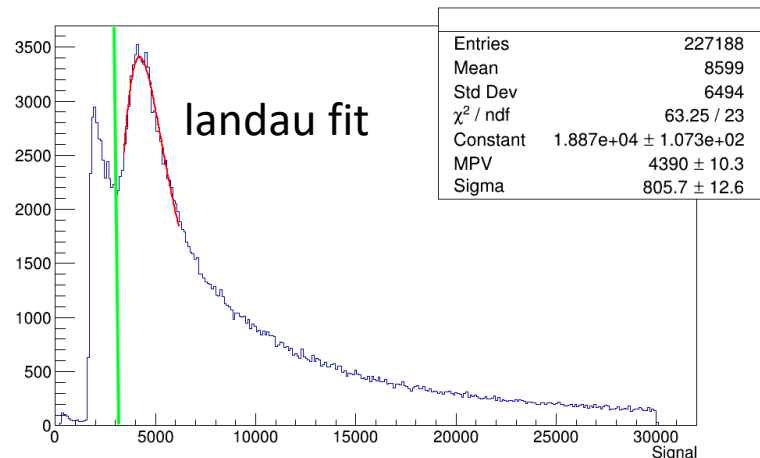
Calibration on photons is possible up to 8 layer

HGND calibration

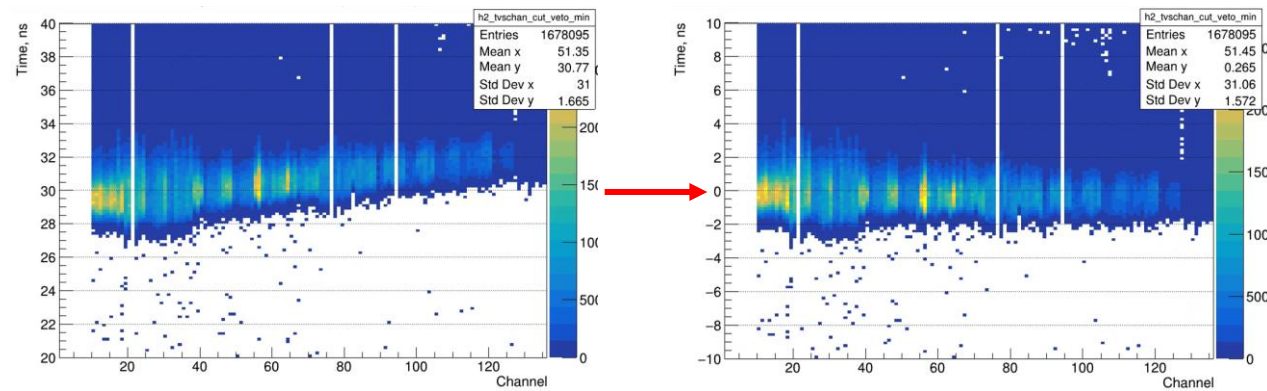


1. Amplitude normalization

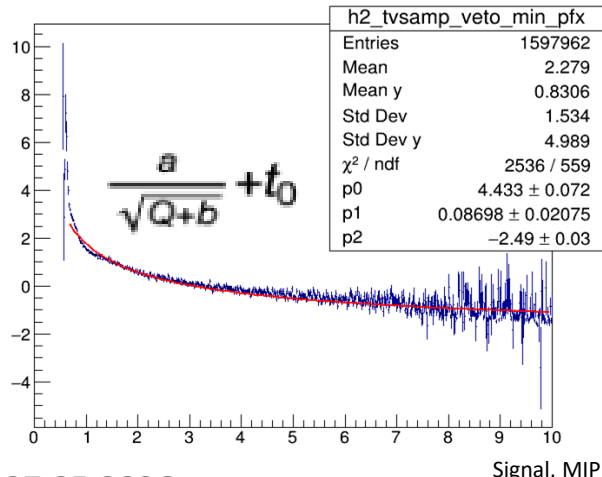
$$Ampl = Ampl \cdot \frac{1}{MPV}$$



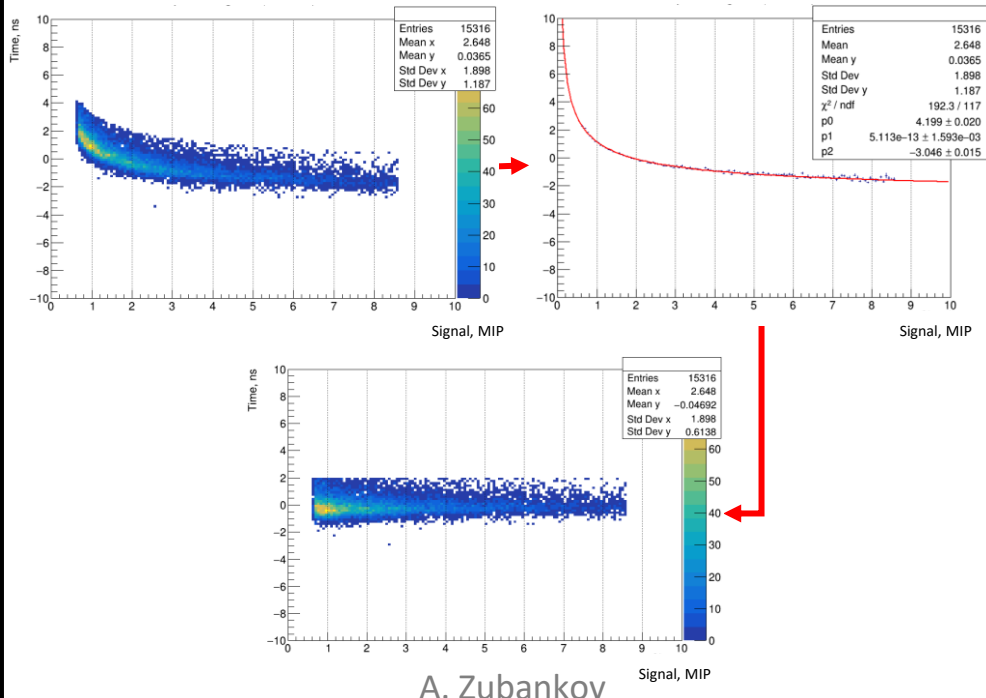
2. Time shift for all channels by the average fit value



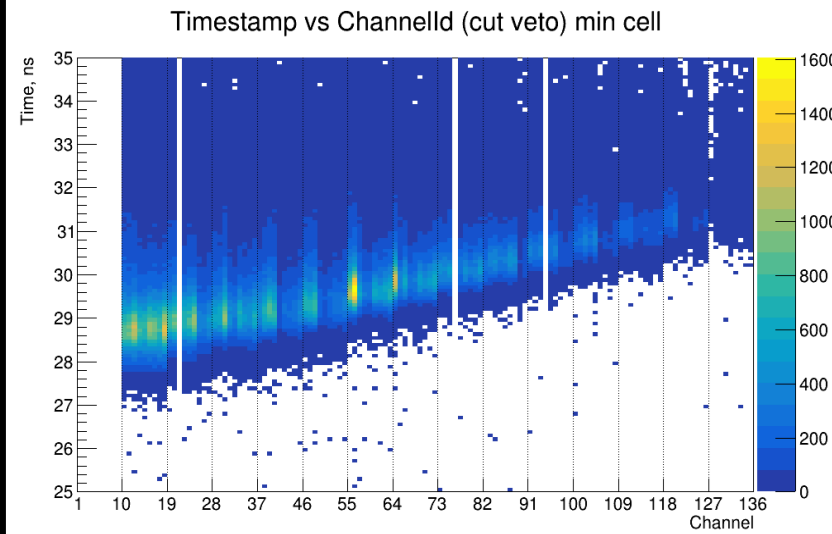
3. Determination of parameters of the approximating function for all channels & time limit



4. Time-amplitude correction



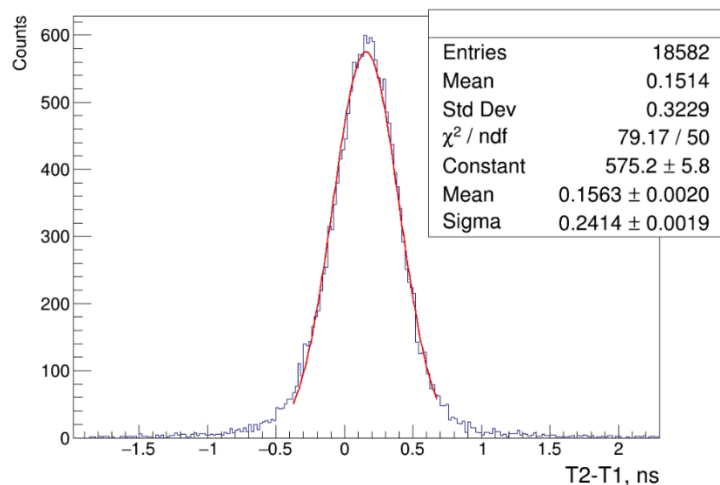
5. Time shift



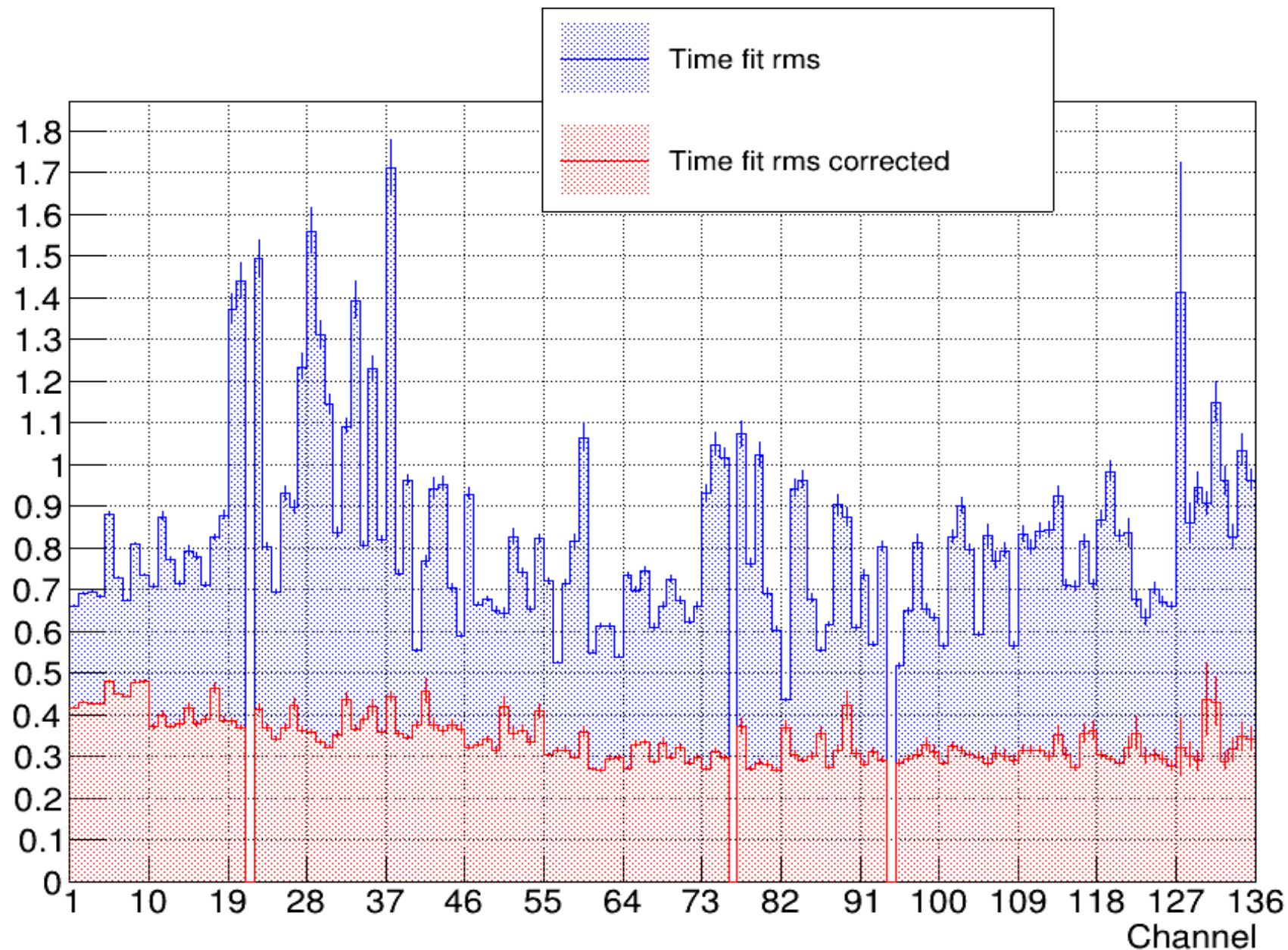
HGND calibration



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.



Time resolution between cells, ns

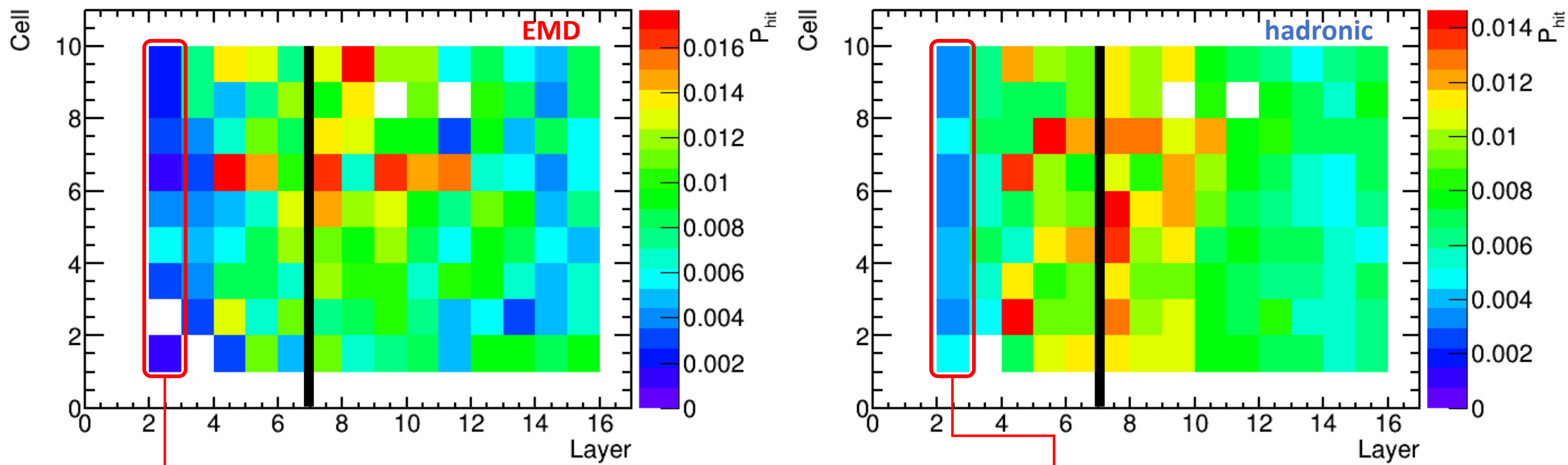


Fastest cells for EMD vs hadronic interactions

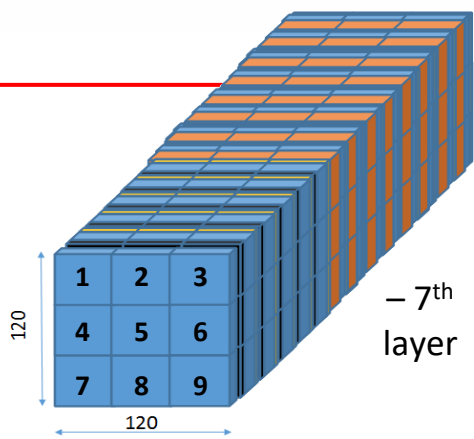


Comparison of hadronic interactions (CCT2) with electromagnetic dissociation (BT)

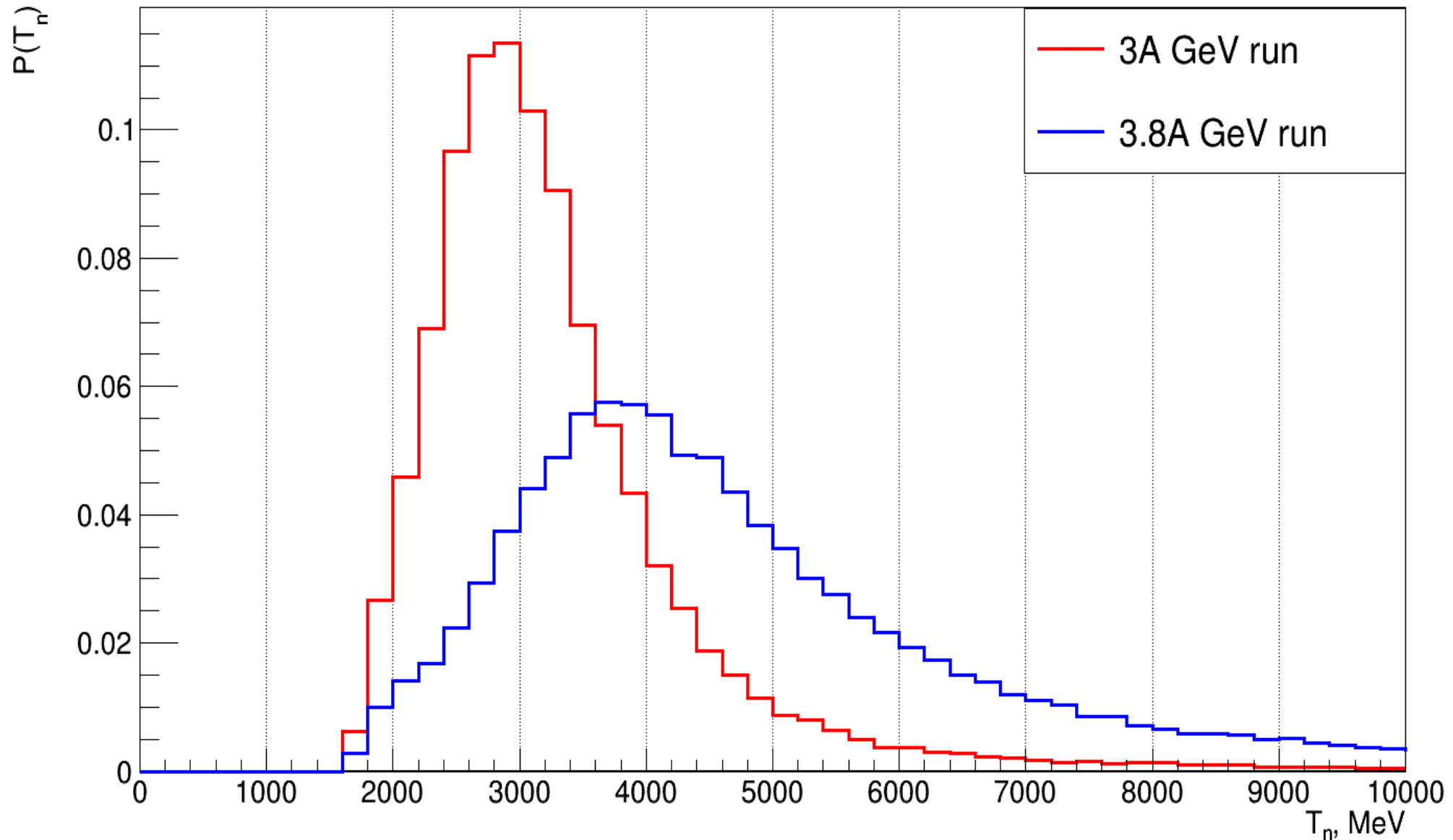
Run **8281 (BT)** vs **8300 (CCT2)** 3.8 AGeV



γ -quanta cut – no hits in 1-2 layers in module $\Rightarrow 1.55 X_0$ or $0.11 \lambda_{int}$

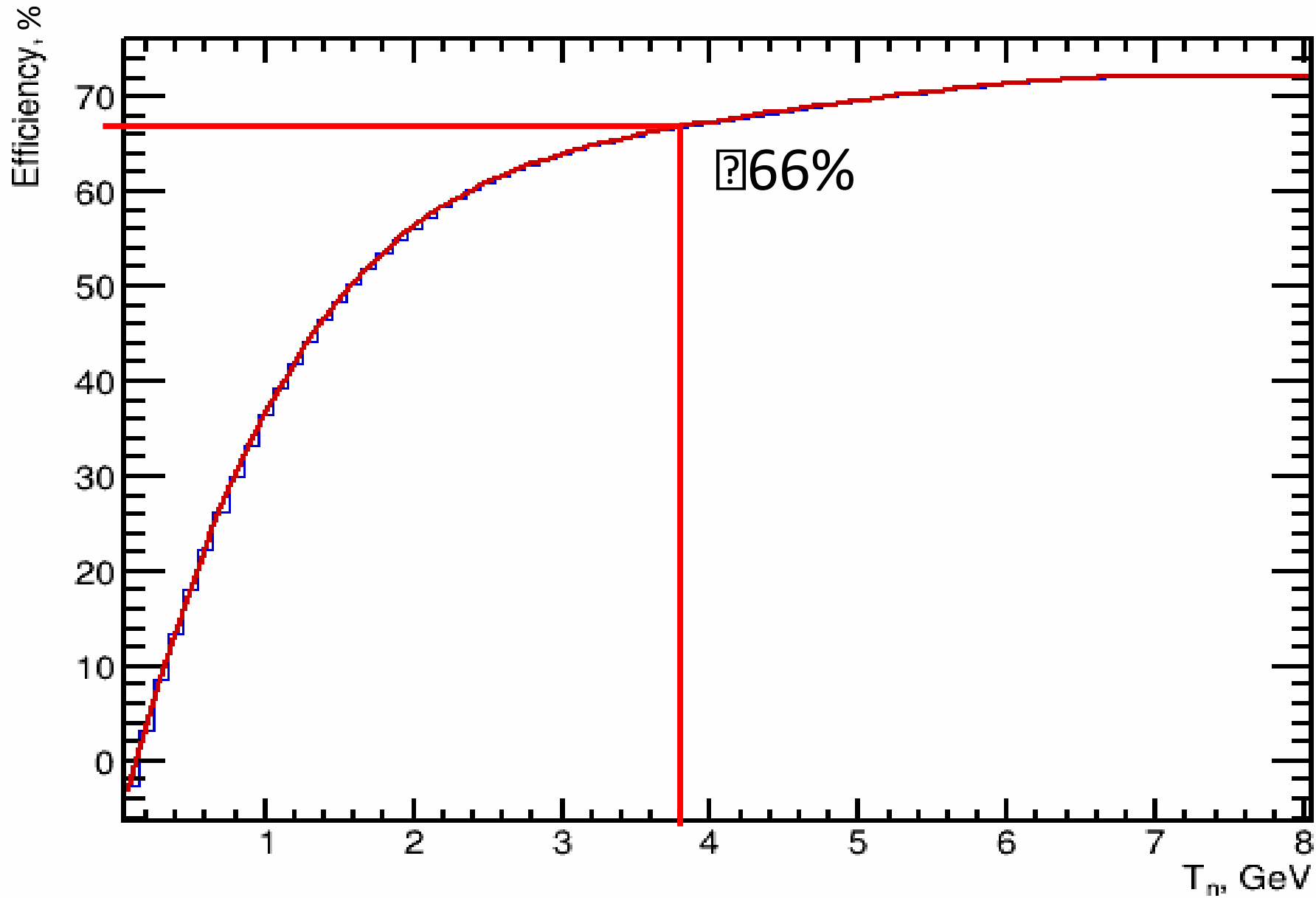


Most of the neutrons are deposited after the 7th layer for both EMD and nuclear interaction



Reconstructed neutron spectra for both 3A GeV and 3.8A GeV runs are in correct positions.

Efficiency of HGND prototype



Geant4 simulation:
Particle source, only
neutrons

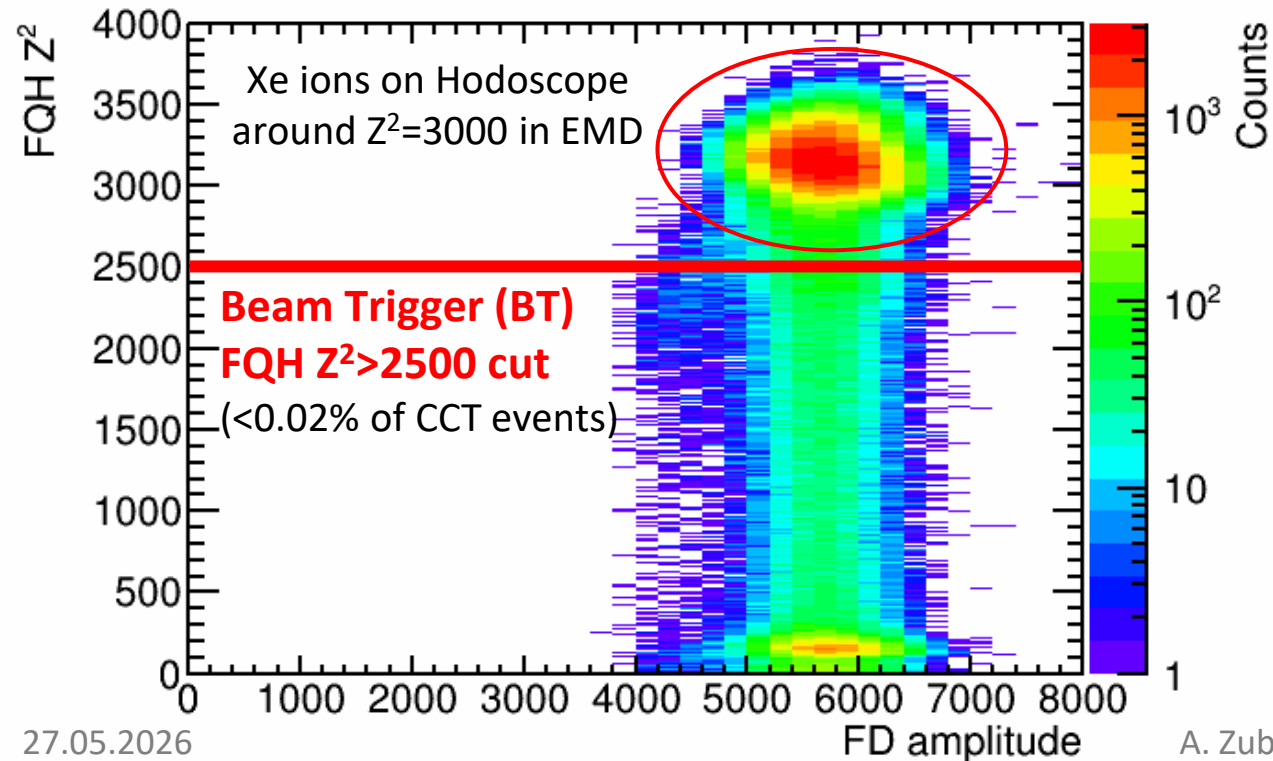
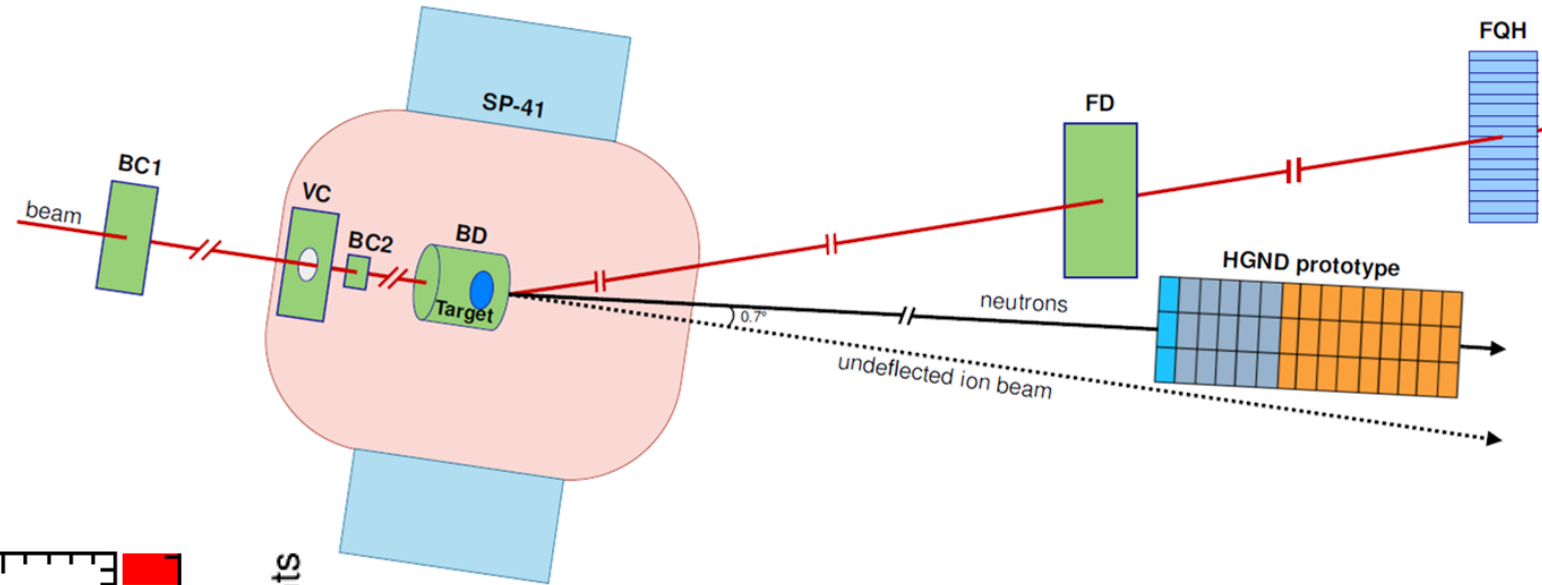
- VETO-cut
- γ -cut
- ToF cut

Selection of EMD events in measurements

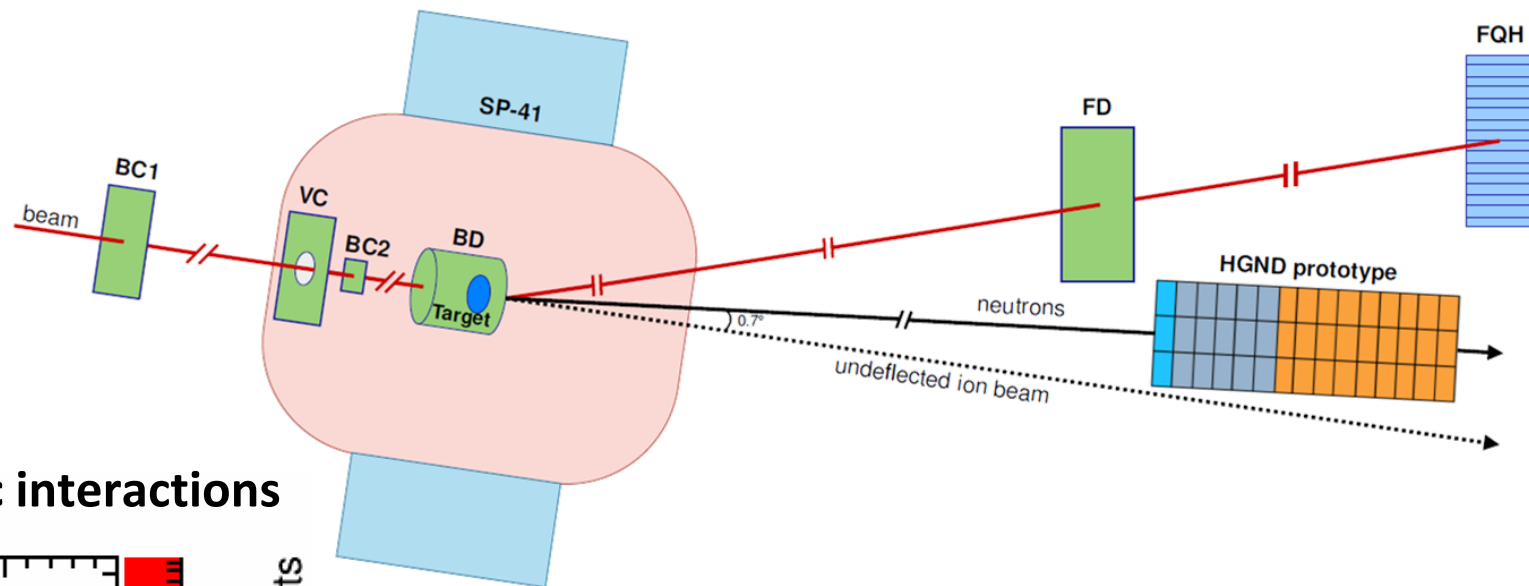


Only single Xe ion in target

Ultra-peripheral collisions – EMD

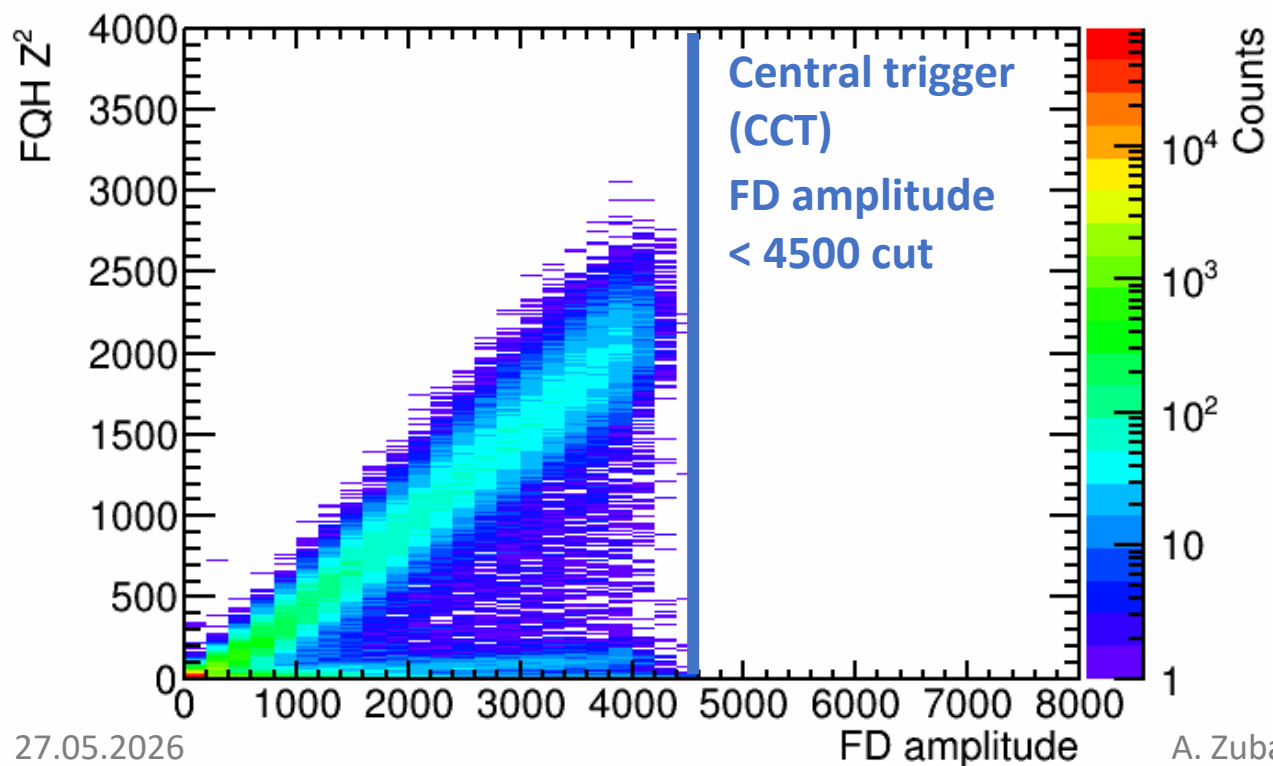


Selection of hadronic fragmentation events in measurements

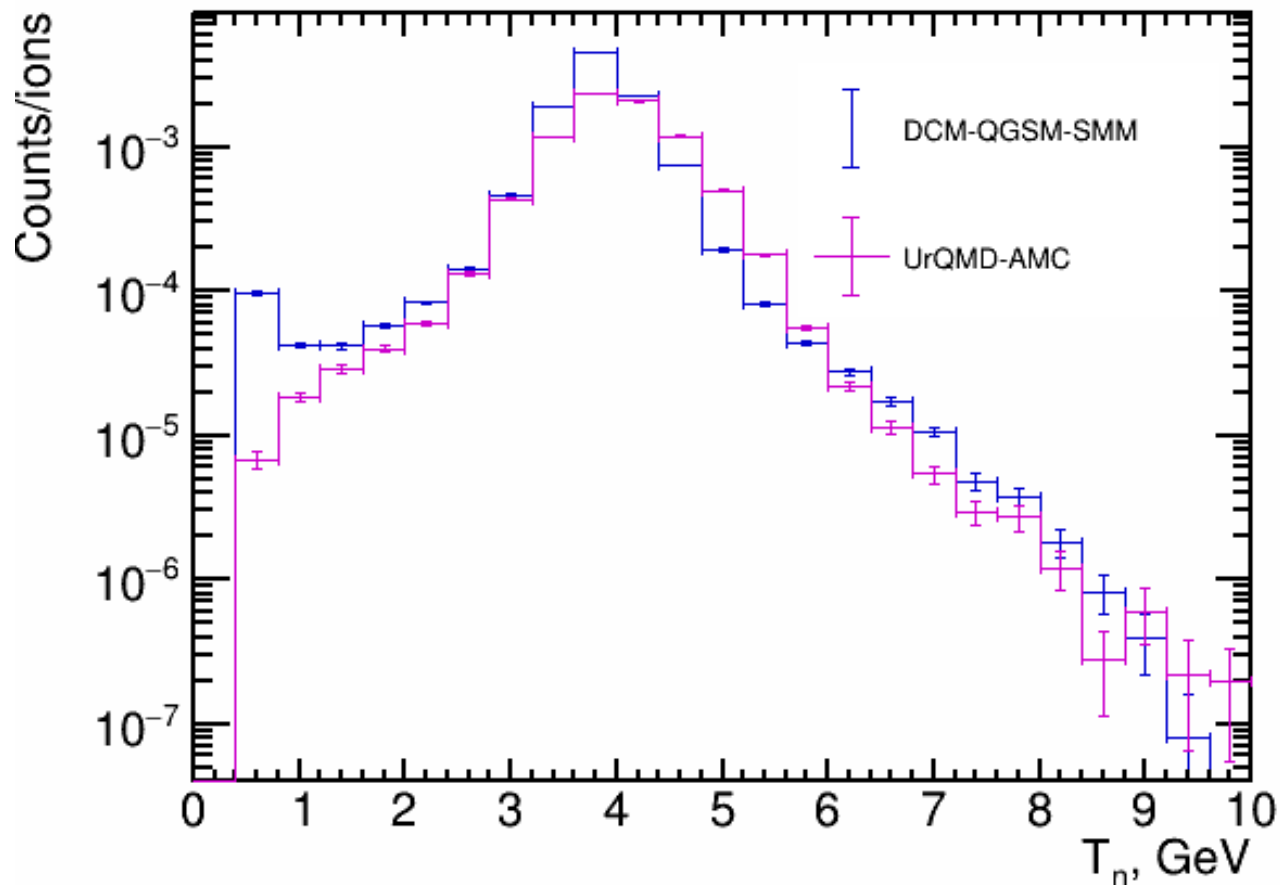


Only single Xe ion in target

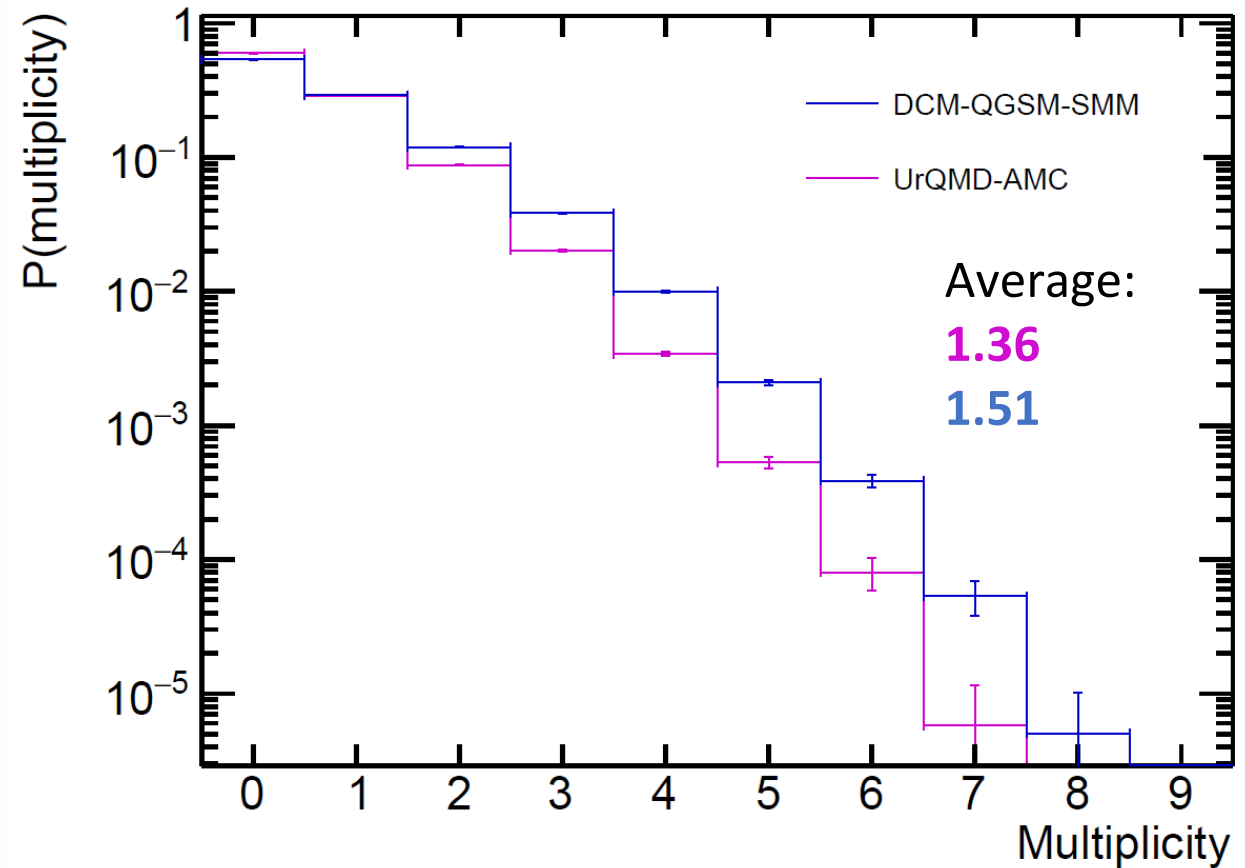
Central & semi-central collisions – hadronic interactions



Neutron kinetic energy in acceptance of the HGND prototype

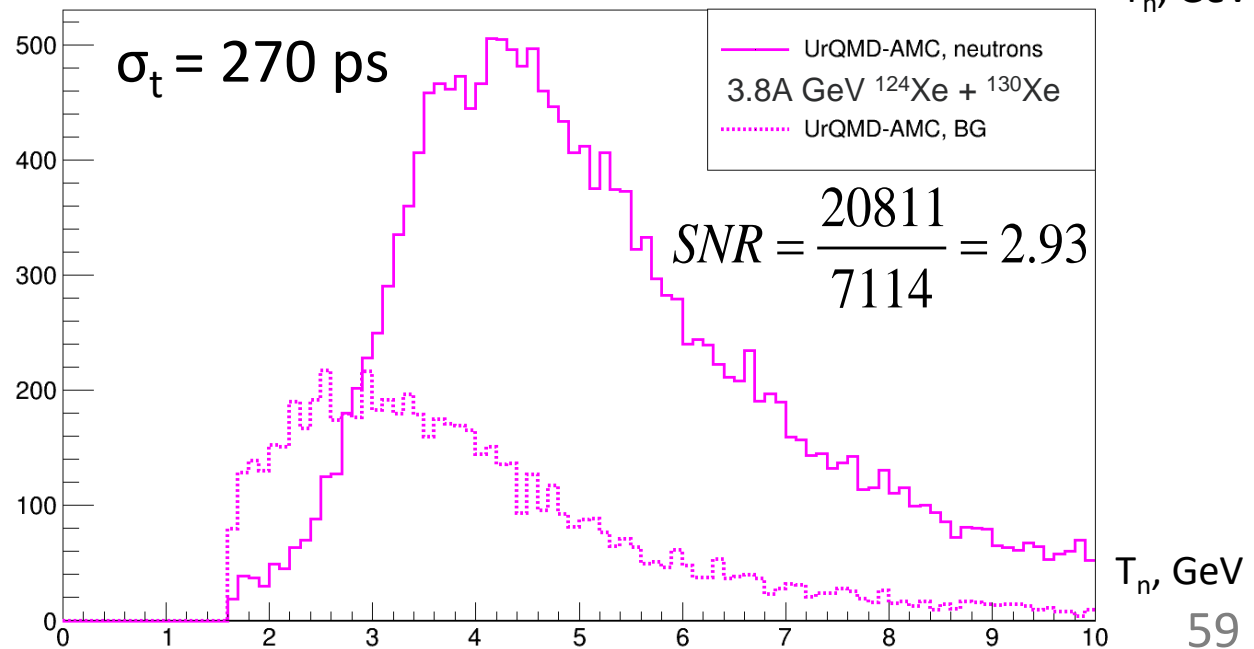
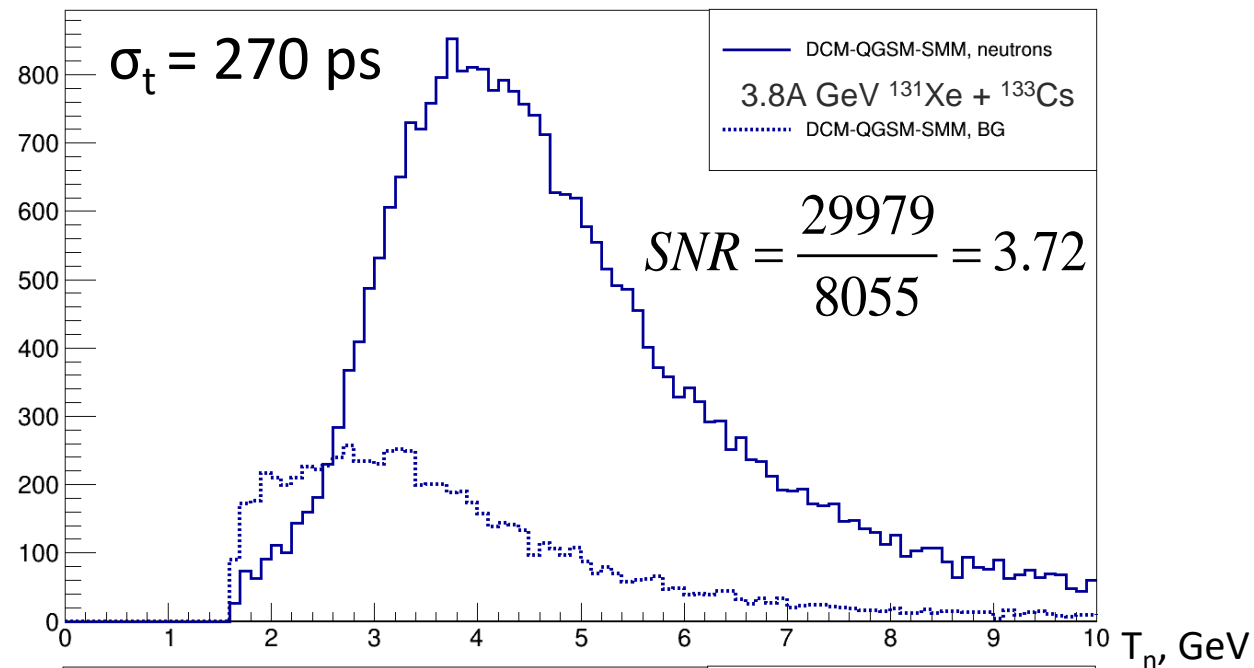
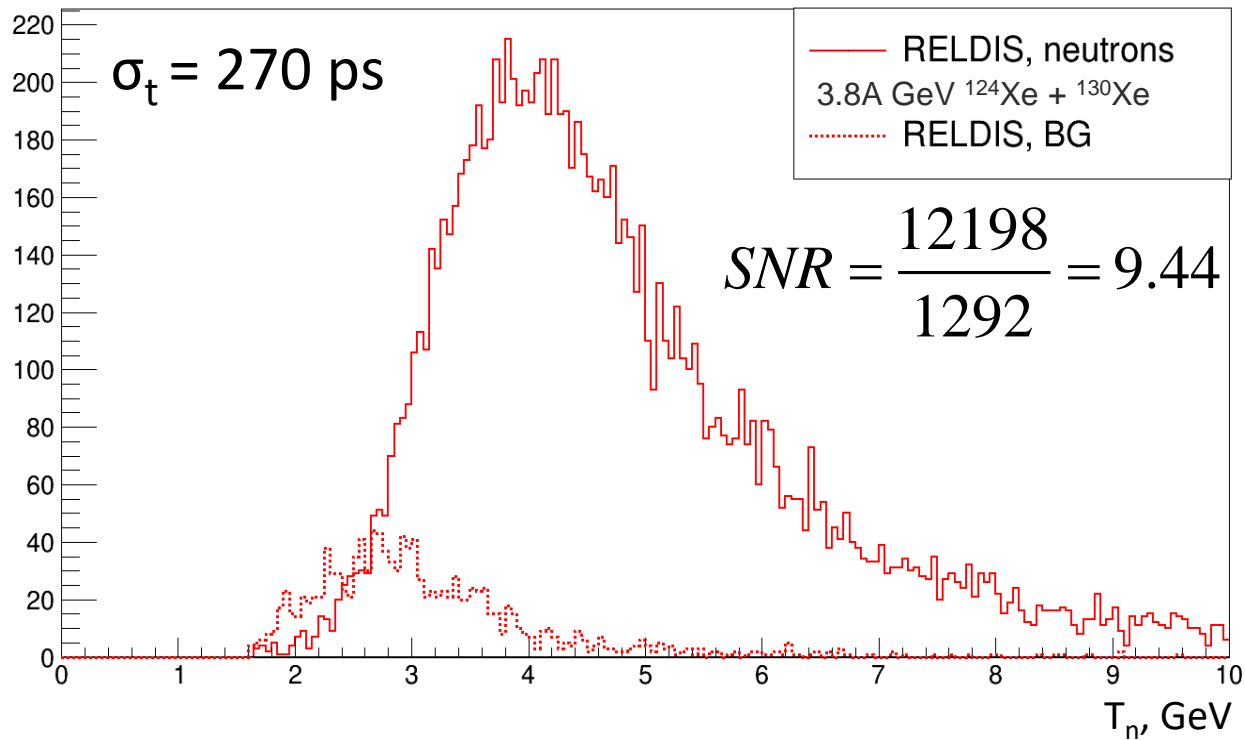


Neutron multiplicity in acceptance of the HGND prototype



Trigger efficiency correction from experimental data was applied for all histograms.

Background in simulation



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

Model	$\Omega_n, \%$	$\varepsilon_n, \%$	$\Omega_n \times \varepsilon_n, \%$
RELDIS	34.21 ± 0.25	60.06 ± 0.44	20.55 ± 0.21
DCM-QGSM-SMM	3.87 ± 0.02	37.33 ± 0.17	1.45 ± 0.01
UrQMD-AMC	2.63 ± 0.01	45.09 ± 0.25	1.19 ± 0.01

Cross-section estimation using different models



$$\sigma = \frac{N_{ev} \cdot \langle N_n \rangle}{N_{ions}} \cdot \frac{A}{d \cdot N_A \cdot \rho} \cdot (\Omega_n \times \varepsilon_n)$$

$$d = 0.175 \text{ cm}$$

$$N_A = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

$$\rho = 4.53 \text{ g/cm}^3$$

	RELDIS	DCM-QGSM-SMM	UrQMD-AMC
$Y = N_{ev}/N_{ions}$, neutrons / ion	$(1.49 \pm 0.12) \cdot 10^{-3}$	$(3.78 \pm 0.02) \cdot 10^{-3}$	
$N_{ev} \cdot \langle N_n \rangle / N_{ions} \cdot (\Omega_n \times \varepsilon_n)$	$(6.92 \pm 0.57_{\text{stat}} \pm 0.17_{\text{syst}}) \cdot 10^{-3}$	$(16.31 \pm 0.10_{\text{stat}} \pm 1.31_{\text{syst}}) \cdot 10^{-3}$	$(17.98 \pm 0.13_{\text{stat}} \pm 0.60_{\text{syst}}) \cdot 10^{-3}$
σ^{exp}	$1.88 \pm 0.16_{\text{stat}} \pm 0.05_{\text{syst}} \text{ b}$	$4.44 \pm 0.03_{\text{stat}} \pm 0.36_{\text{syst}} \text{ b}$	$4.90 \pm 0.03_{\text{stat}} \pm 0.16_{\text{syst}} \text{ b}$
σ^{sim}	$1.89 \pm 0.02 \text{ b}$	$4.76 \pm 0.01 \text{ b}$	$4.89 \pm 0.01 \text{ b}$

Preliminary estimations are in good agreement within the errors with the modeling predictions.

$$d = 0.175 \text{ cm}$$

$$N_A = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

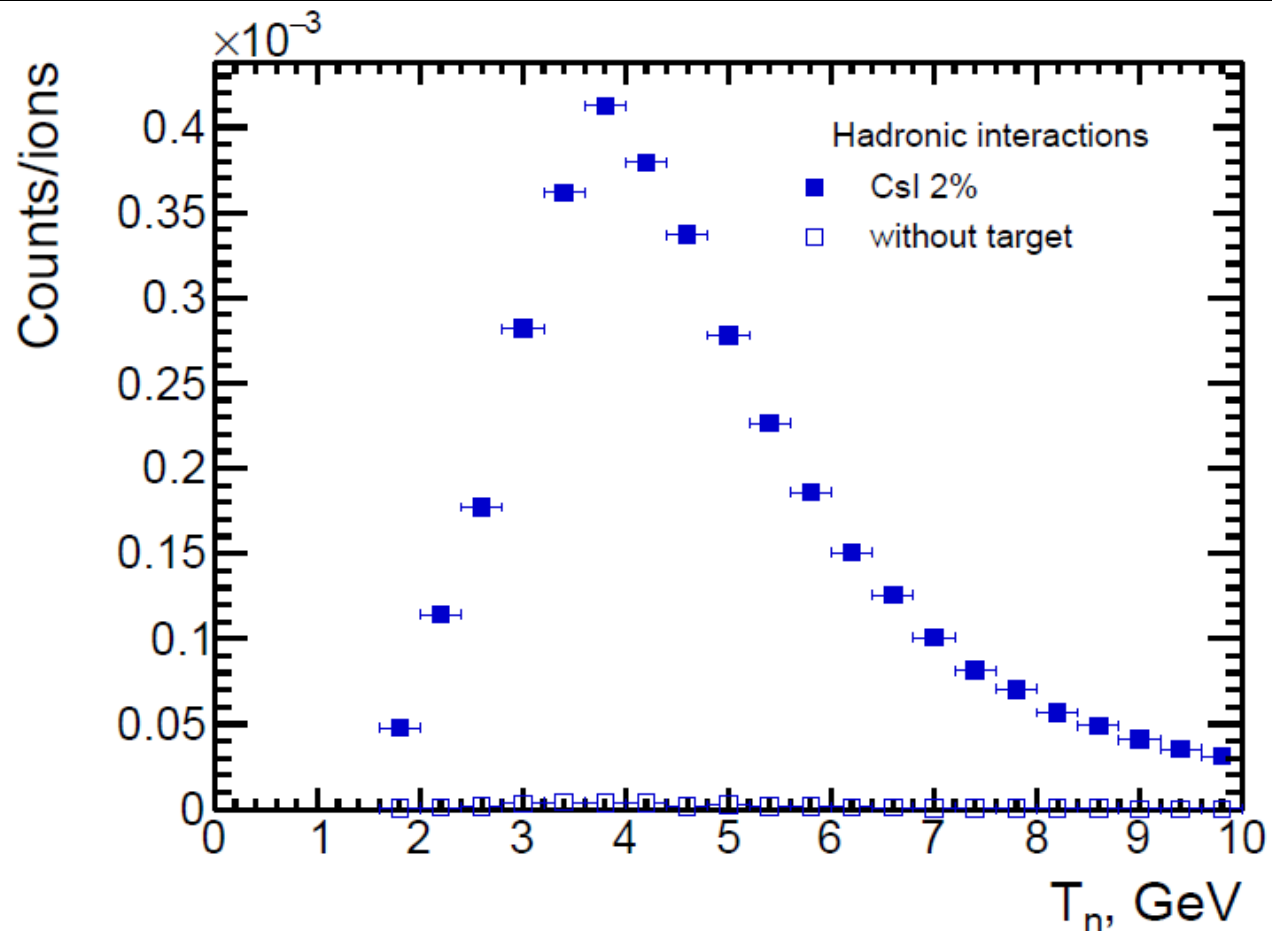
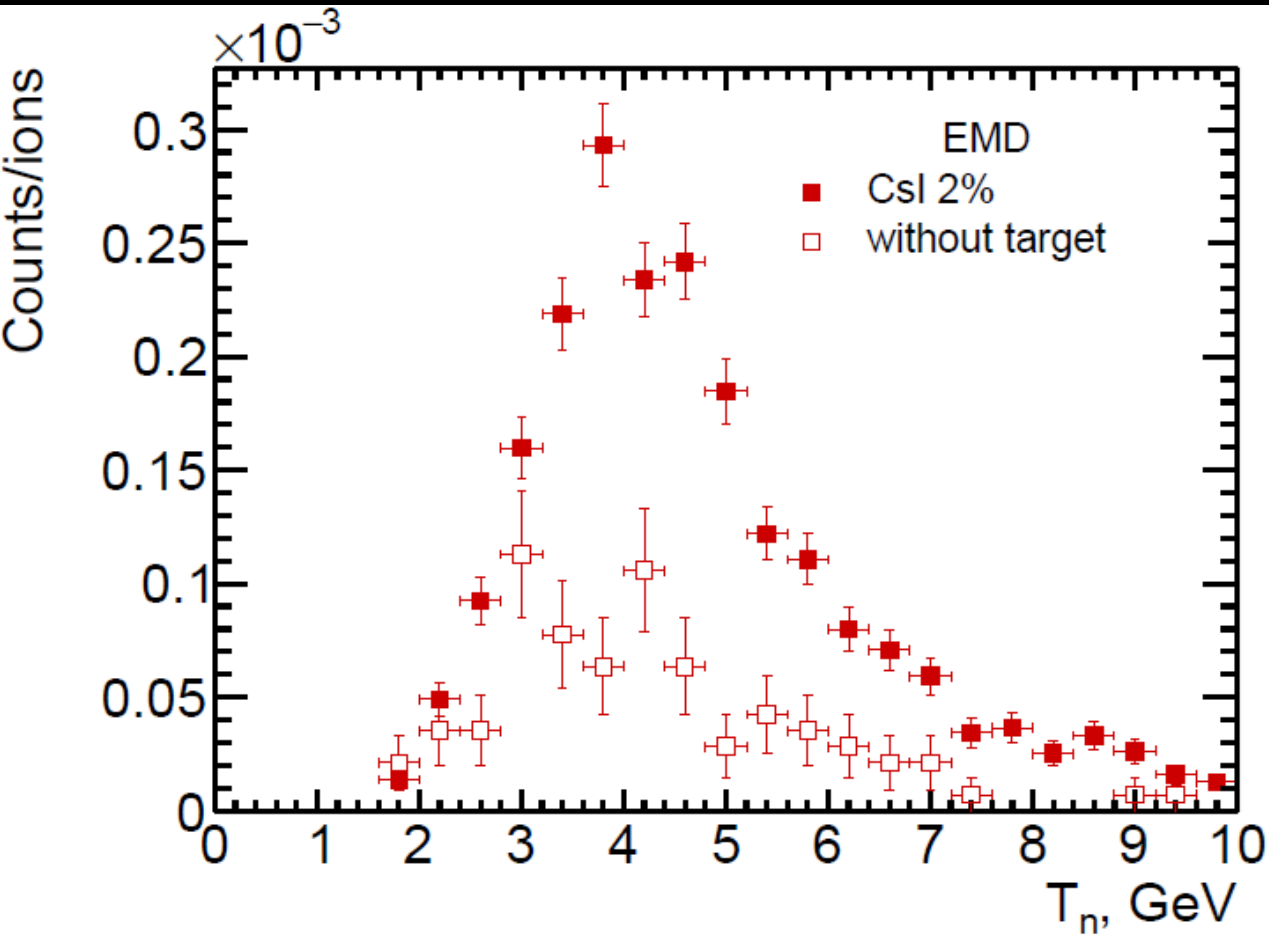
$$\rho = 4.53 \text{ g/cm}^3$$

$$\sigma = \frac{N_{ev}}{N_{ions}} \cdot \frac{A}{d \cdot N_A \cdot \rho} \cdot \langle N_n \rangle \cdot (\Omega_n \times \varepsilon_n) = Y_{corr} \cdot \frac{A}{d \cdot N_A \cdot \rho}$$

	RELDIS	DCM-QGSM-SMM	UrQMD-AMC
$\sigma_{exp}, \text{ b}$	$1.88 \pm 0.16_{stat} \pm 0.05_{syst}$	$4.44 \pm 0.03_{stat} \pm 0.36_{syst} \text{ b}$	$4.90 \pm 0.03_{stat} \pm 0.16_{syst} \text{ b}$
$\sigma_{sim}, \text{ b}$	$1.89 \pm 0.02 \text{ b}$	$4.76 \pm 0.01 \text{ b}$	$4.89 \pm 0.01 \text{ b}$

Estimations are in good agreement within the errors with the modeling predictions.

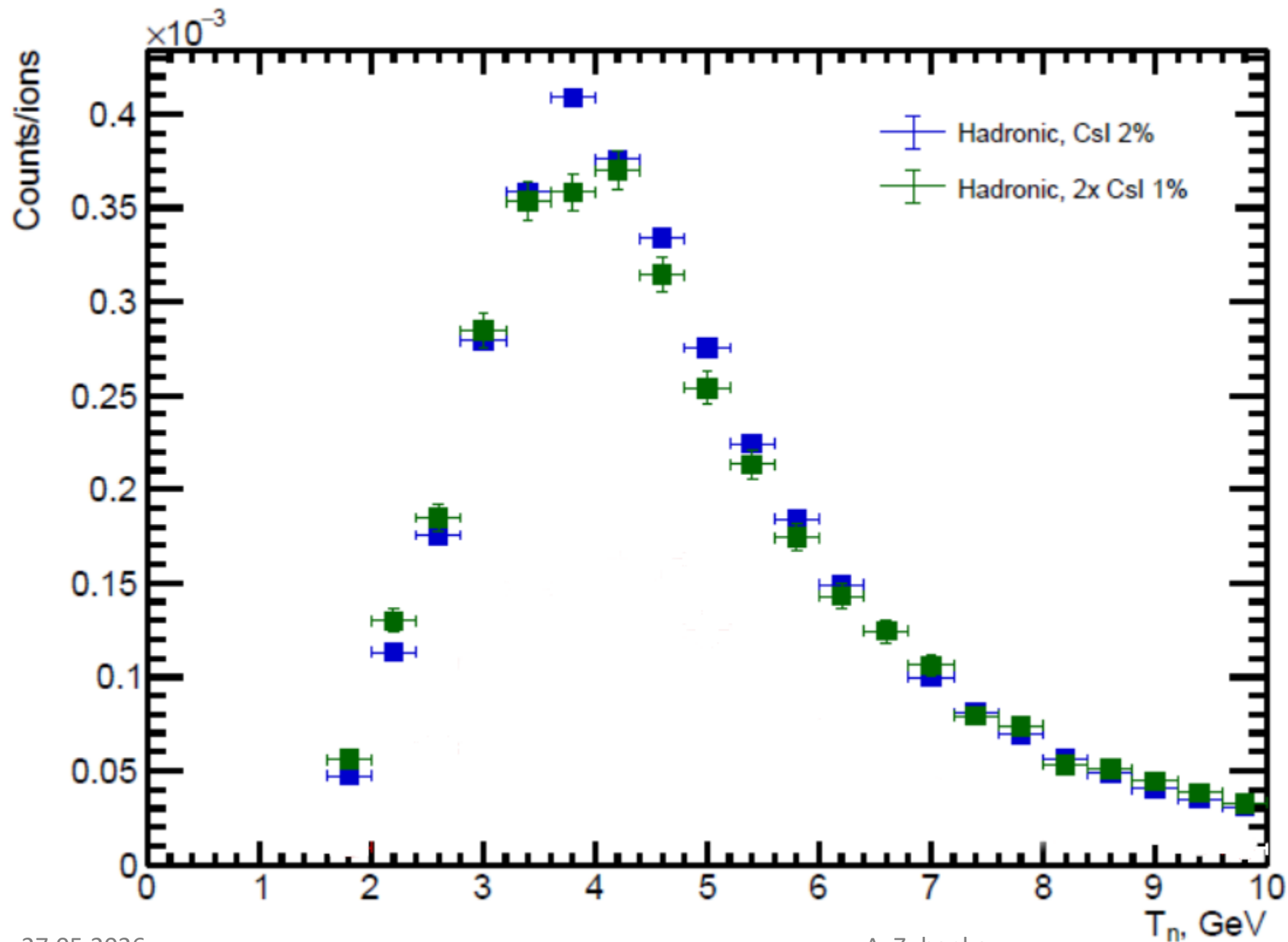
Reconstructed spectra for EMD and hadronic interactions



Reconstructed spectra were obtained both for runs with CsI 2% target and without it to estimate fraction of out of target interactions.

Empty target spectra were subtracted from target spectra.

Comparison with thinner target

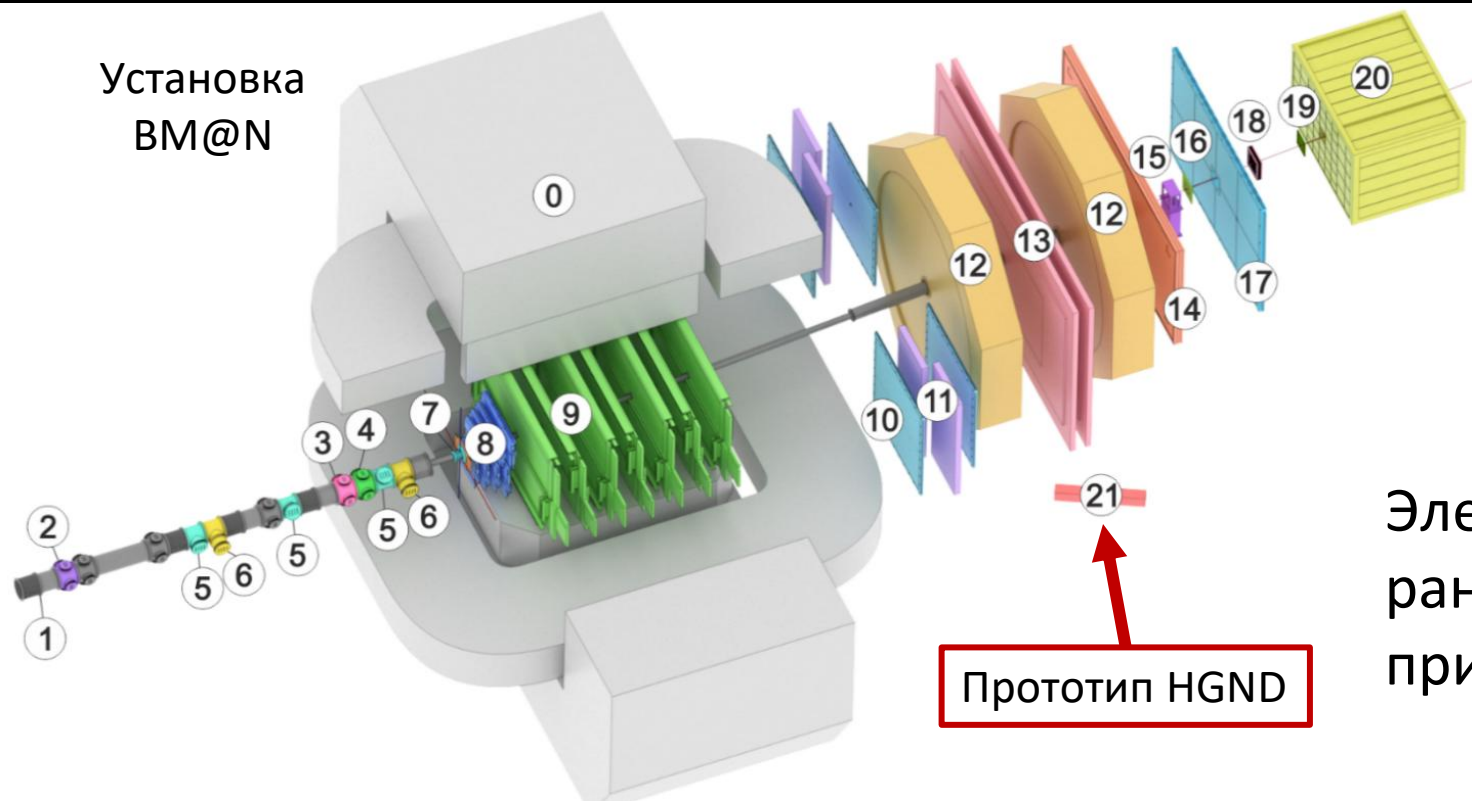


Corrected spectra after subtracting empty target spectra

Measurements with 1% and 2% target are consistent

Прототип HGND

Установка
BM@N



Для проверки концепции полномасштабного HGND был протестирован **прототип HGND** в реакции $^{124}\text{Xe} + \text{CsI}$ при энергии пучка 3.8A ГэВ в эксперименте BM@N.

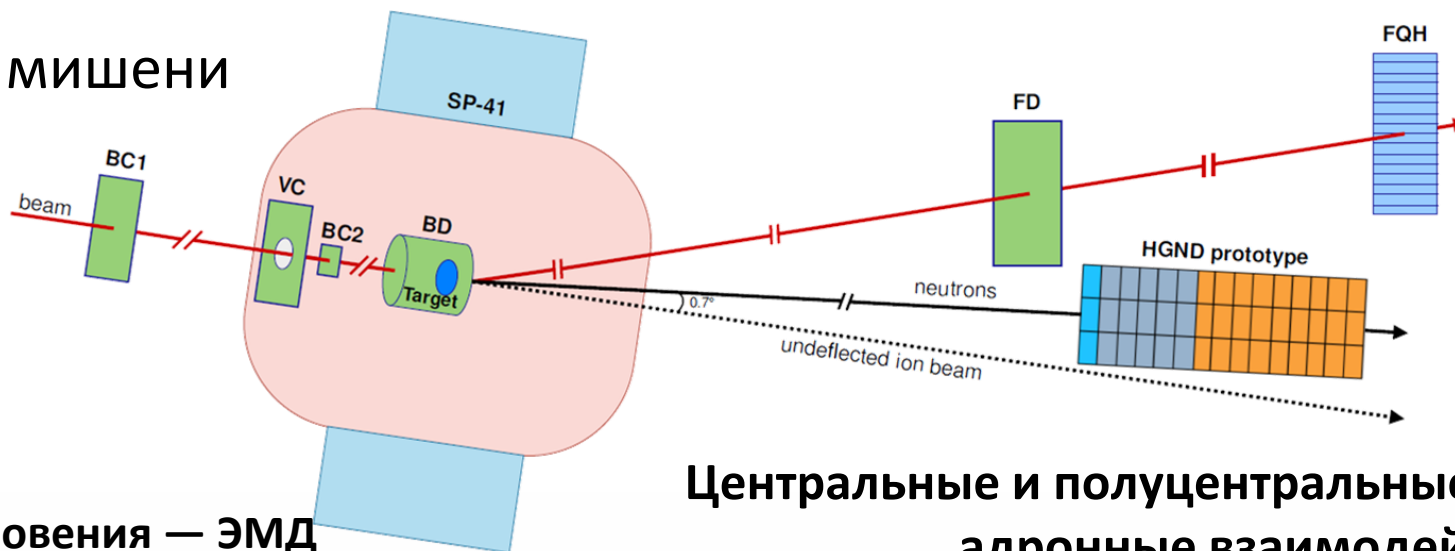
Электромагнитная диссоциация (ЭМД) ранее не изучалась в столкновениях Хе при энергиях 2–4A ГэВ.

Прототип HGND может быть использован для изучения нейтронов из ультрапериферических столкновений и нейтронов-спектаторов на пучках из Нуклотрона. Измерены **выходы нейтронов** с помощью прототипа HGND с модельно-оцененной эффективностью для центральных и полуцентральных столкновений, а также для ЭМД ^{124}Xe .

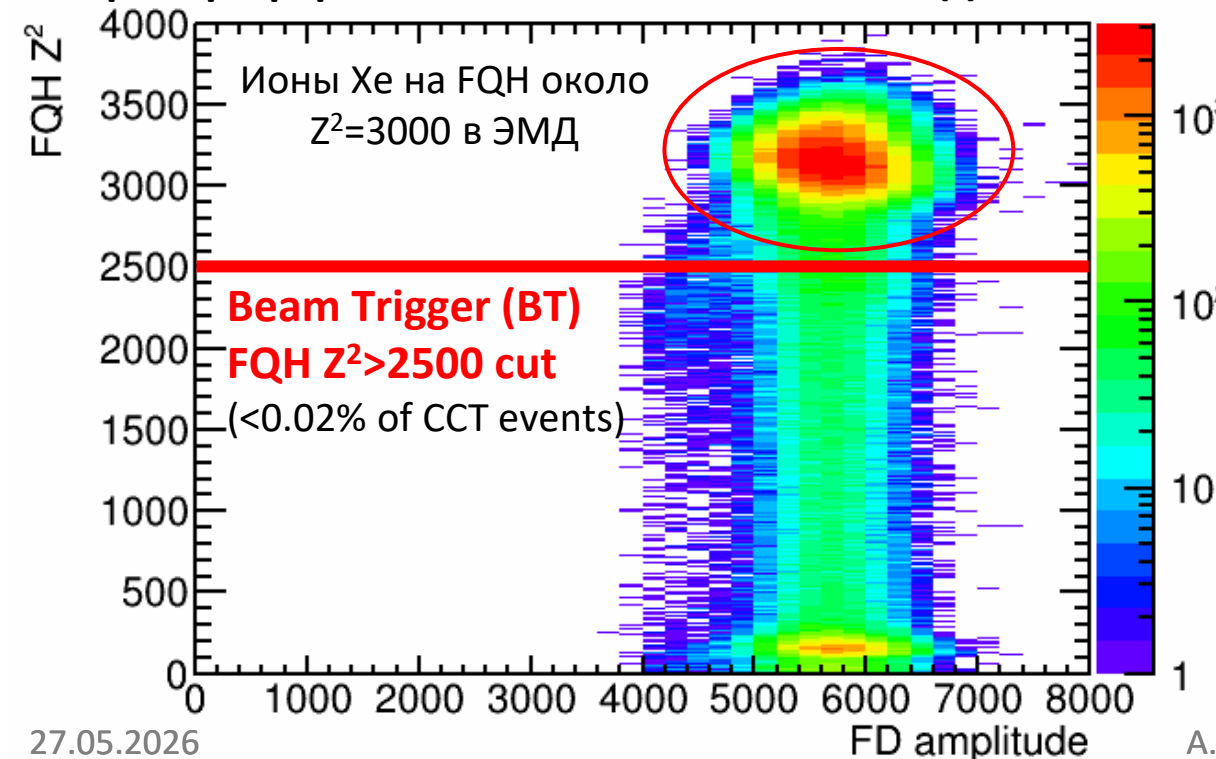
Отбор событий ЭМД и адронных взаимодействий



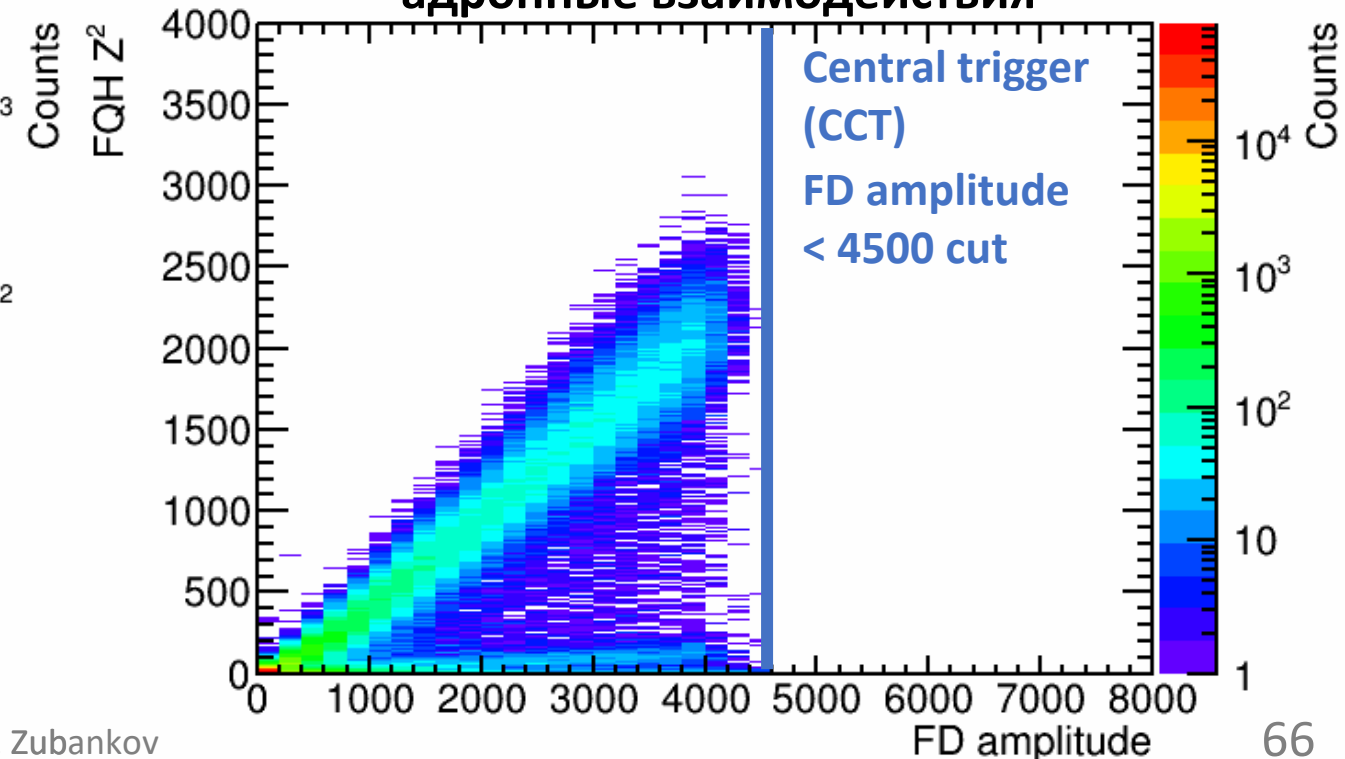
Только один ион Хе на мишени

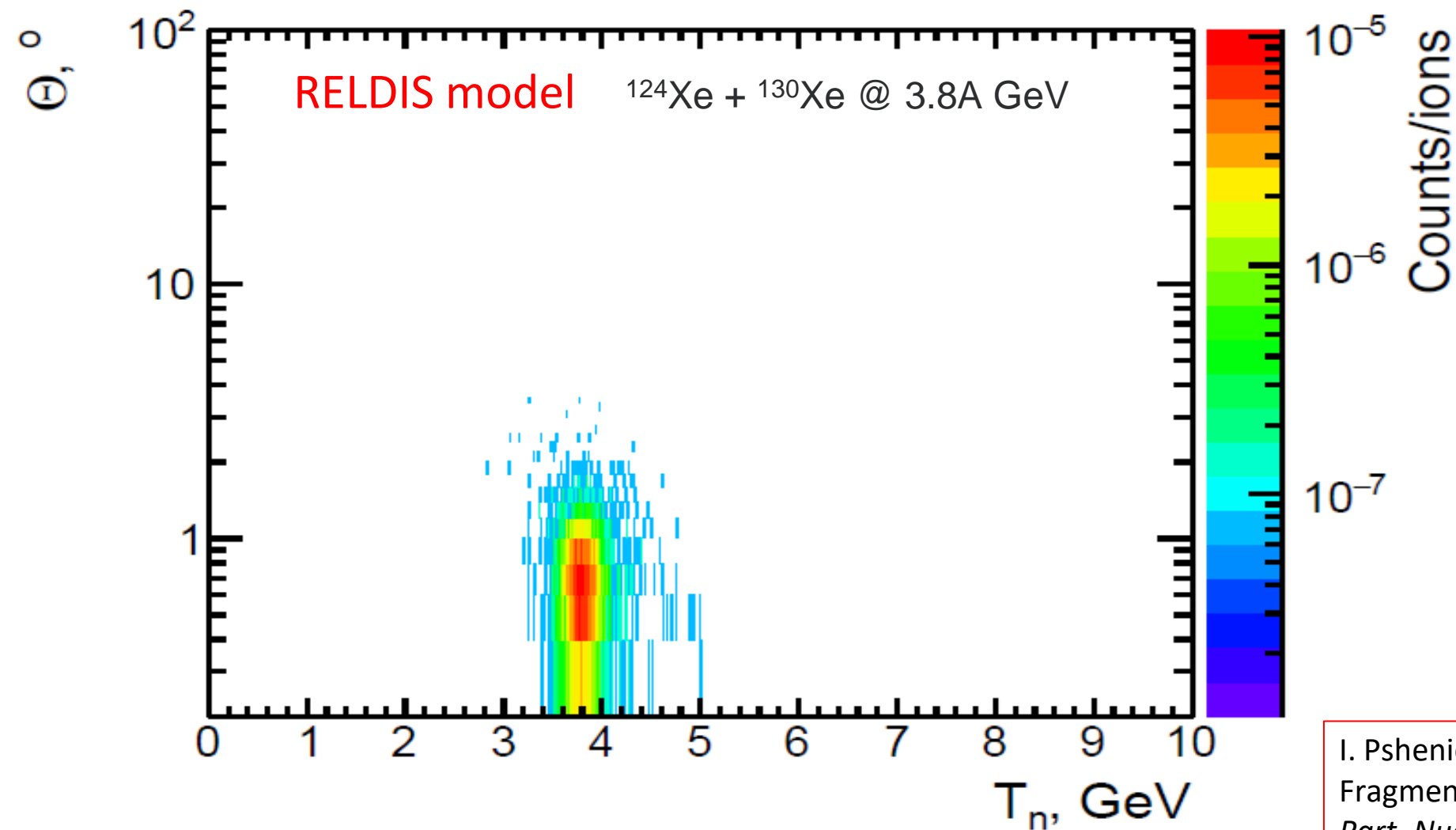


Ультрапериферические столкновения — ЭМД



Центральные и полуцентральные столкновения — адронные взаимодействия





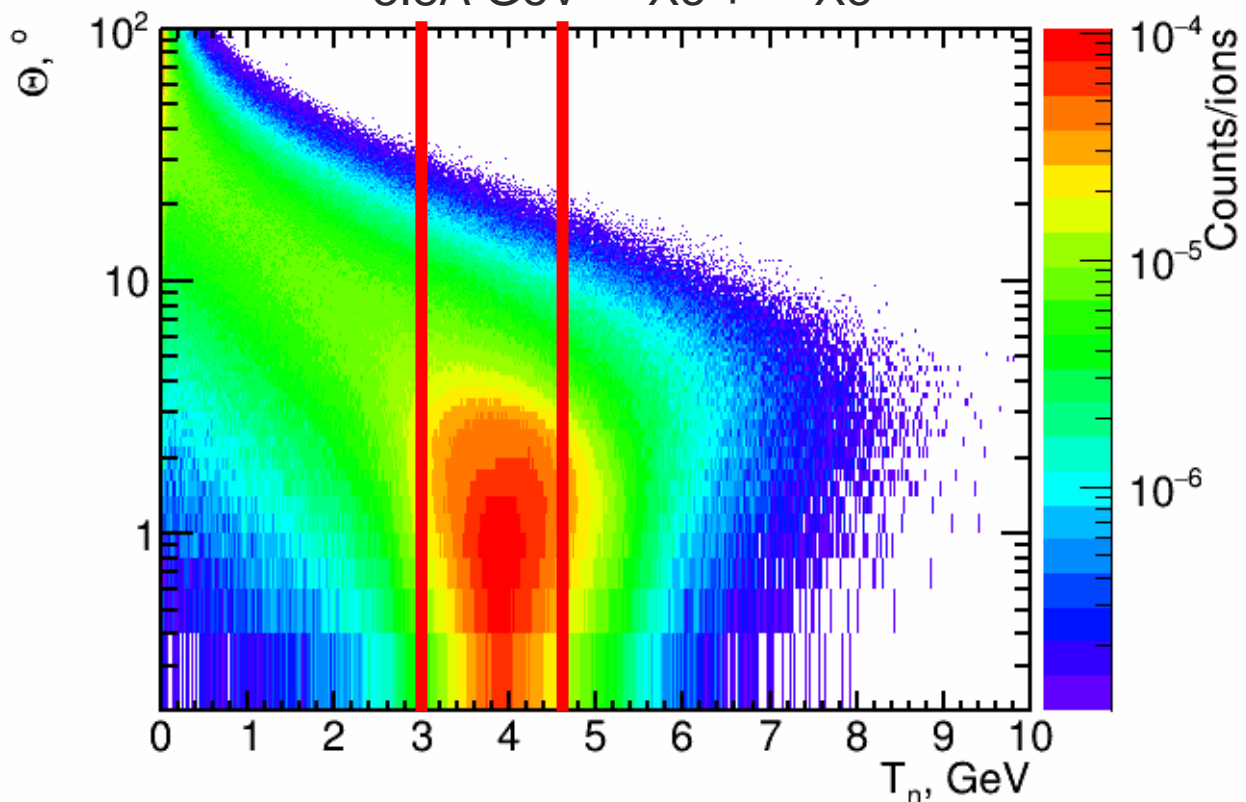
I. Pshenichnov, Electromagnetic Excitation and Fragmentation of Ultrarelativistic Nuclei. *Phys. Part. Nucl.* **2011**, 42 (2), 215-250.

Средняя множественность нейтронов – **1.05**

Средняя множественность нейтронов в акцептансе прототипа HGND – **1.02**

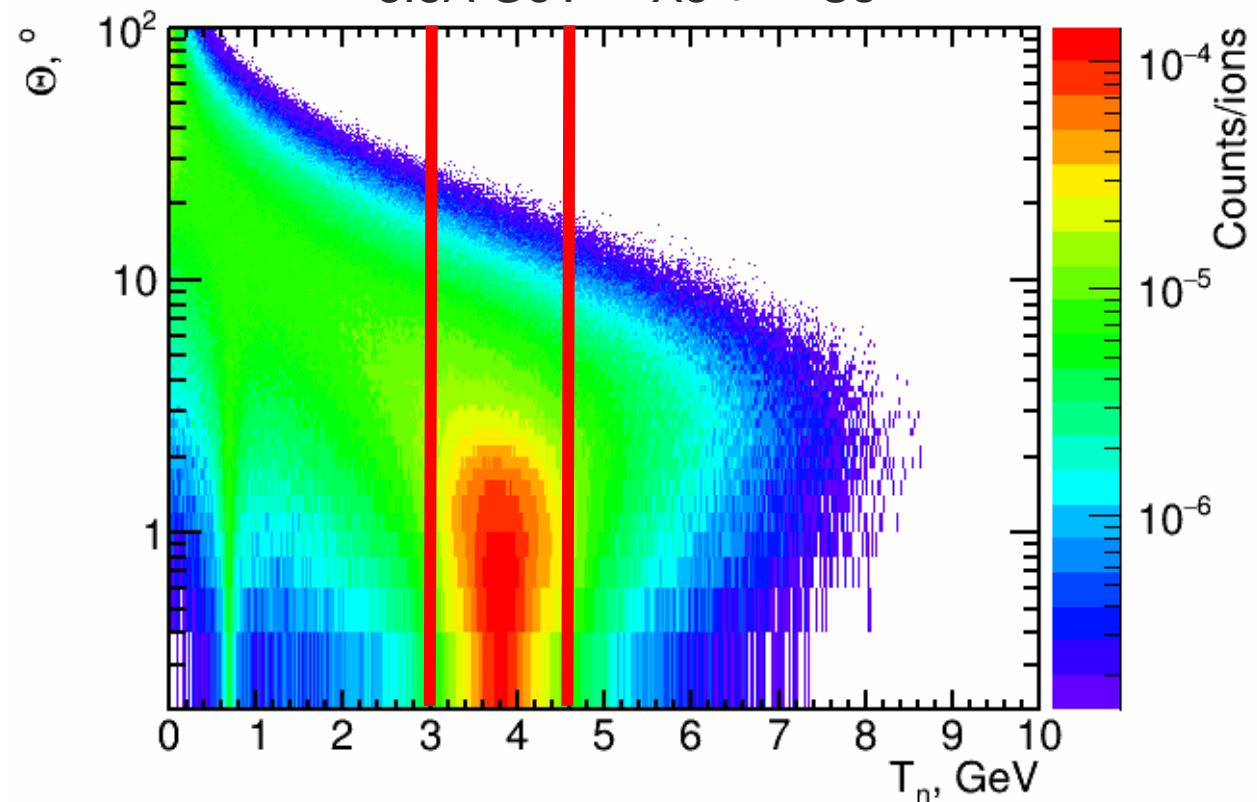
UrQMD-AMC (in Cascade mode)

3.8A GeV $^{124}\text{Xe} + ^{130}\text{Xe}$



DCM-QGSM-SMM

3.8A GeV $^{131}\text{Xe} + ^{133}\text{Cs}$



Средняя множественность нейтронов-спектаторов:

17.70

16.01

Средняя множественность нейтронов в
акцептансе прототипа HGND:

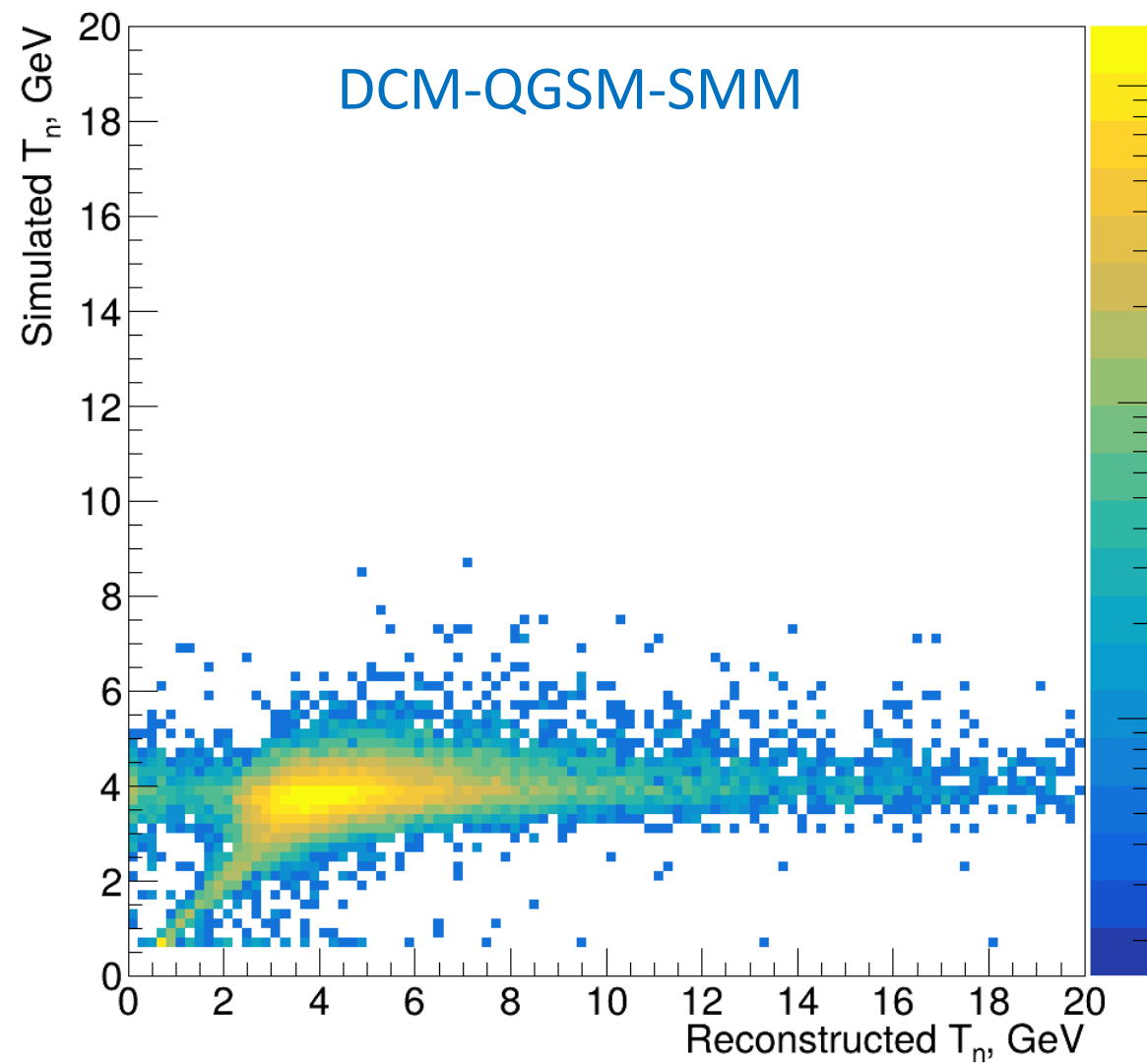
1.36

1.51

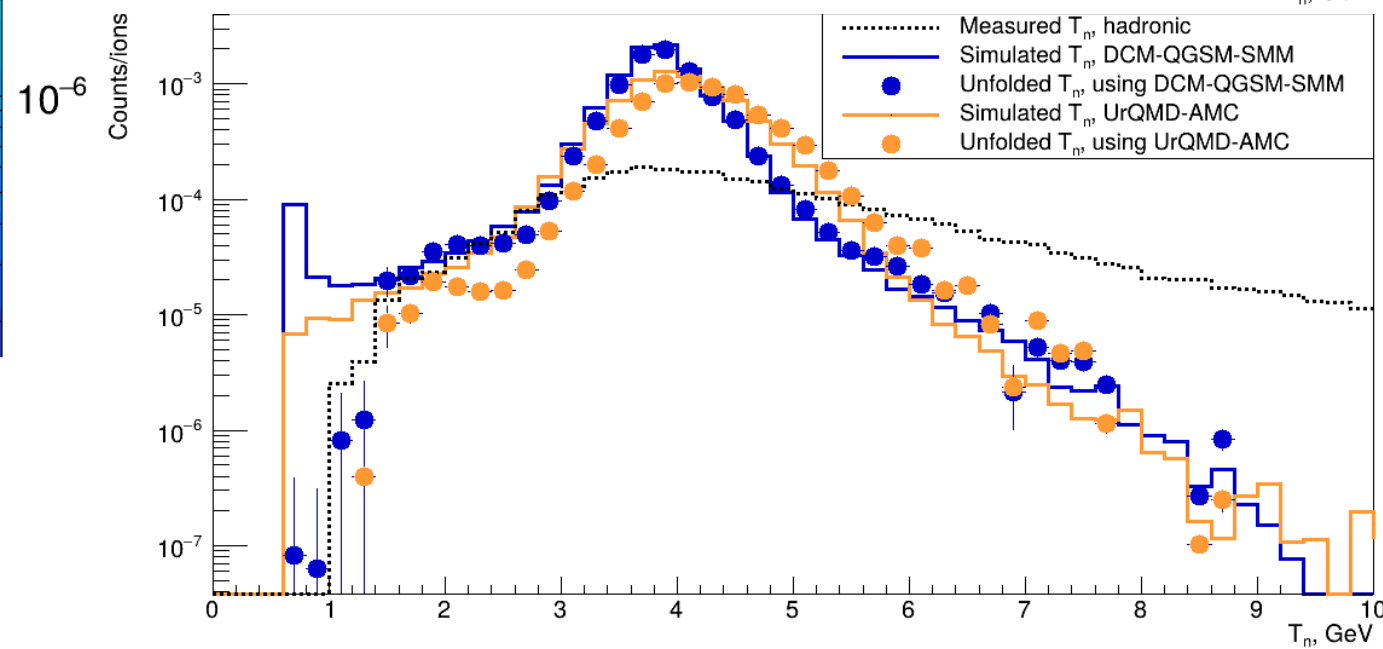
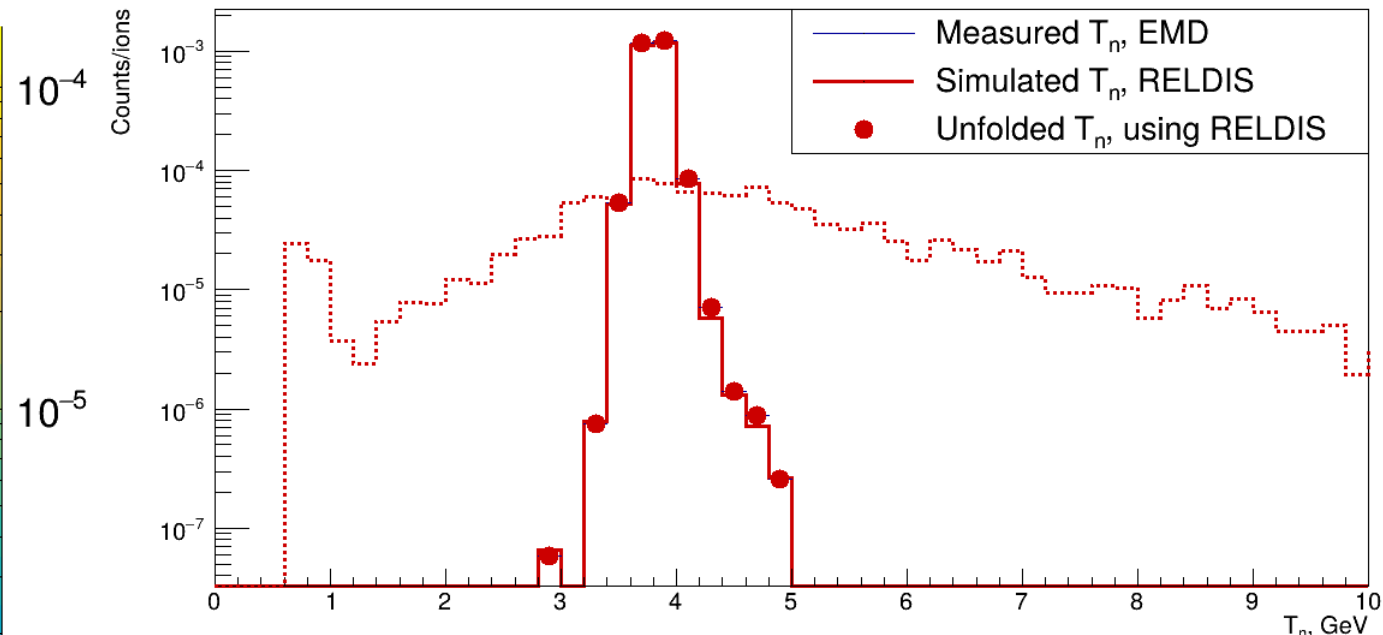
A.O. Svetlichnyi et al., Production of spectator neutrons, protons and light fragments on fixed targets at NICA. ArXiv:2510.02992v2 [Nucl-Th], **2025** 1–15.

M. Baznat et al., Monte-Carlo Generator of Heavy Ion Collisions DCM-SMM, *Phys. Part. Nucl. Lett.* **2020**, 17, 303.

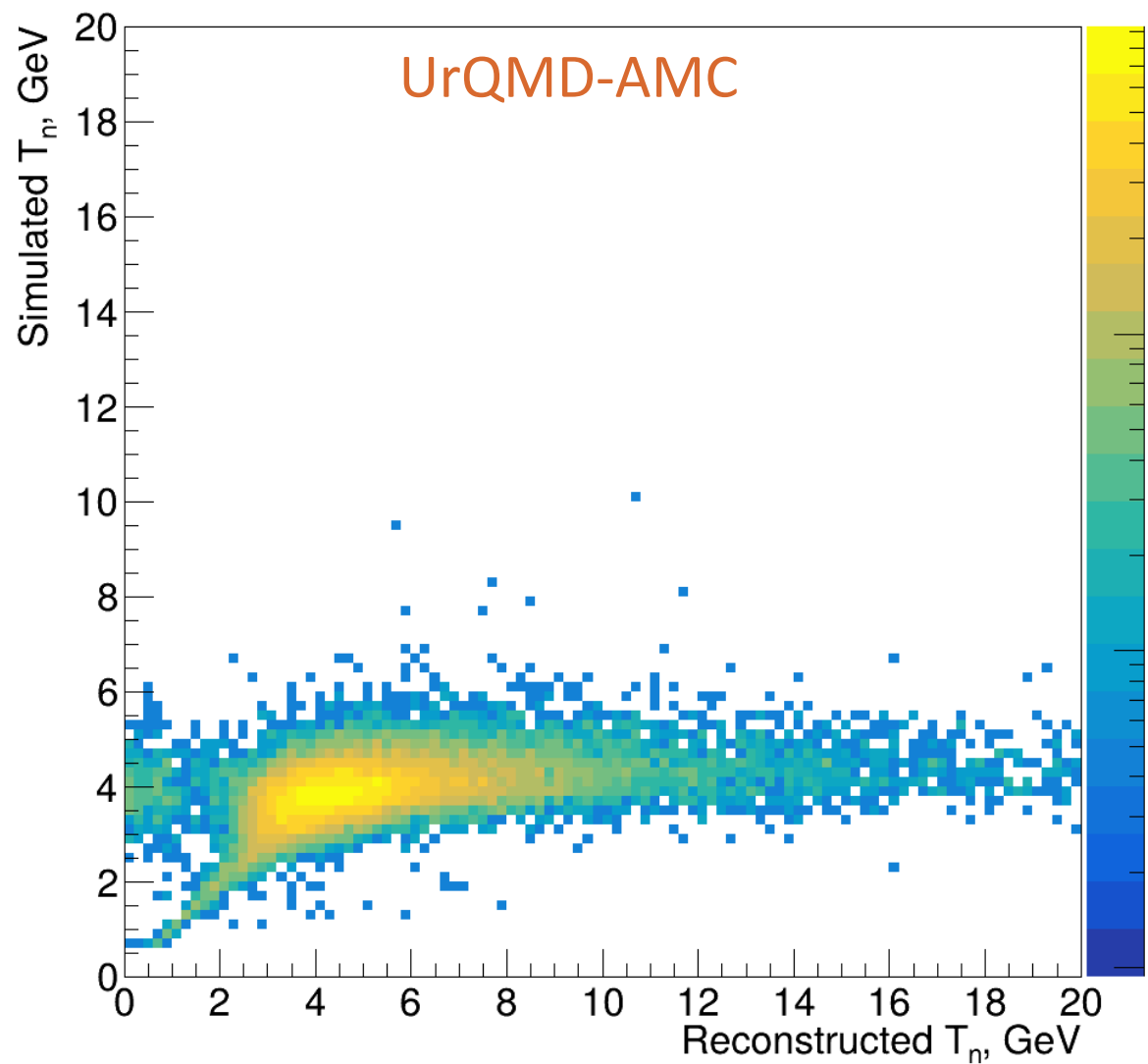
Unfolding using the response from DCM-QGSM-SMM for all



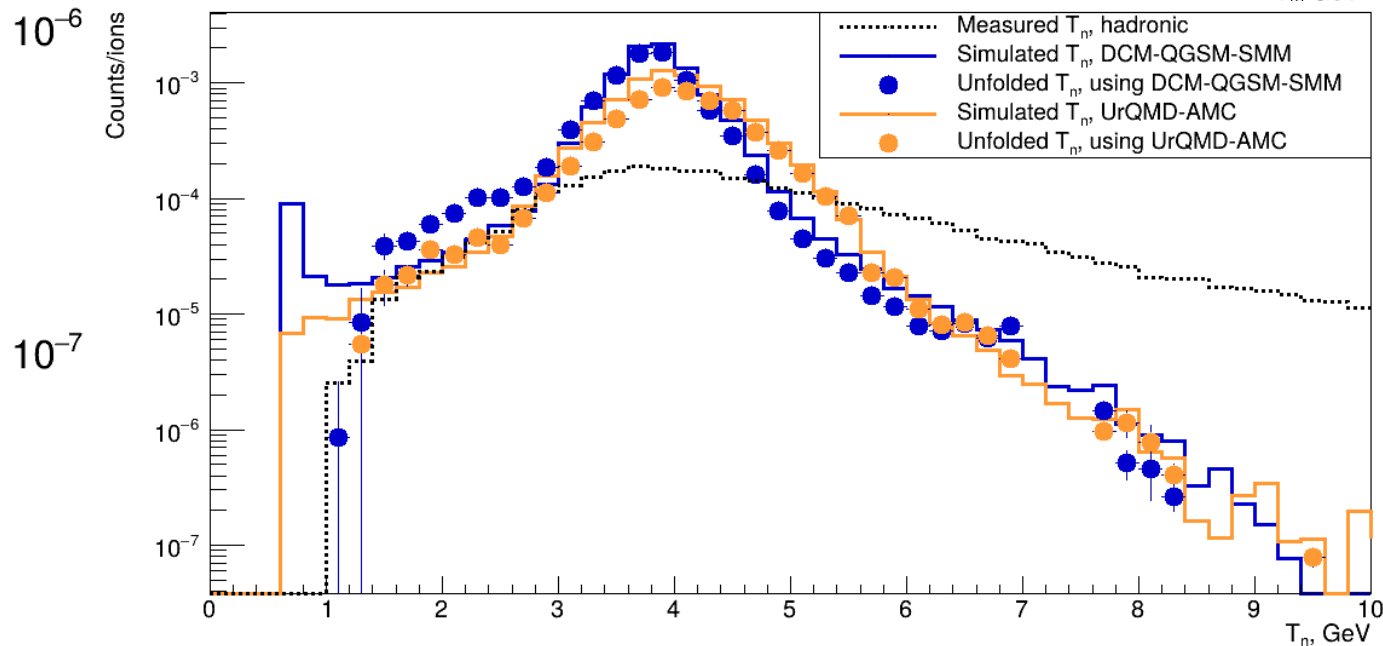
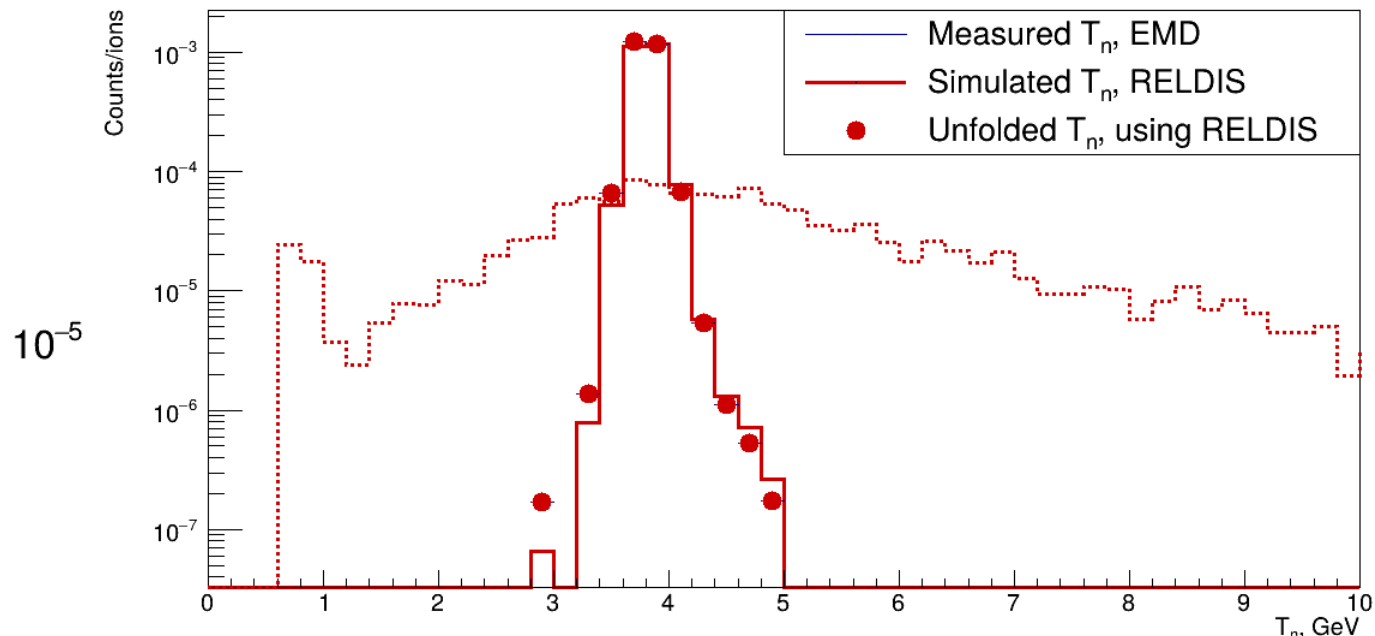
We can use the response matrix from other models with minor distortions.



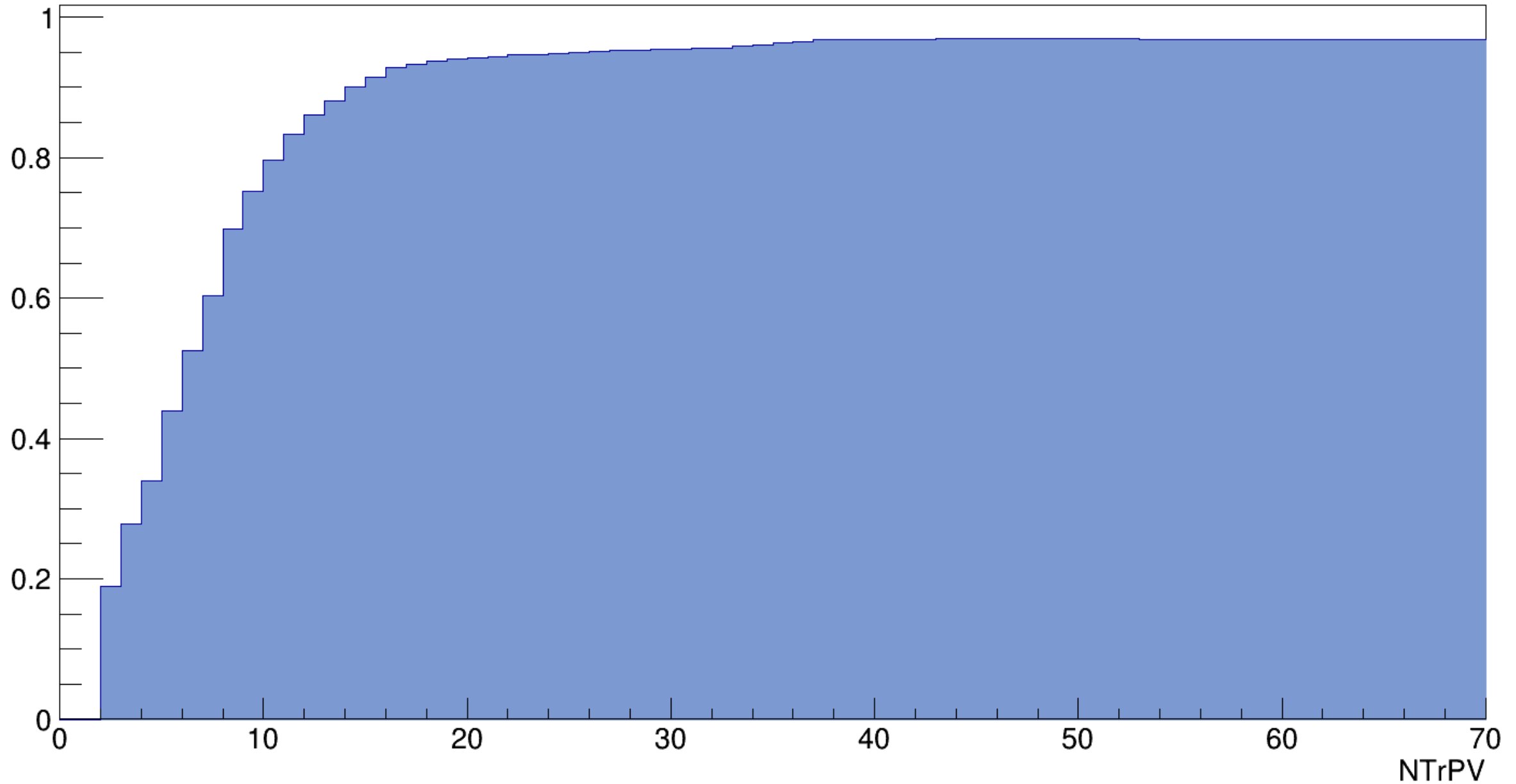
Unfolding using the response from UrQMD-AMC for all

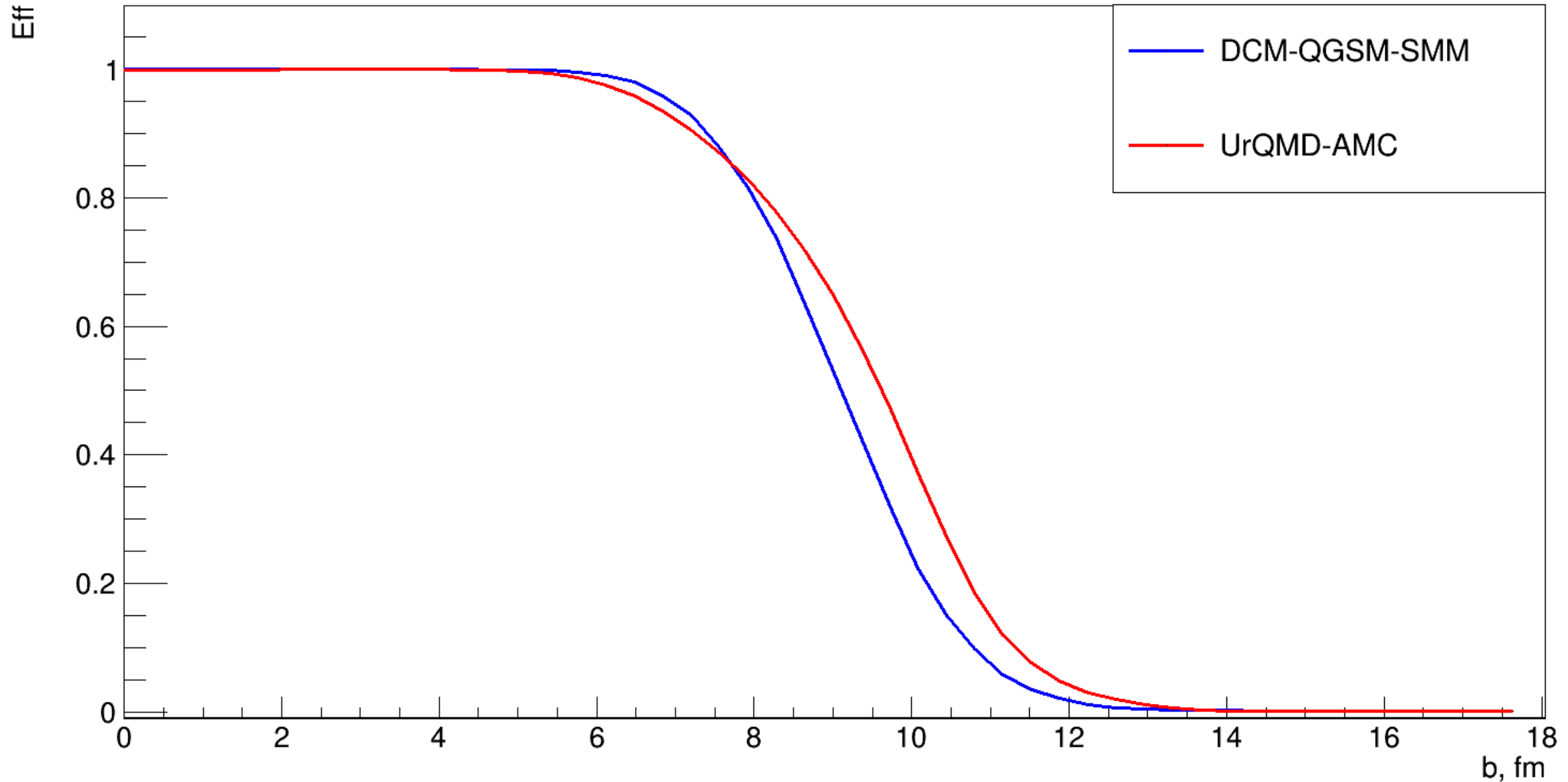


We can use the response matrix from other models with minor distortions.

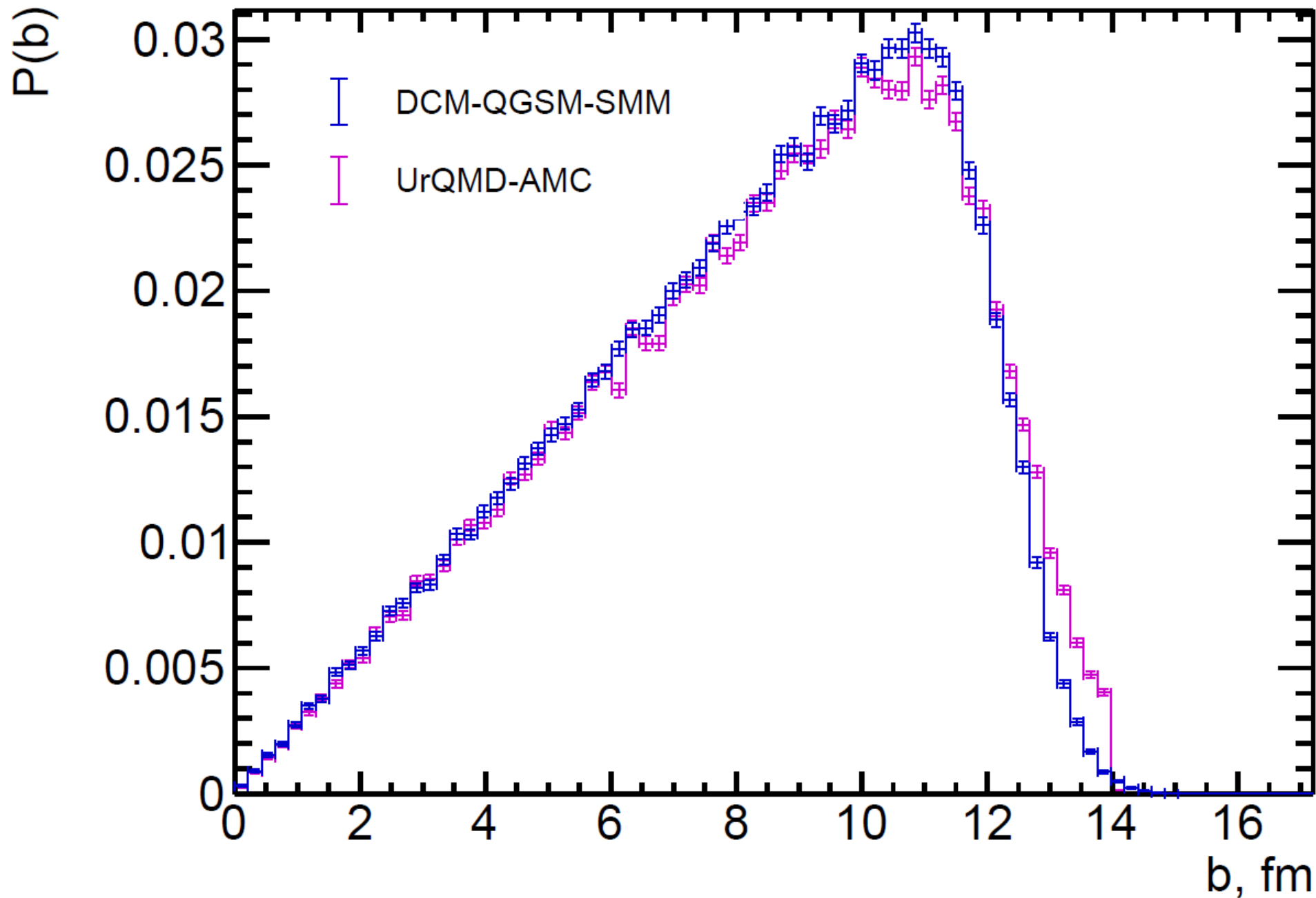


Trigger efficiency





Impact parameter distribution



$$\left\{ \begin{array}{l} P(d) = \frac{N_{ev} \cdot \langle N_n \rangle}{N_{ions}} \cdot (\Omega_n \times \varepsilon_n) \\ P(d) = 1 - \exp(-d/\lambda) \end{array} \right.$$

$$d = 0.175 \text{ cm}$$

$$N_A = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

$$\rho = 4.53 \text{ g/cm}^3$$

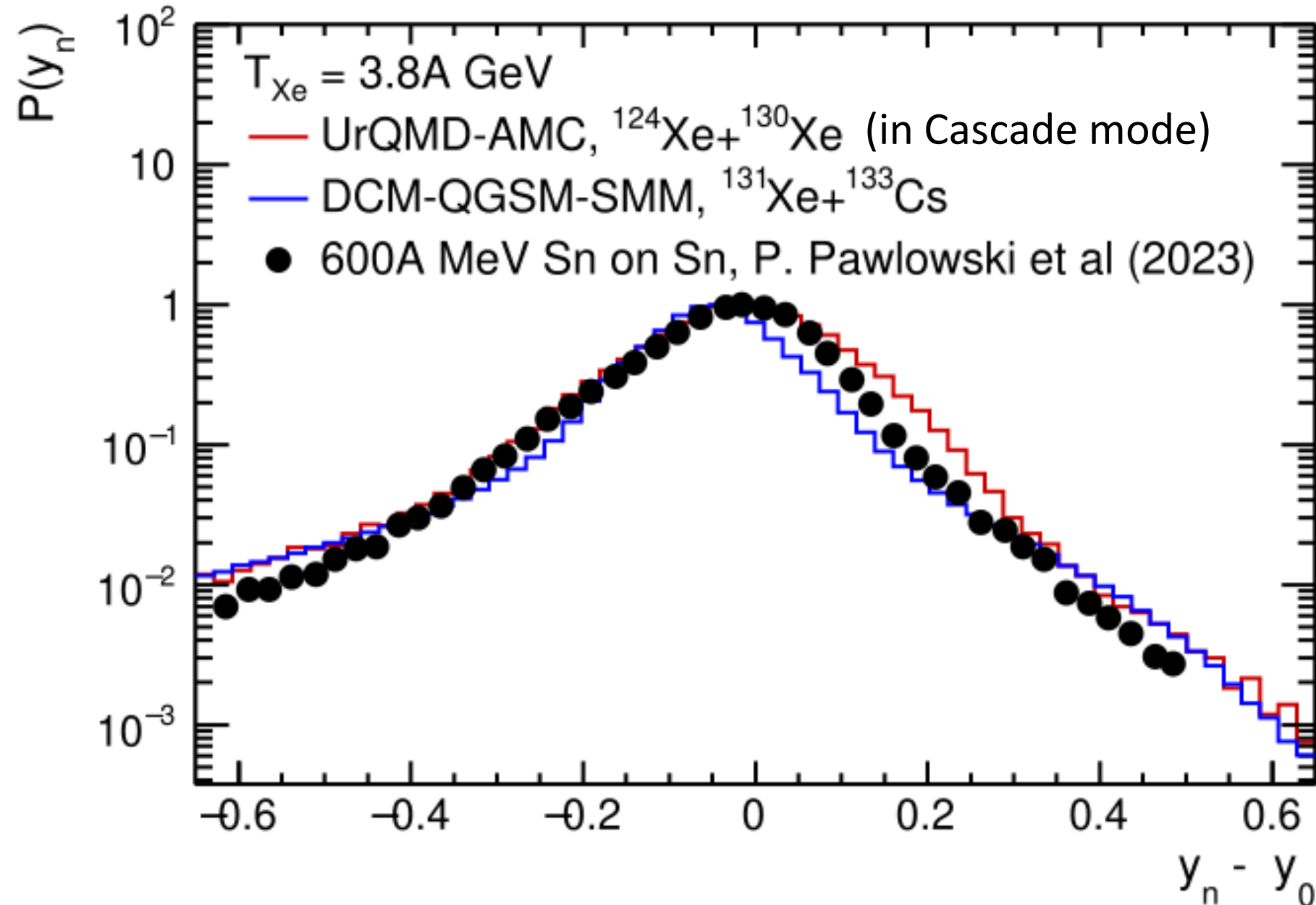
$$\Omega_n = \frac{N_{hit}}{N_{gen}} \quad \varepsilon_n = \frac{N_{rec}}{N_{hit}}$$

$d \ll \lambda$:

$$P(d) = \frac{d}{\lambda} = \frac{d \cdot N_A \cdot \rho \cdot \sigma}{A}$$

$$\sigma = \frac{N_{ev} \cdot \langle N_n \rangle}{N_{ions}} \cdot (\Omega_n \times \varepsilon_n) \cdot \frac{A}{d \cdot N_A \cdot \rho}$$

UrQMD-AMC



DCM-QGSM-SMM and UrQMD-AMC describe the experiment well in the rapidity region $y_n - y_0 < 0$.

In the region $y_n - y_0 > 0$, DCM-QGSM-SMM underestimates the data whereas UrQMD-AMC overestimates.

For DCM-QGSM-SMM, there is a shift in the rapidity relative to the beam rapidity.

- The excited nuclear fragments are formed by means of MST-clusterization algorithm after UrQMD
 - A few excited nuclear prefragments can be formed, in contrast with DCM-QGSM-SMM, where all the spectator nucleon remain bound in one prefragment.
- Excitation energy of prefragment is calculated by hybrid approximation: a combination of Ericson formula for peripheral collisions and ALADIN approximation otherwise¹⁾
- Decays of prefragments are simulated as follows:
 - Fermi break-up model from Geant4 v9.2 ²⁾
 - Statistical Multifragmentation Model (SMM) from Geant4 v10.4 ²⁾
 - Weisskopf-Ewing evaporation model from Geant4 v10.4 ²⁾
- They were validated and adjusted to describe the data³⁾.

1) R. Nepeivoda, et al., Particles **5** (2022) 40

2) J. Alison et al. Nucl. Inst. A **835** (2016) 186

3) 55th Geant4 Technical Forum

<https://indico.cern.ch/event/1106118/contributions/4693132/>

- AMC is developed to simulate secondary decays of spectator fragments created in other models, in particular UrQMD.
- It is assumed that spectator matter is formed out of nucleons that do not undergo any collisions.

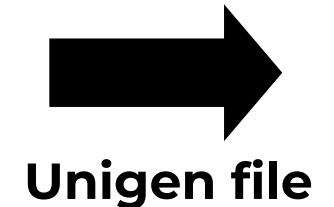
UrQMD:

- Version 3.4
- Cascade mode in this work
- Offset radius 5 fm
- Evolution time – 100 fm/c
- Other parameters are set to default values



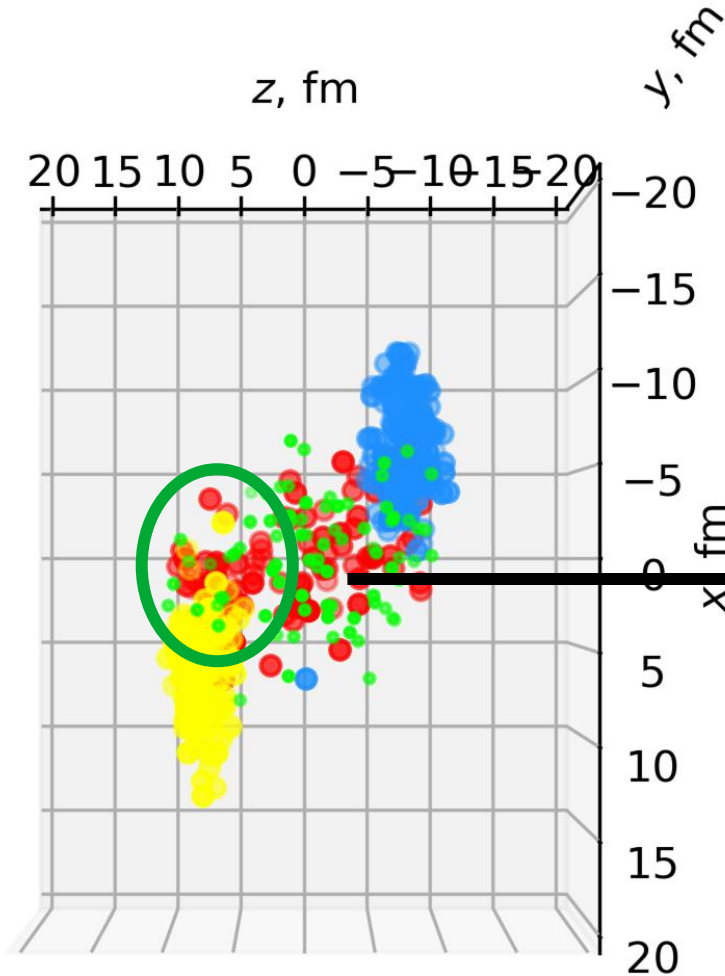
AMC:

- Find spectator nucleons
- Define prefragments via MST-clustering
- Constant $d = 2.7$ fm
- Model prefragments decays
- All the participant data remain intact

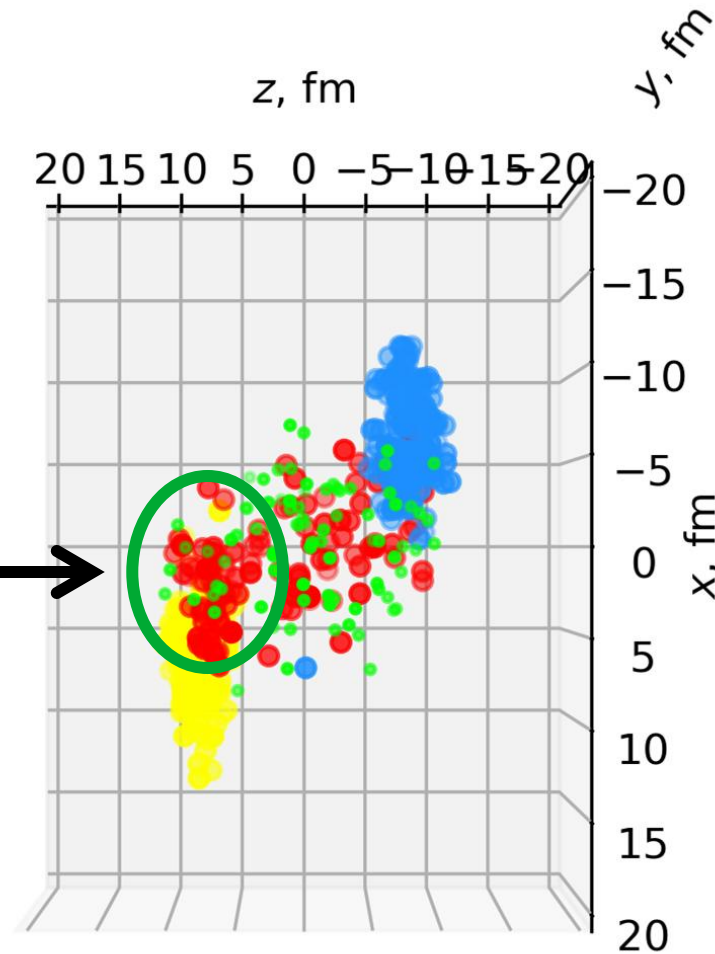


Knocking out some spectator nucleons by mesons

$b = 10$ fm, $\tau = 13.5$ fm/c

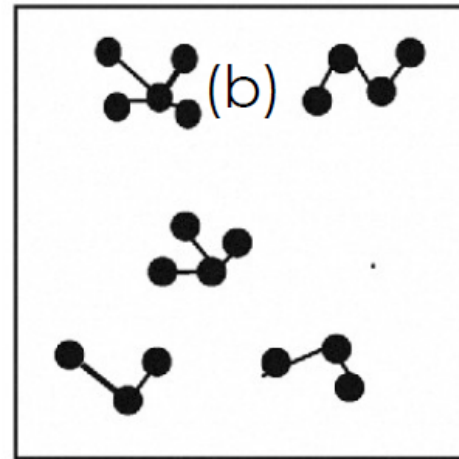
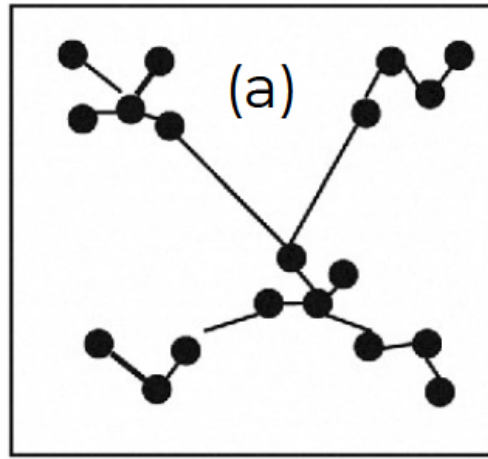


$b = 10$ fm, $\tau = 14.0$ fm/c

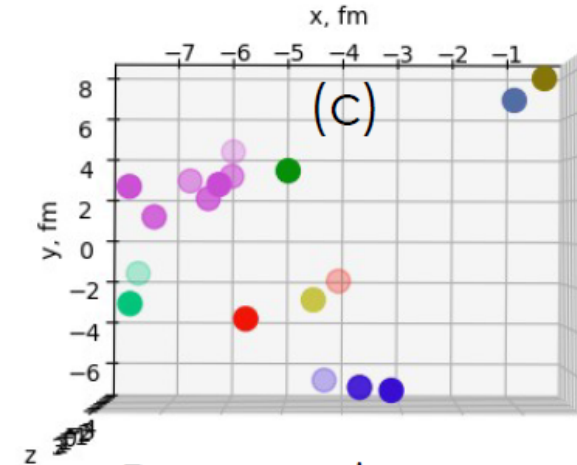


Blue and yellow – spectator nucleons, red – participant nucleons, green – produced mesons

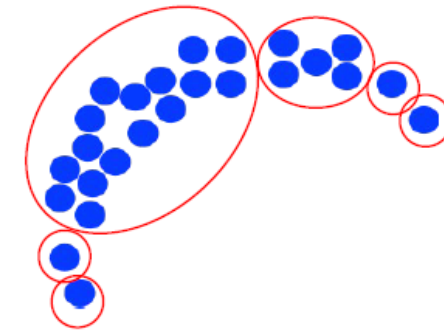
MST-clustering



Clusters representation on the Side A



Beam-eye view



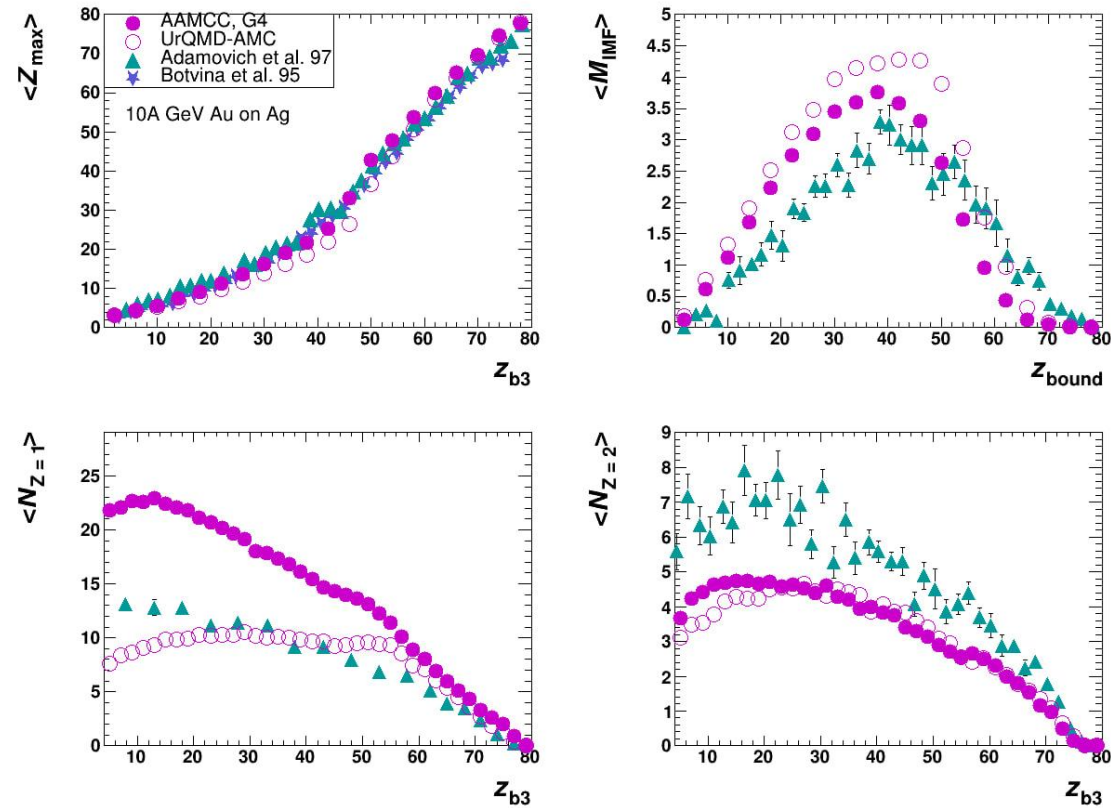
Prefragments in a central collision

- Graph vertexes – nucleons, edges weights – Cartesian distances between them.
- **(a)** The minimum spanning tree is selected from the complete graph
- **(b)** All edges with a weight greater than d are removed. d is the clustering parameter depending on the excitation energy
- **(c)** Connectivity components are separate (pre-)fragments



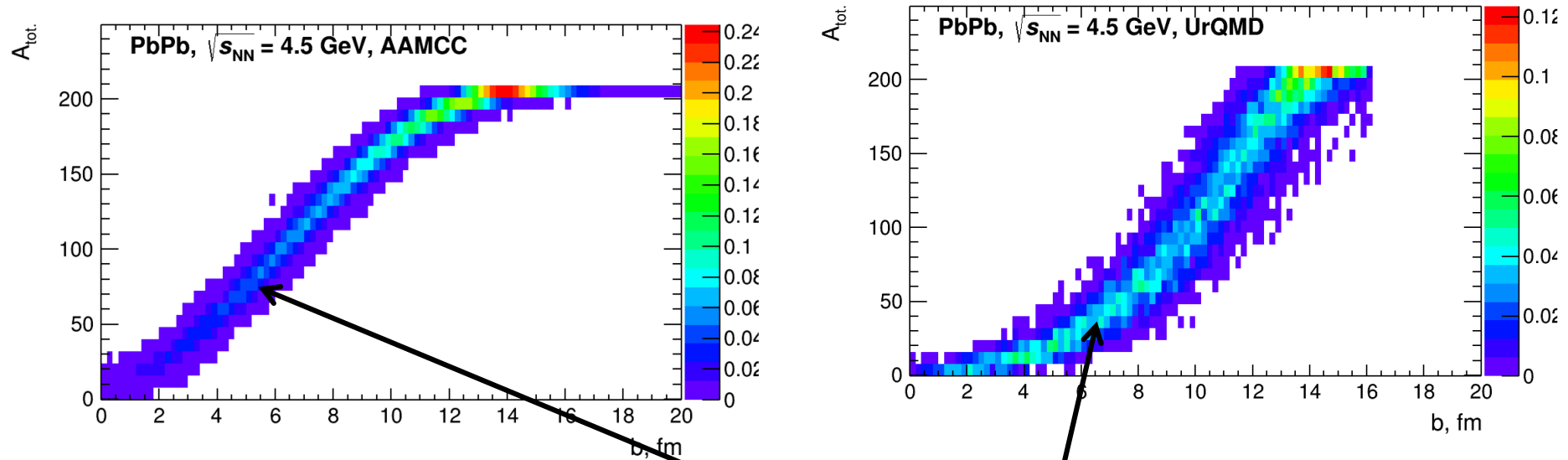
The prefragment is dynamically divided into several prefragments until thermodynamic equilibrium is reached.

^{197}Au fragmentation



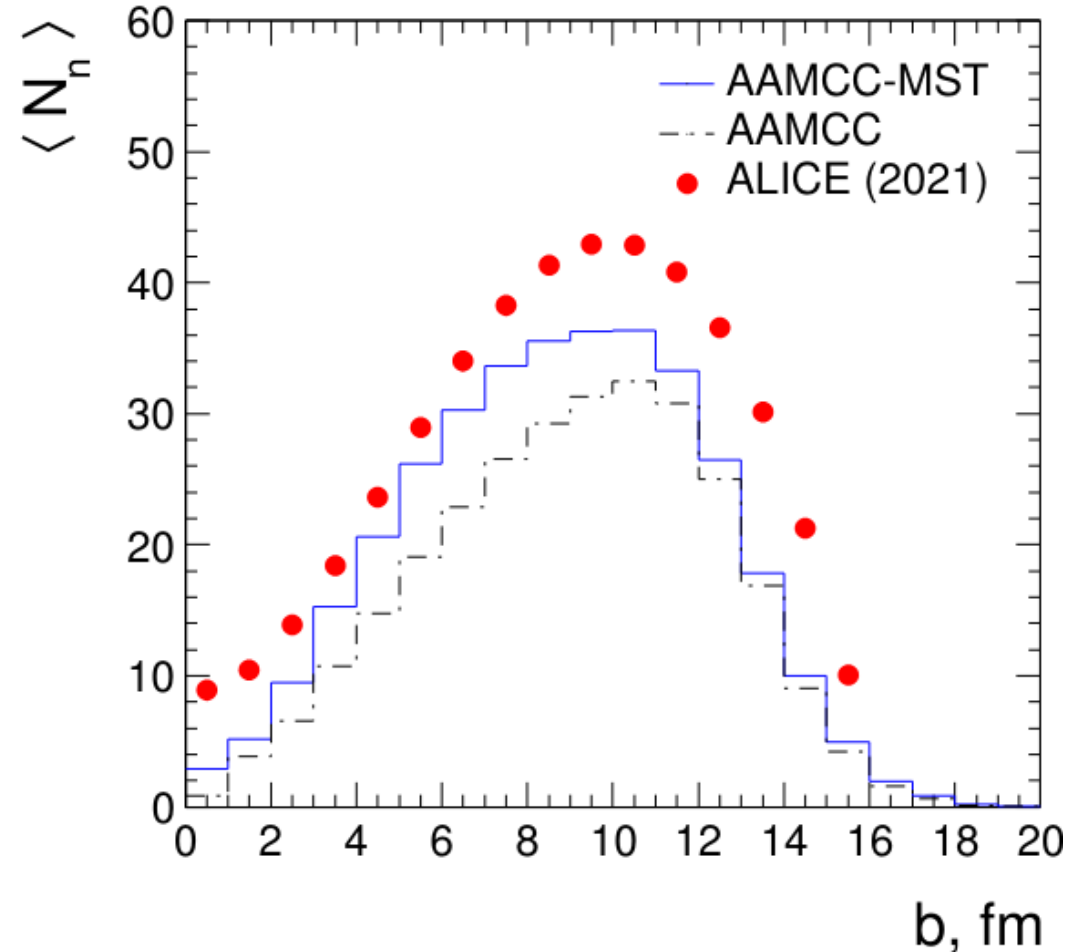
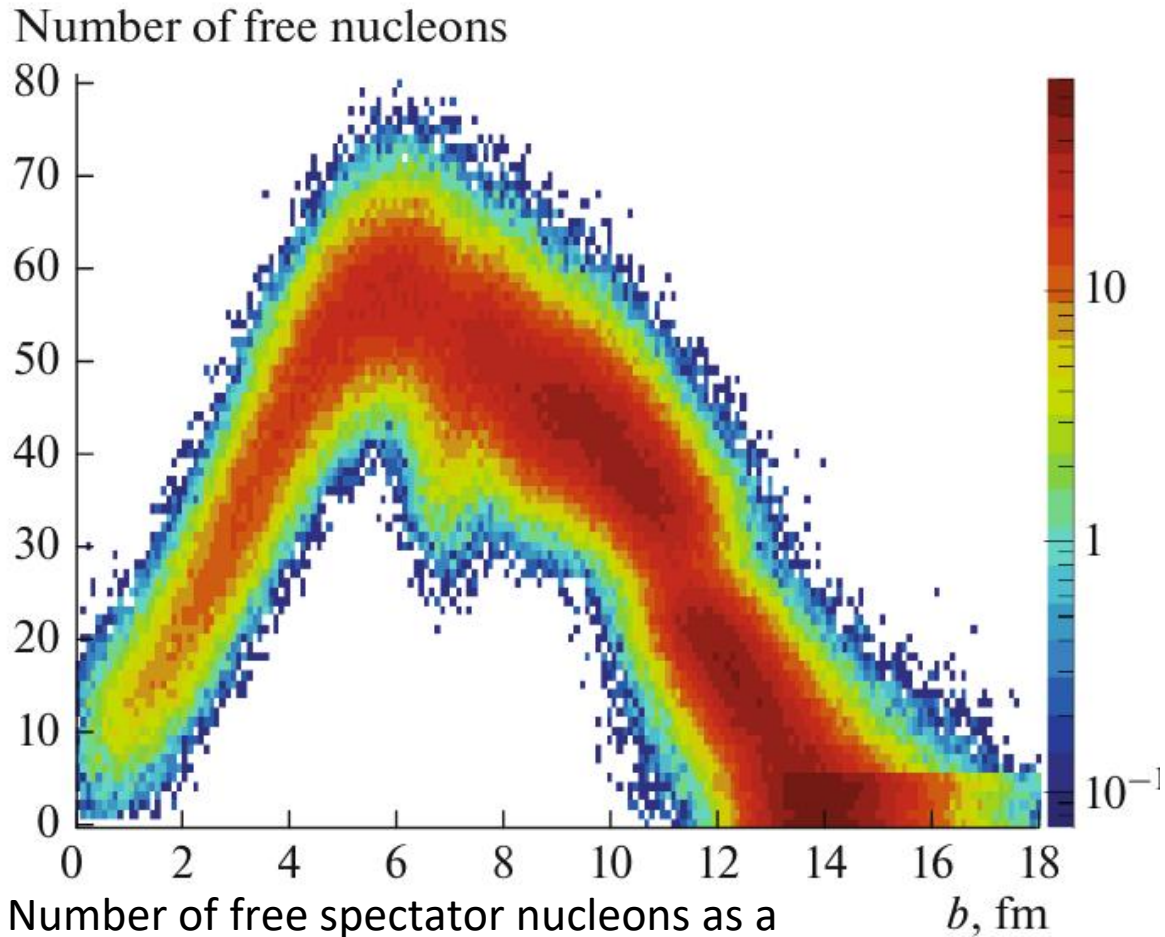
- UrQMD-AMC and AAMCC describe Z_{max} . Models give similar numbers of He
- UrQMD-AMC is systematically lower than AAMCC for $Z_{\text{bound}} < 50$. This is due to a smaller spectator volume in UrQMD.
- AAMCC is closer to data on M_{IMF} , while UrQMD-AMC overestimates M_{IMF} in semi-central collisions. This is because of higher excitation energy of prefragments since more nucleons are removed.
- The difference in H fragments can be attributed to the different number of participants, because of a larger contribution of protons from MST-clustering

Spectator matter volume as a function of impact parameter



UrQMD gives less spectators than AAMCC for all b

Nuclear interaction

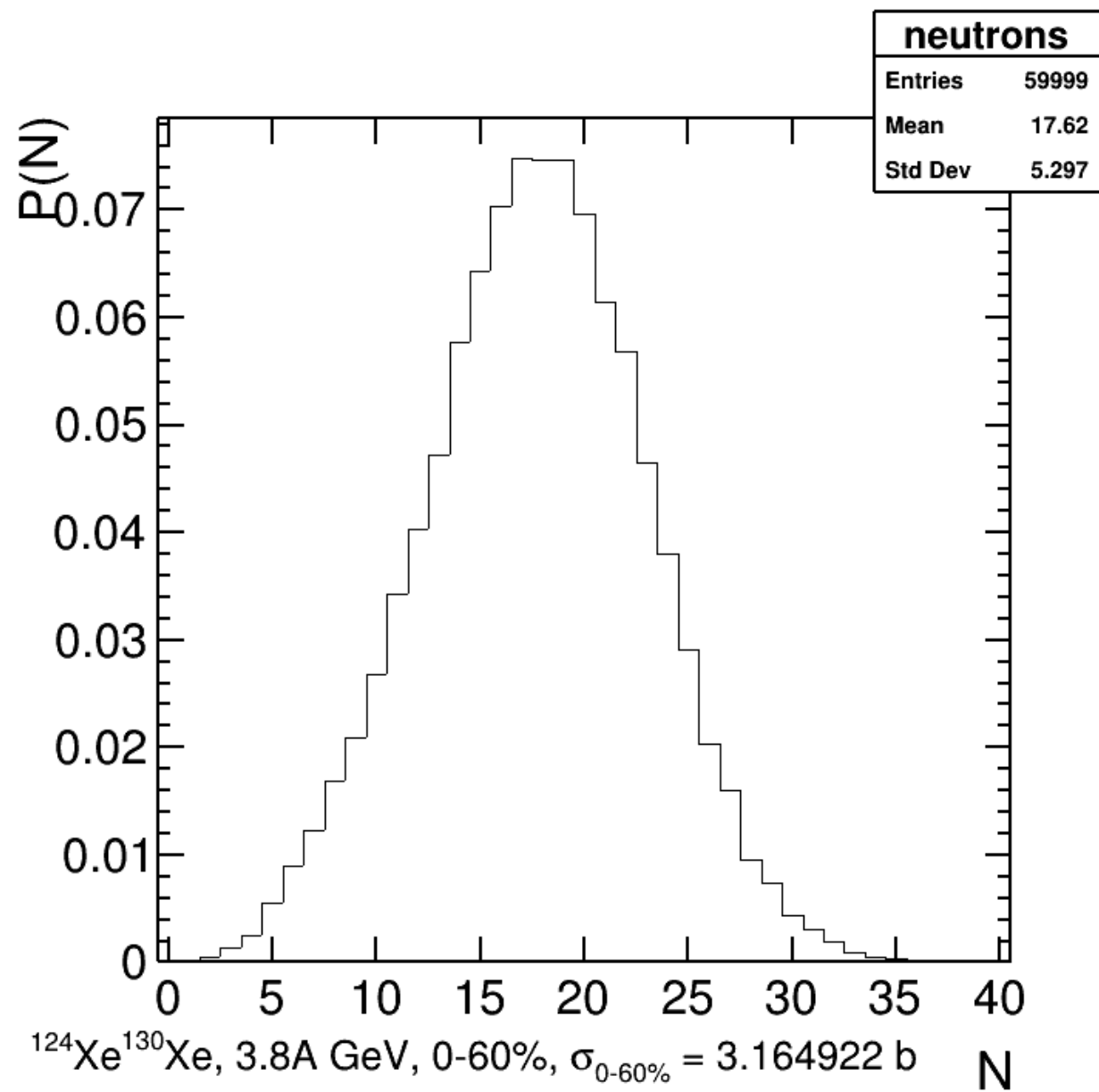
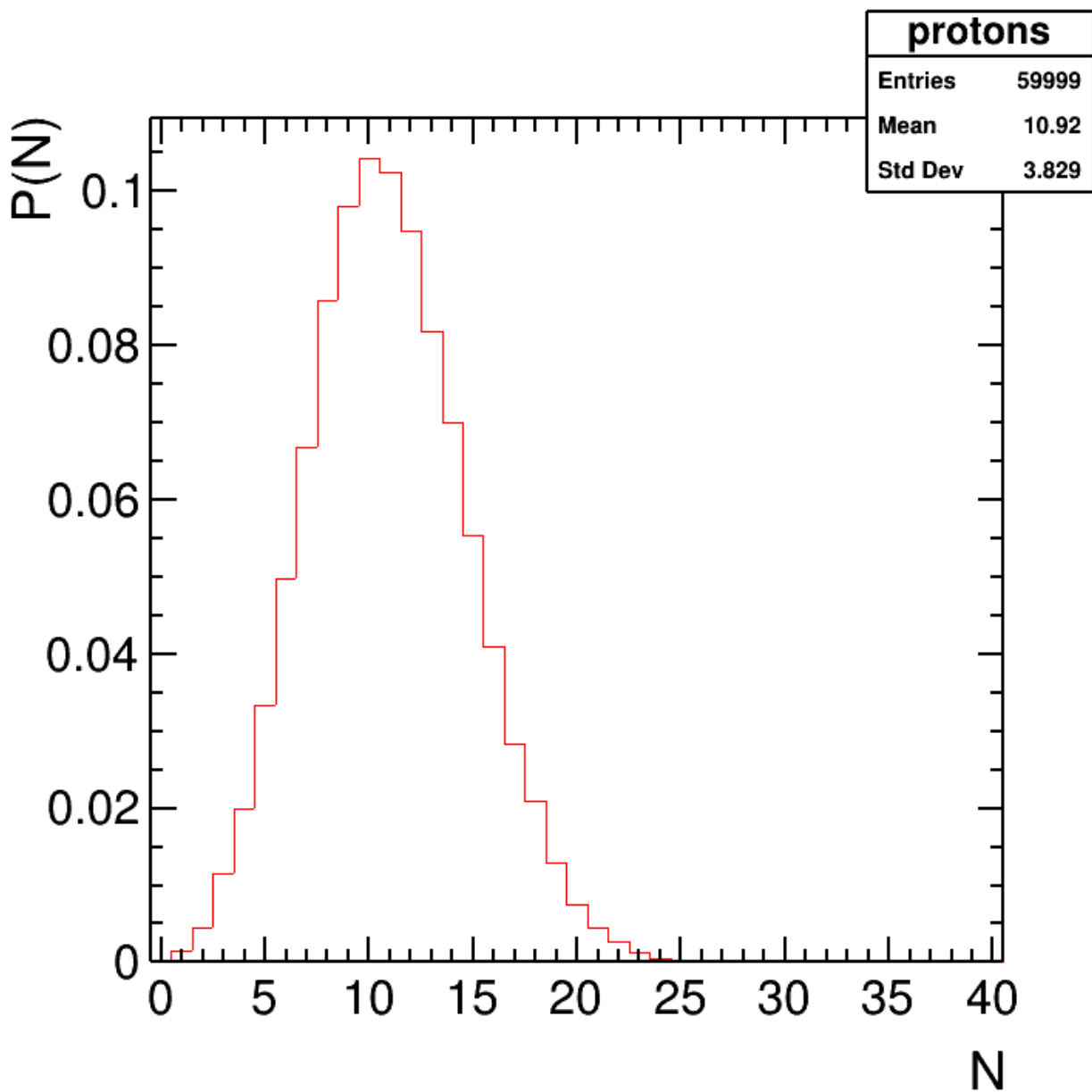


Average multiplicities of neutrons in ^{208}Pb – ^{208}Pb collisions at $v_{\text{NN}} = 5.02$ TeV as functions of the collision impact parameter

A. Svetlichnyi & I. Pshenichnov, Formation of Free and Bound Spectator Nucleons in Hadronic Interactions between Relativistic Nuclei. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* **2020**, 84 (8), 911–916.

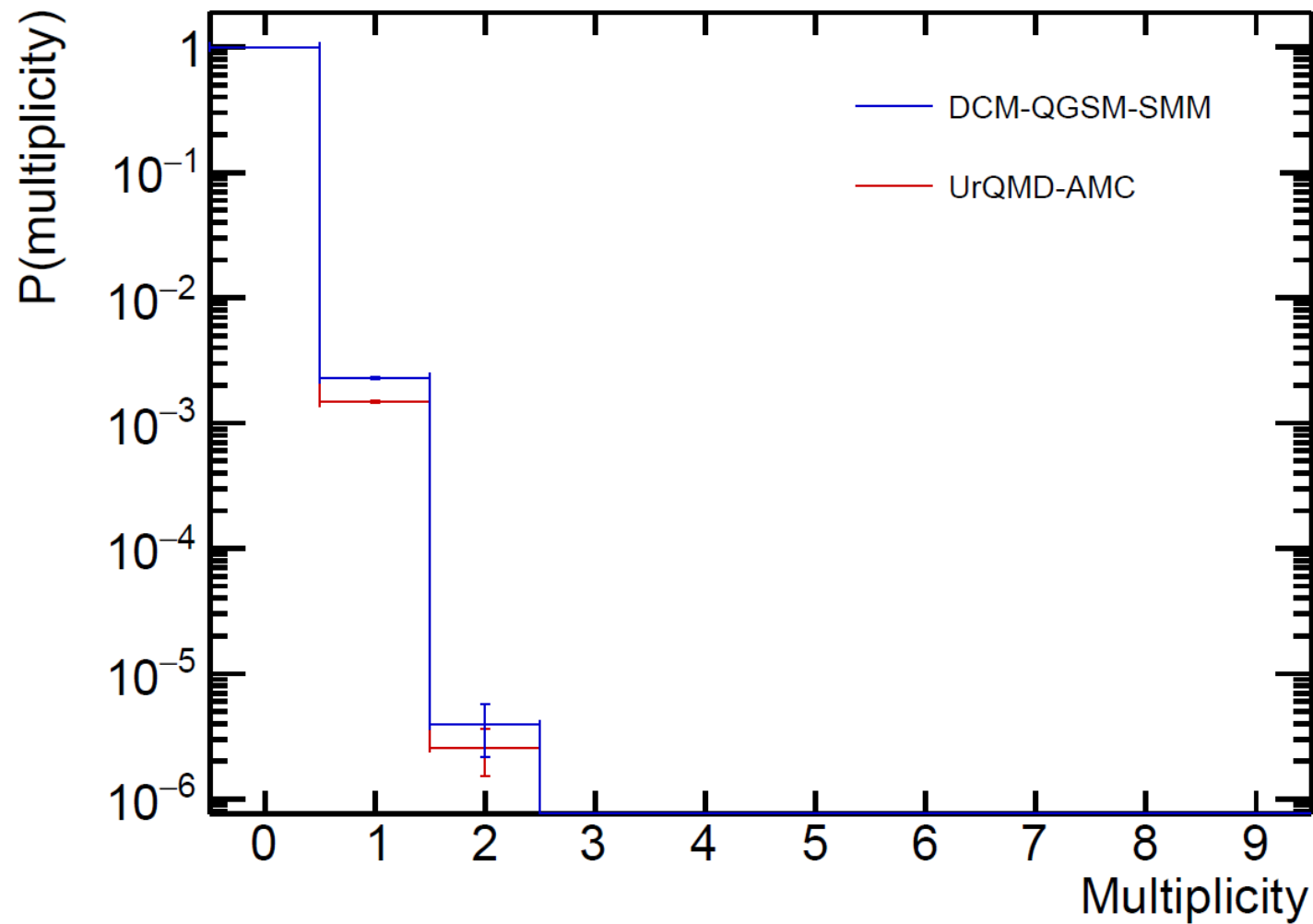
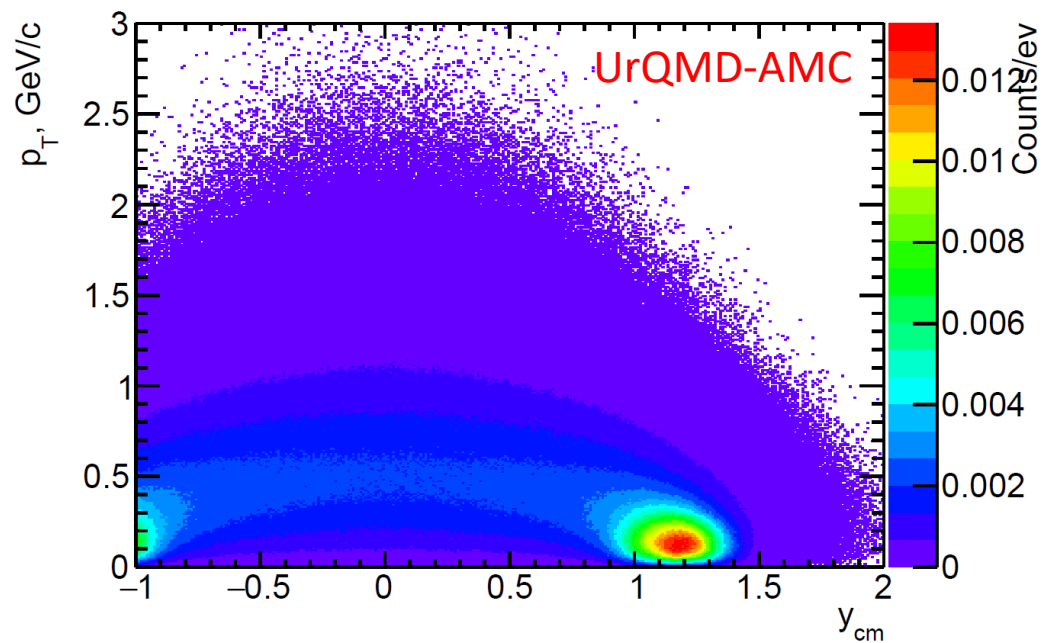
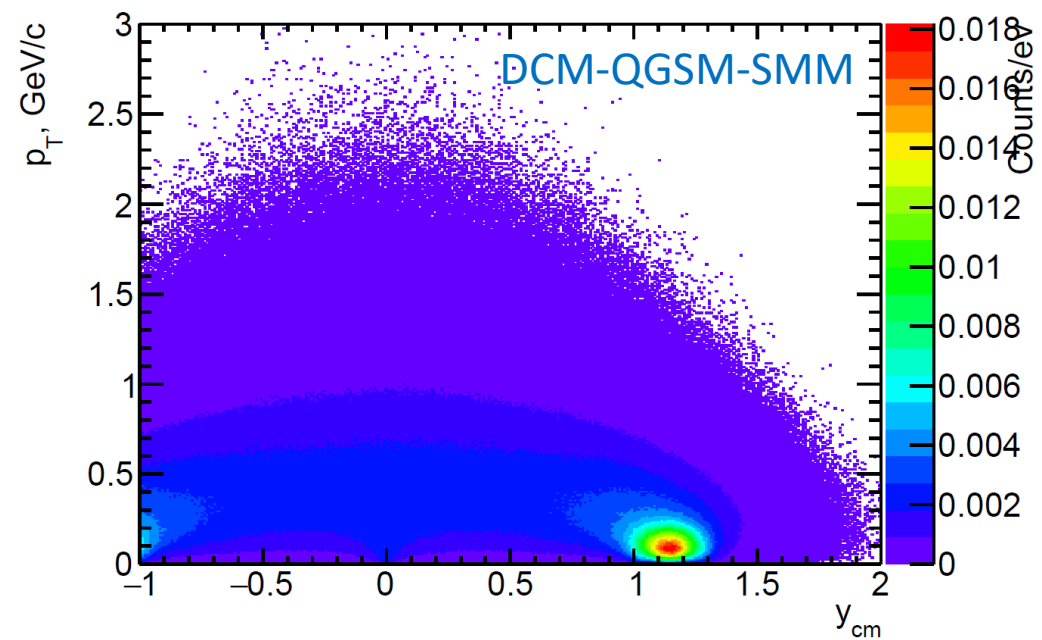
Nepeivoda, R. et al., Pre-Equilibrium Clustering in Production of Spectator Fragments in Collisions of Relativistic Nuclei. *Particles* **2022**, 5, 40–51.

Nuclear interaction



27°

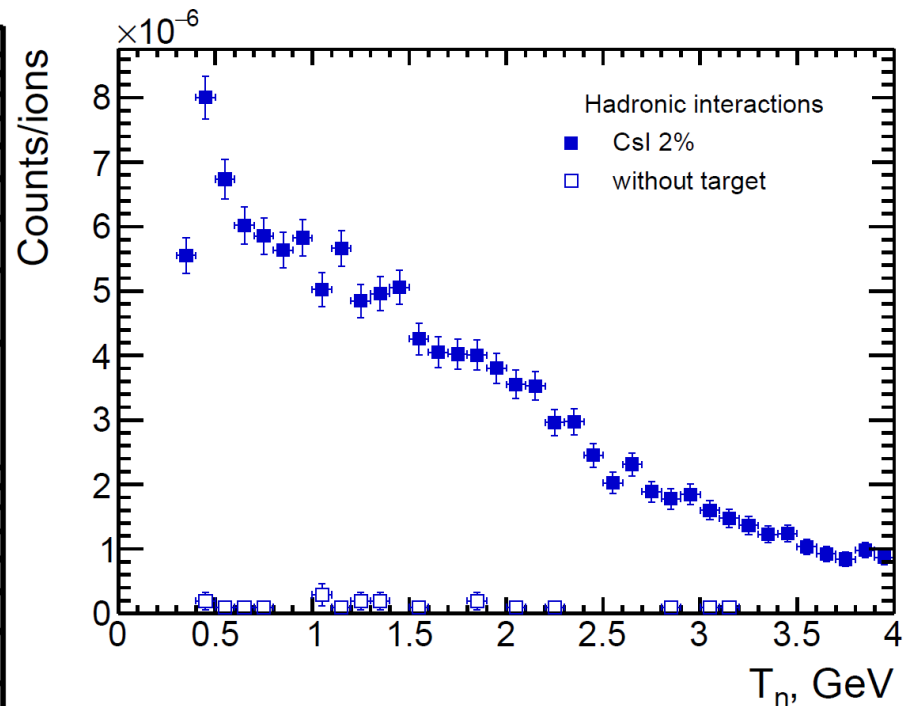
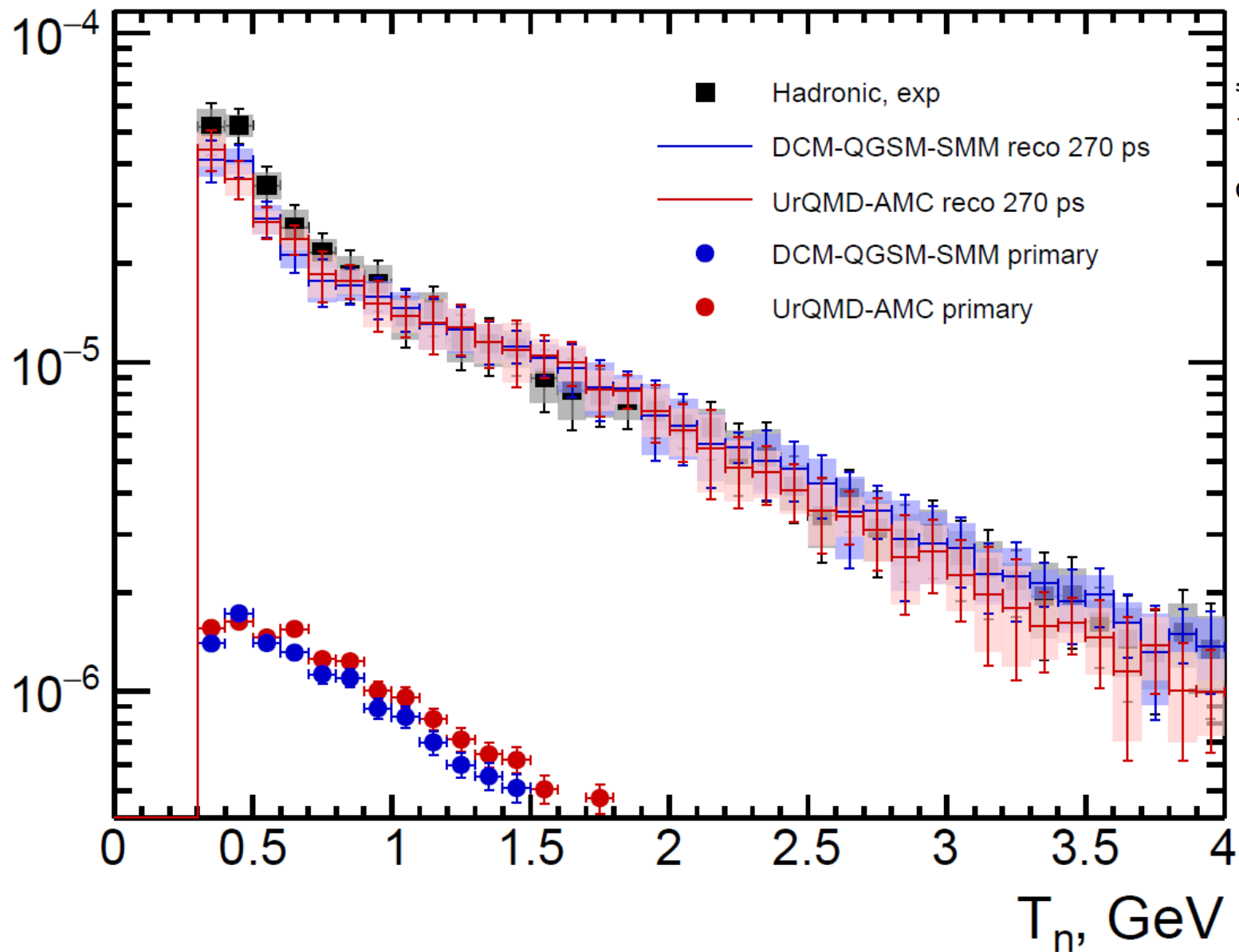
Neutron yields at 27°



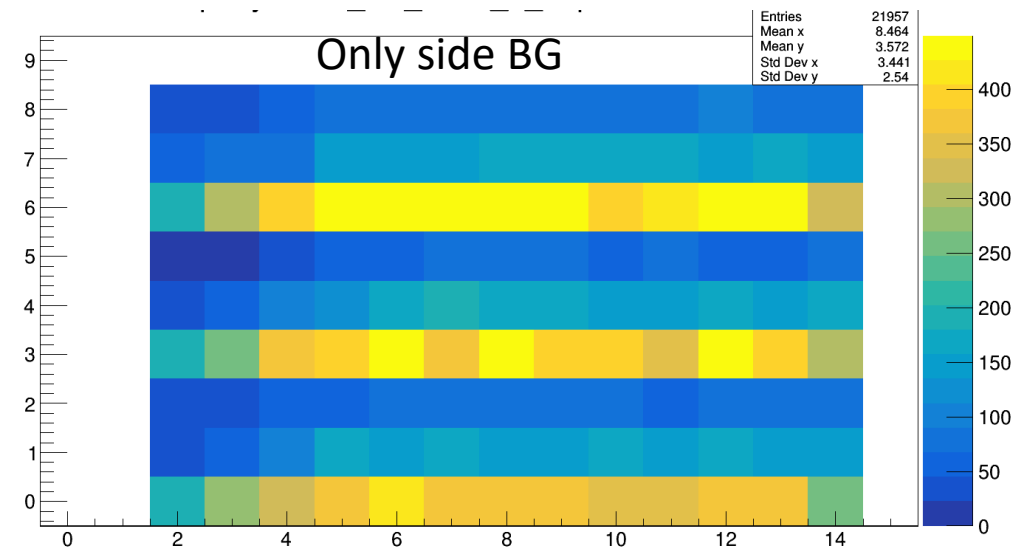
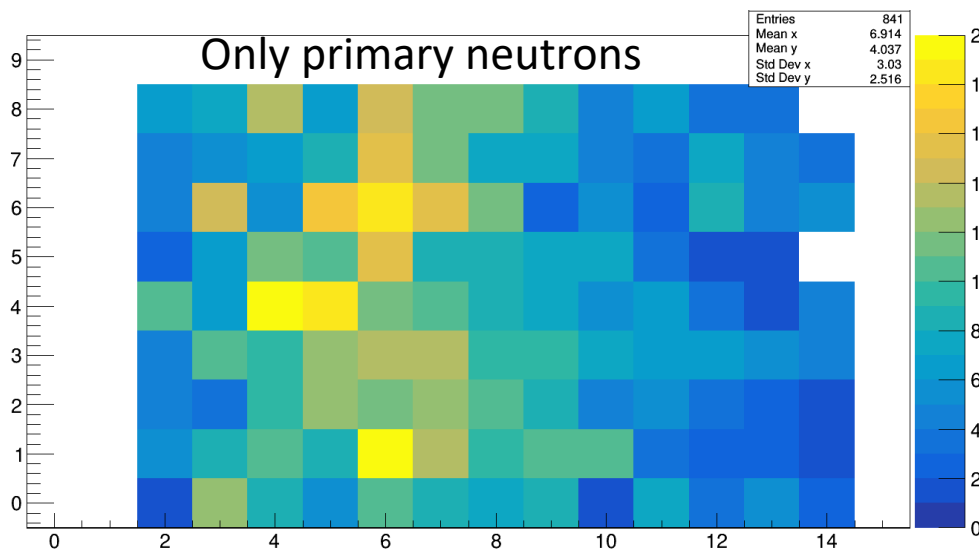
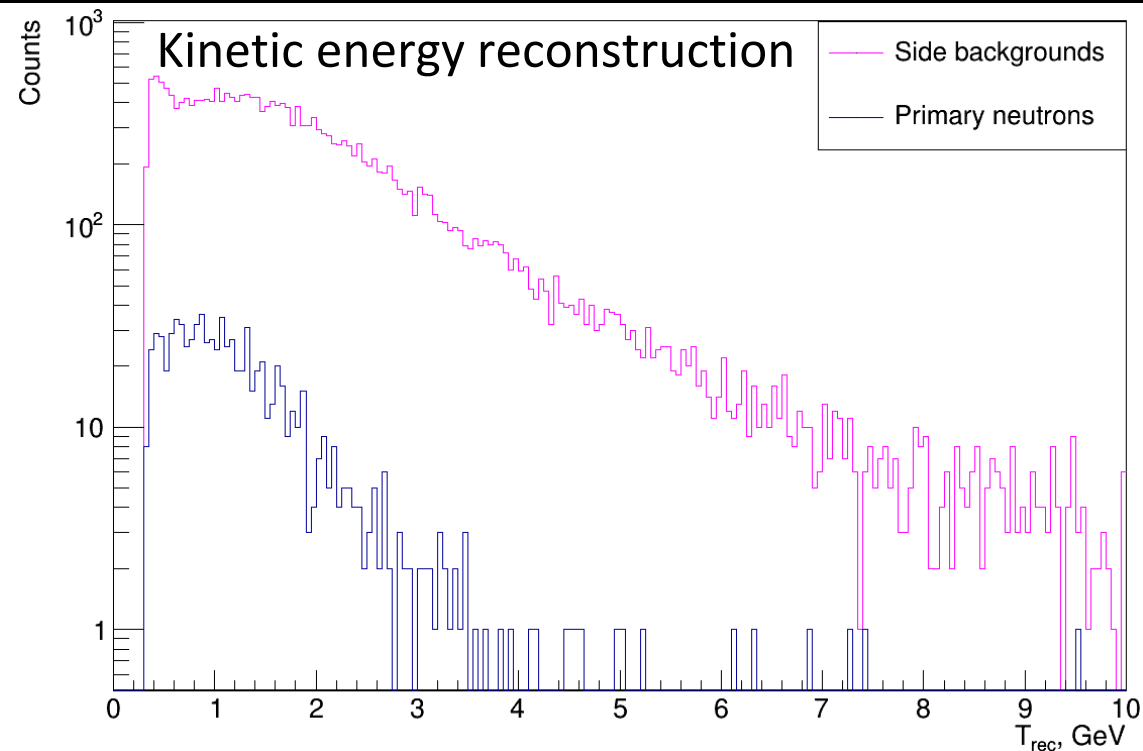
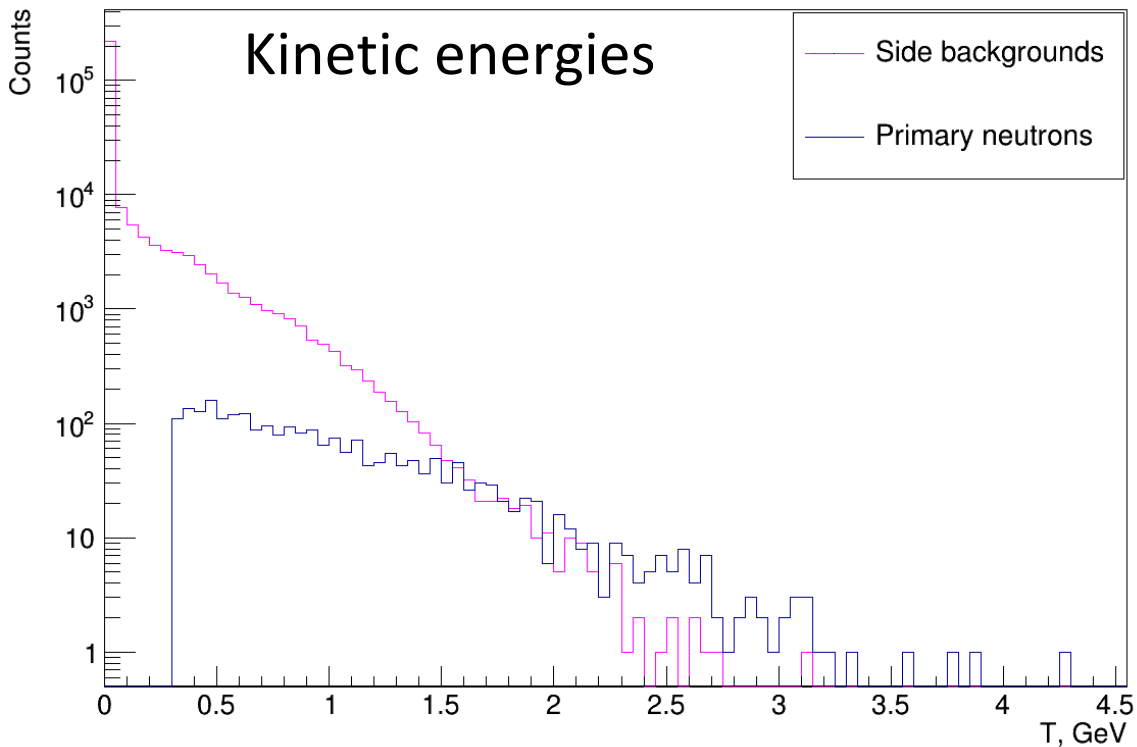
Neutron yields at 27°



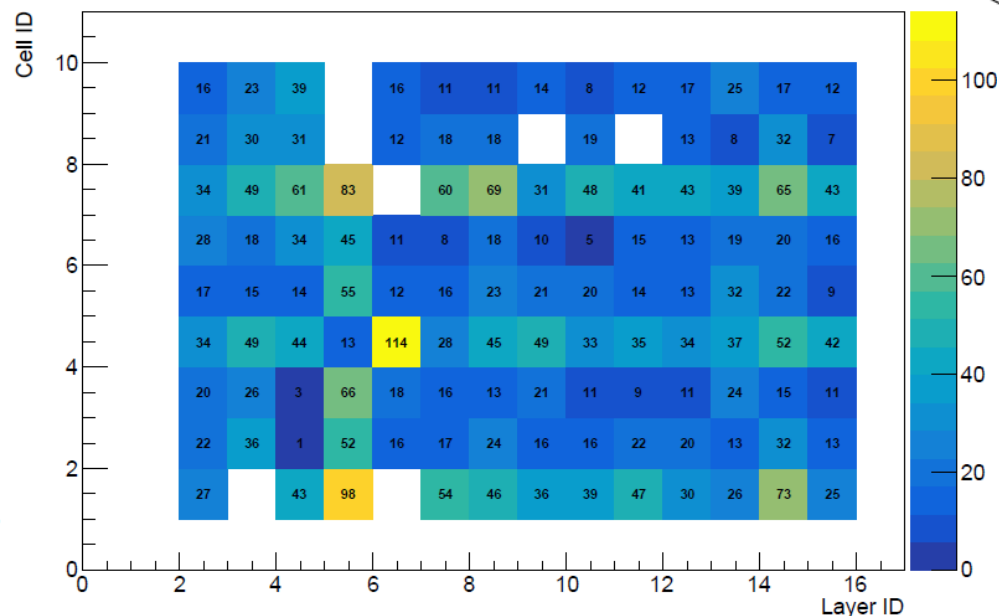
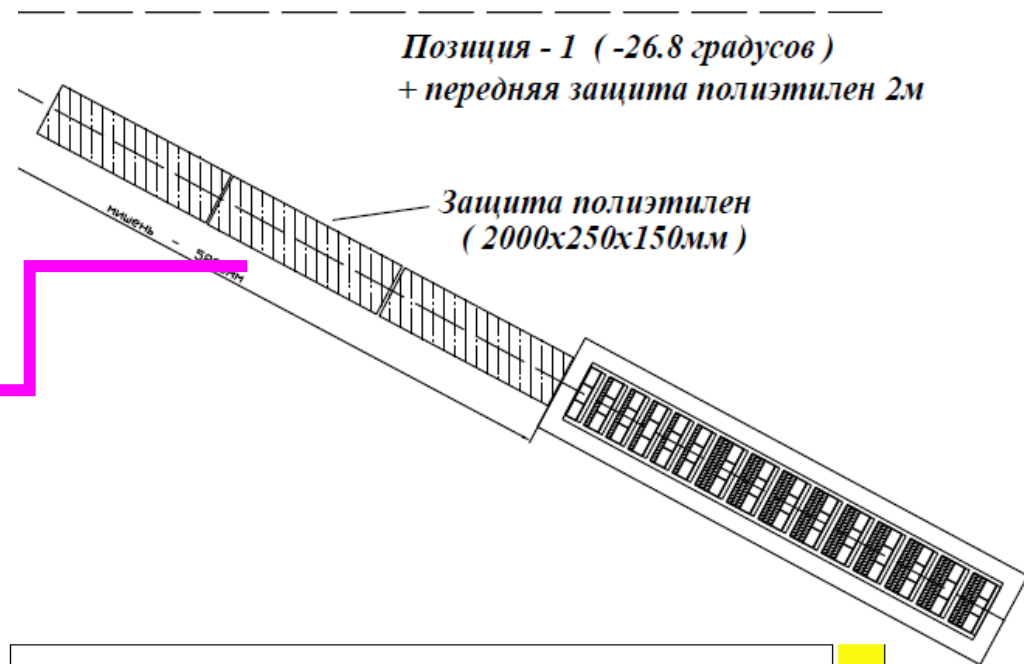
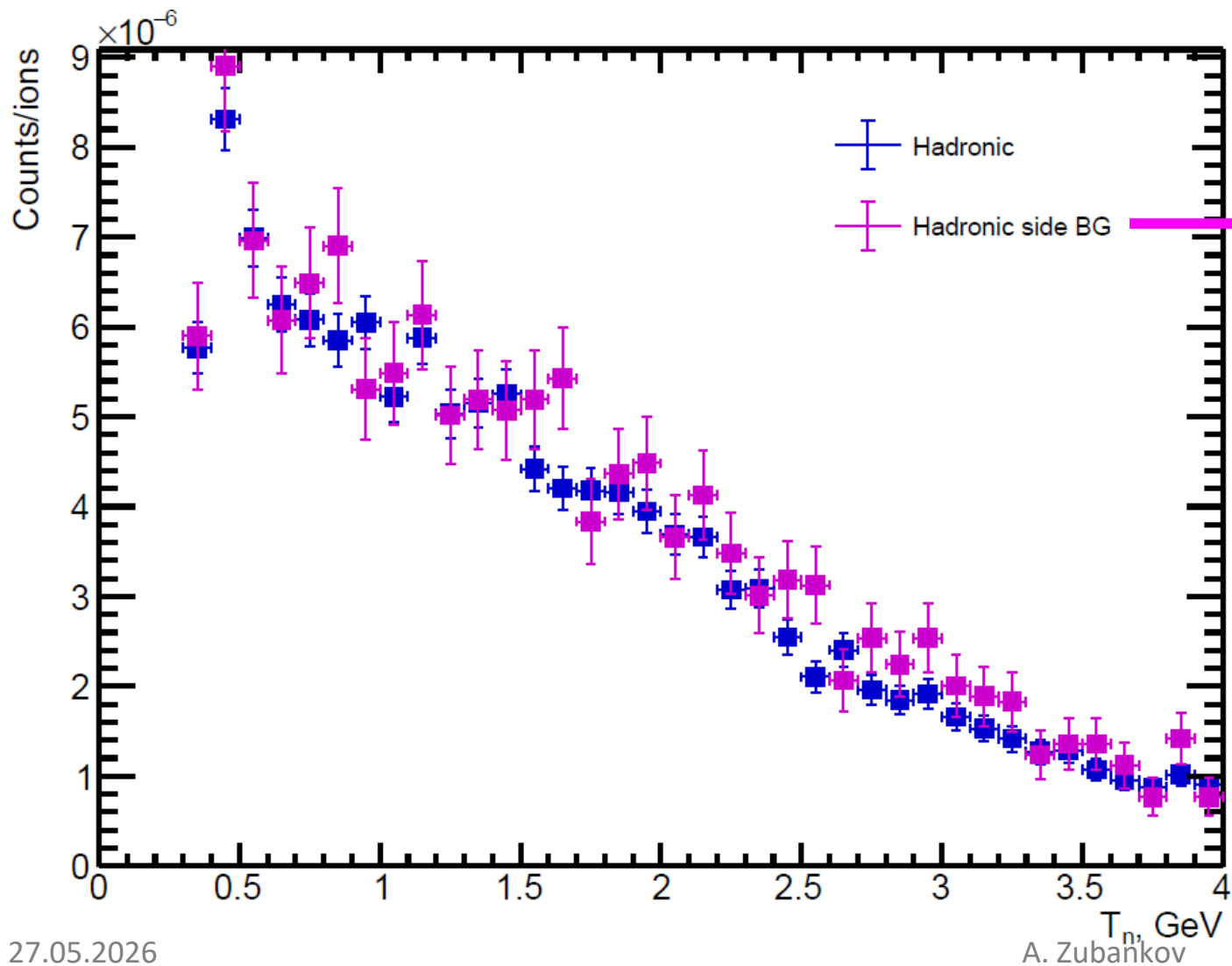
Counts/ions



Backgrounds DCM-QGSM-SMM



Experimental data
Kinetic energy reconstruction



HGND

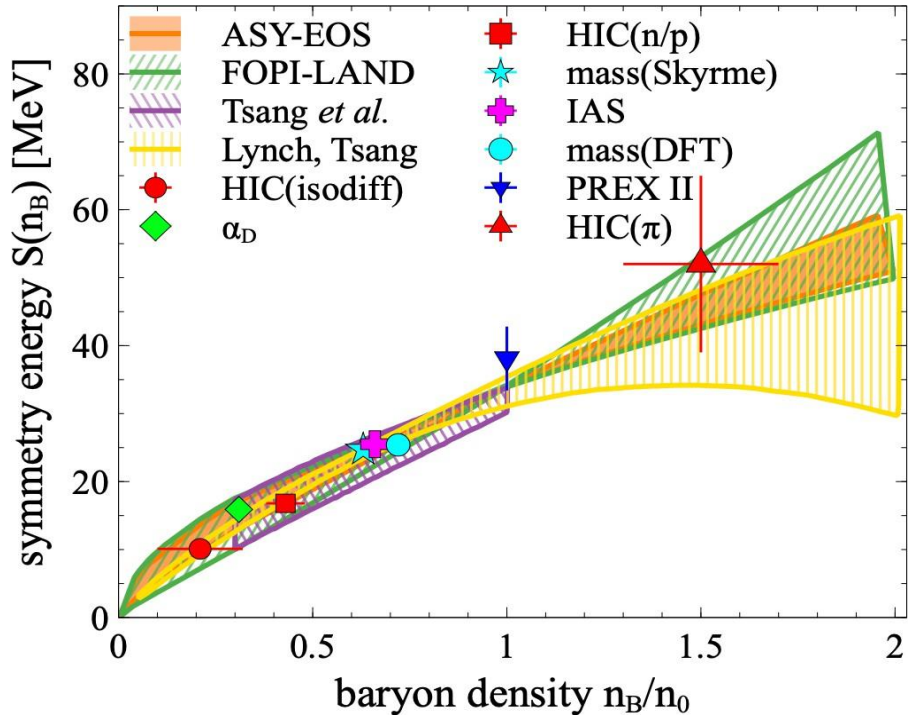
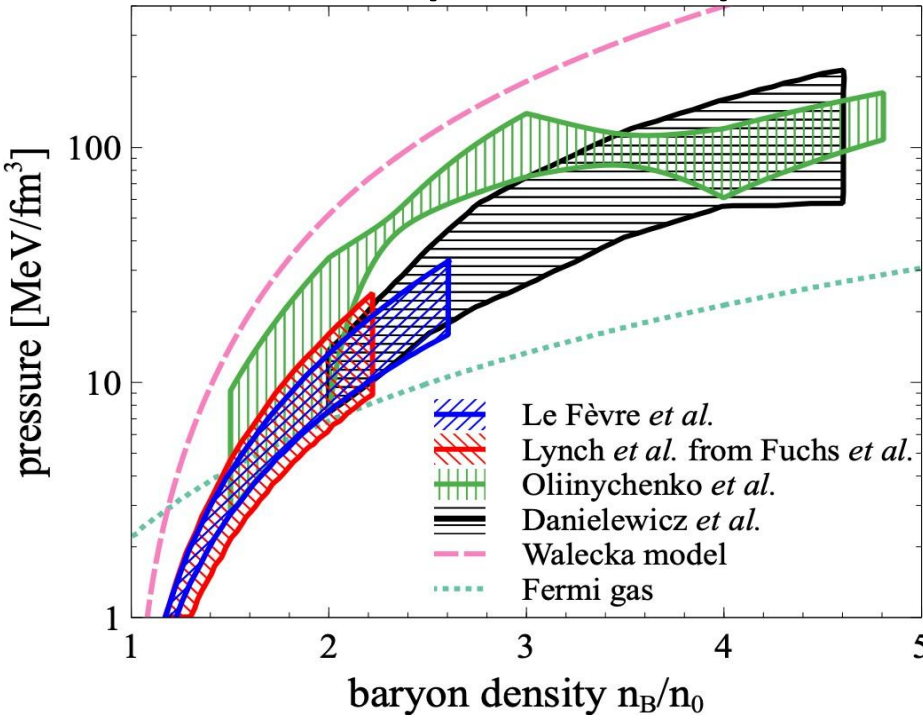
Энергия связи на нуклон: $E_A(\rho, \delta) = E_A(\rho, 0) + E_{sym}(\rho)\delta^2 + O(\delta^4)$

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

↑ Изоспиновая асимметрия

Симметричная материя

Энергия симметрии



- 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.

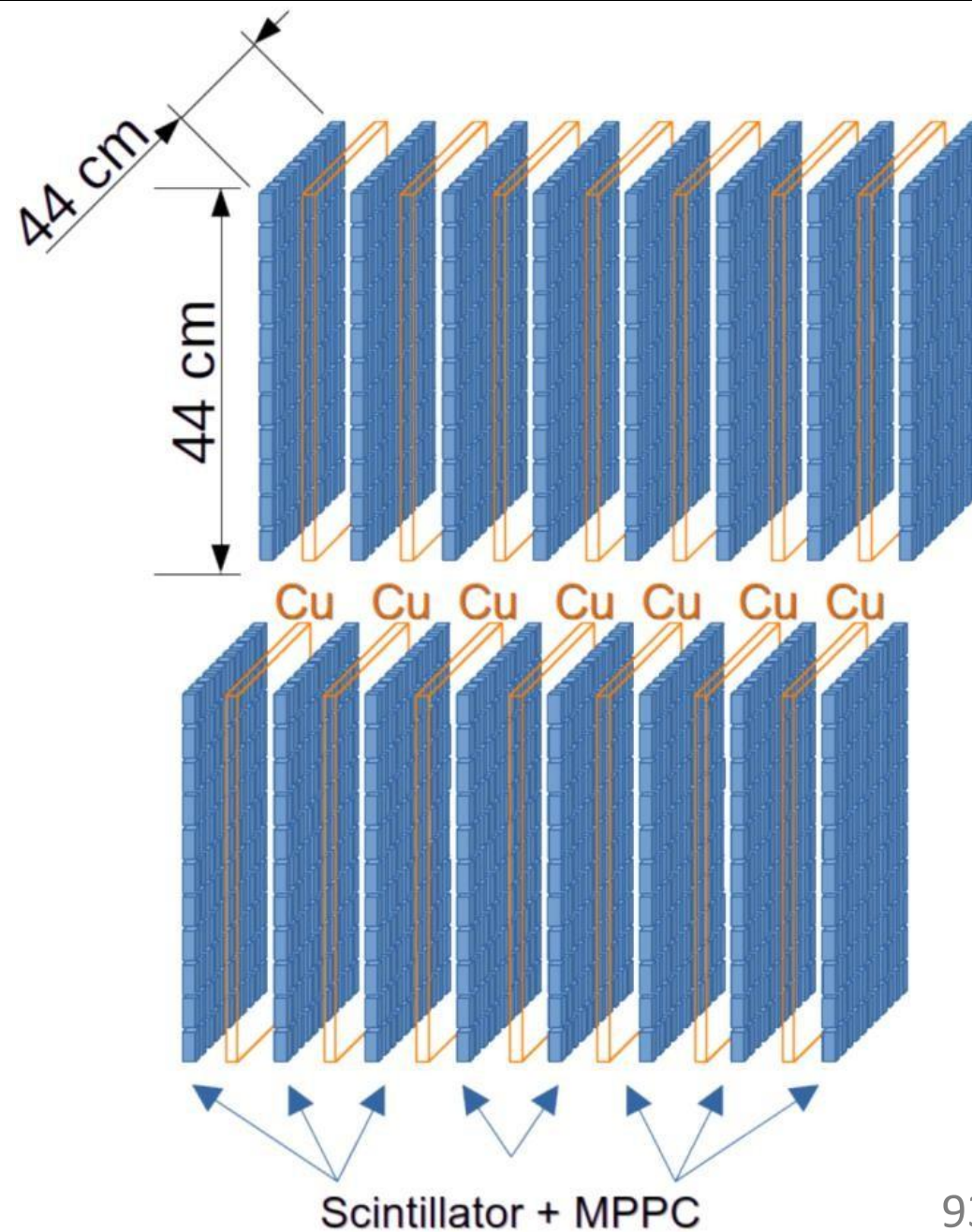
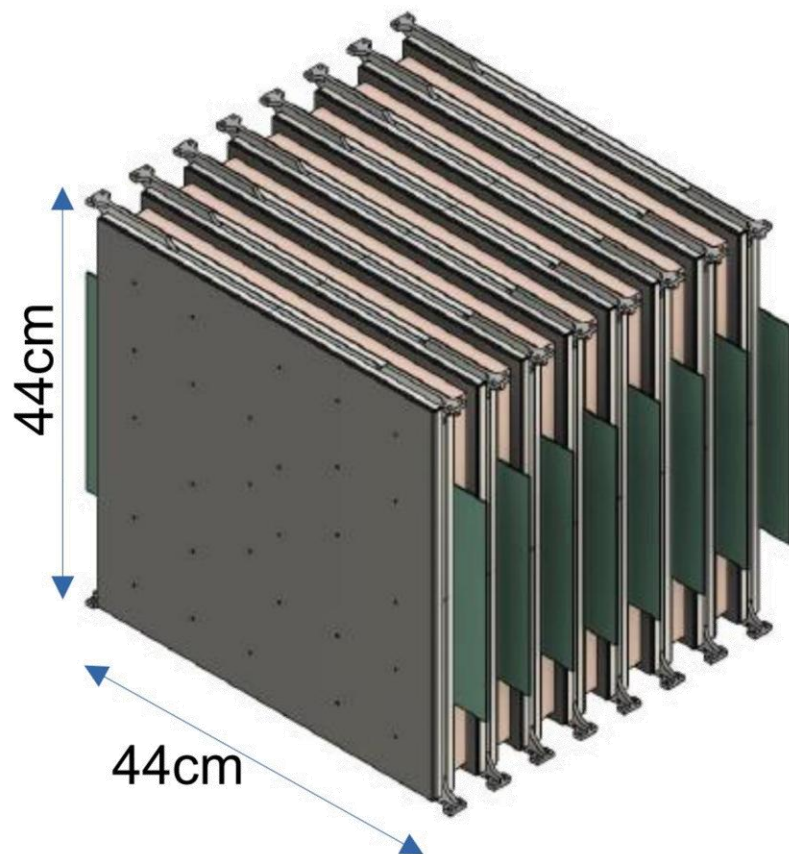
A. Sorensen et. al., Prog.Part.Nucl.Phys. 134 (2024) 104080

- Мало экспериментальных данных по вкладу энергии симметрии при энергиях выше 800 МэВ.
- Необходима реконструкция потока нейтронов и выходов.

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

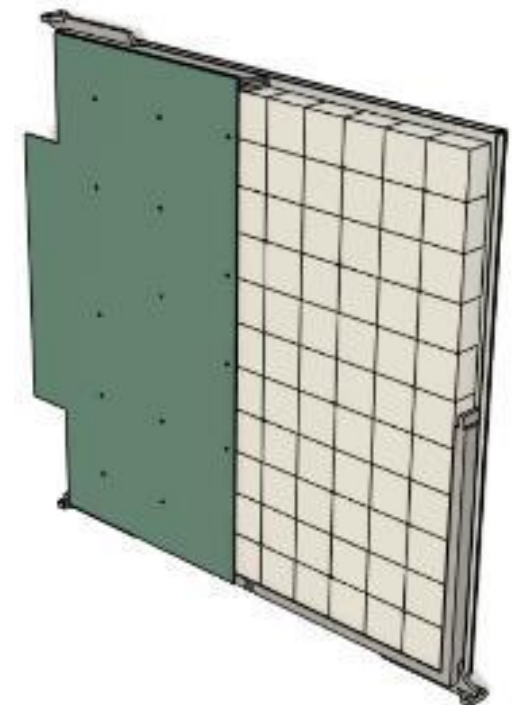
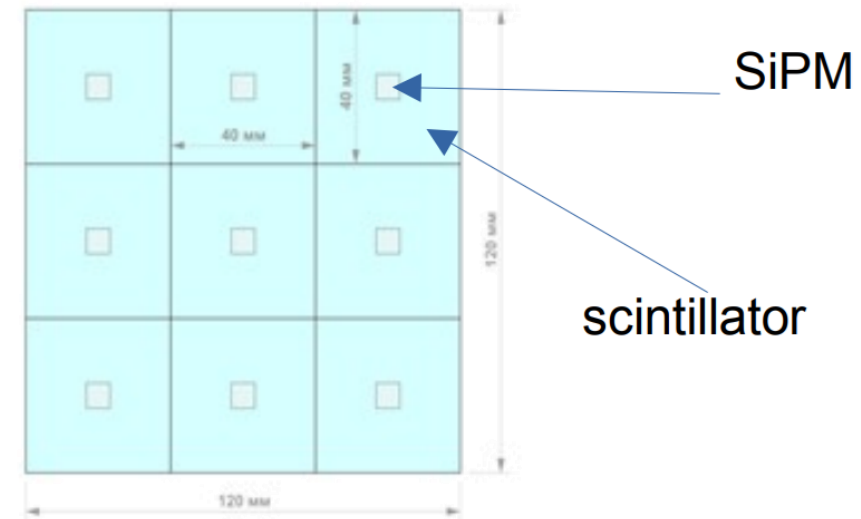


EQR15 11-6060D-S MPPC

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

Сцинтилляторы на основе полистирола с PPOP

- 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



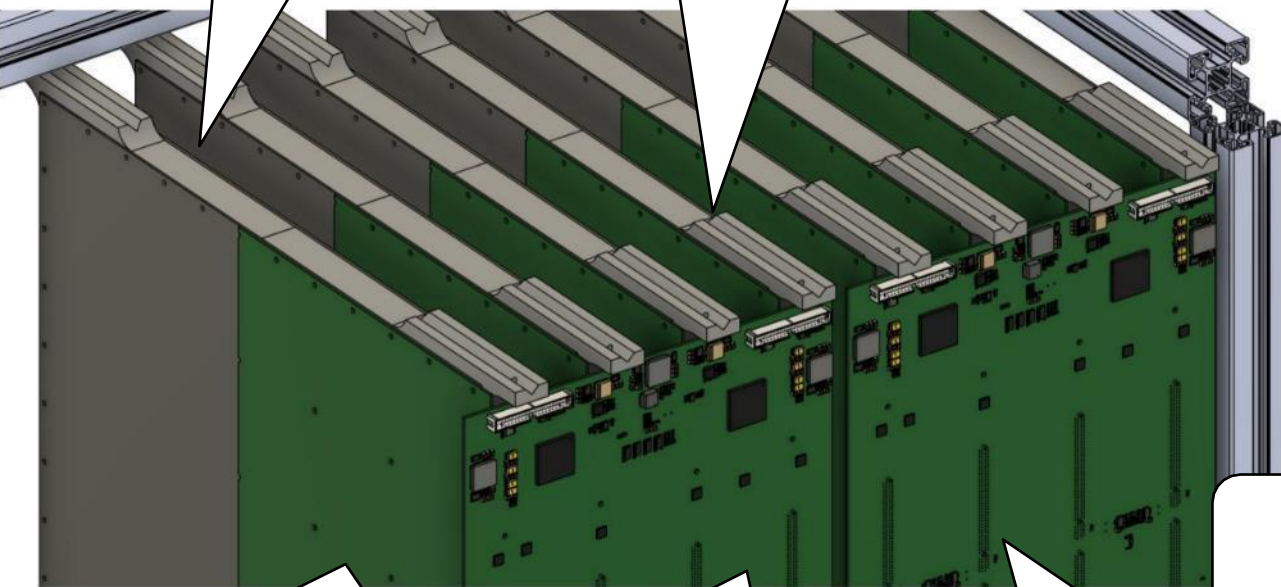
FEE & readout board



- 16 слоев ячеек
- 16 LED плат
- 32 FEE плат
- 8 считывающих плат
- 3 FPGA на плату
- 84 канала на FPGA
- 2000 каналов суммарно

Space for Cu absorber

Mechanical guides



FEE board coupled to scintillation matrix

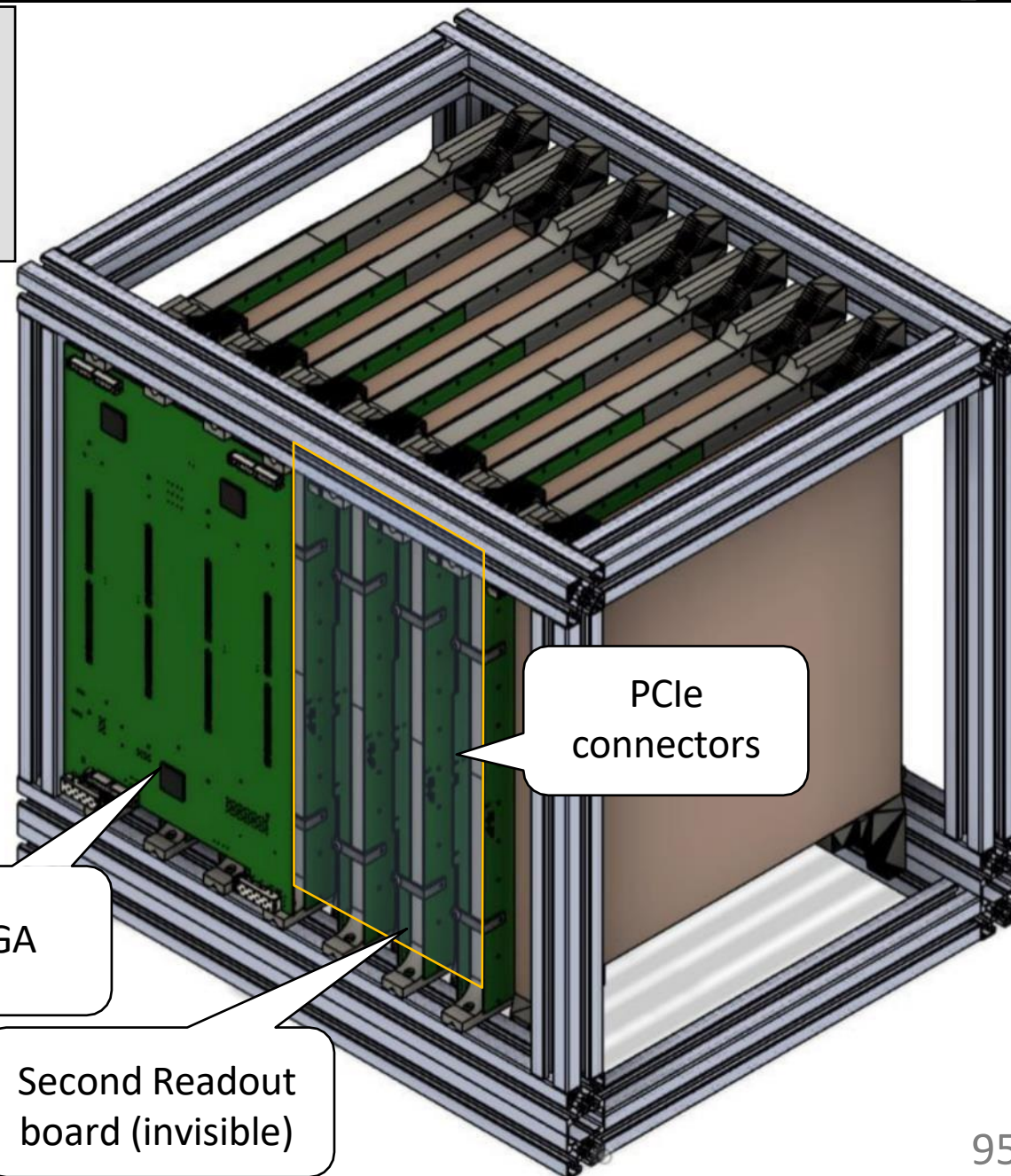
Readout board

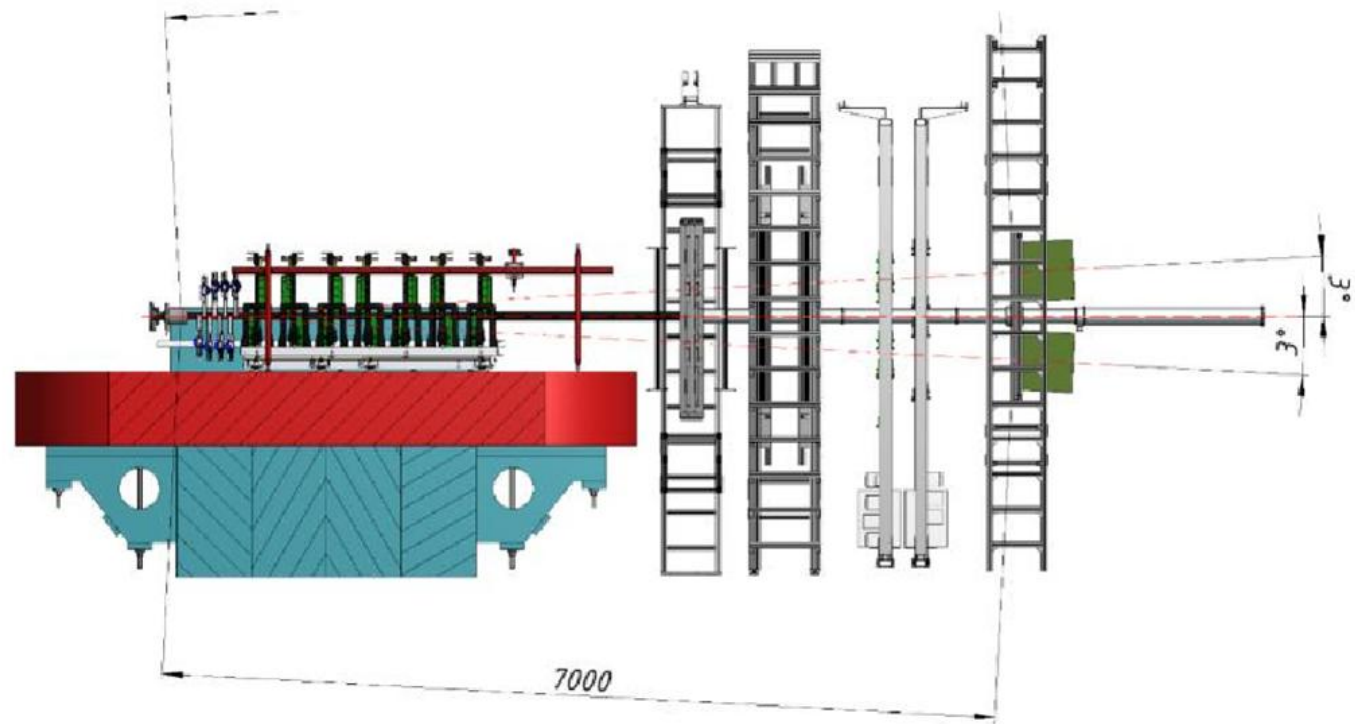
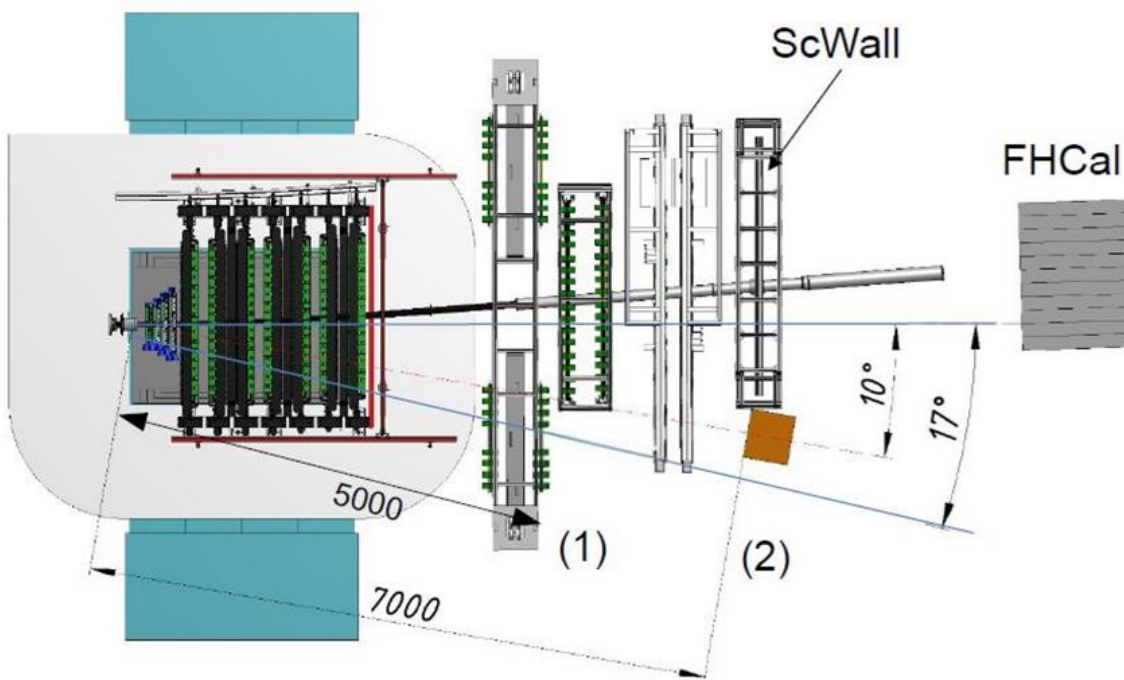
PCIe connectors

FPGA

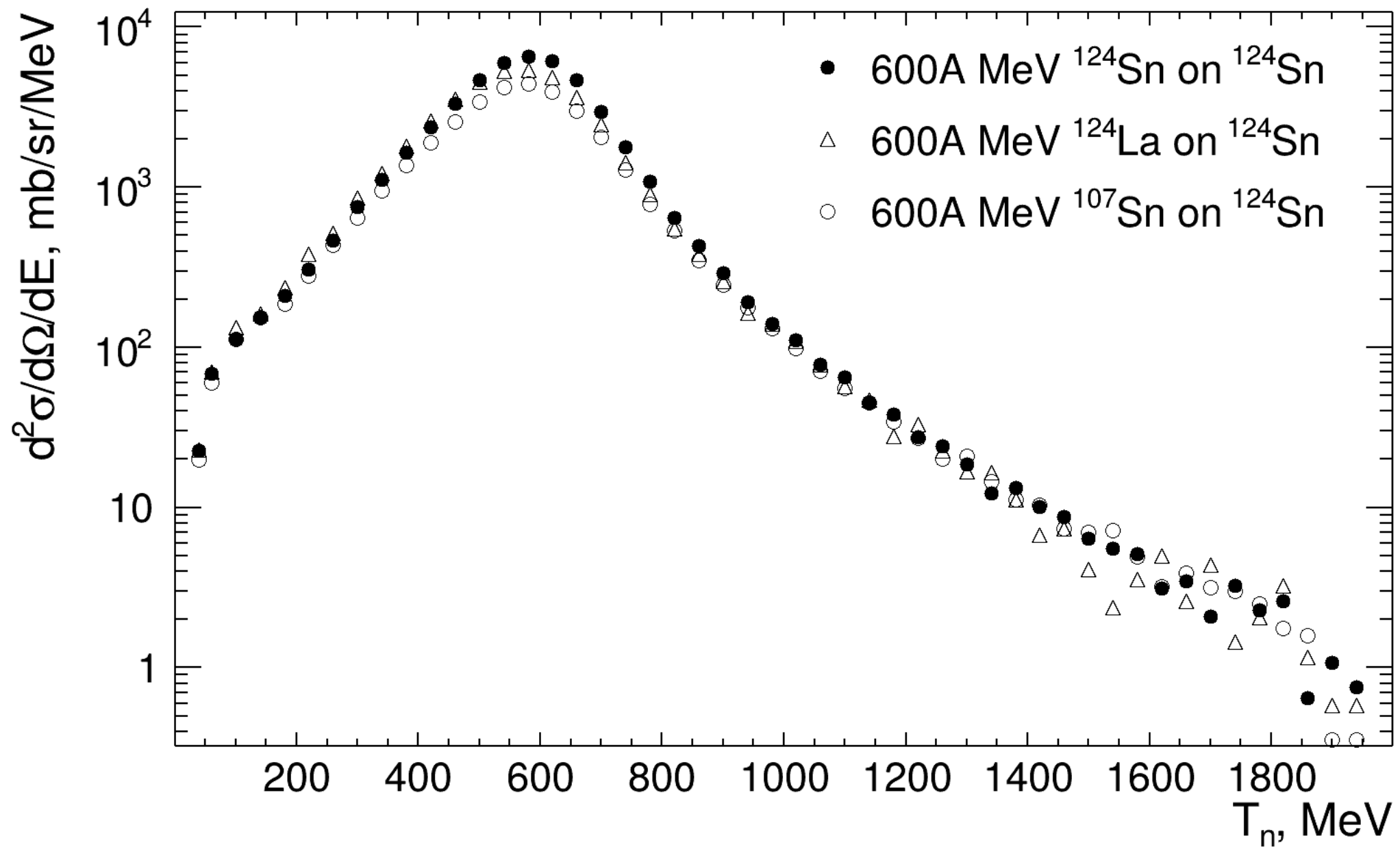
Second Readout board (invisible)

PCIe connectors





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



LAND acceptance

