



Молодежная конференция
«Физика элементарных частиц и космология 2025»

Высокогранулярный нейтронный детектор эксперимента
BM@N на ускорительном комплексе NICA

А. Зубанков от имени группы HGND

04.12.2025



1. Высокогранулярный нейтронный детектор HGND
2. Прототип HGND
3. Измерения выходов нейтронов
4. Восстановление спектра нейтронов

1. Высокогранулярный нейтронный детектор HGND



Nuclotron-based Ion Collider facility



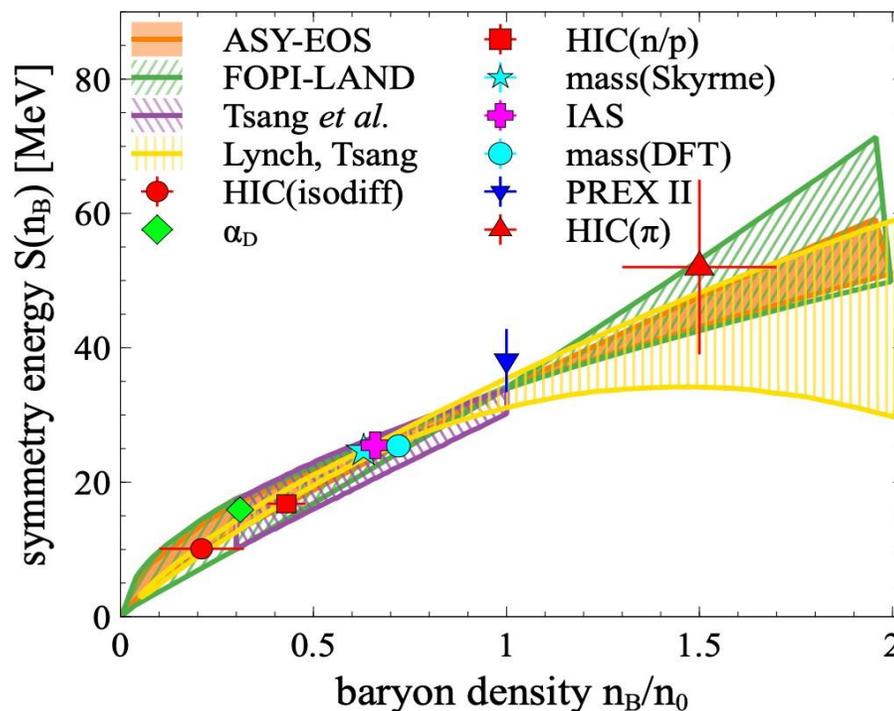
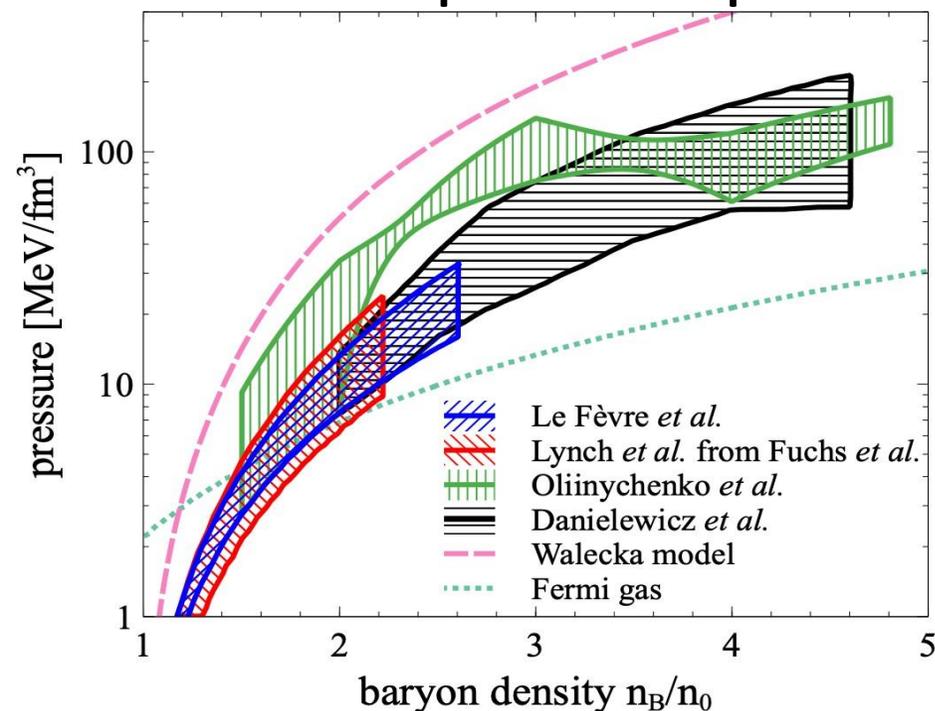
Энергия связи на нуклон: $E_A(\rho, \delta) = E_A(\rho, 0) + E_{sym}(\rho)\delta^2 + O(\delta^4)$

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

↑ Изоспиновая асимметрия

Симметричная материя

Энергия симметрии

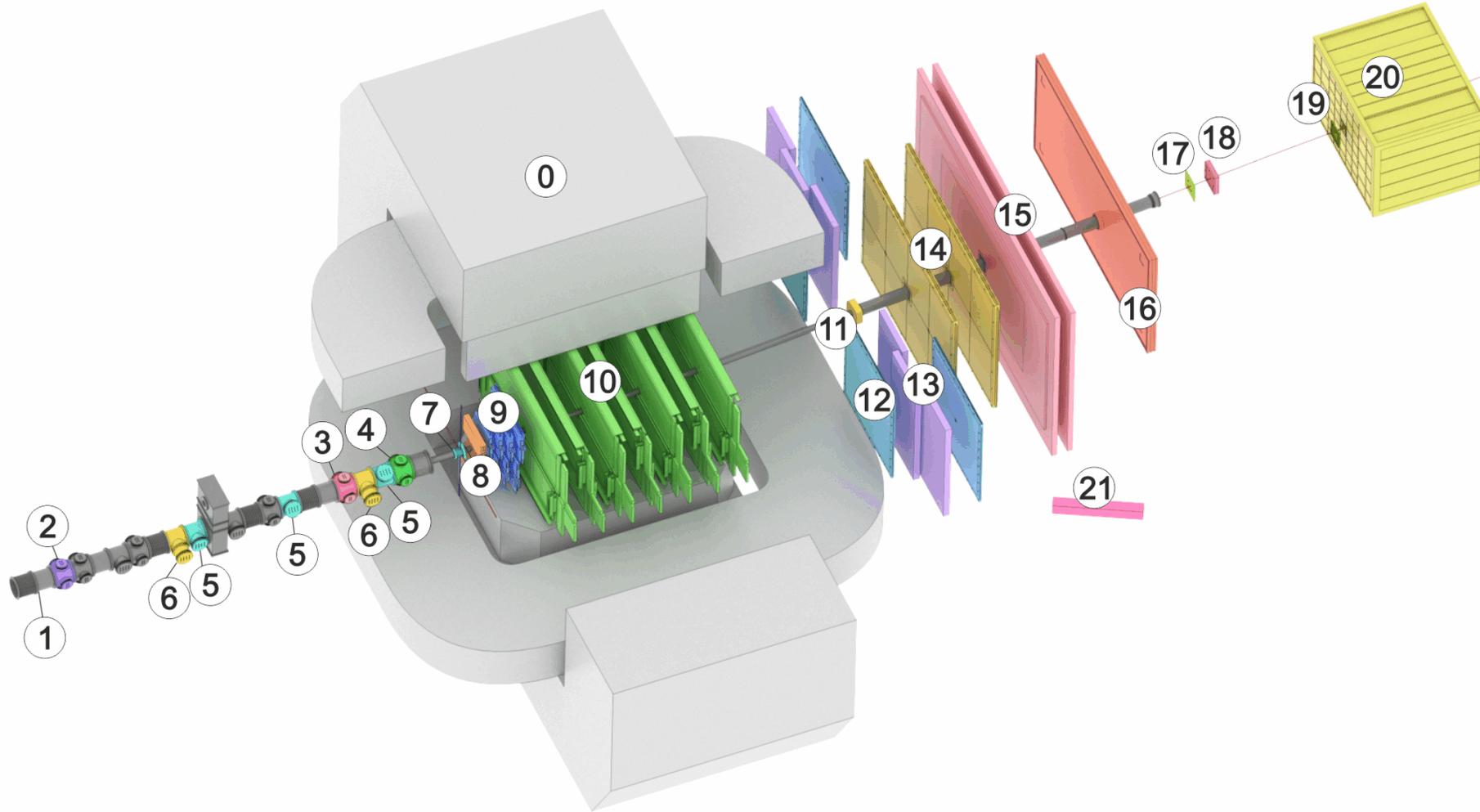


- Изучение EoS необходимо для понимания свойств таких астрофизических объектов как нейтронные звезды.
- Отношение выходов и направленных потоков нейтронов к протонам чувствительно к вкладу энергии симметрии в уравнение состояния ядерной материи.

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

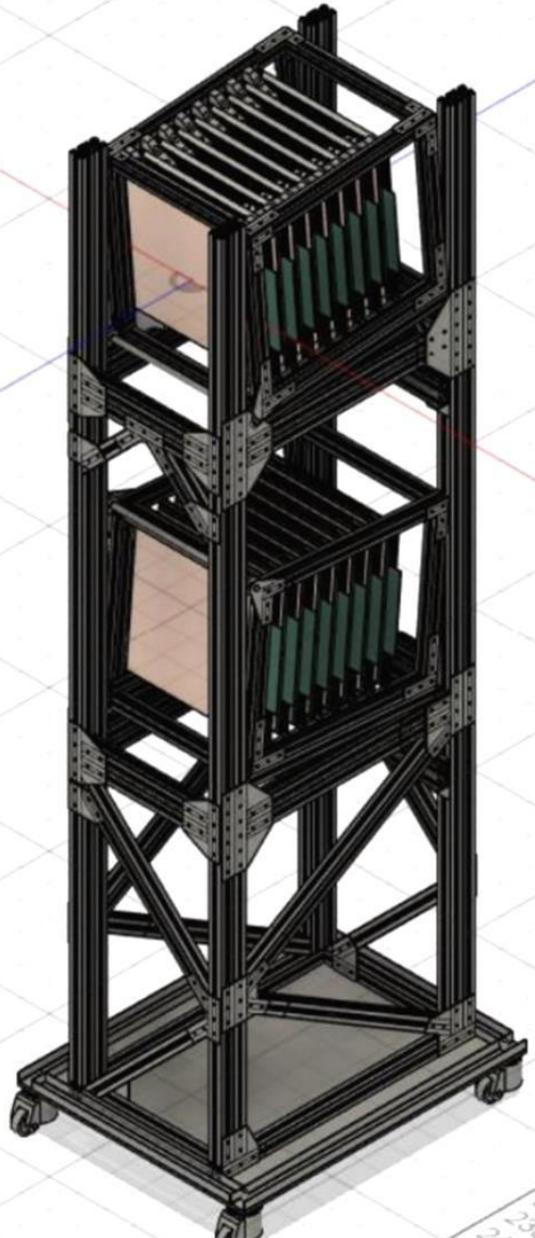
- Мало экспериментальных данных по вкладу энергии симметрии при энергиях выше 800 МэВ.
- Необходима реконструкция потока нейтронов и выходов.

Baryonic Matter at Nuclotron



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

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



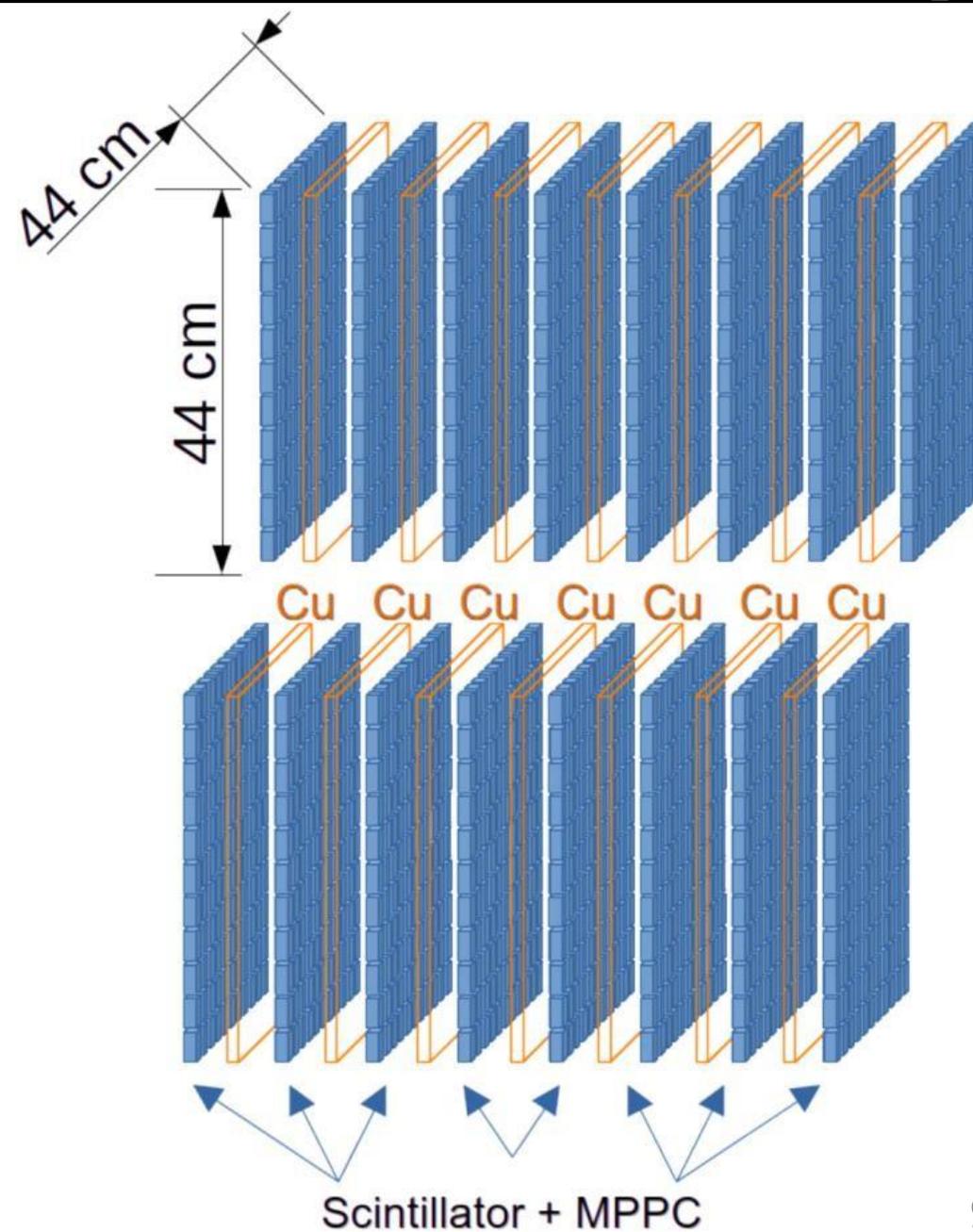
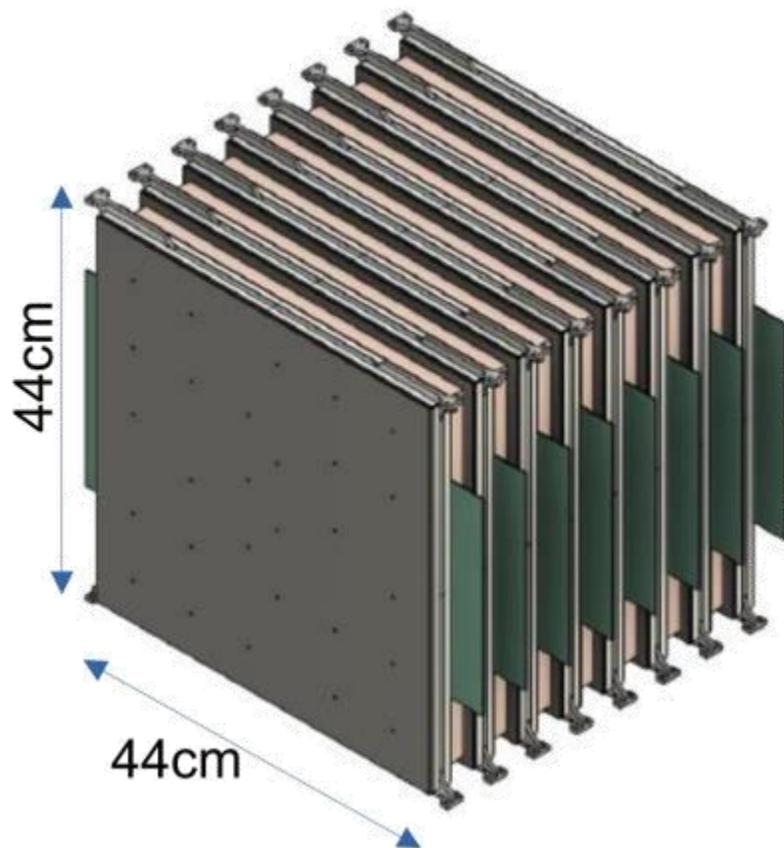
- HGND разрабатывается в ИЯИ РАН для измерения **азимутальных потоков и выходов нейтронов** с энергиями от 300 МэВ до 4 ГэВ в ядро-ядерных взаимодействиях при столкновениях тяжёлых ионов с энергиями до 4А ГэВ в эксперименте с фиксированной мишенью BM@N в ОИЯИ.
- Данные о потоке нейтронов в диапазоне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

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

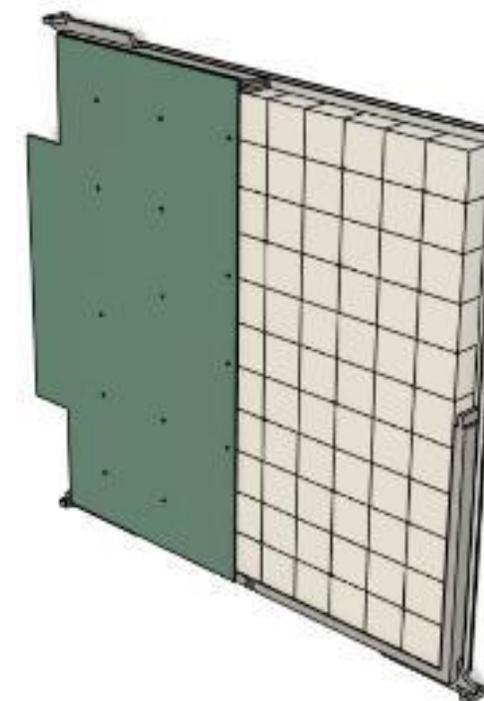
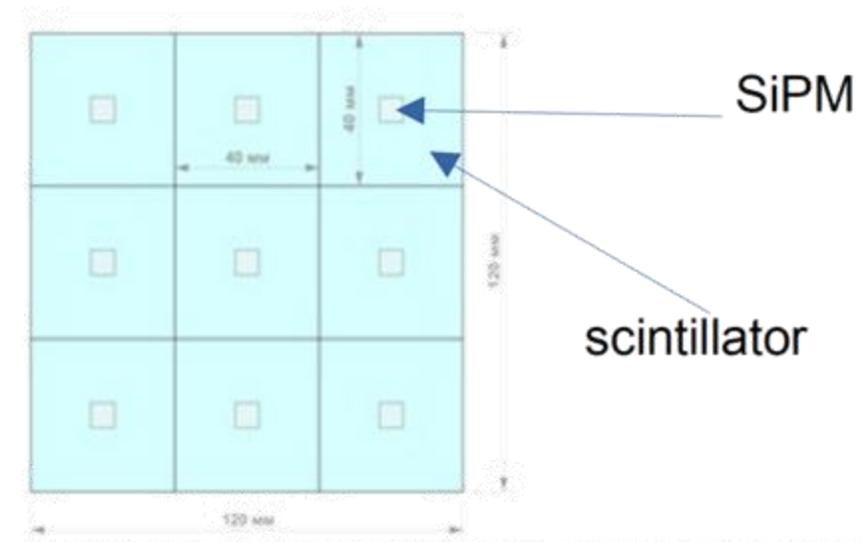


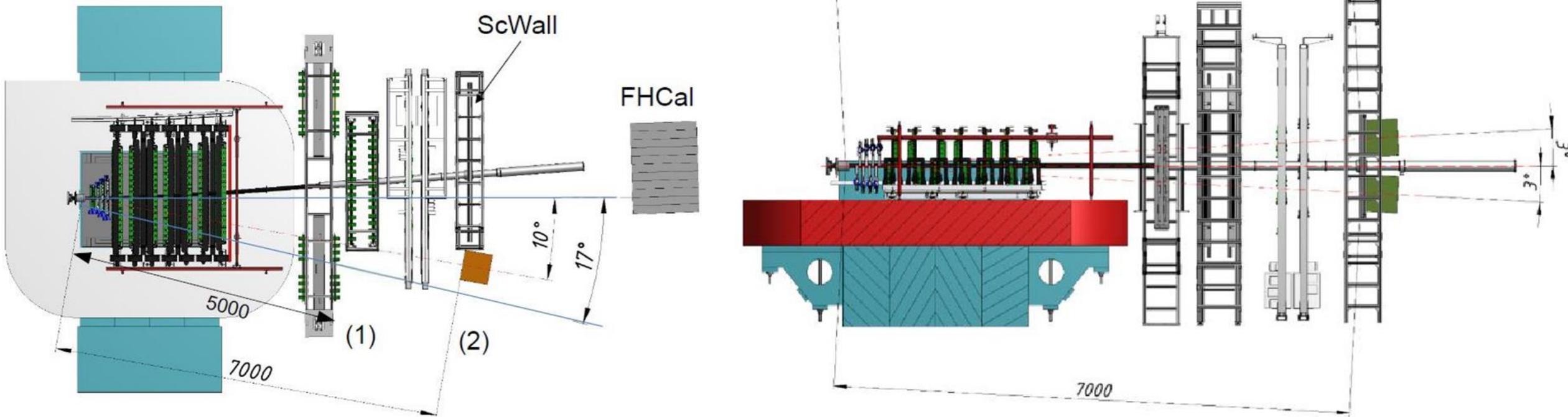
EQR15 11-6060D-S MPPC

- 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

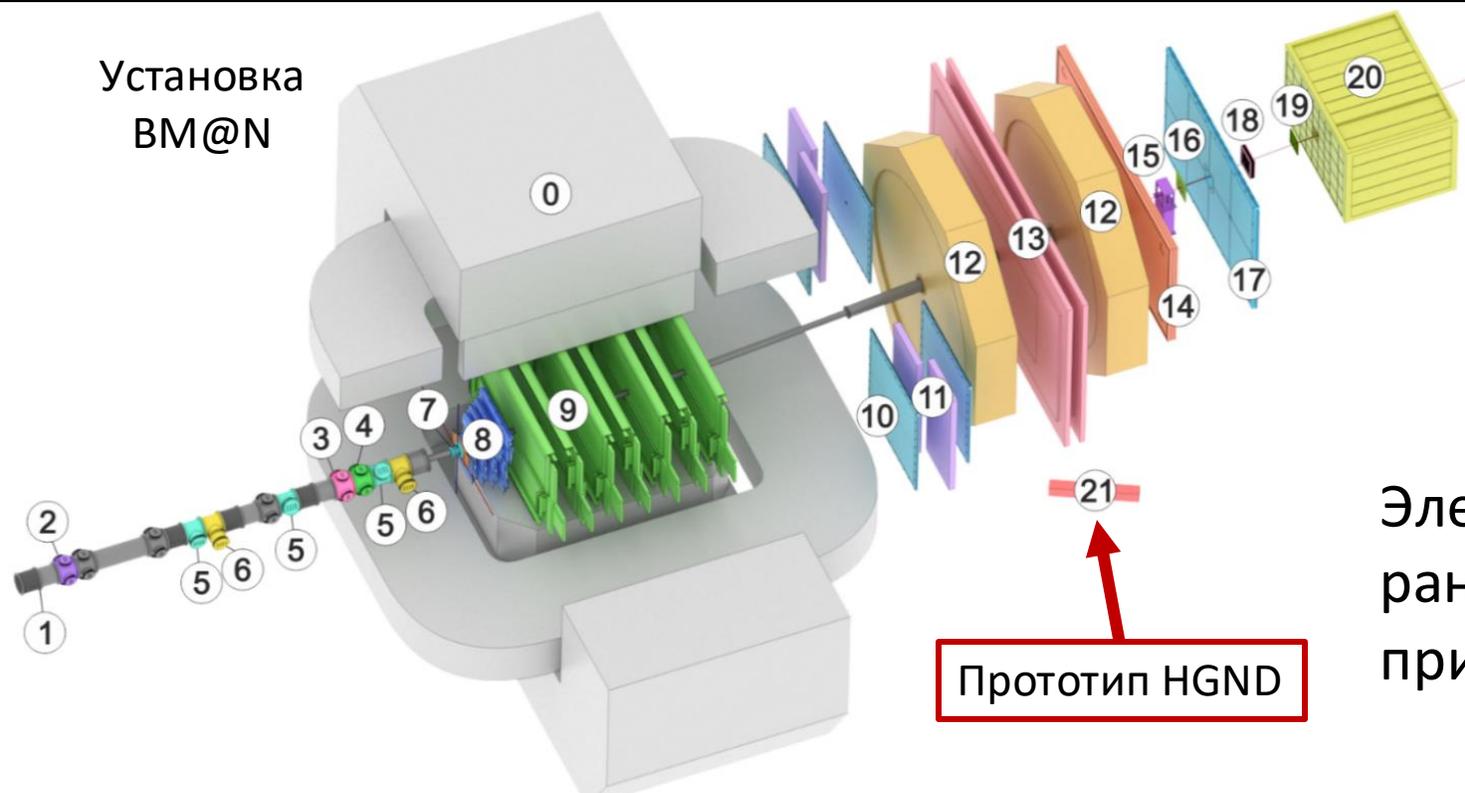




- ТоF метод с T0 в качестве «стартового» времени
- Времяпролетная база ~ 7 м
- Детектор разделён на два «плеча» для увеличения акцептанса

2. 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.

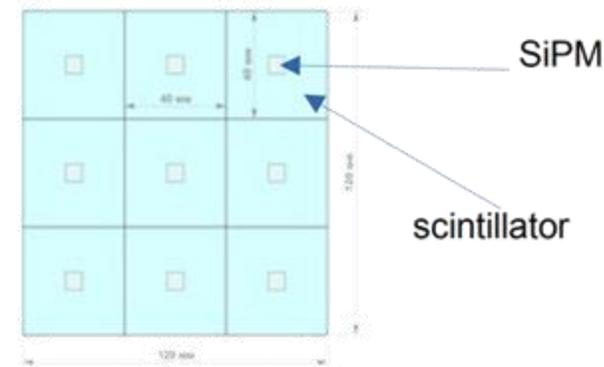
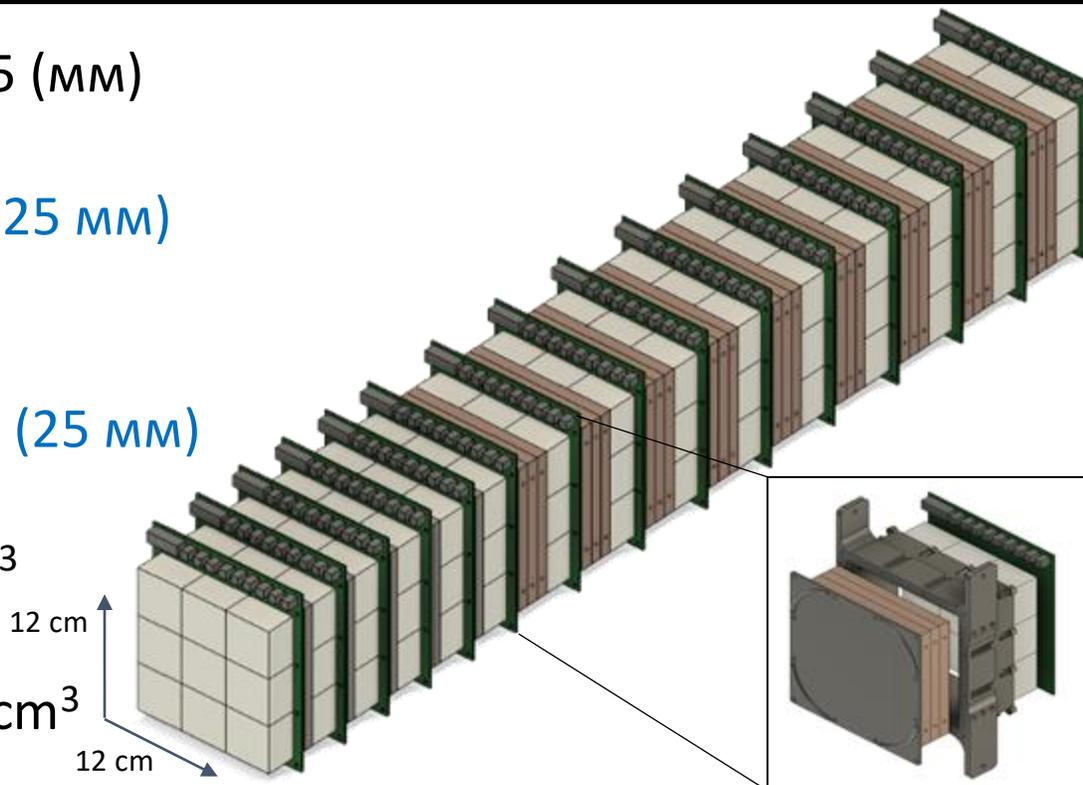
Прототип HGND может быть использован для изучения нейтронов из ультрапериферических столкновений и нейтронов-спектаторов на пучках из Нуклотрона. Измерены **выходы нейтронов** с помощью прототипа HGND с модельно-оцененной эффективностью для центральных и полуцентральных столкновений, а также для ЭМД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

Конструкция прототипа HGND



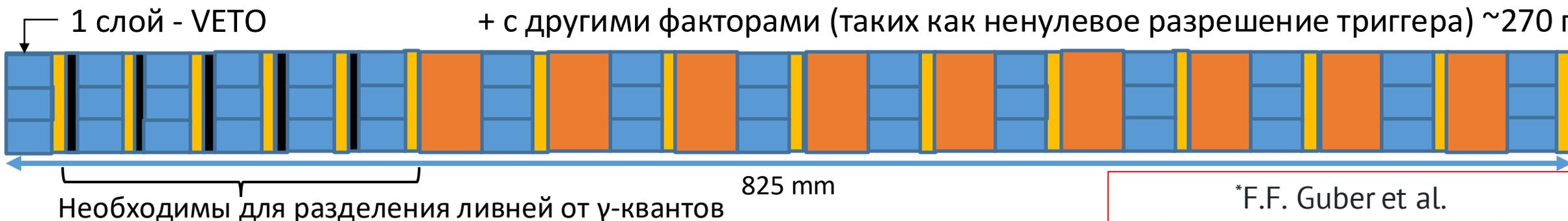
- Сцинт. слой **Veto** 120x120x25 (мм)
- 1 часть:
5 слоев: Pb (8 мм) + Сцинт. (25 мм)
+ PCB + воздух
- 2 часть:
9 слоев: Cu (30 мм) + Сцинт. (25 мм)
+ PCB + воздух

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}



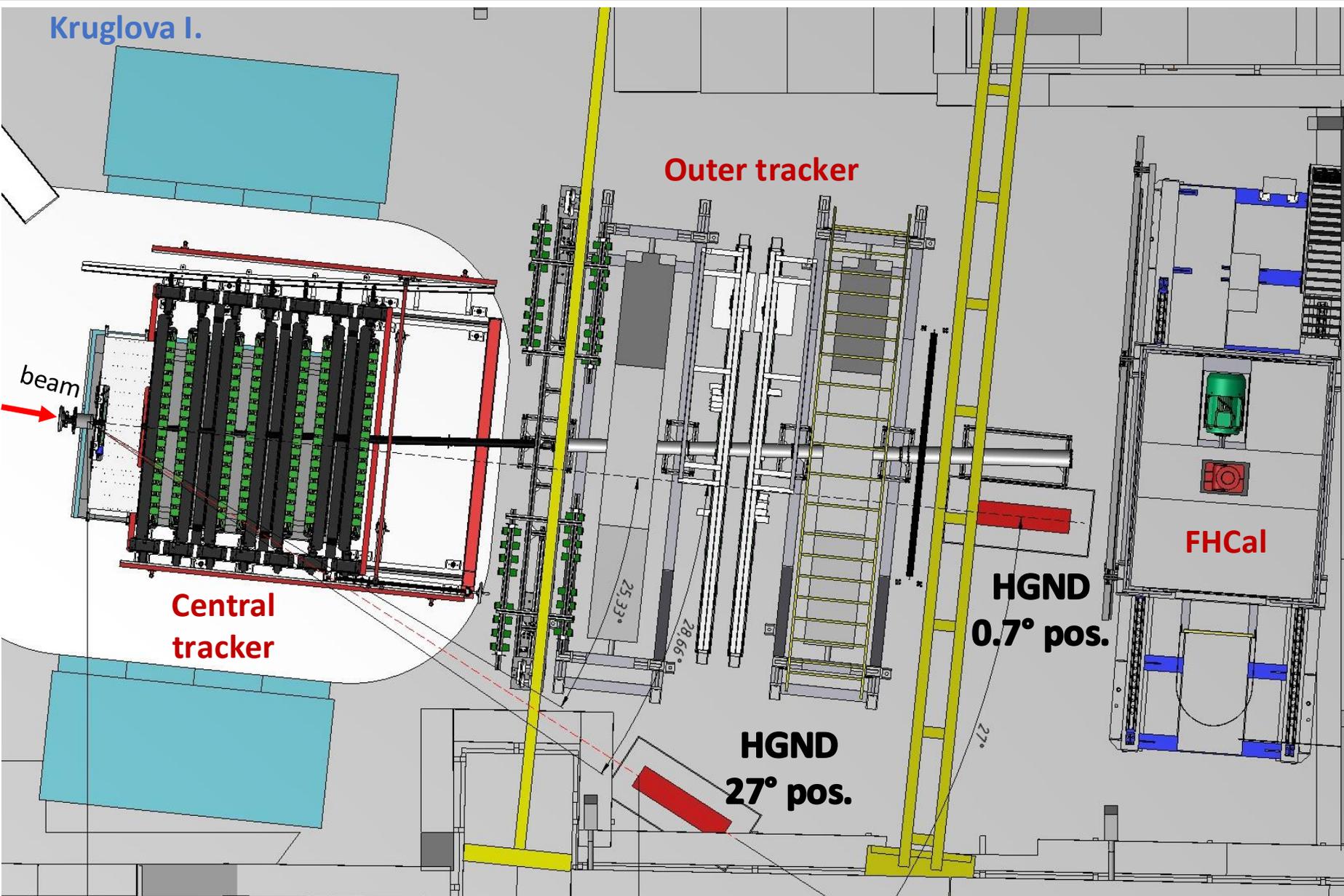
Hamamatsu S13360- 6050PE
Активн. площадь – 6x6 мм²
Число пикселей – 14400
Размер пикселя – 50 μм
Усиление – 1.7x10⁶
PDE – 40%

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

Прототип HGND в сеансе Xe+CsI@3.8A GeV на BM@N



Положение 0.7°:

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

Положение 27°:

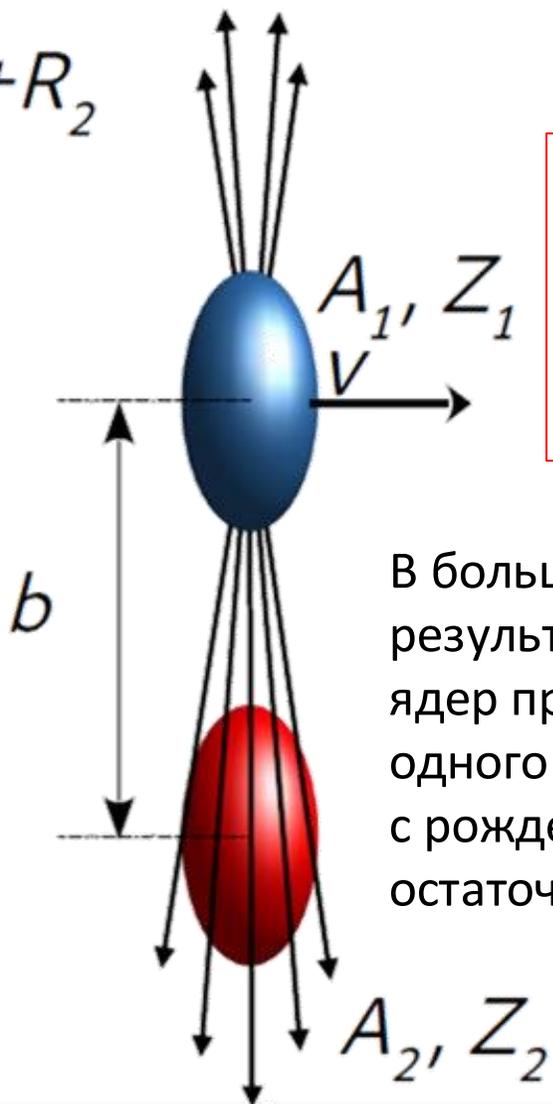
Измерения спектров нейтронов в области ~ midrapidity.



3. Измерения выходов нейтронов

ЭМД:

$$b > R_1 + R_2$$



Используем модели:

RELDIS

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

DCM-QGSM-SMM

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

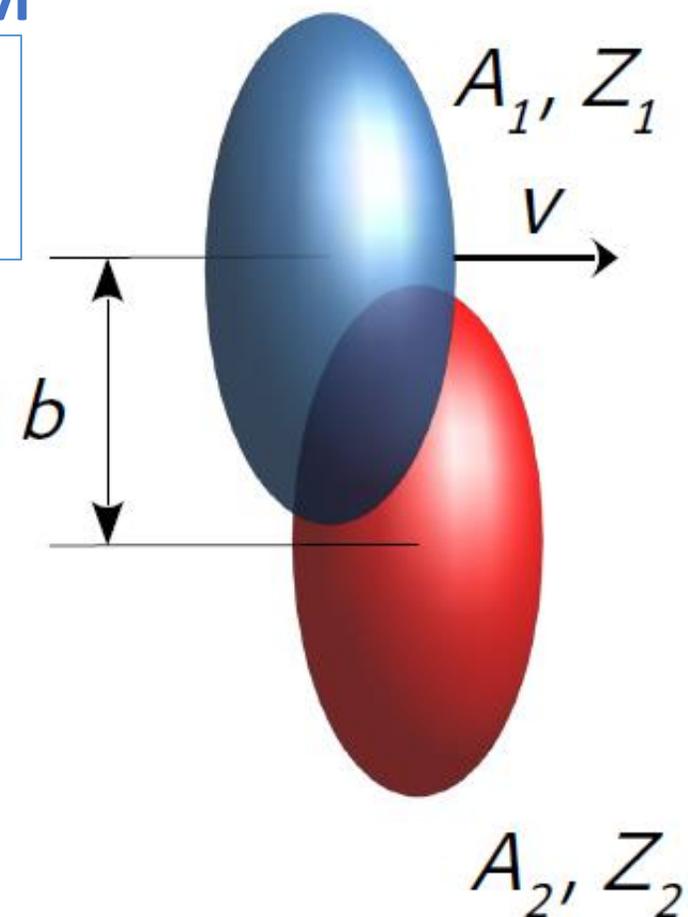
UrQMD-AMC

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.

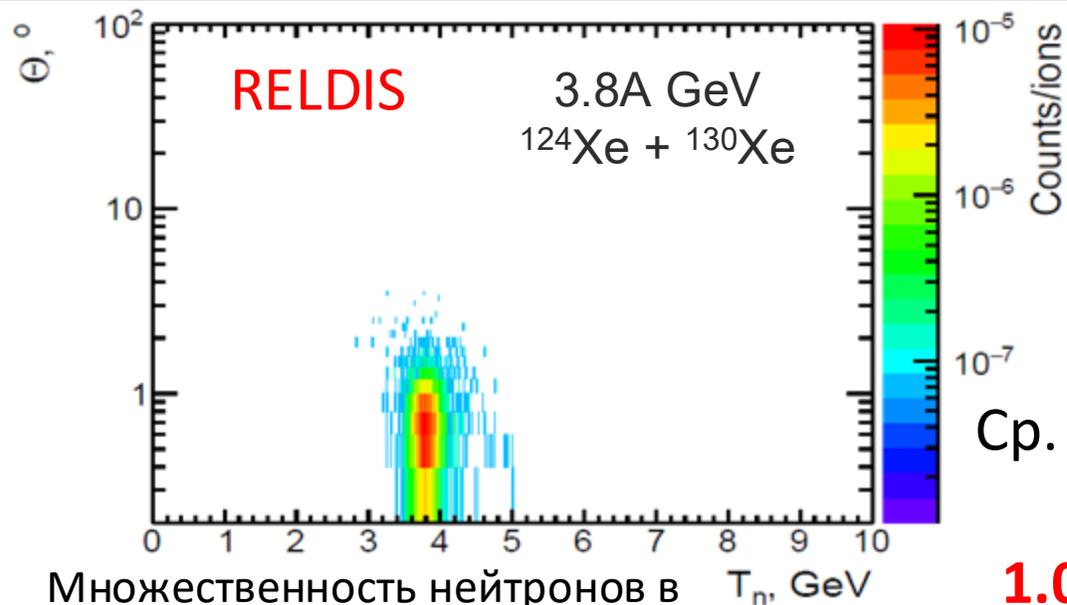
В большинстве случаев, в
результате ЭМД тяжелых
ядер происходит эмиссия
одного или двух нейтронов
с рождением одного
остаточного ядра

Адронные взаимодействия:

$$b < R_1 + R_2$$



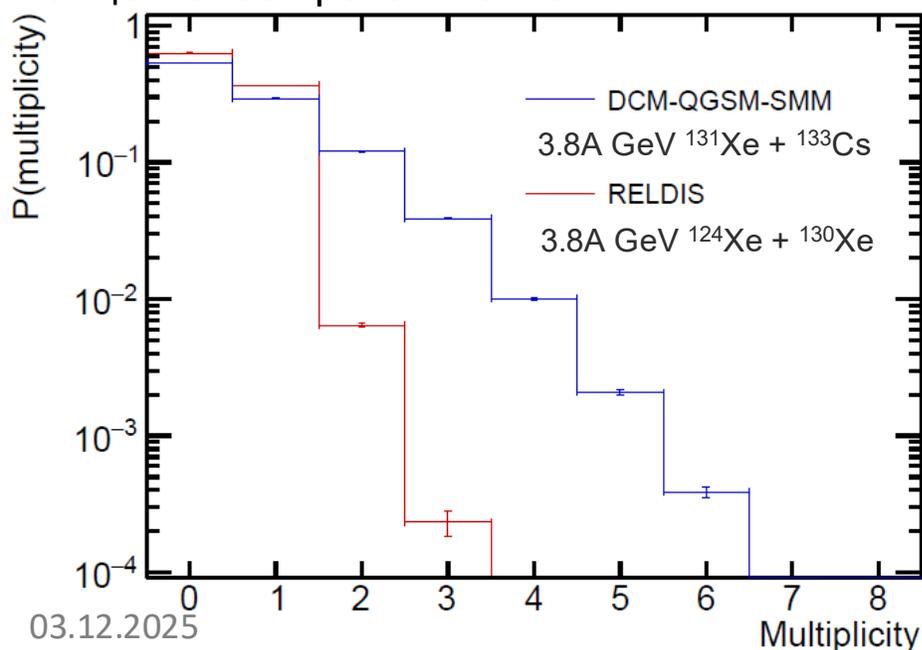
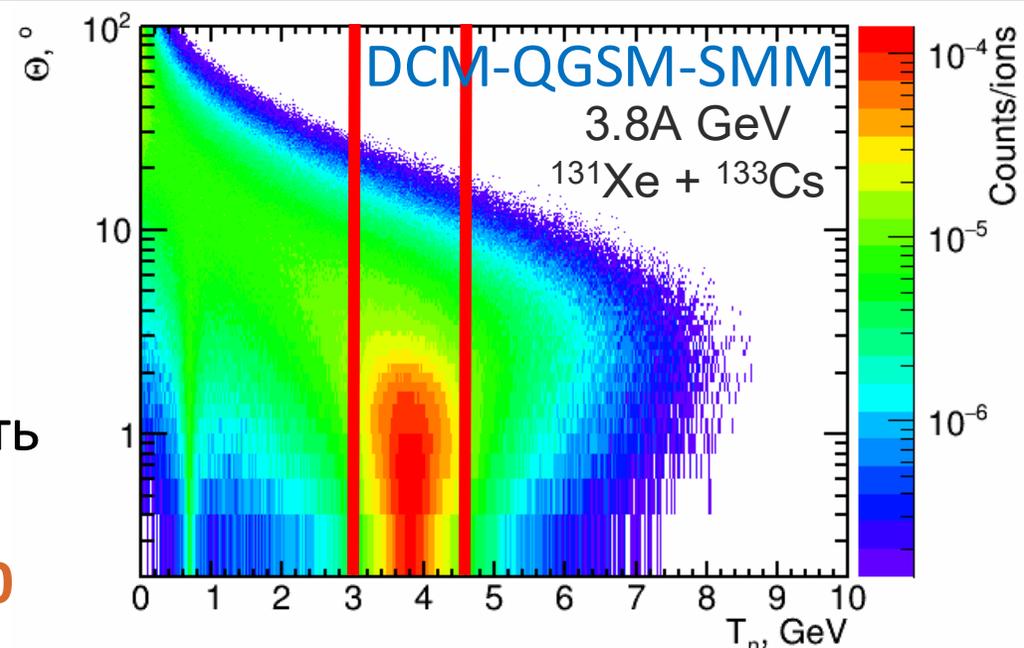
Взаимодействия ядер



Множественность нейтронов в акцептансе прототипа HGND

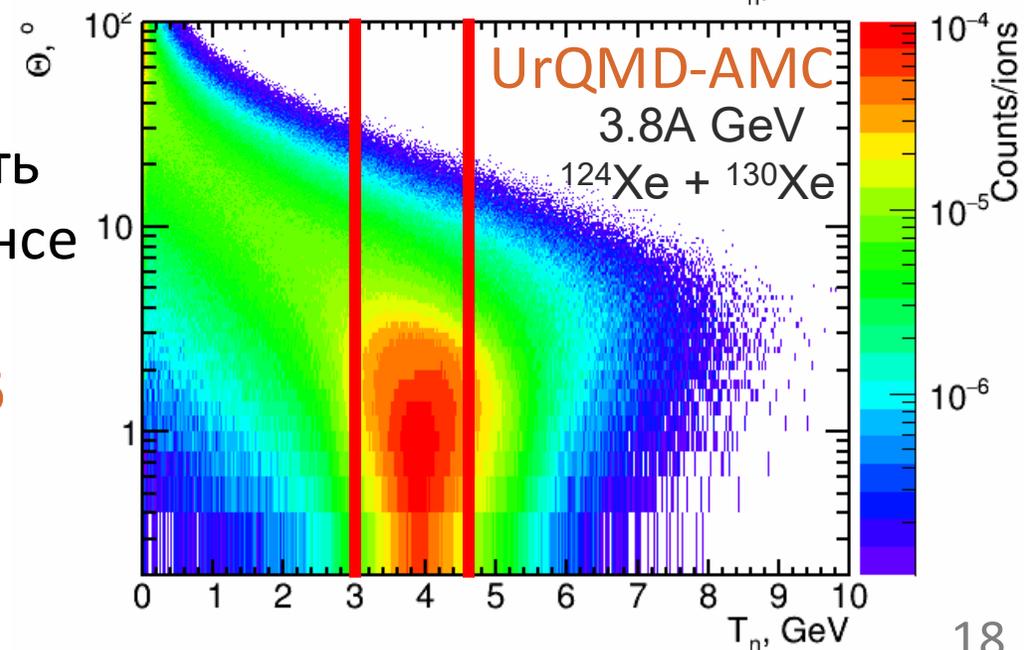
Ср. множественность нейтронов:

1.05 **16.01** **17.70**

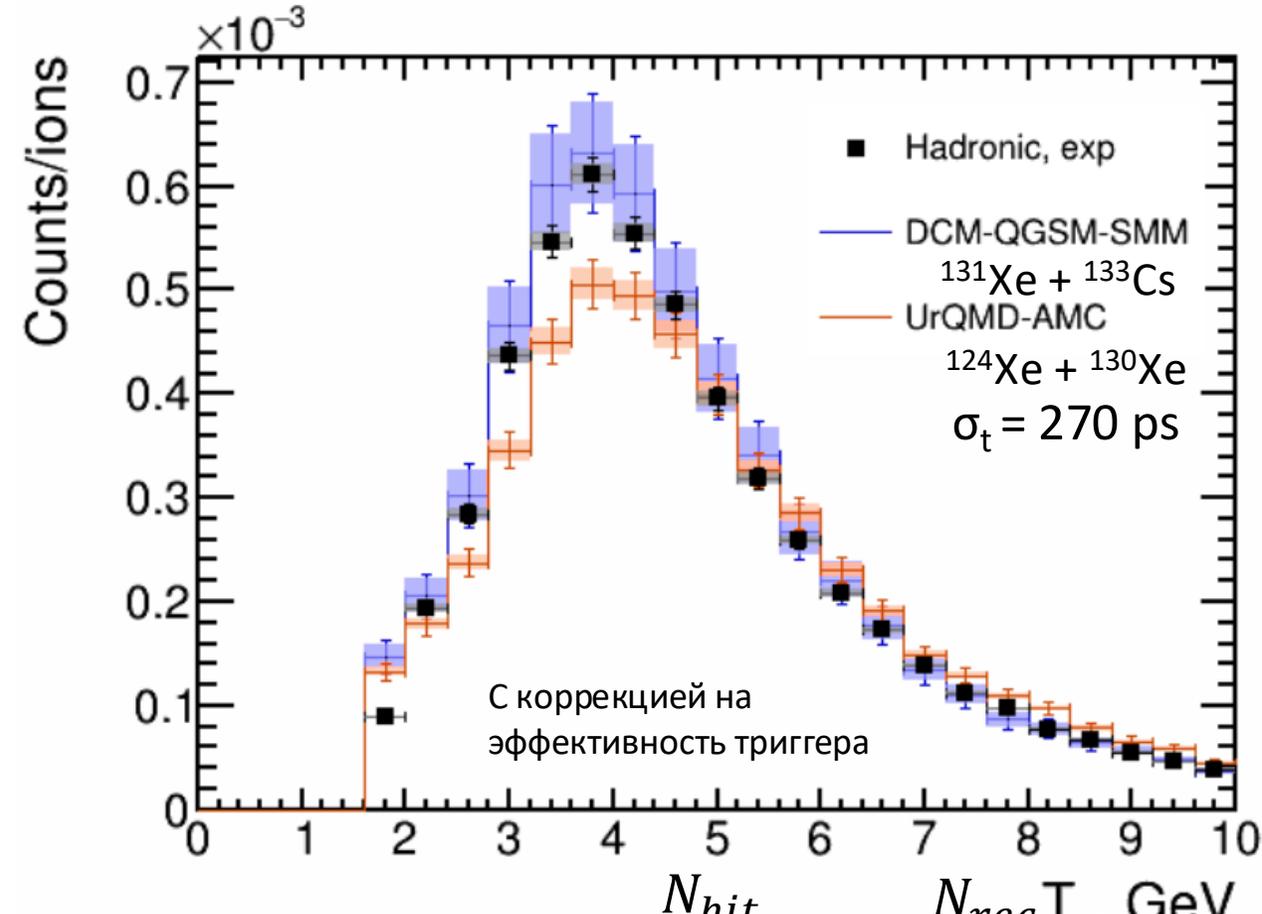
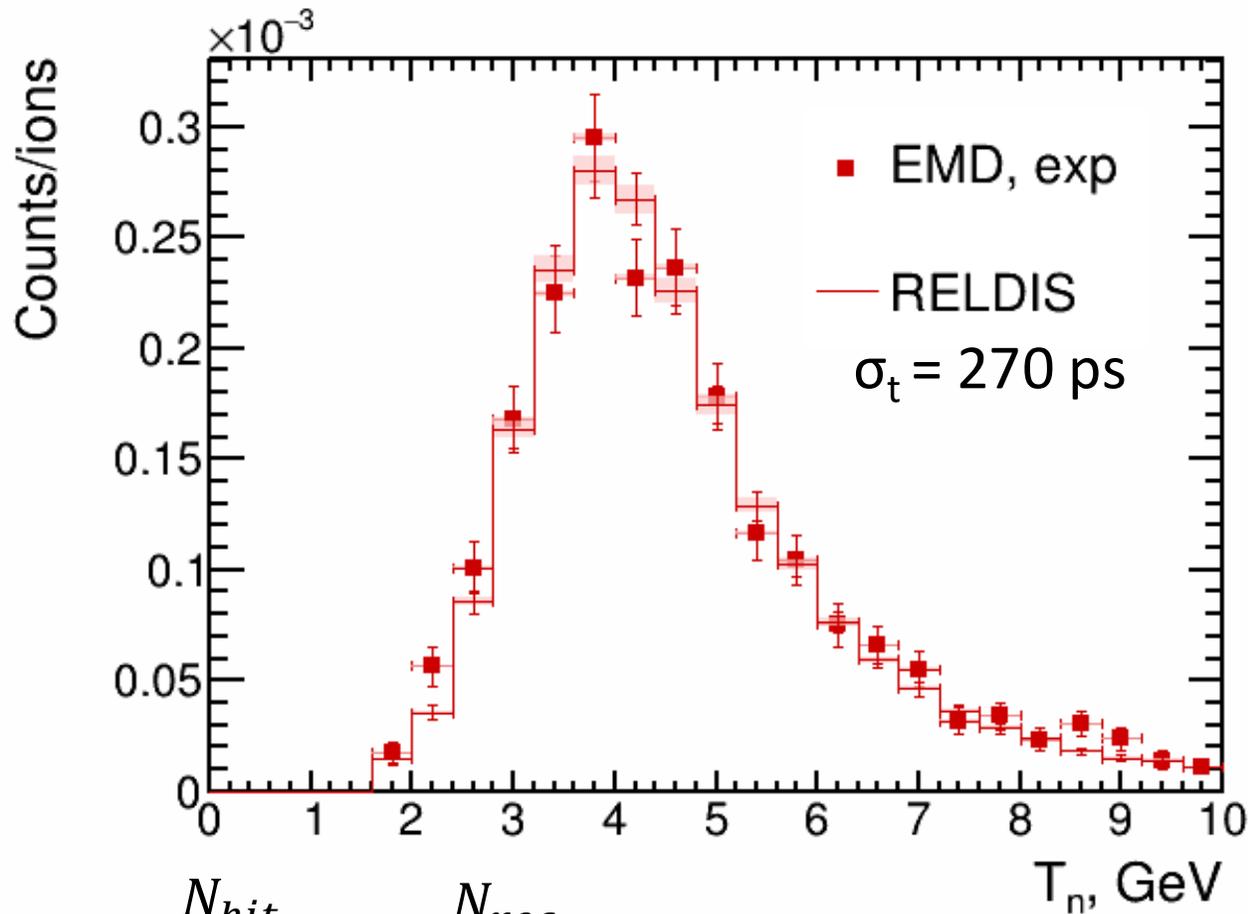


Ср. множественность нейтронов в акцептансе прототипа HGND:

1.02 **1.51** **1.36**



Сравнение измерений и моделирования



Реконструированные спектры из моделирования хорошо согласуются с данными.

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

$$\Omega_n = \frac{N_{hit}}{N_{gen}} \quad \varepsilon_n = \frac{N_{rec}}{N_{hit}} T_n, \text{ GeV}$$

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

A. Zubankov *et al.* Performance study of the Highly Granular Neutron Detector prototype in the BM@N experiment. *NUCL SCI TECH* **36**, 226 (2025). <https://doi.org/10.1007/s41365-025-01817-x>

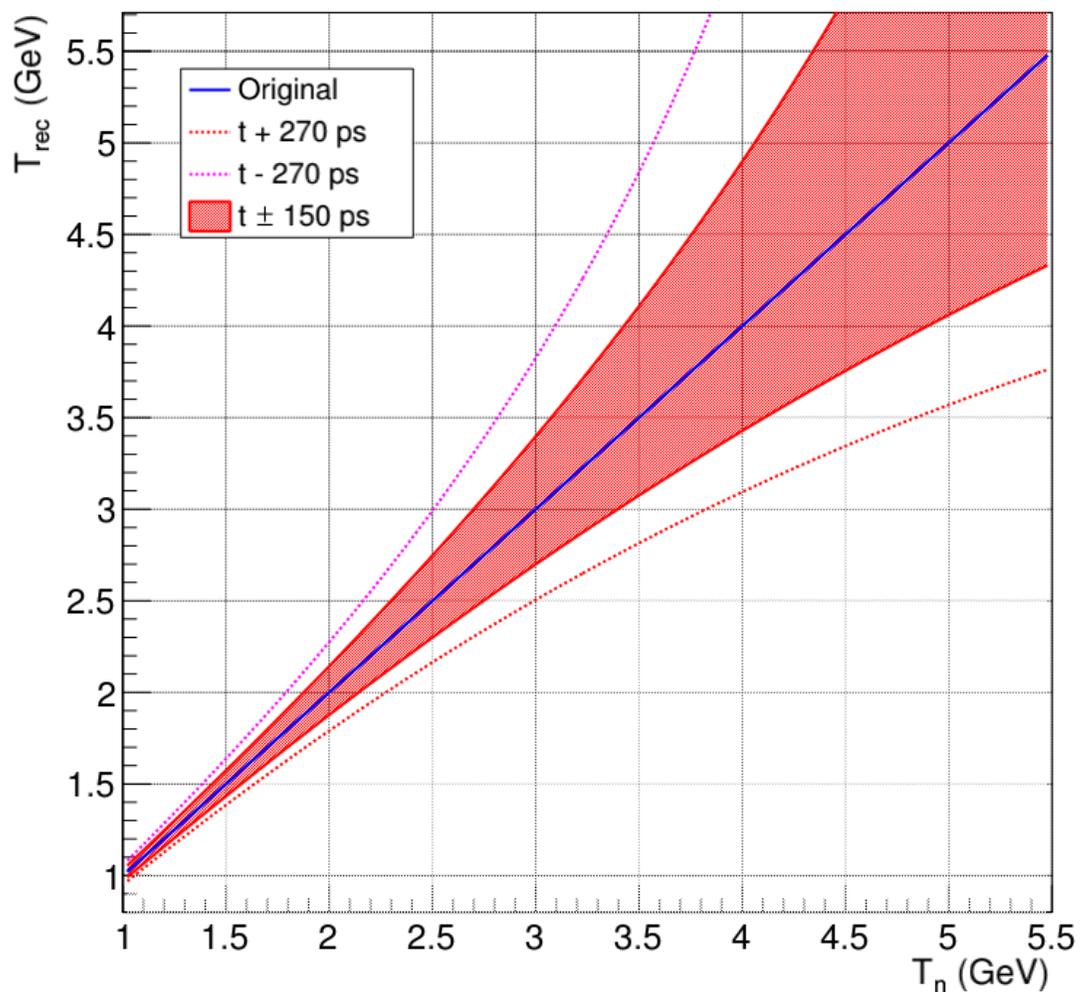
$\Omega_n, \%$	$\varepsilon_n, \%$	$\Omega_n \times \varepsilon_n, \%$
3.87 ± 0.02	37.33 ± 0.17	1.45 ± 0.01
2.63 ± 0.01	45.09 ± 0.25	1.19 ± 0.01

4. Восстановление спектра нейтронов

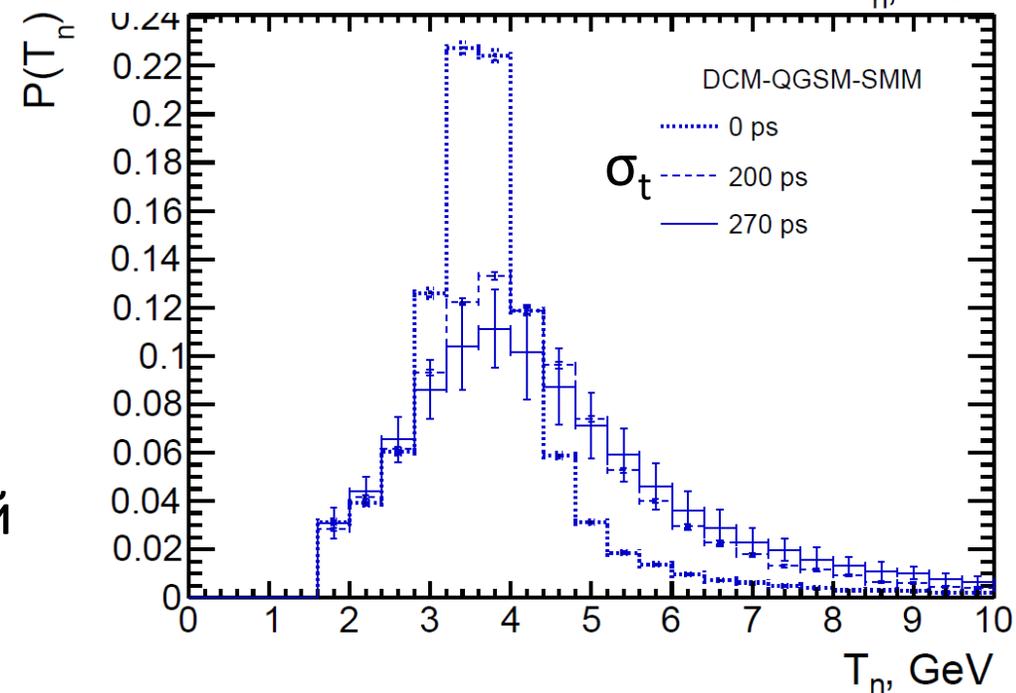
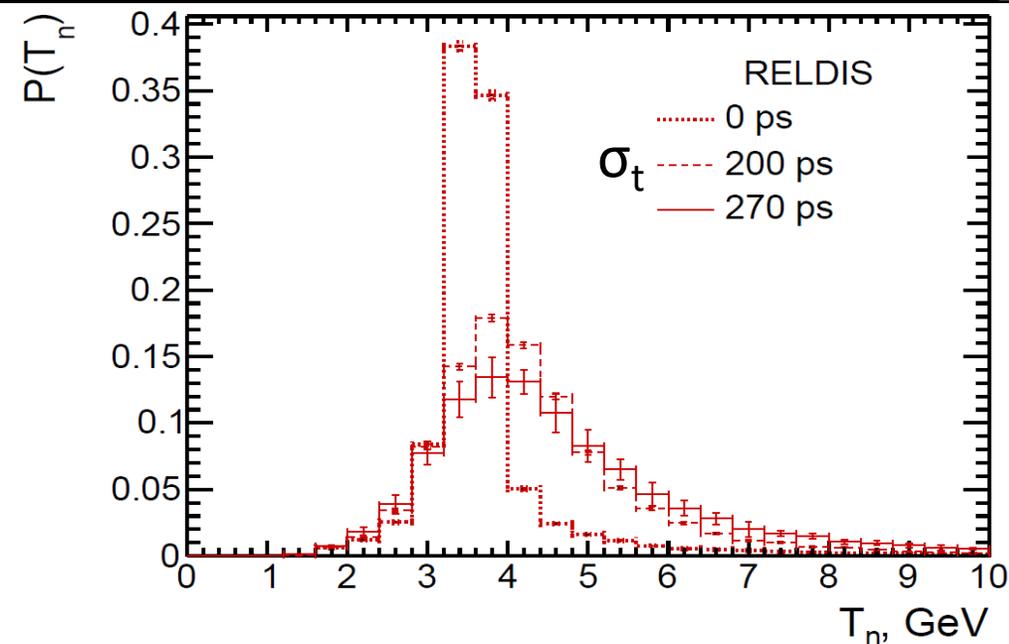
Влияние временного разрешения на спектр нейтронов



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



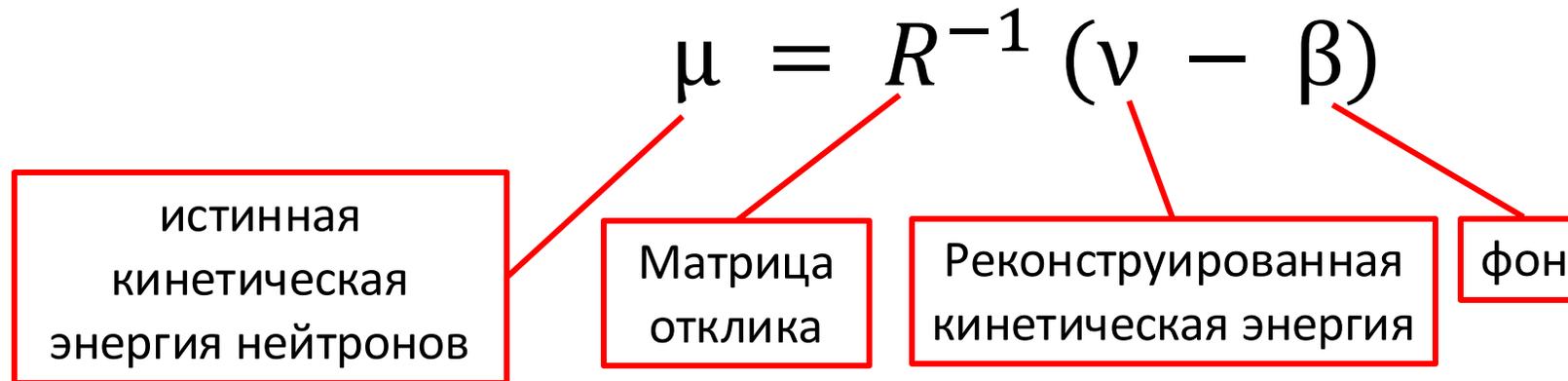
Спектры размазываются в сторону высоких энергий из-за временного разрешения ~ 270 ps.



Разворачивание (unfolding) спектра помогает устранить вклад временного разрешения в форму спектра.

Мы используем фреймворк RooUnfold для восстановления спектра внутри среды ROOT.

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

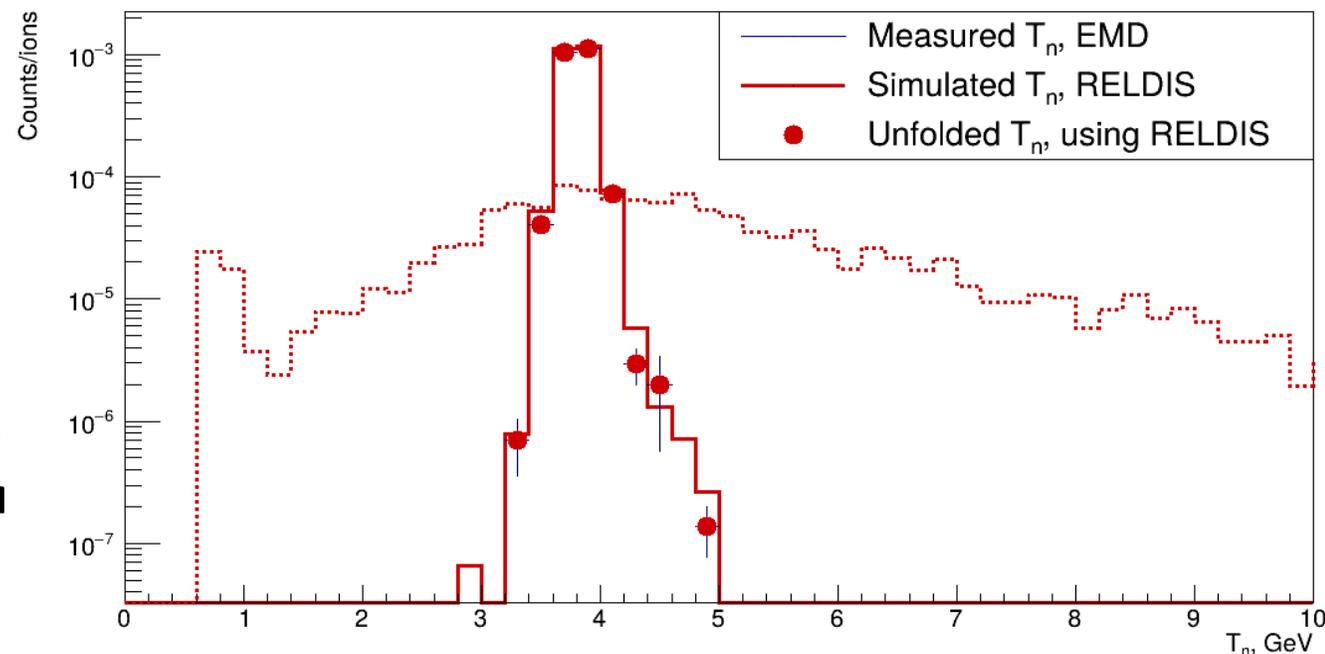
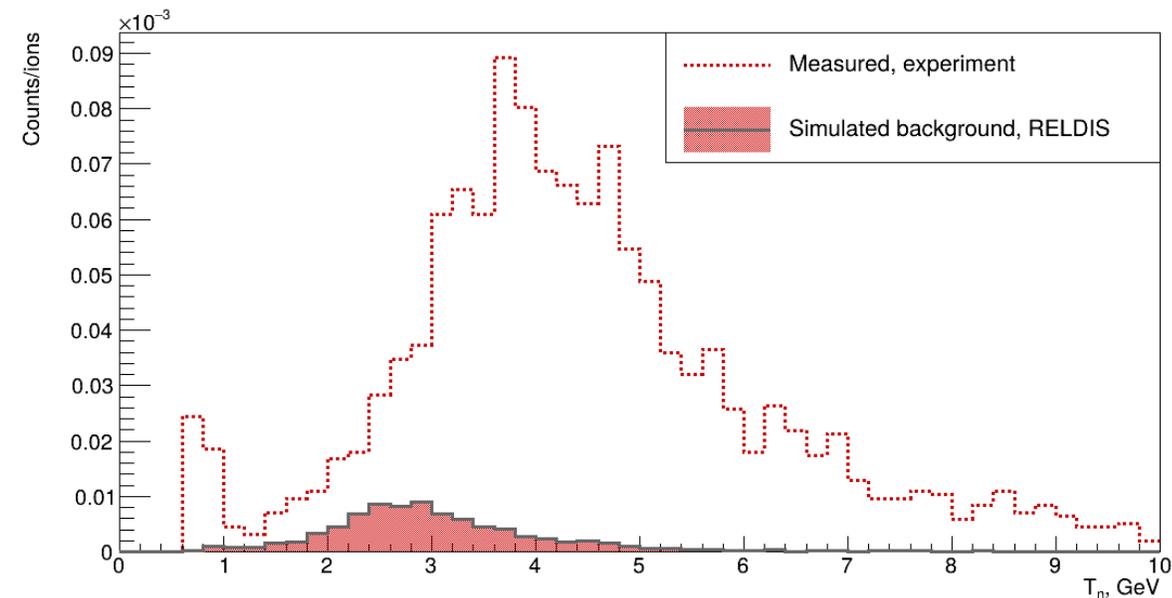
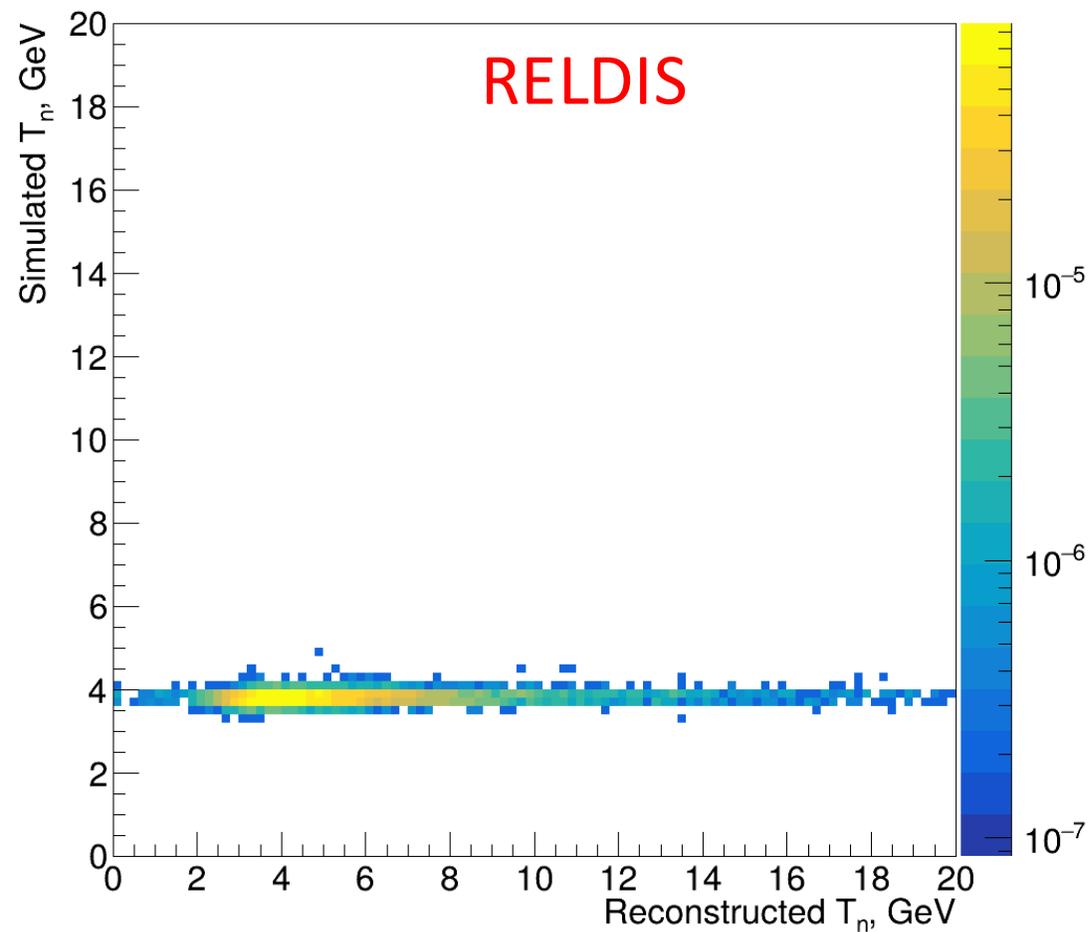


Матрицу отклика R получаем моделированием отклика прототипа HGND на нейтроны.

Используется итеративный байесовский метод, введённый в физику частиц Д'Агостини на основе элементов байесовской статистики.

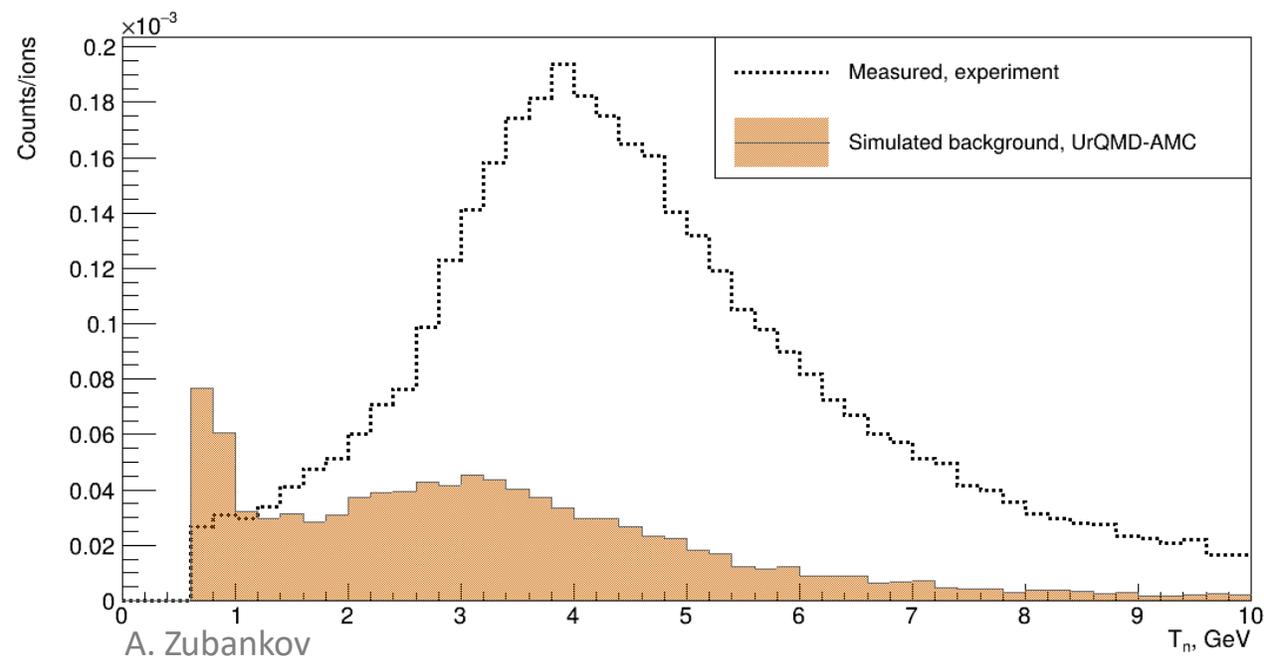
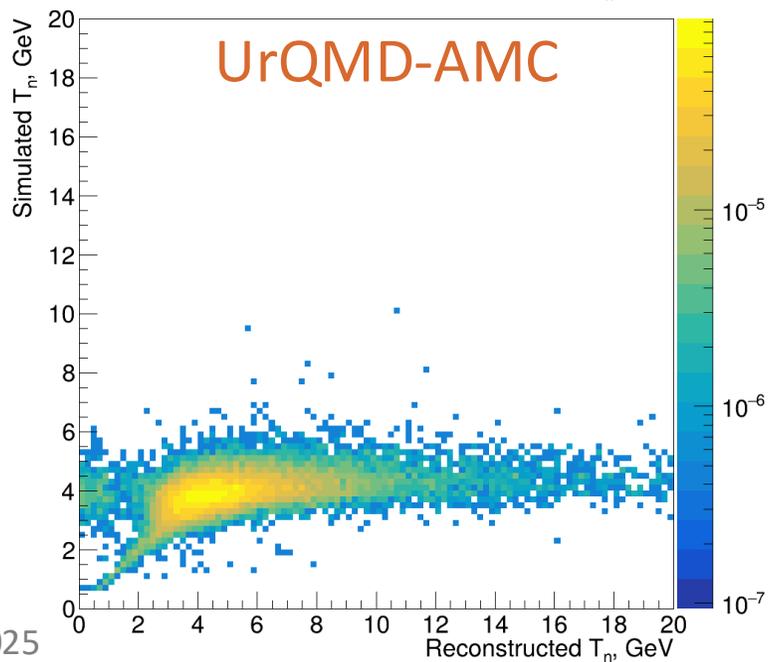
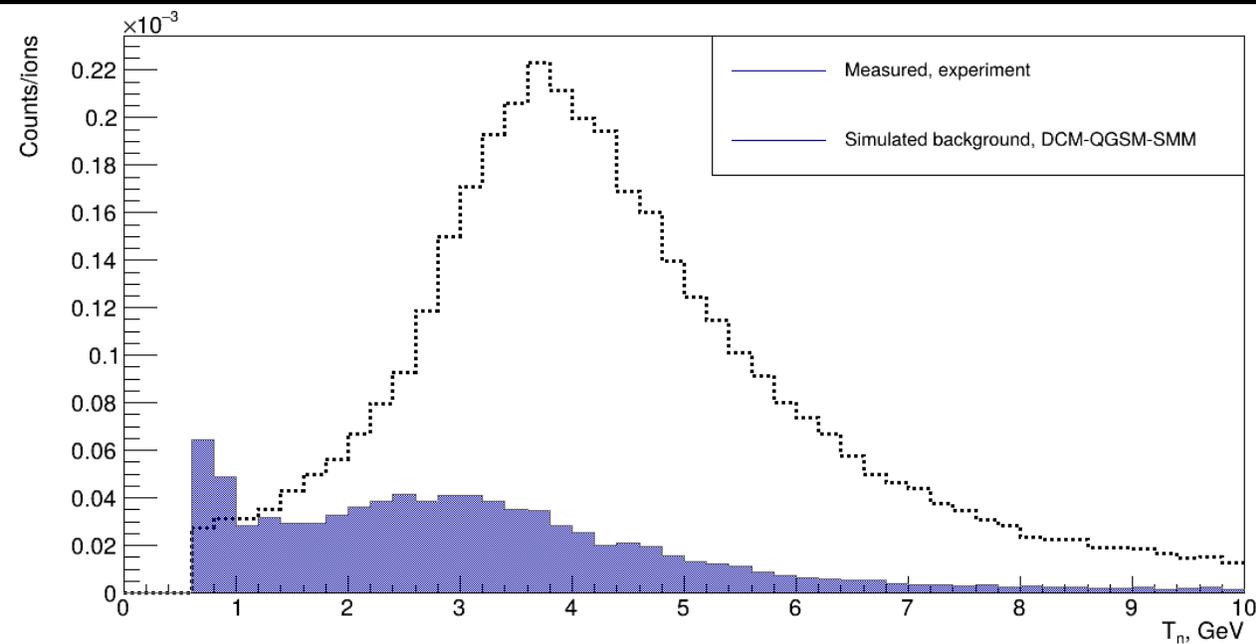
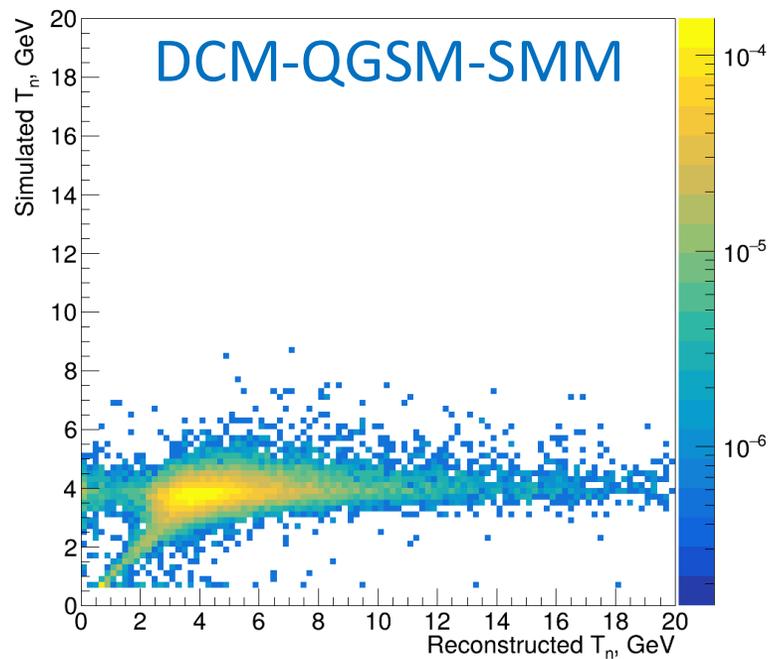
В других областях этот подход известен как деконволюция Ричардсона-Люси.

Разворачивание с помощью отклика из RELDIS

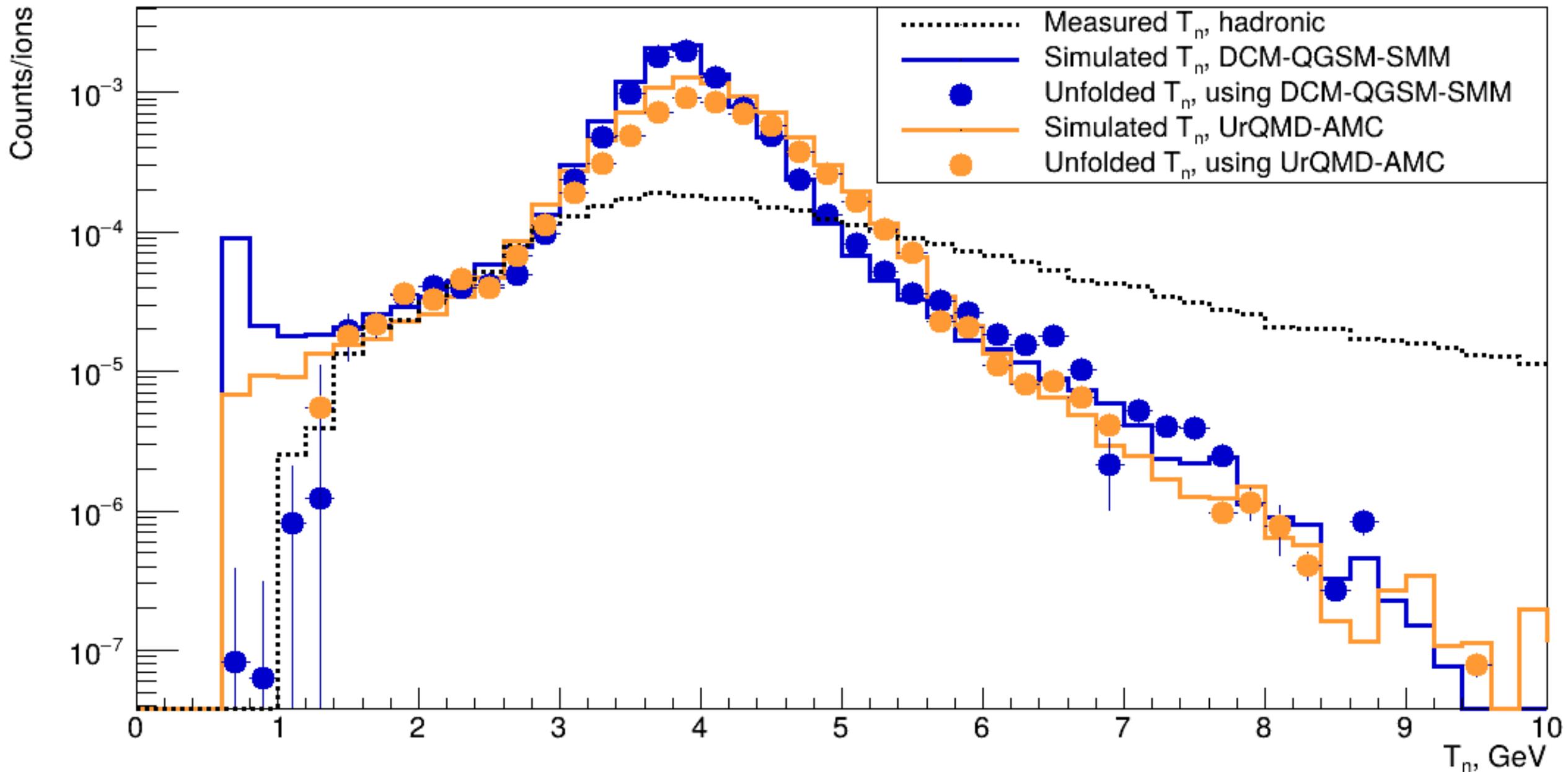


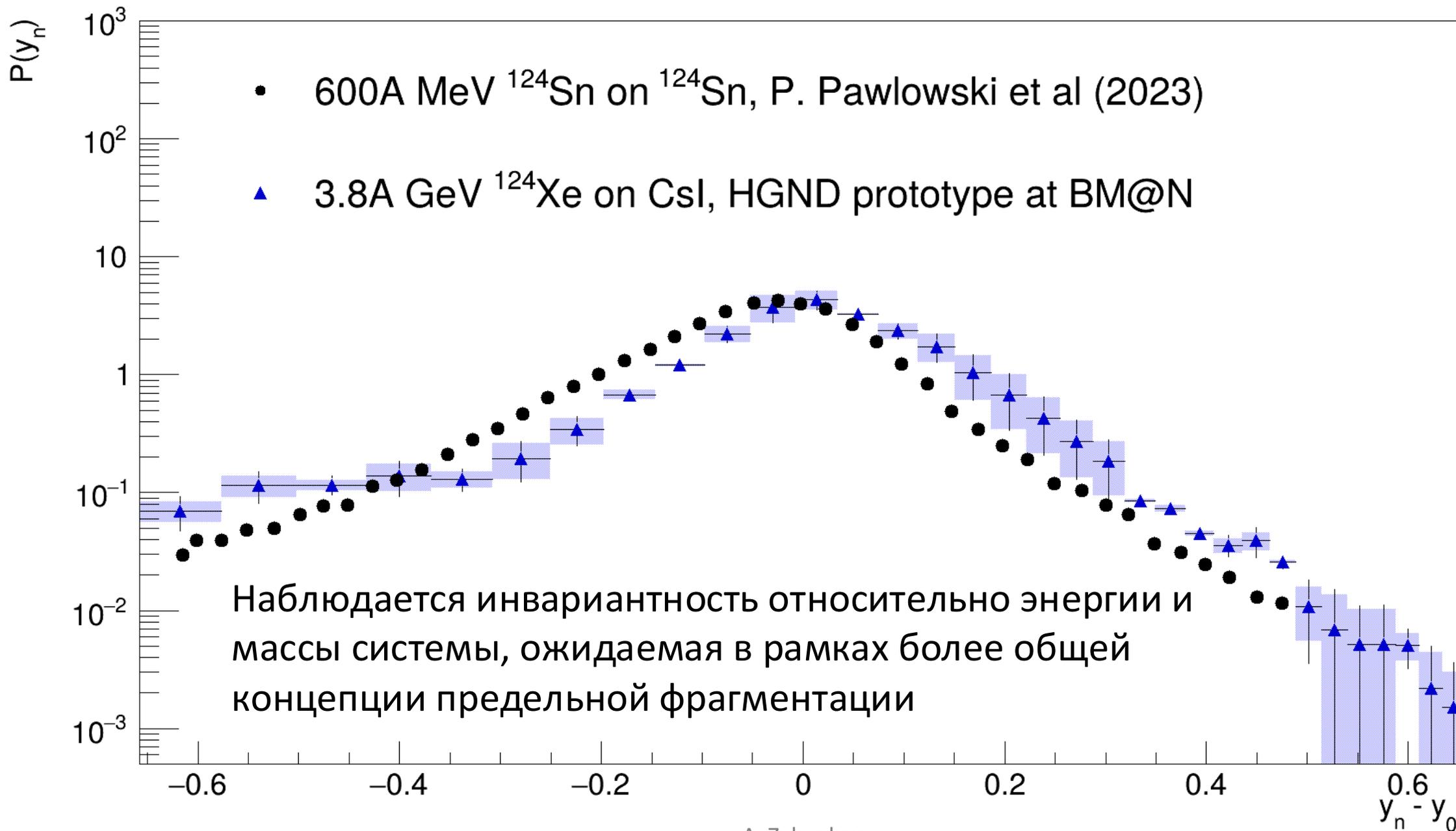
Хорошее согласие в области пика, но не очень хорошее в хвостах из-за узкого распределения истинного T_n в матрице отклика.

Разворачивание с откликом из DCM-QGSM-SMM и UrQMD-AMC



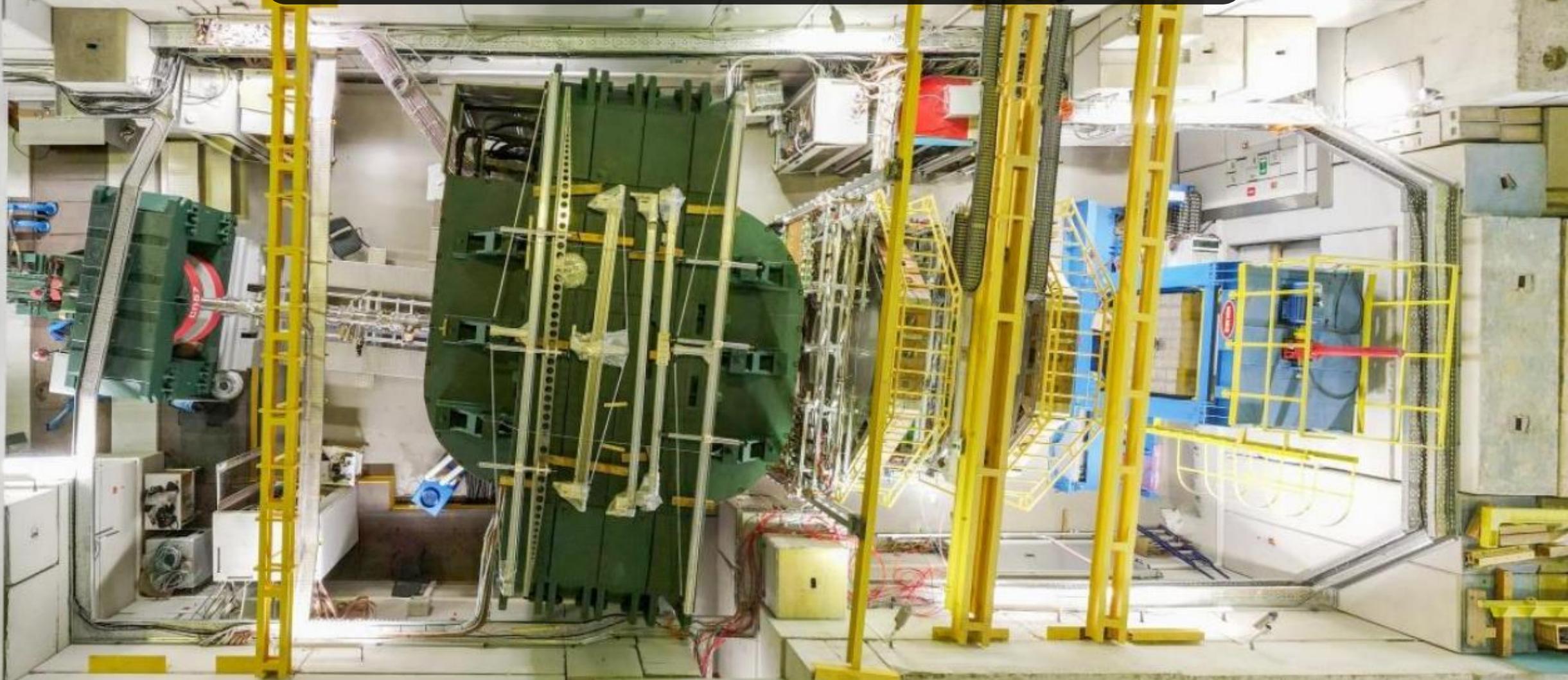
Разворачивание с откликом из DCM-QGSM-SMM и UrQMD-AMC





- Высокогранулярный нейтронный детектор HGND разрабатывается в ИЯИ РАН для измерения выходов и потоков нейтронов на BM@N.
- Прототип HGND успешно использовался в сеансе Xe+CsI@3.8A ГэВ.
- Измерены выходы нейтронов с помощью прототипа HGND.
- Реконструированные спектры хорошо согласуются в пределах погрешностей с моделированием.
- Получены первые результаты по восстановлению спектра нейтронов с помощью процедуры деконволюции.
- Нейтроны из ЭМД и нейтроны-спектаторы будут использоваться для калибровки HGND.

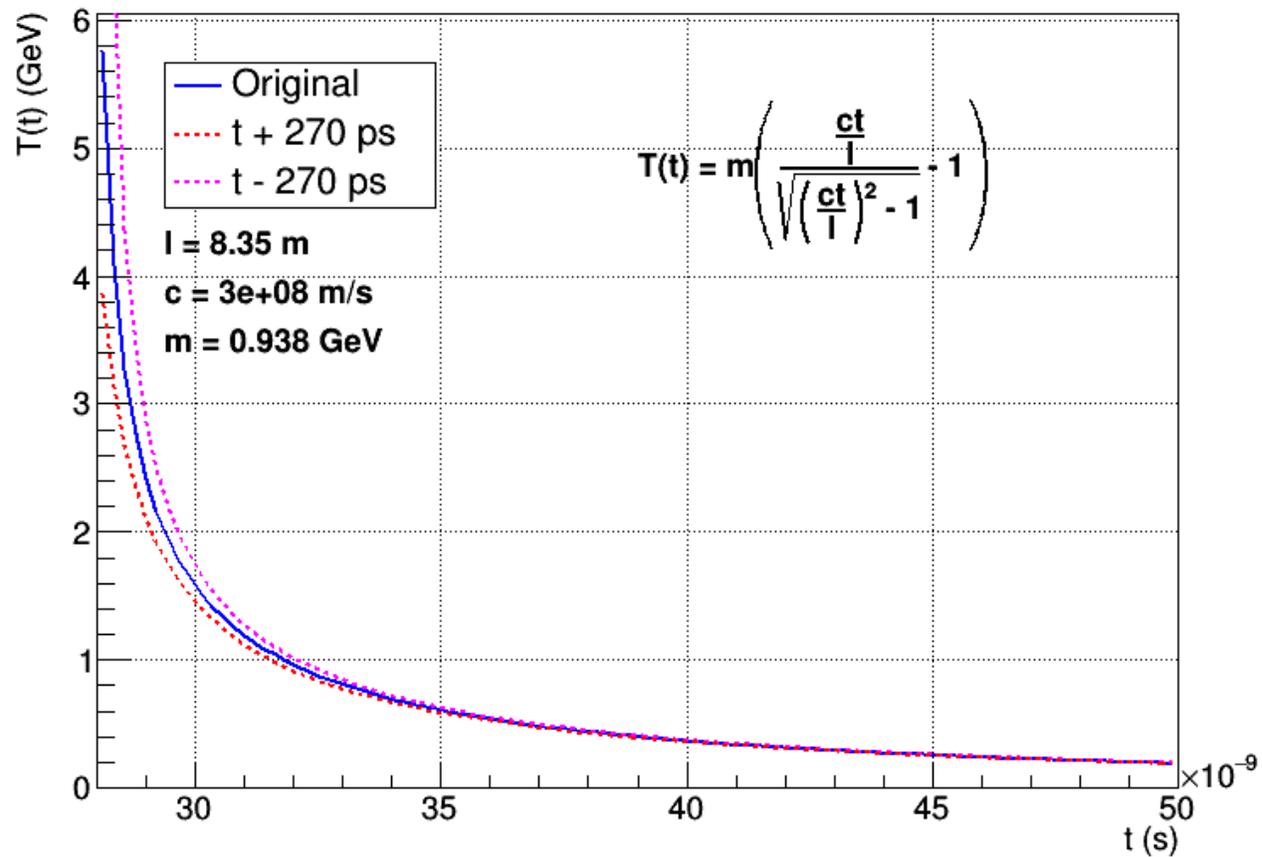
Спасибо за внимание!



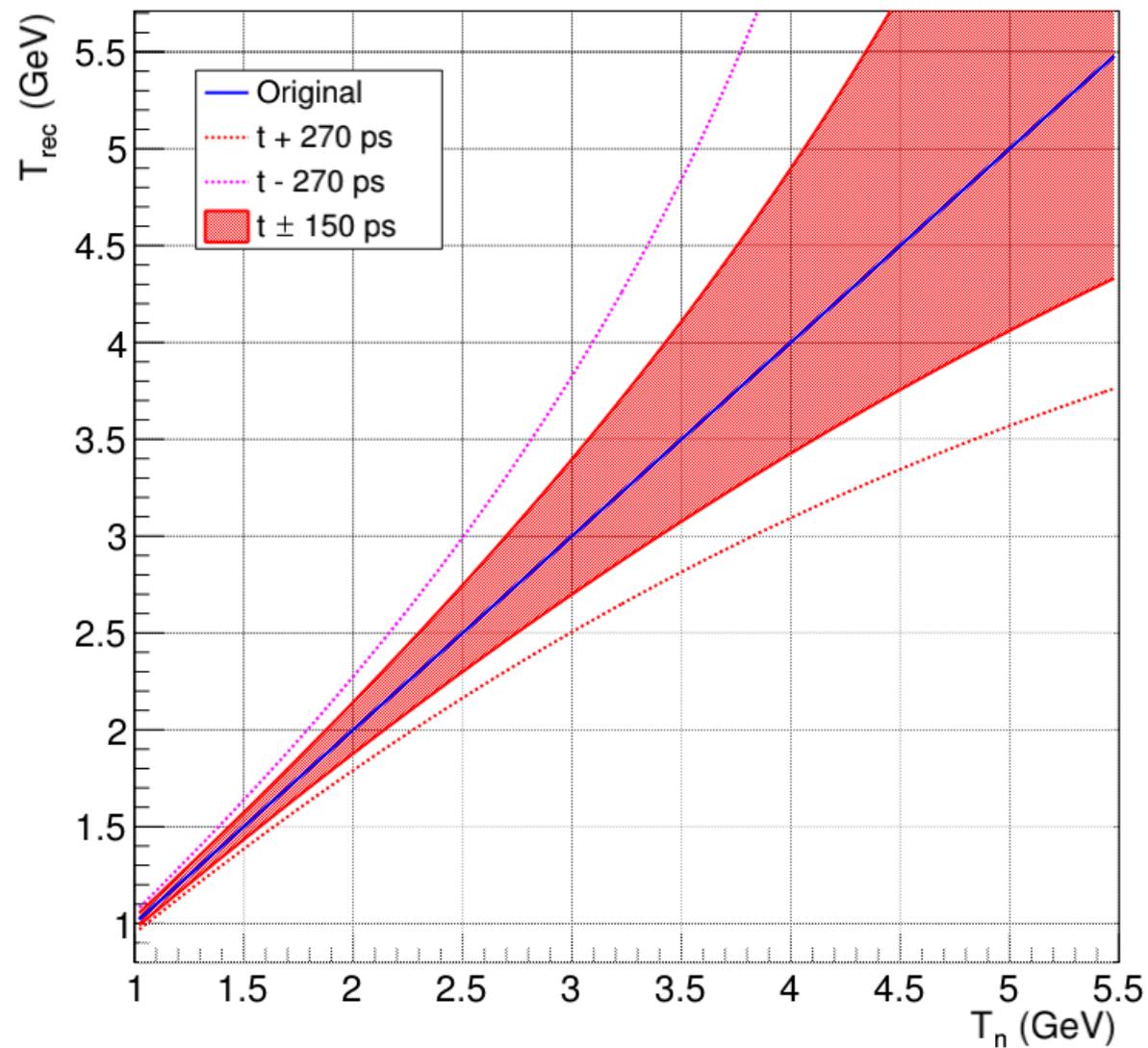
Backup

HGND prototype

T(t) vs t with ± 270 ps shift

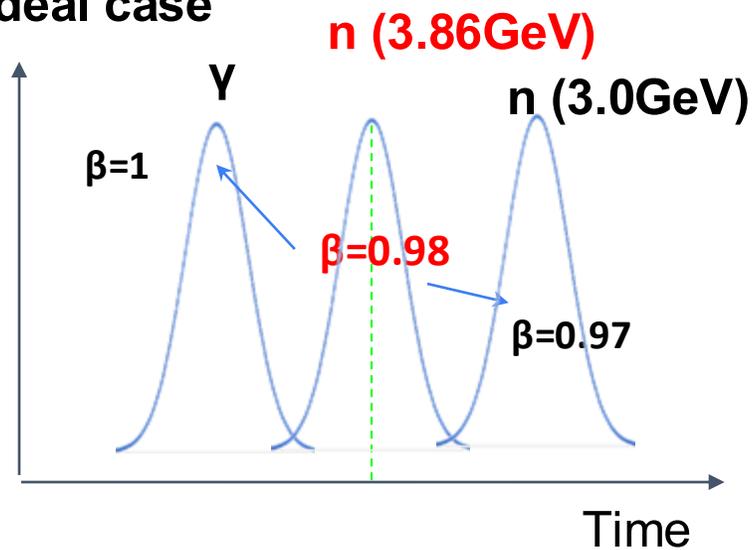


T_{rec} vs T_n with ± 270 and 150 ps shifts



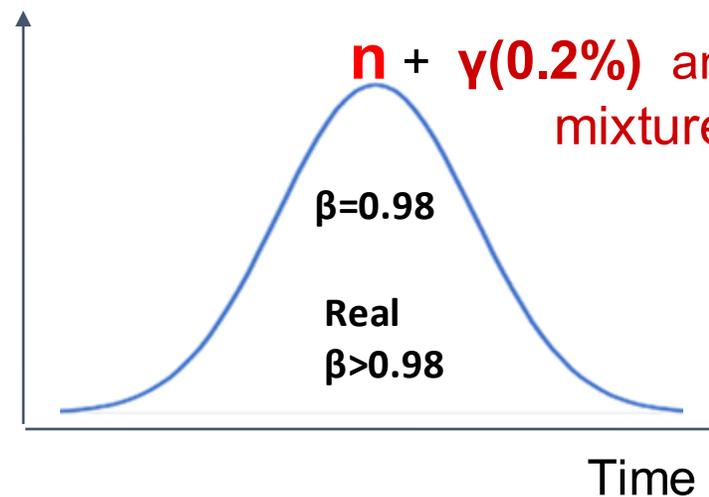


Ideal case

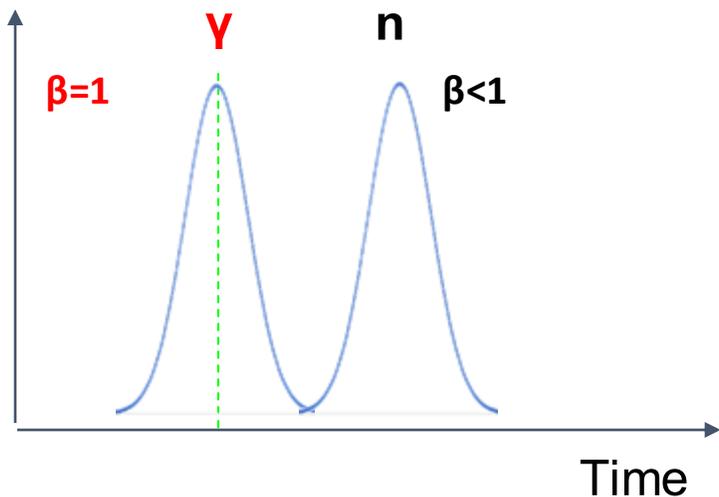


Calibration on neutrons

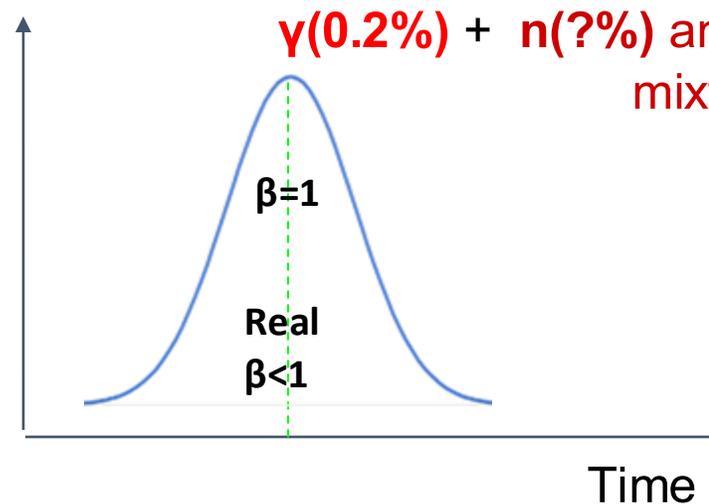
Real data



Calibration on neutrons



Calibration on photons



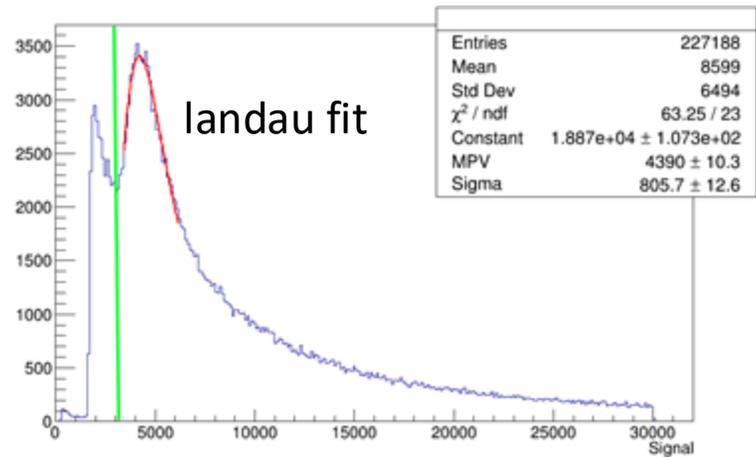
Calibration on photons is possible up to 8 layer

HGND calibration

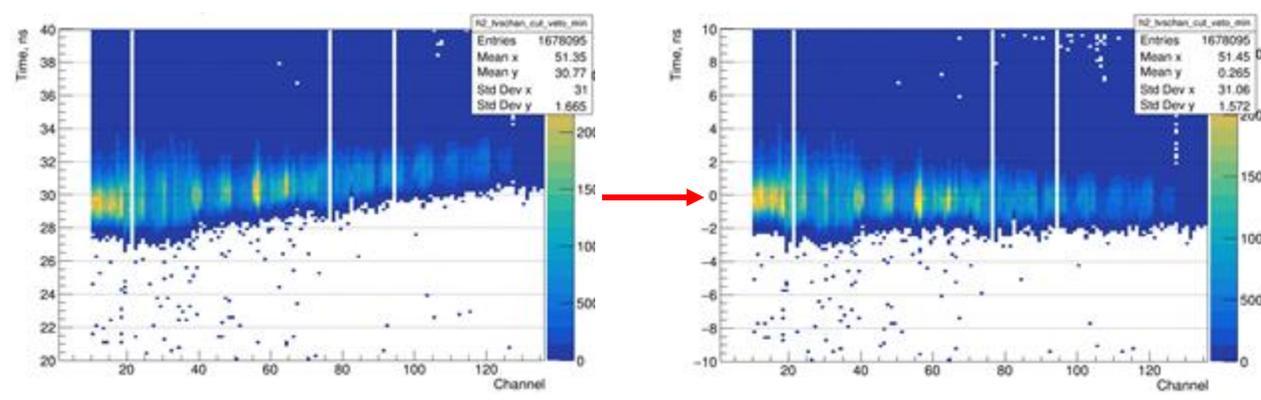


1. Amplitude normalization

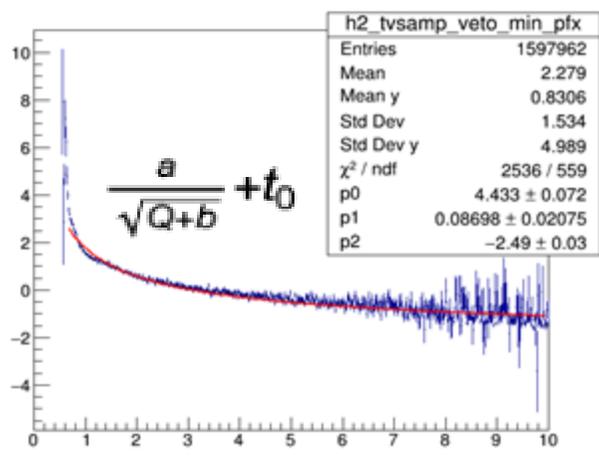
$$Ampl = Ampl \cdot \frac{1}{MPV}$$



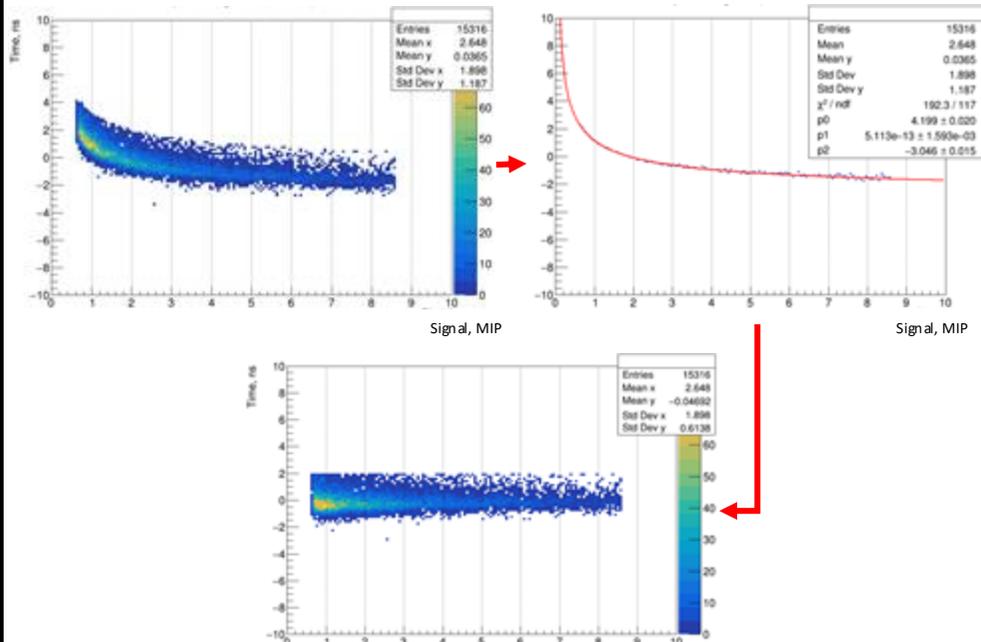
2. Time shift for all channels by the average fit value



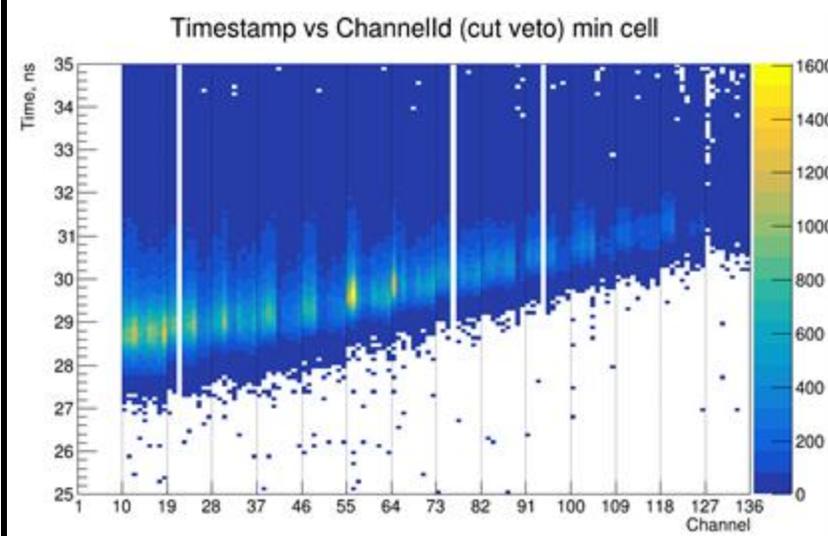
3. Determination of parameters of the approximating function for all channels & time limit



4. Time-amplitude correction



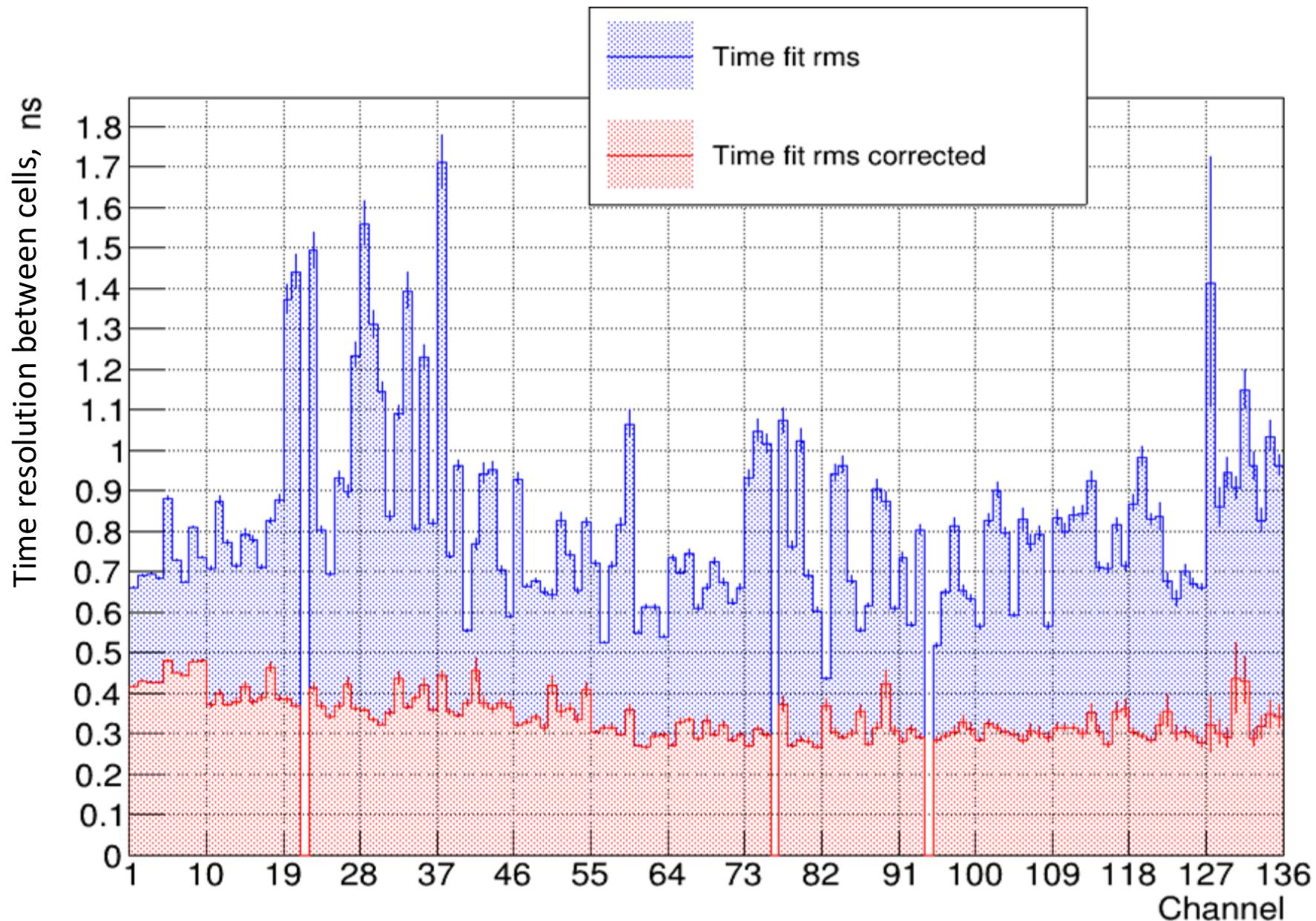
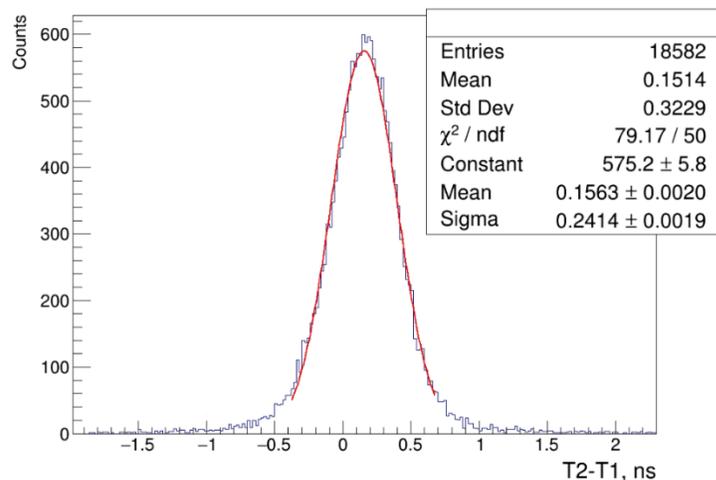
5. Time shift



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.

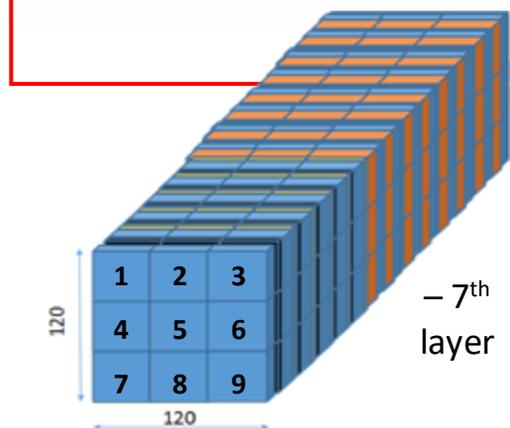
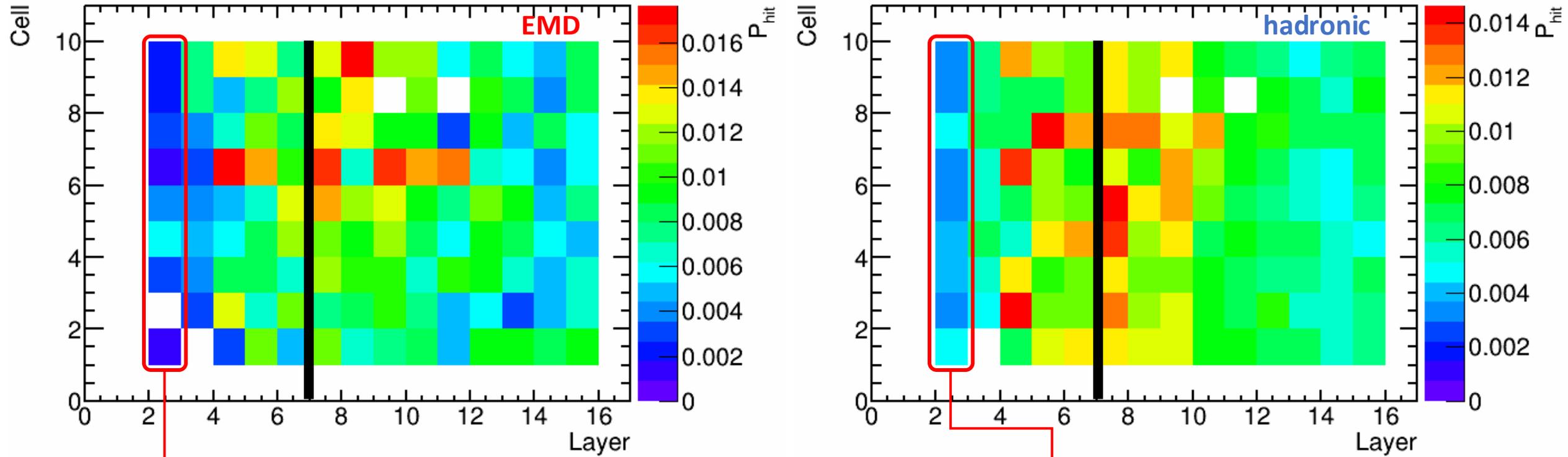


Fastest cells for EMD vs hadronic interactions



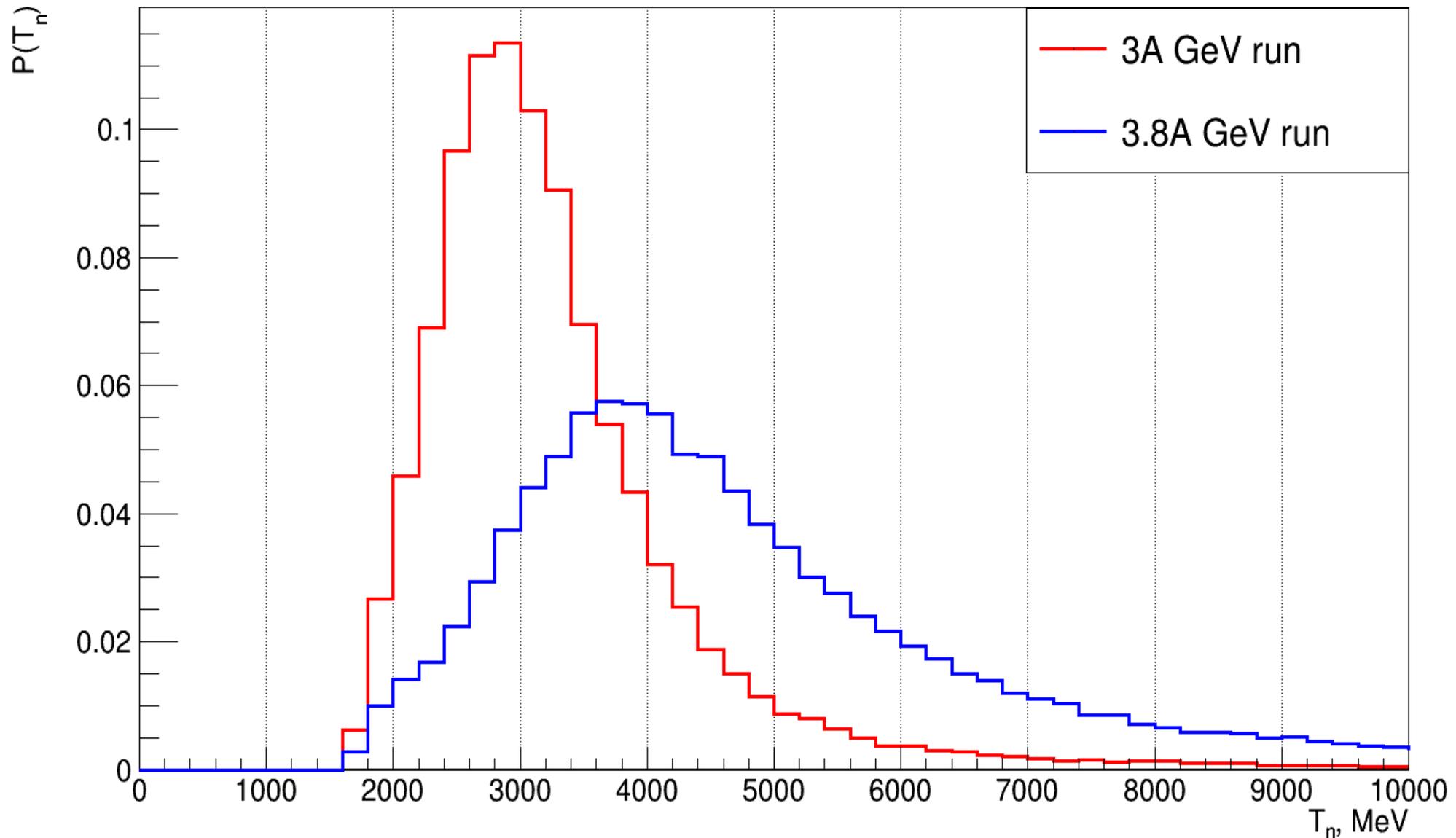
Comparison of hadronic interactions (CCT2) with electromagnetic dissociation (BT)

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

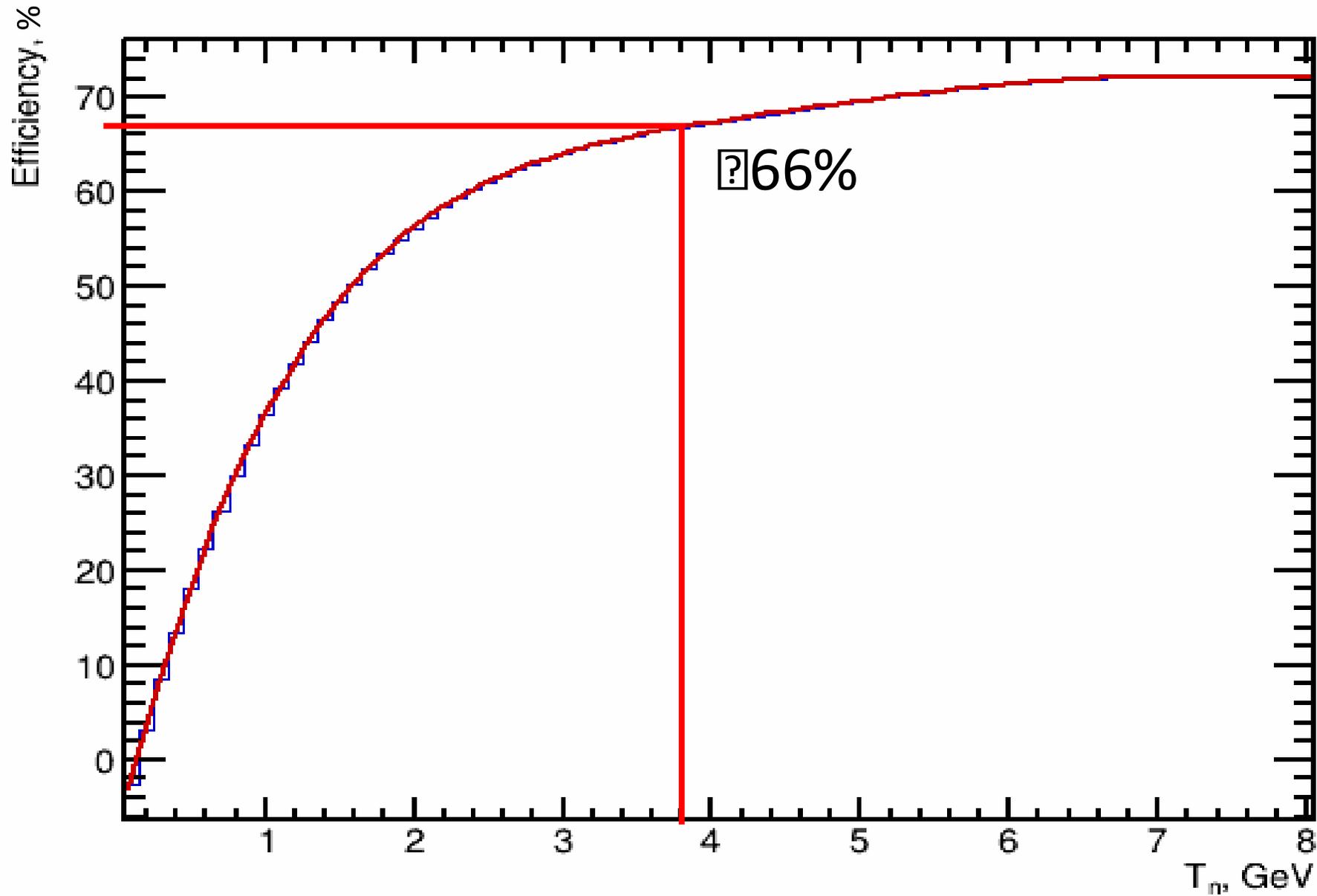


γ -quanta cut – no hits in 1-2 layers in module $\Rightarrow 1.55 X_0$ or $0.11 \lambda_{int}$

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.



Geant4 simulation:
Particle source, only
neutrons

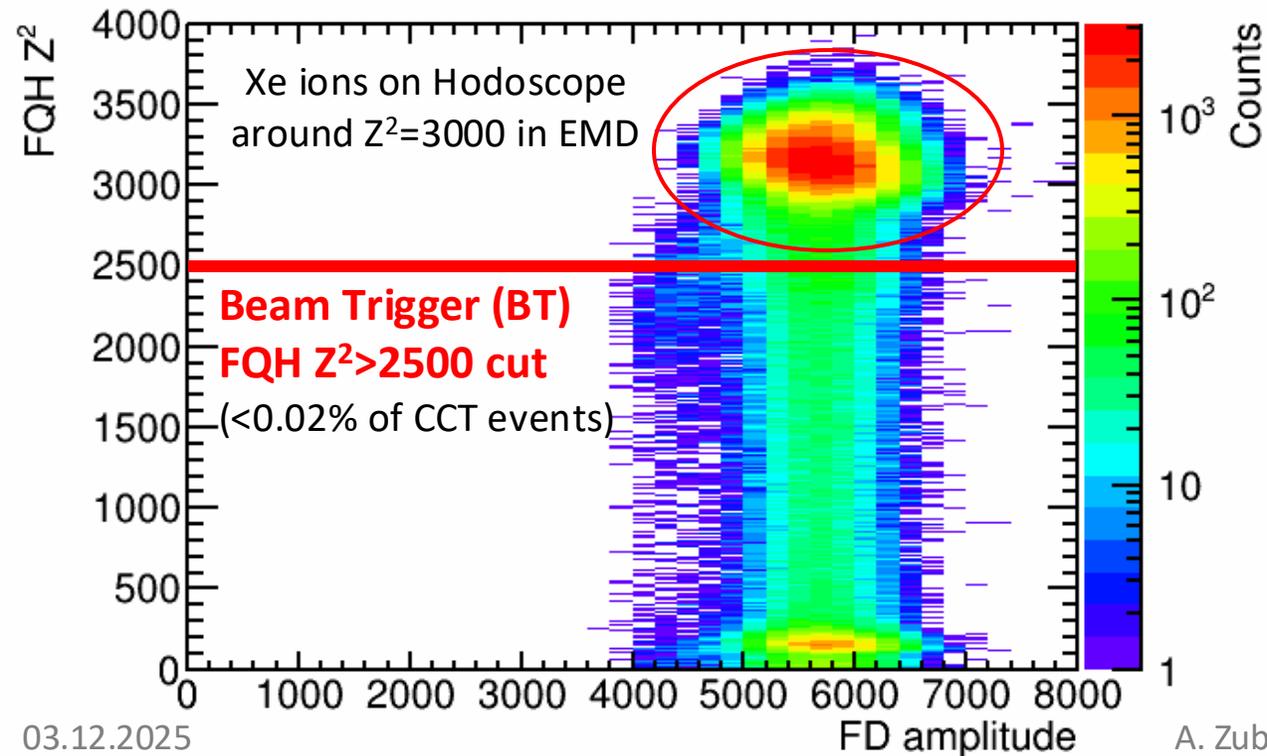
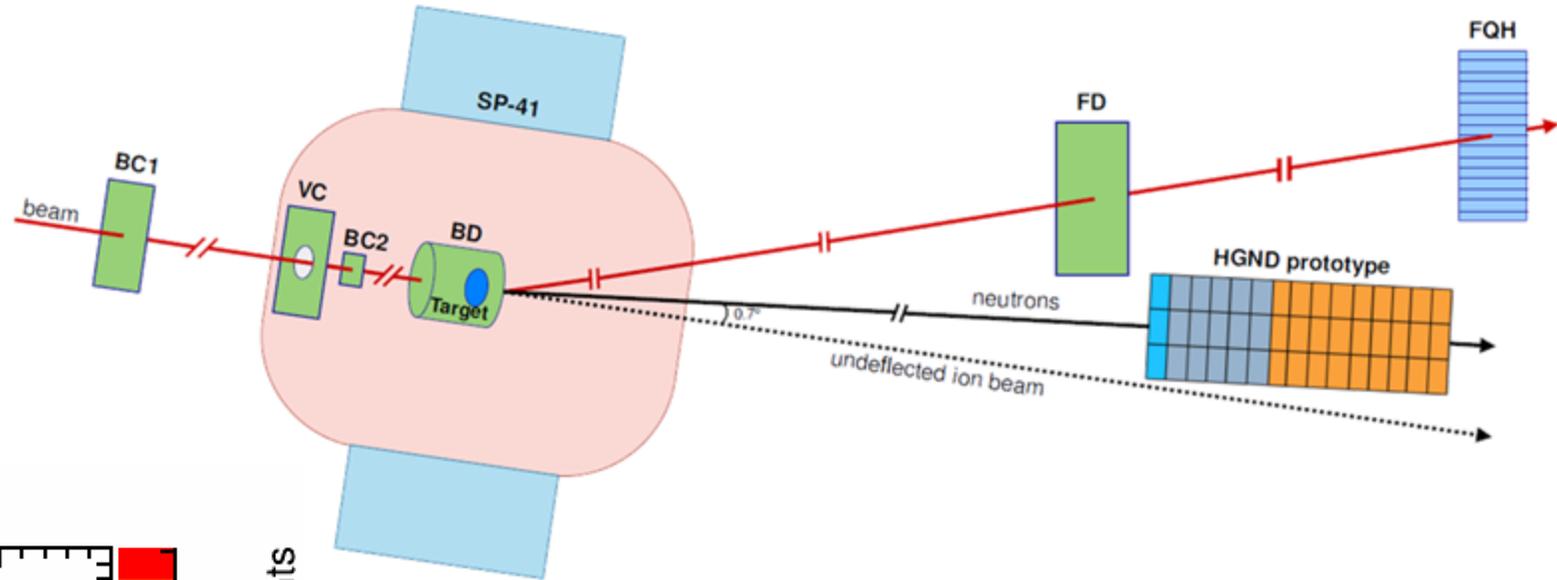
- VETO-cut
- γ -cut
- ToF cut

Selection of EMD events in measurements

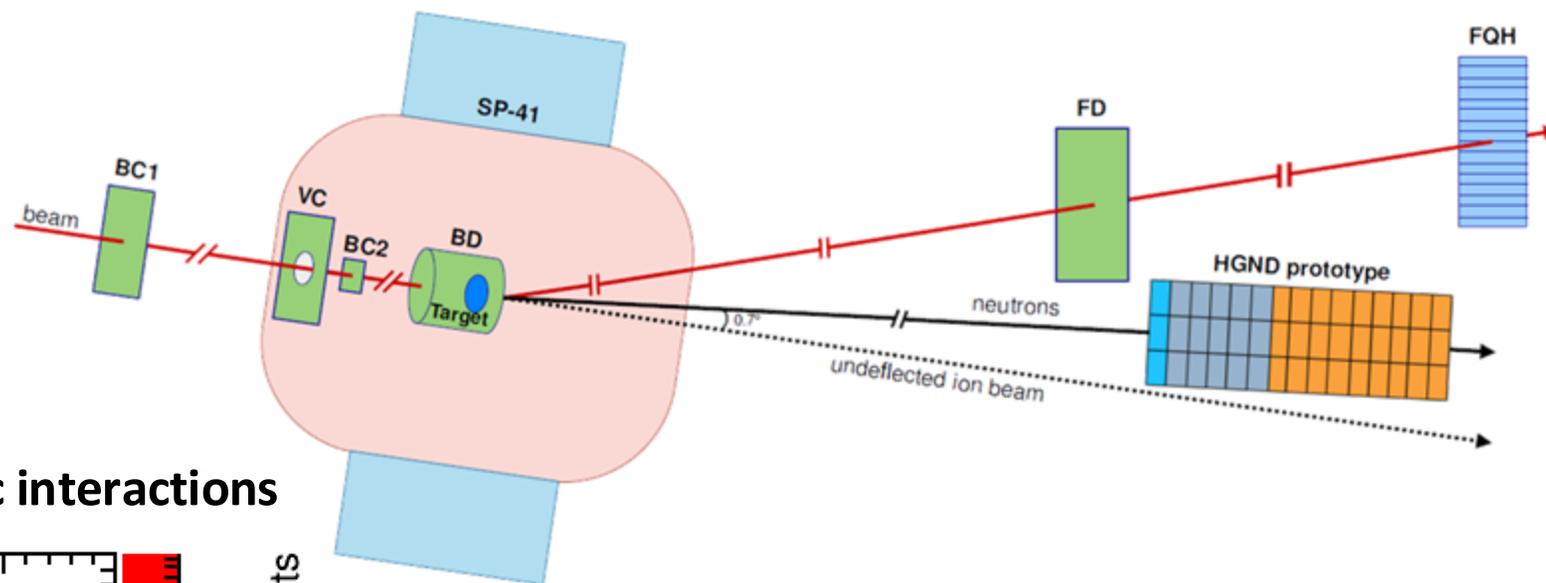


Only single Xe ion in target

Ultra-peripheral collisions – EMD

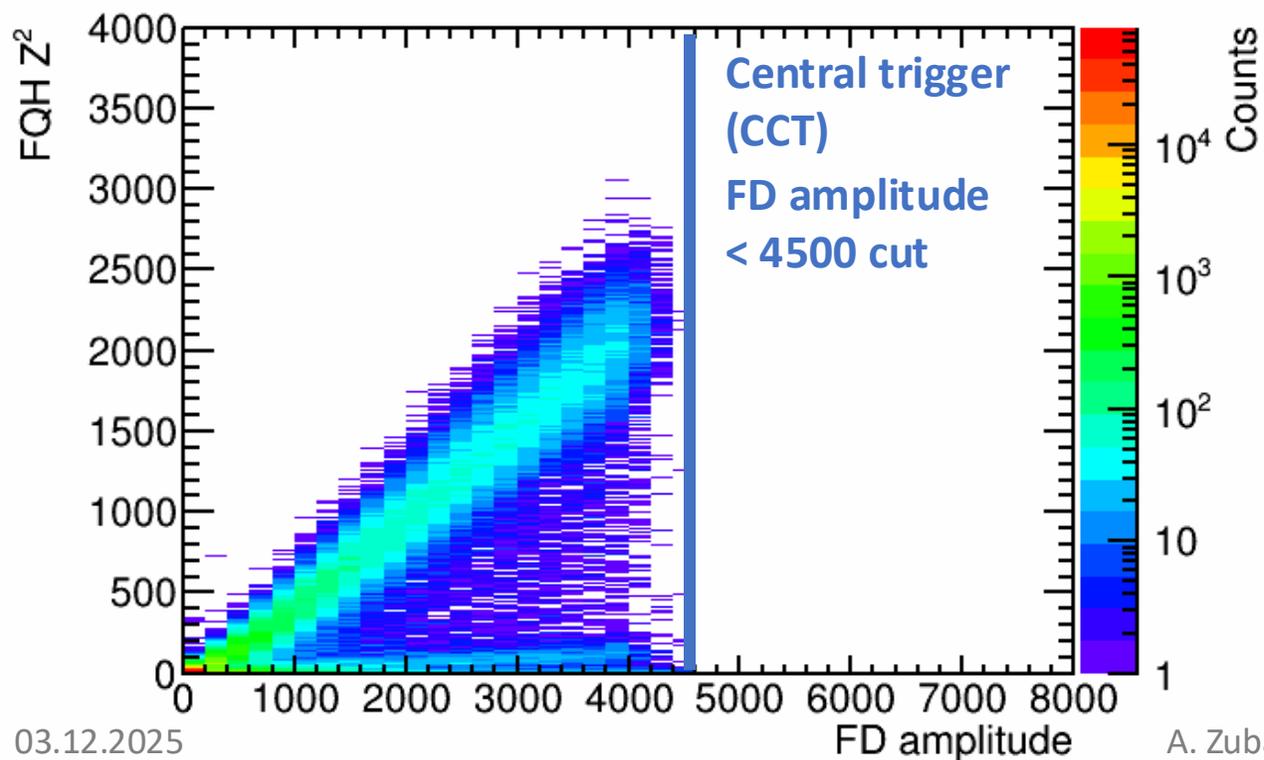


Selection of hadronic fragmentation events in measurements



Only single Xe ion in target

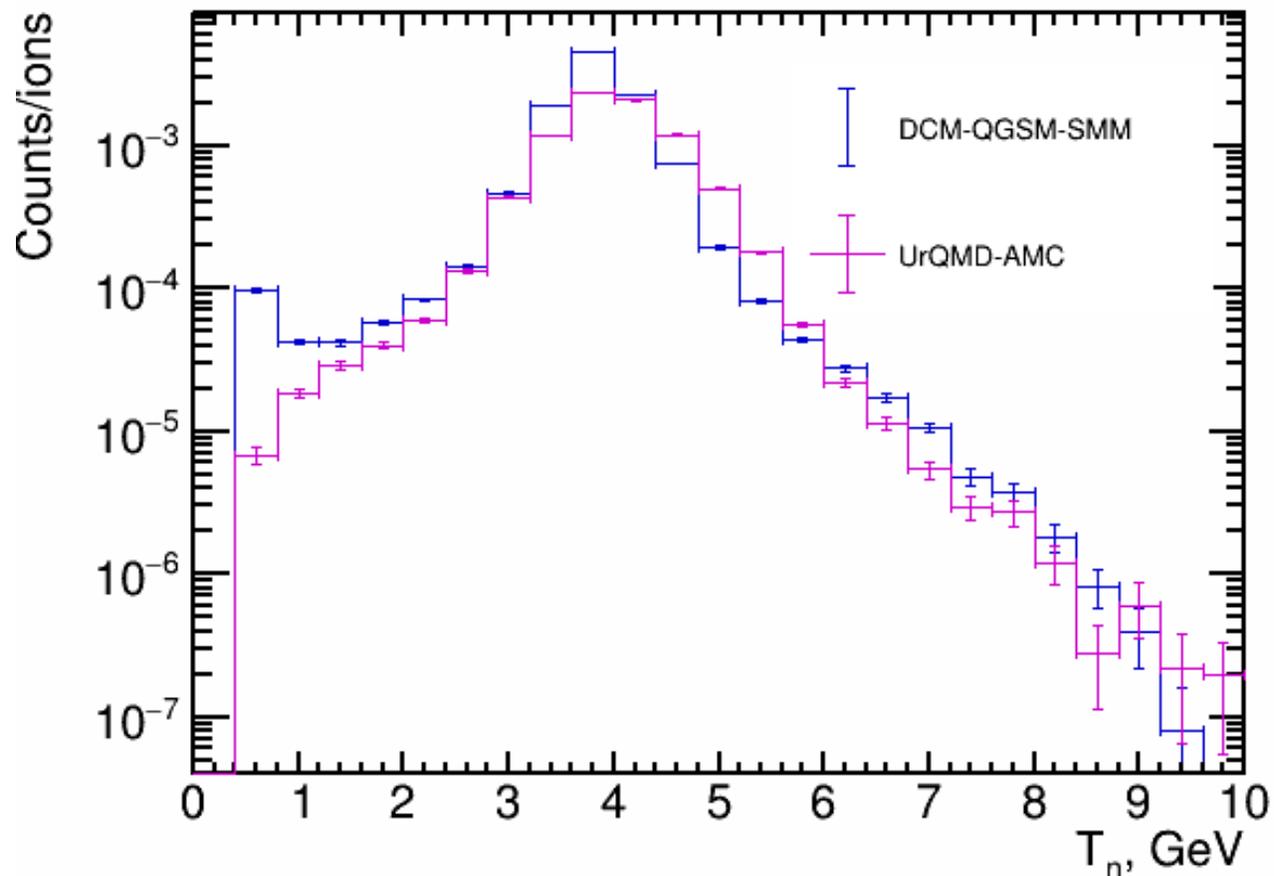
Central & semi-central collisions – hadronic interactions



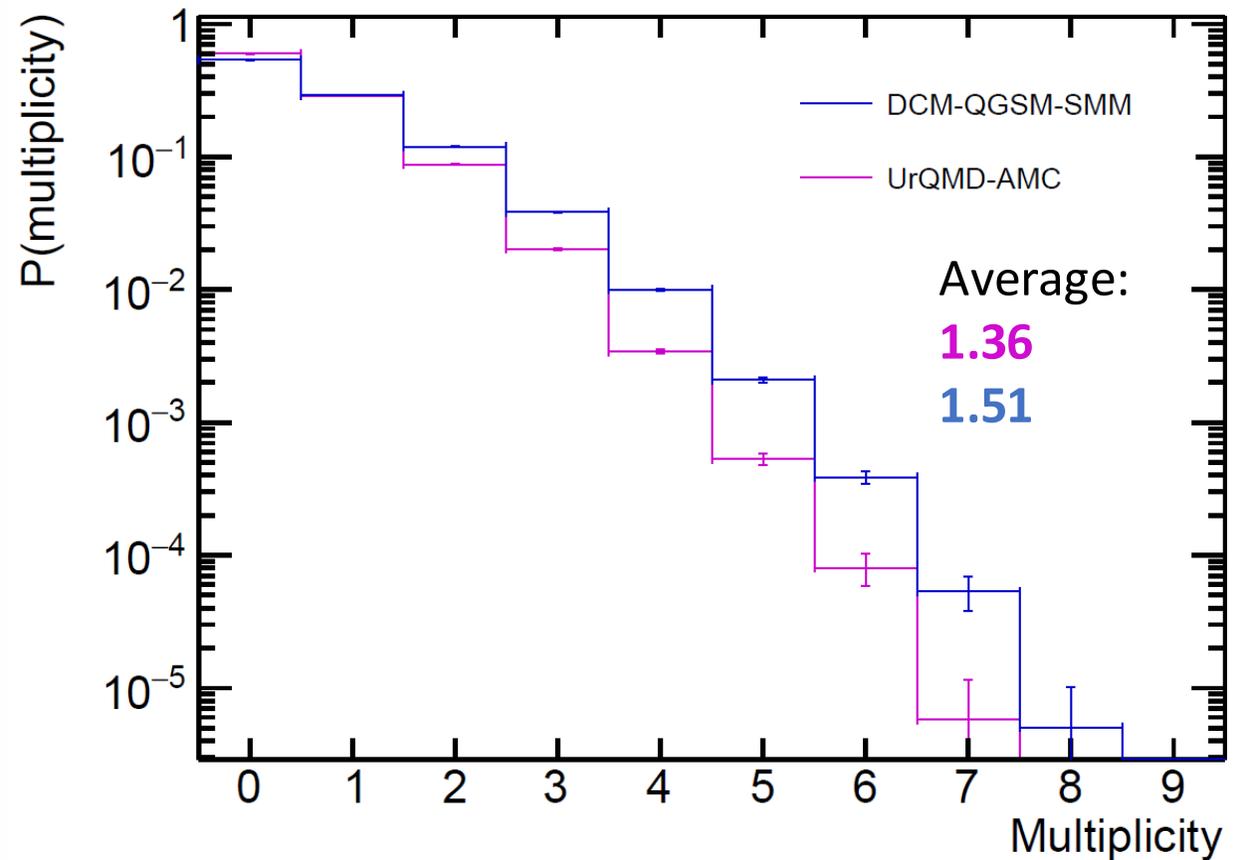
Spectator neutrons in acceptance of the HGND prototype



Neutron kinetic energy in acceptance of the HGND prototype

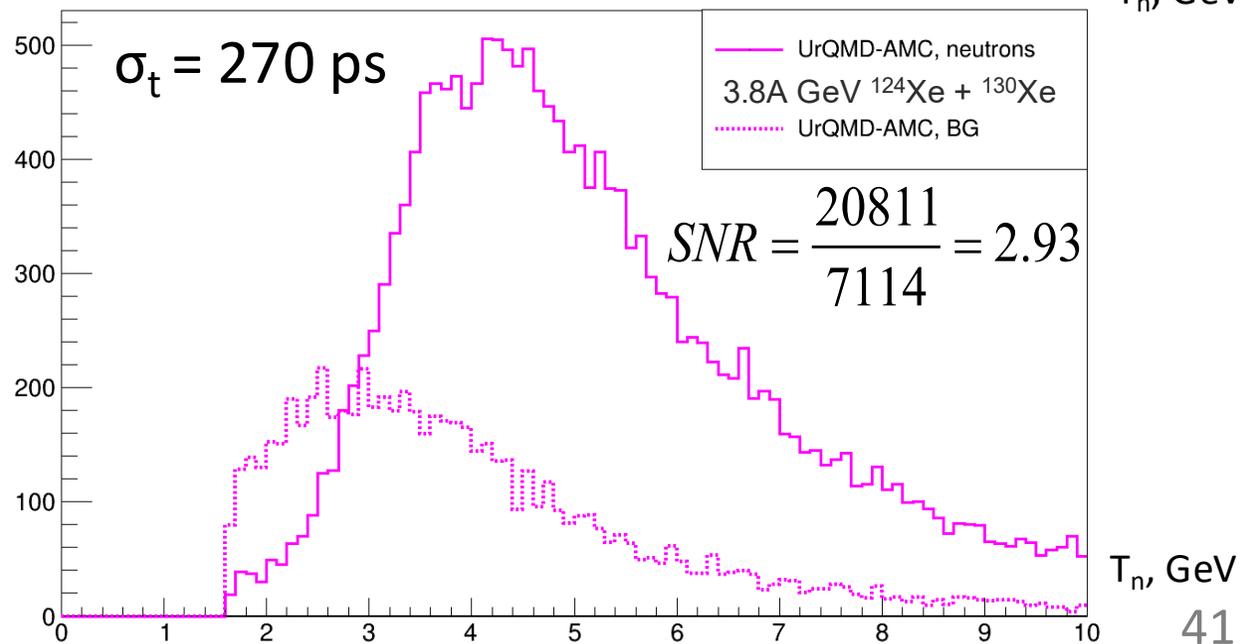
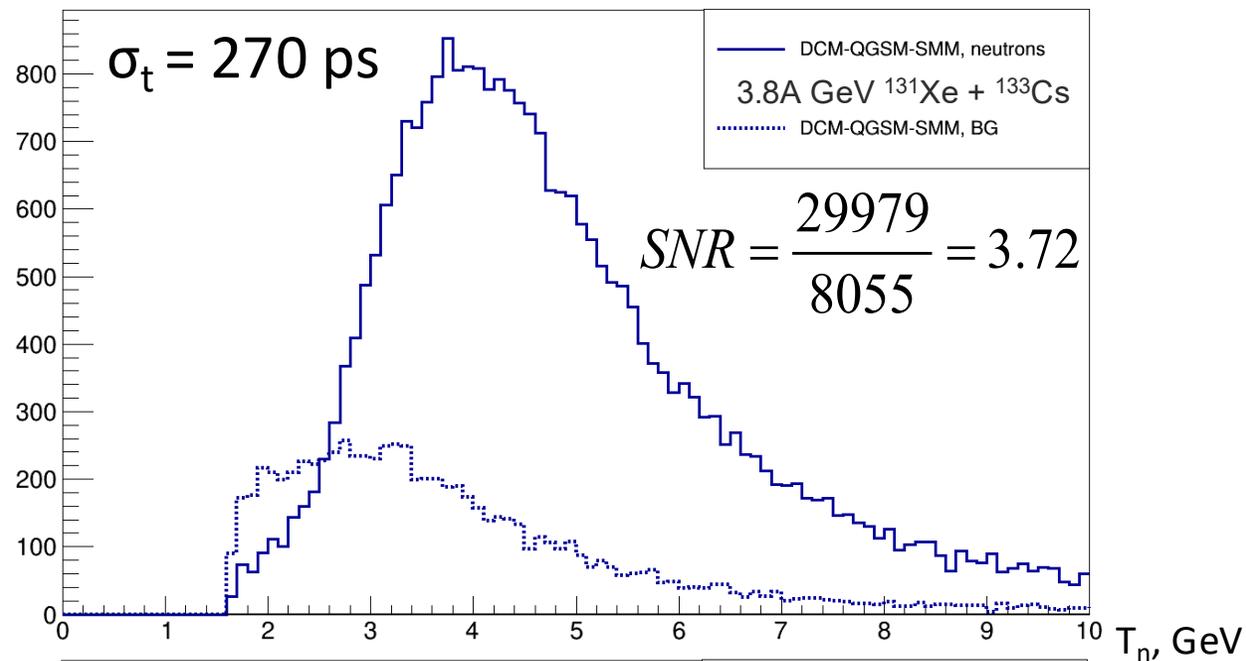
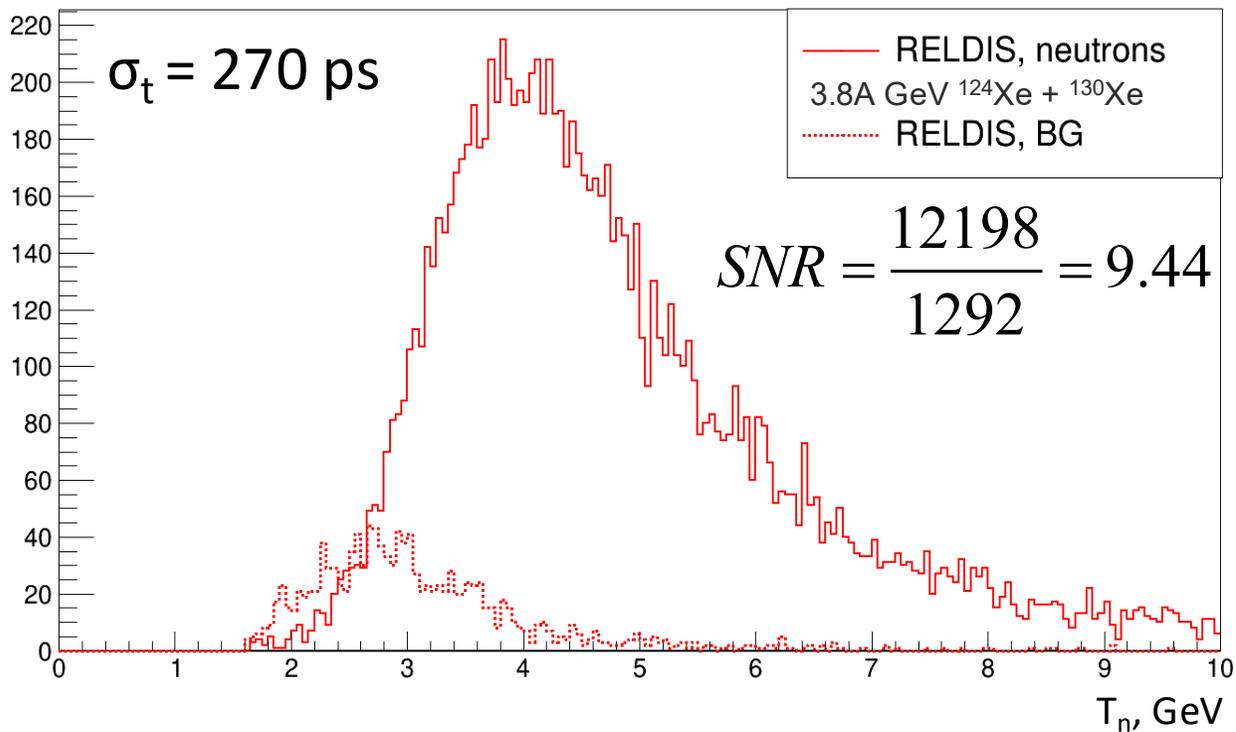


Neutron multiplicity in acceptance of the HGND prototype



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.



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

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

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

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

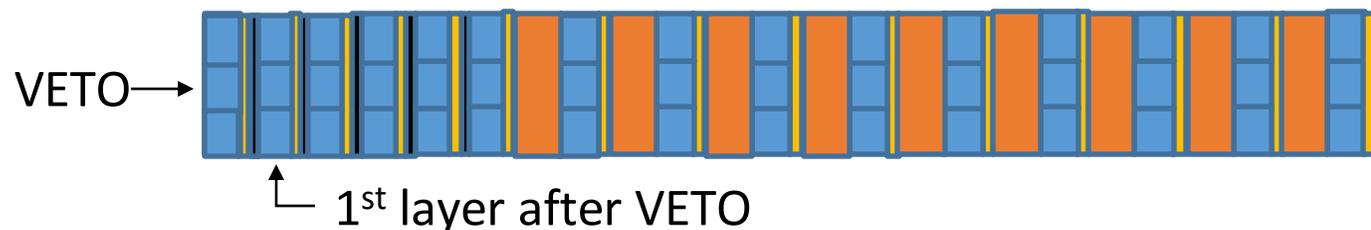
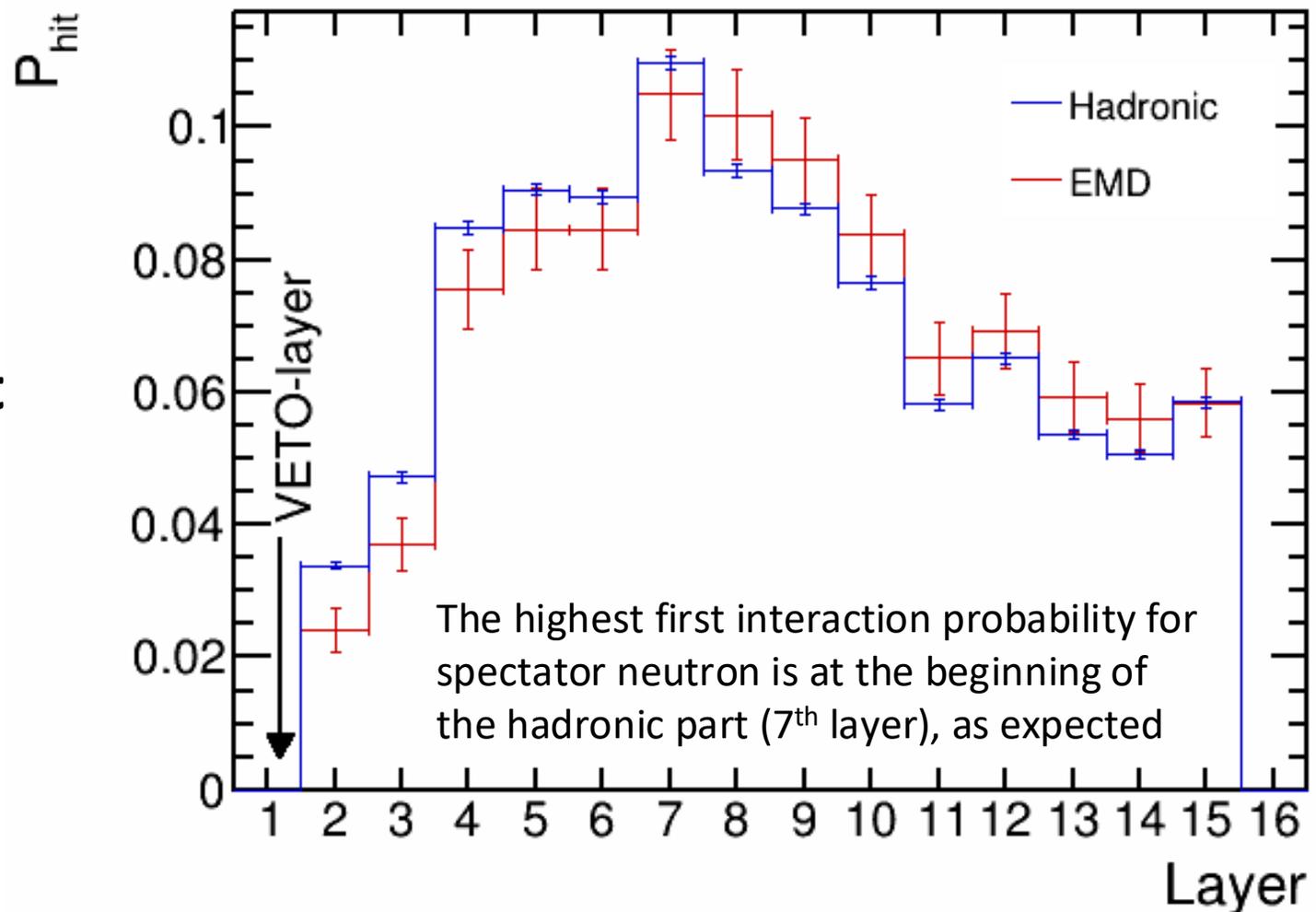
	RELDIS	DCM-QGSM-SMM	UrQMD-AMC
$\sigma_{exp}, \text{ b}$	$1.88 \pm 0.16_{stat} \pm 0.05_{syst}$	$4.44 \pm 0.03_{stat} \pm 0.36_{syst} \text{ b}$	$4.90 \pm 0.03_{stat} \pm 0.16_{syst} \text{ b}$
$\sigma_{sim}, \text{ b}$	$1.89 \pm 0.02 \text{ b}$	$4.76 \pm 0.01 \text{ b}$	$4.89 \pm 0.01 \text{ b}$

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

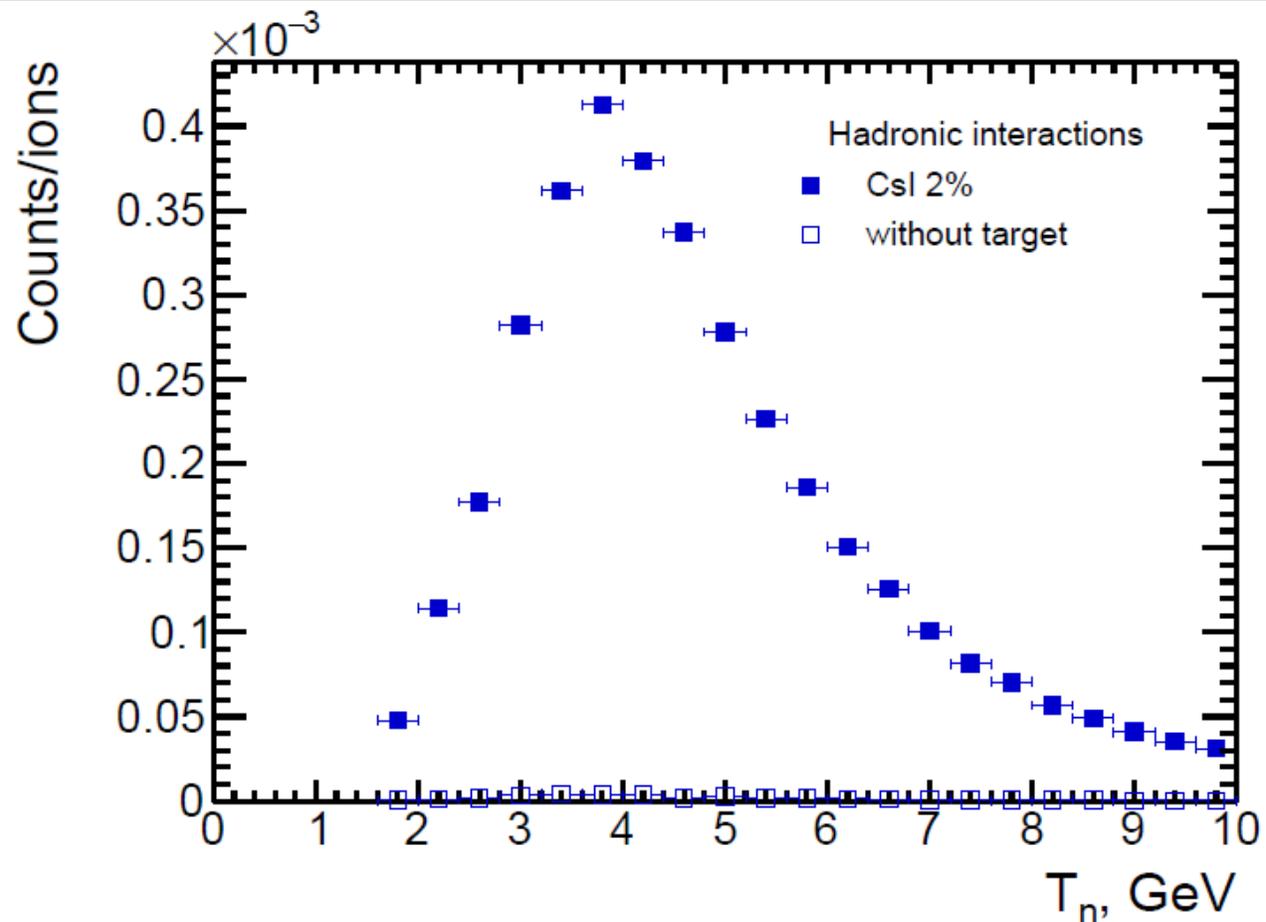
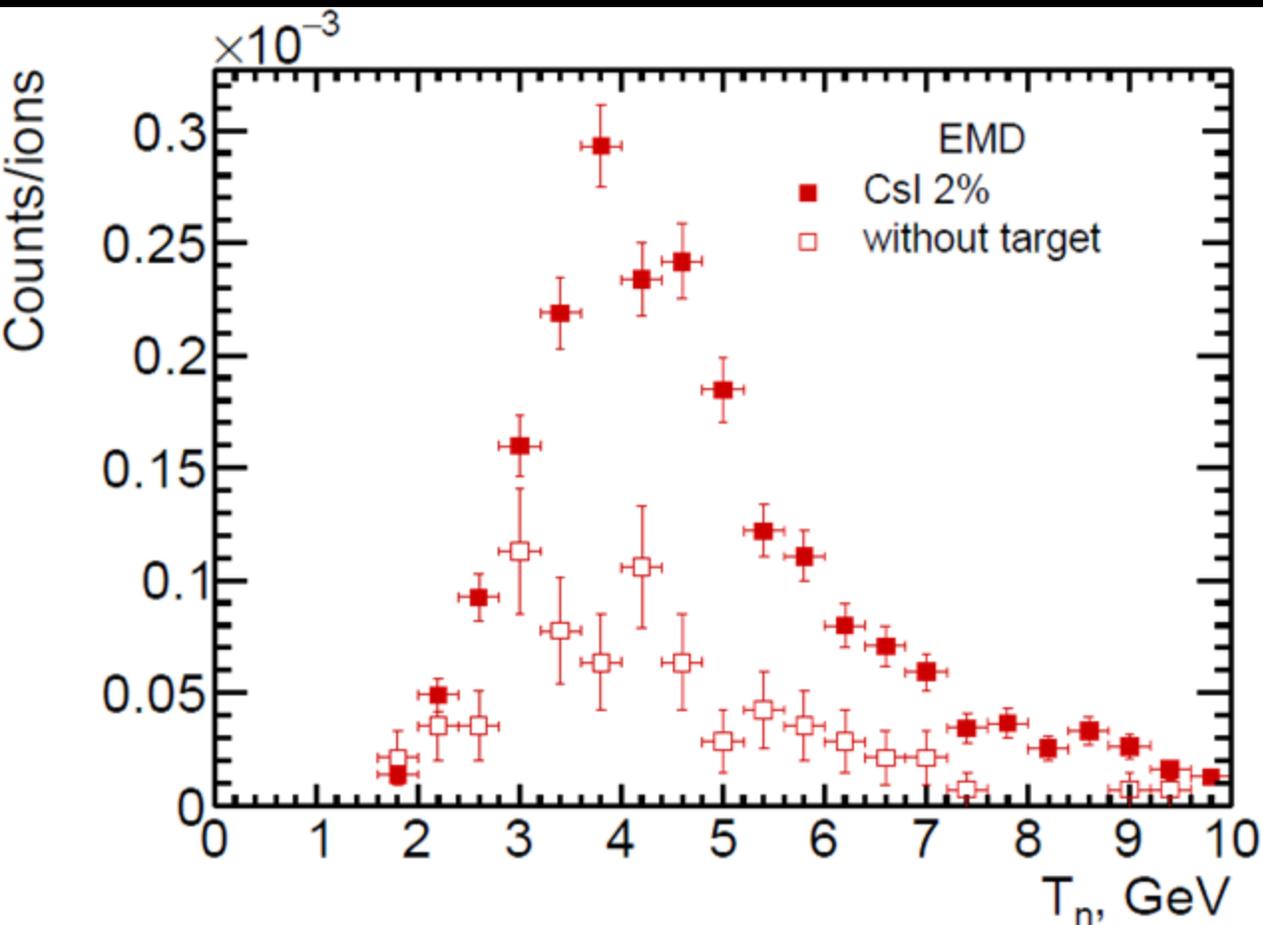
Selection of spectator neutrons



- 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**



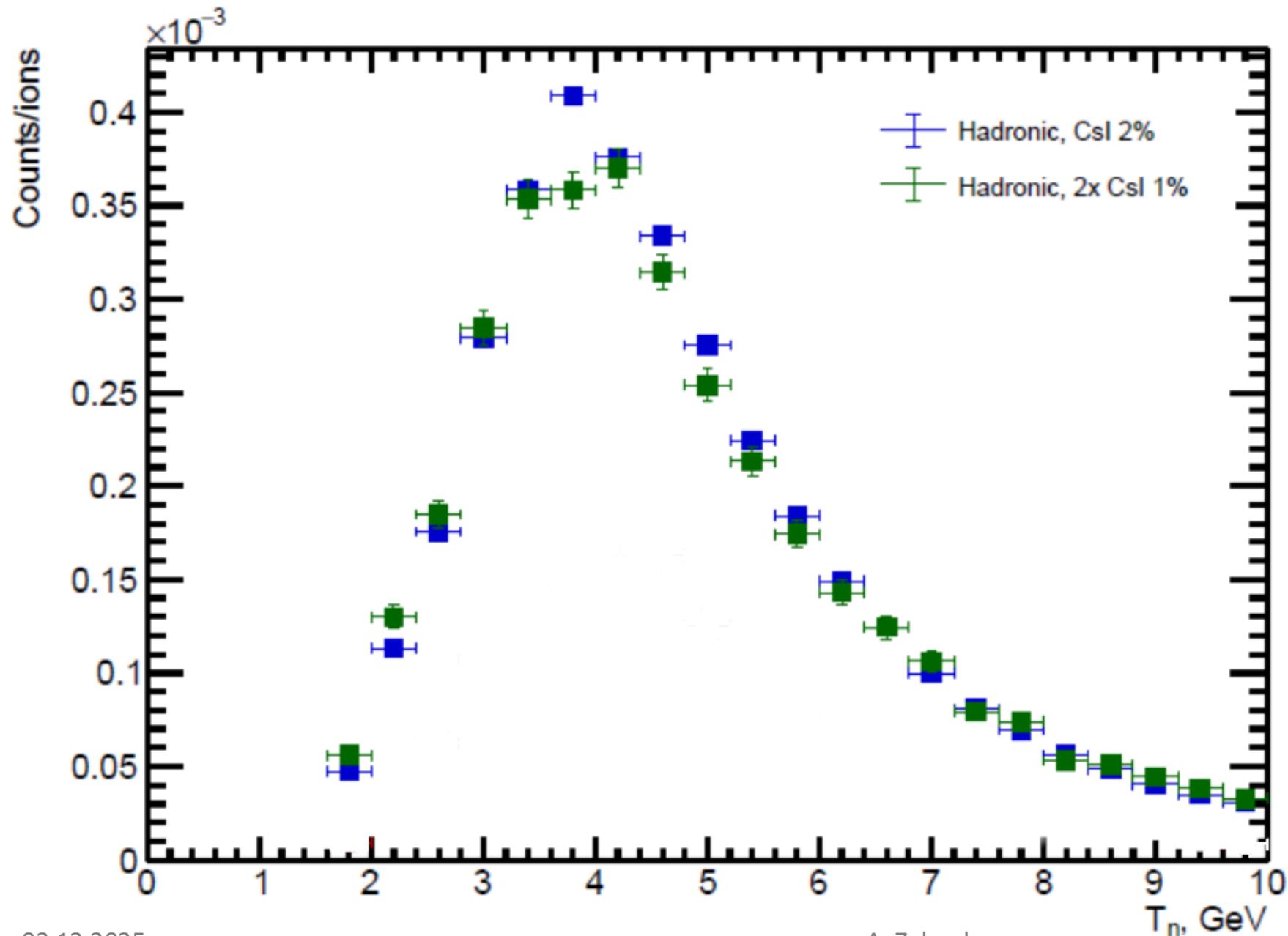
Reconstructed spectra for EMD and hadronic interactions



Reconstructed spectra were obtained both for runs with Csl 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



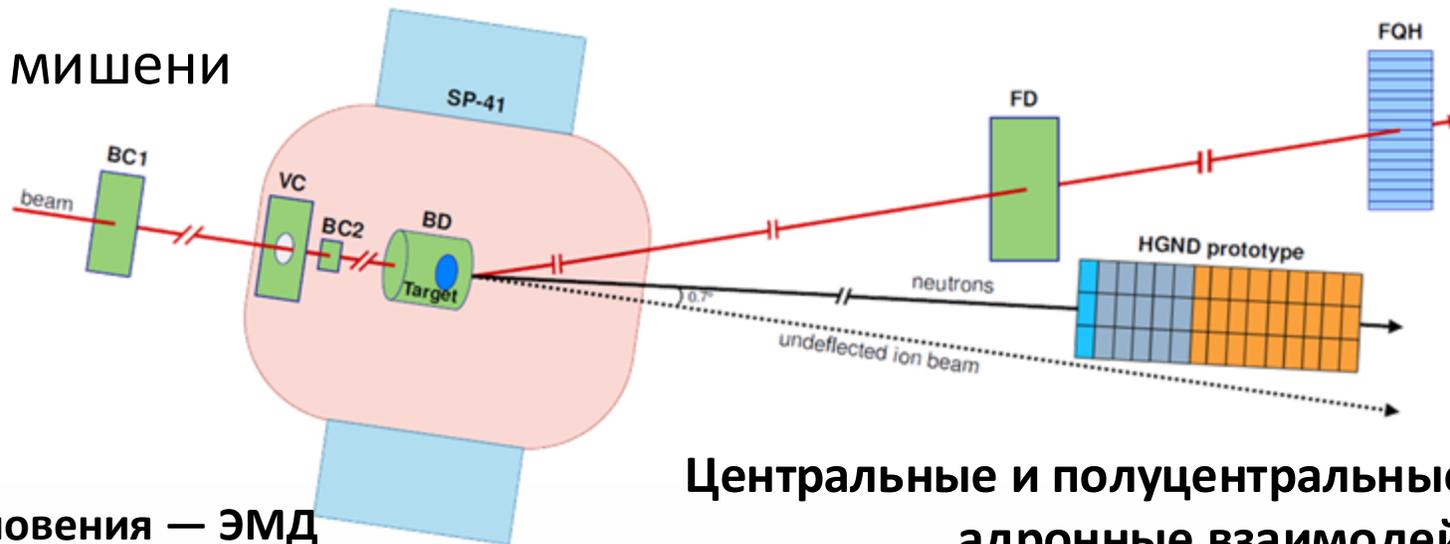
Corrected spectra after subtracting empty target spectra

Measurements with 1% and 2% target are consistent

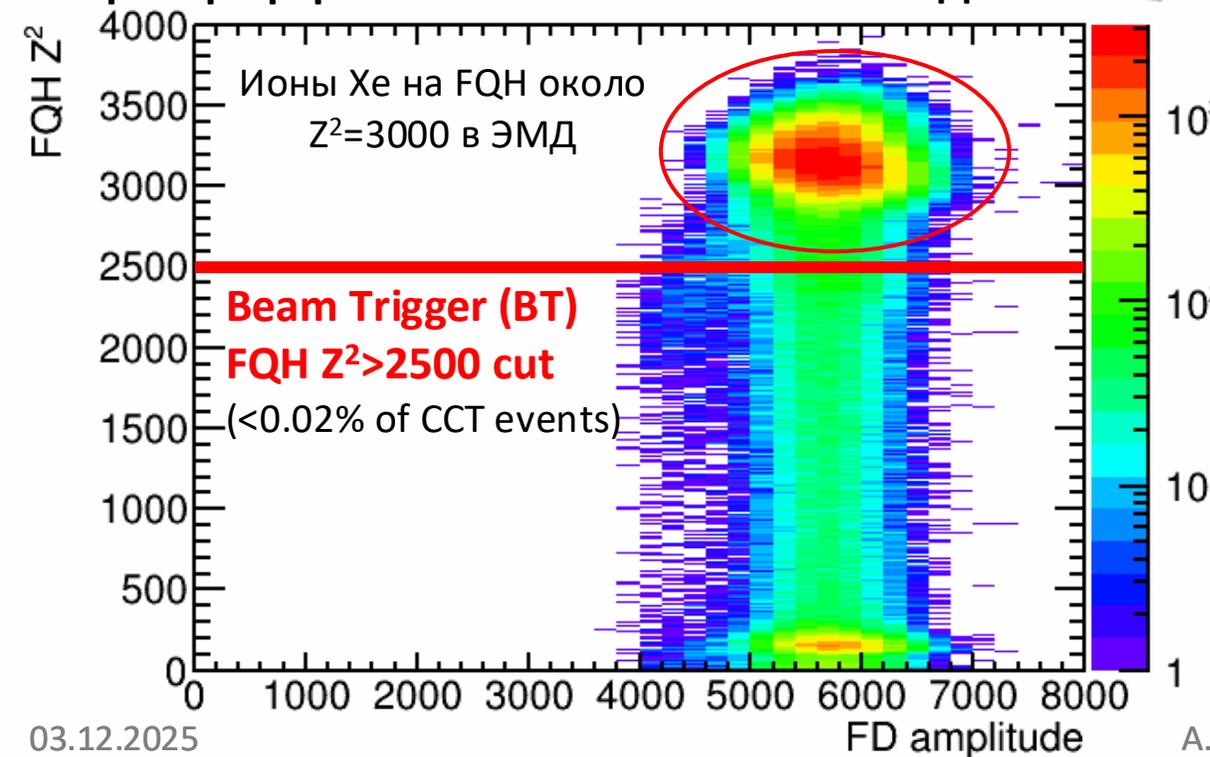
Отбор событий ЭМД и адронных взаимодействий



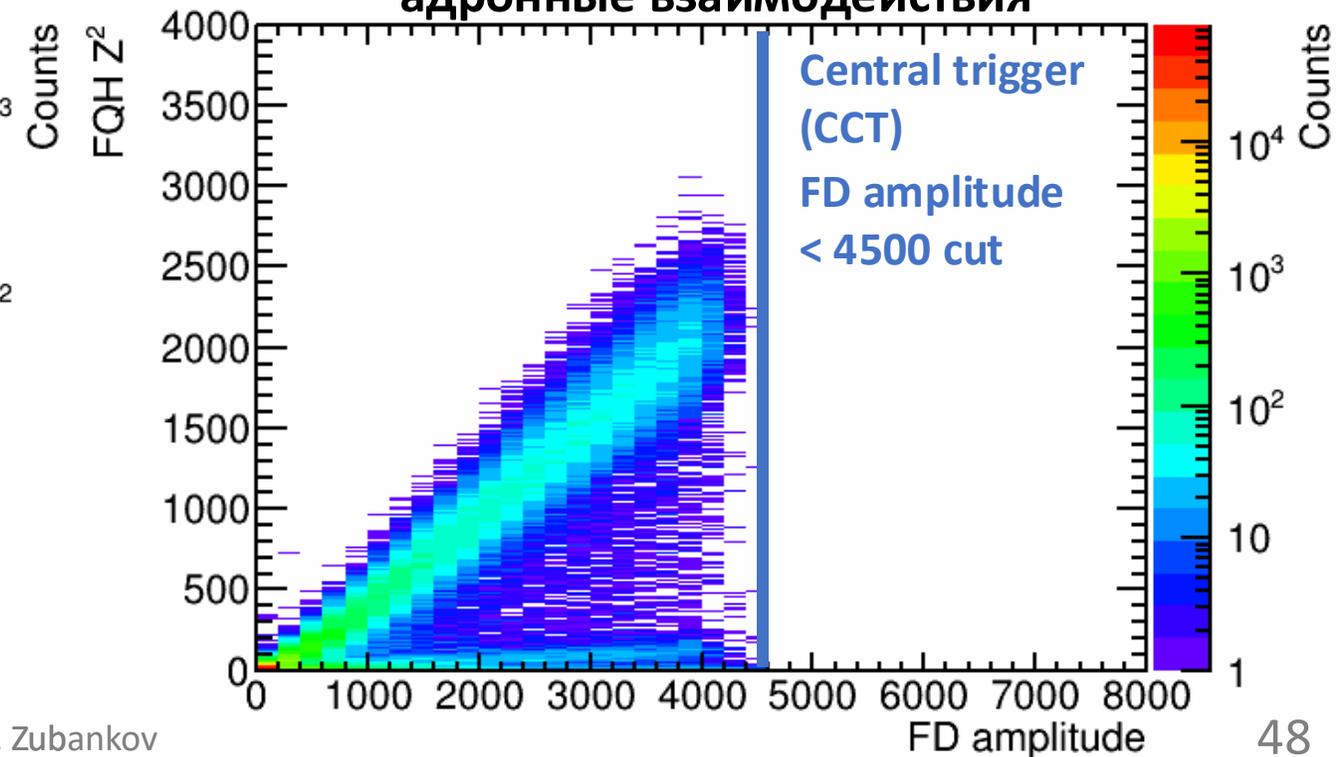
Только один ион Хе на мишени

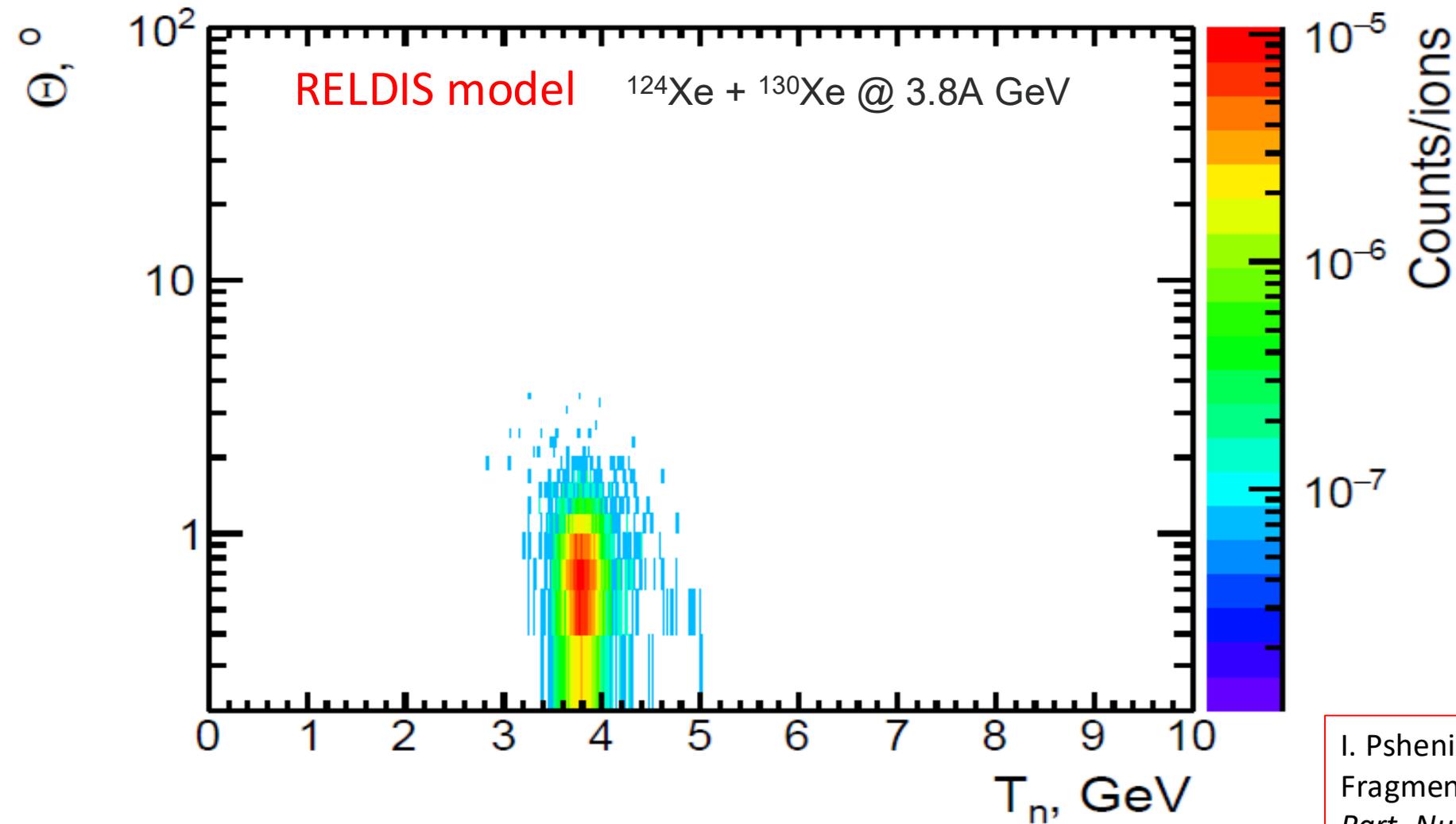


Ультрапериферические столкновения — ЭМД



Центральные и полуцентральные столкновения — адронные взаимодействия





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

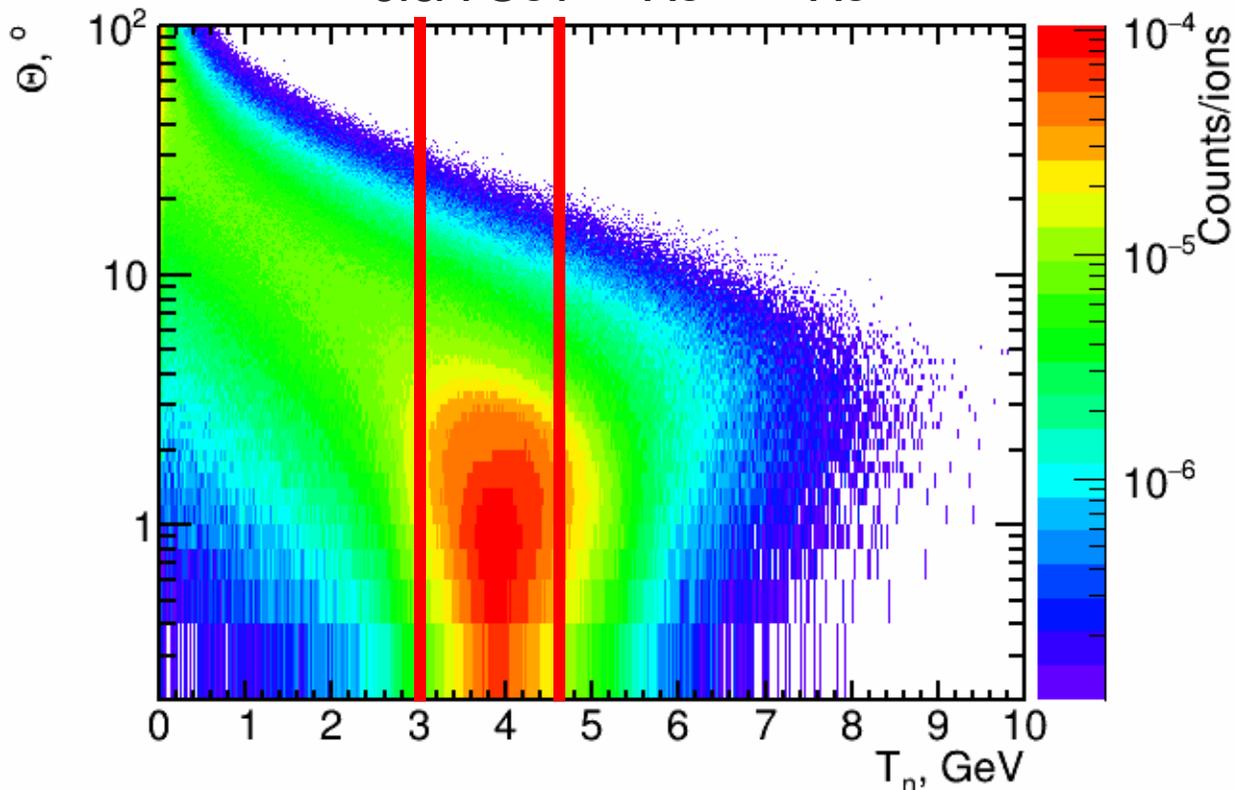
Средняя множественность нейтронов – **1.05**

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



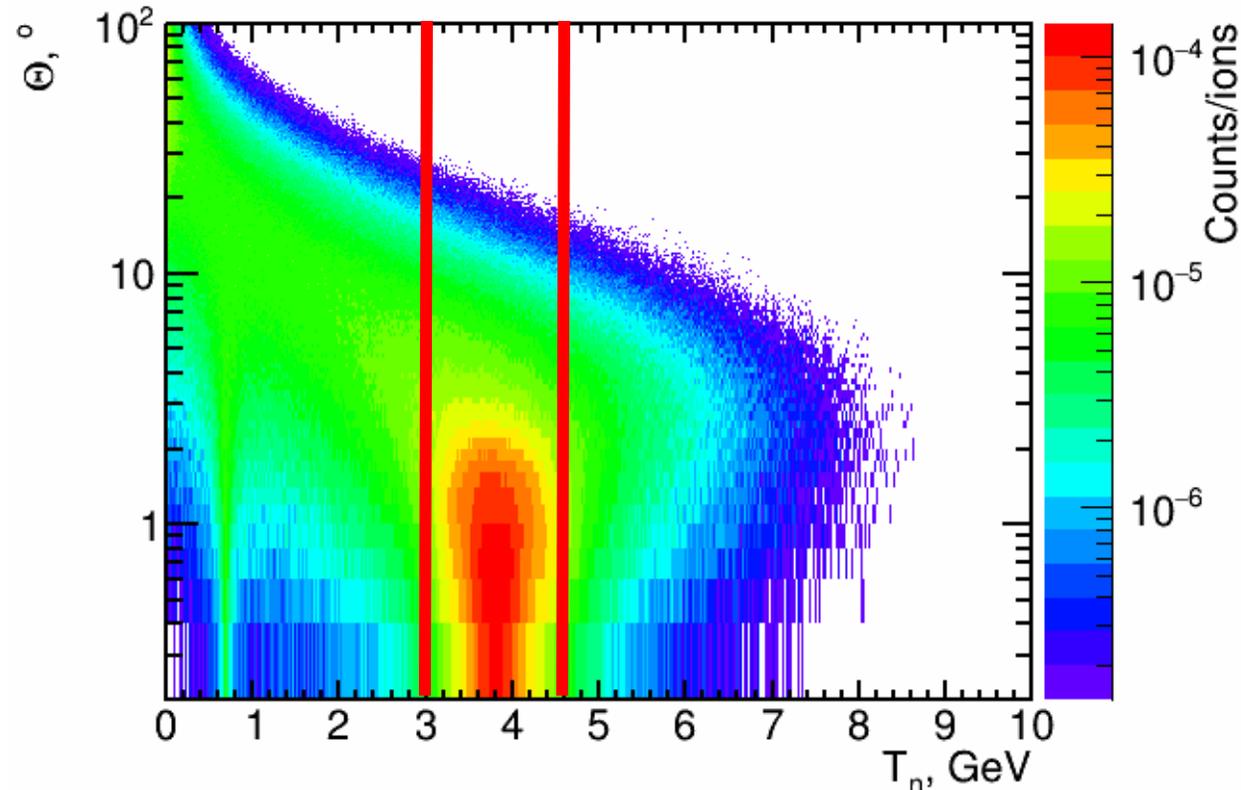
UrQMD-AMC (in Cascade mode)

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.

The sources of systematics are:

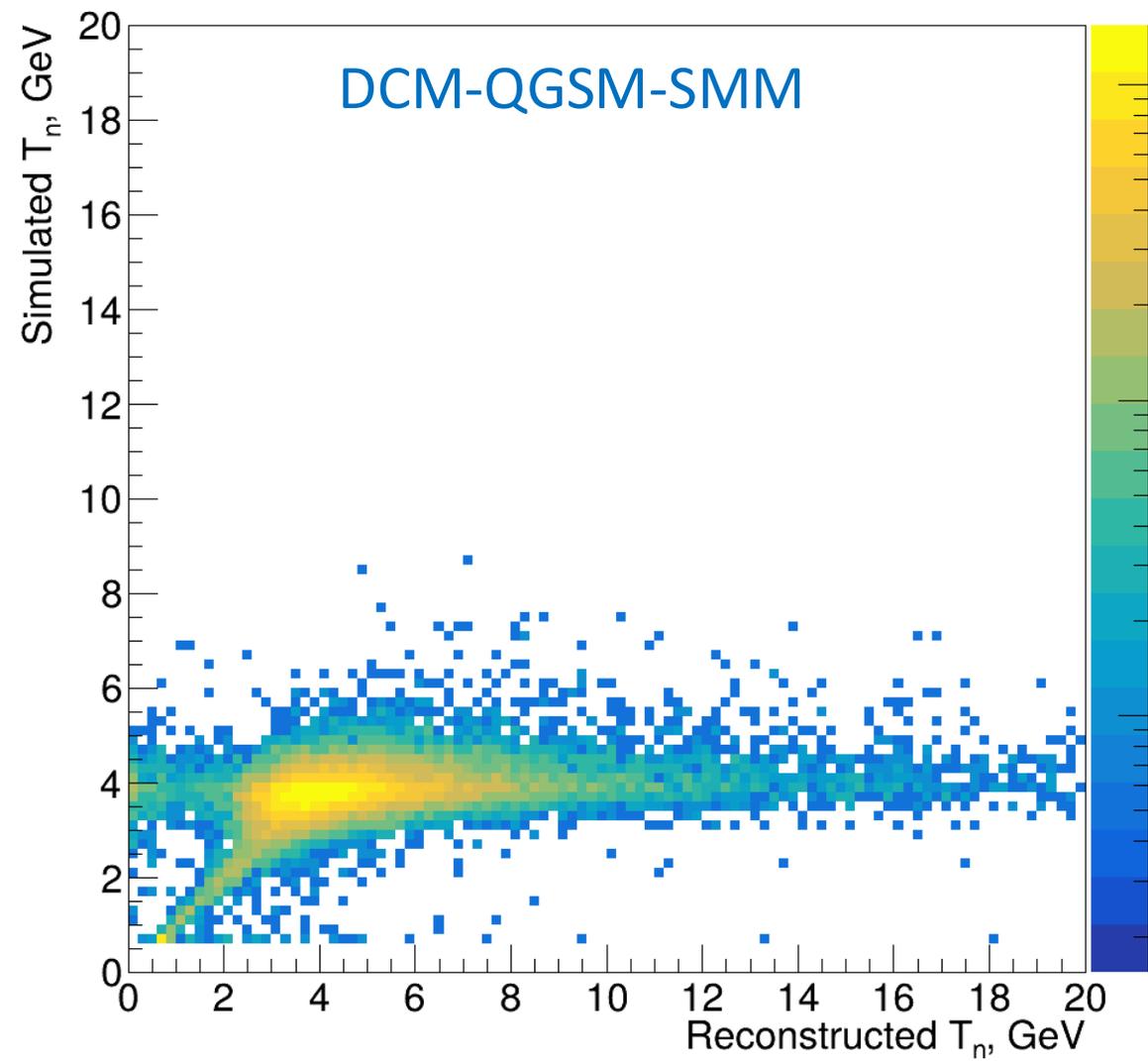
$$\Omega_n = \Omega_n^0 \cdot \varepsilon_{ev/ions}$$

$$\varepsilon_n = \varepsilon_n^0 \cdot \varepsilon_{time} \cdot \varepsilon_{modules} \cdot \varepsilon_{\gamma-rejection}$$

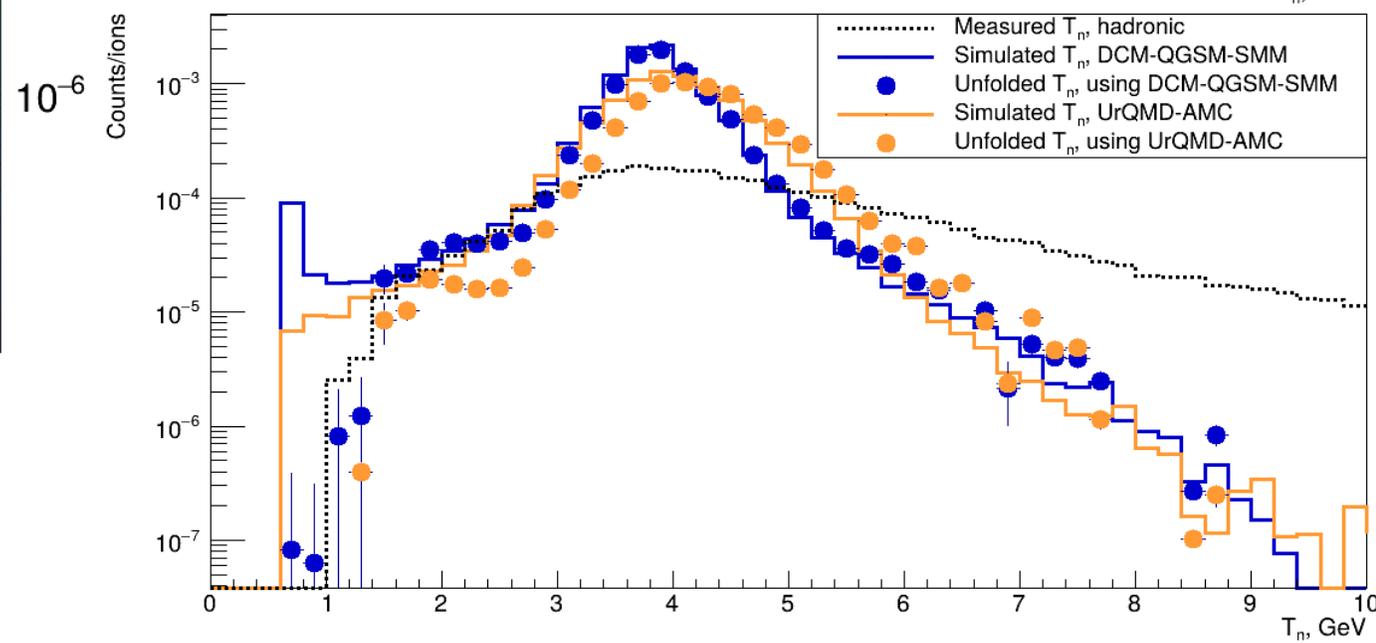
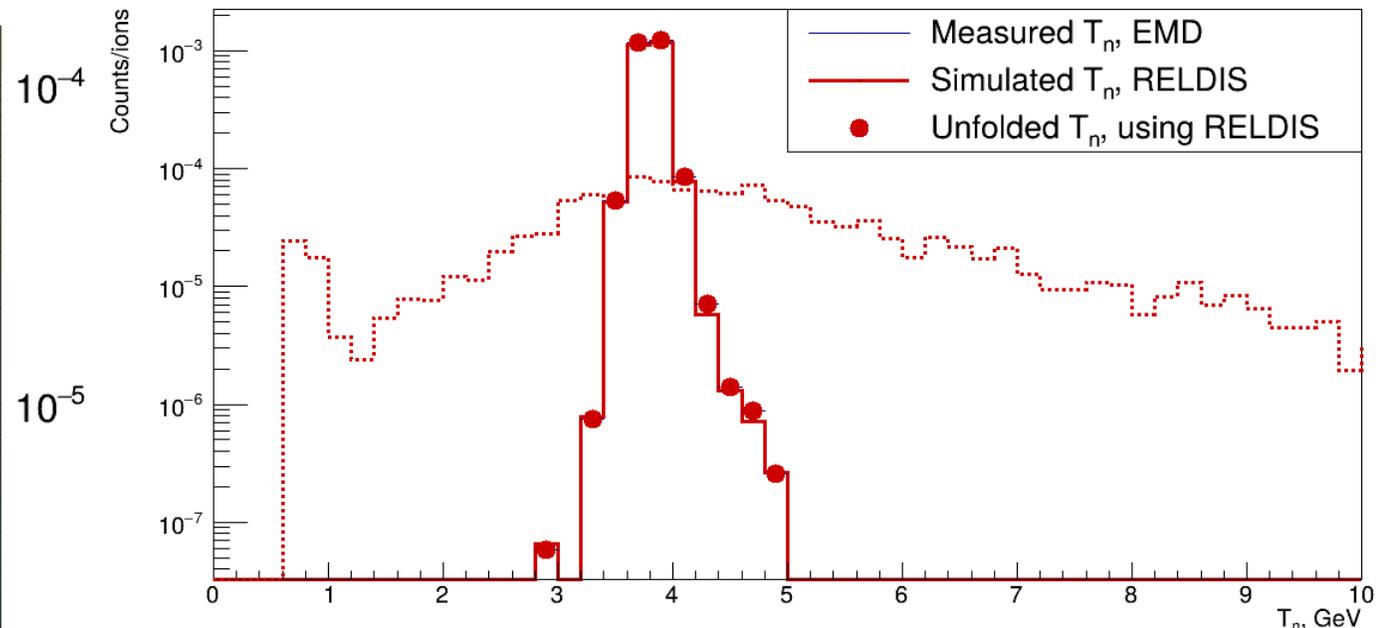
- The number of interactions per incident ion $\varepsilon_{ev/ions}$
- Source of trigger time ε_{time}
- Unevenness of the number of hits on HGND prototype modules $\varepsilon_{modules}$
- Uncertainty in the number of neutrons after photon rejection $\varepsilon_{\gamma-rejection}$

Source of systematics	EMD systematics RELDIS	Hadronic systematics	
		DCM-QGSM-SMM	UrQMD-AMC
$\varepsilon_{ev/ions}$	-	1.60%	
ε_{time}	0.53%	0.36%	
$\varepsilon_{modules}$	2.36%	7.72%	1.47%
$\varepsilon_{\gamma-rejection}$	0.73%	1.58%	2.55%
Total	2.52%	8.05%	3.36%

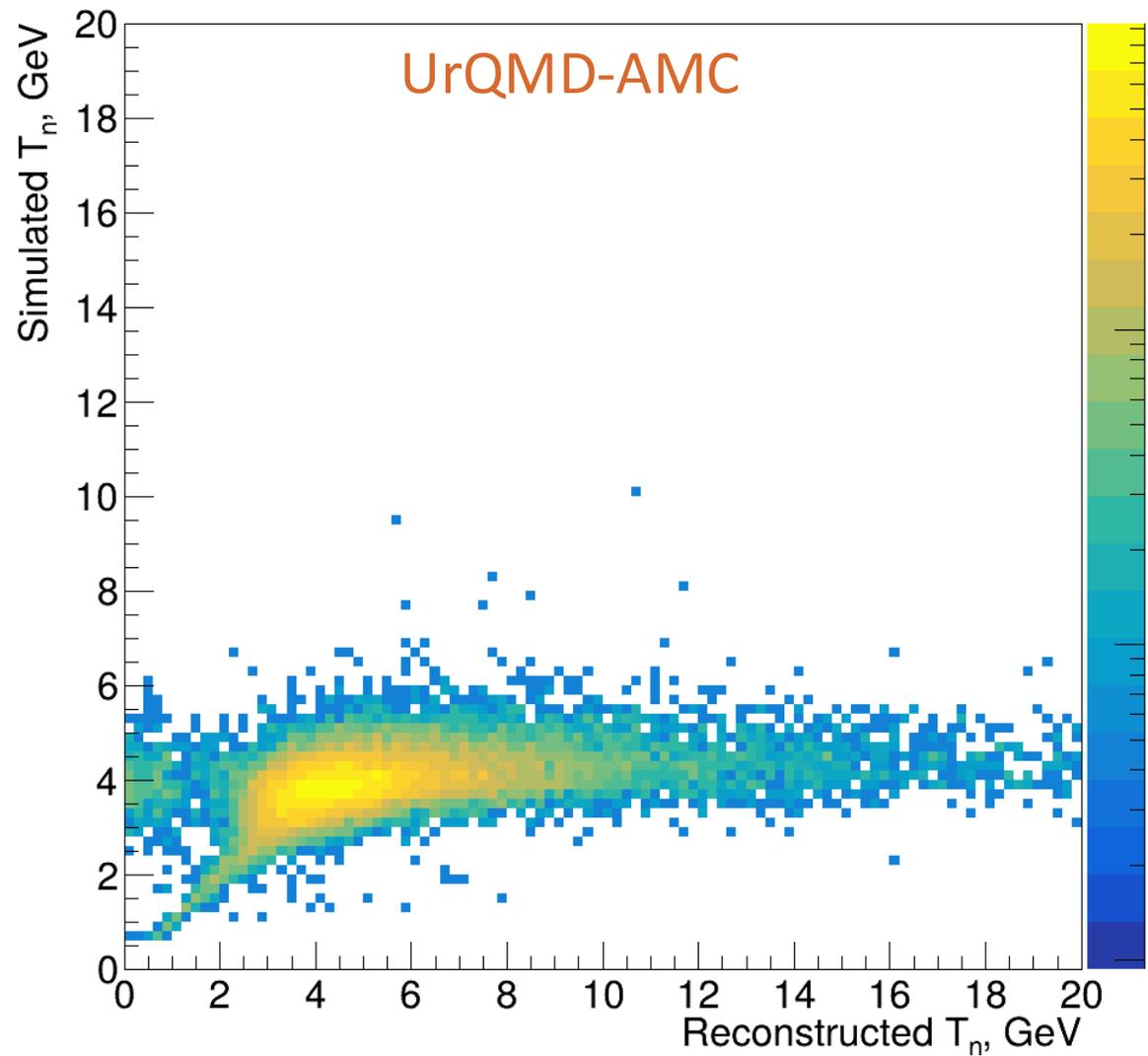
Unfolding using the response from DCM-QGSM-SMM for all



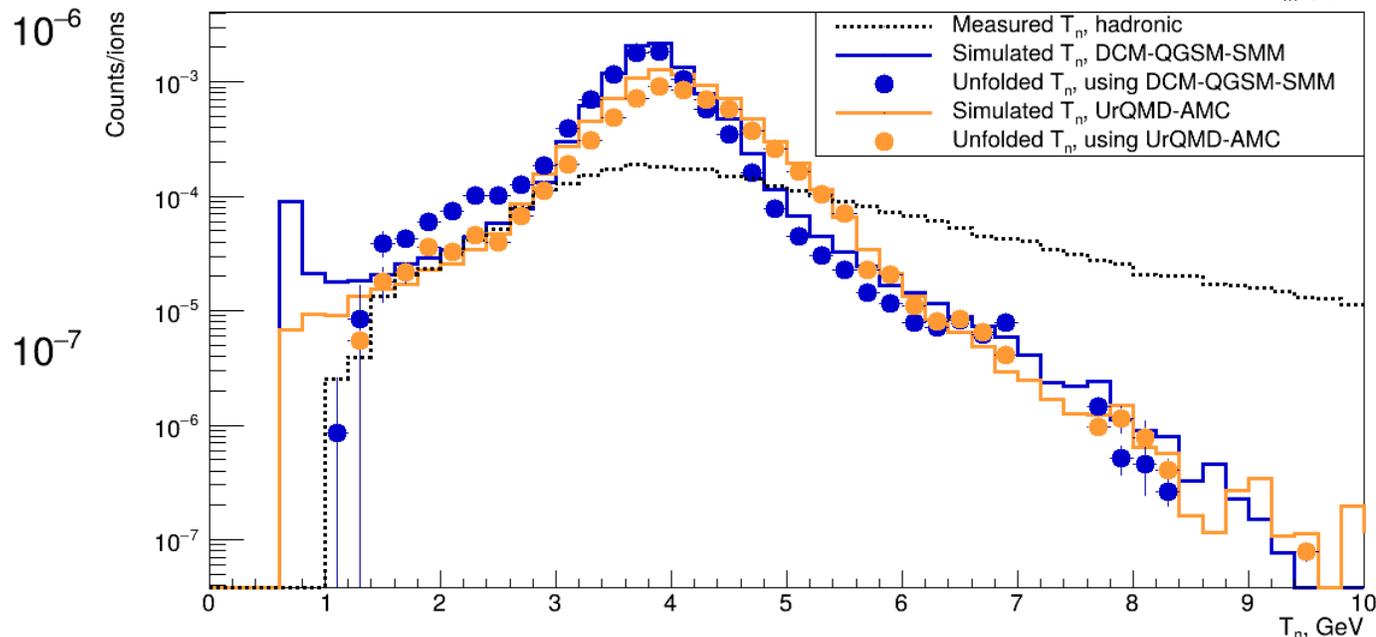
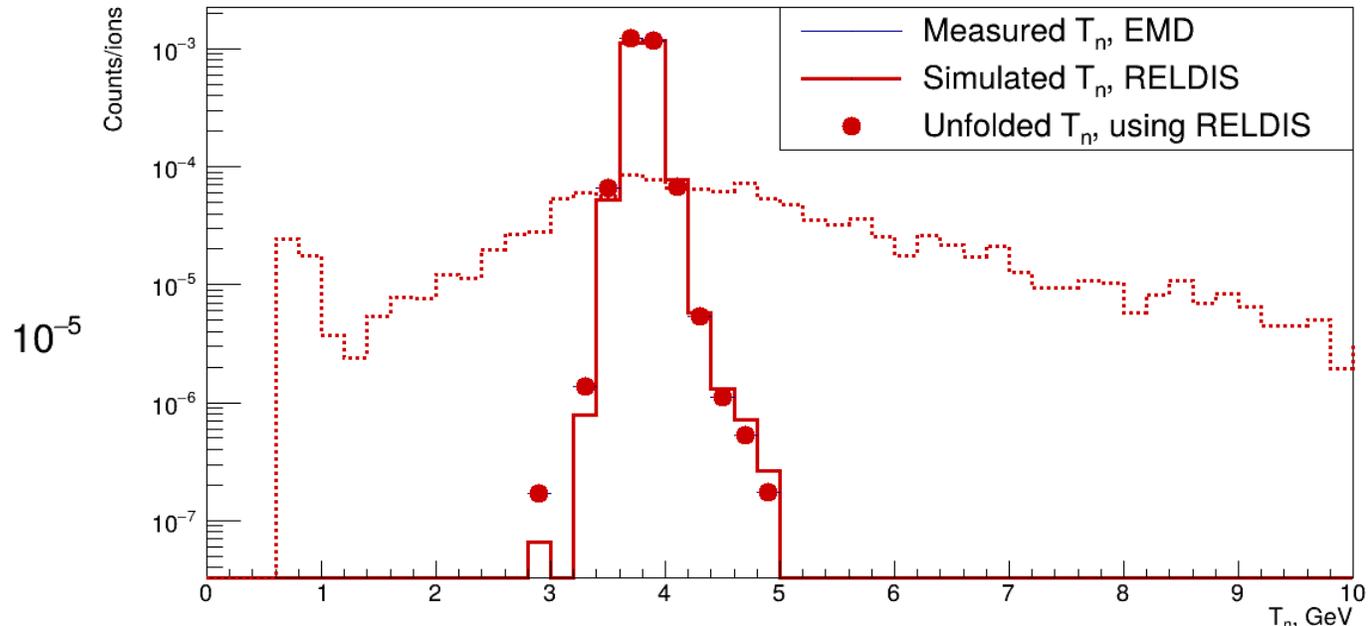
We can use the response matrix from other models with minor distortions.



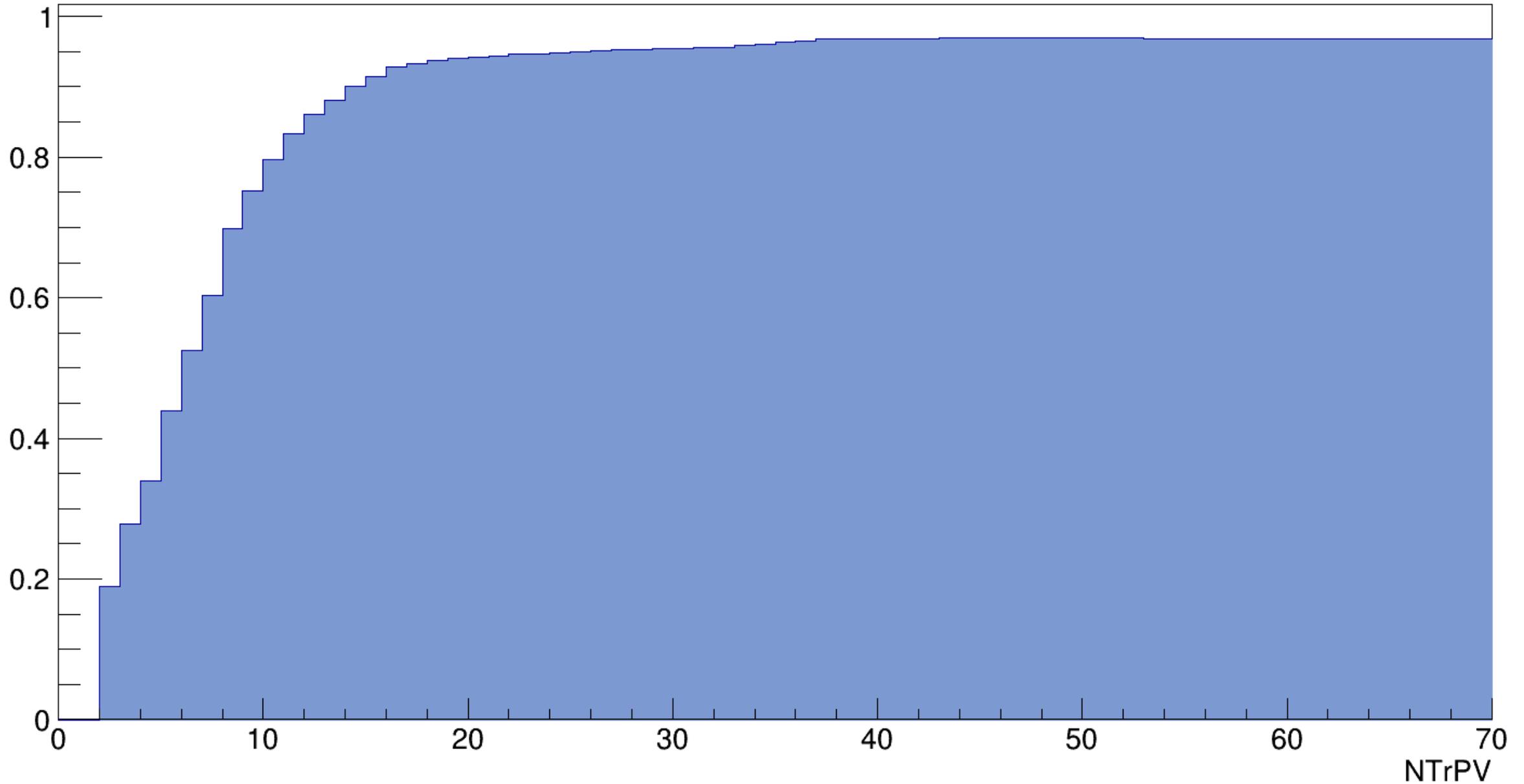
Unfolding using the response from UrQMD-AMC for all

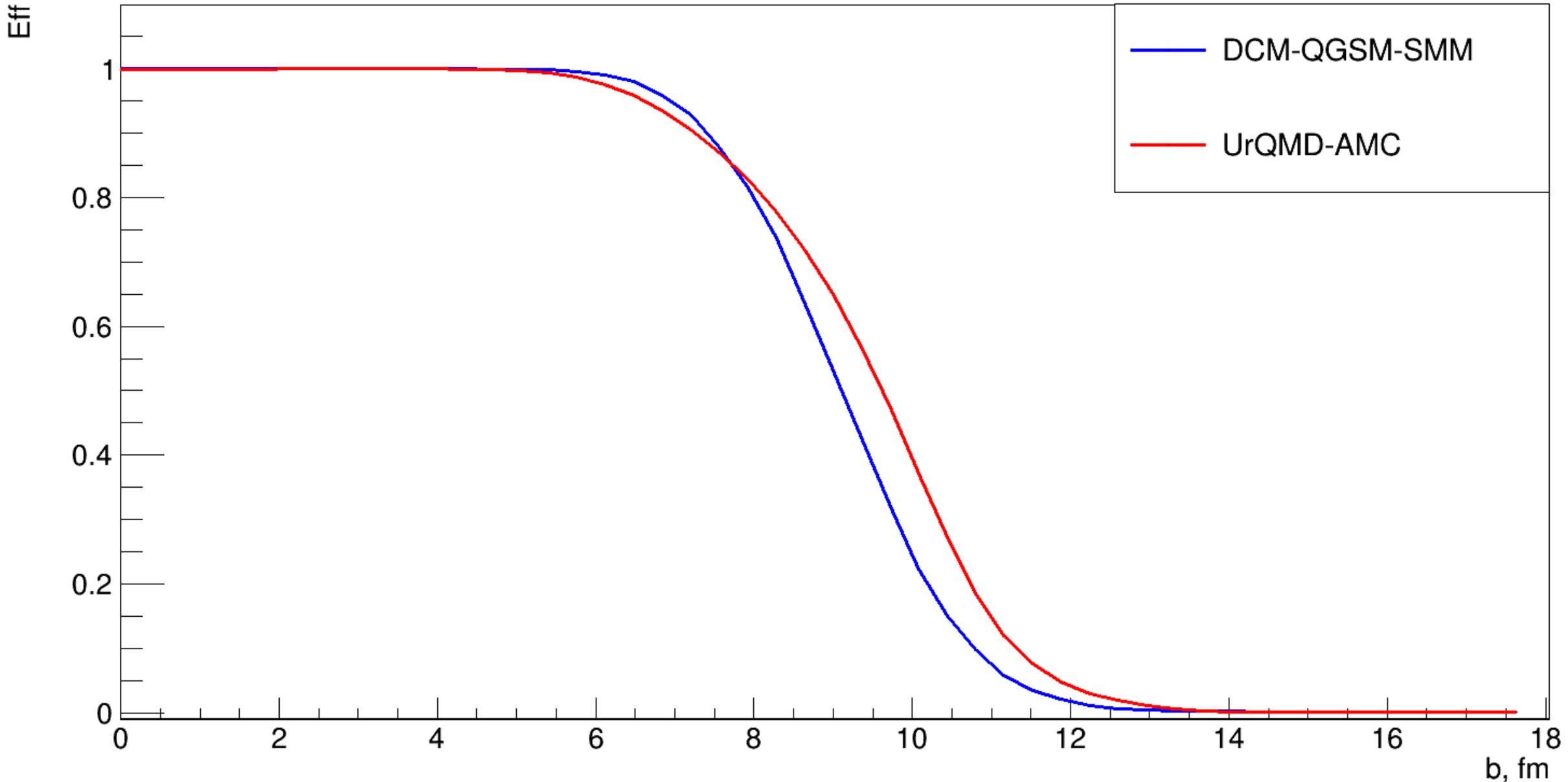


We can use the response matrix from other models with minor distortions.

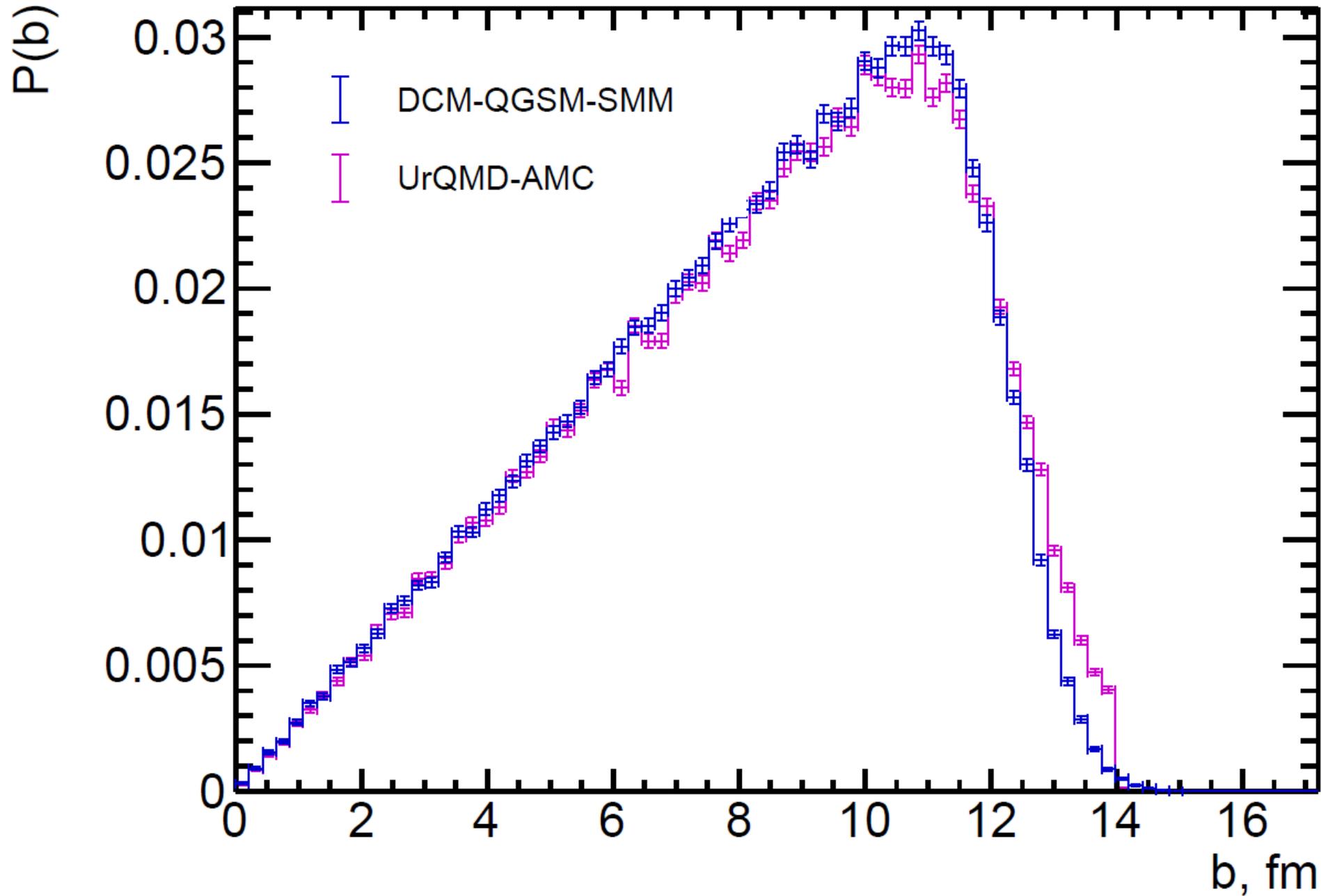


Trigger efficiency





Impact parameter distribution



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

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

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

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

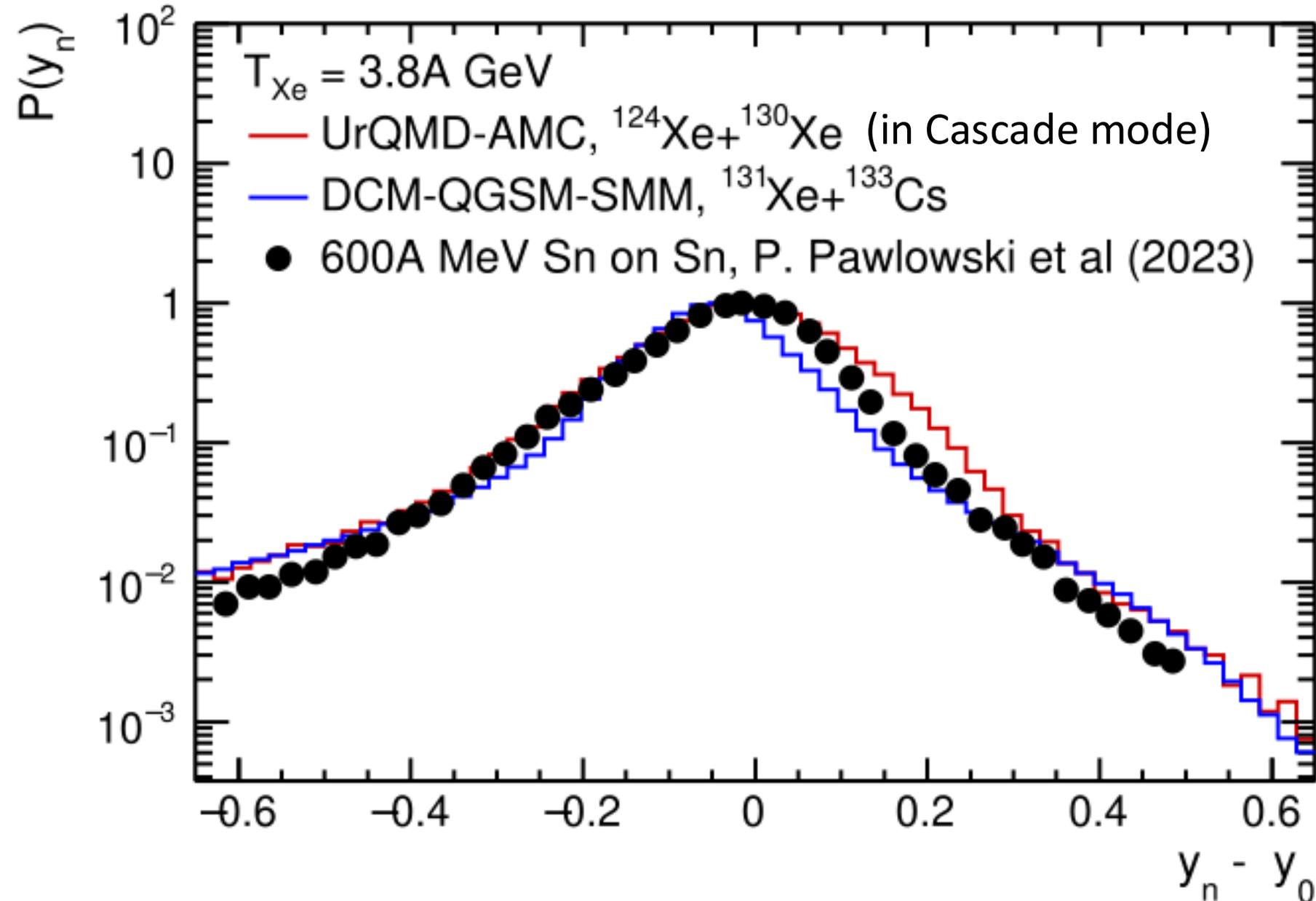
$$\Omega_n = \frac{N_{hit}}{N_{gen}} \quad \varepsilon_n = \frac{N_{rec}}{N_{hit}}$$

$$d = \lambda:$$

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

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

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



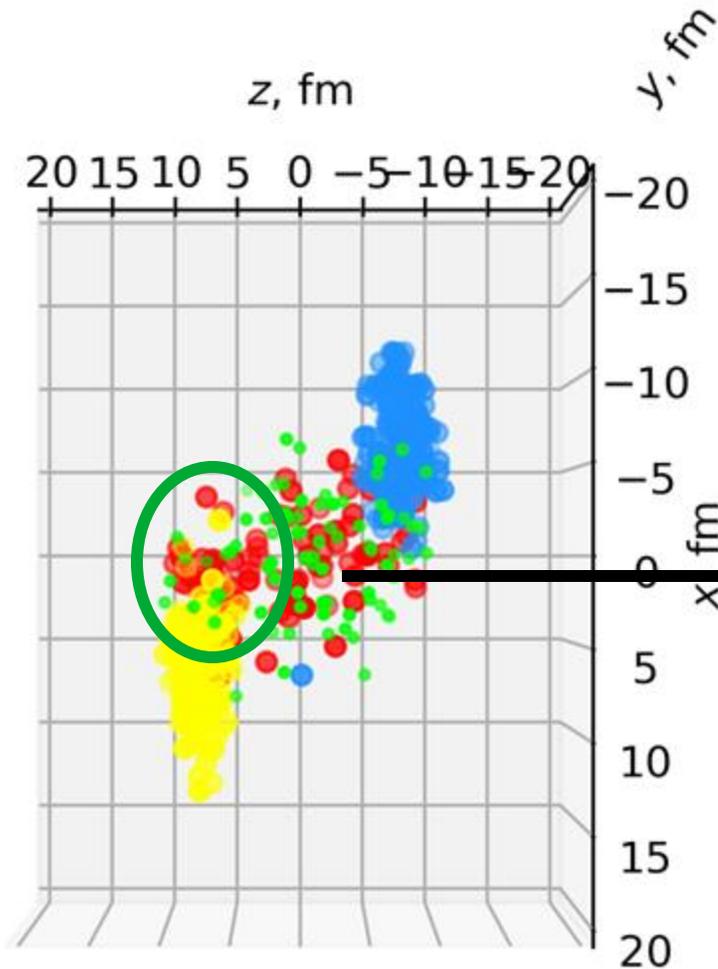
AMC:

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

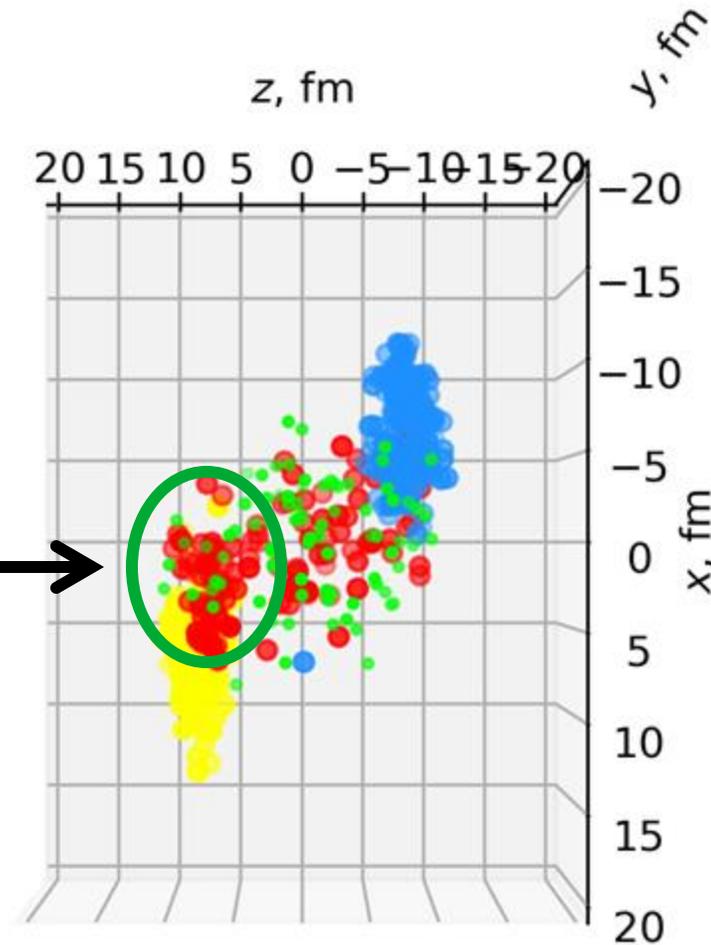


Knocking out some spectator nucleons by mesons

$b = 10 \text{ fm}$, $\tau = 13.5 \text{ fm}/c$

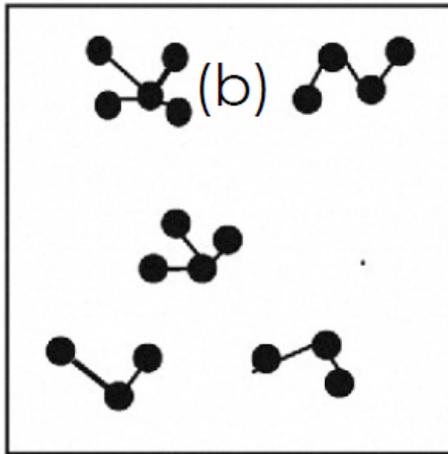
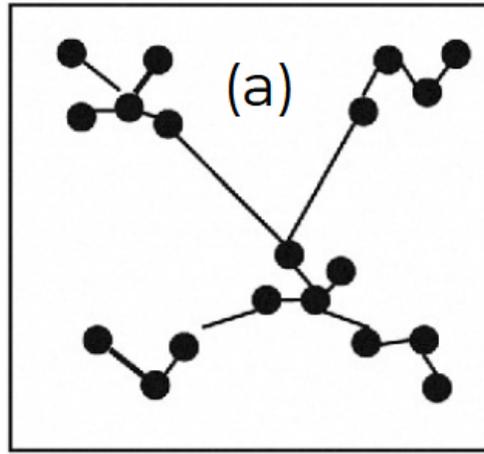


$b = 10 \text{ fm}$, $\tau = 14.0 \text{ fm}/c$

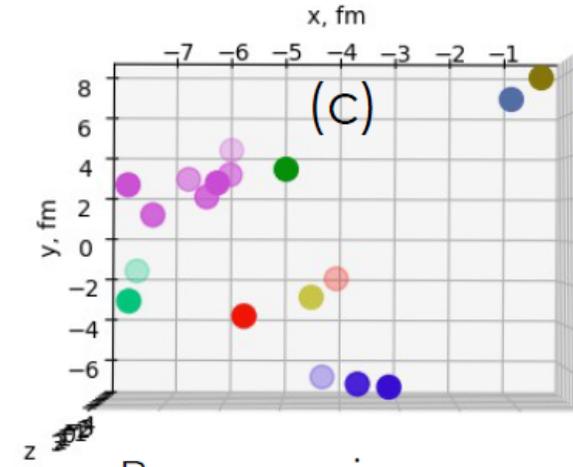


Blue and yellow – spectator nucleons, red – participant nucleons, green – produced mesons

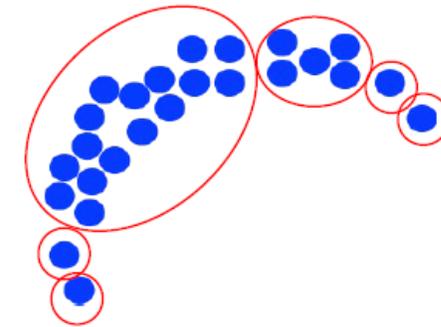
MST-clustering



Clusters representation on the Side A



Beam-eye view



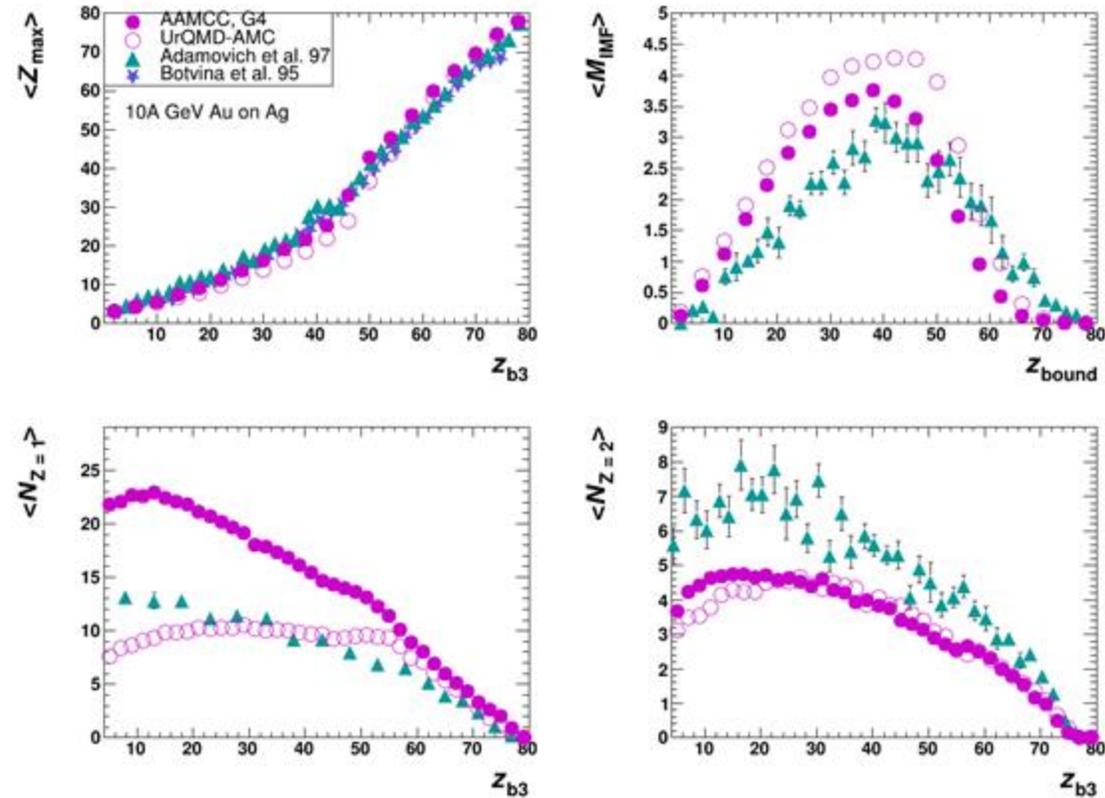
Prefragments in a central collision

- 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



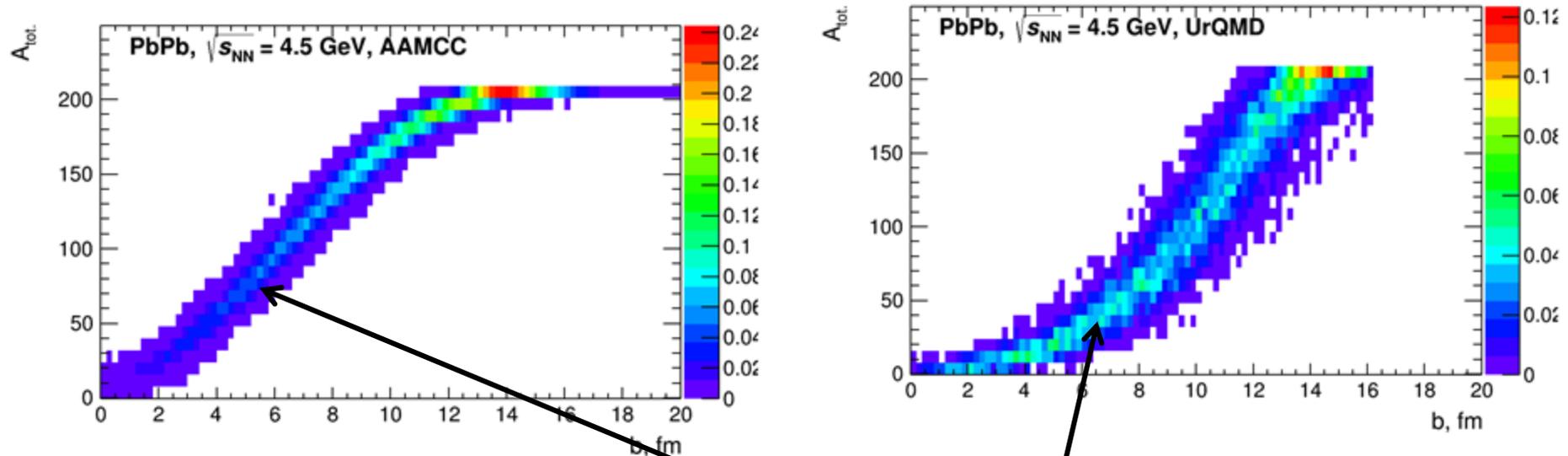
The prefragment is dynamically divided into several prefragments until thermodynamic equilibrium is reached.

^{197}Au fragmentation



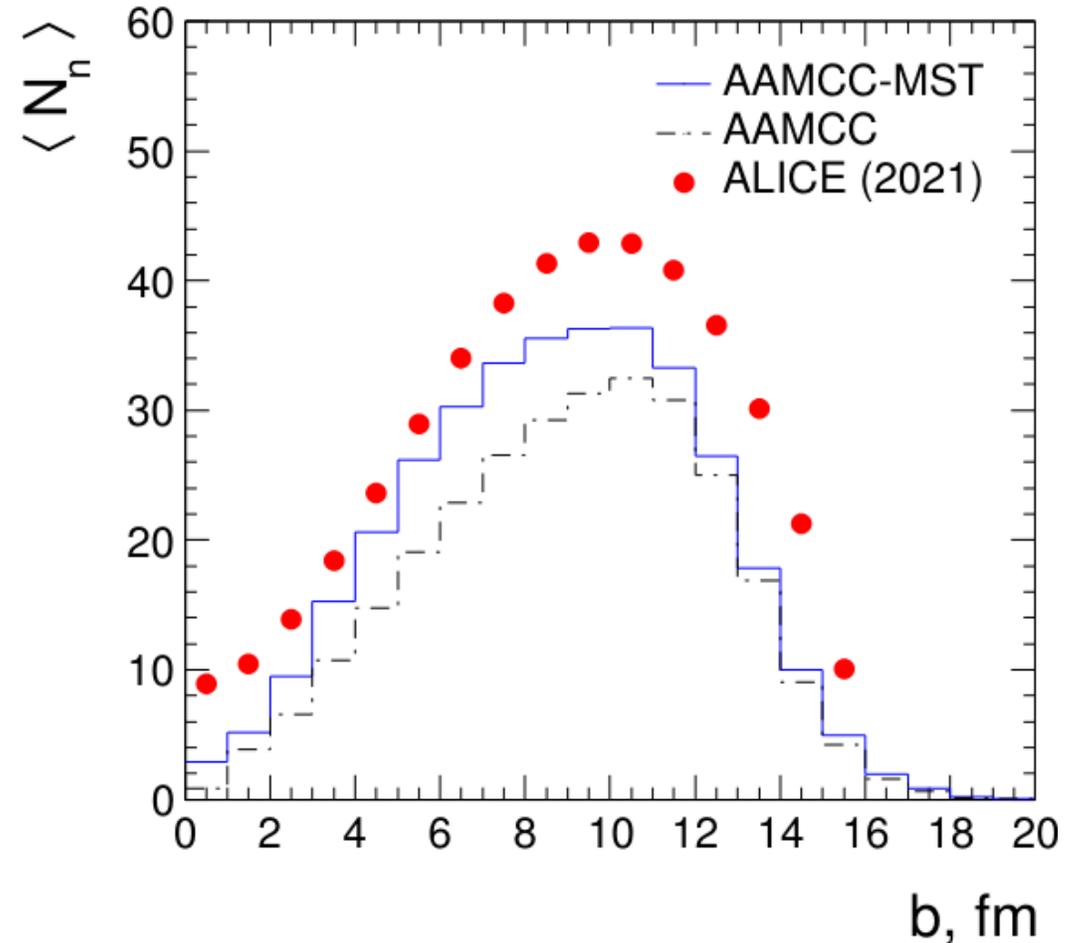
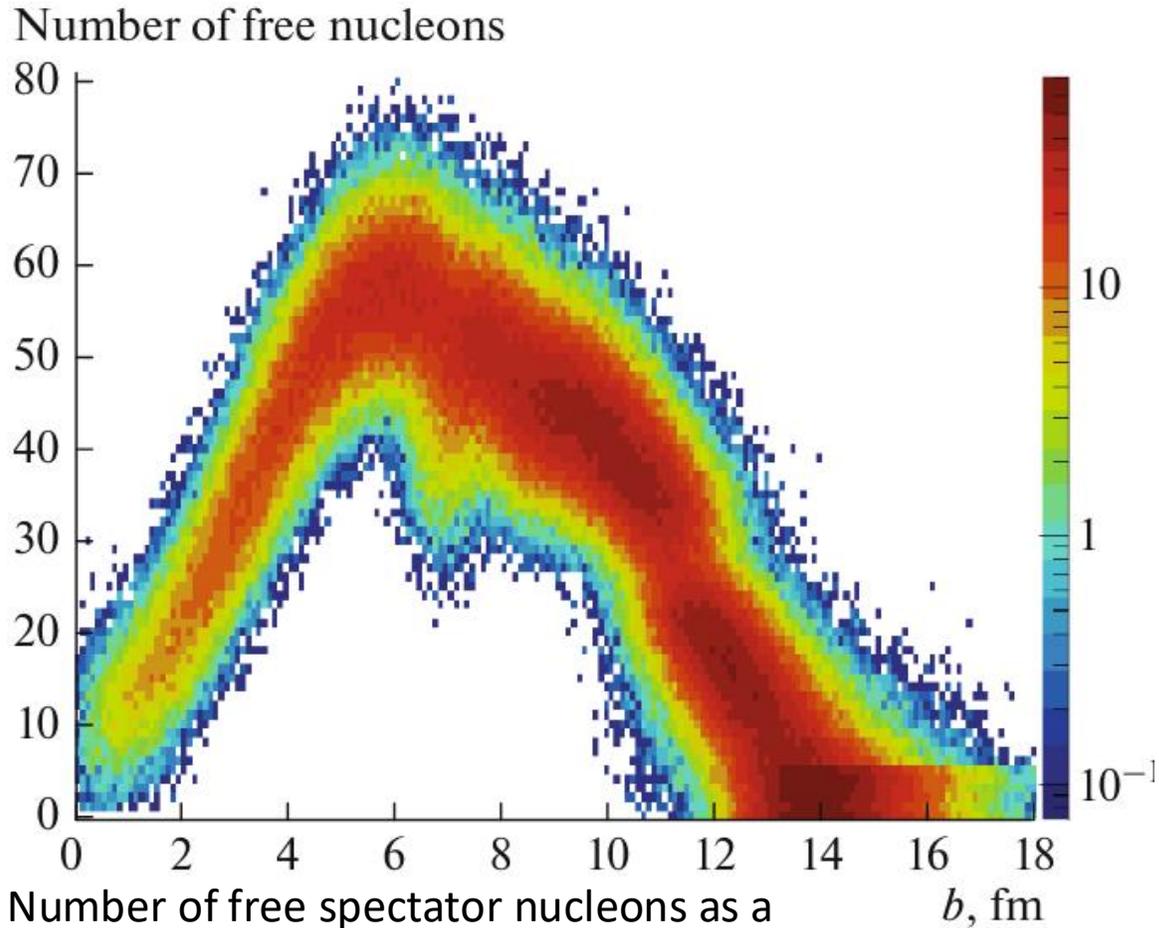
- UrQMD-AMC and AAMCC describe Z_{max} . Models give similar numbers of He
- UrQMD-AMC is systematically lower than AAMCC for $Z_{\text{bound}} < 50$. This is due to a smaller spectator volume in UrQMD.
- AAMCC is closer to data on M_{IMF} , while UrQMD-AMC overestimates M_{IMF} in semi-central collisions. 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

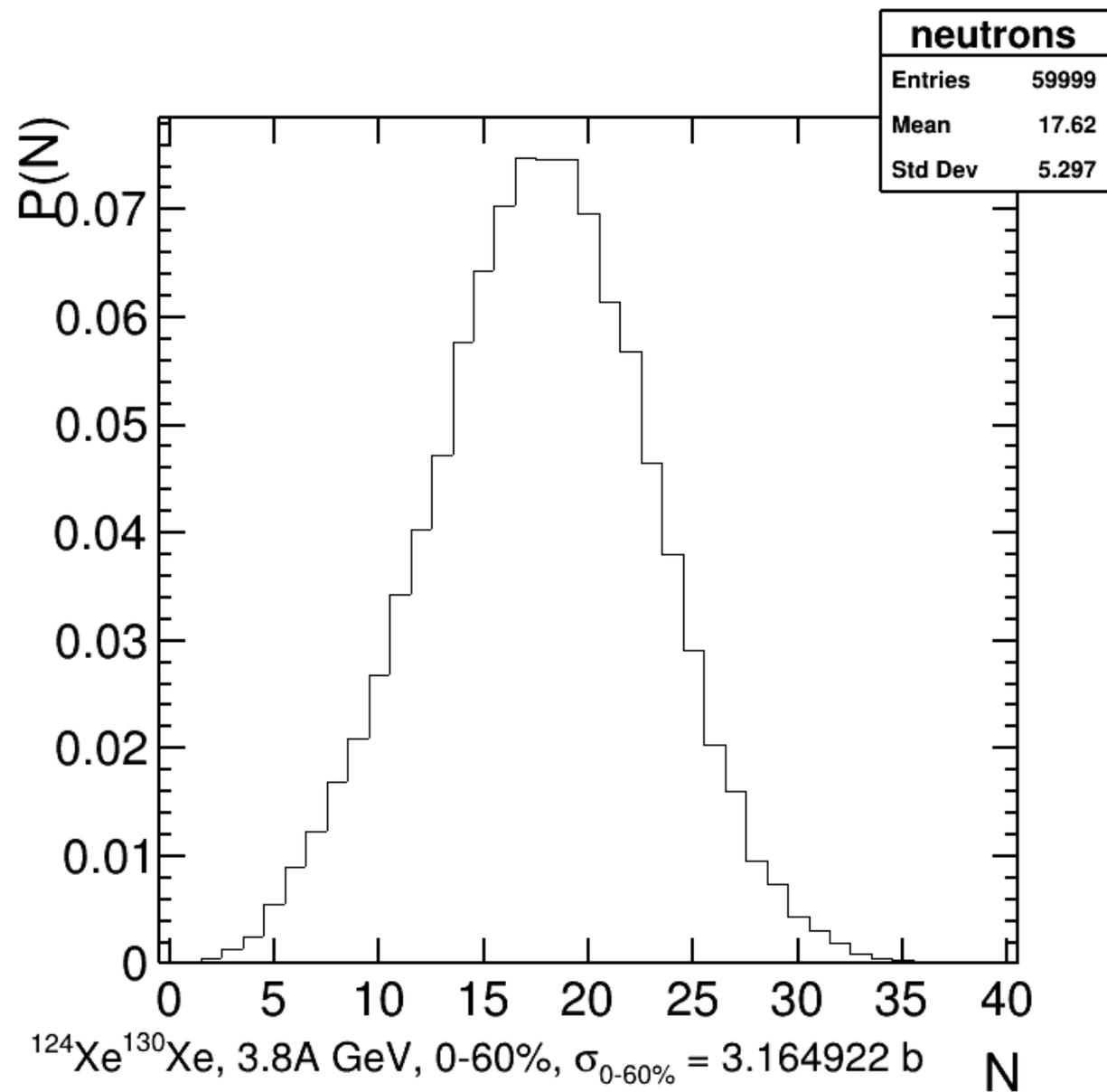
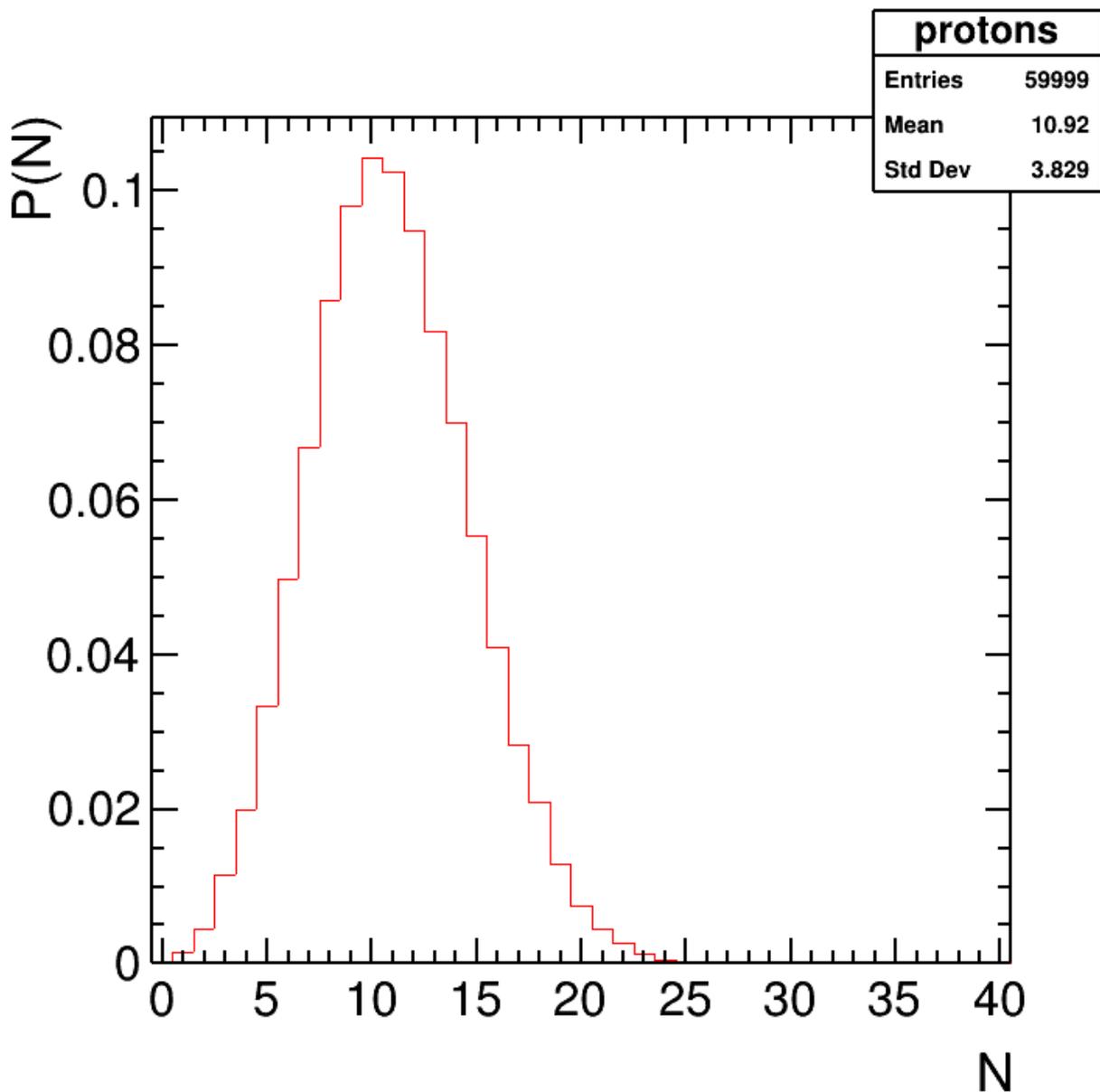


A. Svetlichnyi & I. Pshenichnov, Formation of Free and Bound Spectator Nucleons in Hadronic Interactions between Relativistic Nuclei. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* **2020**, 84 (8), 911–916.

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

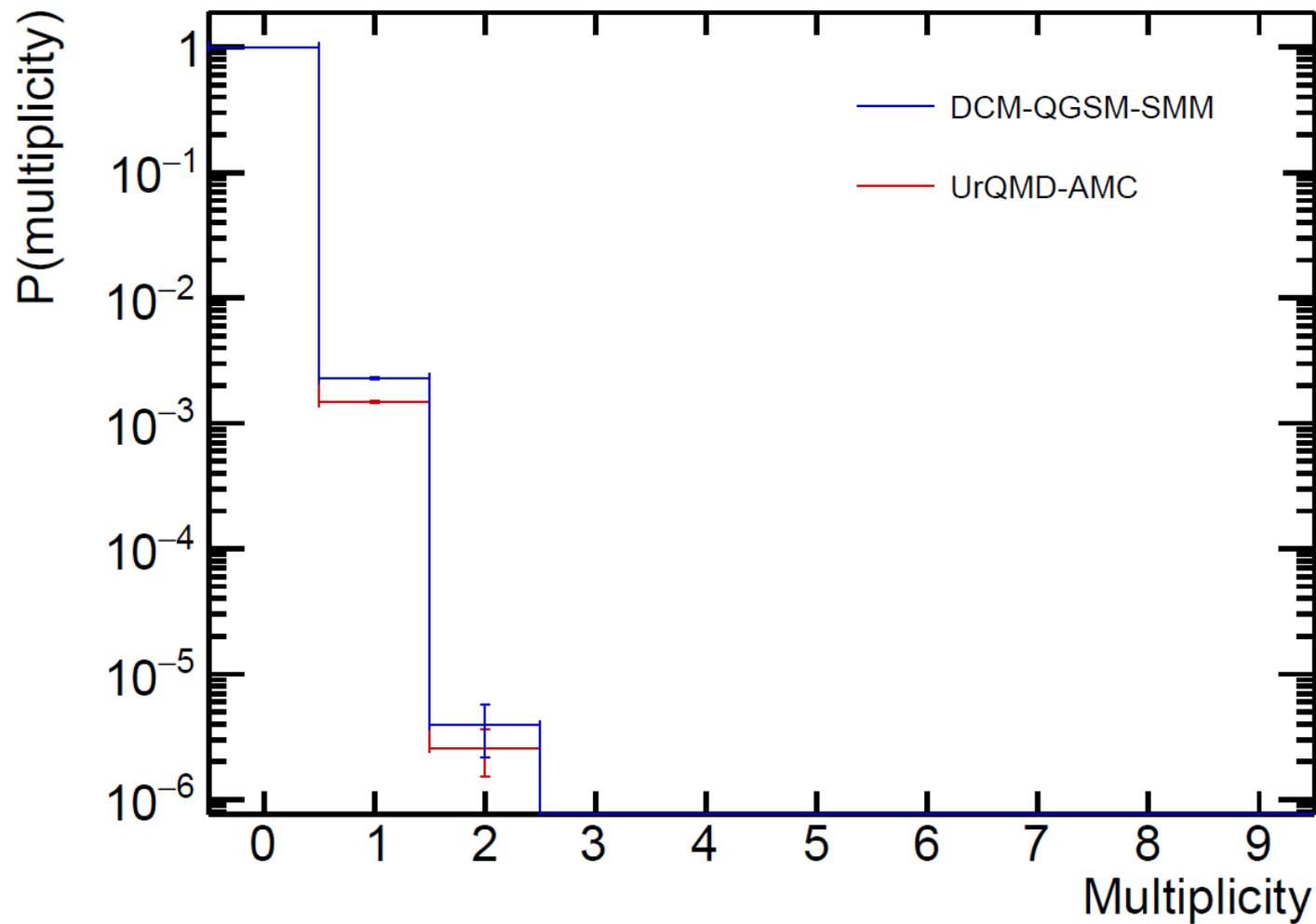
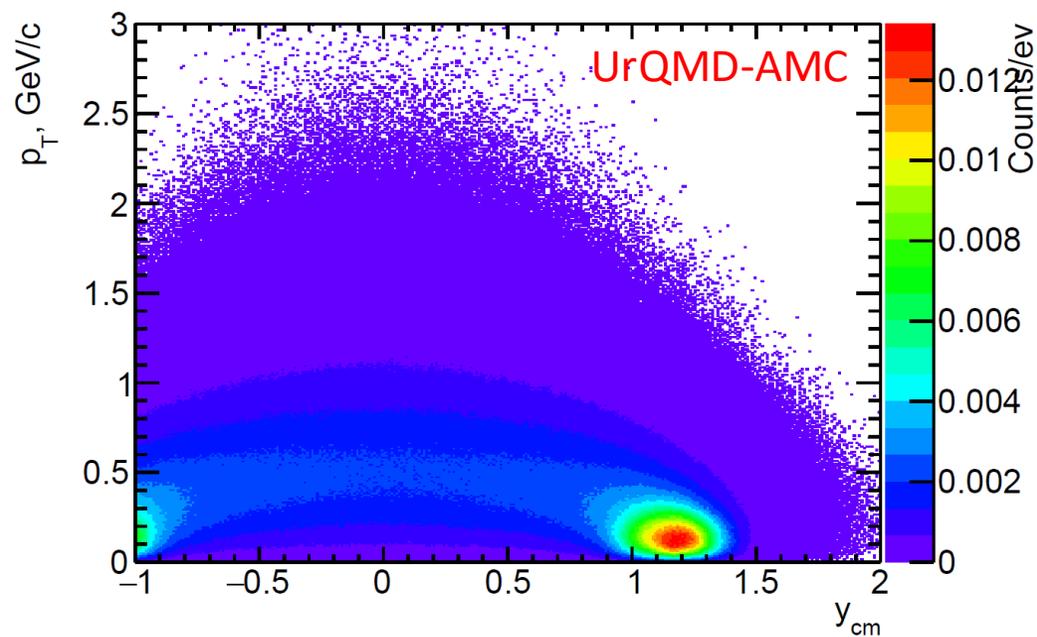
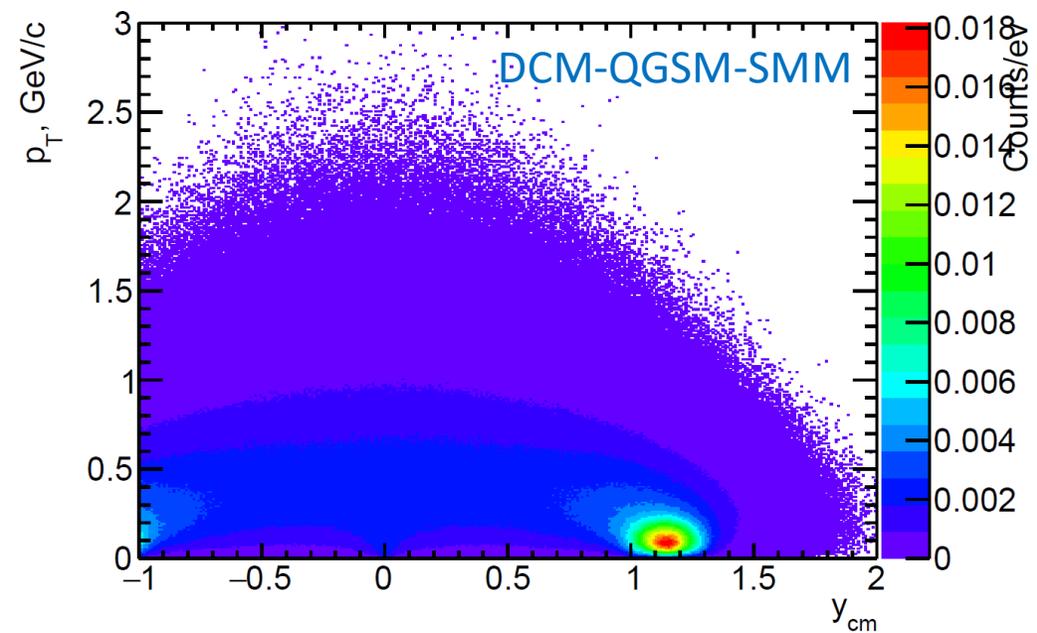
Nepeivoda, R. et al., Pre-Equilibrium Clustering in Production of Spectator Fragments in Collisions of Relativistic Nuclei. *Particles* **2022**, 5, 40–51.

Nuclear interaction



27°

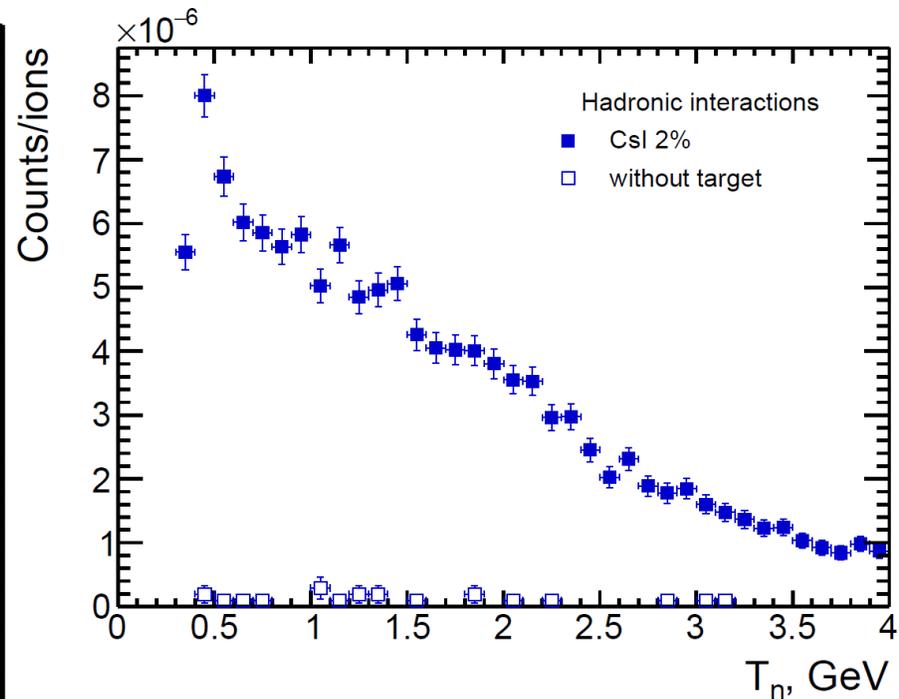
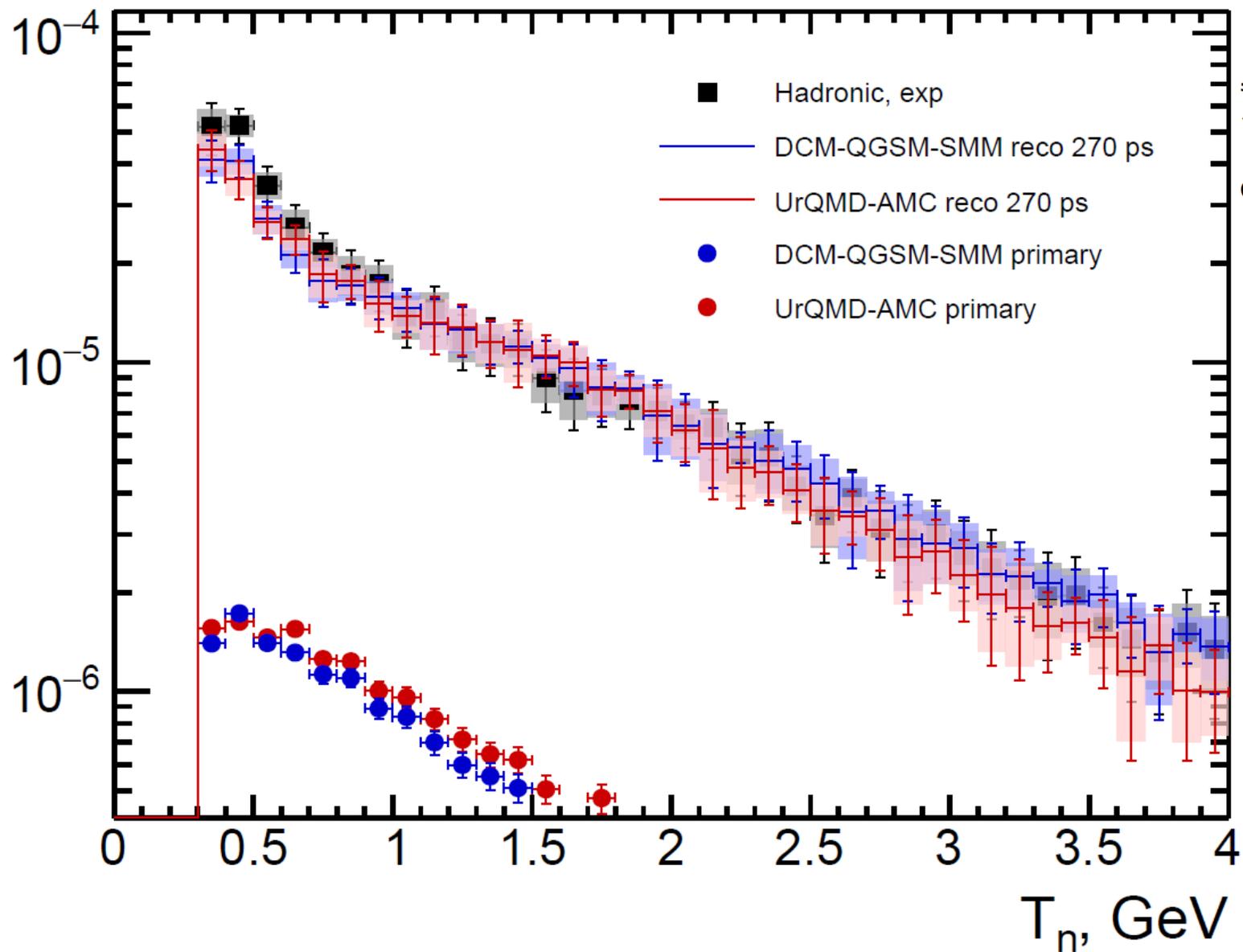
Neutron yields at 27°



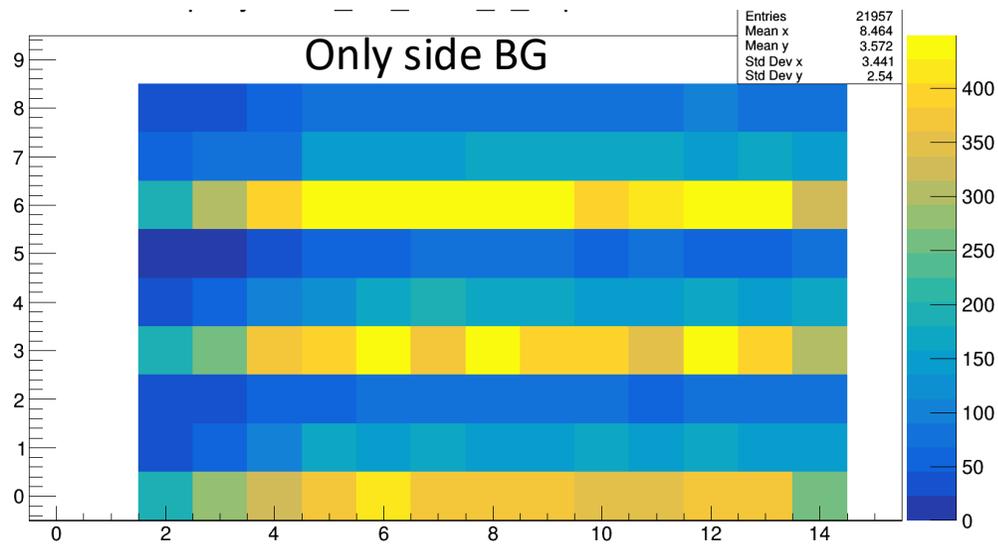
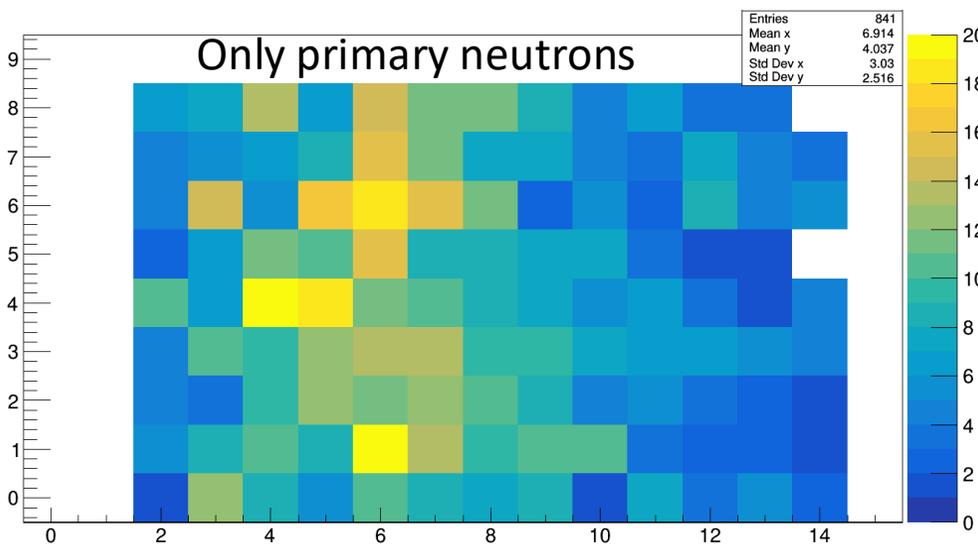
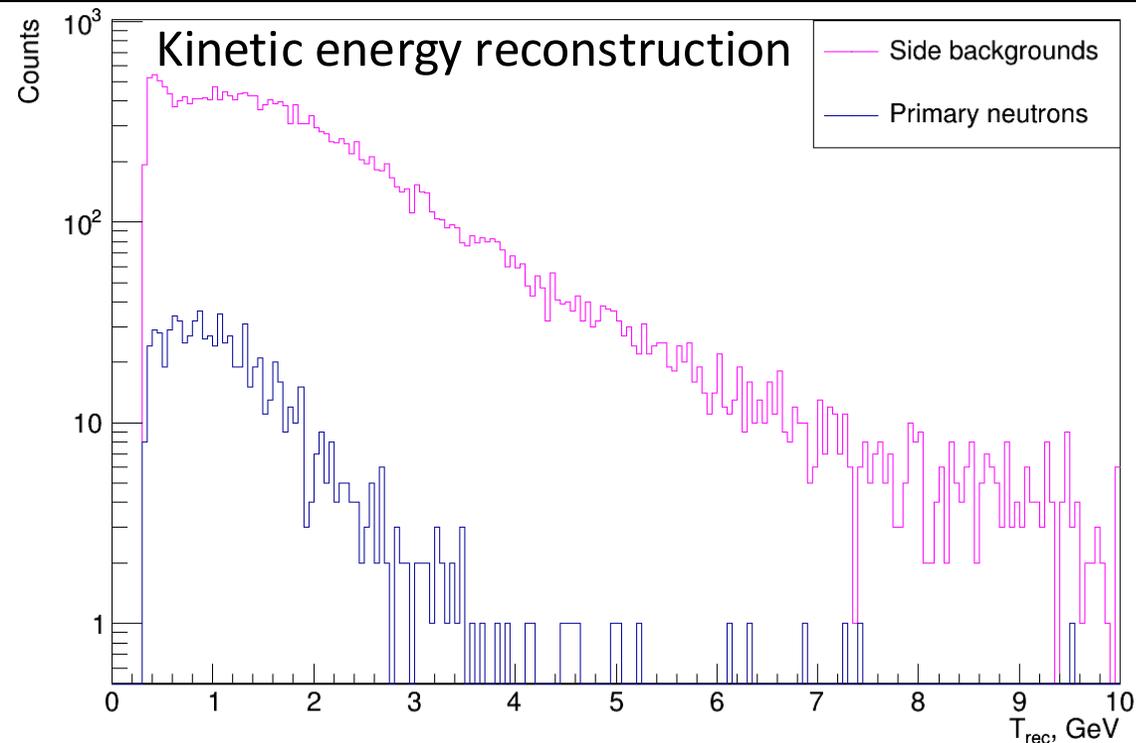
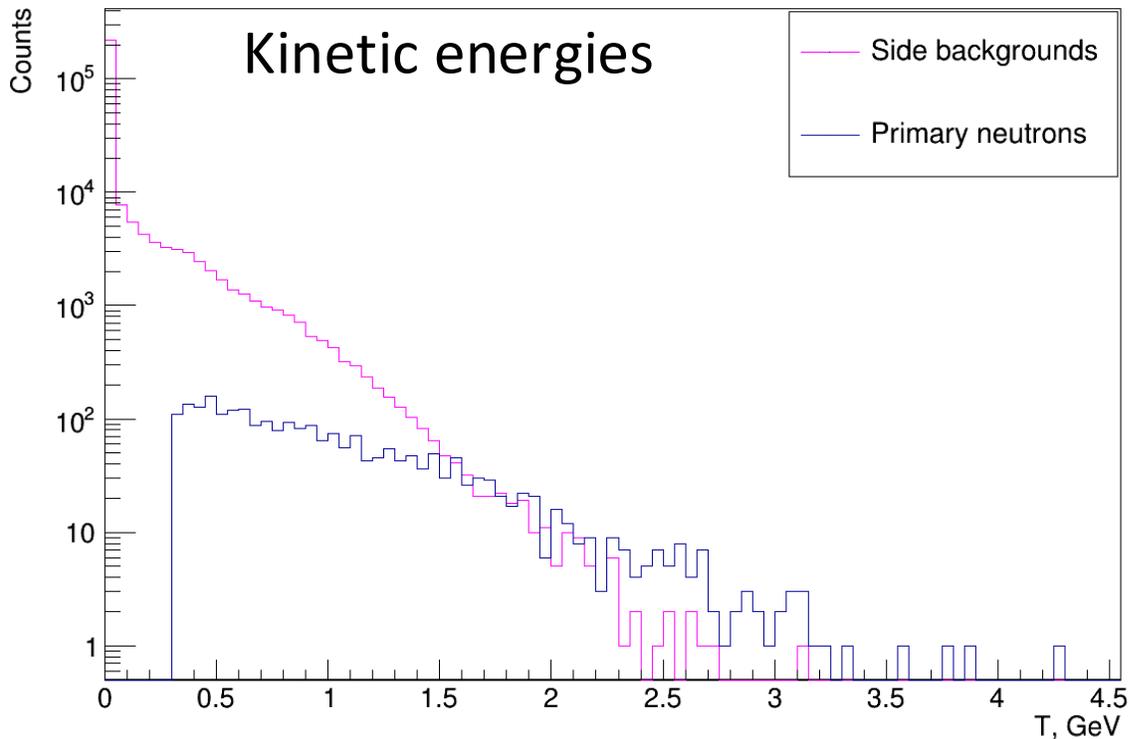
Neutron yields at 27°



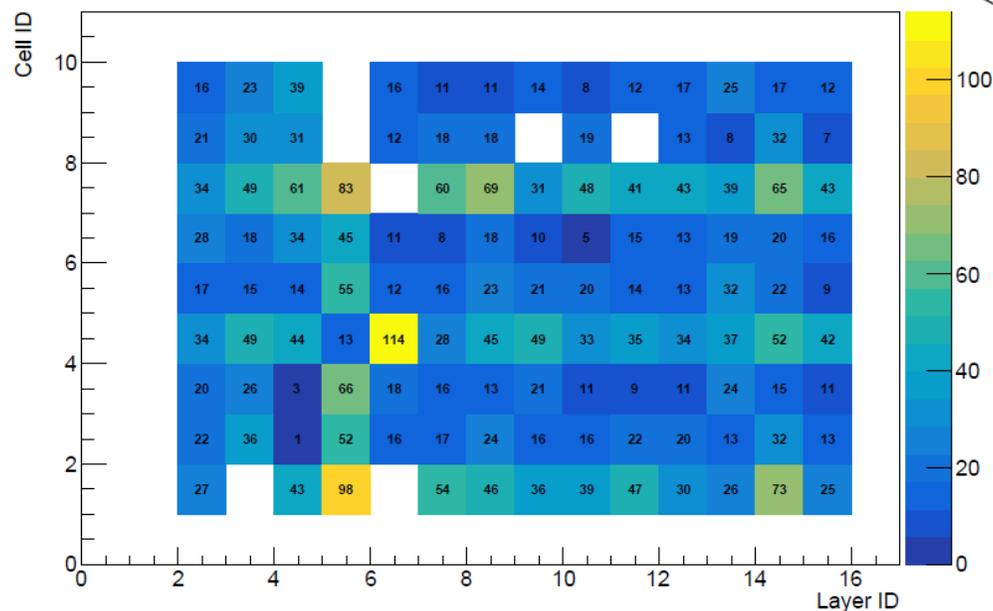
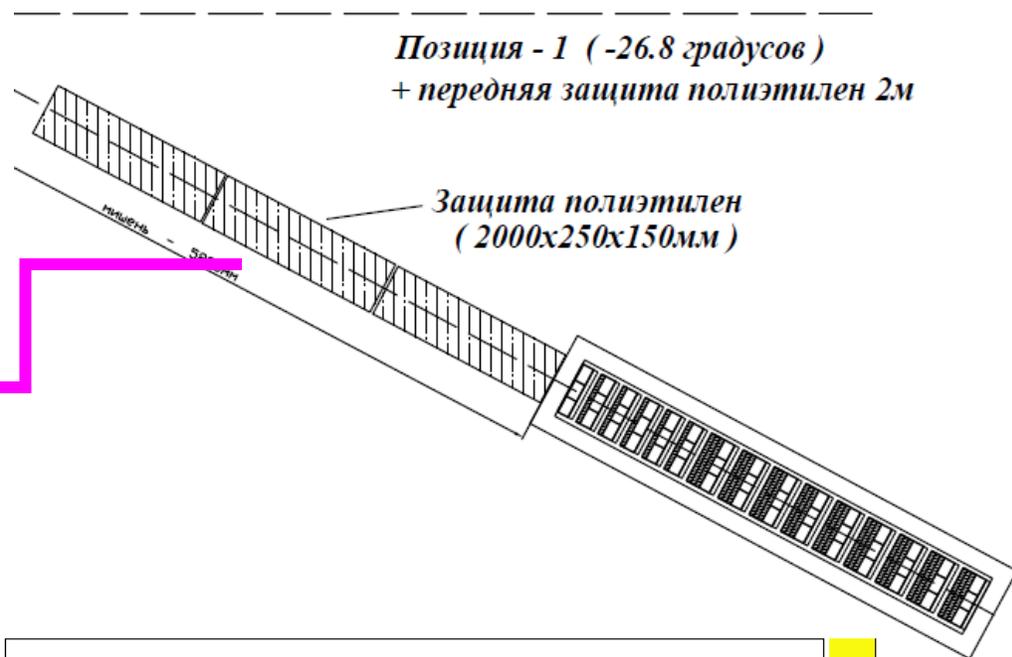
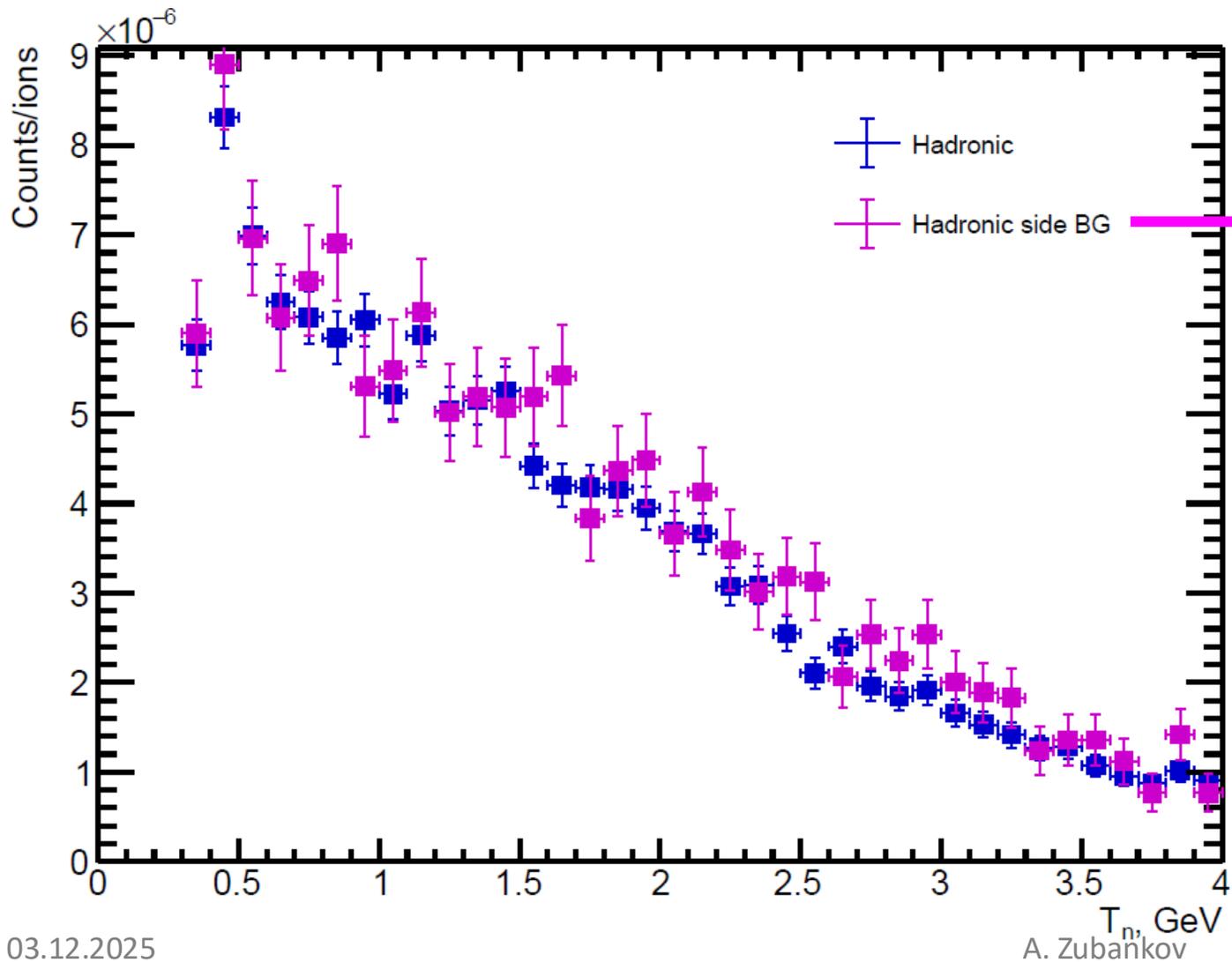
Counts/ions



Backgrounds DCM-QGSM-SMM



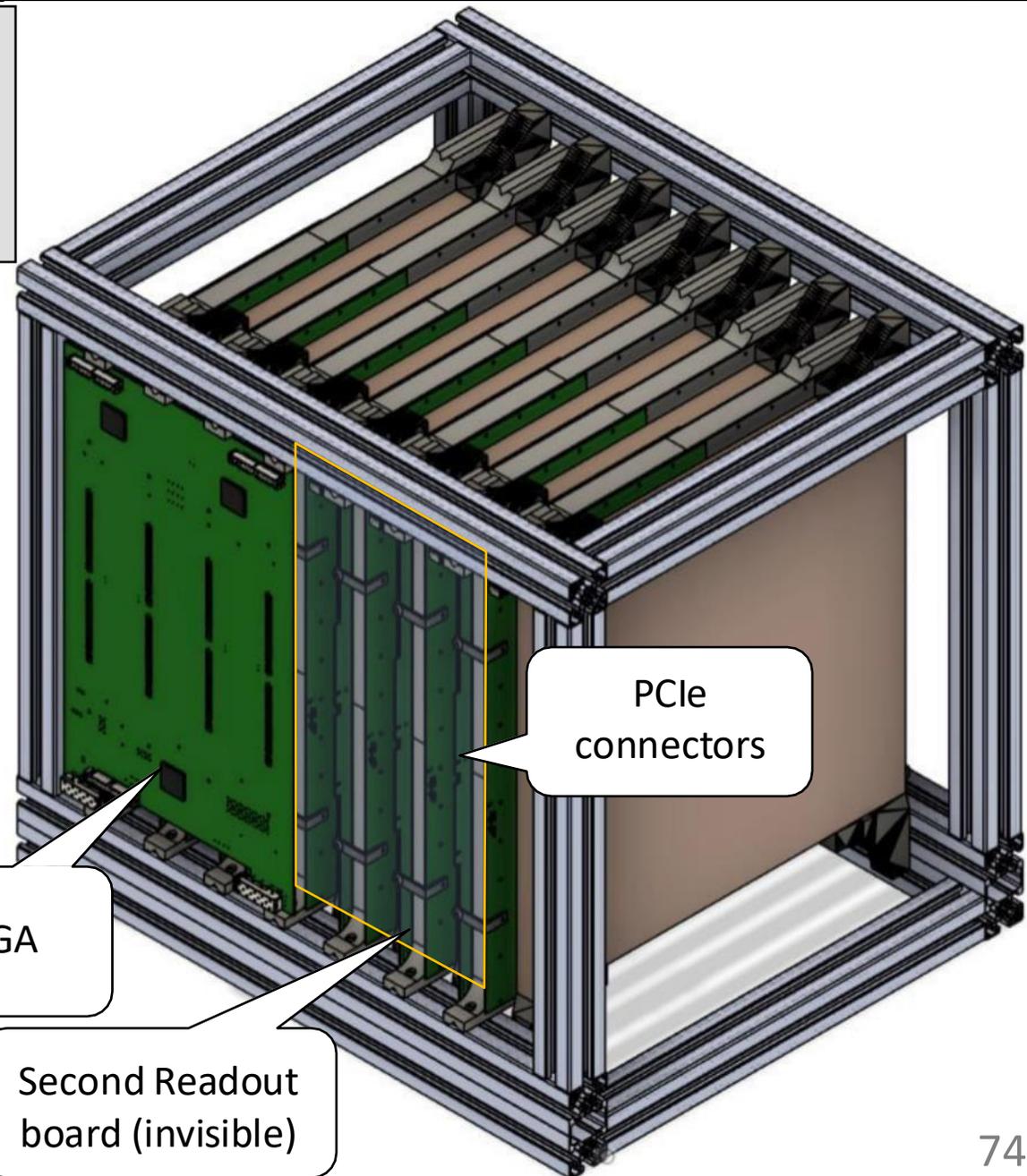
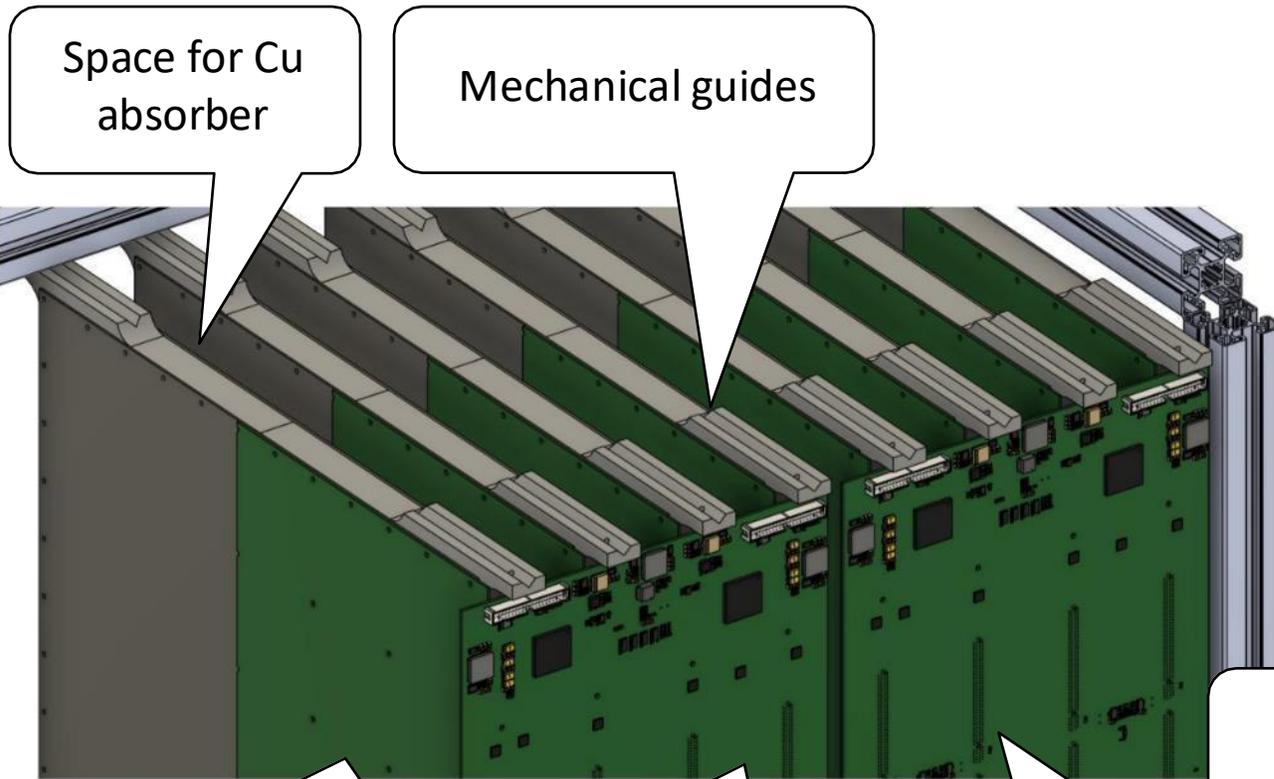
Experimental data
Kinetic energy reconstruction



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



FEE board coupled to scintillation matrix

Readout board

PCIe connectors