

Высокогранулярный нейтронный детектор и система передних детекторов спектаторов эксперимента $BM@N$

Николай Карпушкин
ИЯИ РАН



*Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН
17 — 21 февраля 2025, Москва*

Обзор

- Новый высокогранулярный нейтронный детектор эксперимента VM@N
 - Физическая мотивация измерения нейтронов в экспериментах по столкновению тяжелых ионов
 - Конструкция детектора и исследование его характеристик
 - Статус создания детектора
- Передние детекторы спектаторов эксперимента VM@N
 - Задачи и конструкция детекторов
 - Рабочие характеристики на физическом сеансе Xe+CsI

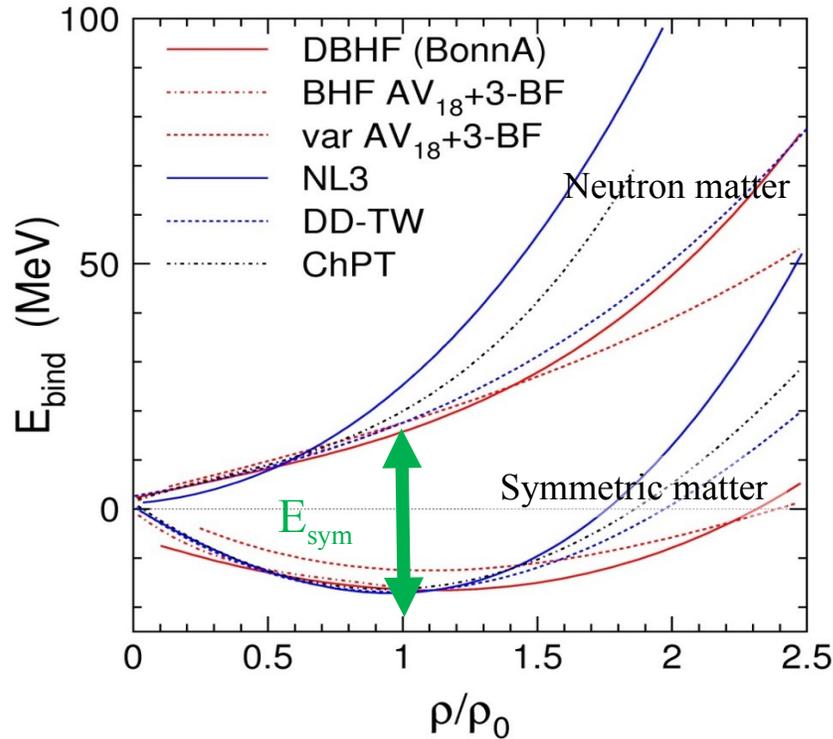
Уравнение состояния материи с высокой барионной плотностью

Энергия связи на нуклон
Изоспиновая асимметрия:
 $\delta = (\rho_n - \rho_p) / \rho$

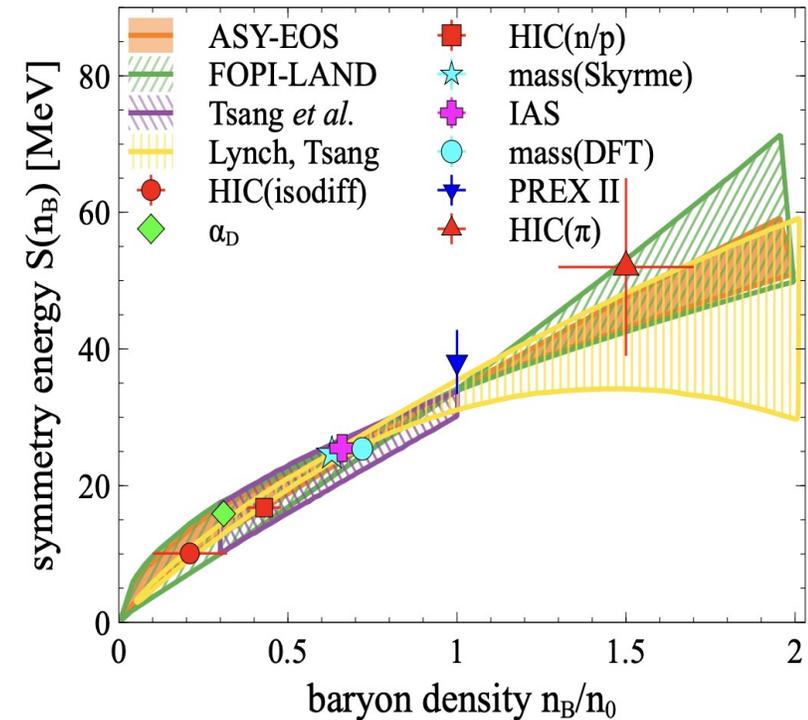
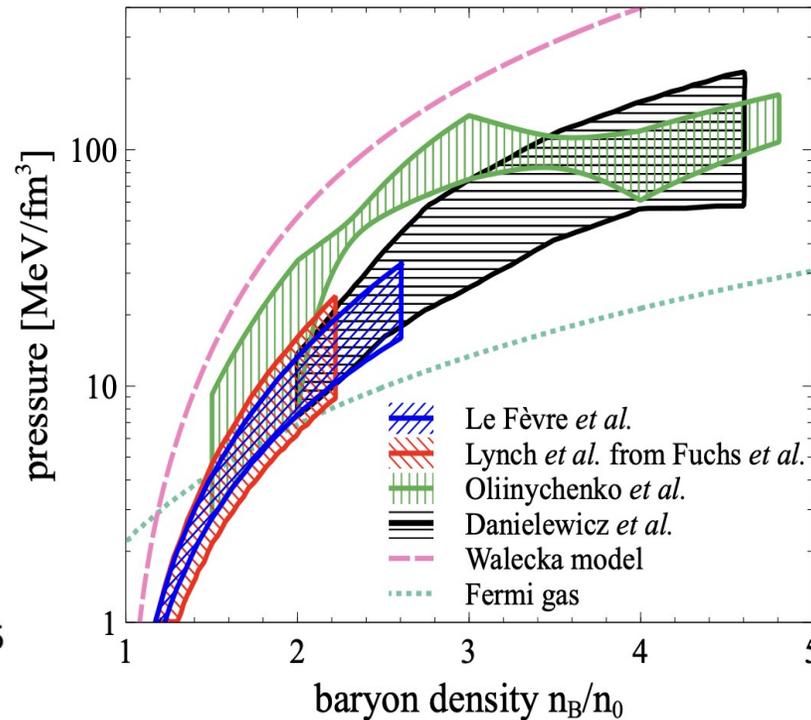
$$E_A(\rho, \delta) = \boxed{E_A(\rho, 0)} + \boxed{E_{sym}(\rho)}\delta^2 + O(\delta^4)$$

Symmetric matter

Symmetry energy



Ch. Fuchs and H.H. Wolter, EPJA 30 (2006) 5



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

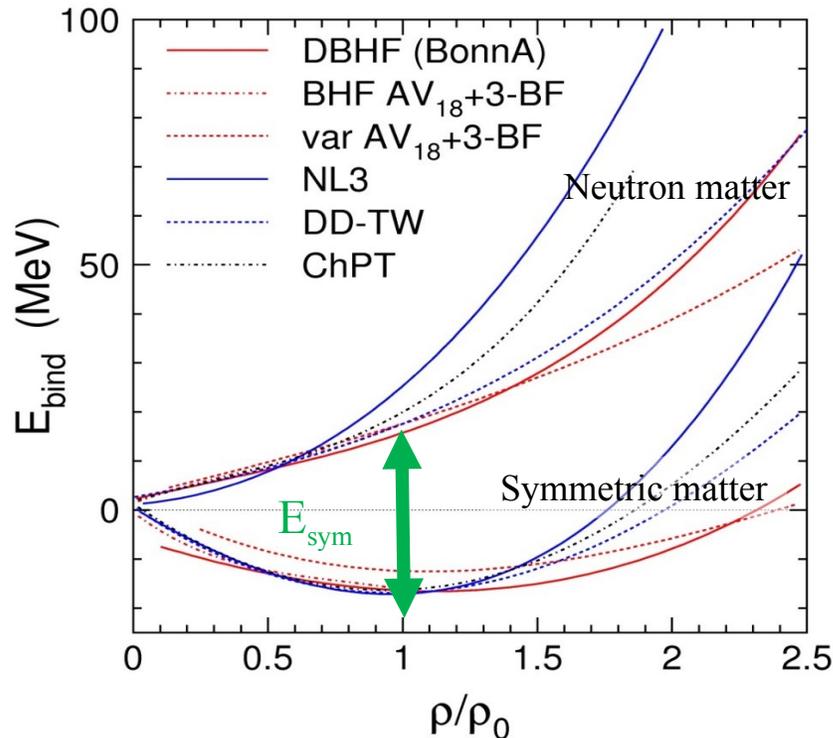
Уравнение состояния материи с высокой барионной плотностью

Энергия связи на нуклон
Изоспиновая асимметрия:
 $\delta = (\rho_n - \rho_p) / \rho$

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

Symmetric matter

Symmetry energy



Ch. Fuchs and H.H. Wolter, EPJA 30 (2006) 5

- В настоящее время активно изучается посредством наблюдаемых (таких как потоки, выходы мезонов и др.) и исследования несжимаемости.

$$K_0 = 9\rho^2 \frac{d^2 E_A}{d\rho^2}$$

- Один из основных источников неопределенности: расхождение между существующими экспериментальными данными.

- Один из основных параметров для изучения – наклон E_{sym} .

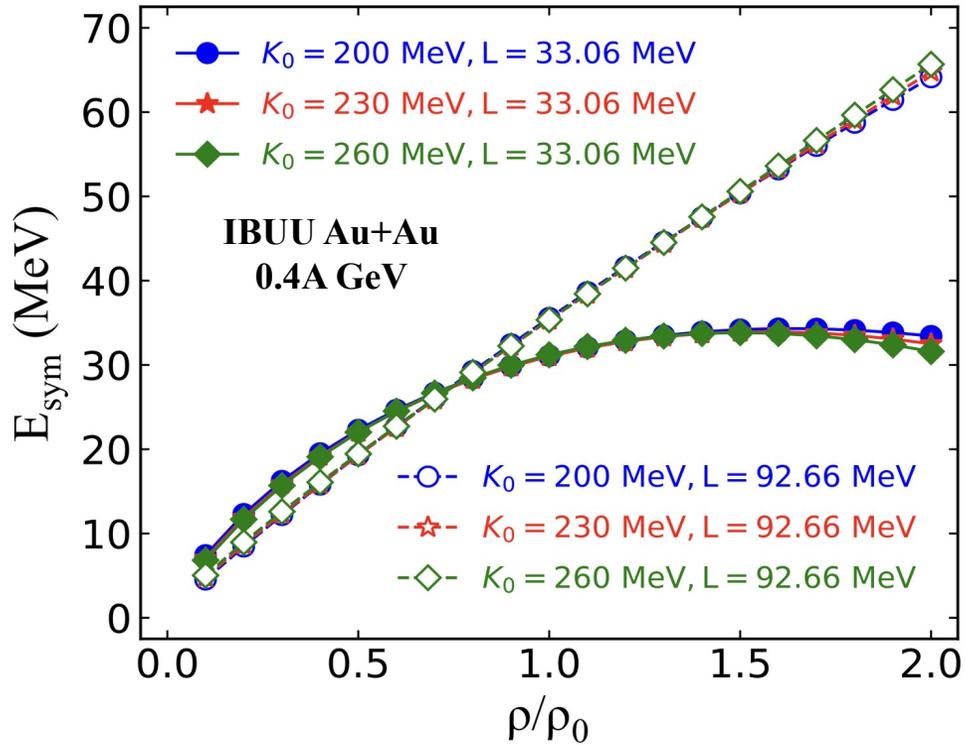
$$L = 3\rho \frac{dE_{sym}(\rho)}{d\rho}$$

- Отсутствуют экспериментальные данные при $E_{kin} > 0.4$ АГэВ.
- Необходимо определить наблюдаемые величины, чувствительные к L , и получить новые экспериментальные данные.

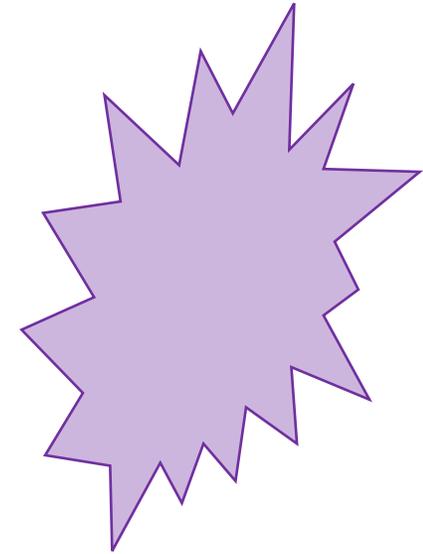
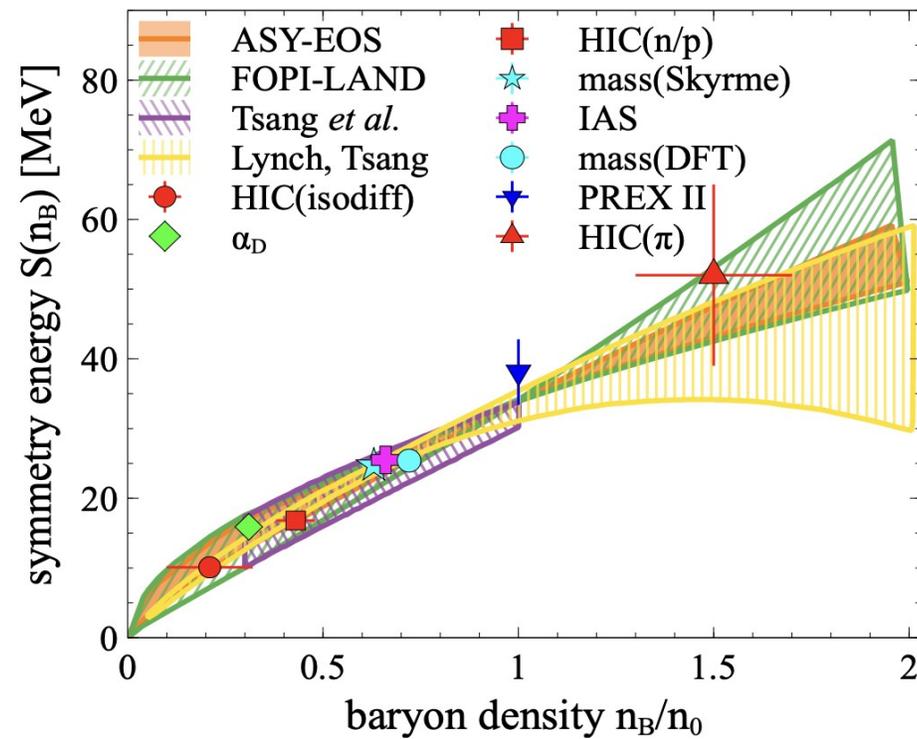
Необходимы новые данные для дальнейшего ограничения транспортных моделей с адронными степенями свободы.

Энергия симметрии при высокой барионной плотности

X.X. Long, G.F. Wei, Phys.Rev.C 109 (2024) 5, 054619



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



Неизученная область
выше $2 n_B/n_0$

- Область плотностей Nuclotron-NICA: $2 < n_B/n_0 < 8$
- Энергия симметрии E_{sym} обладает выраженной зависимостью от плотности, что может быть охарактеризовано наклоном L .

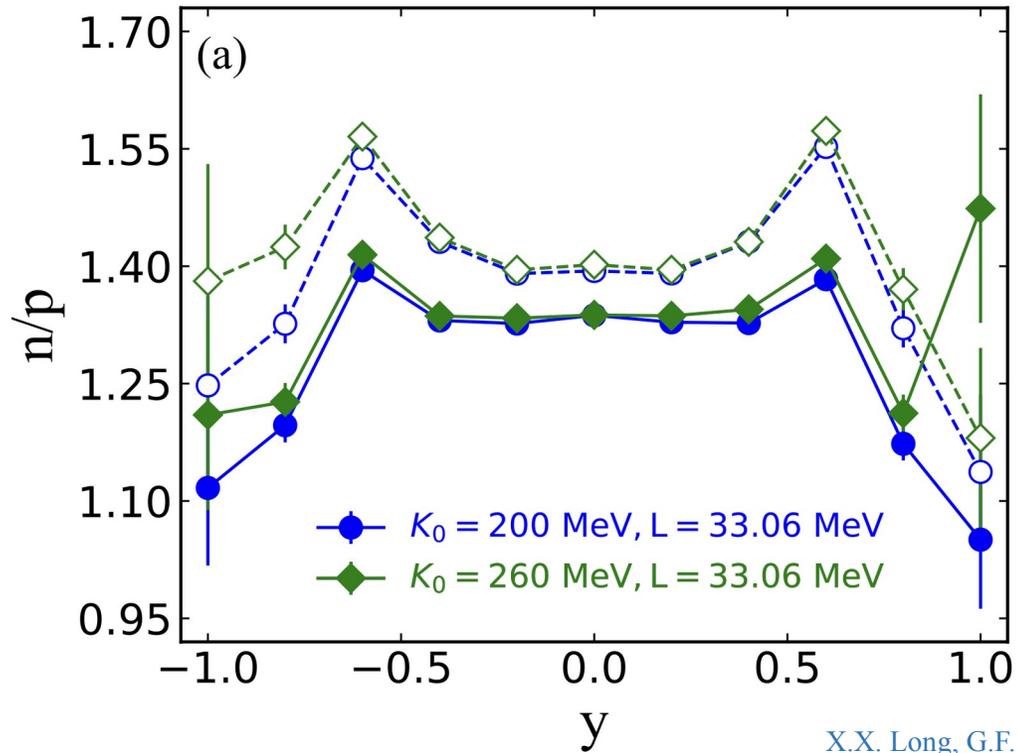
Какие наблюдаемые величины
можно использовать для
извлечения информации о L ?

Наблюдаемые величины для изучения энергии симметрии

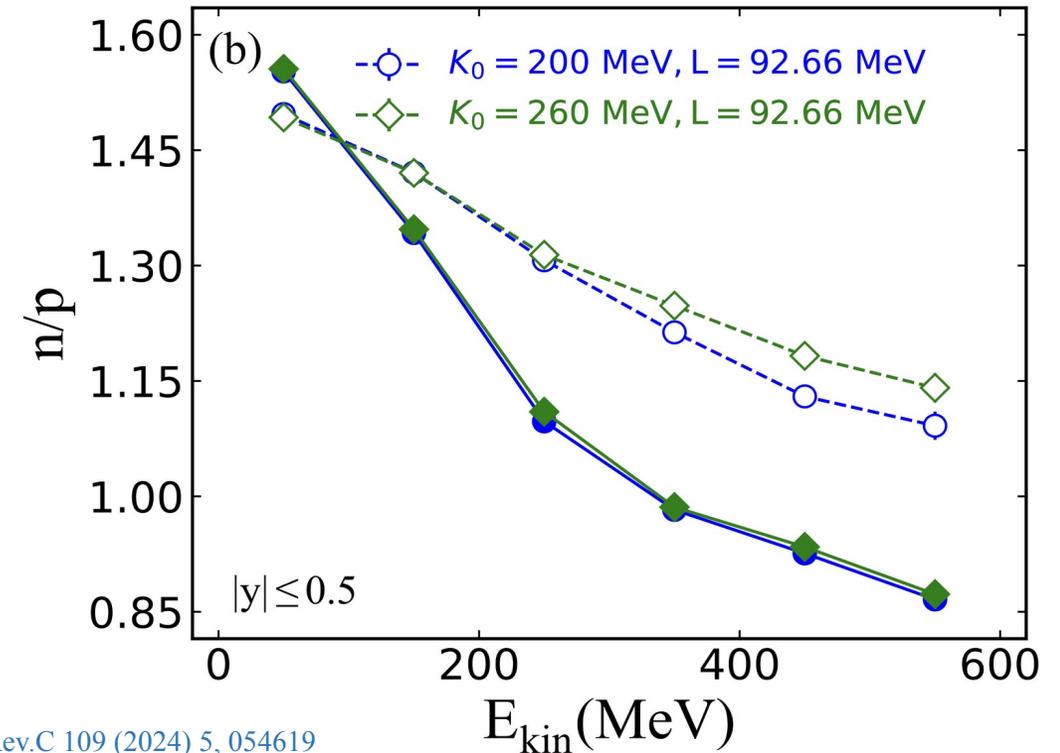
Отношения выходов n/p

✓ Выраженная зависимость от наклона L

✓ Слабая зависимость от несжимаемости K_0



X.X. Long, G.F. Wei, Phys.Rev.C 109 (2024) 5, 054619
IBUU, Au+Au, 0.4A GeV

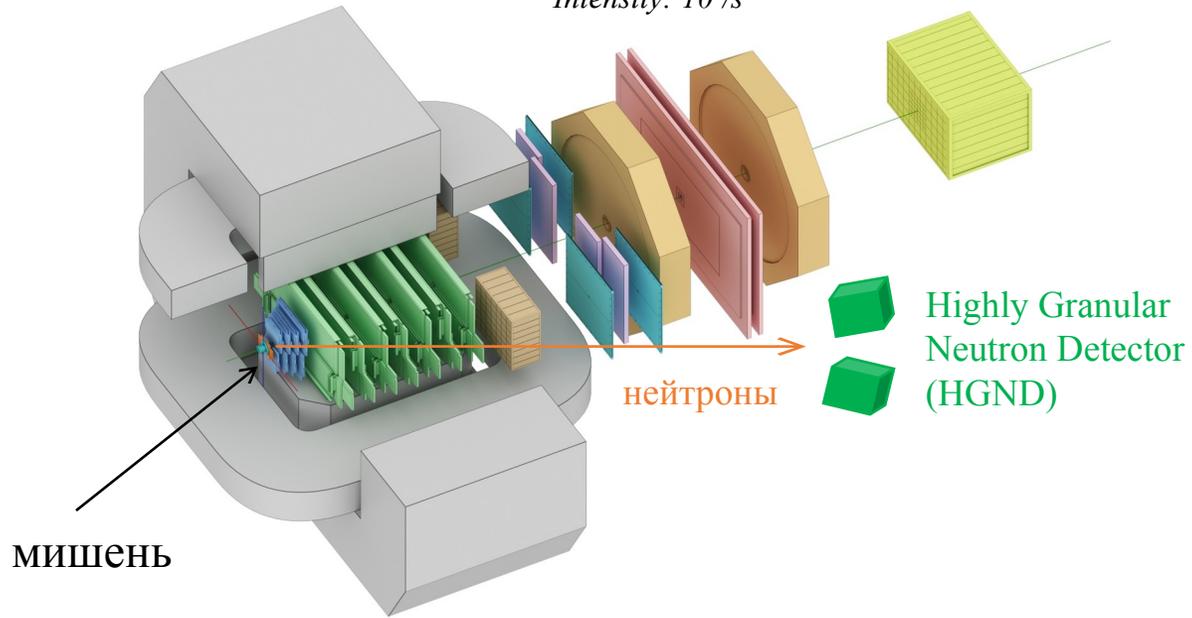


Для изучения энергии симметрии необходимо

экспериментально измерить выходы и азимутальные потоки нейтронов

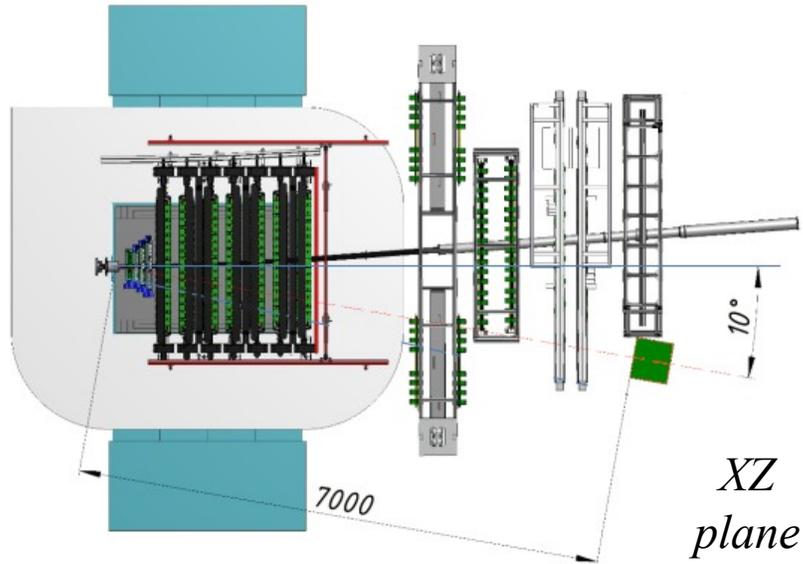
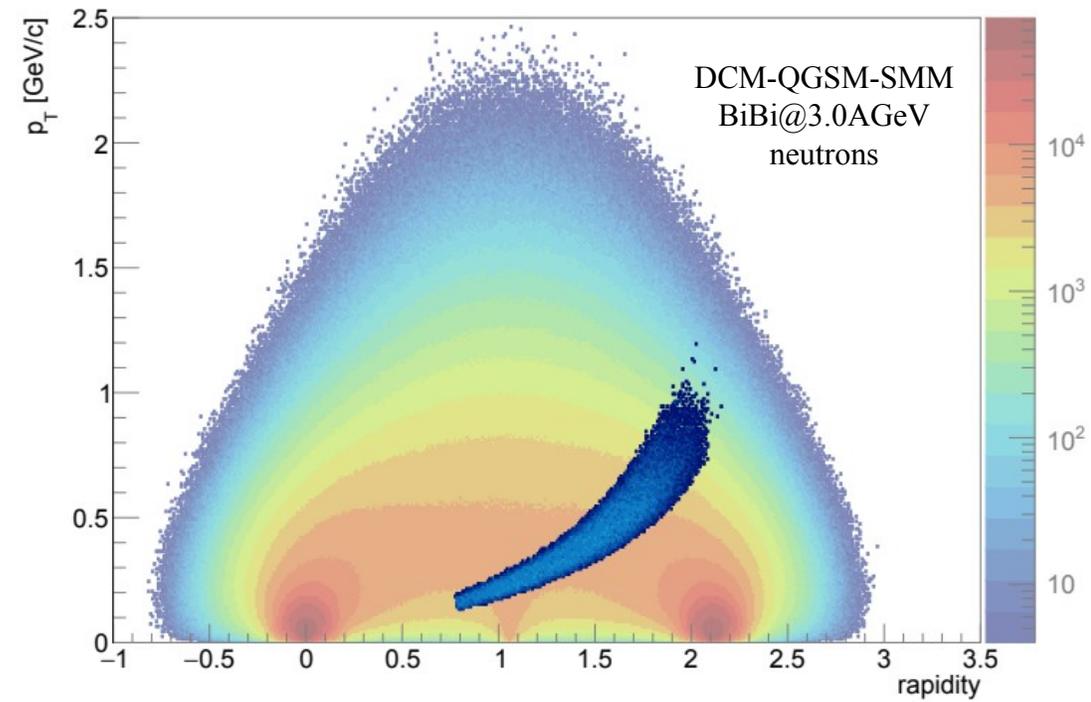
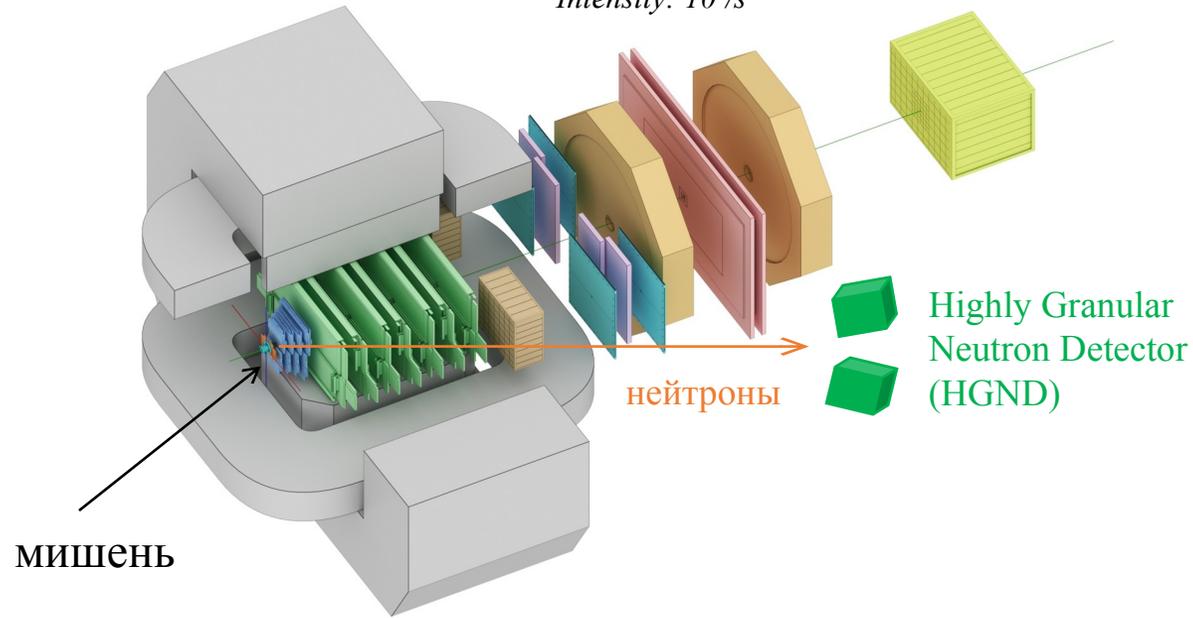
BM@N

Beams: p to Au
Kinetic energy: $1-4.5$ AGeV for $Z/A=0.4$
 $1-6$ AGeV for $Z/A=0.5$
Intensity: $10^6/s$



BM@N

Beams: p to Au
 Kinetic energy: 1-4.5 AGeV for $Z/A=0.4$
 1-6 AGeV for $Z/A=0.5$
 Intensity: $10^6/s$



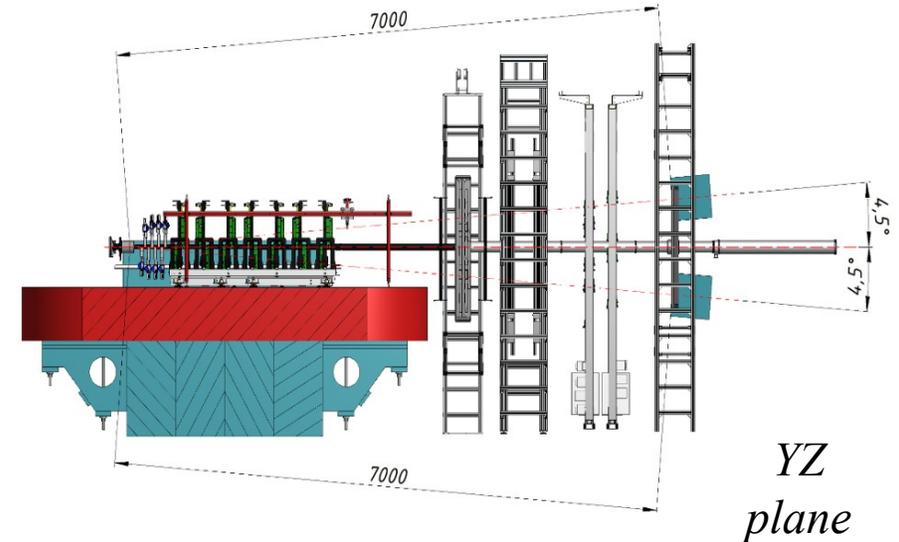
Задача: исследовать энергию симметрии в неизученной области высокой барионной плотности

Как:

- Дифференциальное изучение отношения n/p (выходы, азим. потоки)

Измеряя:

- протоны — спектрометром BM@N
- нейтроны — при помощи HGND по их кинетической энергии, определенной по времени пролета

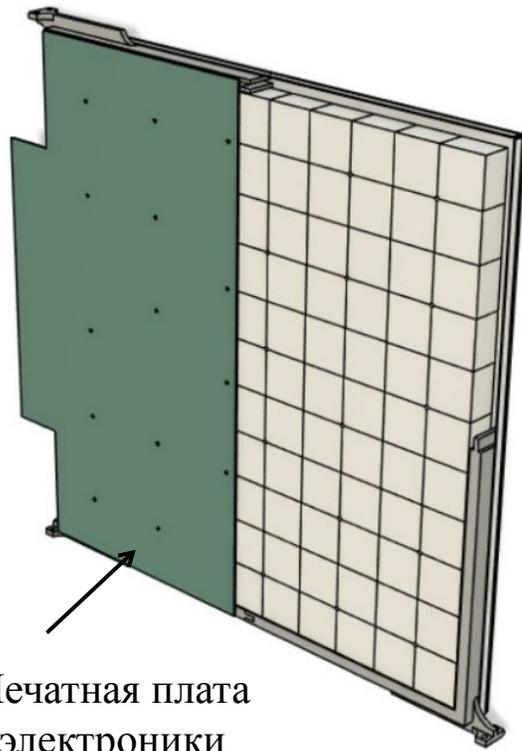


Конструкция детектора

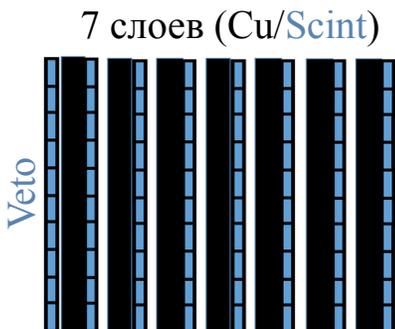
Светонепроницаемая сборка с воздушным охлаждением.

Каждое плечо включает:

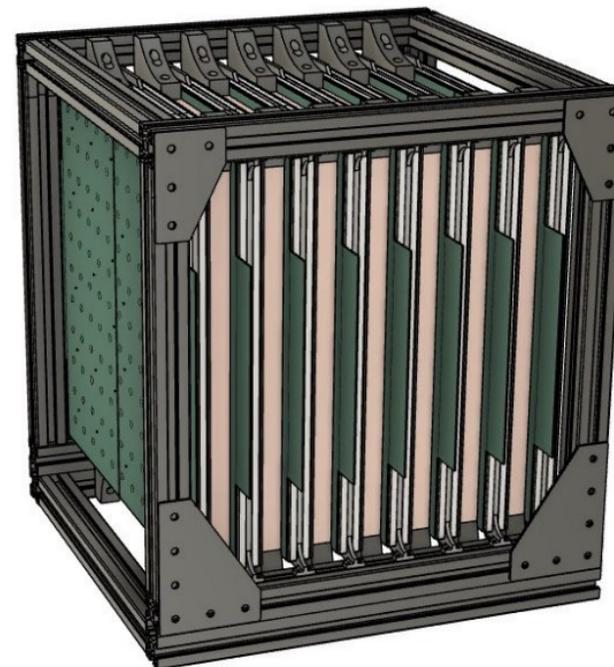
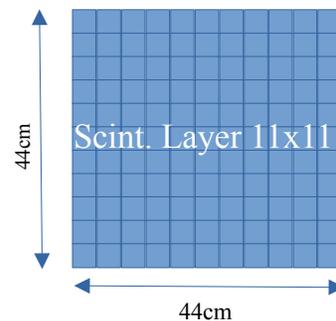
- 1 слой-вето
- 7 слоев медного поглотителя (толщина 3 см)
- 7 активных слоев:
 - 11x11 матрица сцинтилляторов $4 \times 4 \times 2.5 \text{ cm}^3$
 - С обеих сторон печатные платы (PCB) электроники
 - Плата выше по пучку: светодиоды для калибровки
 - Плата ниже по пучку: SiPMs и аналоговая электроника



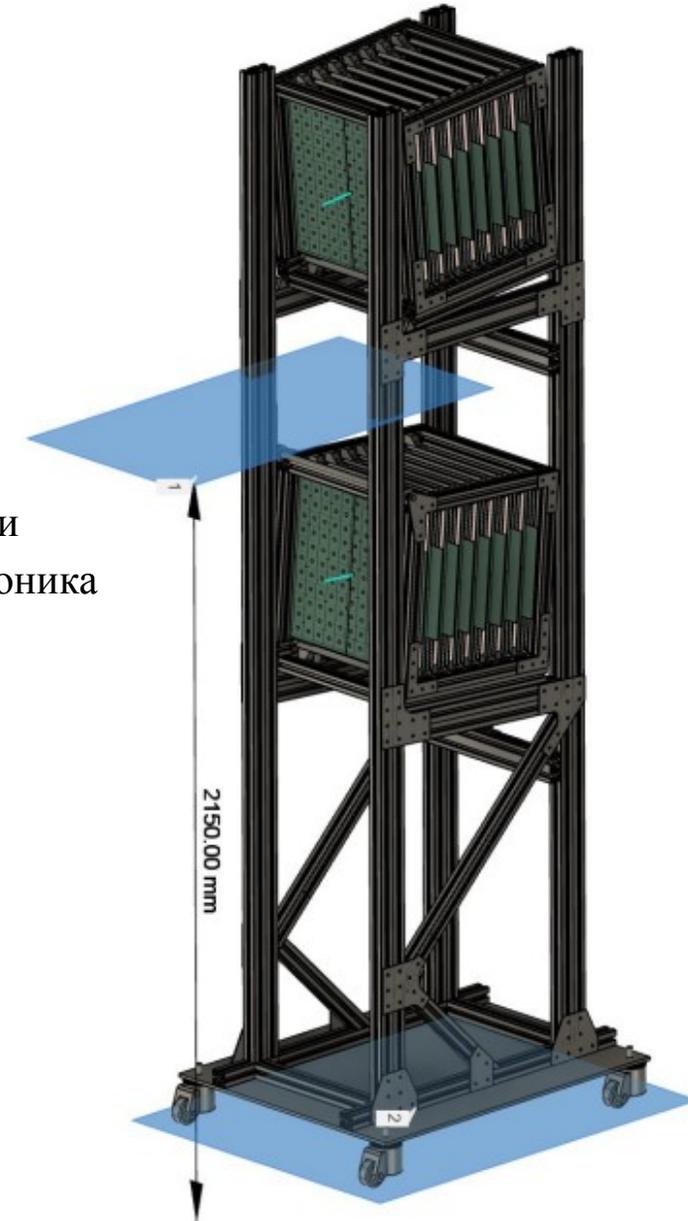
Печатная плата
электроники
(половина)

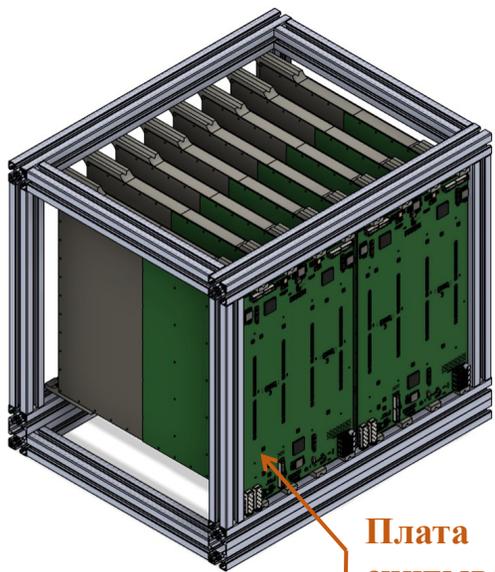


Общая длина $\sim 48 \text{ cm}$ ($1.5 \lambda_{in}$)

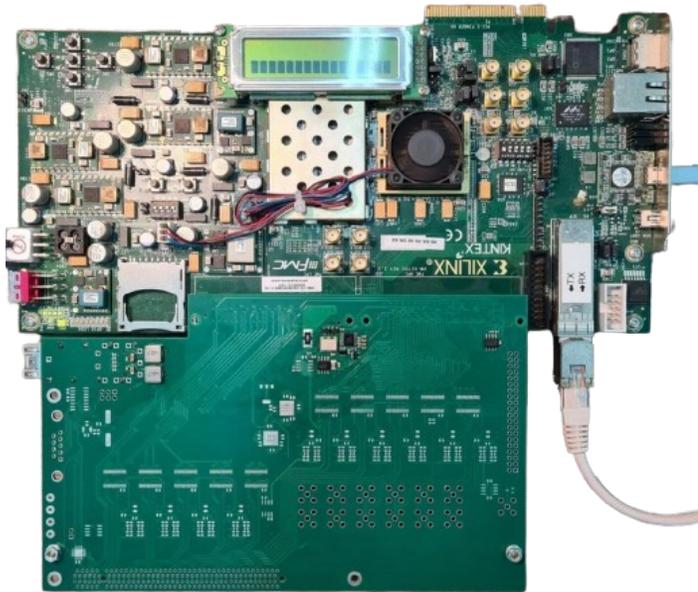


Легкая алюминиевая рама

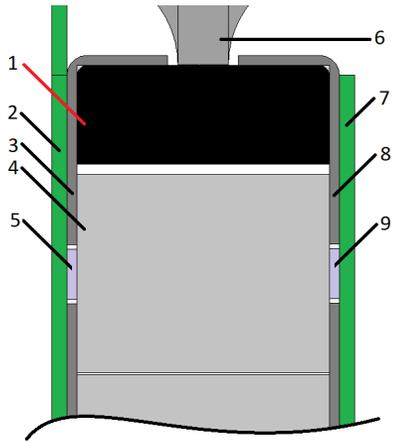




Плата считывания



Прототип платы считывания на основе Xilinx Kintex 7 Evaluation Board



- 1 – каркас активного слоя
- 2 – SiPM PCB
- 3&8 – алюминиевые пластины с отверстиями для SiPM и LED
- 4 – сцинтиллятор
- 5 – SiPM
- 6 – кронштейн
- 7 – LED PCB
- 9 – LED

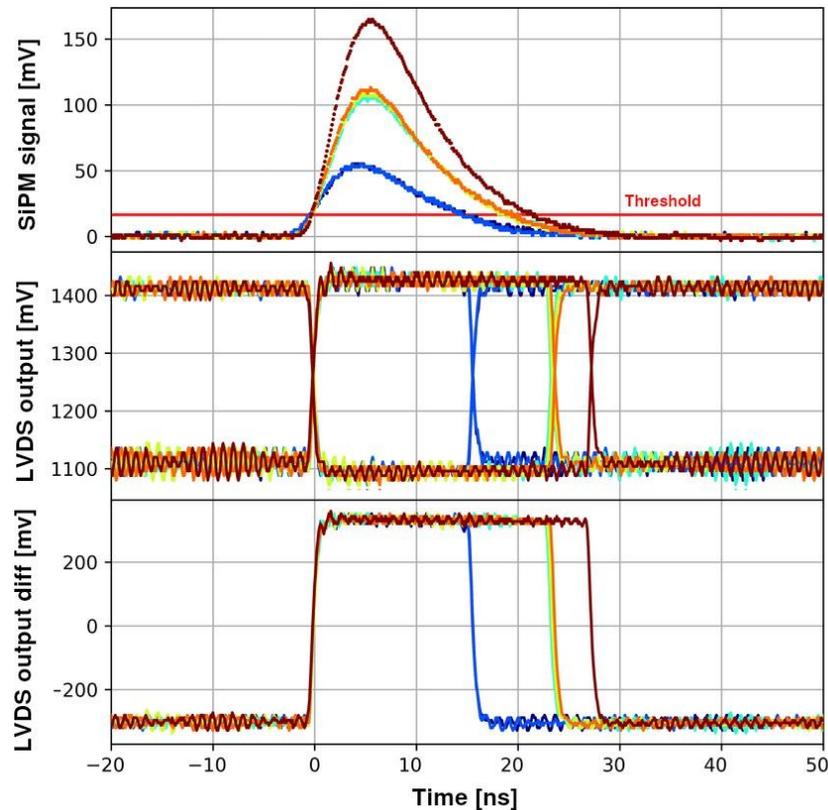


Схема считывания

1. Вспышка сцинтиллятора
2. SiPM EQR15 11-6060D-S
3. Высокоскоростной компаратор с дифф. LVDS выходом
4. ВЦП на основе ПЛИС
= Время отклика + ToT

На канал

- Динамический диапазон: 0.5-7 МIP
- Временное разрешение: 150 ps
- Амплитудное разрешение: < 20% (реконструировано из ToT)

F. Guber, et al., Instrum. Exp. Tech. 66 (2023) 4, 553-557.

D. Finogeev, et al., Nucl. Instrum. Meth. A 1059 (2024) 168952.

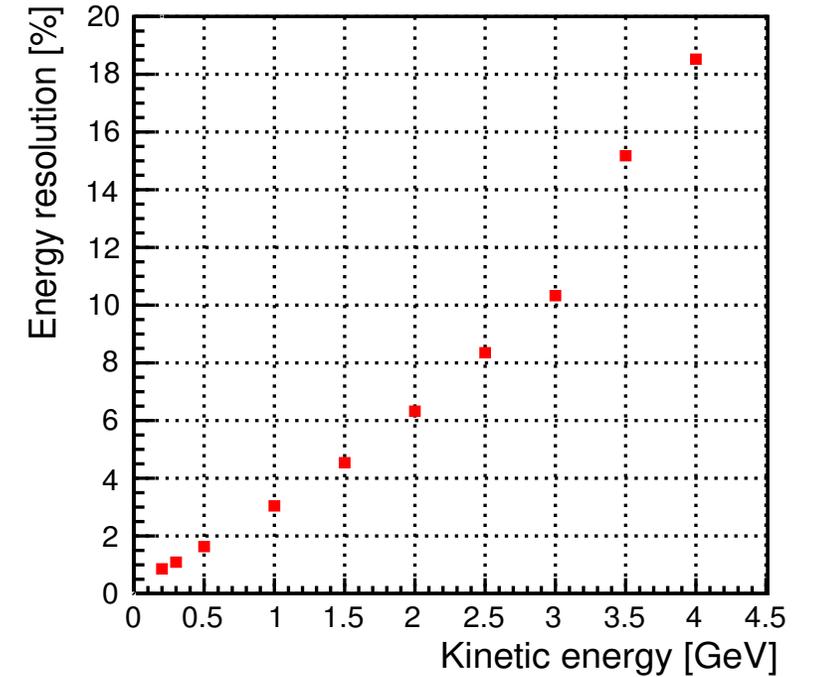
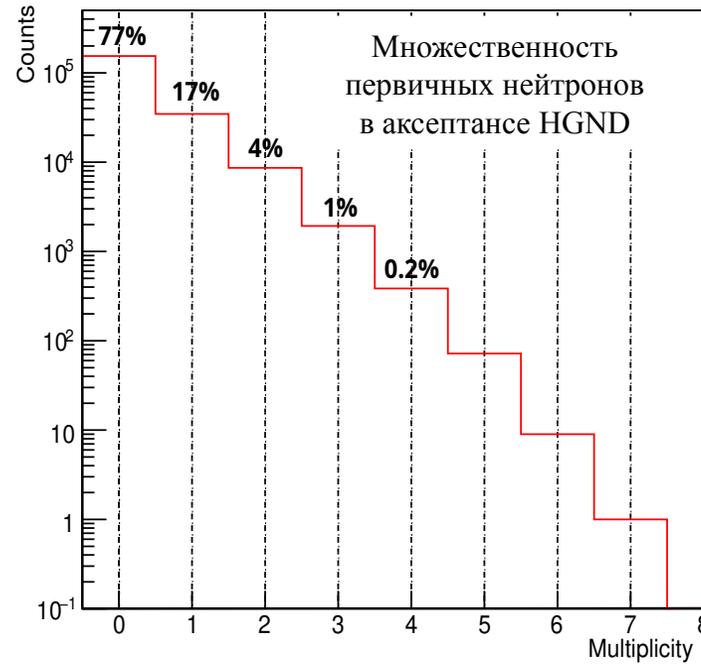
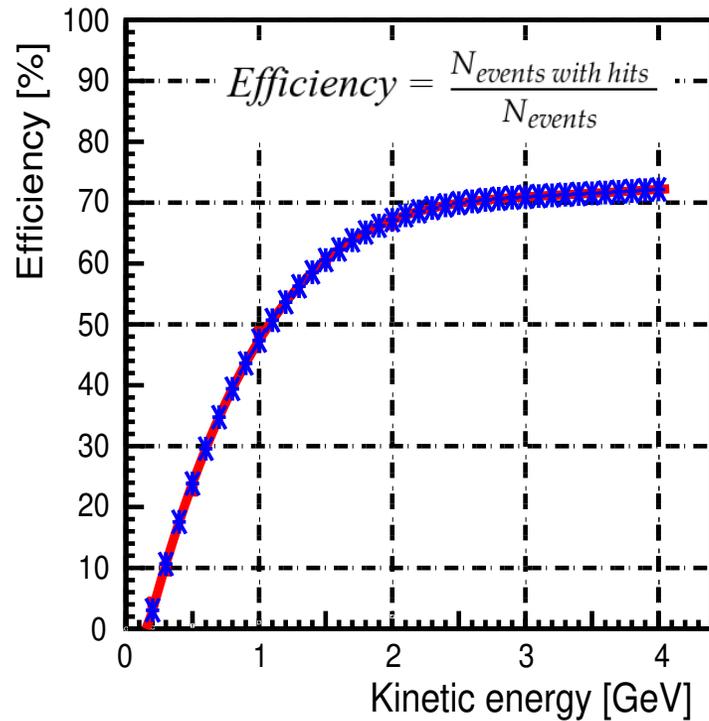
N. Karpushkin, et al., Nucl. Instrum. Meth. A 1068 (2024) 169739.

SiPM: Beijing NDL EQR15 11-6060D-S

- Активная зона $6 \times 6 \text{ mm}^2$
- Пиксель $15 \times 15 \text{ }\mu\text{m}^2$
- Пикселей: 160 000
- PDE: 45%
- Усиление: $4 \cdot 10^5$



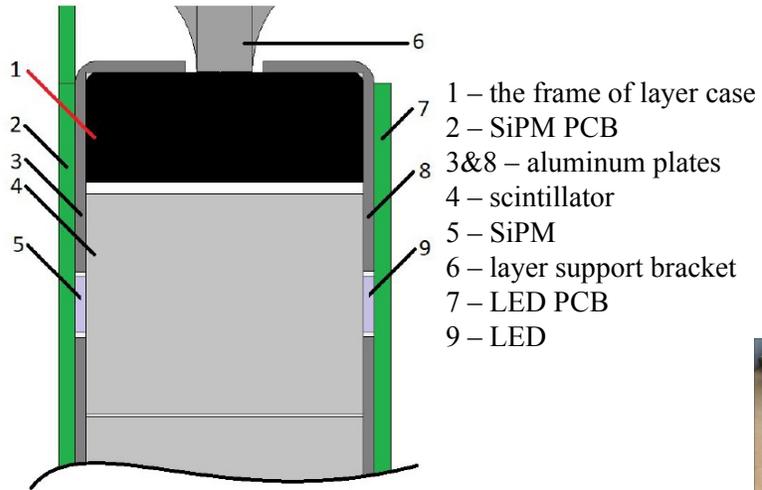
Моделирование характеристик детектора



За **1 месяц** работы BM@N можно собрать $\sim 1.2 \times 10^9$ одиночных первичных нейтронов с кинетической энергией > 300 МэВ.

Верхний предел: 1.5×10^9 нейтронов (требуется распознавание многонейтронных событий).

Статус создания детектора



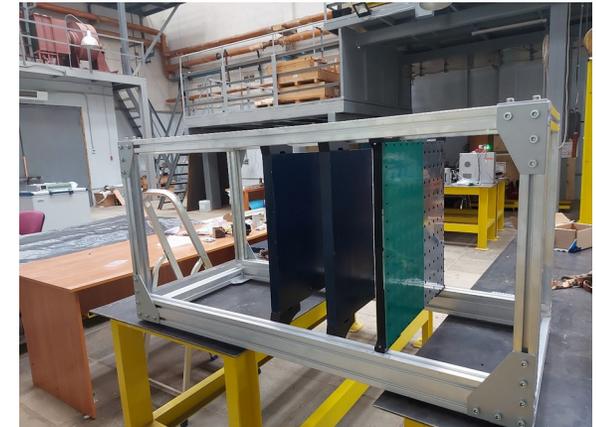
Собранный сцинт. слой



Размещение платы РСВ



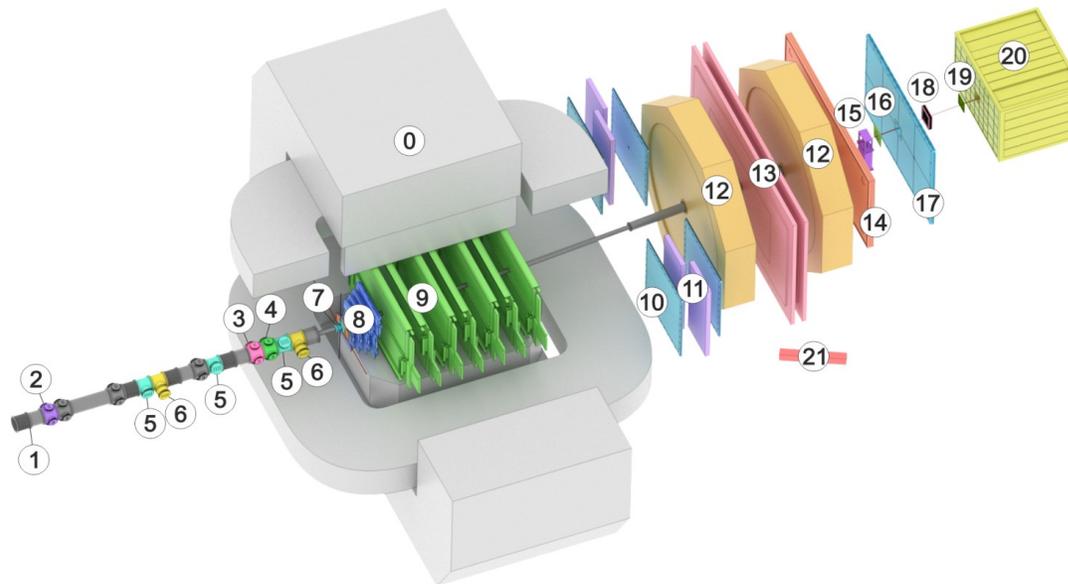
Макетный прототип собран в ИЯИ РАН



- **Сцинтилляционные ячейки:** Все ~2000 ячеек ($40 \times 40 \times 25$ мм³) изготовлены.
- **Печатные платы (РСВ):** Дизайн завершён, производство в процессе.
- **Считывающая плата:** ВЦП на основе ПЛИС находится в активной разработке.
- **Прототип:** Собран первый макетный прототип со сцинтилляционным слоем. Завершены приготовления к тестам на пучке.
- **Сроки:** Ввод в эксплуатацию запланирован на конец 2025 года.

Передние детекторы спектаторов установки BM@N

- **FHCal (Forward Hadron Calorimeter)**
- **FQH (Forward Quarz Hodoscope)**
- Задачи:
 - Центральность
 - [Д. Идрисов 21.02.2025, 14:00](#)
 - [А. Деманов 21.02.2025, 14:15](#)
 - Ориентация плоскости реакции
 - [М.Мамаев 17.02.2025, 16:15](#)
 - [И.Жаворонкова 17.02.2025, 16:45](#)



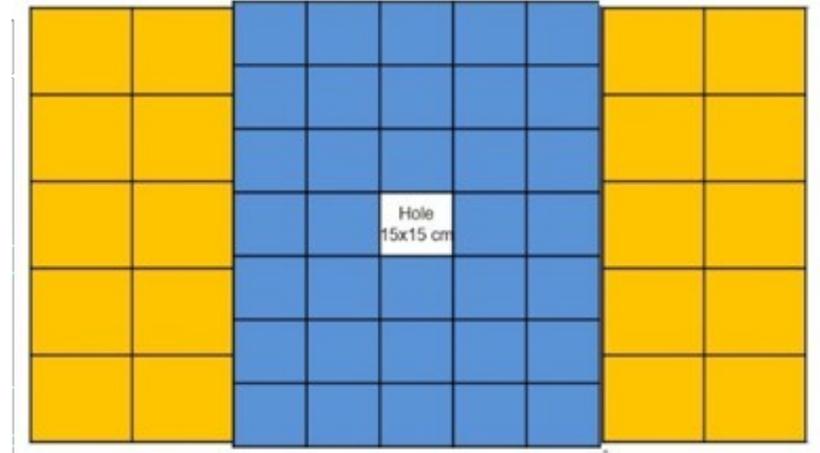
- Magnet SP-41 (0)
- Vacuum Beam Pipe (1)
- BC1, VC, BC2 (2-4)
- SiBT, SiProf (5, 6)
- Triggers: BD + SiMD (7)
- FSD, GEM (8, 9)
- CSC 1x1 m² (10)
- TOF 400 (11)
- DCH (12)
- TOF 700 (13)
- ScWall (14)
- FD (15)
- Small GEM (16)
- CSC 2x1.5 m² (17)
- Beam Profilometer (18)
- FQH (19)
- FHCal (20)
- HGN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



FHCal (Forward Hadron Calorimeter)

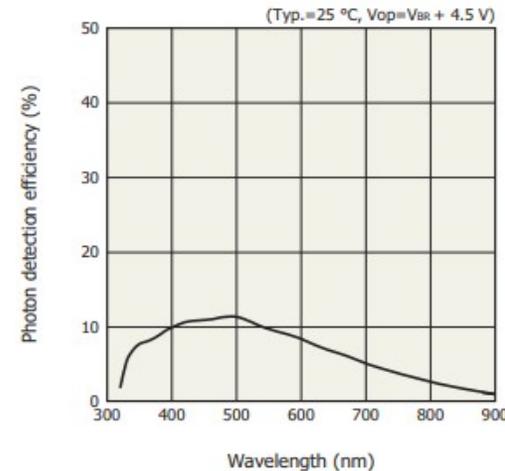
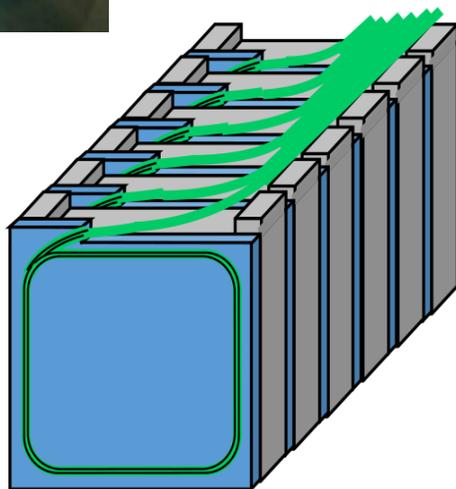


- 34 внутренних модулей 15x15 cm² – 42 пластины Pb/scint (16mm Pb + 4mm Scint)
- 20 внешних модулей 20x20 cm² – 60 пластин Pb/scint (16mm Pb + 4mm Scint)
- Длина малого модуля ~ 4 λ_{int}
Длина большого модуля ~ 5.6 λ_{int}
- Светосбор – 6 WLS оптоволокон с каждых 6 последовательных слоев сцинтиллятора (единая секция) соединяются в оптическом разъеме на заднем торце модуля
- Считывание света:
7 SiPM на малый модуль
10 SiPM на большой модуль
- Вес малого модуля – 200kg
Вес большого модуля – 500kg

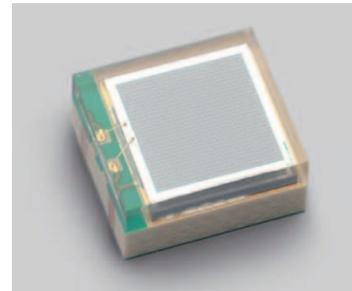


BM@N FHCal

производство
модуля
адронного
калориметра



Hamamatsu MPPC S12572-010P
3*3mm²
Пикселей: 90000
Усиление: 1.35*10⁵
PDE: 12%



Аналогичные калориметры спроектированы и созданы группой ИЯИ РАН для экспериментов MPD@NICA (ОИЯИ), NA61/SHINE (CERN SPS), CBM@FAIR (GSI)

FQH (Forward QuArz Hodoscope)

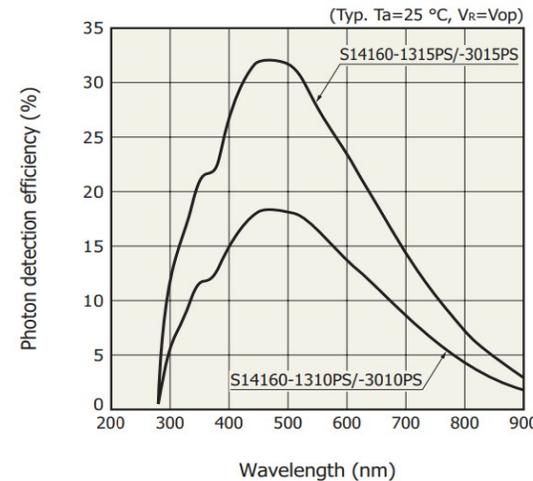
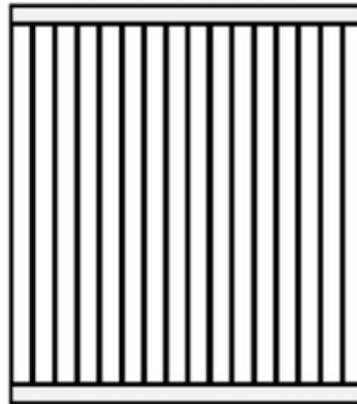
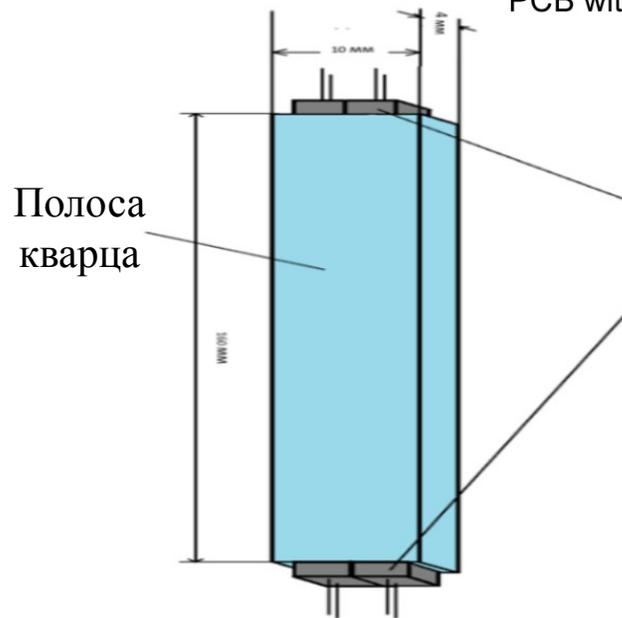
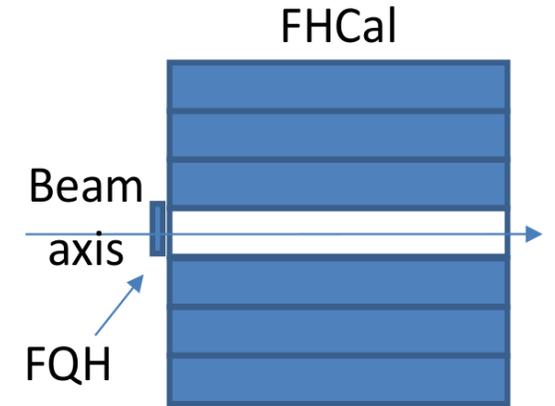
Используется для измерения заряженных фрагментов в пучковом отверстии FHCaI – необходимо для определения центральности ядро-ядерных столкновений



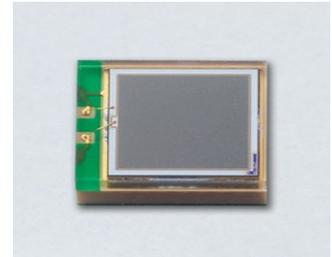
PCB with SiPMs

16 кварцевых полос

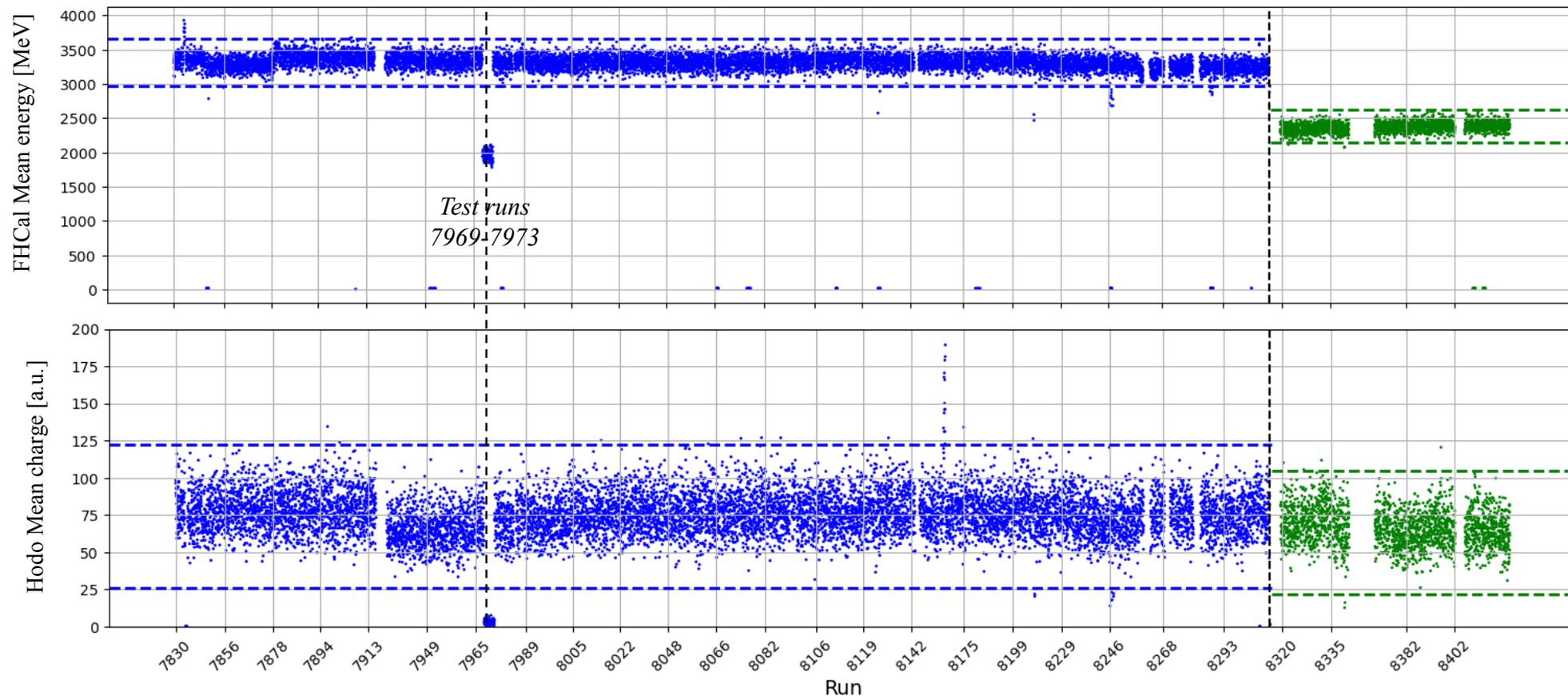
- 16 кварцевых полос $160 \times 10 \times 4 \text{ mm}^3$ с майларовым отражателем
- Перекрывает пучковое отверстие $15 \times 15 \text{ cm}^2$
- Считывание света с обоих торцов
- 2 MPPCs соединенные параллельно для считывания света каждой полосы
- Каждая пара SiPM считывается с усилением $\times 1$ и $\times 4$



Hamamatsu MPPC S14160-3015PS $3 \times 3 \text{ mm}^2$
 Пикселей: 39984
 Усиление: 3.6×10^5
 PDE: 32%



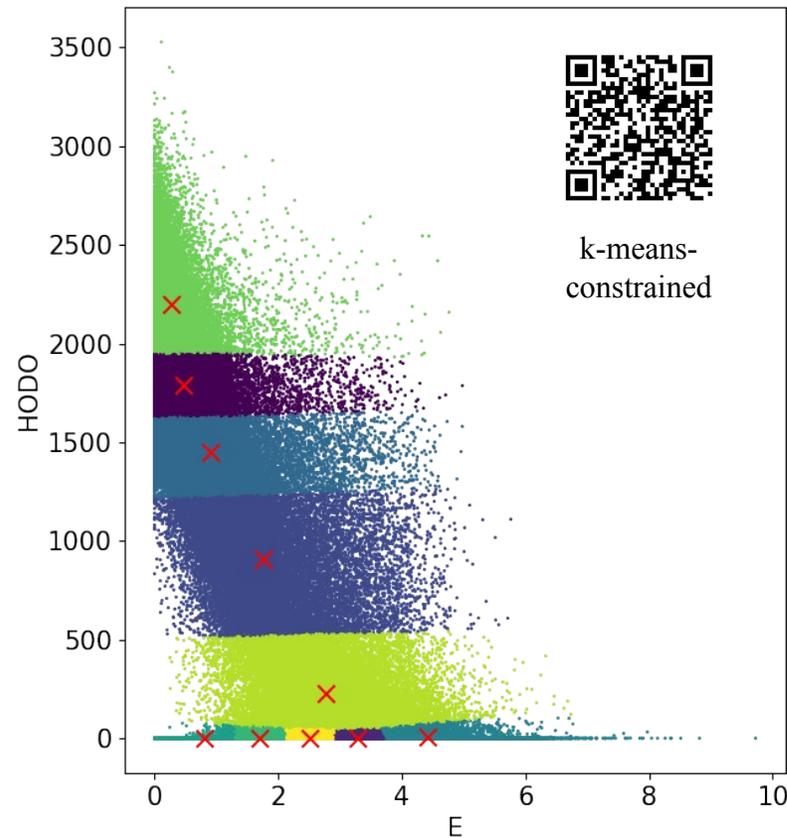
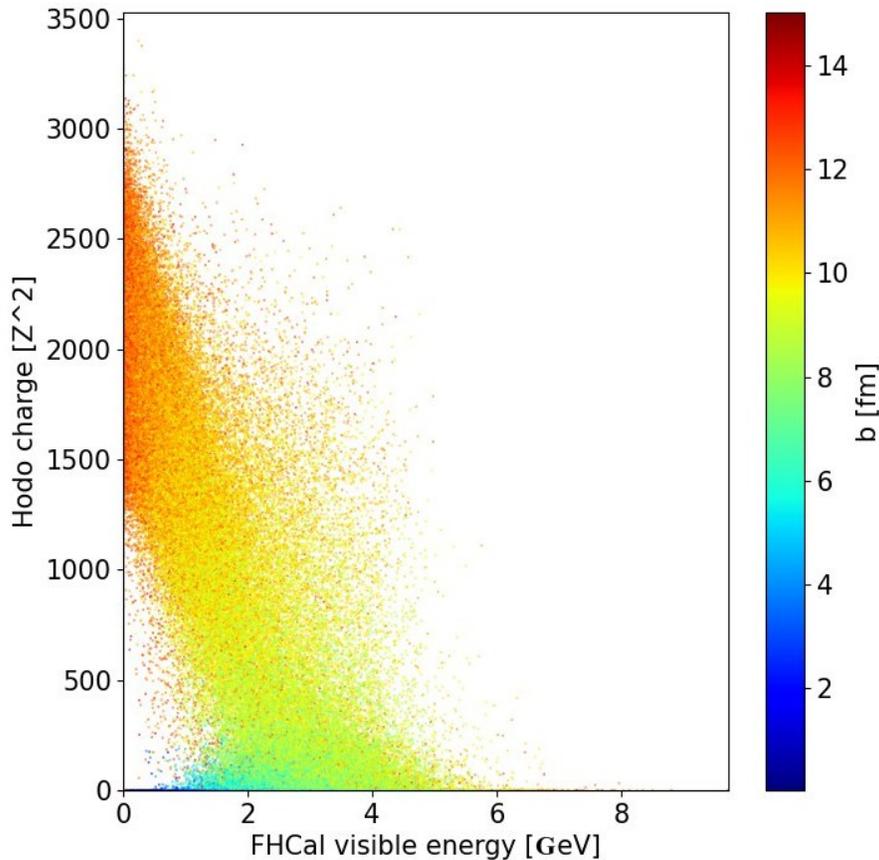
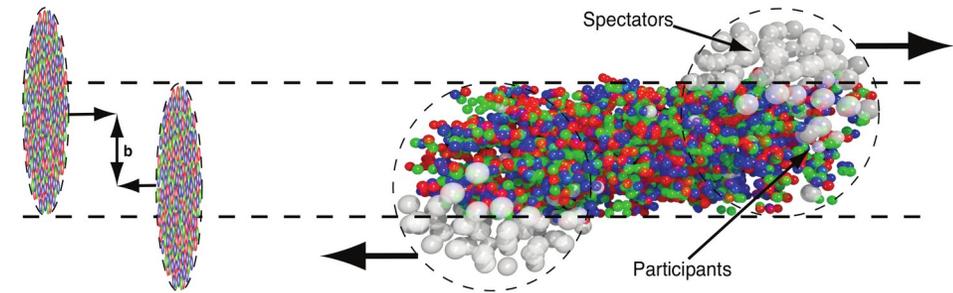
Передние детекторы спектаторов в физическом сеансе XeCsI 3.8A GeV и 3.0A GeV



- Исследовались столкновения ядер ксенона с мишенью йодида цезия при двух энергиях.
- Передние детекторы спектаторов продемонстрировали стабильную работу в ходе физического сеанса VM@N в 2022–2023 гг.
- Почти вся статистика находится в пределах 5σ , за исключением тестовых данных.

Определение центральности: корреляция FQN&FHCaI

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



Прицельный параметр b не является измеряемой в эксперименте величиной, поэтому необходимы экспериментальные наблюдения для определения центральности.

[Методы определения центральности в эксперименте BM@N](#)
Д. Идрисов 21.02.2025, 14:00

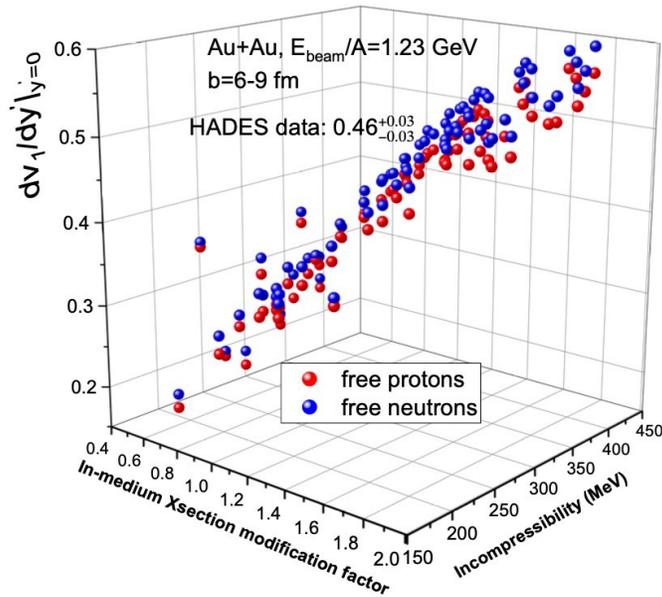
Выводы

- Новый высокогранулярный нейтронный детектор — перспективный детектор для эксперимента $BM@N$, предназначенный для исследования энергии симметрии при высокой барионной плотности.
- Энергия симметрии представляет интерес для изучения свойств нейтронных звезд.
- Статус создания HGND:
 - ▾ Сцинтилляционные ячейки: Все ~ 2000 ячеек ($40 \times 40 \times 25$ мм³) изготовлены.
 - ▾ Печатные платы (PCB): Дизайн завершён, производство в процессе.
 - ▾ Считывающая плата: Плата ВЦП на основе ПЛИС находится в активной разработке.
 - ▾ Собран первый макетный прототип. Завершены приготовления к тестам на пучке.
 - ▾ Сроки: Ввод в эксплуатацию запланирован на конец 2025 года.
- Передние детекторы спектаторов:
 - ▾ Разработаны и созданы в ИЯИ РАН для оценки центральности и плоскости реакции в эксперименте $BM@N$.
 - ▾ Впервые использовались в тяжелоионном физическом сеансе $BM@N$ и продемонстрировали стабильную работу в течение всего периода измерений и сейчас используются в физическом анализе.

Спасибо за внимание!

BACKUP

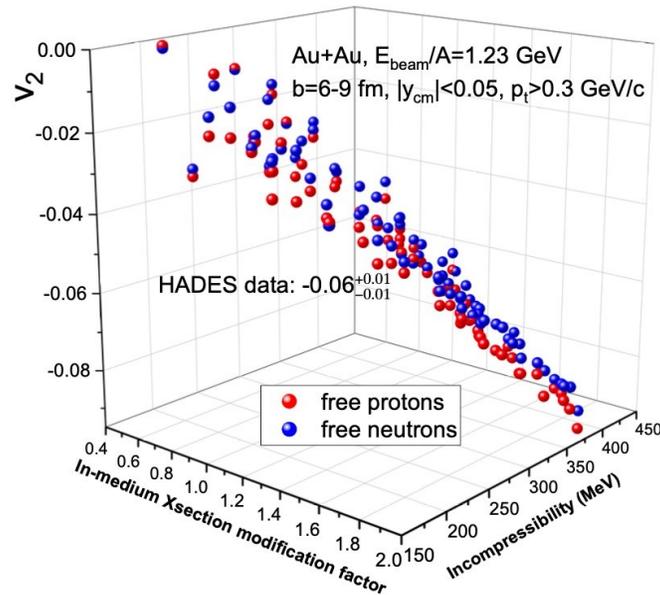
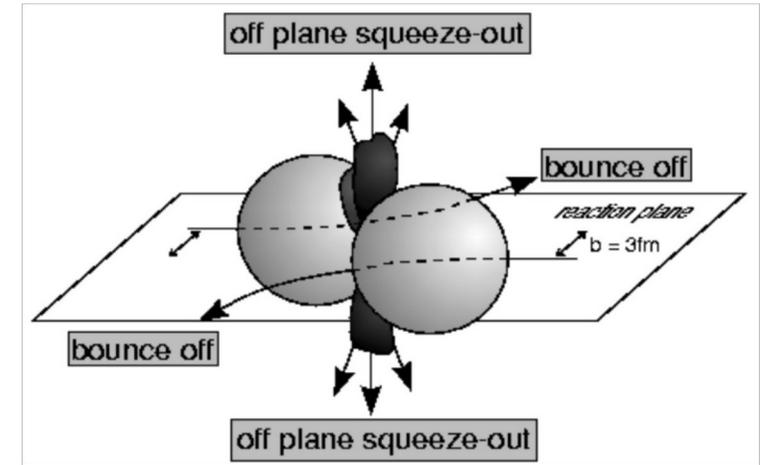
Collective flow as sensitive probe to the EOS



Incompressibility parameter $K_0(\rho)$:

Specifies the behavior of EOS in the given baryon densities

Models with flexible EOS for different (K_0, ρ) are required



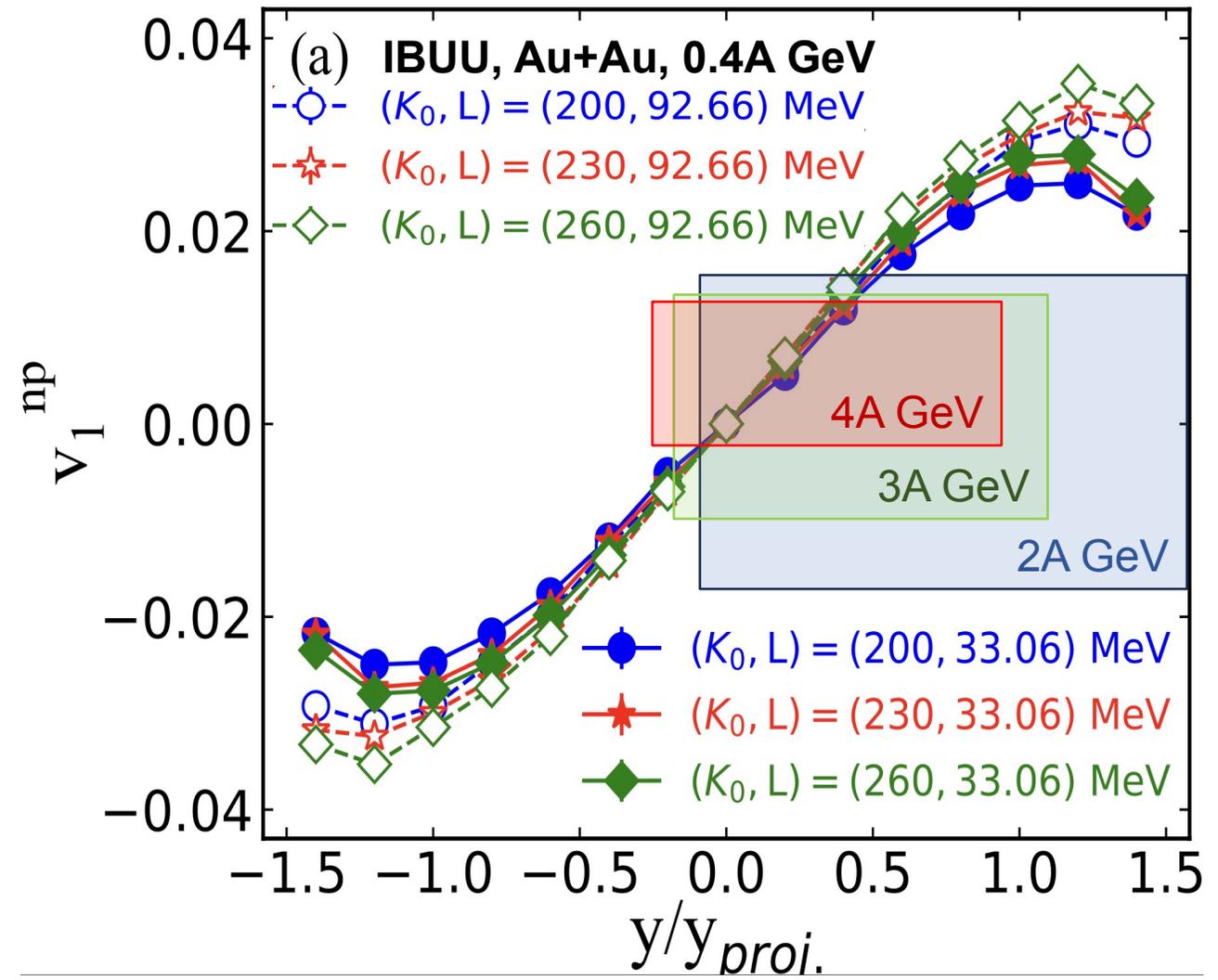
Collective flow is sensitive to:

- Compressibility of the created in the collision matter
- Time of the interaction between the matter within the overlap region and spectators

How to measure the collective flow?

Using v_1^{np} to study L

X.X. Long, G.F. Wei, Phys.Rev.C 109 (2024) 5, 054619



One can define free neutron-proton differential directed flow:

$$v_1^{np} = \frac{N_n(y)}{N(y)} \langle v_1^n(y) \rangle - \frac{N_p(y)}{N(y)} \langle v_1^p(y) \rangle$$

$N_n(y), N_p(y), N(y)$ - total number of neutrons, protons and nucleons respectively

$\langle v_1^n(y) \rangle, \langle v_1^p(y) \rangle$ - flow of neutrons and protons respectively

- v_1^{np} sensitive to both K_0 and L which may lead to ambiguous interpretation
 - More observables might be necessary for robust study of L

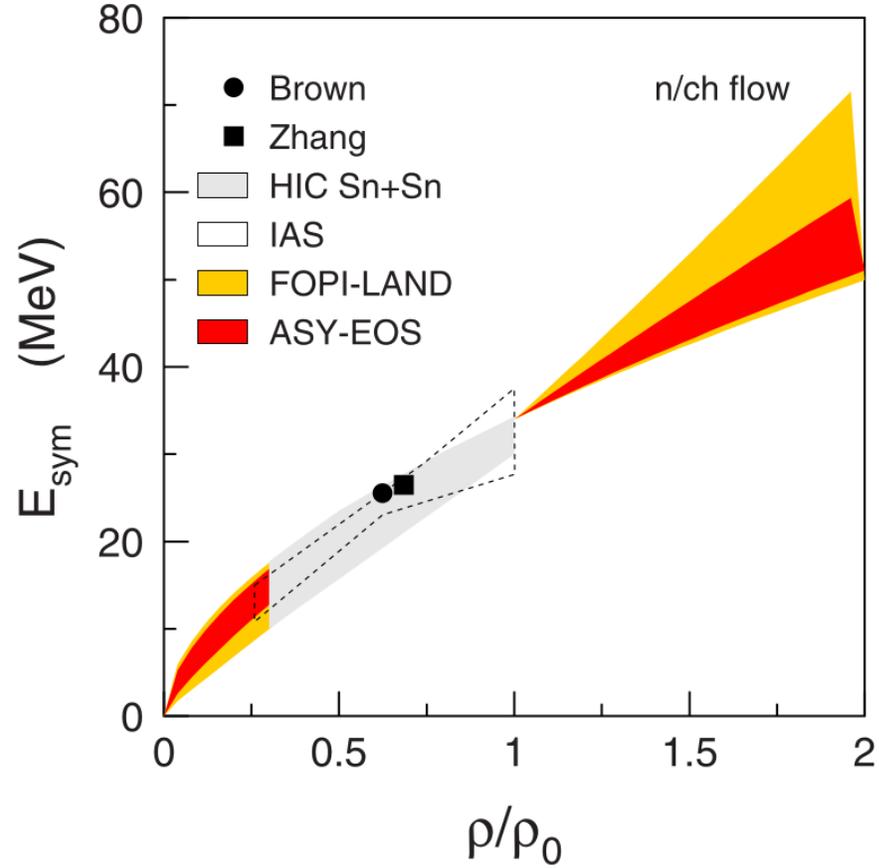
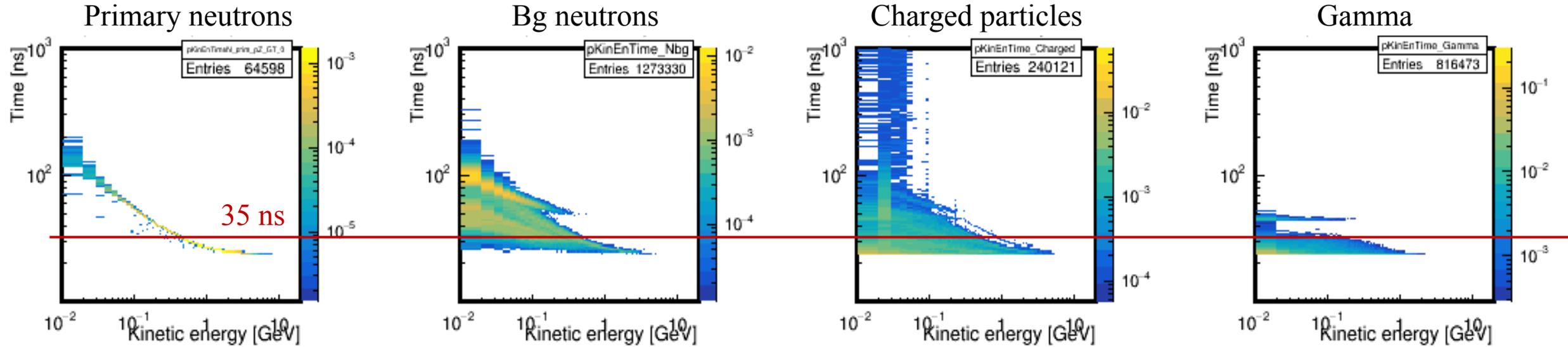


FIG. 18. Constraints deduced for the density dependence of the symmetry energy from the present data in comparison with the FOPI-LAND result of Ref. [5] as a function of the reduced density ρ/ρ_0 . The low-density results of Refs. [78–81] as reported in Ref. [82] are given by the symbols, the gray area (HIC), and the dashed contour (IAS). For clarity, the FOPI-LAND and ASY-EOS results are not displayed in the interval $0.3 < \rho/\rho_0 < 1.0$.

Discussing the ToF cut

At HGND entrance

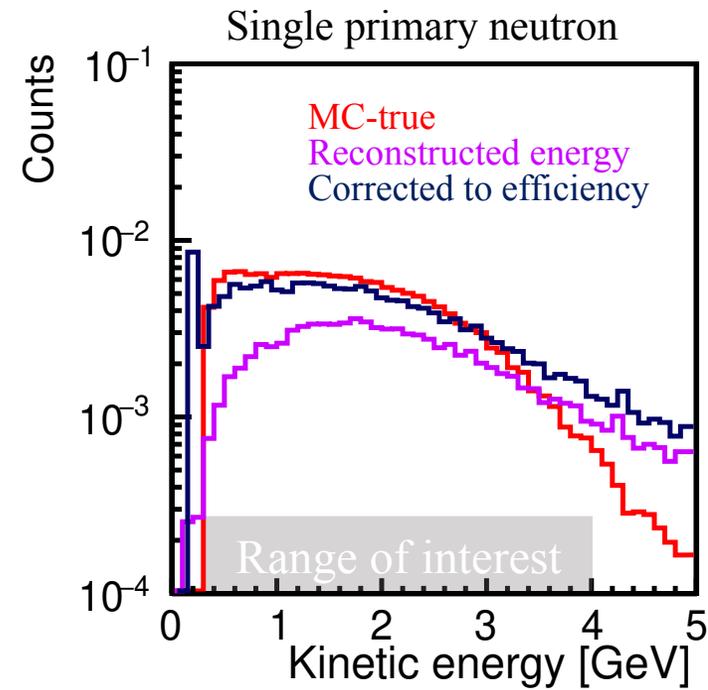
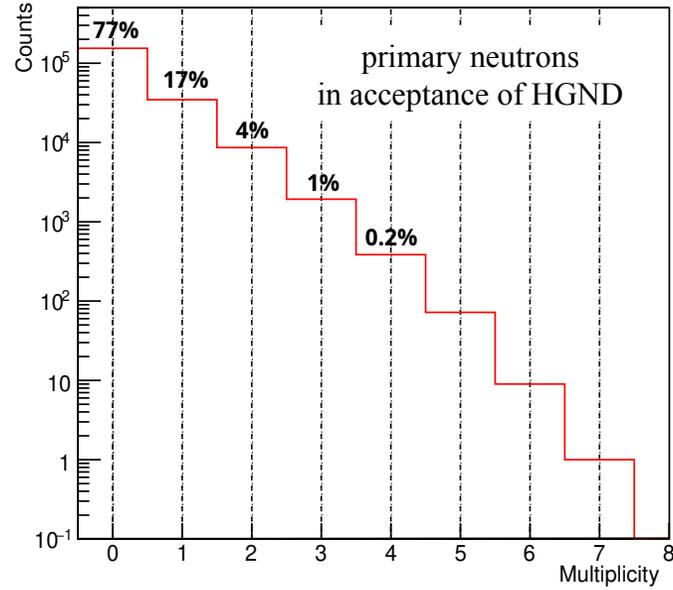
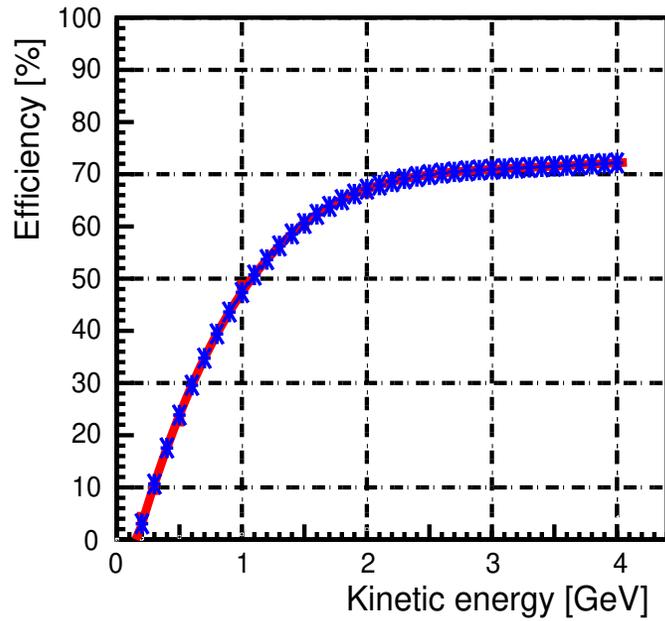
All HGND surfaces



Selecting $ToF < 35$ ns rejects:

- background neutrons - 77%
- gamma - 15%
- primary neutrons - 8%

Measuring the primary neutrons with energies $\gtrsim 300$ MeV



BiBi@3AGeV
DCM-QGSM-SMM
200k minbias

$$\text{Efficiency} = \frac{N_{\text{events with hits}}}{N_{\text{events}}}$$

Hit selection: ≥ 2 hits with signal > 3 MeV (~ 0.5 MIP)

Beam rate: 10^6 per spill,

Duty factor of the beam: 50%

Efficiency of accelerator operation: 70%

Target interaction length: 2%,

Mean primary neutron yield:

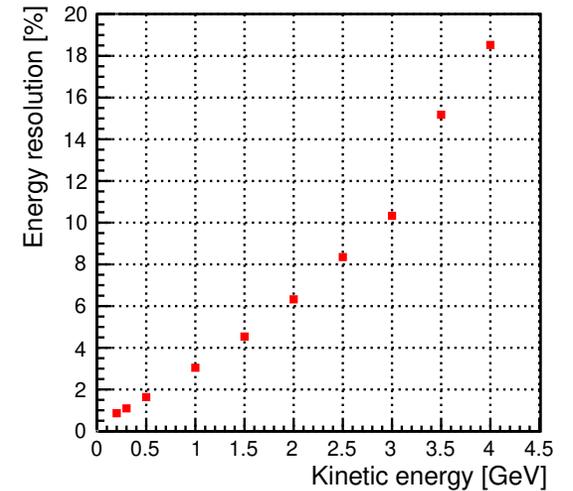
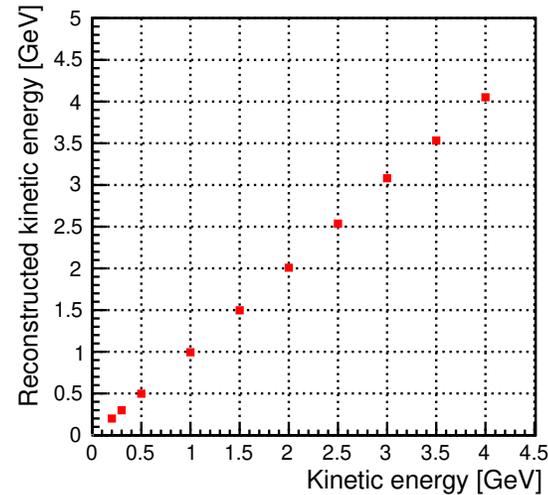
0.17 (single) — 0.23 (all) neutron / interaction

Mean efficiency of the HGND detector: 50%

1 month of the BM@N run $\sim 1.2 \cdot 10^9$ single primary neutrons

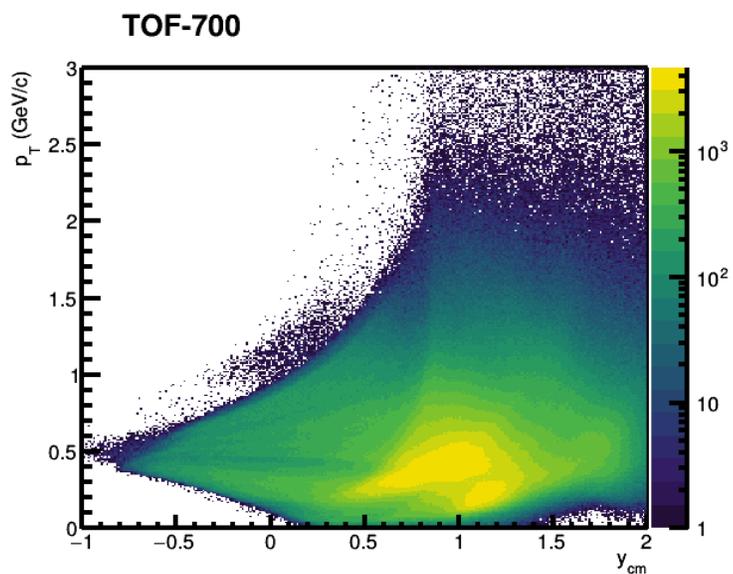
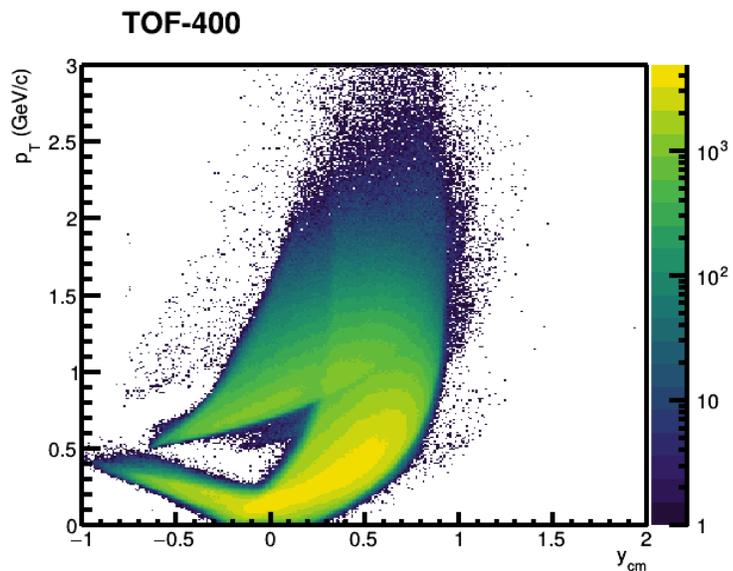
with kinetic energy > 300 MeV can be collected

Upper limit: $1.5 \cdot 10^9$ neutrons (additional multi-neutron event recognition is required).

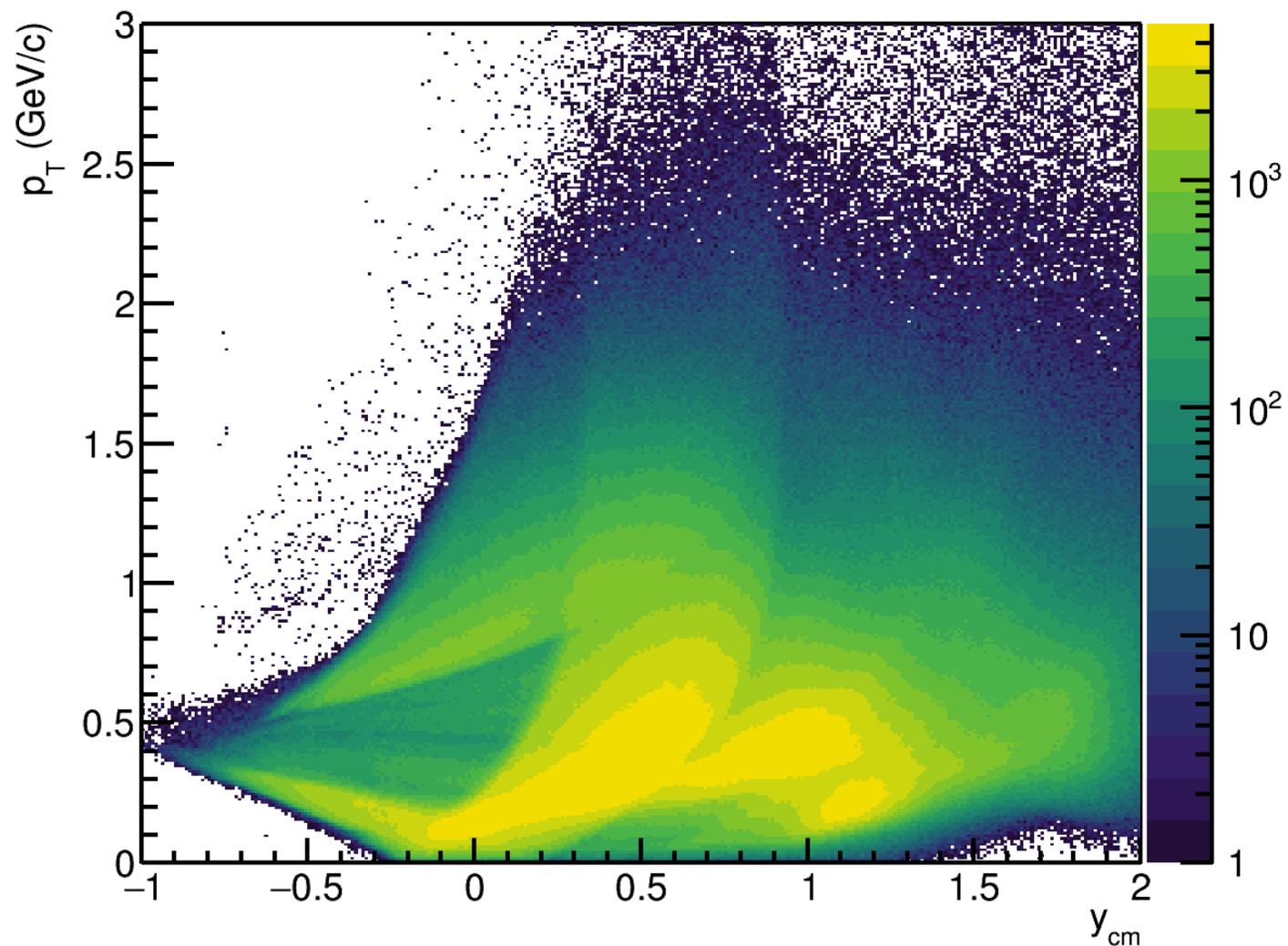


Methods of neutrons energy reconstruction in multi-neutron events are currently under development.

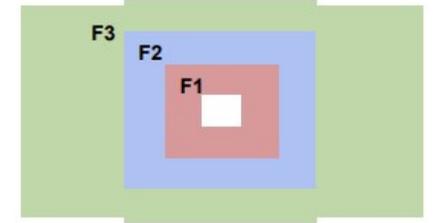
Proton p_T - y acceptance



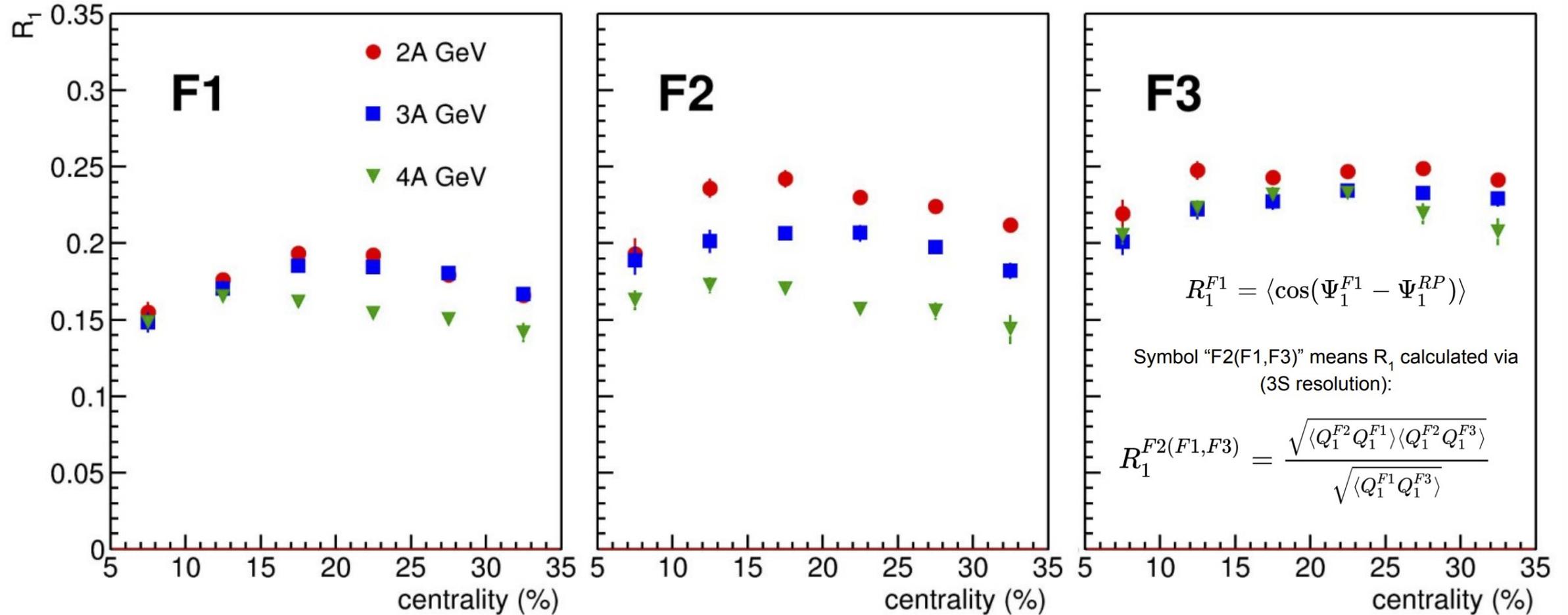
Combined



Performance study: R1

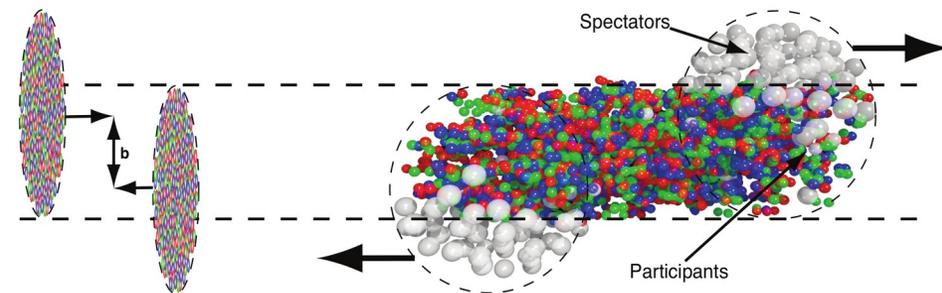


DCMQGSM-SMM



Event centrality: FQH&FHCAL correlation

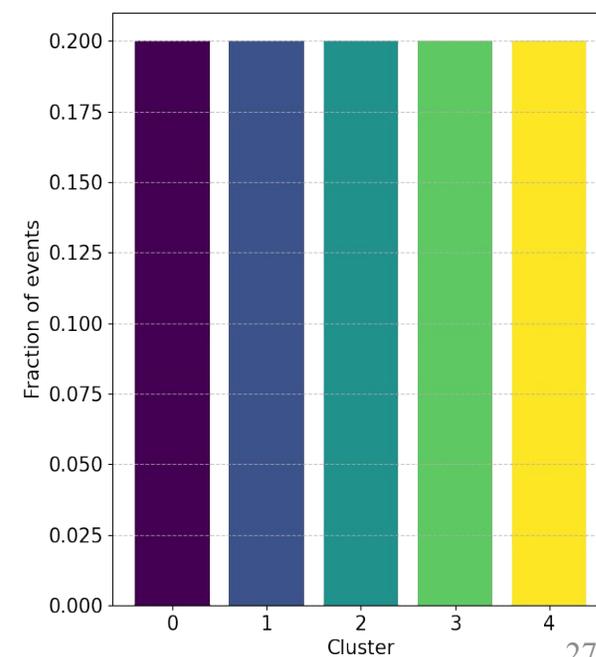
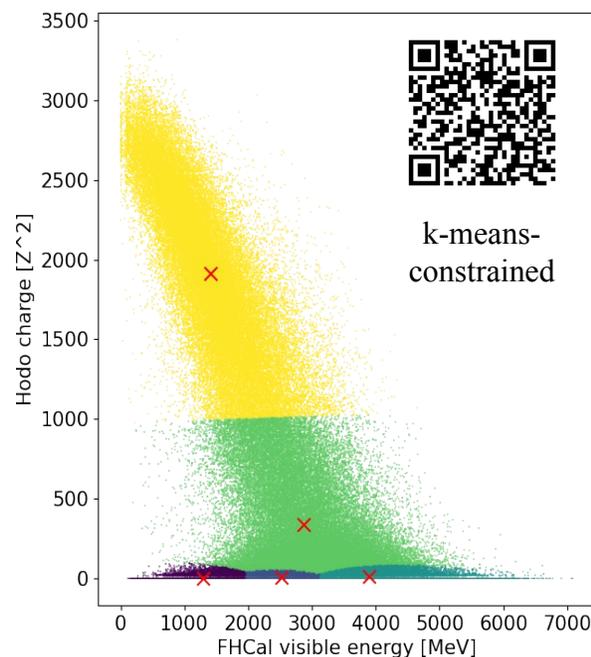
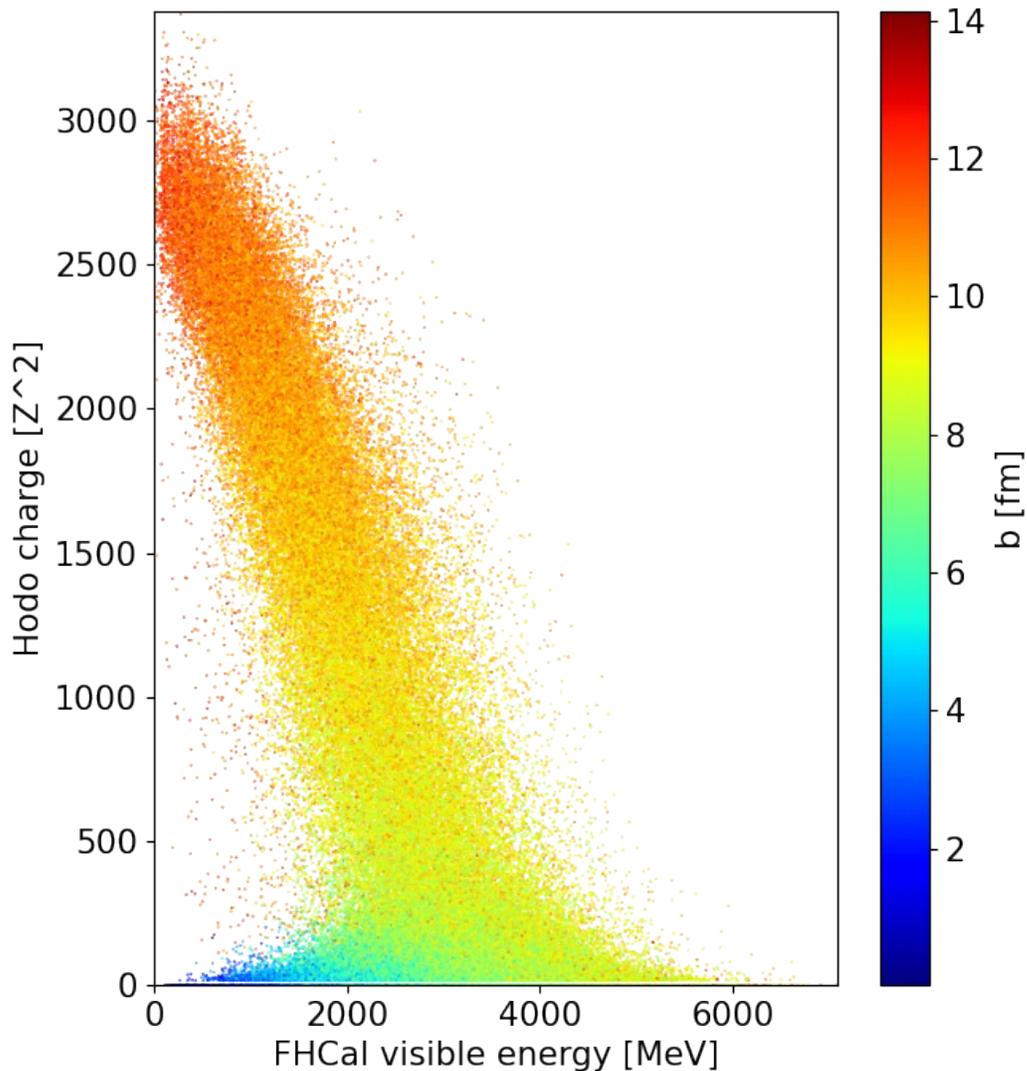
XeCsI@3.8A GeV. DCM-QGSM-SMM 250k minbias



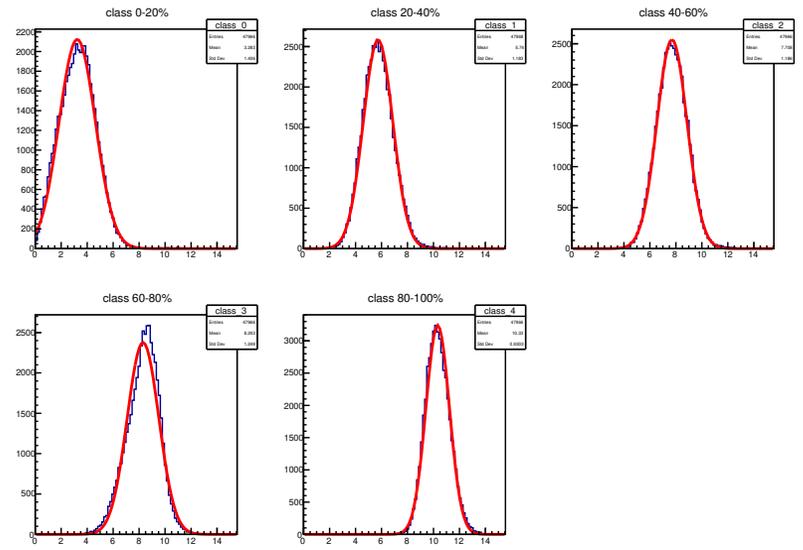
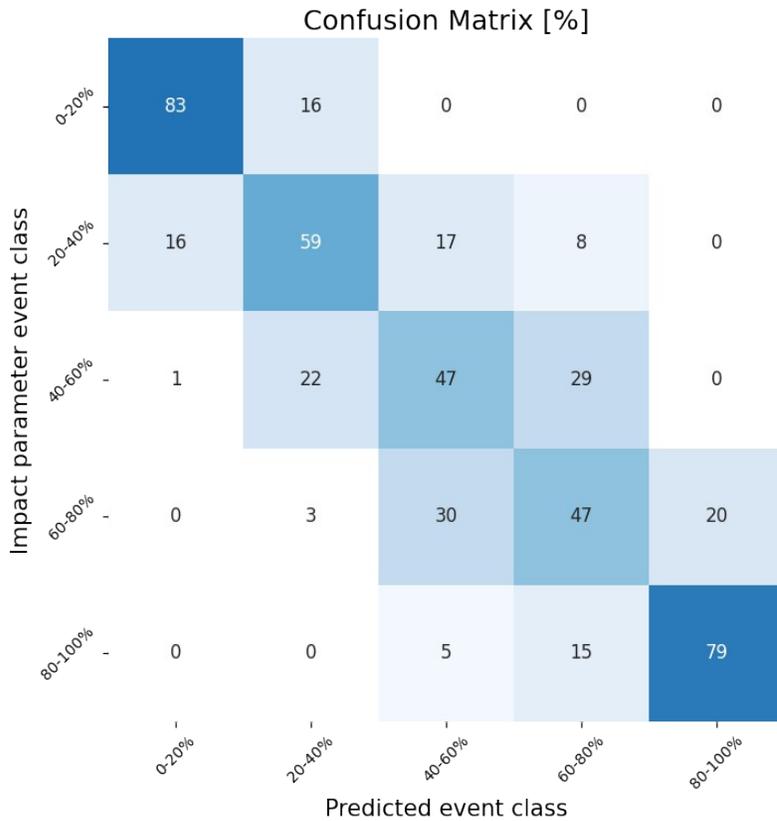
$$c(b) = \frac{\int_0^b \frac{d\sigma}{db'} db'}{\int_0^\infty \frac{d\sigma}{db'} db'} = \frac{1}{\sigma_{A-A}} \int_0^b \frac{d\sigma}{db'} db'$$

The impact parameter b is not a measurable quantity, therefore experimental observables are used to determine centrality.

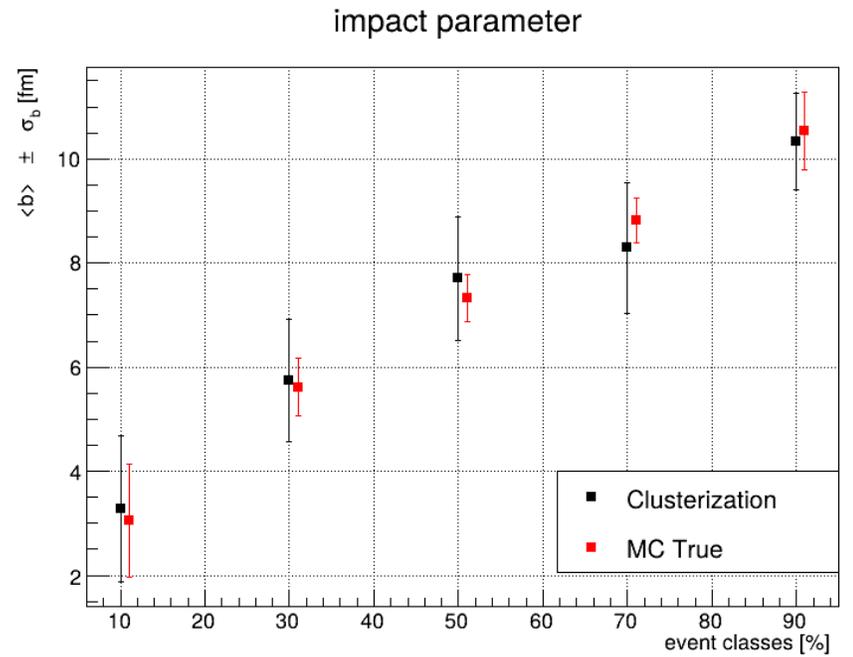
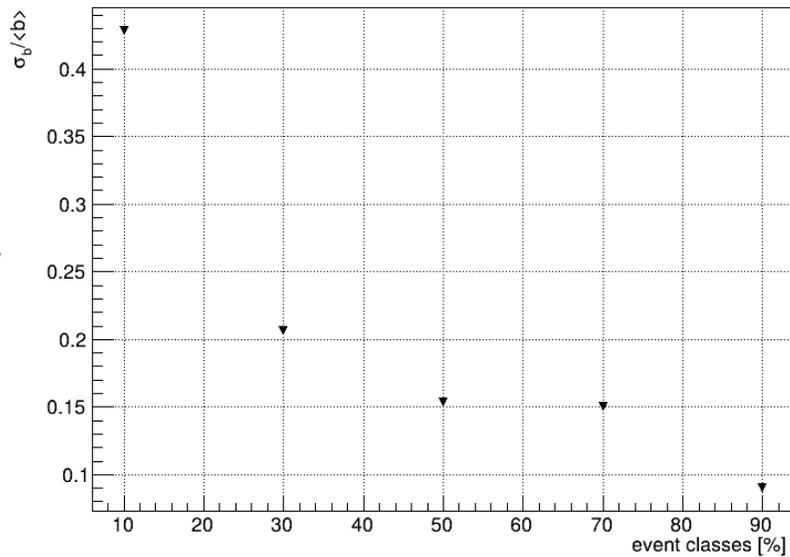
Event class as clusterization task: $c \approx \frac{1}{\sigma_{A-A}} \int_{\mathbf{X} \in \Omega_k} \frac{d\sigma}{d\mathbf{X}} d\mathbf{X}$



Event characterisation: Cluster information from simulation

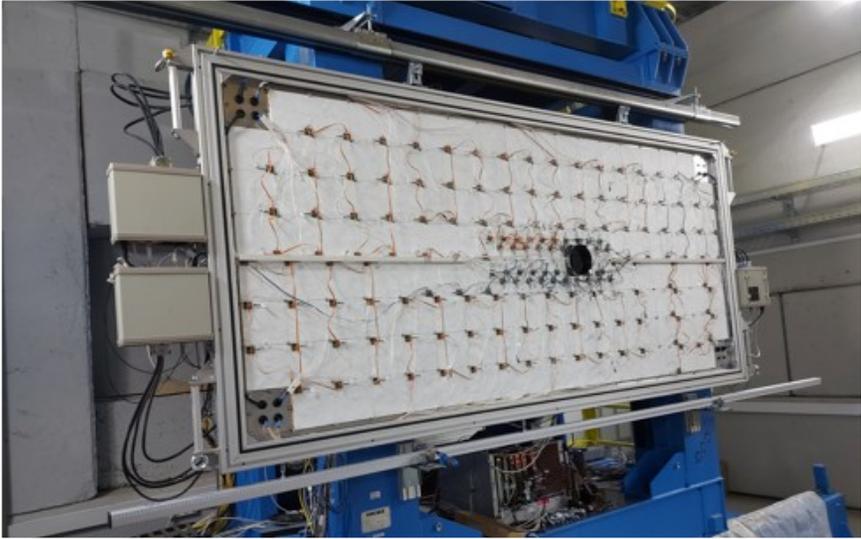


impact parameter resolution



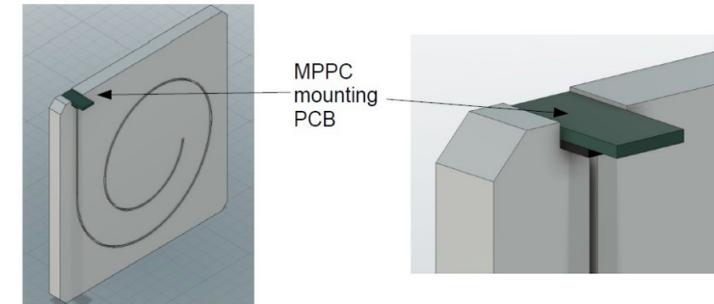
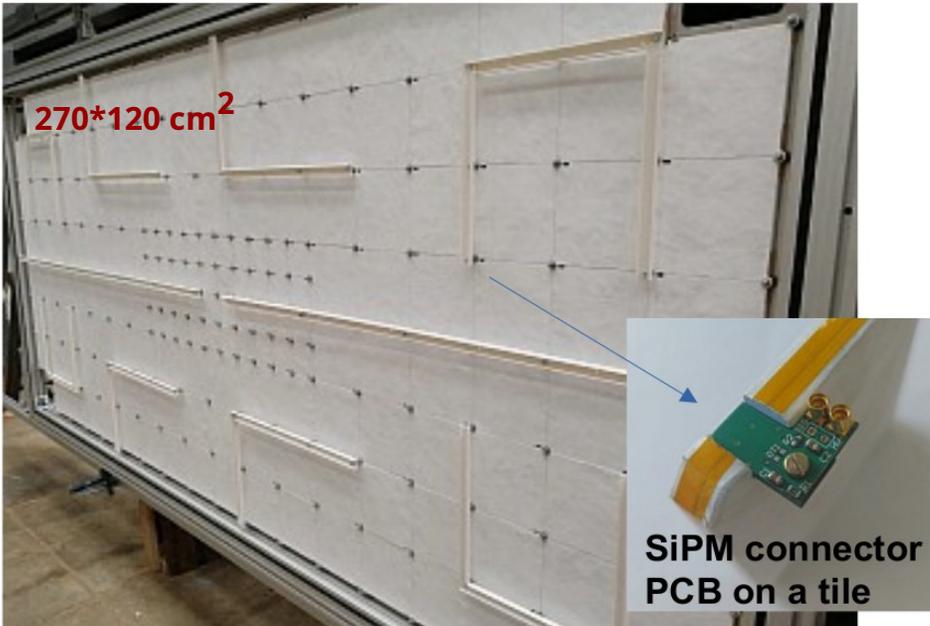
XeCsI@3.8A GeV. DCM-QGSM-SMM 250k minbias

Bayesian inversion is upcoming to determine centrality in experimental data

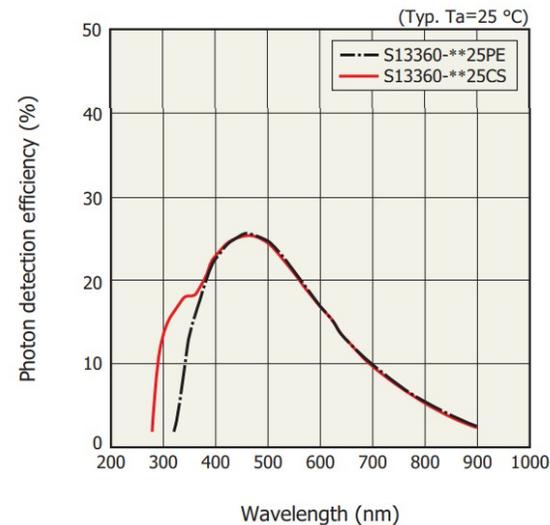


ScWall (Scintillation Wall)

- 36 small inner cells $7.5 \times 7.5 \times 1 \text{ cm}^3$ + 138 big outer cells $15 \times 15 \times 1 \text{ cm}^3$
- light yield for MIP signal – small cells 55 p.e. $\pm 2.4\%$; big cells 32 p.e. $\pm 6\%$.
- beam hole for heavy fragments
- covered with a light-shielding aluminum plate
- light collection by WLS fibers
- light readout with SiPM mounted on the PCB at each scint. cell

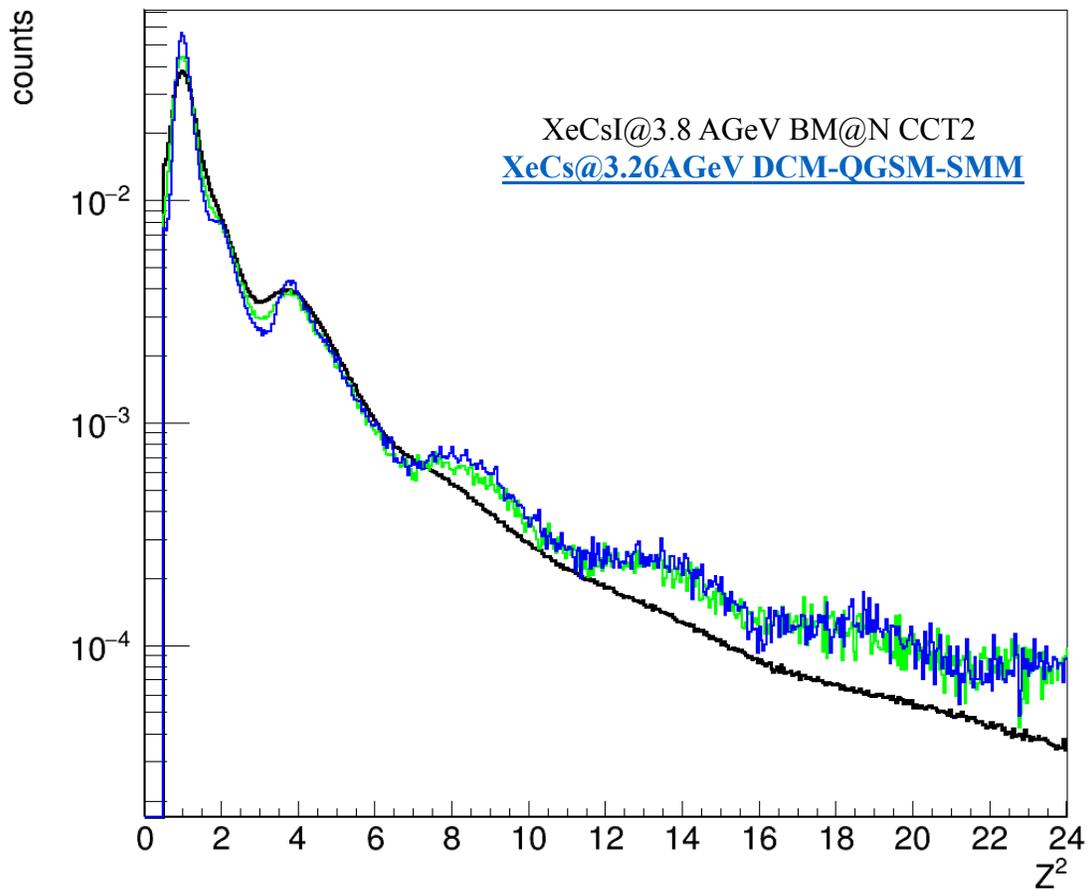


light collection from tiles



Hamamatsu MPPC S13360-1325CS $1.3 \times 1.3 \text{ mm}^2$
 Number of pixels: 2668
 Gain: 7×10^5
 PDE: 25%





ScWall Z^2 distributions

41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58					
59	60	A	62	63	64	B	66	67	68	69	C	71	72	73	74	D	75	76				
77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94					
95	96	97	98	99	100	101	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	102	103	104	105	106	107
108	109	110	111	112	113	114	11	12	13	14	15	16			19	20	115	116	117	118	119	120
121	122	I	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	K	133	134	135	136	L	137	138		
139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156					
157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174					

