

# Изучение рождения протонов, дейтронов и тритонов в столкновениях аргон-ядро в эксперименте VM@N на ускорительном комплексе NICA

В.И. Колесников<sup>1</sup>, М.Н. Капишин<sup>1</sup>, Л.Ковачев<sup>1</sup>  
для VM@N эксперимента  
<sup>1</sup>ЛФВЭ, ОИЯИ



Сессия-конференция секции ядерной физик ОФН РАН, посвященная 70-летию В.А. Рубакова  
Москва, Президиум РАН, 17-21 февраля 2025

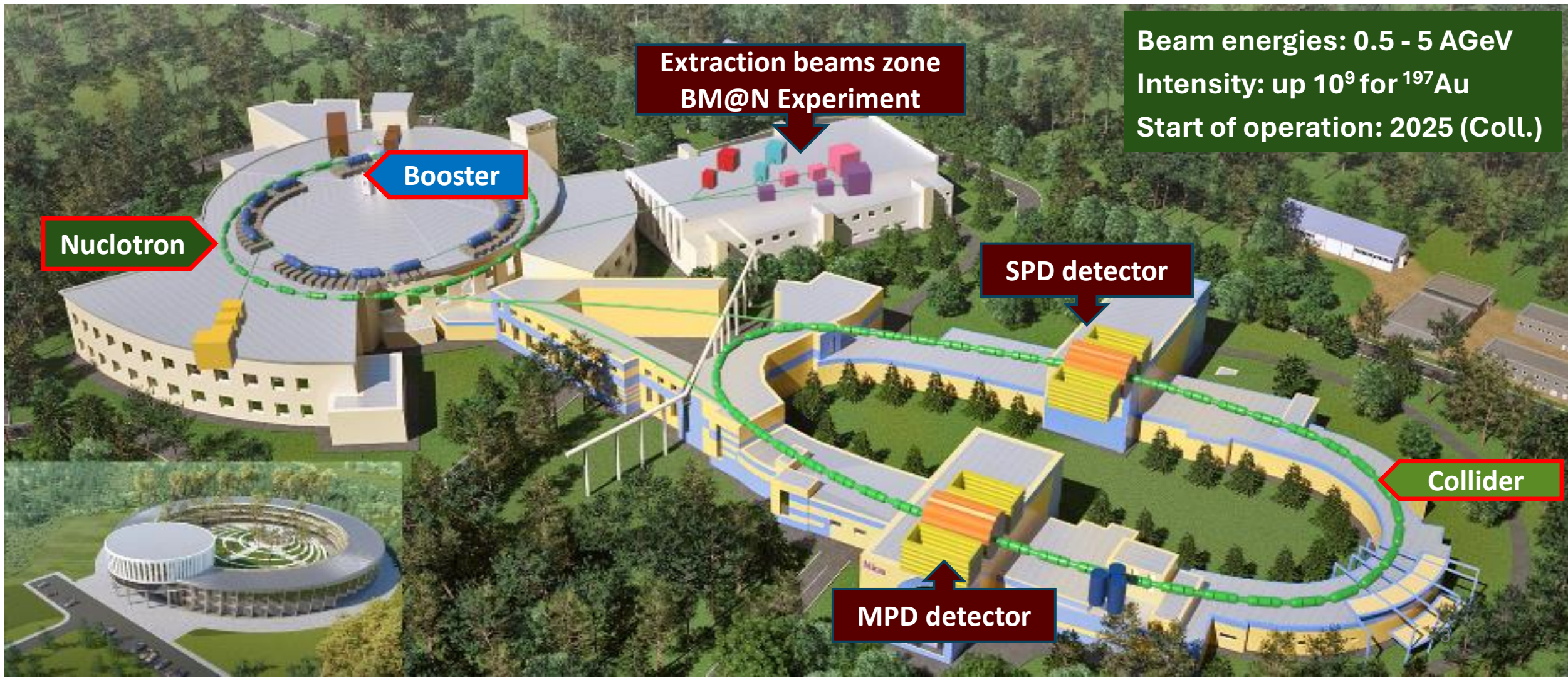
## Содержание доклада

- Введение: перспективы изучения рождения нуклонных кластеров в столкновениях релятивистских ядер на ускорительном комплексе NICA
- Результаты по рождению  $p, d, t$  в реакциях столкновения Ar+ядро в эксперименте VM@N на NICA: pT-спектры, быстротные распределения,  $d/p$ -отношение, коалесценция
- Заключение



# NICA – Nuclotron-based Ion Collider fAcility

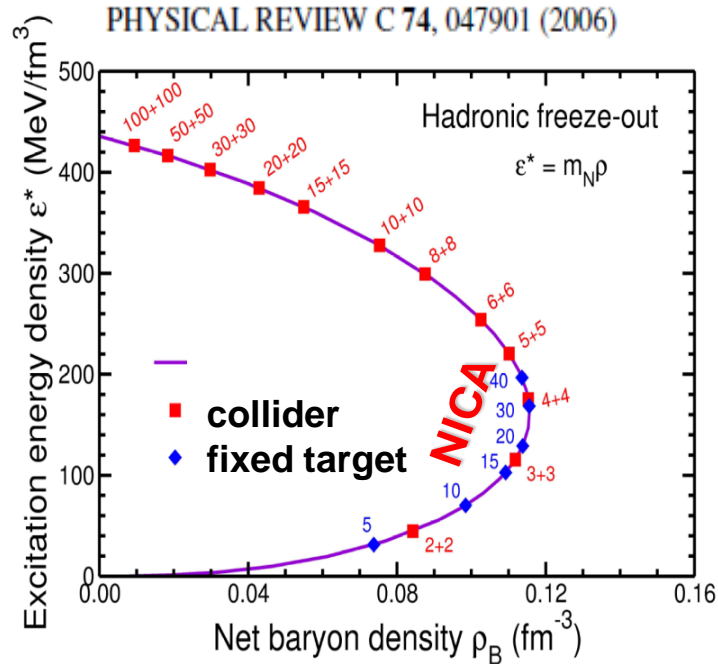
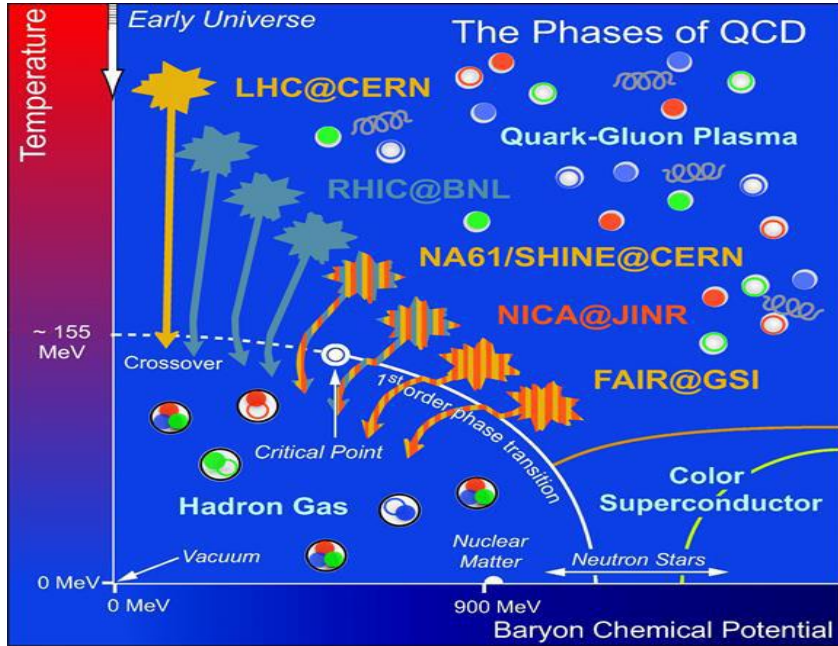
- Ускорительный комплекс с пучками частиц (от  $p$  до  $Au$ ) для фундаментальных и прикладных исследований
- Современные детекторы для изучения плотной барионной материи и спиновых явлений (MPD, SPD, BM@N)
- Уникальная инфраструктура для создания сверхпроводящих ускорителей





# Фазовая диаграмма КХД и столкновения тяжелых ионов

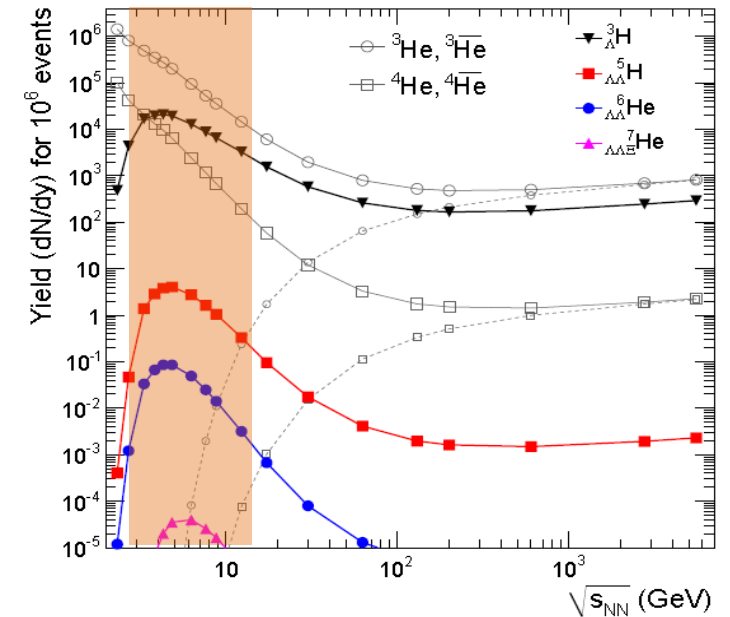
- Фазовая диаграмма КХД: разнообразие условий (от ранней Вселенной до нейтронных звезд)
- Отсутствие экспериментально подтвержденной структуры (фазовые переходы, критическая точка)



## NICA: плотная материя для конечных $\mu_B$ и T

- Барионная плотность до  $10\rho_0$ , максимальное freeze-out значение  $\mu_B = (300-750)$  MeV,  $T_{ch} \sim (120-150)$  MeV
- Энергии: BM@N (FT) - 2-4.5A GeV, MPD(Collider) -  $\sqrt{s_{NN}} = 3-11$  GeV

A. Andronic et al, PLB 697 (2011) 203

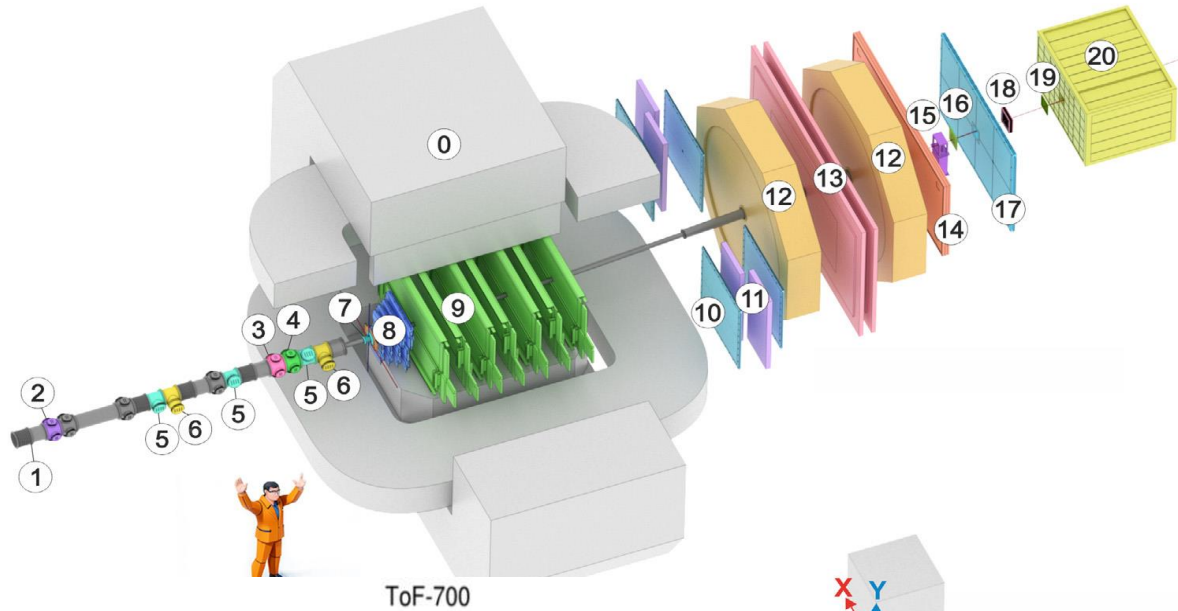


## Зачем изучать рождение протонов и легких ядер на NICA?

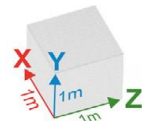
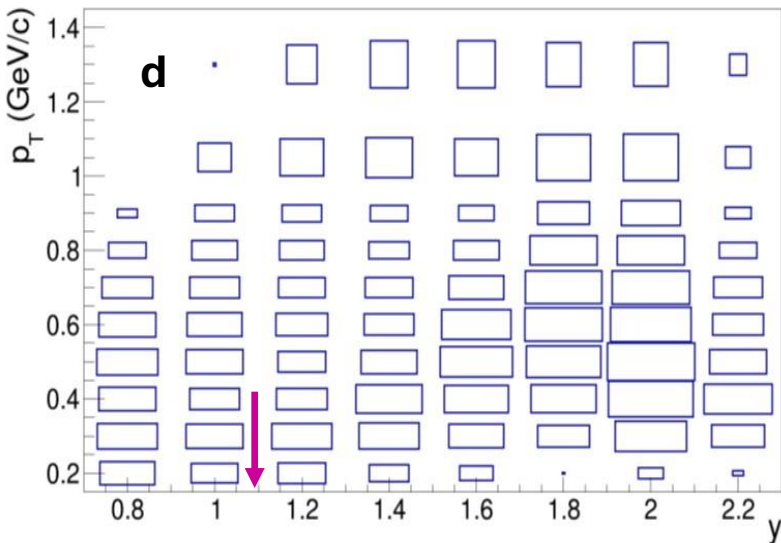
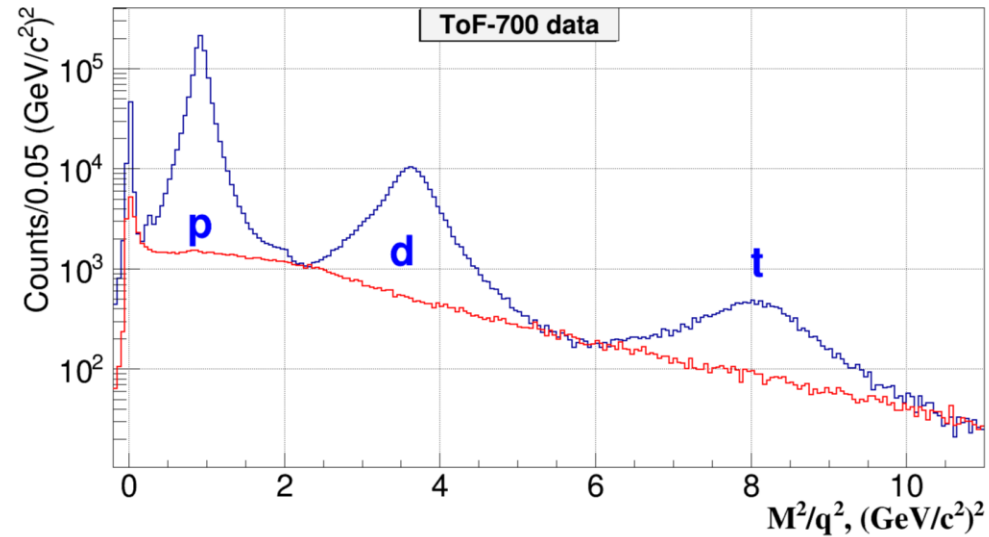
- Протоны:** барионная плотность и трансфер барионного числа, фазовые переходы и критические явления в КХД материи, коллективные эффекты
- Легкие ядра:** высокая вероятность образования нуклонных кластеров в плотной горячей материи. Выходы легких ядер чувствительны к координатно-импульсным корреляциям и динамическим флуктуациям (фазовые трансформации и критические явления)

# BM@N (Baryonic Matter @ Nuclotron) эксперимент на NICA

NIM A 1065 (2024) 169532



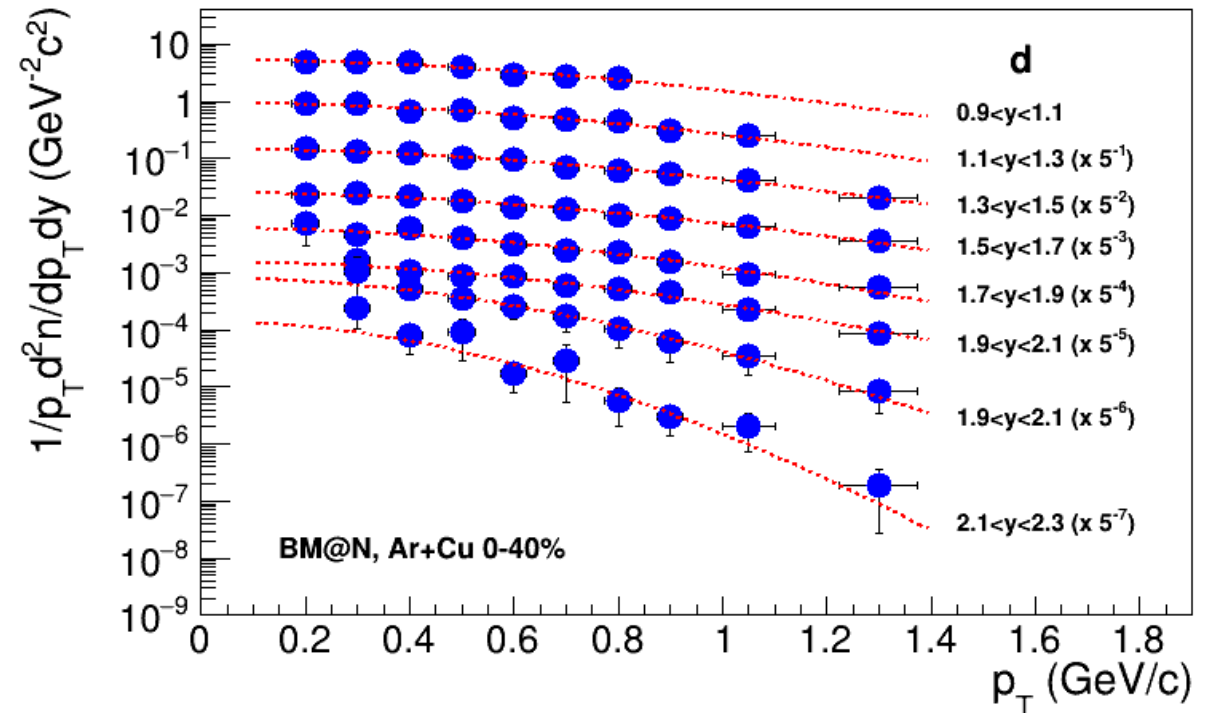
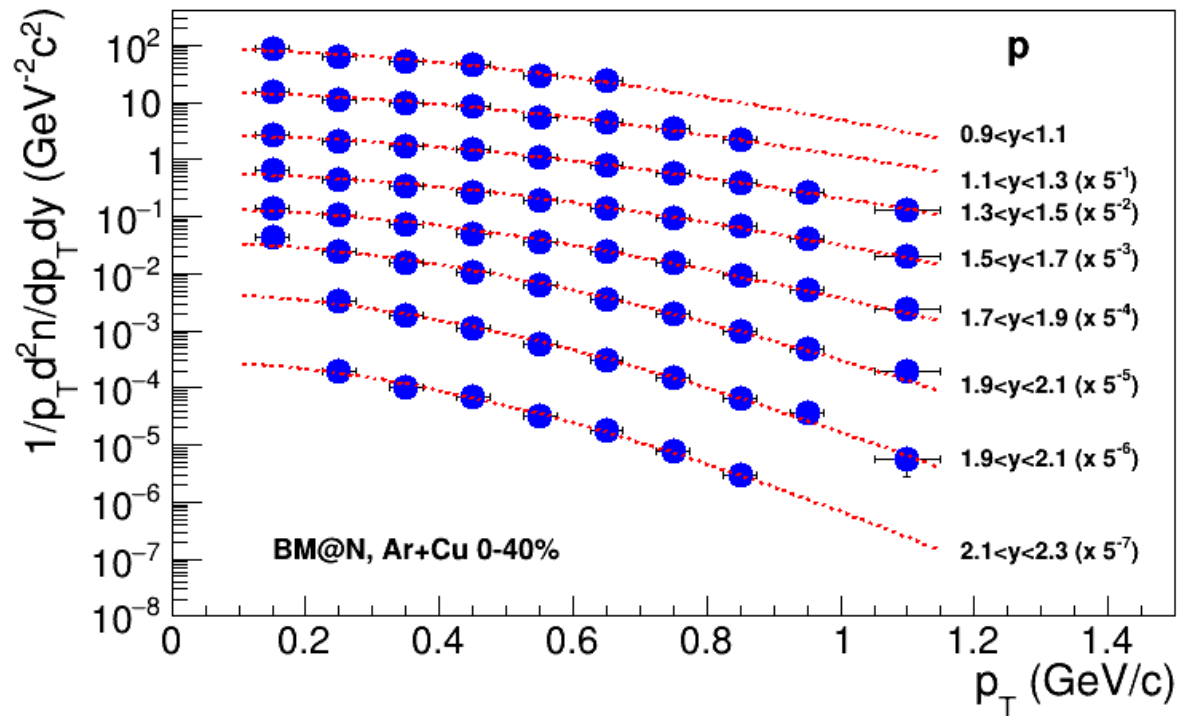
- Tracking : ST + GEMs + CSC/CSC ( $\delta p / p \sim 2 \cdot 10^{-2}$ )
- PID : MRPC TOF400/700 ( $\sigma_{\text{TOF}} \sim 85 / 115$  ps)
- Trigger and centrality: multiplicity detectors BD+SiMD



- Реакции:** Ar + C,Al,Cu,Sn,Pb при 3.2A ГэВ ( $\sqrt{s} = 3.1$  ГэВ)
- Полная реконструкция событий
- Центральность (0-40% и 40-80%) по множественности частиц
- Идентификация частиц (ToF) в бинах по быстройте и  $p_T$
- Коррекции по реалистичному моделированию детектора

# BM@N результаты: pT-спектры $p, d$ в Ar+A 3.2A ГэВ

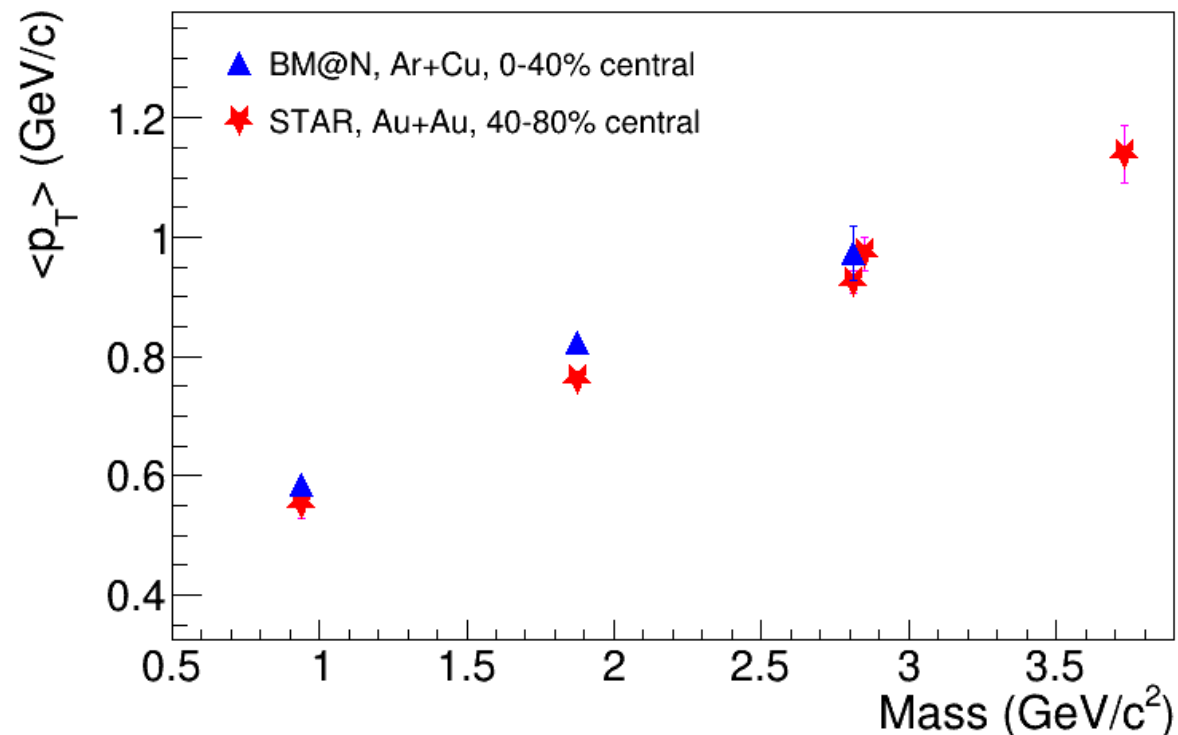
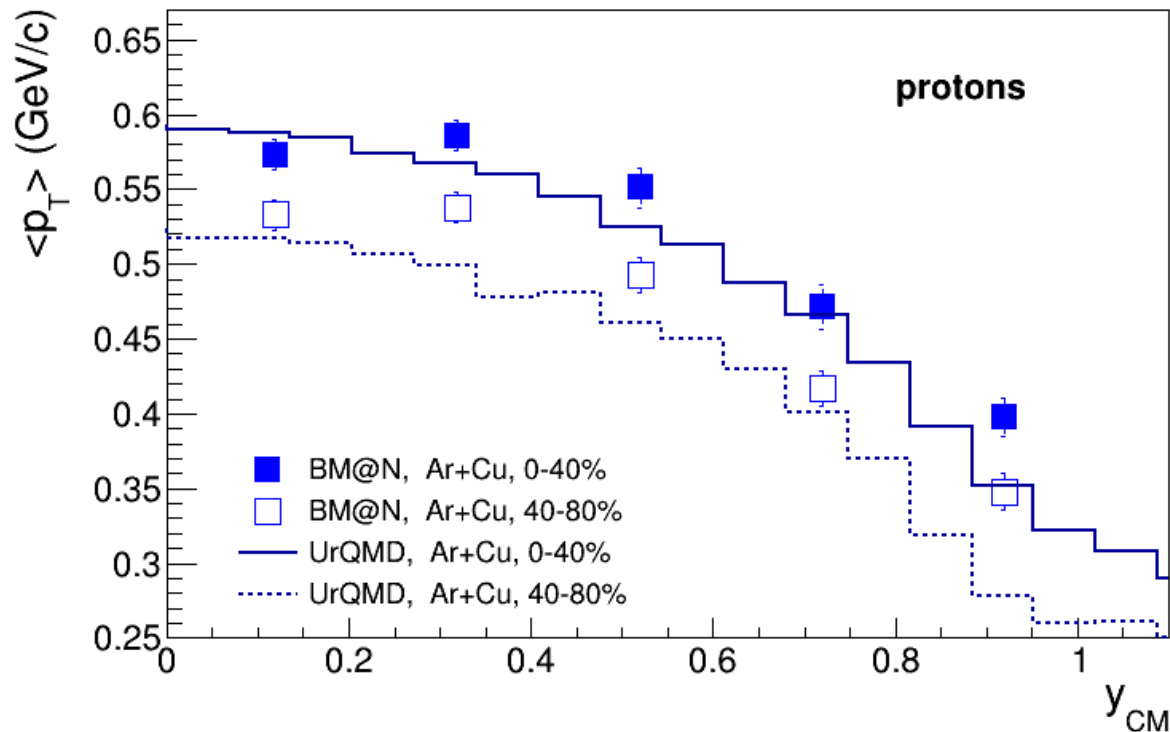
- $16 \cdot 10^6$  Ar + C, Al, Cu, Sn, Pb at  $E/A = 3.2$  GeV; детали анализа см. в *JHEP 07 (2023) 174*
- Распределения по поперечному импульсу позволяют оценить (эффективную) температуру в источнике частиц (в качестве примера см. близкую к симметричной систему Ar+Cu)



- Для всех частиц формы спектров соответствует экспоненциальным по  $mT$  распределениям во всех быстротных интервалах
- Фиты для определения полного интеграла спектров и  $\langle pT \rangle$ :  $\sim 5-30\%$  ( $p$ ),  $10-40\%$  ( $d$ ) и  $12-45\%$  ( $t$ ) экстраполяция

# BM@N результаты: $\langle p_T \rangle$ частиц в Ar+A 3.2A ГэВ

- Сравнение результатов для Ar+Cu (BM@N/NICA, 0-40% central at 3.2A GeV) и Au+Au (STAR/RHIC, 40-80% central at 3A GeV, [Phys. Rev. C 110 \(2024\) 54911](#))

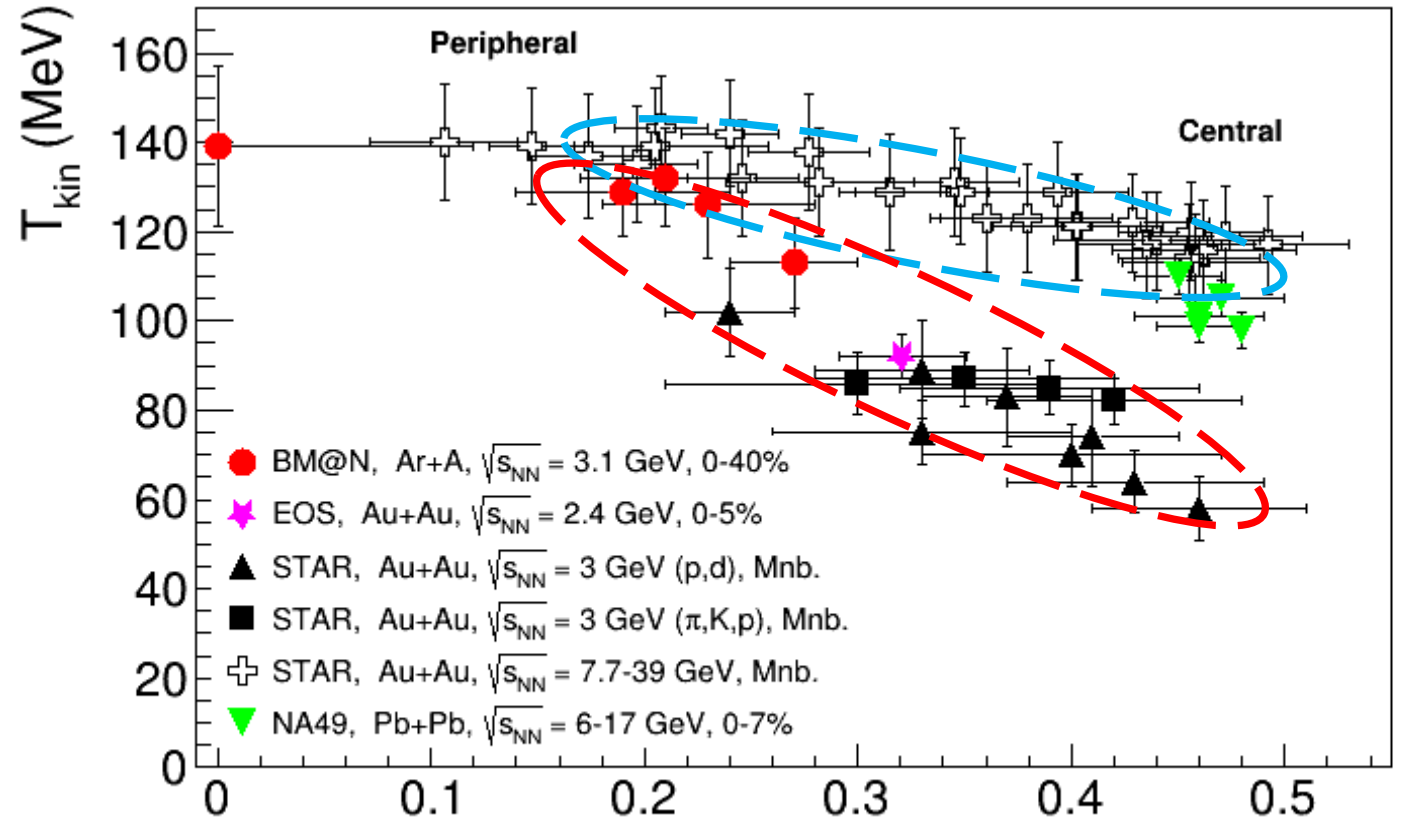
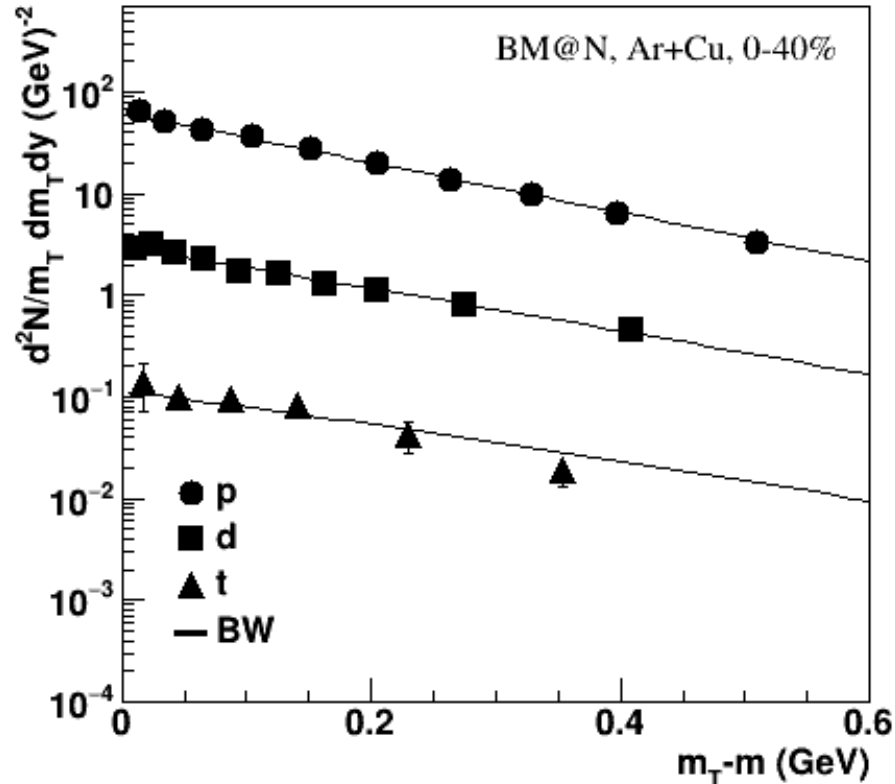


- $\langle p_T \rangle$  возрастает с центральностью столкновения и имеет максимум в midrapidity
- Модели (UrQMD как пример) воспроизводят тренд быстрой зависимости  $\rightarrow$  тест  $p_T$ -generation mechanism?
- $\langle p_T \rangle$  пропорционален массе частицы  $\rightarrow$  указание на наличие радиального расширения в источнике?
- Сравнение Ar+Cu и Au+Au: форма спектров частиц (термодинамические параметры файерболла) определяется числом нуклонов-участников (центральностью столкновения), а не размером сталкивающихся ядер

# BM@N результаты: фиты по BW-модели в Ar+A 3.2A ГэВ

Для расширяющегося источника BW fit:  $C_i \int_0^1 m_t f(\xi) K_1 \left( \frac{m_t \cosh(\rho)}{T} \right) I_0 \left( \frac{p_t \sinh(\rho)}{T} \right) \xi d\xi$

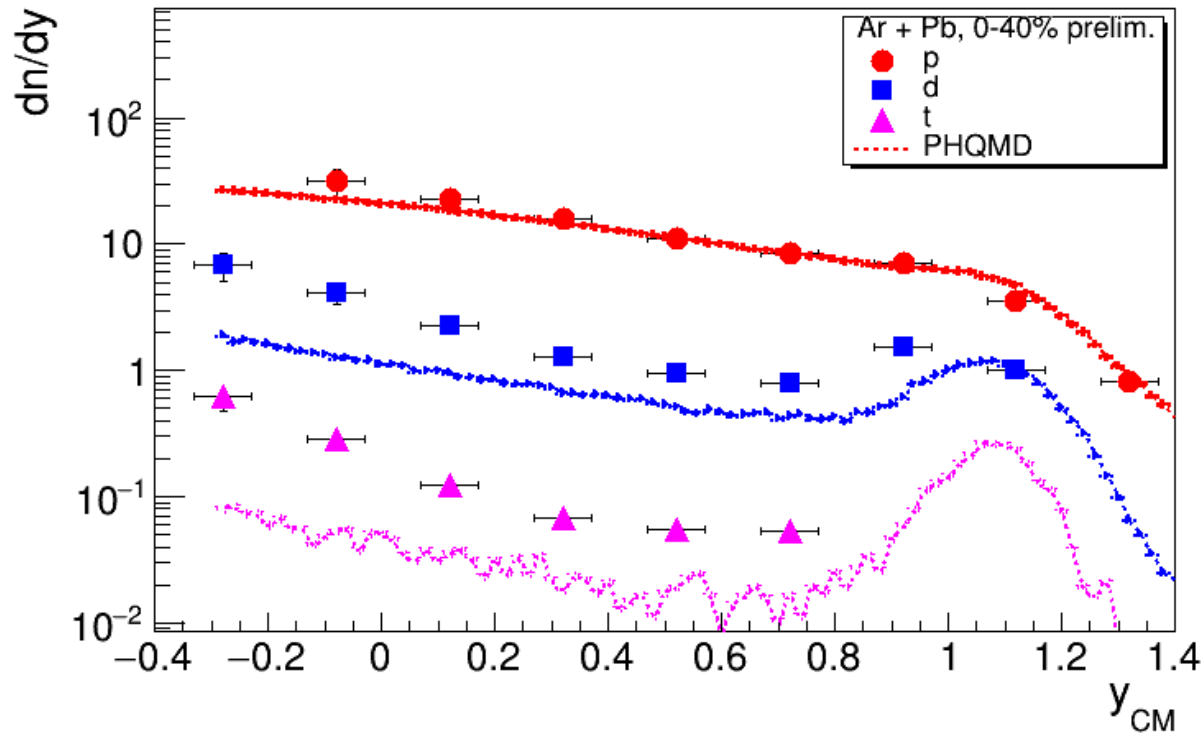
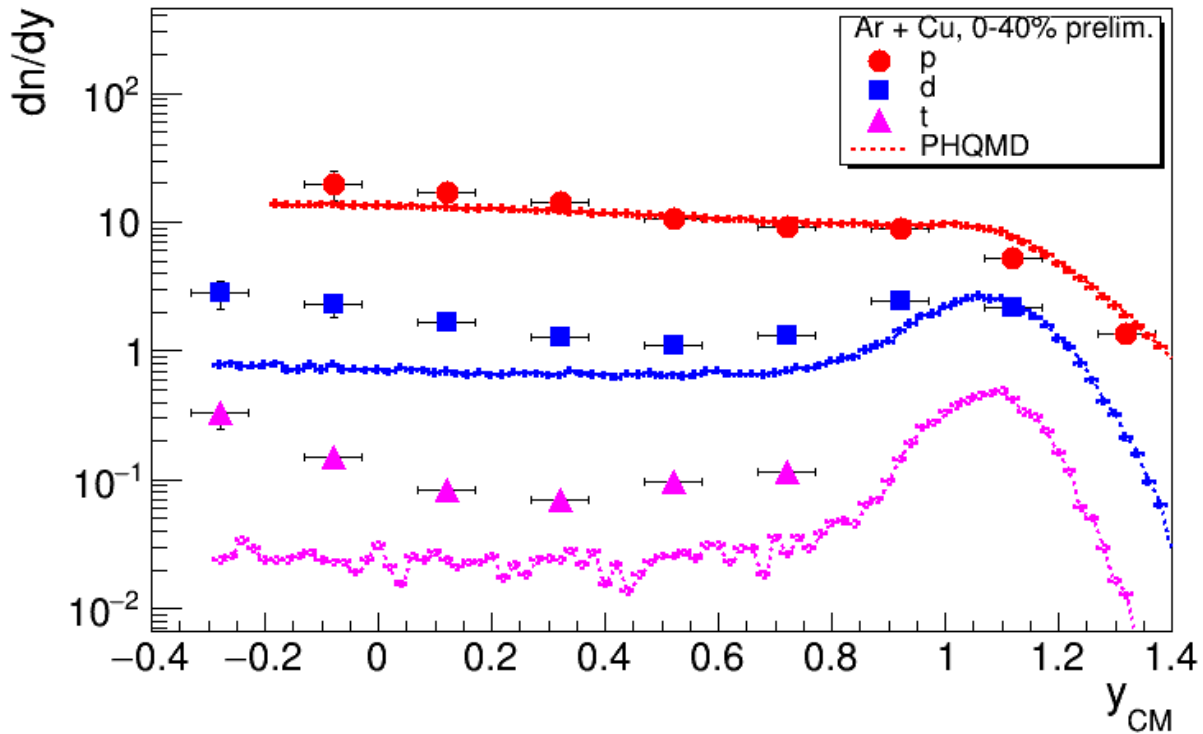
Параметры фитов:  $T$  – температура источника (в момент кинетического вымораживания) и  $\langle \beta \rangle$  (средняя) скорость радиального расширения



- BW фиты ( $p+d+t$ ):  $T \sim 115-140$  MeV,  $\langle \beta \rangle \sim 0.2-0.25$  для 0-40% Ar+A (BM@N)
- Результаты для разных энергий и центральностей столкновения: тренд меняется при  $\sqrt{s} < 6$  GeV, что может указывать на радикальное изменение уравнения состояния(?) → нужны новые данные для подтверждения тренда



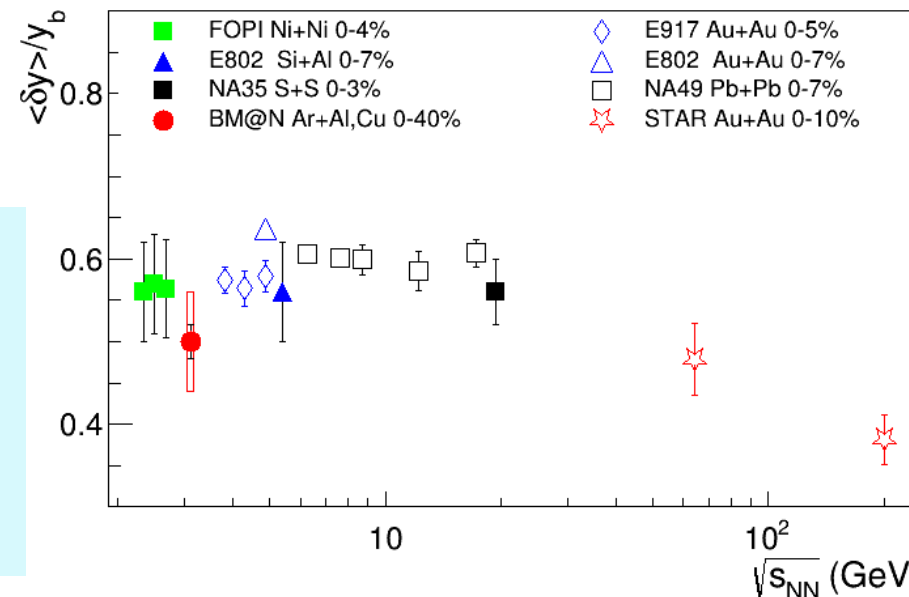
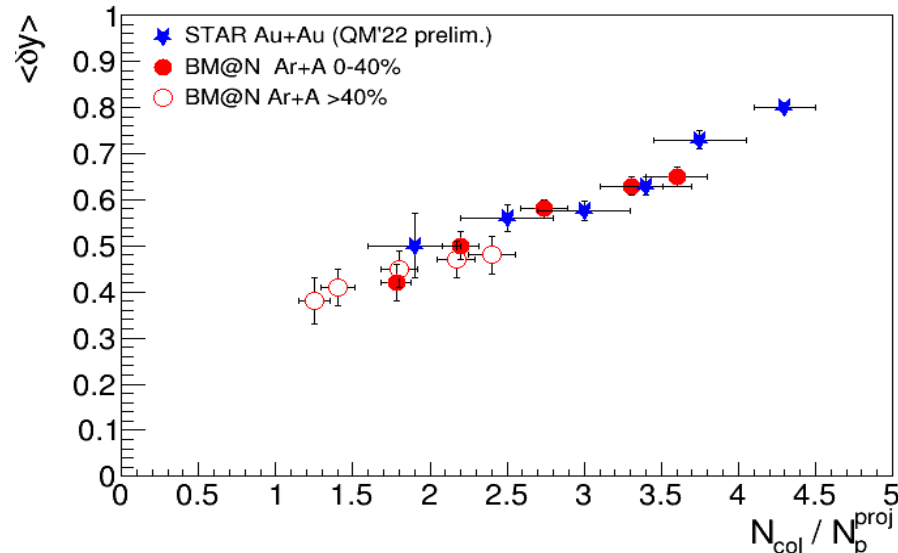
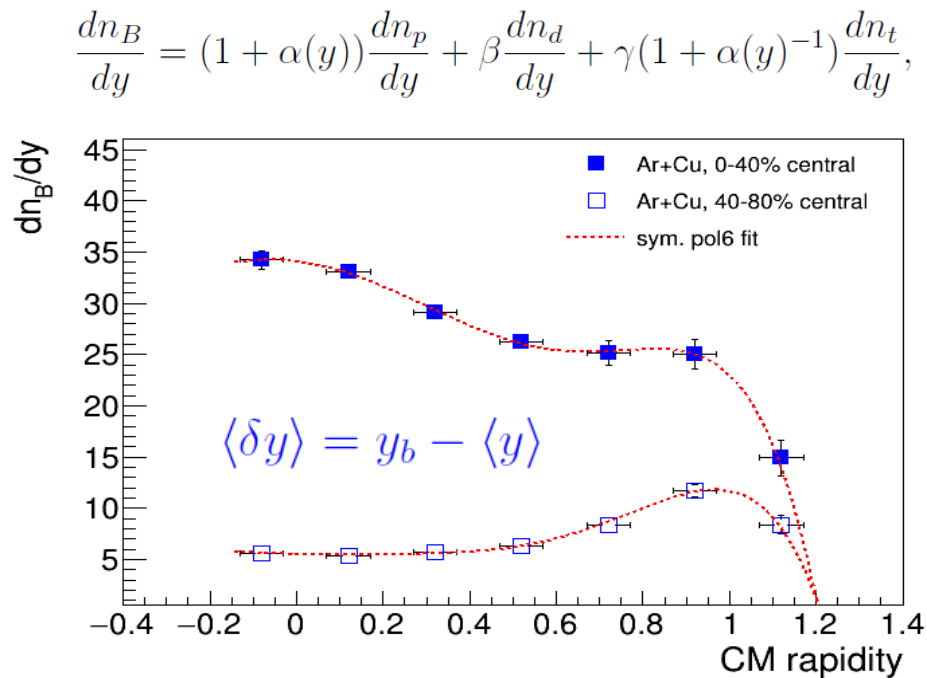
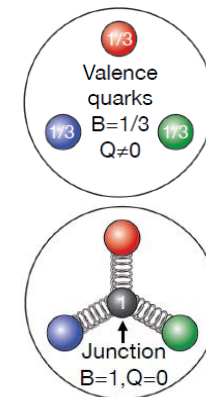
# BM@N результаты: быструтные распределения для $p, d, t$ в Ar+A 3.2A ГэВ



- **Протоны:** микроскопические модели (PHQMD) удовлетворительно описывают быструтные распределения
- **Легкие ядра:** сильный дефицит выходов для midrapidity в моделях. Нужны дополнительные источники (механизмы) образования ядер, к примеру, образование и распад возбужденных состояний (*Phys. Lett. B 809 (2020) 135746*)

# BM@N результаты: *rapidity loss* в Ar+A 3.2A ГэВ

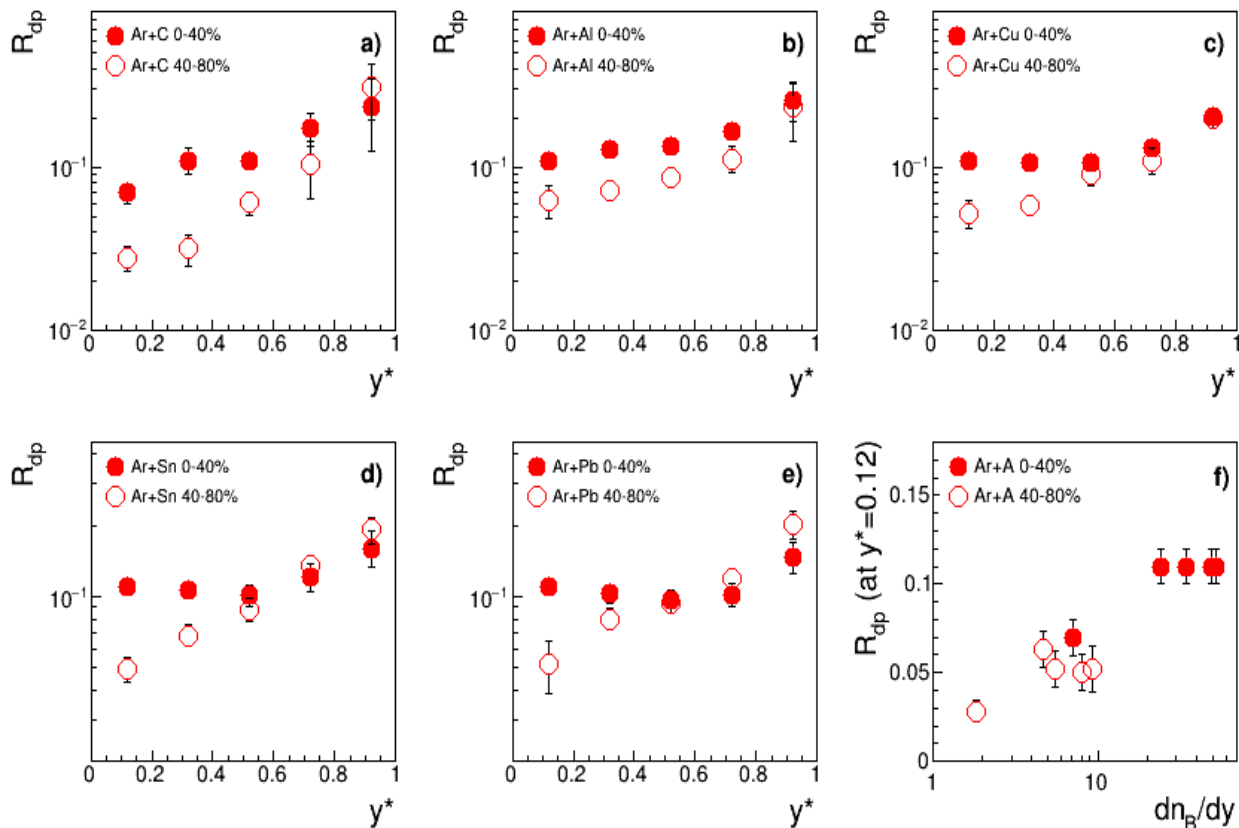
- Механизм потерь быстроты (трансфера барионного числа) важен для понимания динамики реакции
- Барионная плотность в файерболле и свойства плотной барионной материи (EOS, сжимаемость и т.д.)



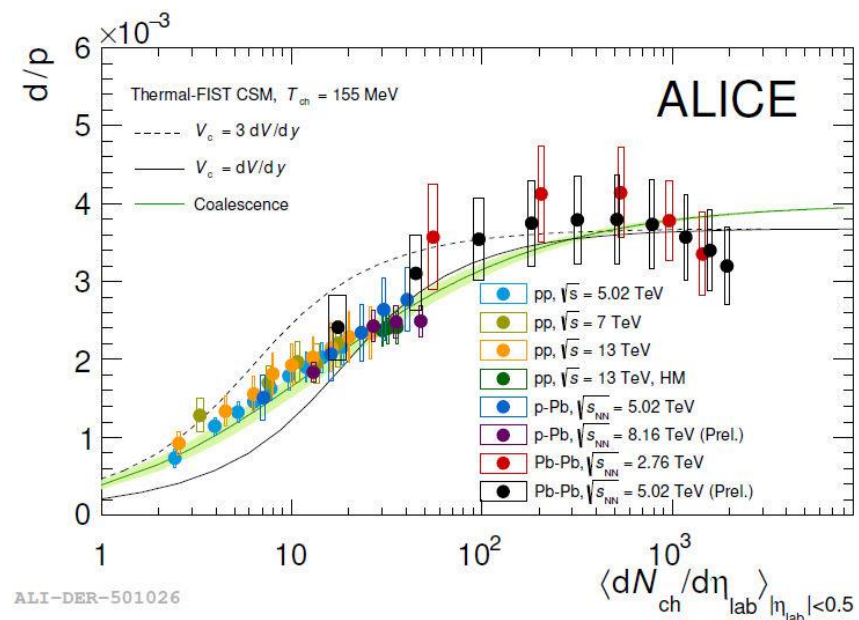
- $\langle \delta y \rangle$  растет с увеличением числа вторичных столкновений (т.е. с увеличением центральности и размера системы)
- $\langle \delta y \rangle$  в Ar+A и Au+Au сравнимы для равного числа вторичных столкновений на один нуклон-участник
- $\langle \delta y \rangle$  пропорционально быстроту пучка в широком диапазоне энергий столкновения

# BM@N результаты: $d/p$ -отношение $R_{dp}$ в Ar+A

- $R_{dp}$  пропорционально phase-space density нуклонов



- $R_{dp}$  растет при приближении к области быстроты пучка в более периферийных Ar+A и имеет плато в 0-40% центральных событиях
- Значение  $R_{dp}$  в midrapidity растет с увеличением плотности частиц по быстроте для малых размеров области взаимодействия но выполаживается в центральных столкновениях Ar+A



ALI-DER-501026

- Аналогичный тренд (рост и выполаживание)  $R_{dp}$  наблюдается в pp, pPb, PbPb столкновениях при энергиях LHC. Рост плотности нуклонов в столкновении малых систем, но в PbPb реакция фибрбол растет в объеме, но  $T$  и  $\mu_B$  не меняется.

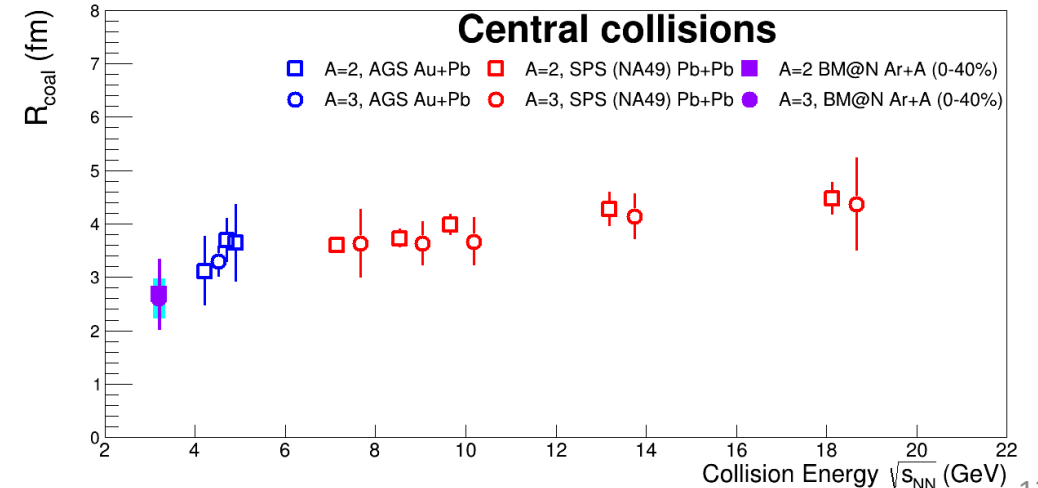
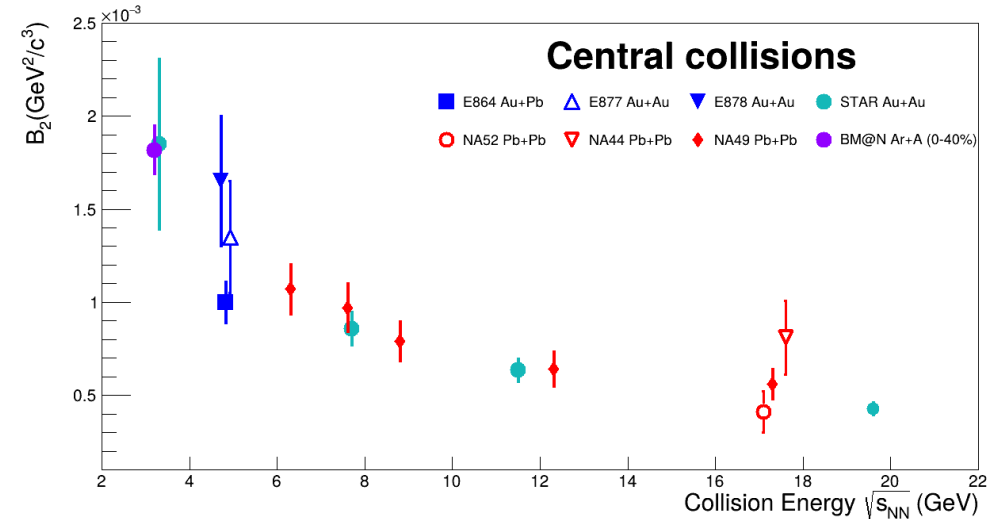
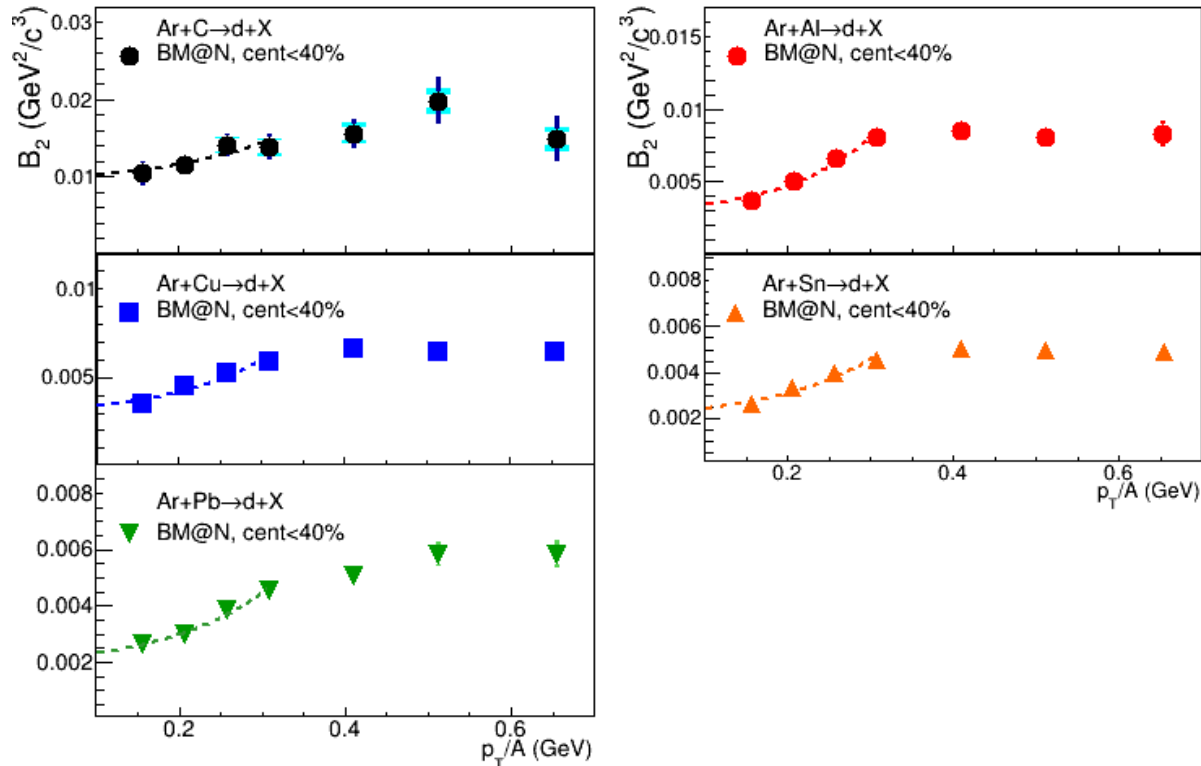


# BM@N результаты: коалесценция и размер источника частиц

- **Коалесценция:** связанные нуклонные кластеры образованы из нуклонов с близкими импульсами, локализованными в пределах в малой пространственной области
- Параметр коалесценции  $B_A$  обратно пропорционален объему источника частиц, коалесцентные радиусы сравнимы с фемто-радиусами из анализа 2-х частичных корреляций

$$E_A d^3 N_A / d^3 p_A = B_A (E_p d^3 N_p / d^3 p)^Z (E_n d^3 N_n / d^3 p)_{|p=p_A/A}^{A-Z}$$

$$B_A \simeq g_s \Lambda_A A^{-1/2} C_A [(2\pi)^{3/2} / (m_T R_{||} (m_T) R_{\perp}^2 (m_T))]^{A-1} \exp[m_T (1/T_p - 1/T_A)]$$



- Параметры коалесценции  $B_{2,3}$  возрастают с уменьшением энергии столкновения, данные BM@N в тренде

## Заключение

- Реализация физической программы NICA осуществляется согласно плана
- BM@N экспериментом представлены результаты по рождению  $p, d, t$  в реакциях  $Ar+C, Al, Cu, Sn, Pb$  при энергии  $E/A = 3.2$  ГэВ:
  - $pT$ -спектры, быстротные распределения и отношения частиц получены для 2-х интервалов по центральности столкновения
  - $\langle pT \rangle$  растет с центральностью и имеет максимум в midrapidity
  - получены средние потери  $\langle \delta u \rangle$  в зависимости от размера области взаимодействия
  - $R_{dp}$  и параметры коалесценции получены для  $Ar+A$  реакций

*Спасибо за внимание!*

**Дополнительные слайды**

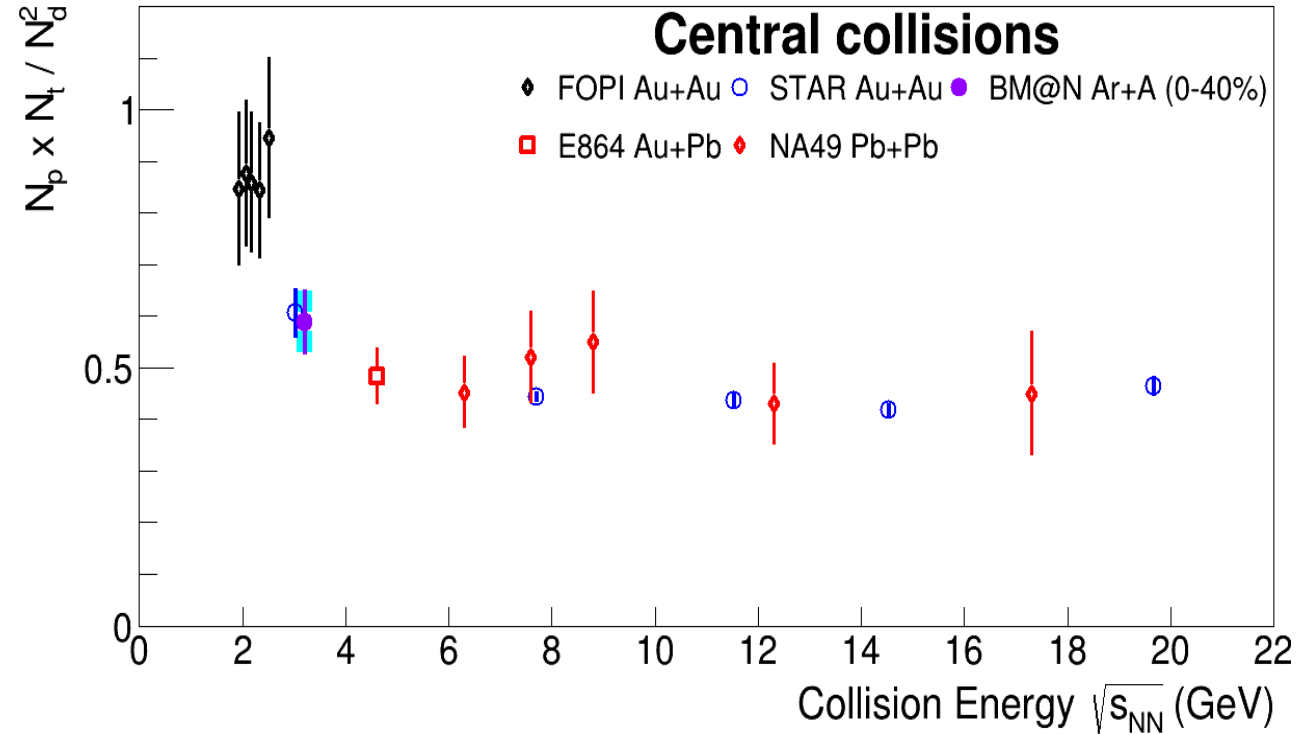
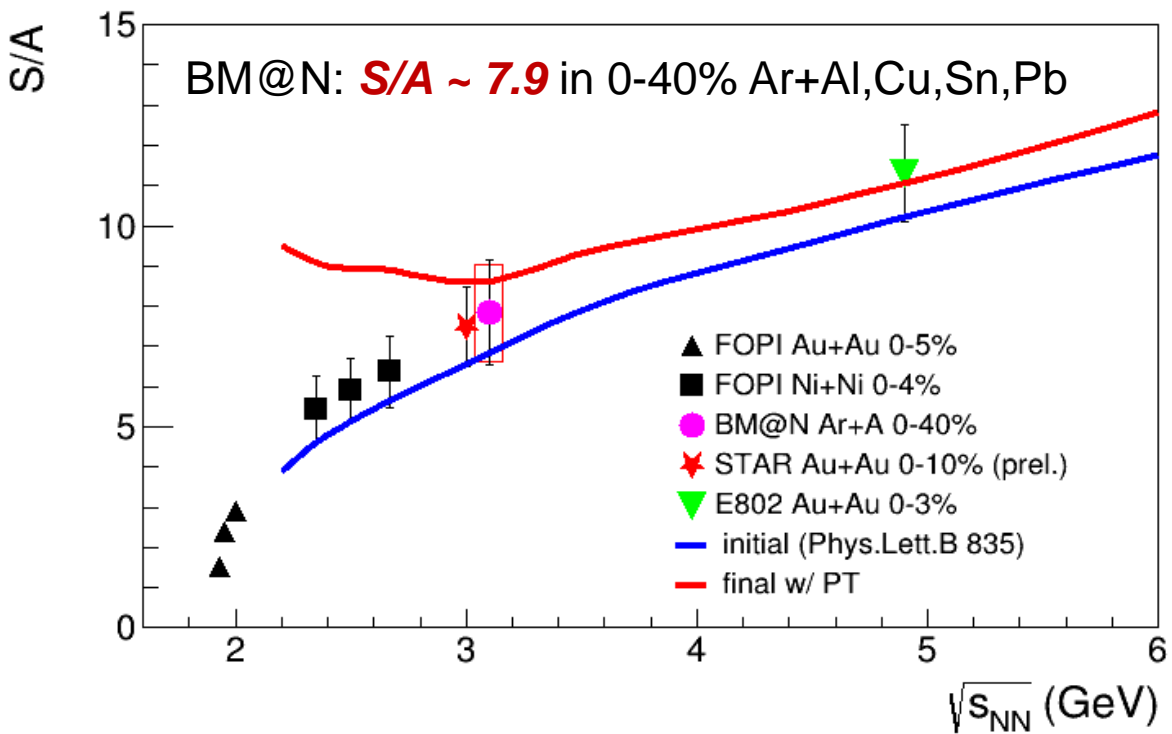


# BM@N результаты: энтропия на барион $S/A$ и отношение $N_p N_t / N_d^2$

- Энтропия-на-барион  $S/A$  может быть получена из  $R_{dp}$   
*Phys. Rep. 131, 4 (1986) 223-318*

$$\frac{S_N}{A} = 3.945 - \ln R_{dp} - \frac{1.25 R_{dp}}{1 + R_{dp}}$$

- $N_p N_t / N_d^2$  получено для  $dn/dy$  значений вблизи midrapidity



- $S/A$  в Ar+A (BM@N/NICA) следует основному тренду – росту с энергией столкновения. Лучшая точность требуется для (не)подтверждения теоретических предсказаний о фазовом переходе при низких энергиях
- Тройное отношение  $N_p N_t / N_d^2$  слабо зависит от энергии и размера системы. Детали энергетической и system-size зависимостей в области энергий NICA могут быть прояснены в ближайшее время