



# Программа и первые физические результаты эксперимента BM@N на ускорительном комплексе НИКА/Нуклотрон

В.Плотников от имени  
коллаборации BM@N

*ЛФВЭ, ОИЯИ, Дубна, Россия*

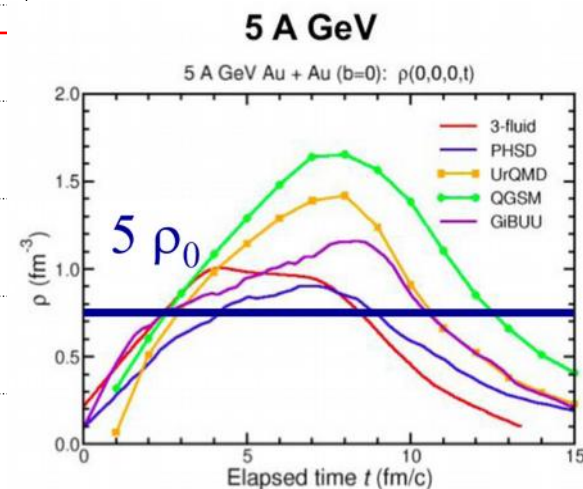
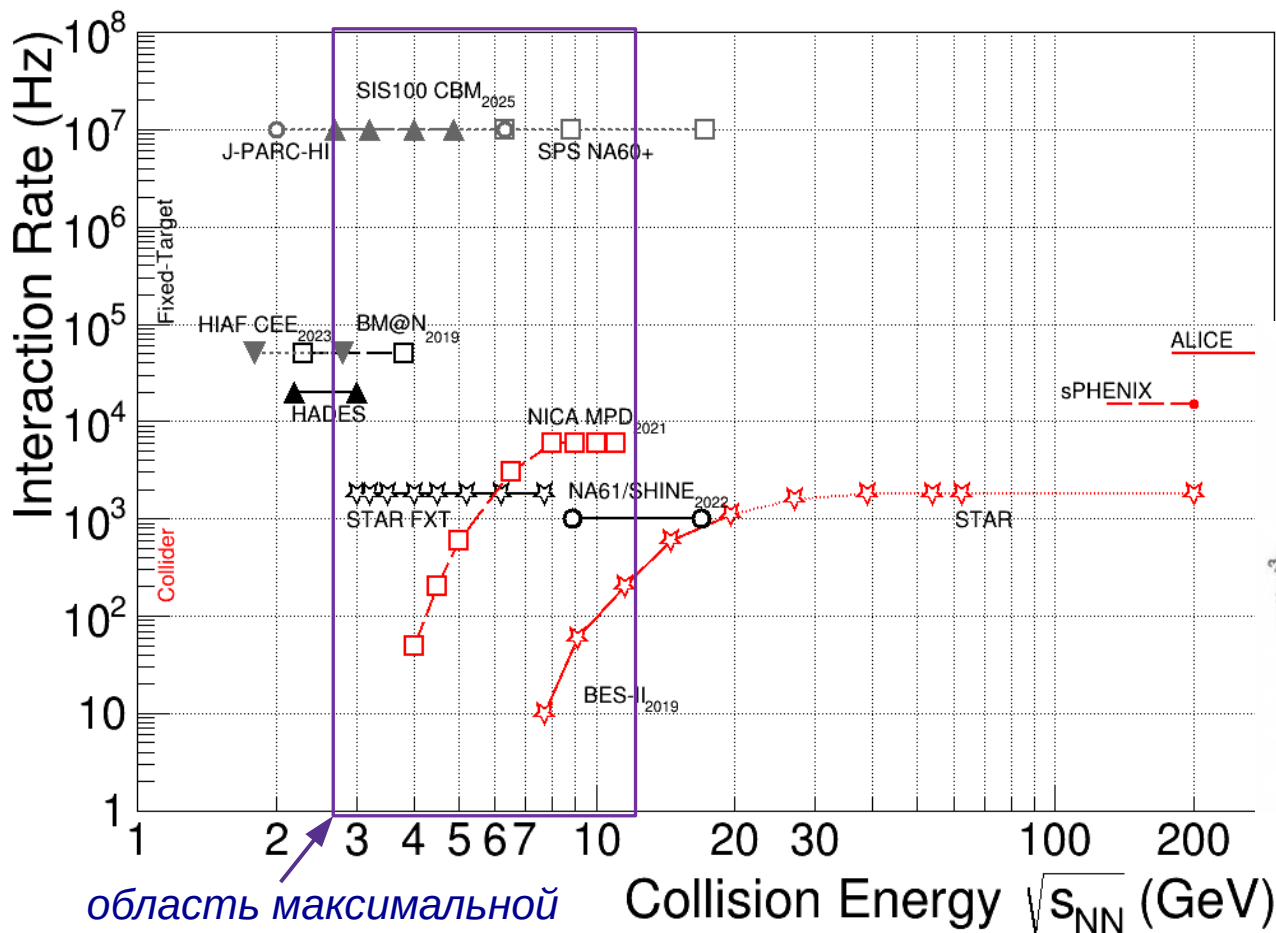


Joint Institute for Nuclear  
Research

SCIENCE BRINGING NATIONS  
TOGETHER

Научная сессия секции ядерной физики ОФН  
РАН, Дубна, Россия  
5.04.2024

1. Физическая программа BM@N
2. Физические результаты по образованию  $\pi^+$  и  $K^+$ -мезонов
3. Физические результаты по образованию  $p$ ,  $d$  и  $t$
4. Первые результаты анализа сеанса на пучке Xe
5. Планы на следующие сеансы



**BM@N:**  $\sqrt{s_{NN}} = 2.3 - 3.3$  ГэВ

**MPD:**  $\sqrt{s_{NN}} = 4 - 11$  ГэВ

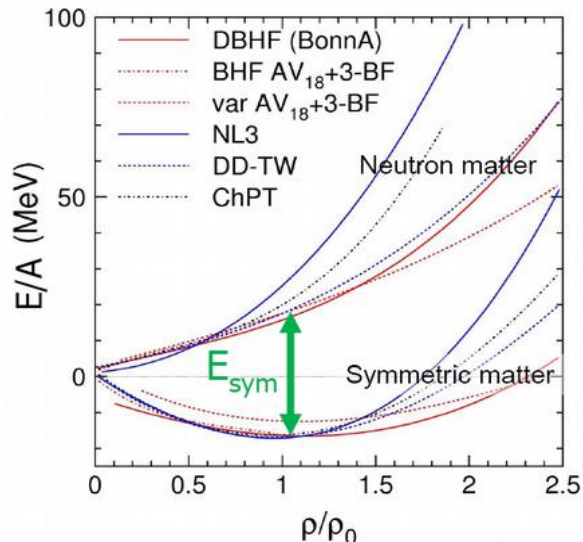
**Конкуренты BM@N:**

HADES BES (SIS): Au+Au at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.42$  GeV,  
Ag+Ag at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.42$  GeV, 2.55 GeV.

# Уравнение состояния симметричной и асимметричной ядерной материи



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



УС: соотношение между плотностью, давлением, температурой, энергией и изоспиновой асимметрией

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

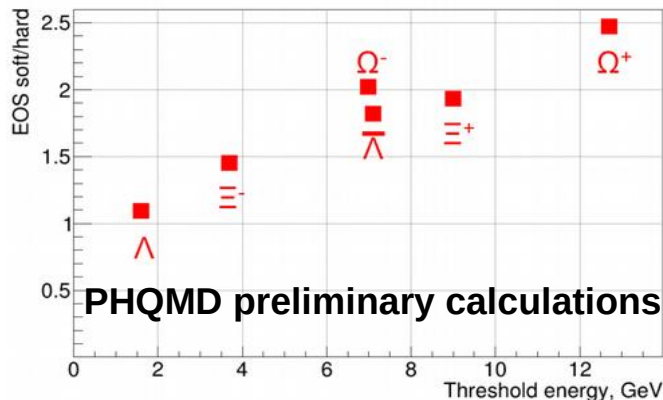
with  $\delta = (\rho_n - \rho_p) / \rho$

Кривизна определяется несжимаемостью ядерной материи:  $K = 9\rho^2 d^2(E/A)/d\rho^2$

- ▶ Изучение УС симметричной материи при  $\rho = 3-5\rho_0$ 
  - эллиптические потоки протонов, мезонов и гиперонов
  - подпороговое образование странных мезонов и гиперонов
  - извлечение  $K$  из предсказаний моделей
- ▶ Ограничения на энергию симметрии  $E_{\text{sym}}$ 
  - эллиптические потоки нейтронов относительно протонов
  - подпороговое образование частиц с противоположным изоспином

P Senger 2022 Phys. Scr. 97 064003

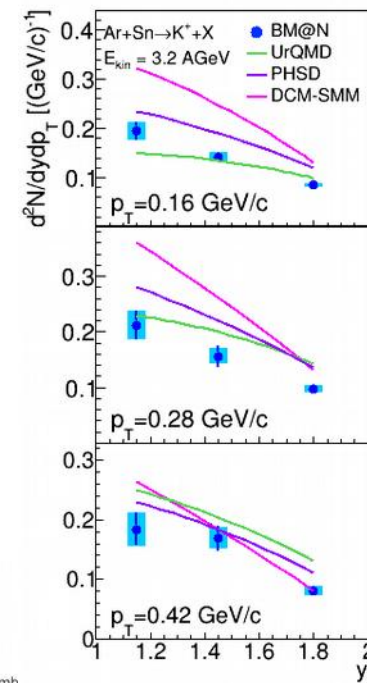
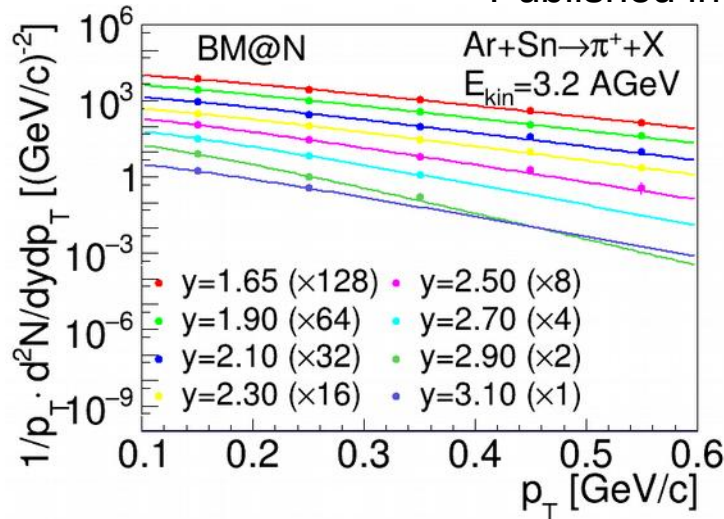
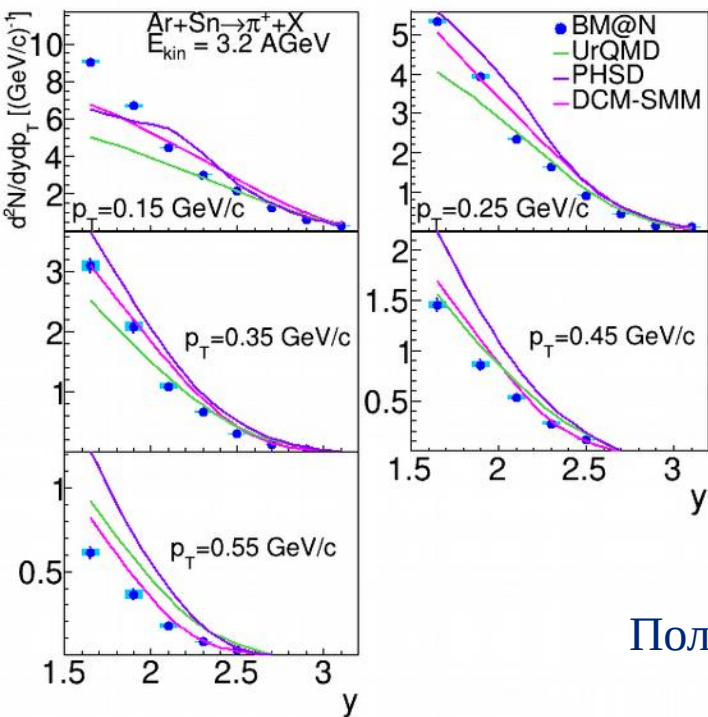
Hyperon yield in 4A GeV Au+Au:  
soft EOS ( $K=240$  MeV) / hard EOS ( $K=350$  MeV)



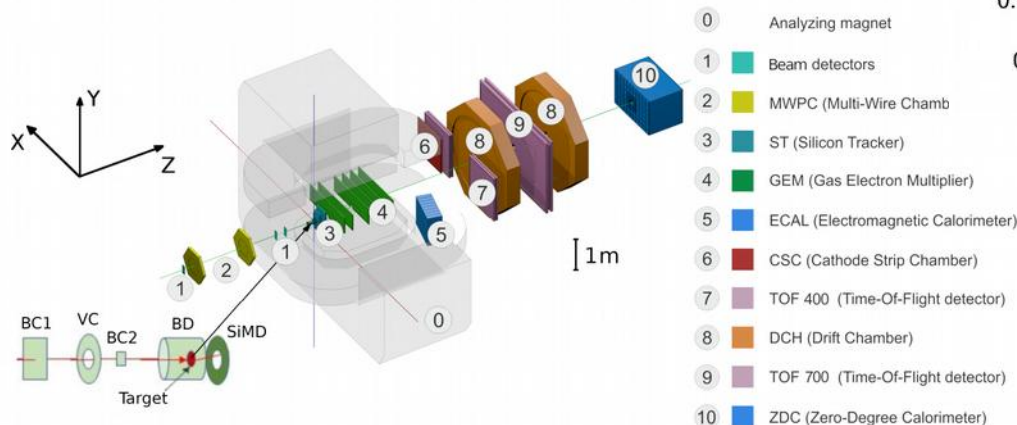
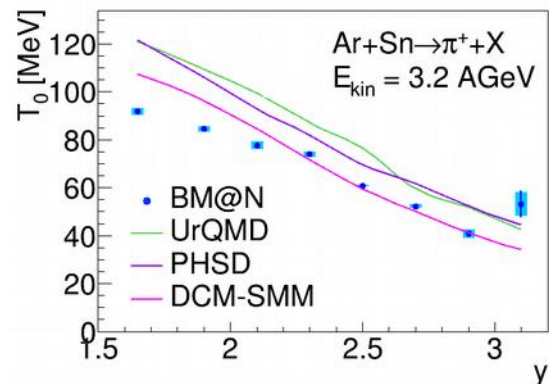
# Образование $\pi^+$ и $K^+$ -мезонов в аргон-ядерных взаимодействиях с энергией пучка 3.2 АГэВ на Нуклотроне



<https://arxiv.org/abs/2303.16243v3>  
Published in JHEP 07 (2023) 174

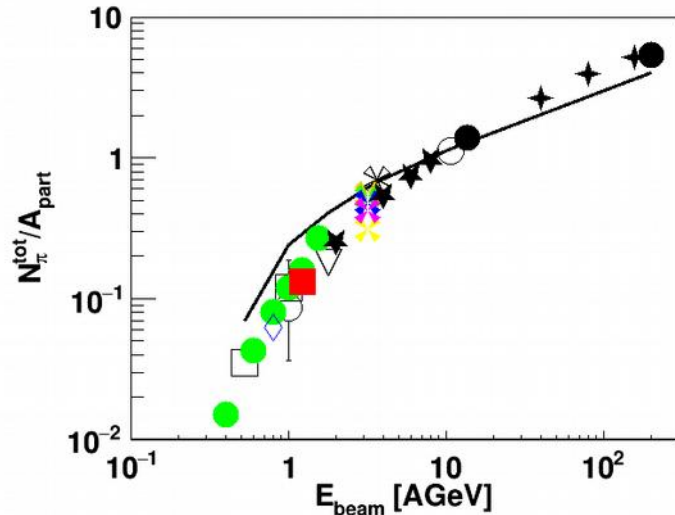
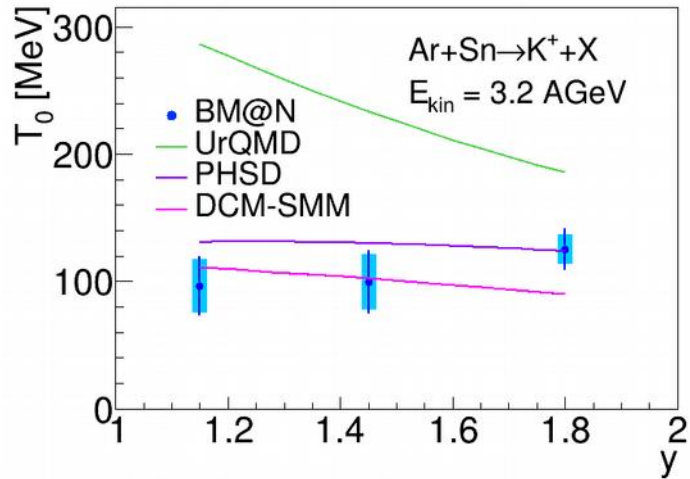


Полная область по центральности

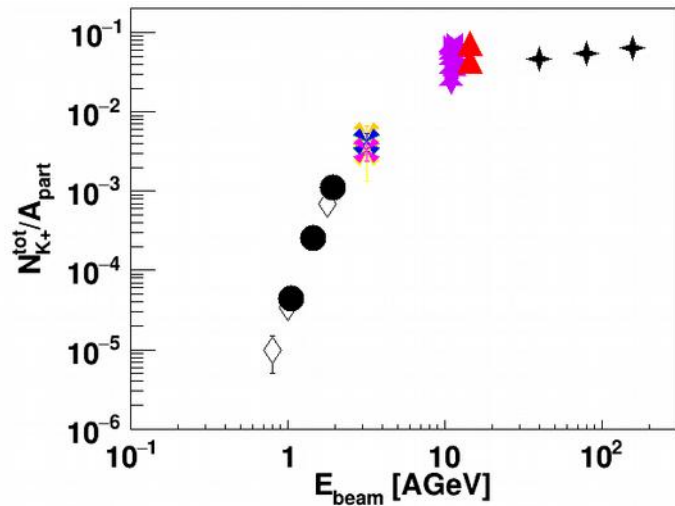
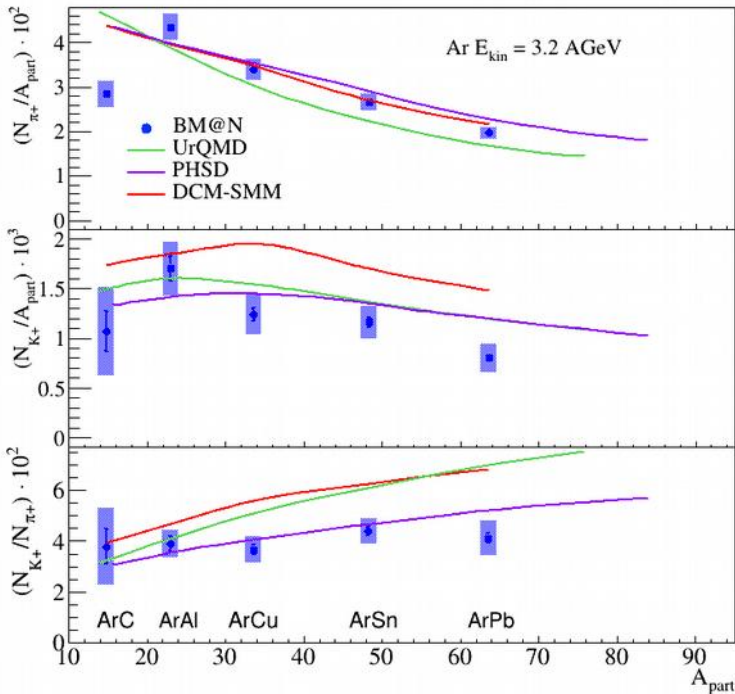




# Образование $\pi^+$ и $K^+$ -мезонов в аргон-ядерных взаимодействиях с энергией пучка 3.2 АГэВ на Нуклотроне

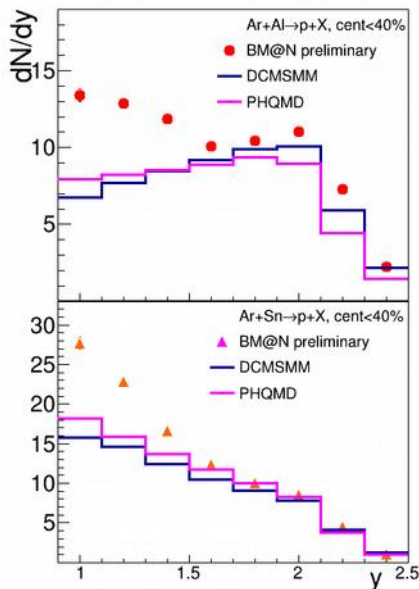
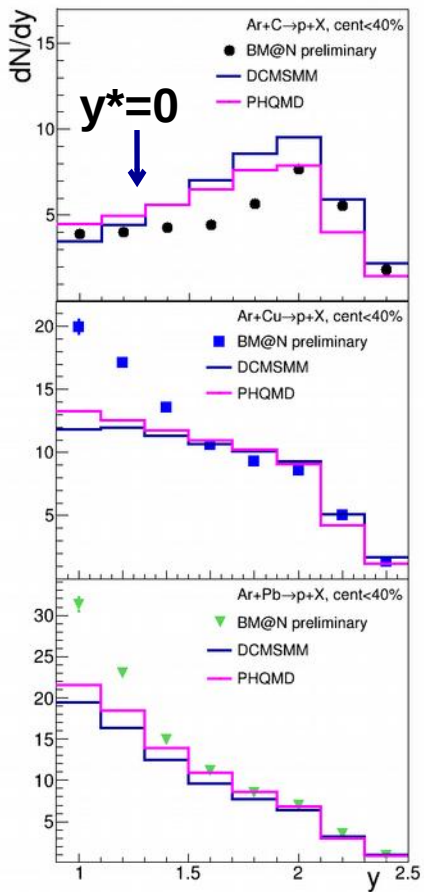


- N+N
- ⊗  $^{24}\text{Mg}+\text{Mg}$
- $^{139}\text{La}+\text{La}$
- $^{197}\text{Au}+\text{Au}$
- ▽  $^{40}\text{Ar}+\text{KCl}$
- $^{30}\text{Si}+\text{Al,S}$
- ★  $^{207}\text{Pb}+\text{Pb}$
- ★ BM@N Ar+C
- ★ BM@N Ar+Al
- ★ BM@N Ar+Cu
- ★ BM@N Ar+Sn
- ★ BM@N Ar+Pb
- FOPI (Reisdorf) Au+Au
- ◇ TAPS Au+Au
- HADES Au+Au
- ★ E895 Au+Au

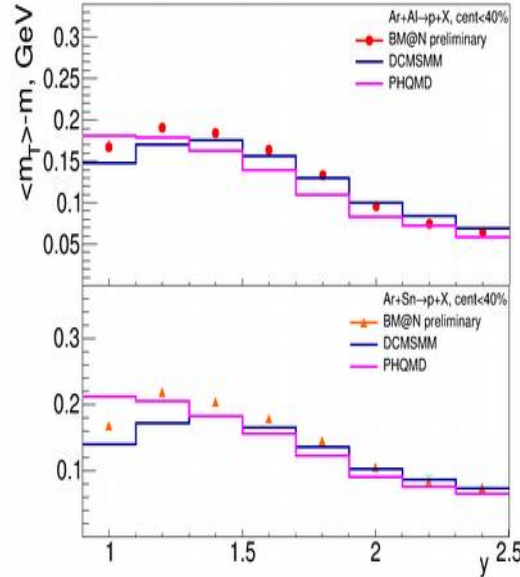
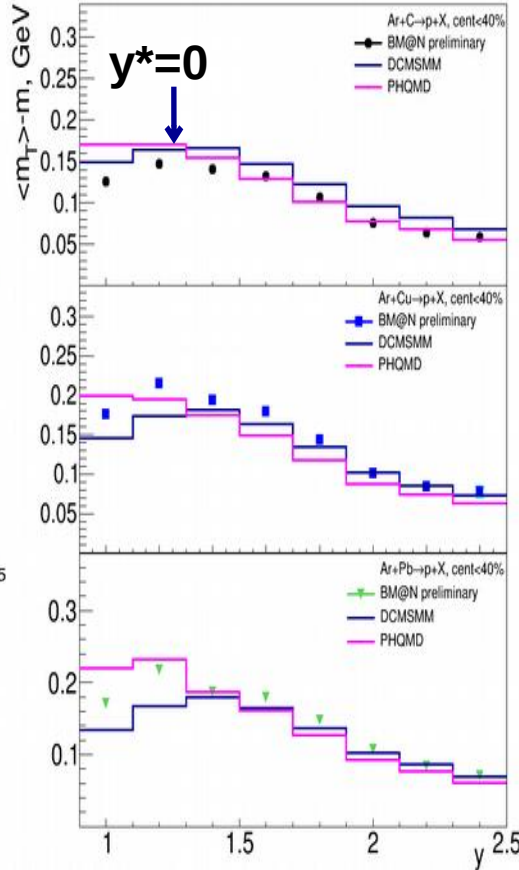


- $^{58}\text{Ni}+\text{Ni}$  FOPI Best
- ◇  $^{58}\text{Ni}+\text{Ni}$  KaoS Barth
- ★ BM@N Ar+C
- ★ BM@N Ar+Al
- ★ BM@N Ar+Cu
- ★ BM@N Ar+Sn
- ★ BM@N Ar+Pb
- ★  $^{197}\text{Au}+\text{Au}$  E866 Ahle
- ★ Si+Au E859 Ahle
- ★  $^{207}\text{Pb}+\text{Pb}$  NA49 Afanasiev

# Образование р в аргон-ядерных взаимодействиях с энергией пучка 3.2 АГэВ



Центральность  
0-40%



$$y^* = y_{lab} - y_{cm}$$

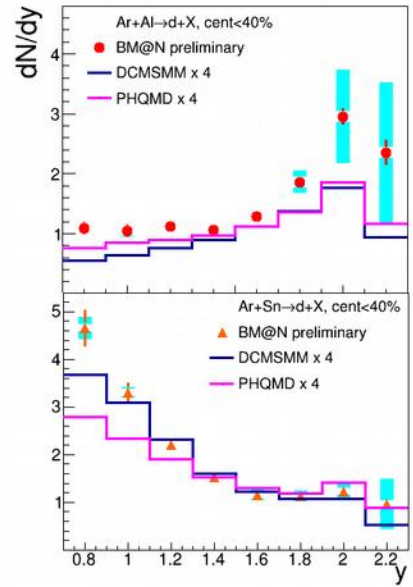
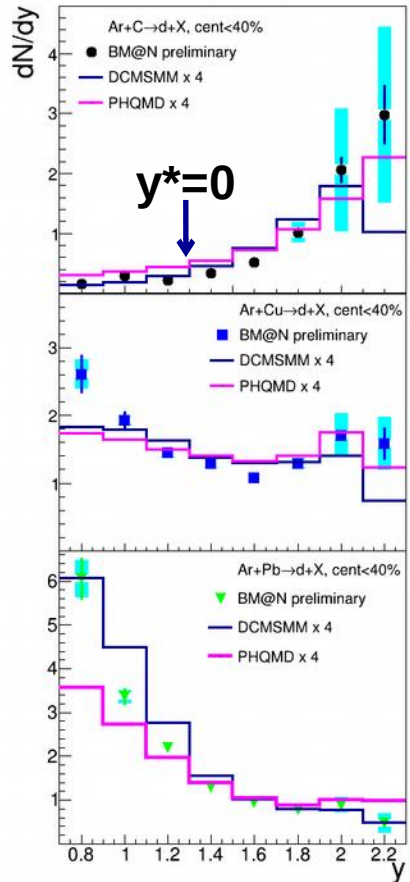
$$y_{cm} \rightarrow \langle y(\pi) \rangle$$

Ar+C  $\langle y(\pi) \rangle = 1.27$   
Ar+Pb  $\langle y(\pi) \rangle = 0.82$

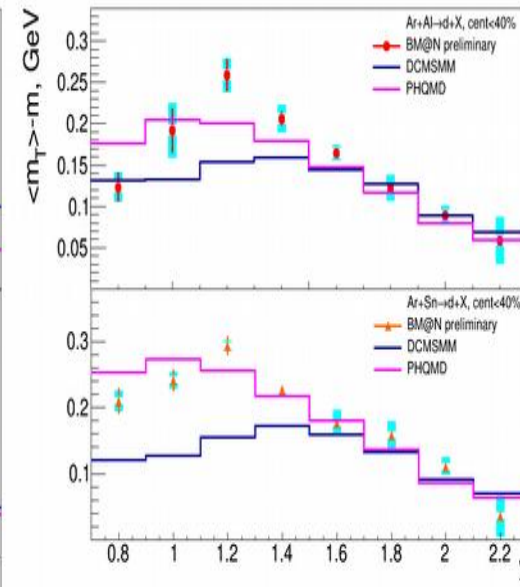
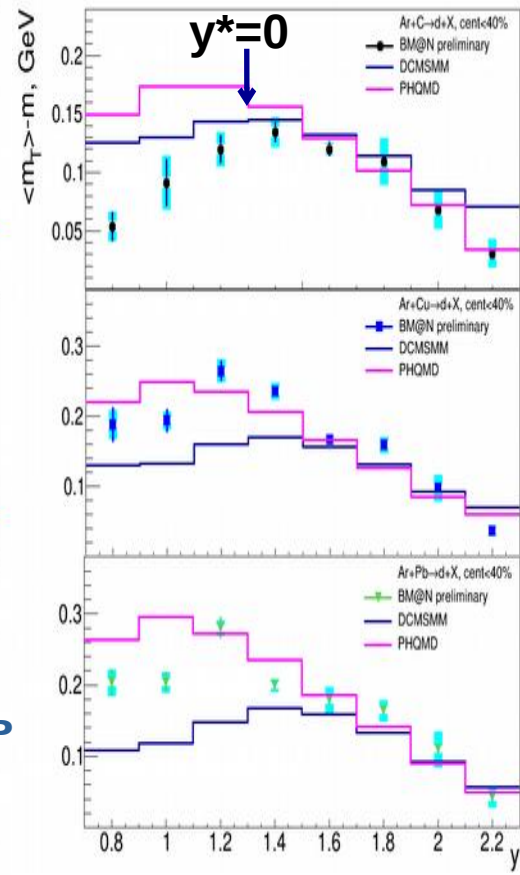
- Спектр  $dN/dy$  мягче для более тяжёлых мишеней
- Предсказания DCM-SMM и PHQMD недооценивают данные в области центральных быстрот

- Максимум  $\langle m_t \rangle$  при центральной быстройте  $y^*$
- Предсказания DCM-SMM и PHQMD описывают  $\langle m_t \rangle$ -зависимость по  $y$

# Образование d в аргон-ядерных взаимодействиях с энергией пучка 3.2 АГэВ



Центральность  
0-40%



$$y^* = y_{lab} - y_{CM}$$

$$y_{CM} \rightarrow \langle y(\pi) \rangle$$

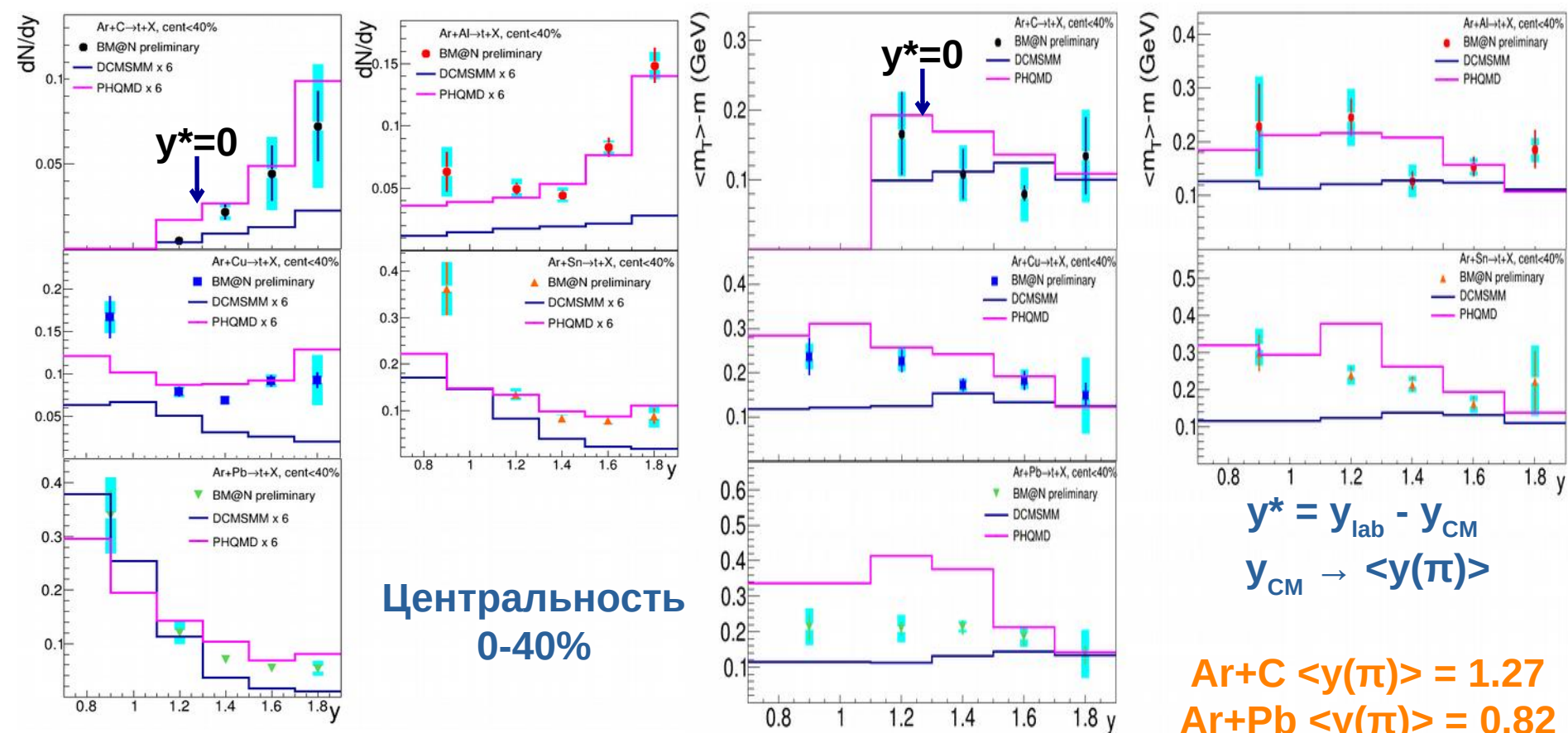
Ar+C  $\langle y(\pi) \rangle = 1.27$   
Ar+Pb  $\langle y(\pi) \rangle = 0.82$

- Спектр  $dN/dy$  мягче для более тяжёлых мишеней
- Предсказания DCM-SMM и PHQMD описывают форму данных, но меньше по нормировке примернов в 4 раза

- Максимум  $\langle m_T \rangle$  при центральной быстроте  $y^*$
- Предсказания PHQMD лучше согласуются с данными при центральной быстроте, чем DCM-SMM



# Образование $t$ в аргон-ядерных взаимодействиях с энергией пучка 3.2 АГэВ



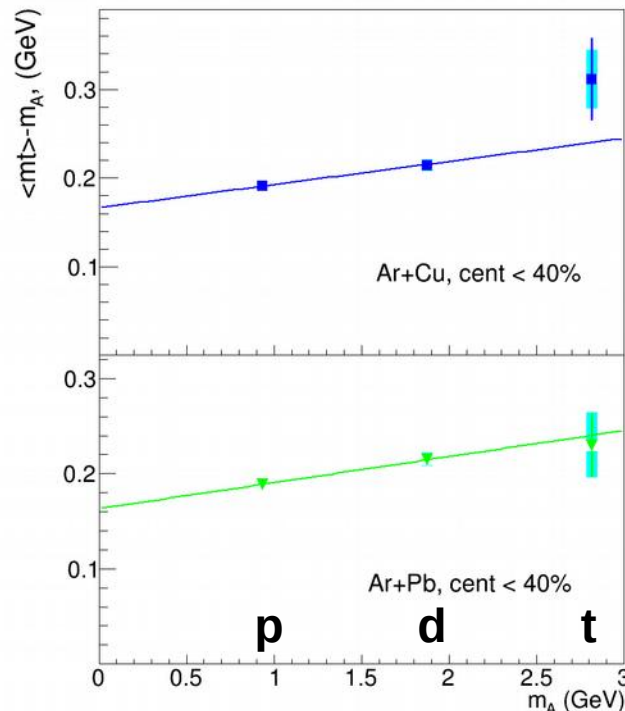
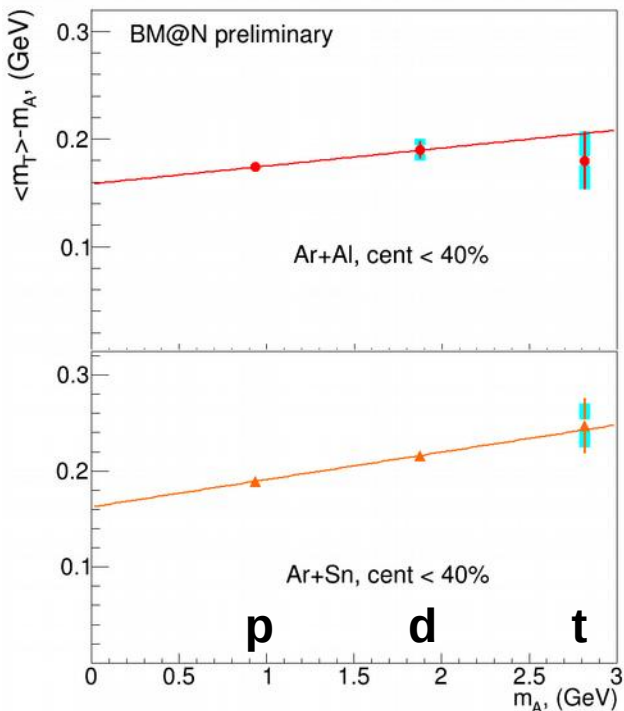
- Предсказания PHQMD лучше описывают форму данных, чем DCM-SMM, но предсказания обеих моделей меньше по нормировке примерно в 6 раз

- PHQMD предсказывает более высокие  $\langle m_T \rangle$  при центральной быстроте, чем DCM-SMM, и лучше согласуется с данными

# Фит $\langle m_t \rangle$ -зависимости для p, d, t



$0.9 < y_{lab} < 1.7$  ( $-0.18 < y^* < 0.62$ )



$$\langle m_t \rangle - m \approx E_{therm} + E_{flow} =$$

$$= 3/2 T^* + (\gamma - 1)m$$

$$\text{где } \gamma = 1/\sqrt{1 - \langle \beta \rangle^2}$$

$$T^* = T \sqrt{(1 + \langle \beta \rangle)/(1 - \langle \beta \rangle)}$$

- **HADES** Au+Au при  $\sqrt{s} = 2.4$  GeV:  $T = 66 \pm 8$  MeV и  $\langle \beta \rangle = 0.34 \pm 0.02$  (энергия ниже, но ядра тяжелее)
- **NA49** (Pb+Pb) и **STAR** (Au+Au) при более высоких энергиях:  $T \sim 95-110$  MeV,  $\langle \beta \rangle \sim 0.46$

Reaction	Ar+C	Ar+Al	Ar+Cu	Ar+Sn	Ar+Pb
T, MeV	$89 \pm 3$	$76 \pm 8$	$80 \pm 5$	$74 \pm 9$	$80 \pm 10$
$\langle \beta \rangle$	$0.0 \pm 0.04$	$0.26 \pm 0.05$	$0.27 \pm 0.03$	$0.30 \pm 0.4$	$0.26 \pm 0.5$

# Факторы коалесценции $B_2$ (дейтроны), $B_3$ (тритоны)

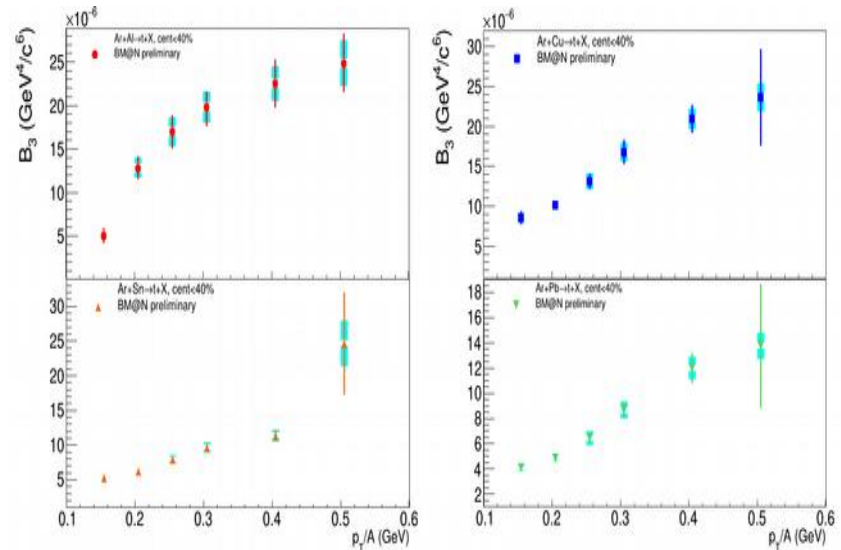
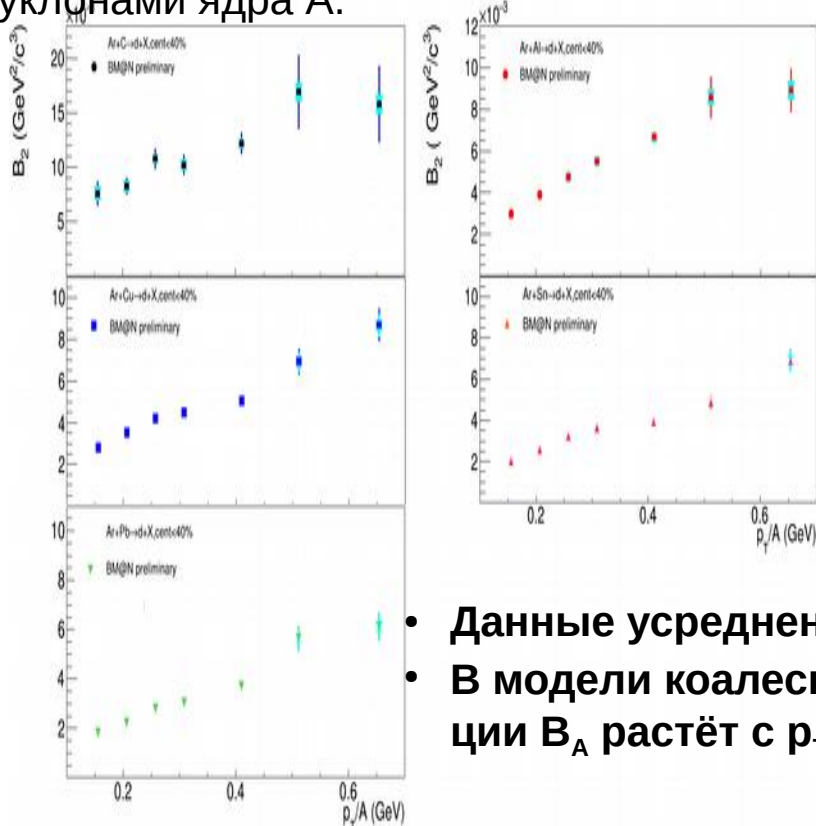
$$E_A \frac{d^3 N_A}{dp_A^3} = B_A \left( E_p \frac{d^3 N_p}{dp_p^3} \right)^Z \left( E_n \frac{d^3 N_n}{dp_n^3} \right)^{A-Z}$$

$$\approx B_A \left( E_p \frac{d^3 N_p}{dp_p^3} \right)^A, \quad B_A \propto V_{\text{eff}}^{1-A}$$

$$\rightarrow B_A = d^2 N_A / 2\pi p_T dp_T(A) dy / [d^2 N_p / 2\pi p_T dp_T(p) dy]^A, \quad A=2(d), 3(t)$$

$B_A$  зависит от массового числа ядра  $A$ , сталкивающейся системы, центральности, энергии и поперечного импульса

$B_A$  – параметр коалесценции, который характеризует вероятность формирования нуклонами ядра  $A$ .



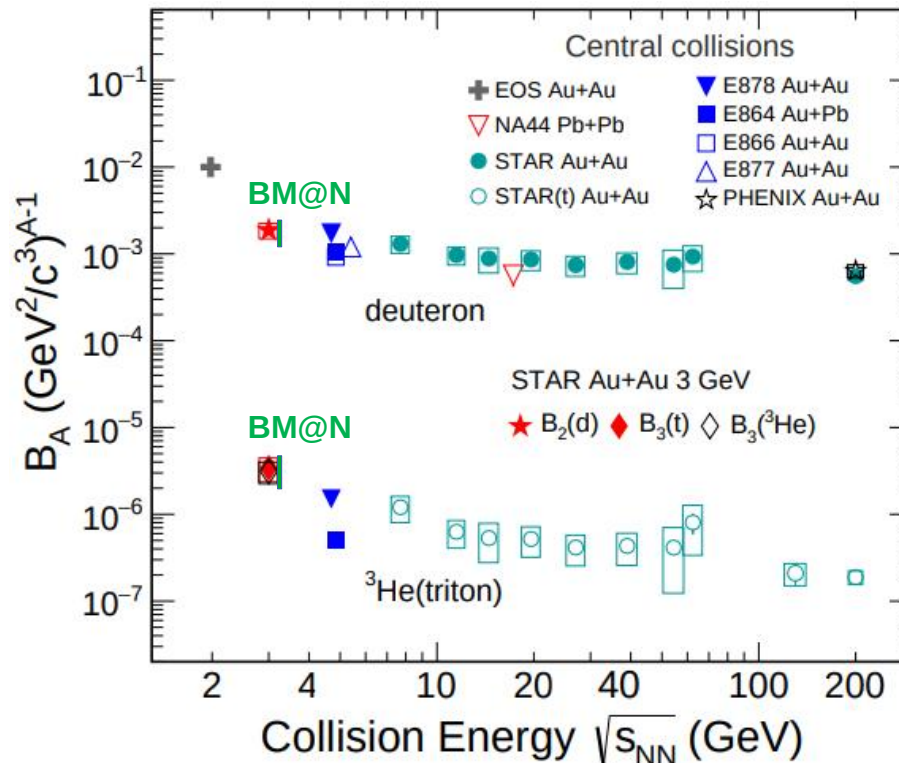
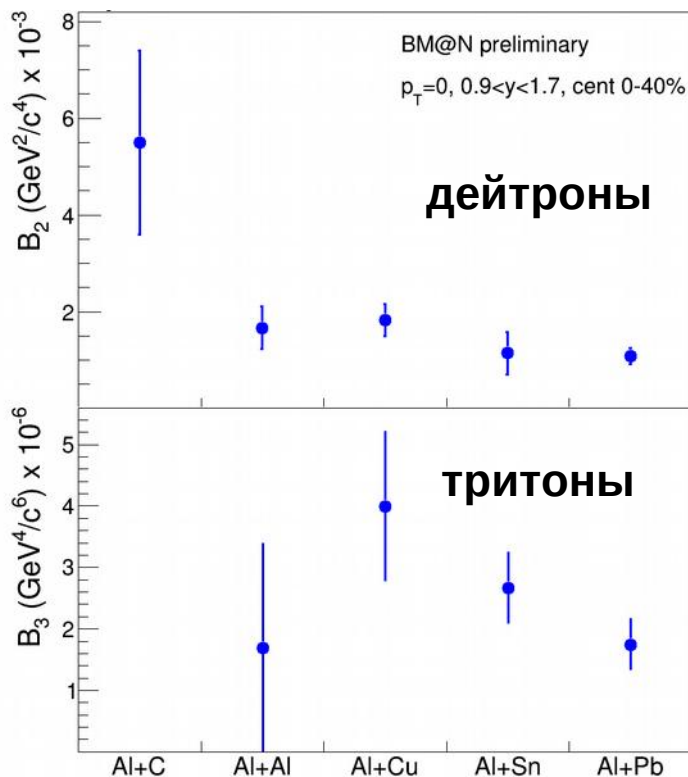
• Данные усреднены в  $0.9 < y_{\text{lab}} < 1.7$  ( $-0.18 < y^* < 0.62$ )

• В модели коалесценции  $B_A$  растёт с  $p_T$

$$B_2 = \frac{3 \pi^{3/2} \langle C_d \rangle}{2m_t \mathcal{R}_\perp^2(m_t) \mathcal{R}_\parallel(m_t)} e^{2(m_t - m) \left( \frac{1}{T_P^*} - \frac{1}{T_d^*} \right)}$$

# Факторы коалесценции $V_2$ , $V_3$

Результаты для  $V_2$  и  $V_3$  во взаимодействиях Ar+A (центральность 0-40%) совместимы с энергетической зависимостью соответствующих факторов, полученных в центральных взаимодействиях тяжёлых ядер.



STAR Collaboration: [nucl-ex] arXiv:2311.11020

Значения  $V_2(p_T)$  и  $V_3(p_T)$  экстраполированы к  $p_T = 0$  с использованием экспоненциального фита  $V_A(p_T=0)\exp(a \cdot p_T)$ .



# Отношение $N_p \cdot N_t / N_d^2$



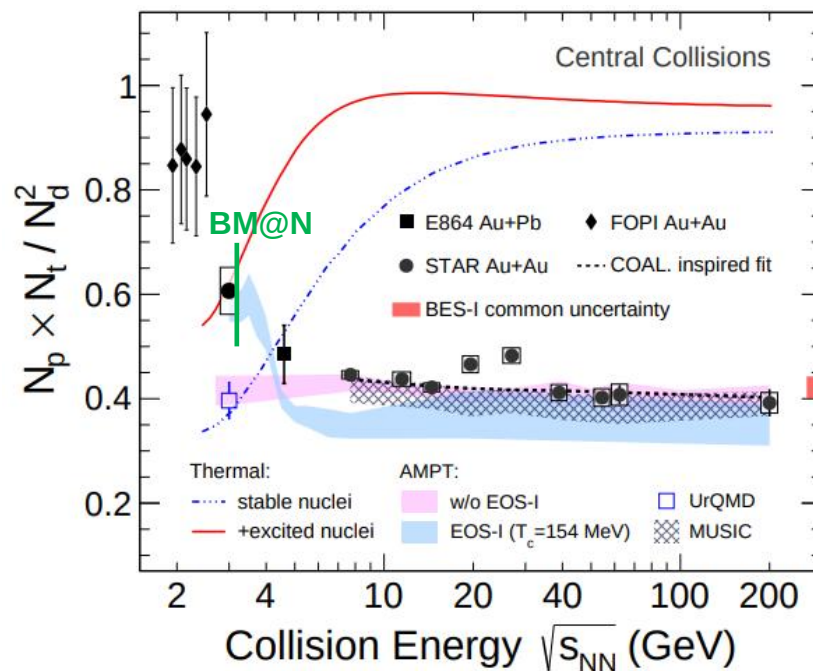
Reaction	Ar+C	Ar+Al	Ar+Cu	Ar+Sn	Ar+Pb
$N_p \cdot N_t / N_d^2$	$0.53 \pm 0.10$	$0.55 \pm 0.09$	$0.69 \pm 0.11$	$0.60 \pm 0.07$	$0.59 \pm 0.06$

Центральность 0-40%, Из  $dN/dy$  для p,d,t в  $-0.18 < y^* < 0.62$

**BM@N: Средневзвешенное значение  $N_p \cdot N_t / N_d^2 \sim 0.60 \pm 0.10$  для Ar+C,Al,Cu,Sn, Pb взаимодействий**

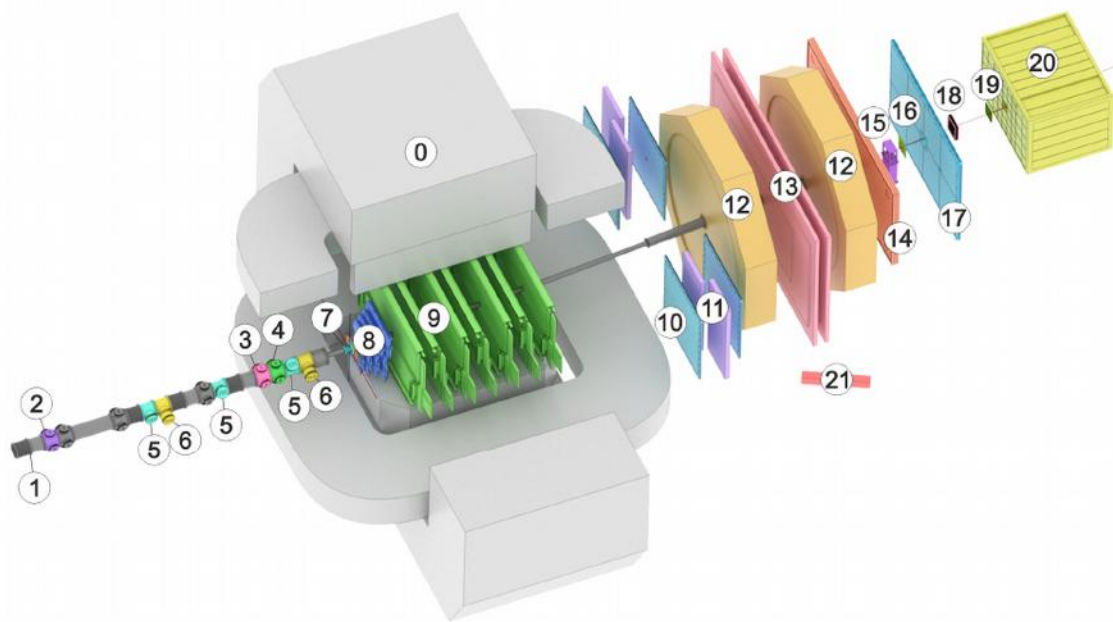
**Сравнение с результатами AGS, FOPI, STAR**

**Результаты BM@N соответствуют общей зависимости данных при меньших и больших энергиях**



**STAR Collaboration: [nucl-ex]  
arXiv:2311.11020**

# Xe+CsI: полный акцептанс детекторов



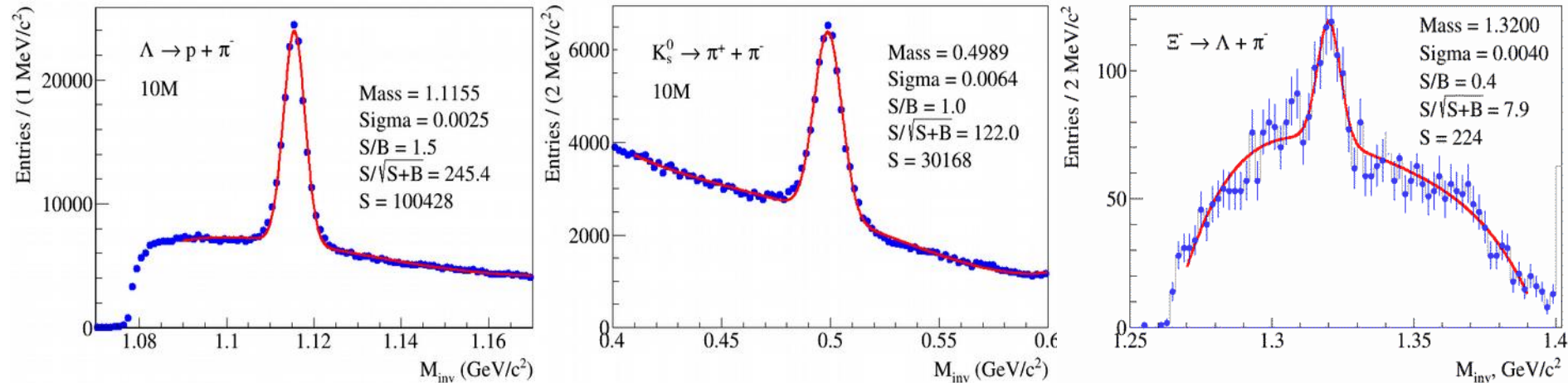
- Magnet SP-41 (0)
- Vacuum Beam Pipe (1)
- BC1, VC, BC2 (2-4)
- SiBT, SiProf (5, 6)
- Triggers: BD + SiMD (7)
- FSD, GEM (8, 9)
- CSC 1x1 m<sup>2</sup> (10)
- TOF 400 (11)
- DCH (12)
- TOF 700 (13)
- ScWall (14)
- FD (15)
- Small GEM (16)
- CSC 2x1.5 m<sup>2</sup> (17)
- Beam Profilometer (18)
- FQH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

- **Полная конфигурация установки**

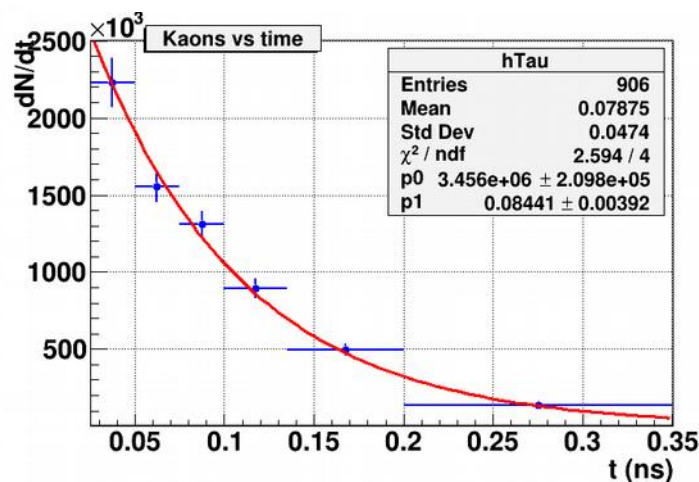
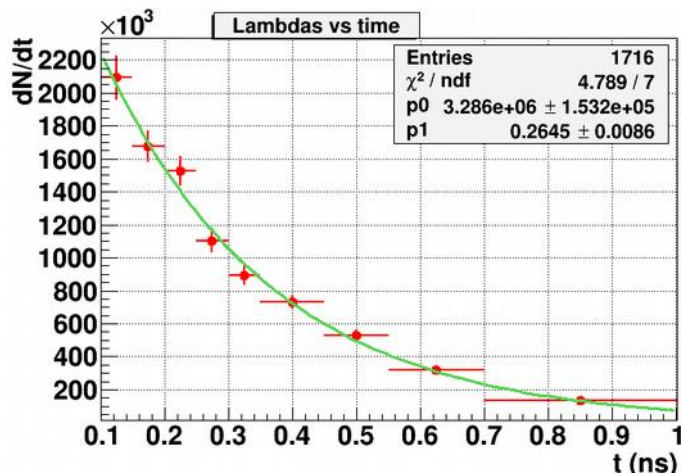
- **На рассмотрении в NIM статья по установке BM@N для конфигурации в Xe+CsI сеансе**

- **Набрано 507М событий при 3.8 АГЭВ, 48М событий при 3.0 АГЭВ**

# Xe+CsI: полный акцептанс детекторов



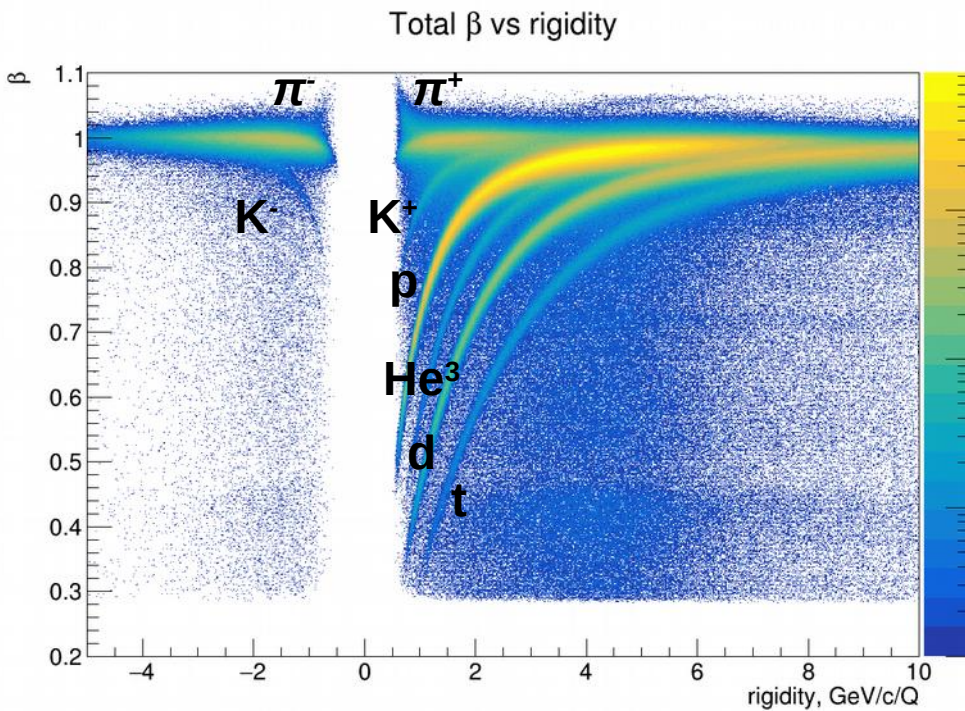
- В 500М событиях ожидается: **4М  $\Lambda^0$** , **1.2М  $K_s^0$**  и **8К  $\Xi^-$**



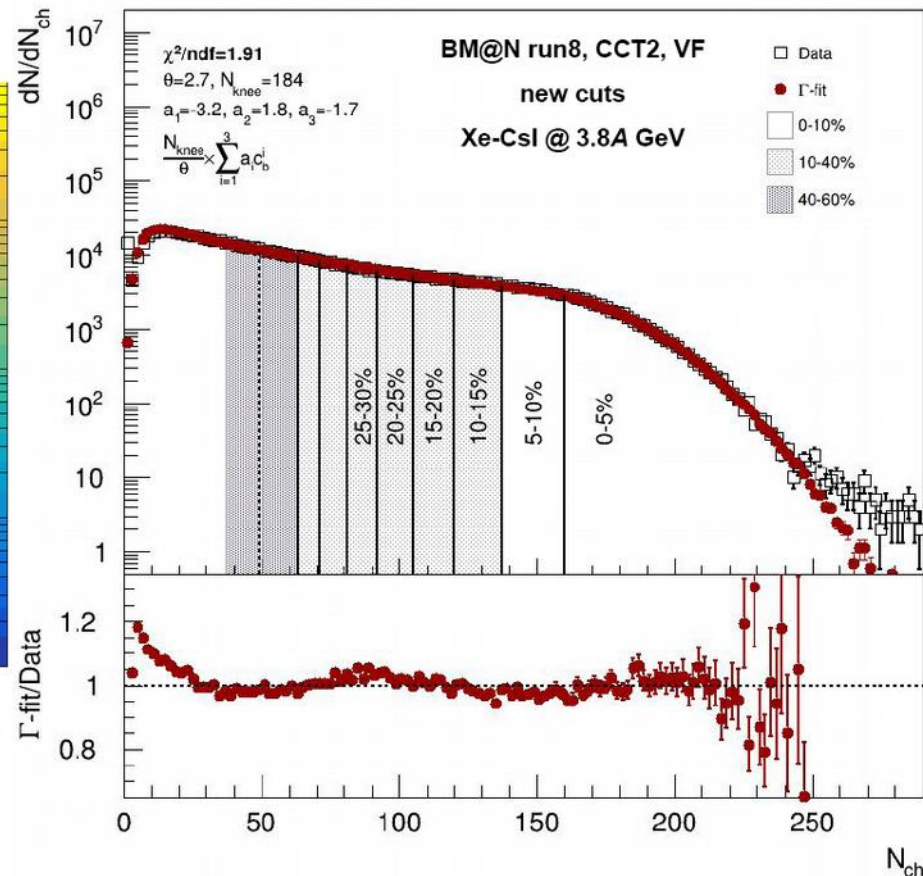
- Оценки времён жизни, полученные из эксперимента согласуются с табличными значениями для  **$\Lambda^0$  (0.2632 нс)** и  **$K_s^0$  (0.0895 нс)**



# Xe+CsI: идентификация и центральность



Видны сигналы  $K^-$



$\Gamma$ -фит в согласии с экспериментальными данными



Физический сеанс в пучке ксенона:

- сканирование по энергии пучка в диапазоне 2-3 АГэВ
- та же конфигурация центрального трекера, основанная на кремниевых и GEM-детекторах
- дополнительная 1<sup>ая</sup> вершинная плоскость кремниевых детекторов
- полная замена внешних дрейфовых камер на катодно-стриповые камеры
- расширение время-пролётной системы ToF-400

Подготовка к физическому сеансу с пучком  $V_i$

- Планируется дальнейшее развитие центрального трекера: установка дополнительных станций кремниевых детекторов
- Планируется запустить в работу 2-координатный (X/Y) нейтронный детектор высокой гранулярности для измерения выходов и коллективных потоков нейтронов

Архив

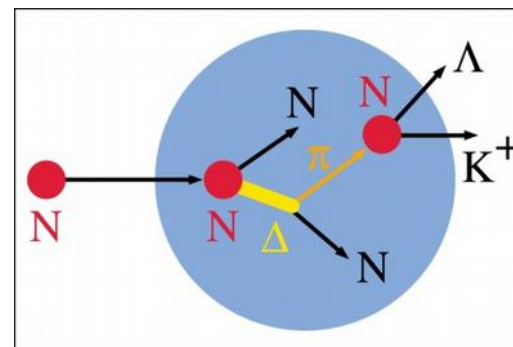
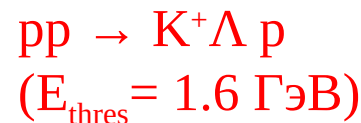
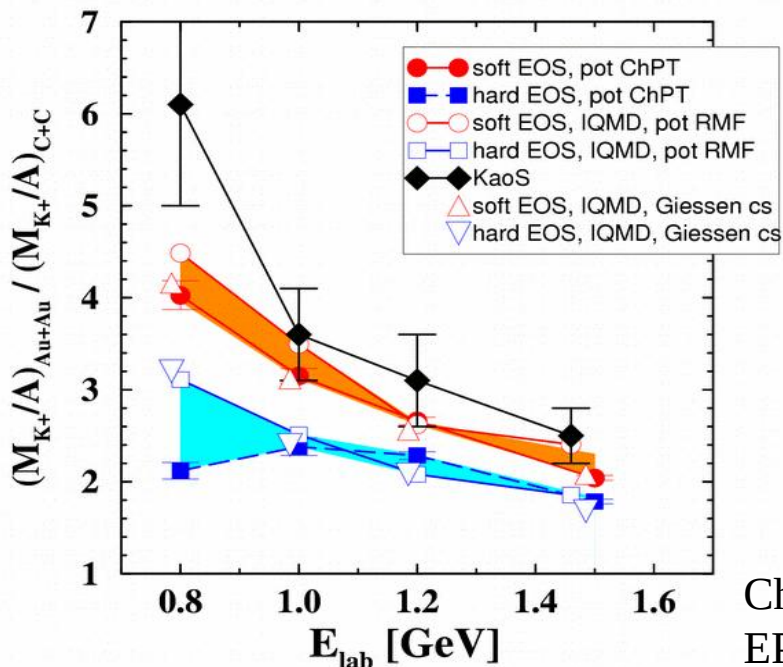


Уравнение состояния ядерной материи при высоких плотностях

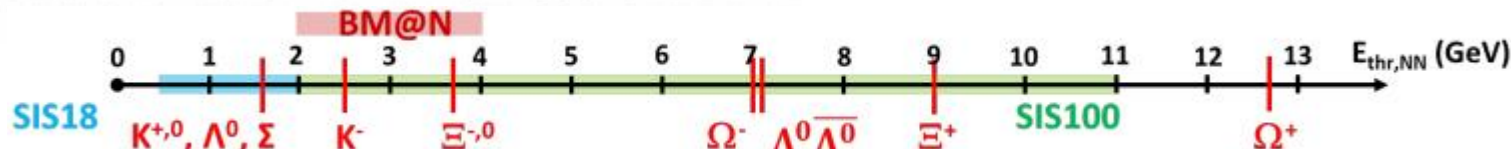
Образование частиц при (под)пороговых энергиях через множественные последовательные столкновения

Пример: подпороговое рождение  $K^+$  в GSI

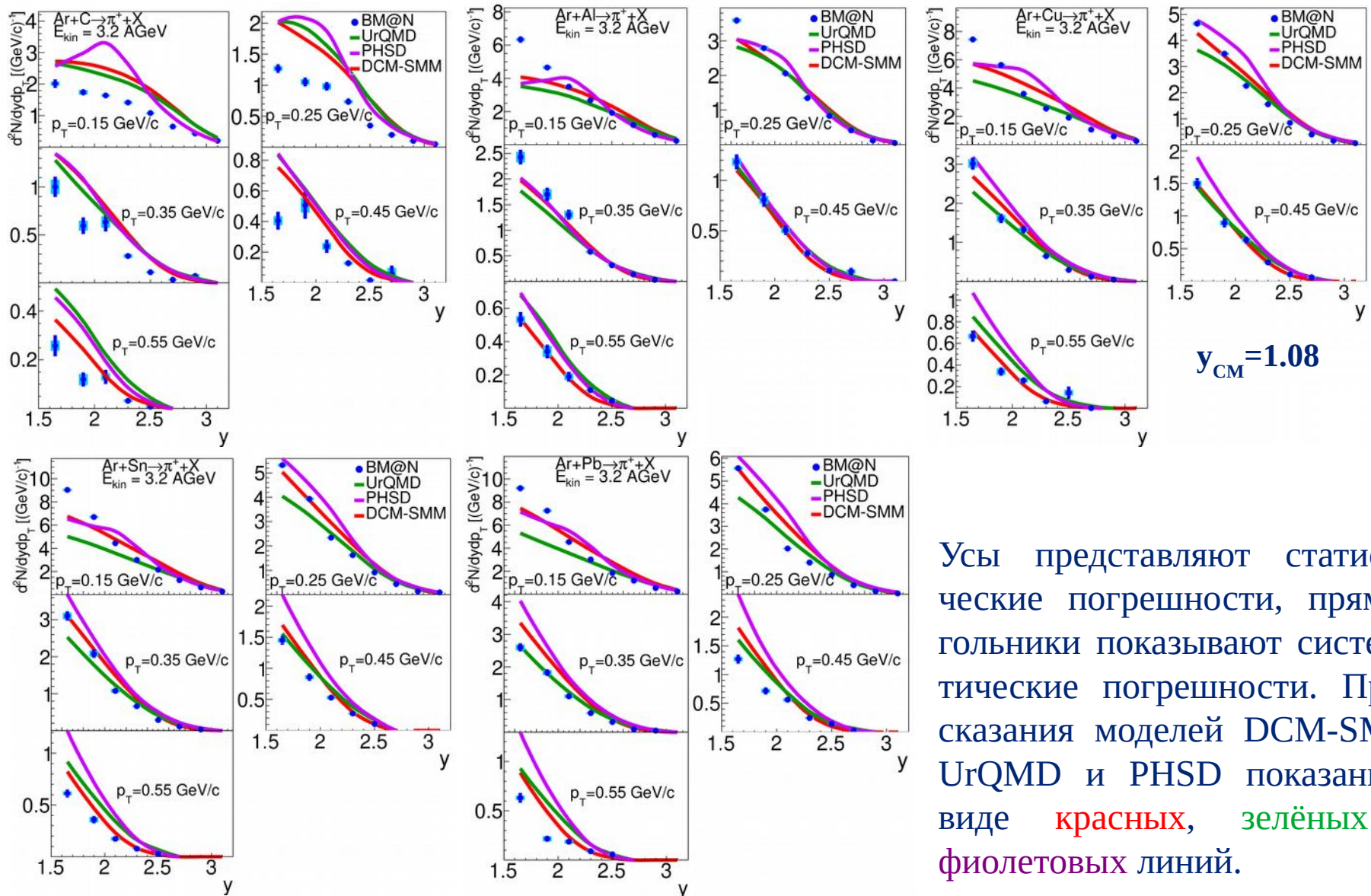
Идея: выходы  $K^+$   $\sim$  плотность  $\sim$  сжимаемость



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



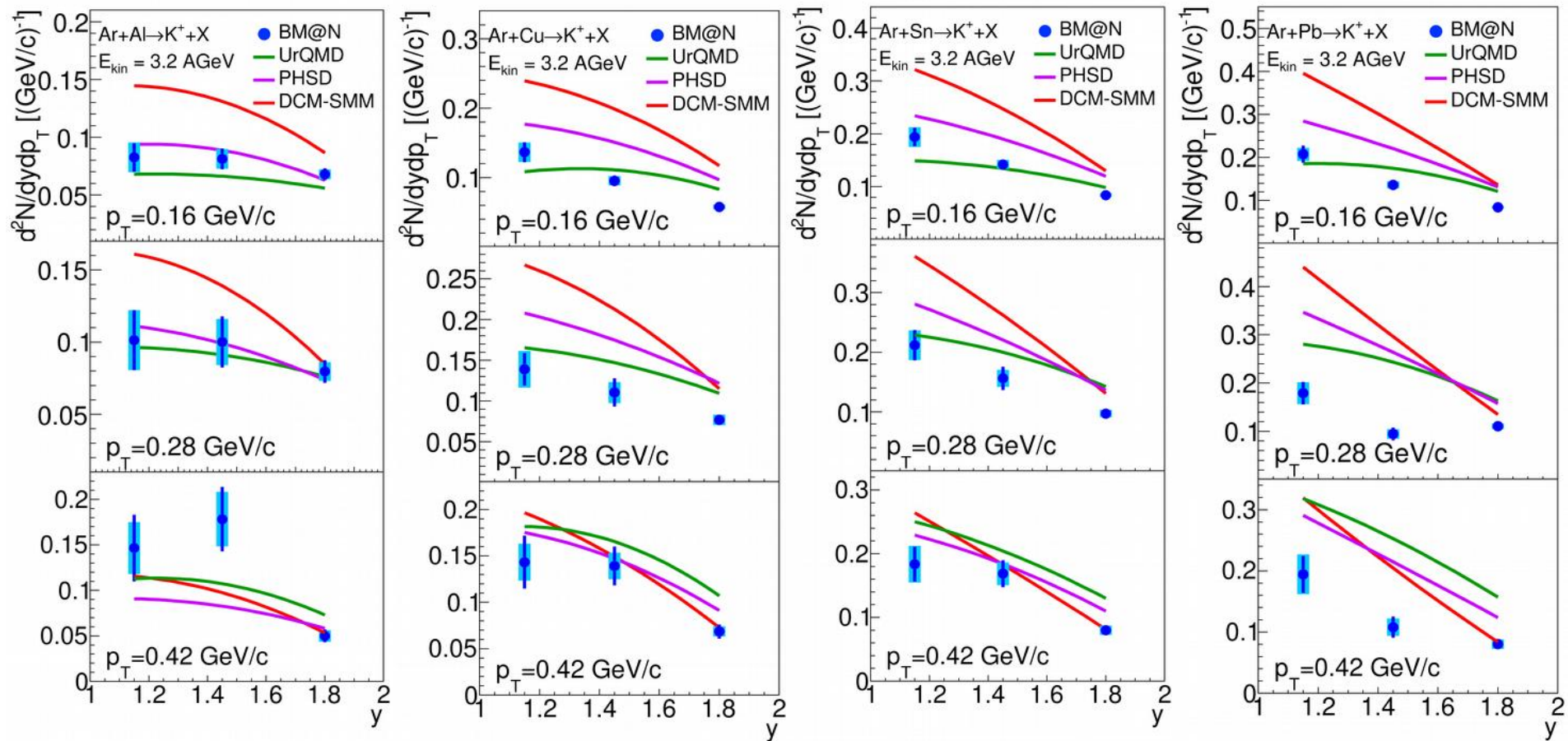
# Спектры по $y$ $\pi^+$ -мезонов



Усы представляют статистические погрешности, прямоугольники показывают систематические погрешности. Предсказания моделей DCM-SMM, UrQMD и PHSD показаны в виде красных, зелёных и фиолетовых линий.

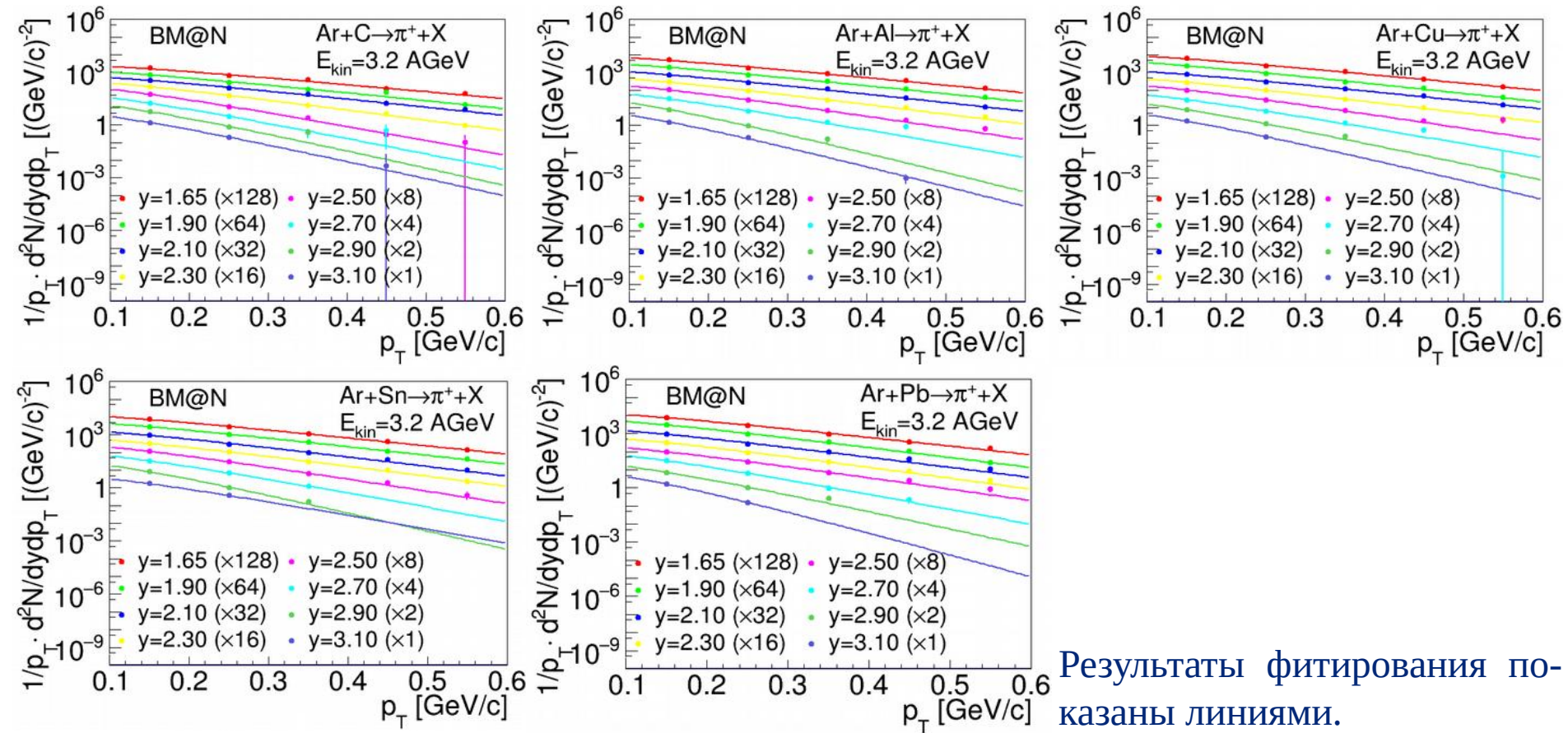


# Спектры по $y$ $K^+$ -мезонов



Усы представляют статистические погрешности, прямоугольники показывают систематические погрешности. Предсказания моделей DCM-SMM, UrQMD и PHSD показаны в виде **красных**, **зелёных** и **фиолетовых** линий.

# Инвариантные $p_T$ -спектры $\pi^+$ -мезонов **BM@N**

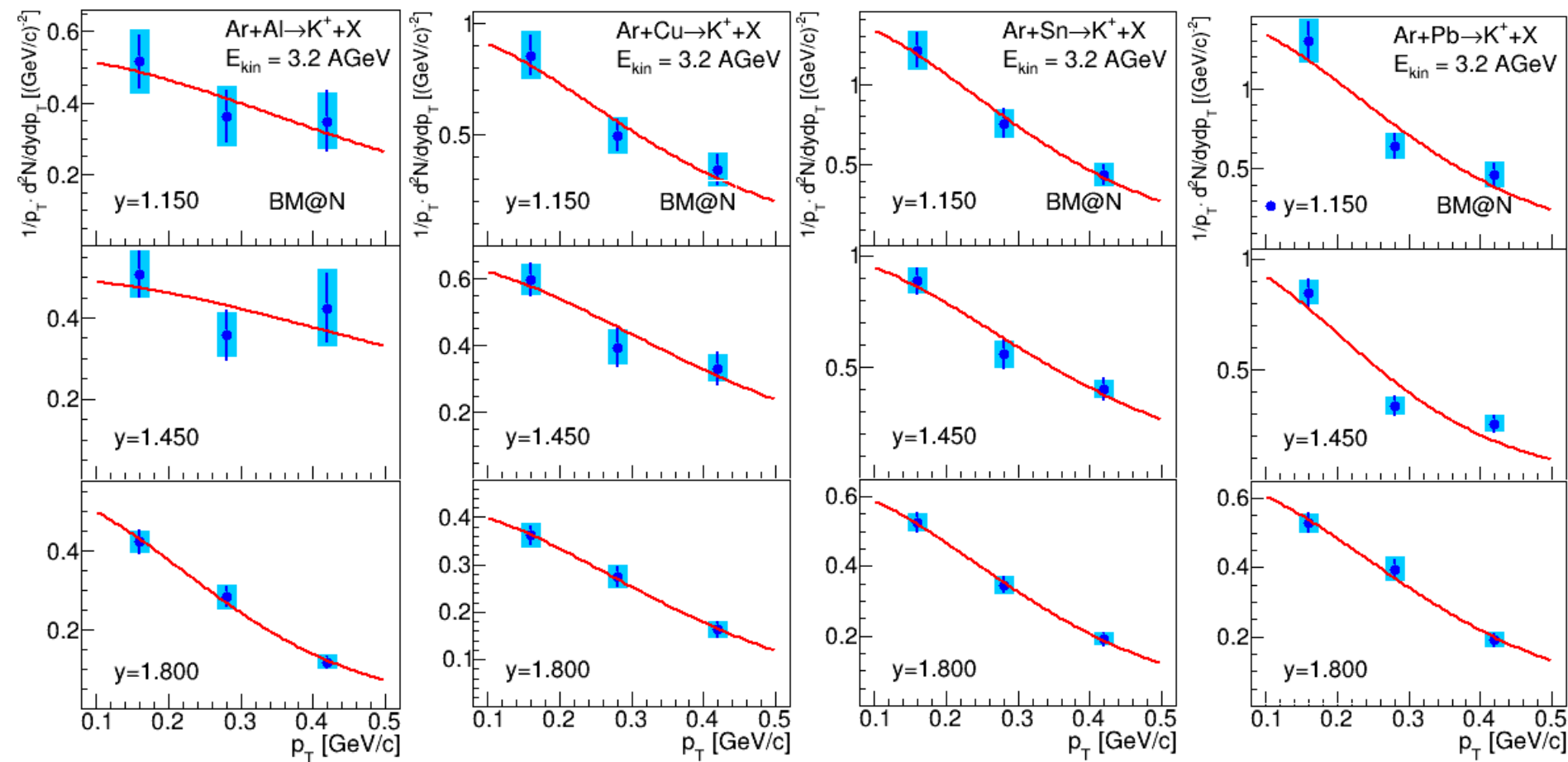


Результаты фитирования показаны линиями.

$$1/p_T \cdot d^2N/dp_T dy = C \cdot \exp(-(m_T - m_{\pi,K})/T_0)$$

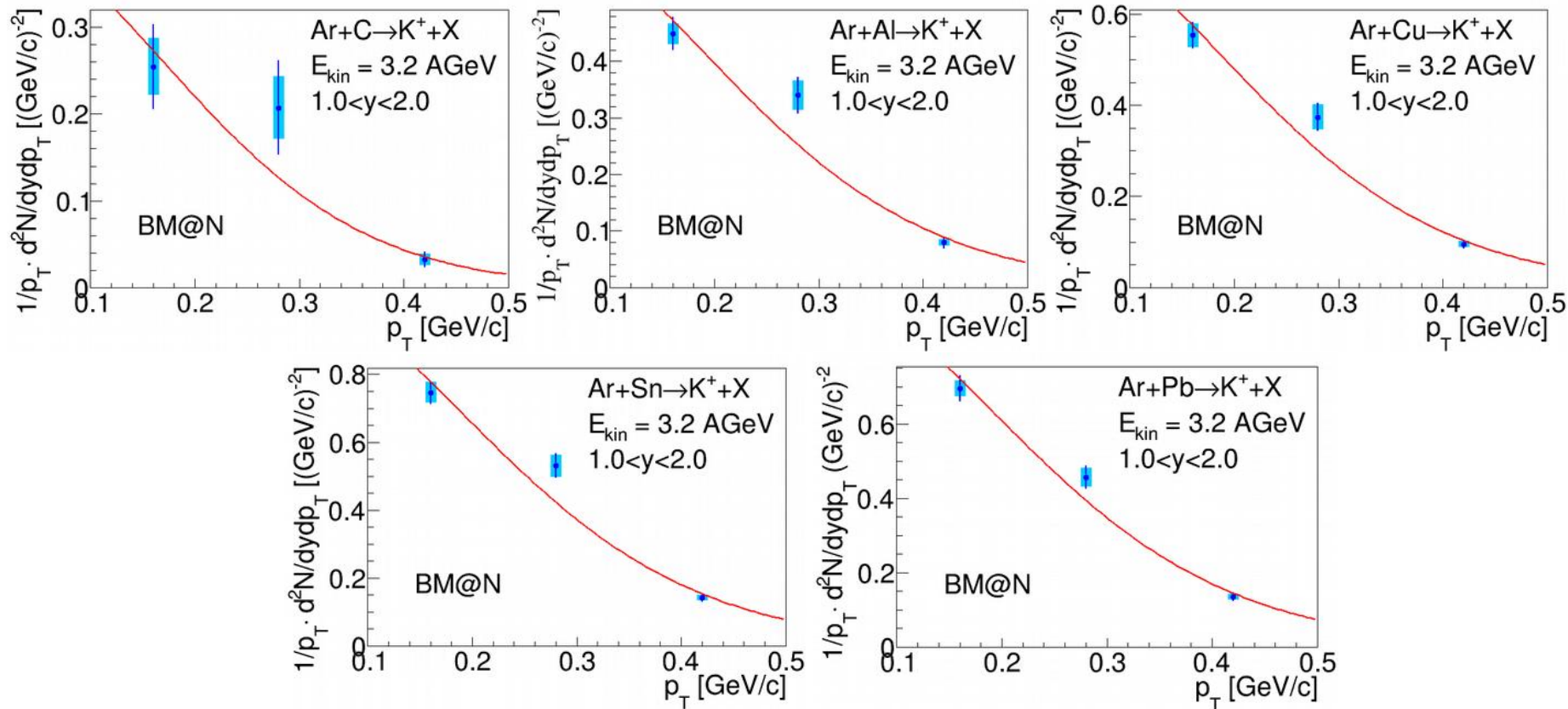
где  $m_T = \sqrt{(m_{\pi,K}^2 + p_T^2)}$  – поперечная масса,  $C$  – нормировка (свободный параметр),  $T_0$  – обратный наклон (свободный параметр),  $dy$  – ширина измеренного бина по  $y$ ,  $dp_T$  – ширина измеренного бина по  $p_T$ .

# Инвариантные $p_T$ -спектры $K^+$ -мезонов



Усы представляют статистические погрешности, прямоугольники показывают систематические погрешности. Результаты фитирования показаны в виде красных кривых.

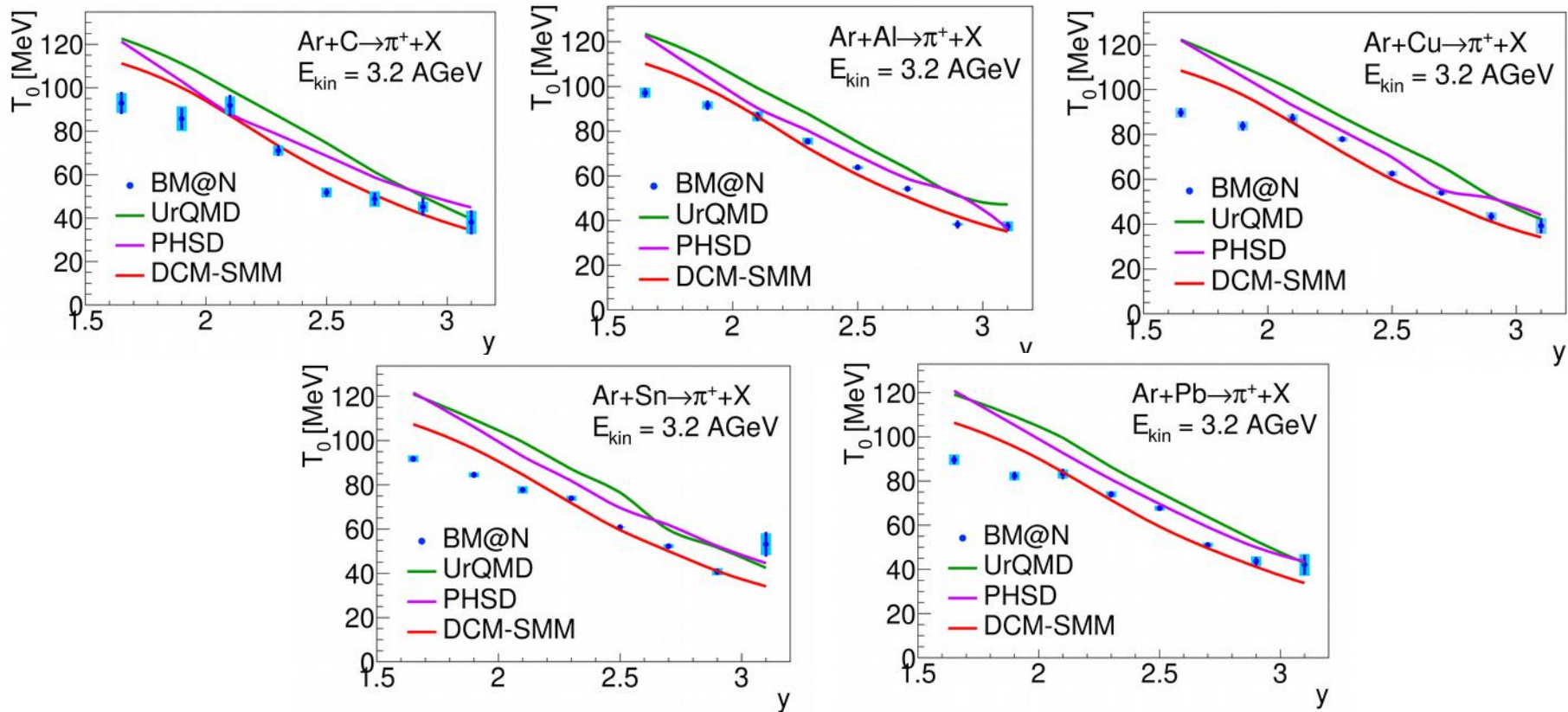
# Инвариантные $p_T$ -спектры $K^+$ -мезонов



Измеренная область по быстроте. Результаты фитирования показаны в виде **красных** кривых.

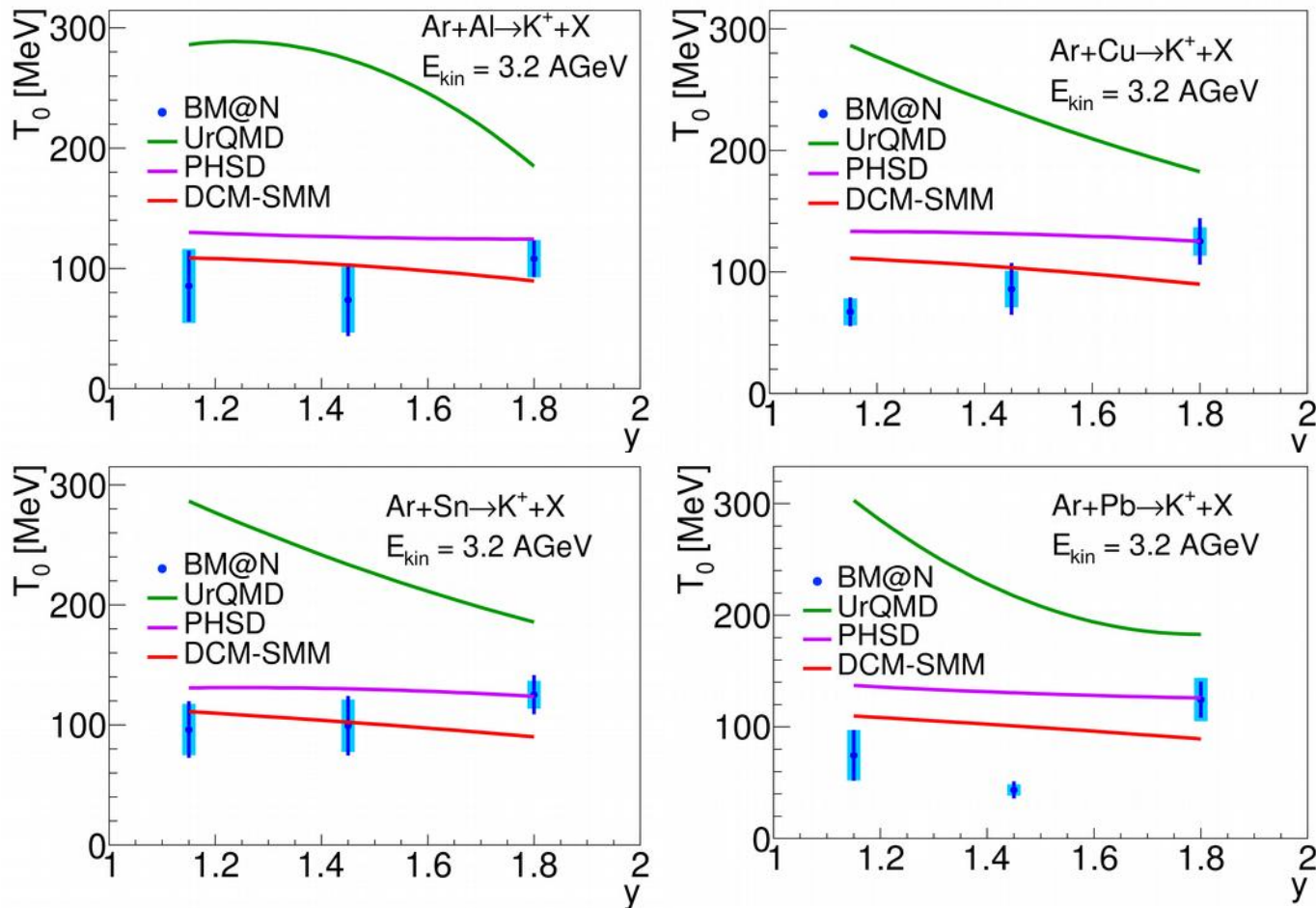


# Параметры обратного наклона $T_0 \pi^+$



Усы представляют статистические погрешности, прямоугольники показывают систематические погрешности. Предсказания моделей DCM-SMM, UrQMD и PHSD показаны в виде красных, зелёных и фиолетовых линий.

# Параметры обратного наклона $T_0$ $K^+$



Усы представляют статистические погрешности, прямоугольники показывают систематические погрешности. Предсказания моделей DCM-SMM, UrQMD и PHSD показаны в виде **красных**, **зелёных** и **фиолетовых** линий.

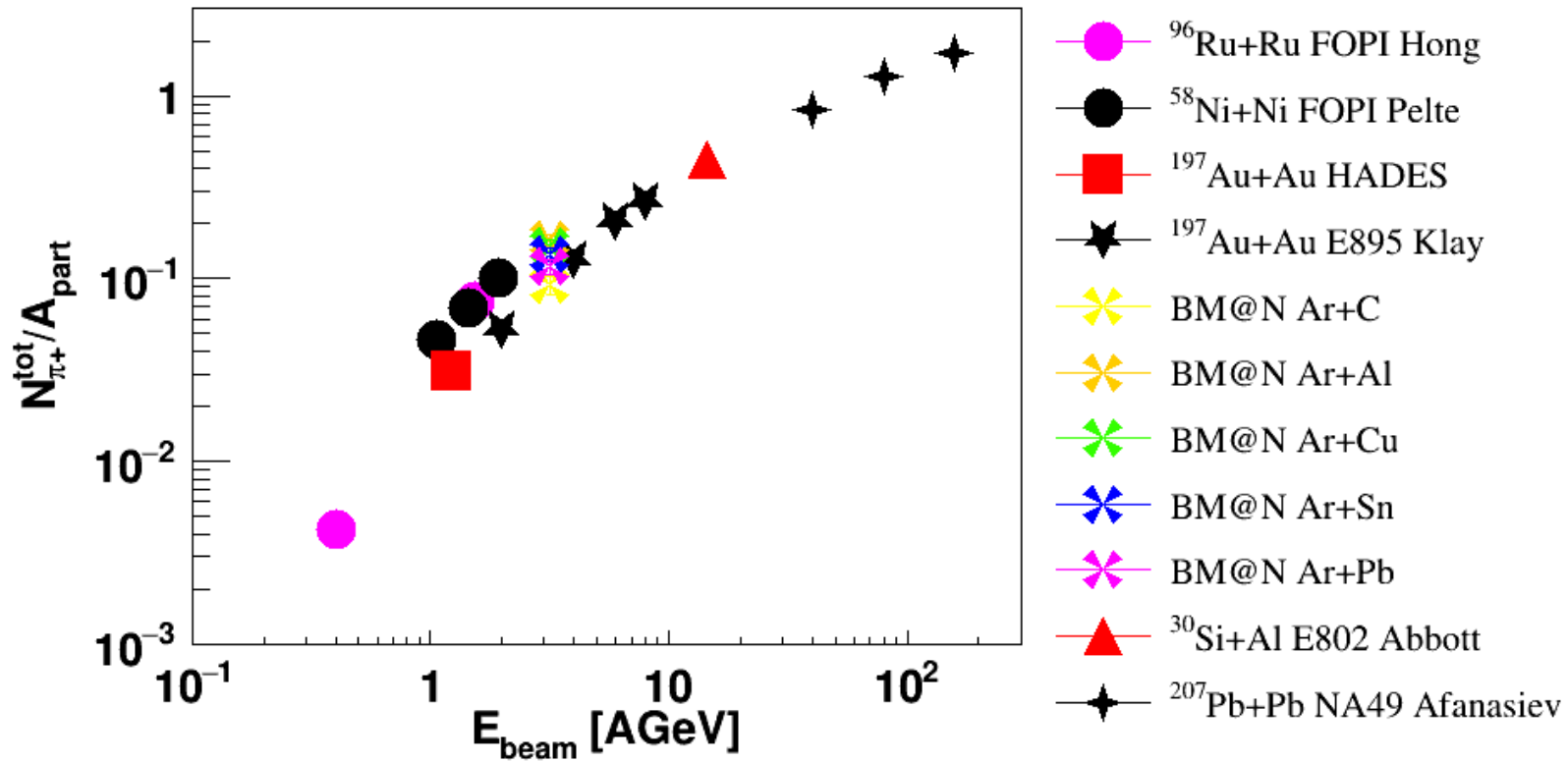
# Обратные наклоны $\pi^+$ и $K^+$



$T_{eff}$  показан для диапазона поперечных импульсов в области, измеренной [BM@N](#).

Взаимод. ядра / Кинет. энергия пучка / Эксперимент	$T_{eff}$ at $y^* = 0$ (World), $y^* \approx 0.5$ ( $\pi^+$ , <a href="#">BM@N</a> ), $y^*$ in meas. range ( $K^+$ , <a href="#">BM@N</a> )
$Ar+KCl$ , 1.76 АГэВ, HADES	$82.4 \pm 0.1^{+9.1}_{-4.6}$ ( $\pi^+$ , $A_{part} = 38.5$ ) $89 \pm 1 \pm 2$ ( $K^+$ , $A_{part} = 38.5$ )
$Ni+Ni$ , 1.93 АГэВ, FOPI	$110.9 \pm 1.0$ ( $K^+$ , $A_{part} = 75$ )
$Ni+Ni$ , 1.93 АГэВ, KaoS	$97 \pm 7$ ( $K^+$ , $A_{part} \sim 5$ ) $107 \pm 10$ ( $K^+$ , $A_{part} \sim 100$ )
$Ar+Cu$ , 3.2 АГэВ, <a href="#">BM@N</a>	$90 \pm 2$ ( $\pi^+$ , $A_{part} = 33.6$ ) $81 \pm 5$ ( $K^+$ , $A_{part} = 33.6$ )
$Ar+Sn$ , 3.2 АГэВ, <a href="#">BM@N</a>	$92 \pm 2$ ( $\pi^+$ , $A_{part} = 48.3$ ) $81 \pm 5$ ( $K^+$ , $A_{part} = 48.3$ )

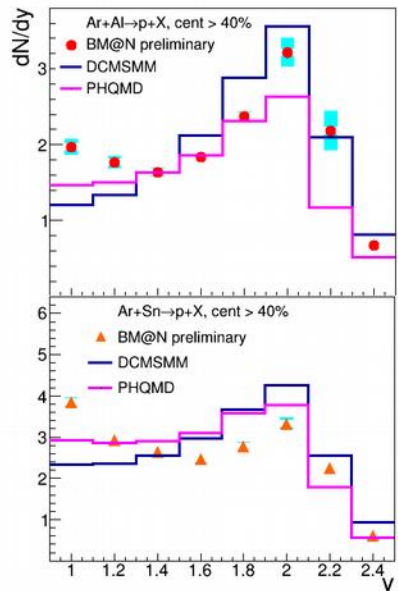
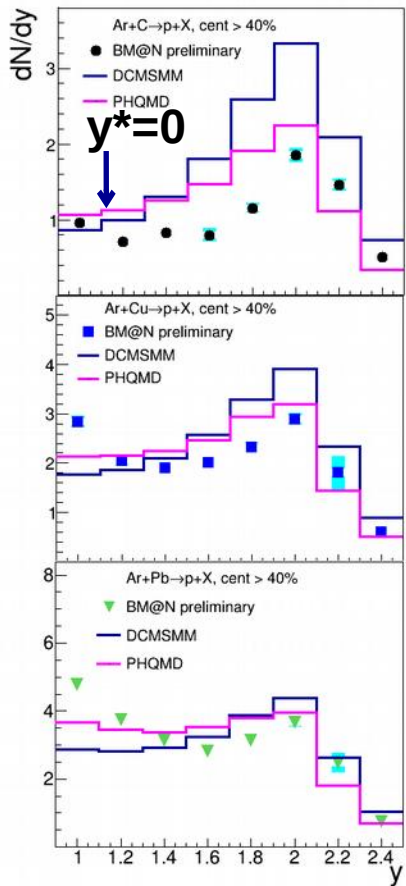
$$N_{\pi^+}^{\text{tot}}/A_{\text{part}}$$



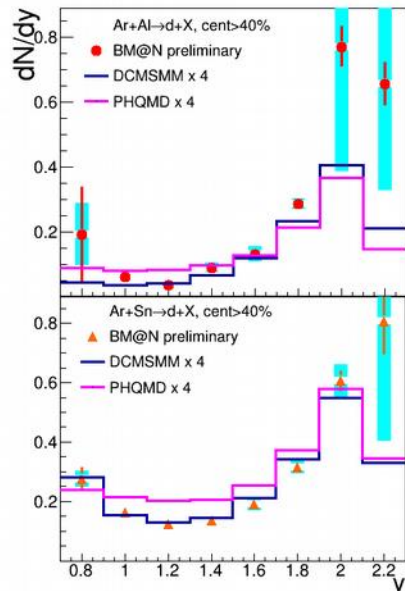
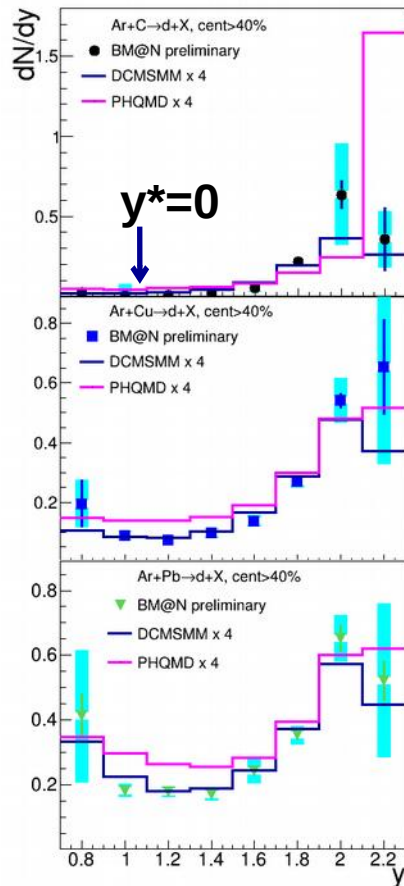
$\pi^+$  multiplicity per the mean number of nucleons-participants  $A_{\text{part}}$  shown as a function of the beam kinetic energy  $E_{\text{beam}}$ . The BM@N results are compared with the world measurements.



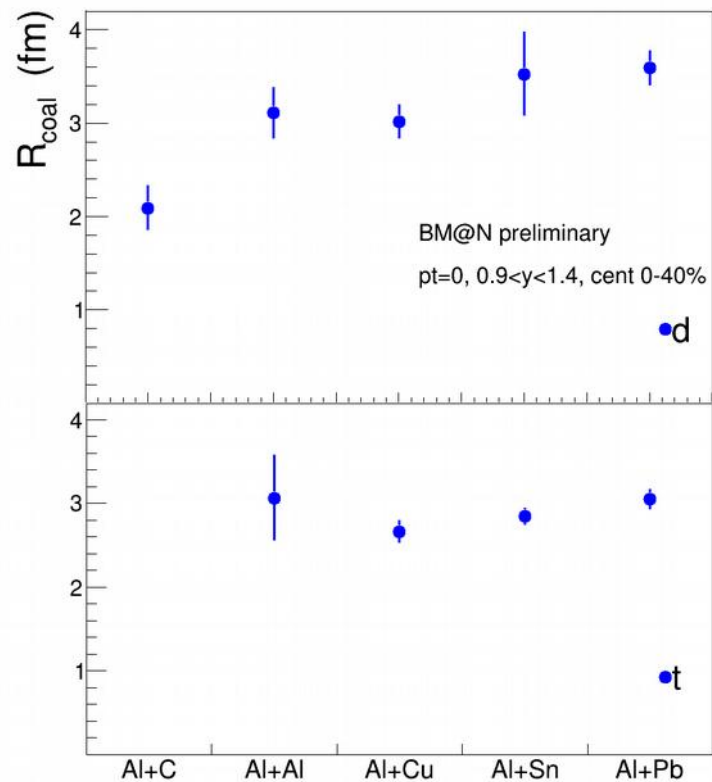
# Образование p, d в аргон-ядерных взаимодействиях с энергией пучка 3.2 АГэВ



$$y^* = y_{lab} - 1.08$$



Центральность > 40%



Радиус источника коалесценции  $R_{\text{coal}}$  вычислен с использованием значений  $V_2(p_T=0)$  и  $V_3(p_T=0)$  для d и t.

