



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

В.Плотников от имени
коллаборации VM@N

ЛФВЭ, ОИЯИ, Дубна, Россия

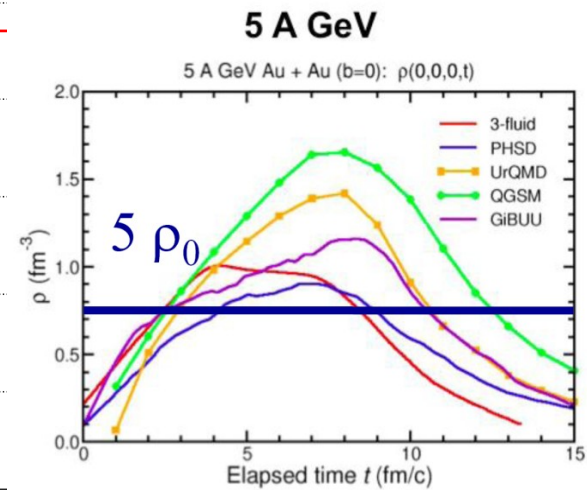
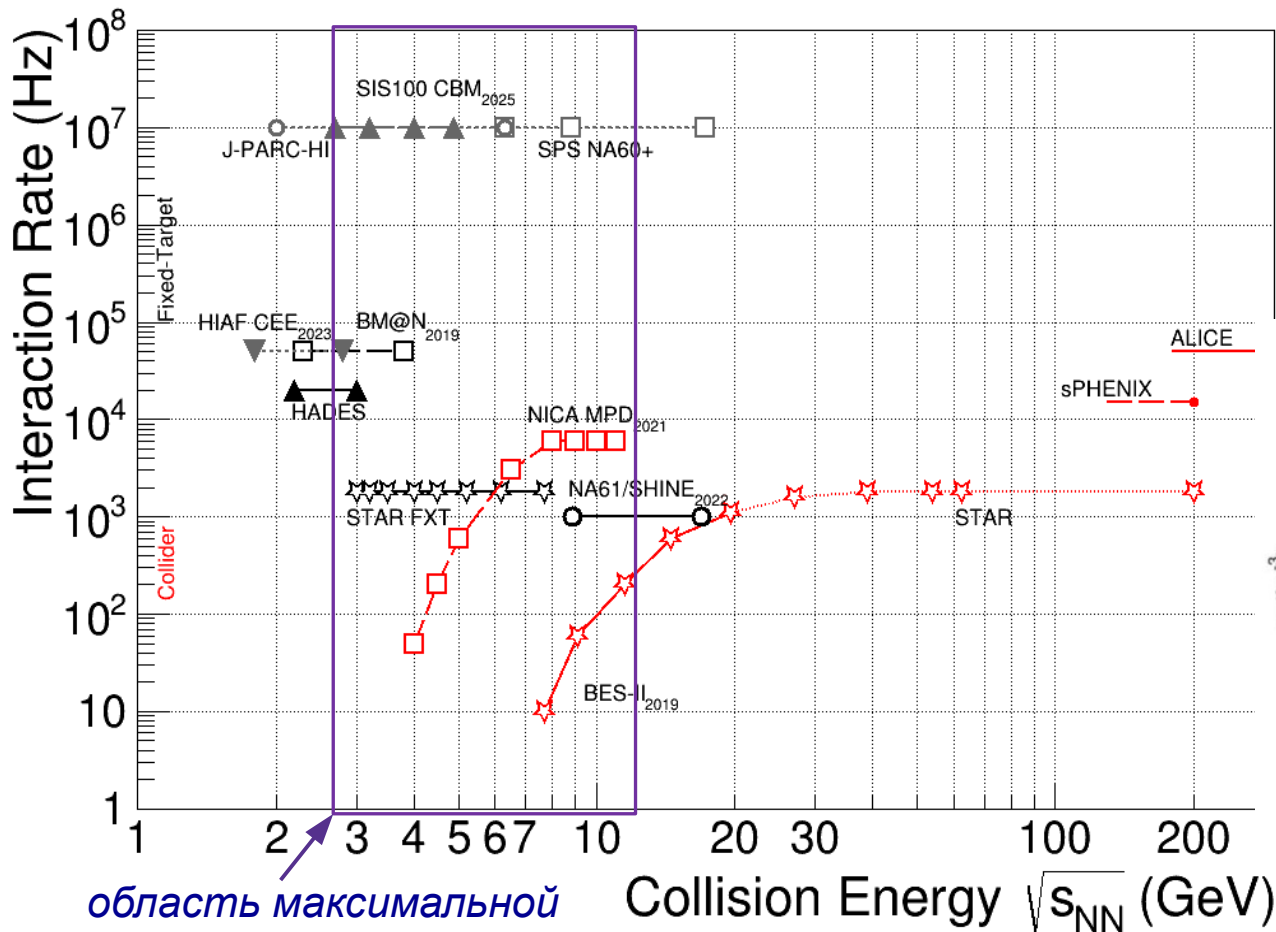


**Joint Institute for Nuclear
Research**

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 π^+ 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

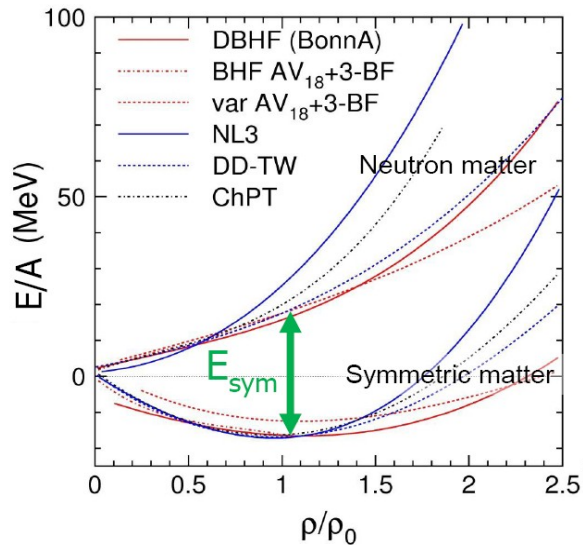
Конкуренты BM@N:

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

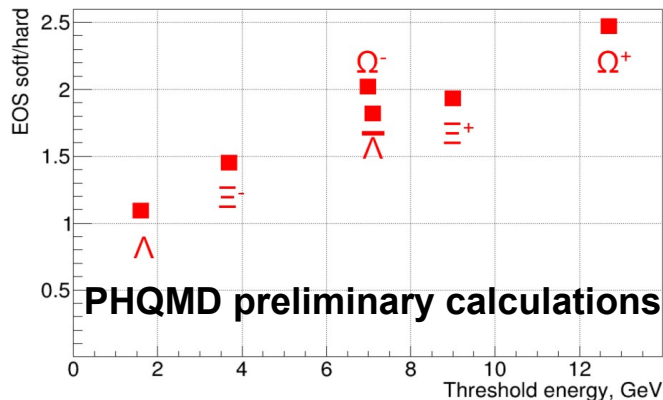
► Ограничения на энергию симметрии E_{sym}

→ эллиптические потоки нейтронов относительно протонов

→ подпороговое образование частиц с противоположным изоспином

P Senger 2022 Phys. Scr. 97 064003

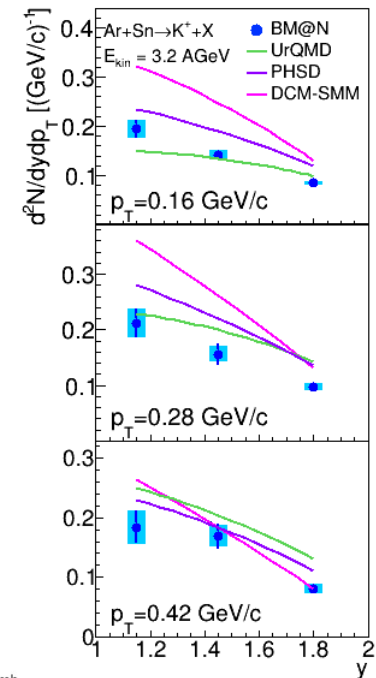
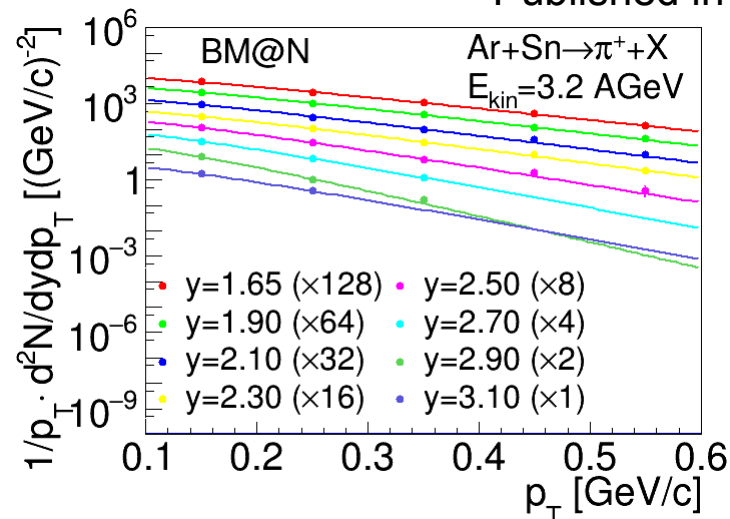
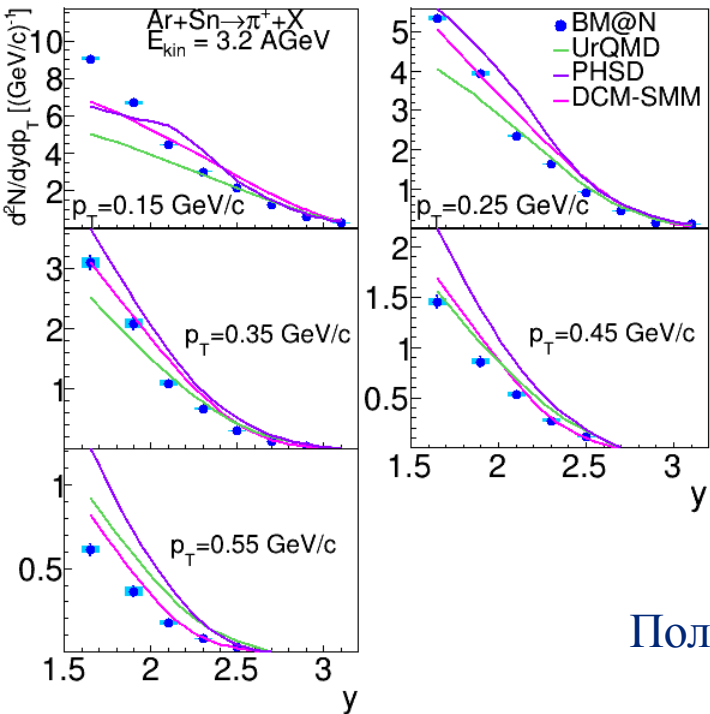
Hyperon yield in 4A GeV Au+Au:
soft EOS ($K=240$ MeV) / hard EOS ($K=350$ MeV)



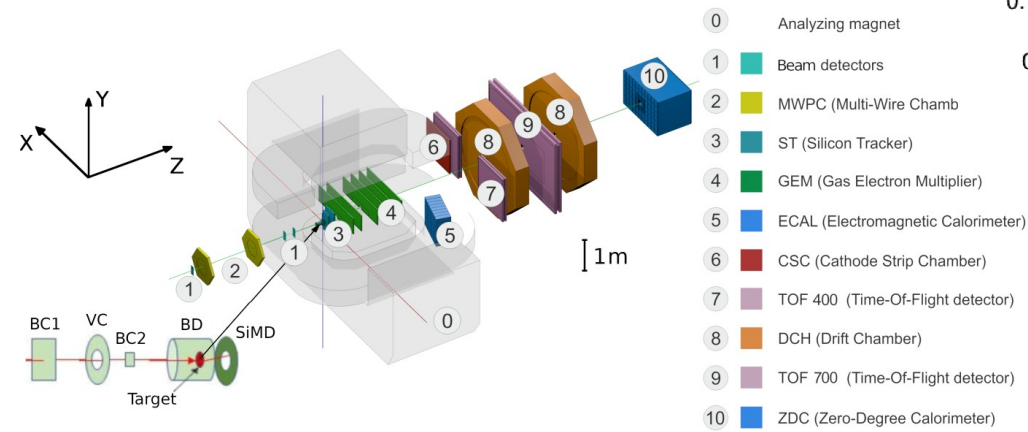
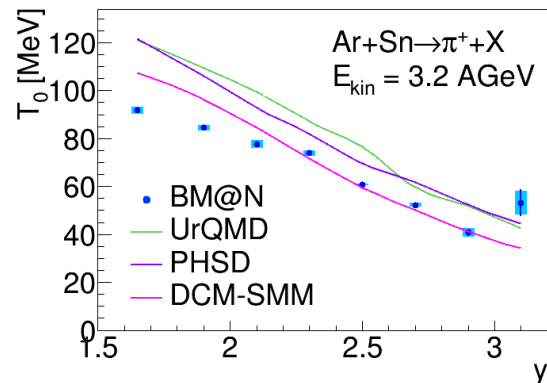
Образование π^+ и K^+ -мезонов в аргон-ядерных взаимодействиях с энергией пучка 3.2 АГэВ на Нуклотроне



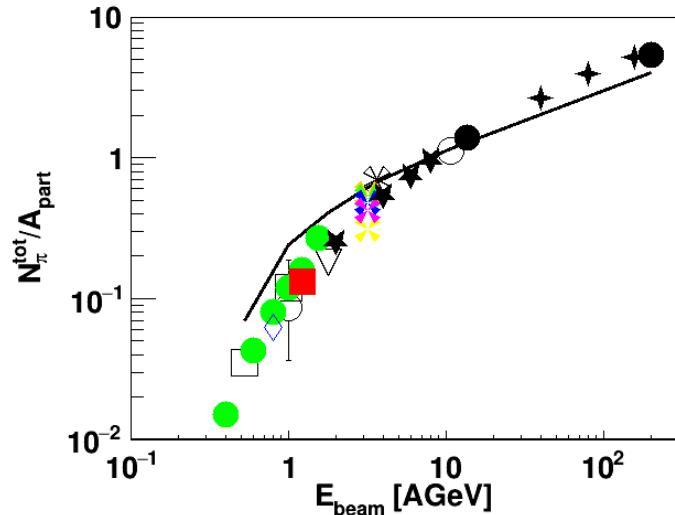
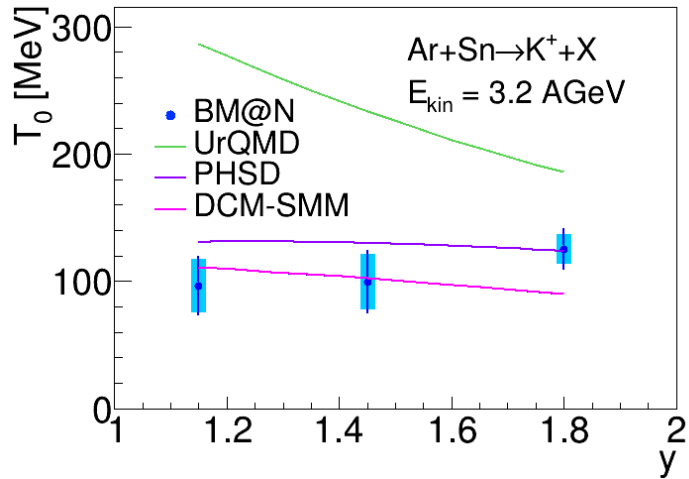
<https://arxiv.org/abs/2303.16243v3>
Published in JHEP 07 (2023) 174



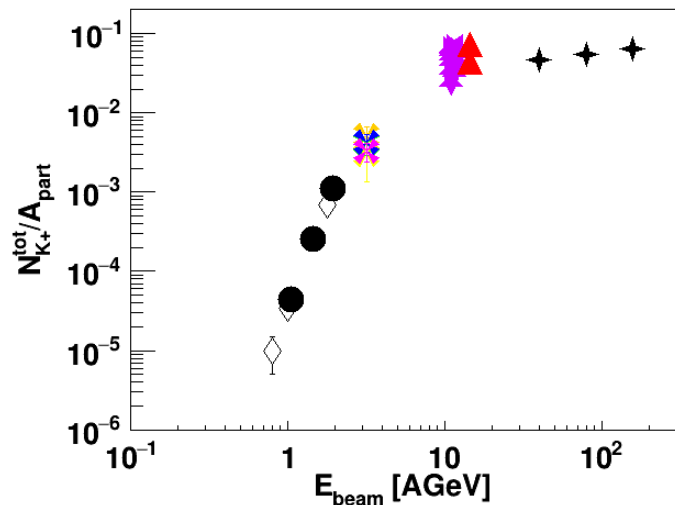
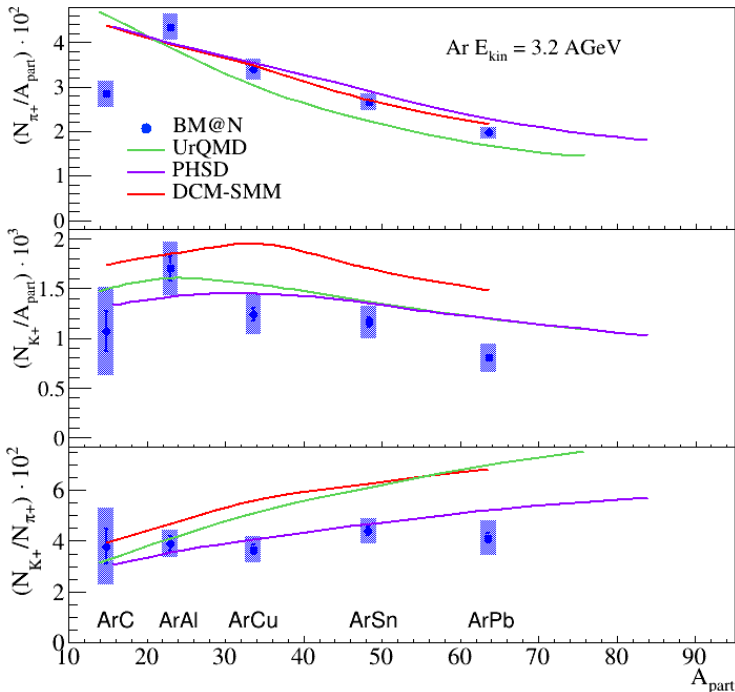
Полная область по центральности



Образование π^+ и K^+ -мезонов в аргон-ядерных взаимодействиях с энергией пучка 3.2 АГэВ на Нуклотроне

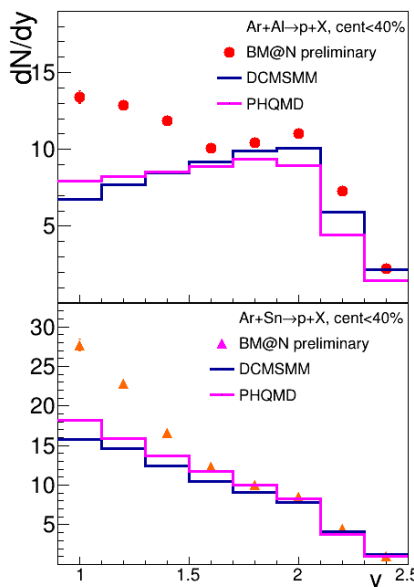
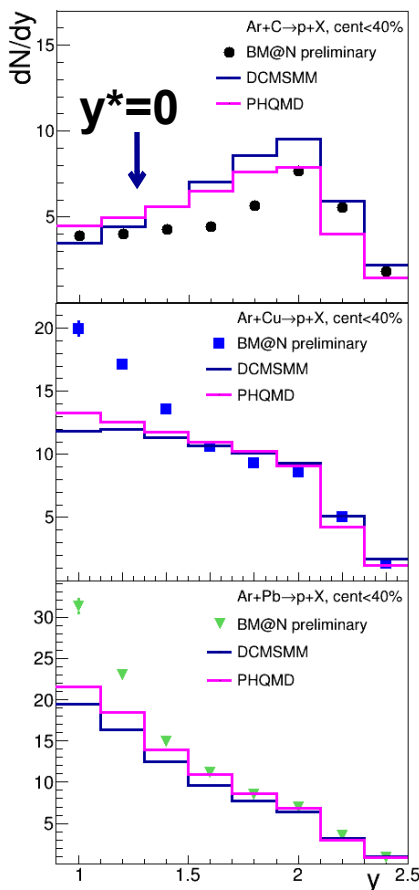


- N+N
- $^{24}\text{Mg}+\text{Mg}$
- $^{139}\text{La}+\text{La}$
- $^{197}\text{Au}+\text{Au}$
- $^{40}\text{Ar}+\text{KCl}$
- $^{30}\text{Si}+\text{Al,S}$
- $^{207}\text{Pb}+\text{Pb}$
- BM@N Ar+C
- BM@N Ar+Al
- BM@N Ar+Cu
- BM@N Ar+Sn
- BM@N Ar+Pb
- FOPI (Reisdorf) Au+Au
- TAPS Au+Au
- HADES Au+Au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

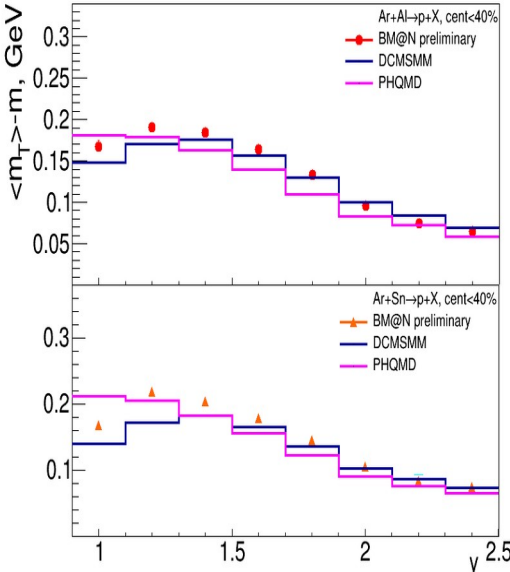
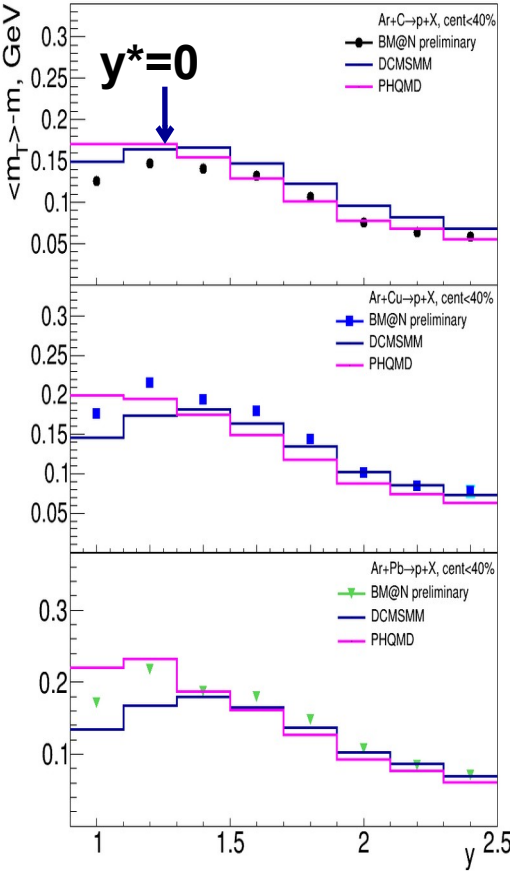


- $^{58}\text{Ni}+\text{Ni}$ FOPI Best
- $^{58}\text{Ni}+\text{Ni}$ KaoS Barth
- BM@N Ar+C
- BM@N Ar+Al
- BM@N Ar+Cu
- BM@N Ar+Sn
- BM@N Ar+Pb
- $^{197}\text{Au}+\text{Au}$ E866 Ahle
- Si+Au E859 Ahle
- $^{207}\text{Pb}+\text{Pb}$ NA49 Afanasiev

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



**Центральность
0-40%**



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

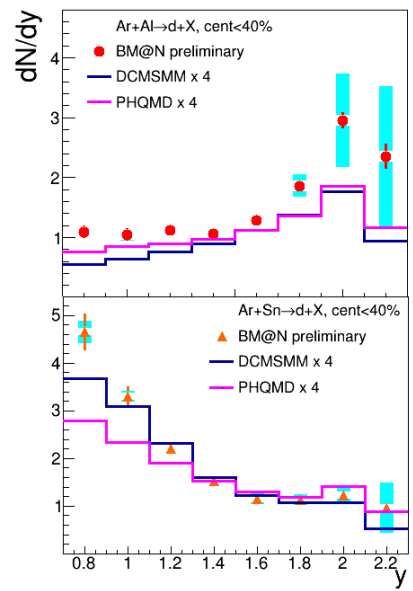
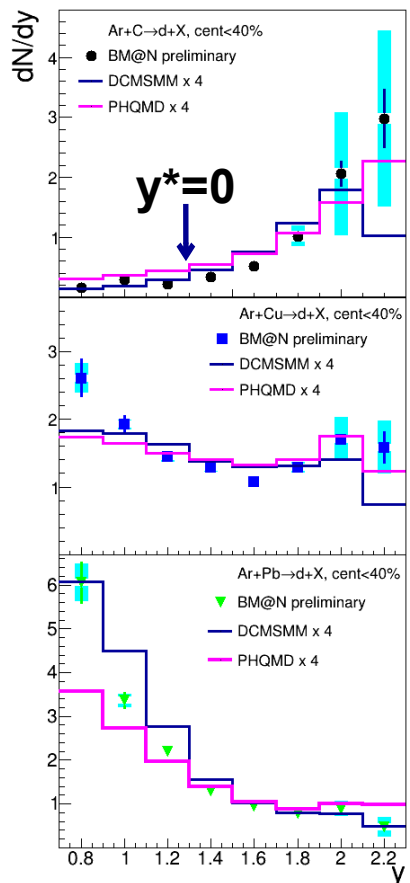
$$y_{cm} \rightarrow \langle y(\pi) \rangle$$

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

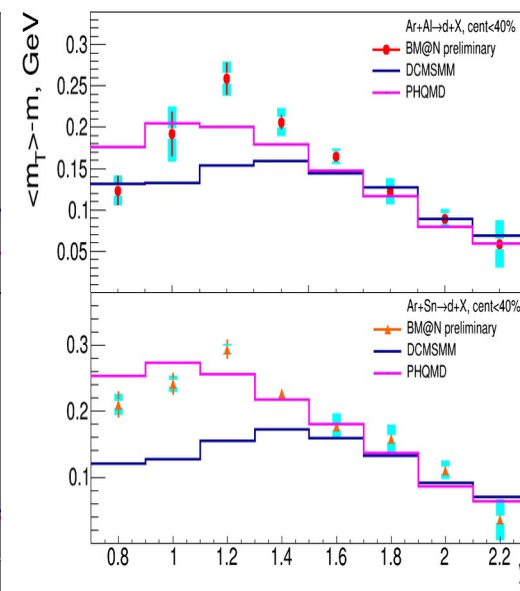
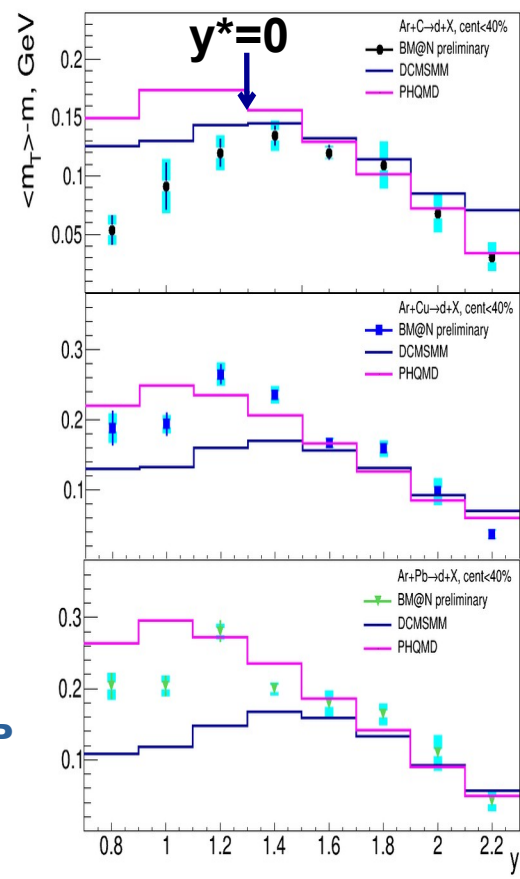
- **Спектр dN/dy мягче для более тяжёлых мишеней**
- **Предсказания DCM-SMM и PHQMD недооценивают данные в области центральных быстрот**

- **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%**



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

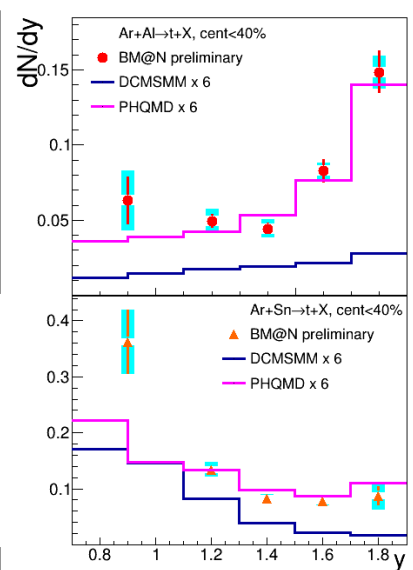
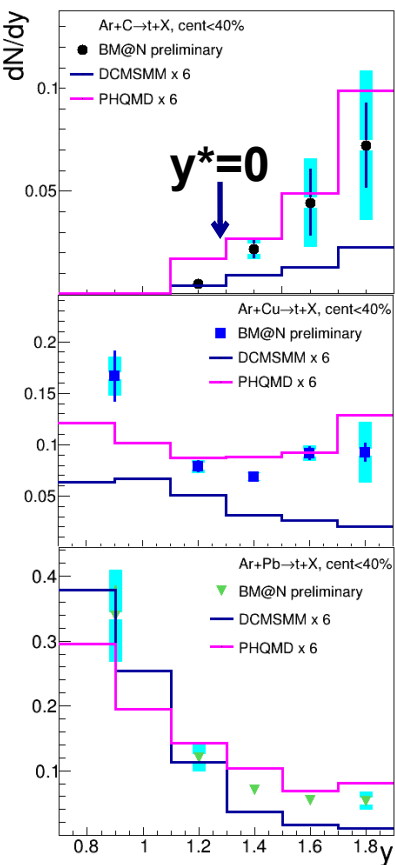
$$y_{CM} \rightarrow \langle y(\pi) \rangle$$

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

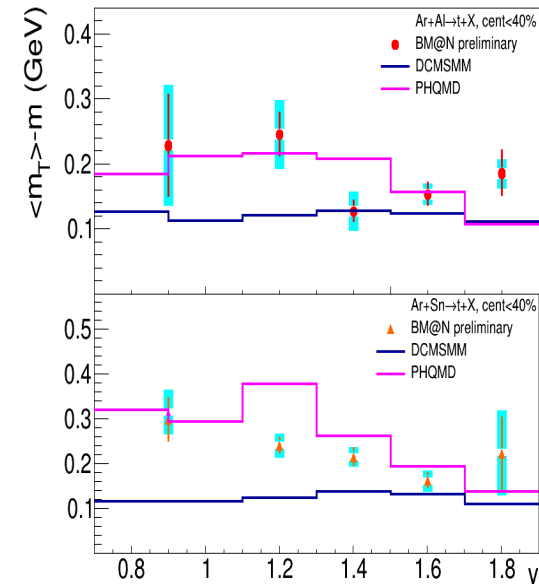
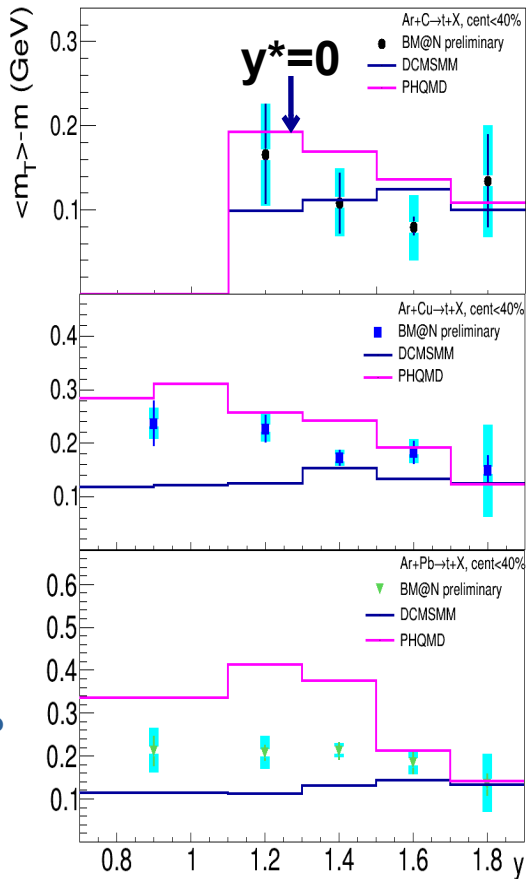
- Спектр dN/dy мягче для более тяжёлых мишеней
- Предсказания DCM-SMM и PHQMD описывают форму данных, но меньше по нормировке примернов в 4 раза

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

Образование t 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 $\langle y(\pi) \rangle = 0.82$

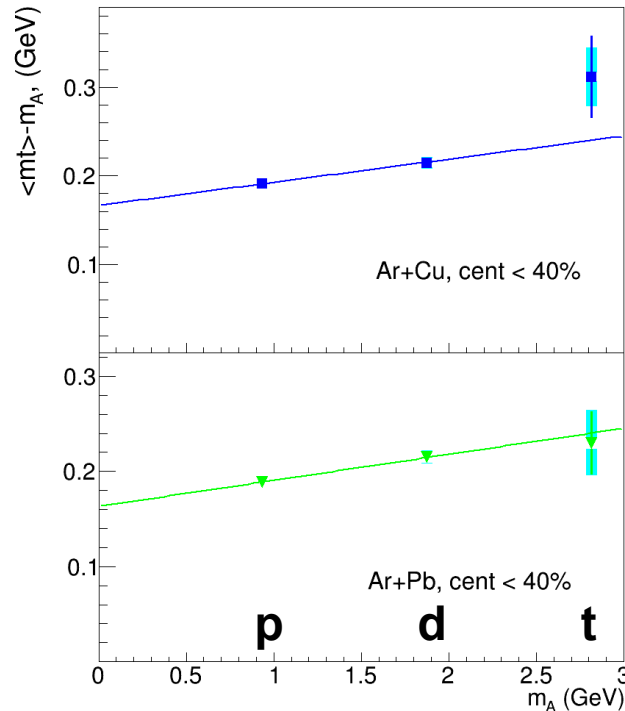
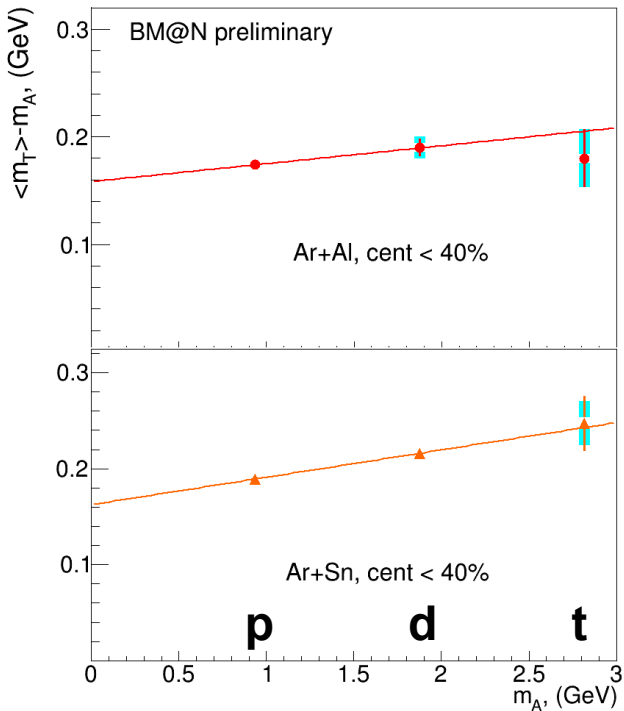
- Предсказания PHQMD лучше описывают форму данных, чем DCM-SMM, но предсказания обеих моделей меньше по нормировке примерно в 6 раз

- 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 ± 3	76 ± 8	80 ± 5	74 ± 9	80 ± 10
$\langle \beta \rangle$	0.0 ± 0.04	0.26 ± 0.05	0.27 ± 0.03	0.30 ± 0.4	0.26 ± 0.5

Факторы коалесценции B_2 (дейтроны), B_3 (тритоны)

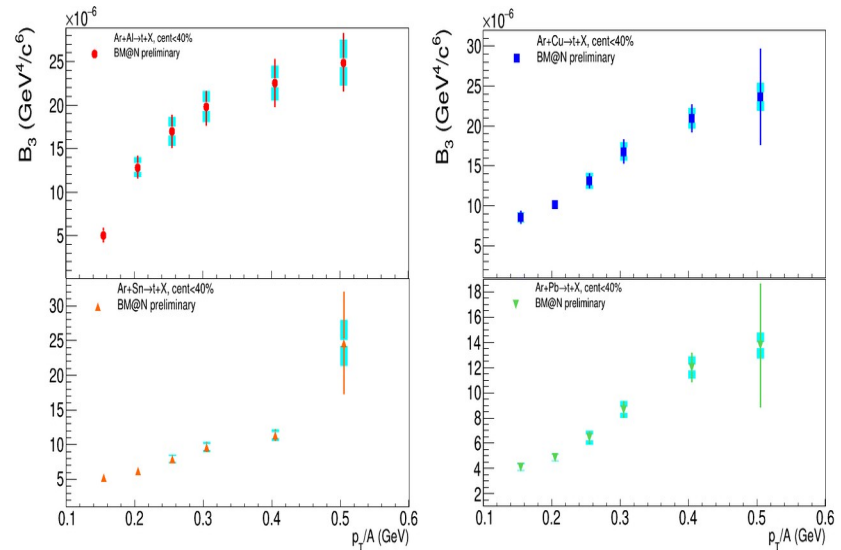
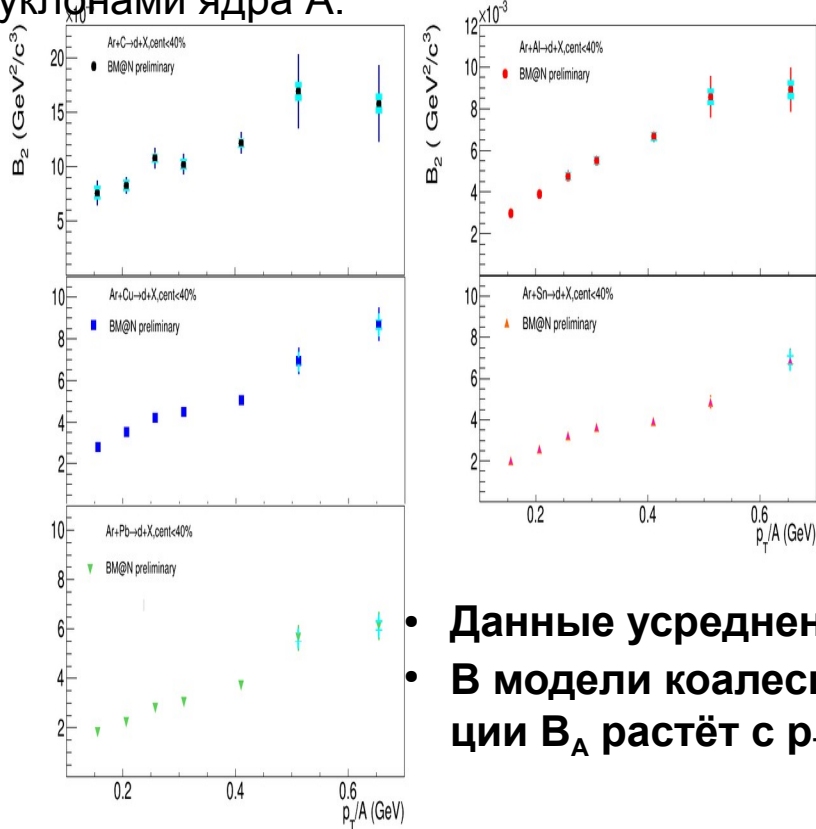
$$E_A \frac{d^3 N_A}{dp_A^3} = B_A \left(E_p \frac{d^3 N_p}{dp_p^3} \right)^Z \left(E_n \frac{d^3 N_n}{dp_n^3} \right)^{A-Z}$$

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

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

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 .

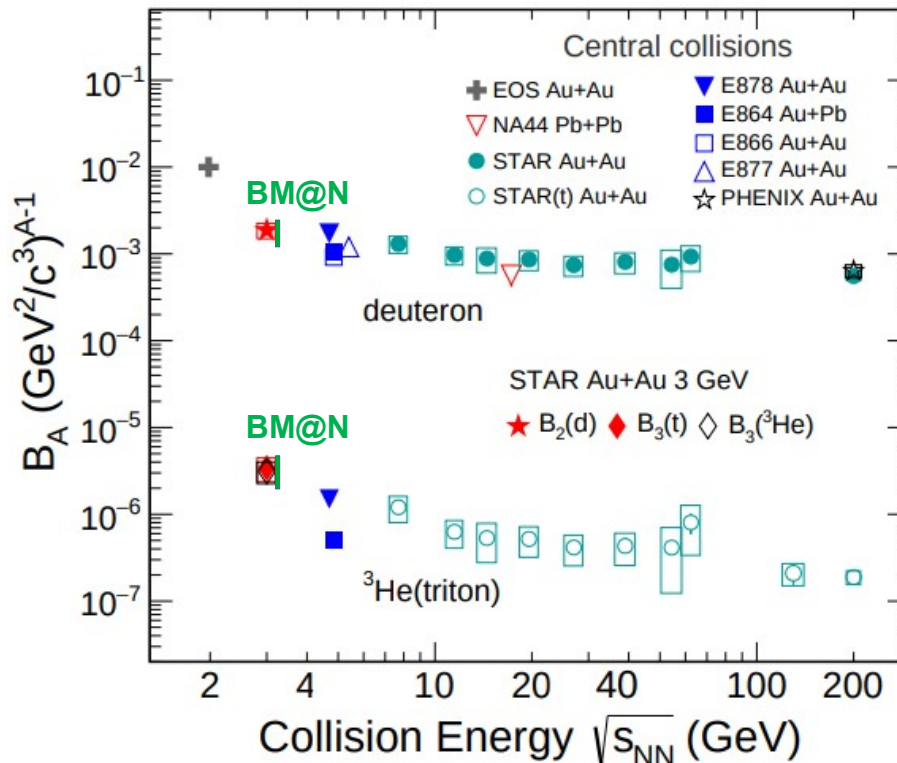
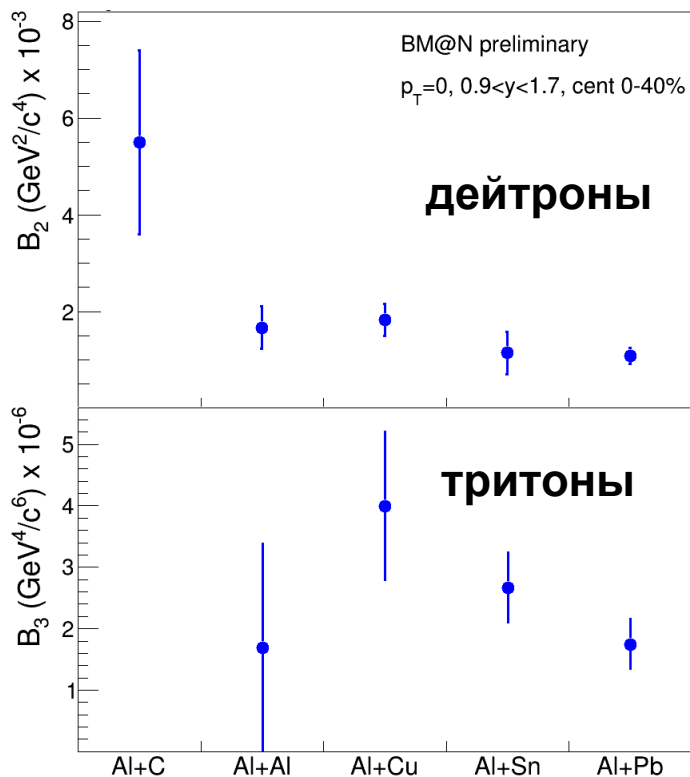


• Данные усреднены в $0.9 < y_{\text{lab}} < 1.7$ ($-0.18 < y^* < 0.62$)

• В модели коалесценции B_A растёт с p_T

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

Результаты для B_2 и B_3 во взаимодействиях Ag+A (центральность 0-40%) совместимы с энергетической зависимостью соответствующих факторов, полученных в центральных взаимодействиях тяжёлых ядер.



STAR Collaboration: [nucl-ex] arXiv:2311.11020

Значения $B_2(p_T)$ и $B_3(p_T)$ экстраполированы к $p_T = 0$ с использованием экспоненциального фита $B_A(p_T=0)\exp(a \cdot p_T)$.

Отношение $N_p N_t / N_d^2$



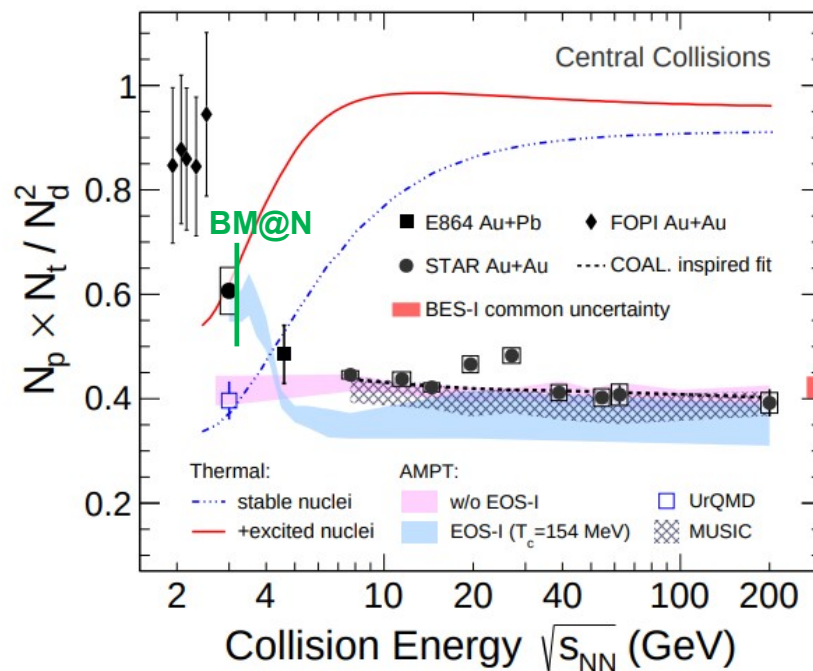
Reaction	Ar+C	Ar+Al	Ar+Cu	Ar+Sn	Ar+Pb
$N_p \cdot N_t / N_d^2$	0.53 ± 0.10	0.55 ± 0.09	0.69 ± 0.11	0.60 ± 0.07	0.59 ± 0.06

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

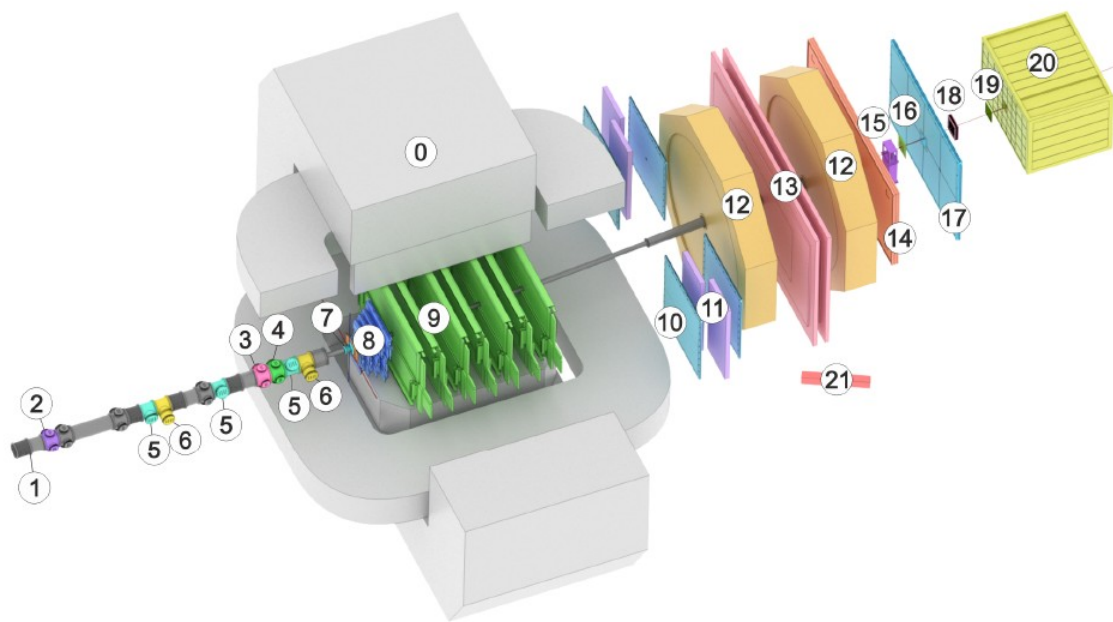
Сравнение с результатами AGS, FOPI, STAR

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



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

Xe+CsI: полный акцептанс детекторов



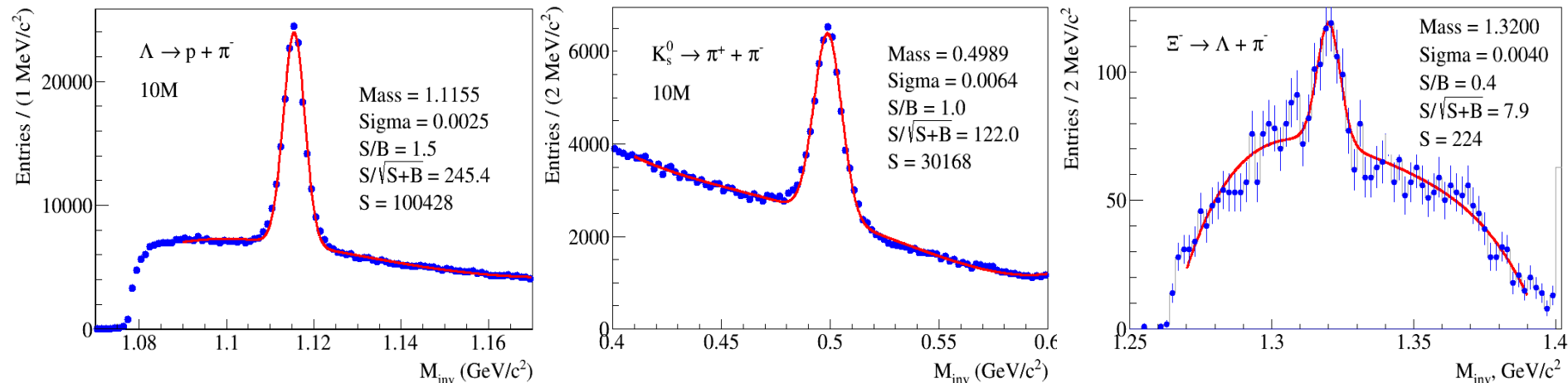
- Magnet SP-41 (0)
- Vacuum Beam Pipe (1)
- BC1, VC, BC2 (2-4)
- SiBT, SiProf (5, 6)
- Triggers: BD + SiMD (7)
- FSD, GEM (8, 9)
- CSC 1x1 m² (10)
- TOF 400 (11)
- DCH (12)
- TOF 700 (13)
- ScWall (14)
- FD (15)
- Small GEM (16)
- CSC 2x1.5 m² (17)
- Beam Profilometer (18)
- FQH (19)
- FHCAL (20)
- HGN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

- **Полная конфигурация установки**

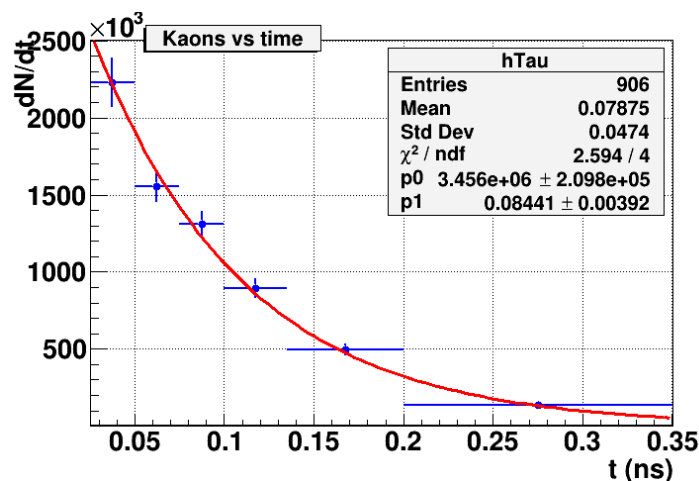
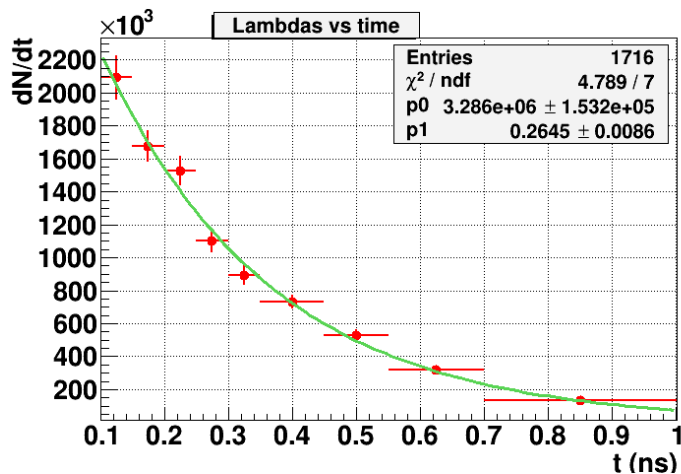
- **На рассмотрении в NIM статья по установке BM@N для конфигурации в Xe+CsI сеансе**

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

Xe+CsI: полный аксептанс детекторов



- В 500М событиях ожидается: **4М Λ**, **1.2М K_s⁰** и **8К Ξ⁻**

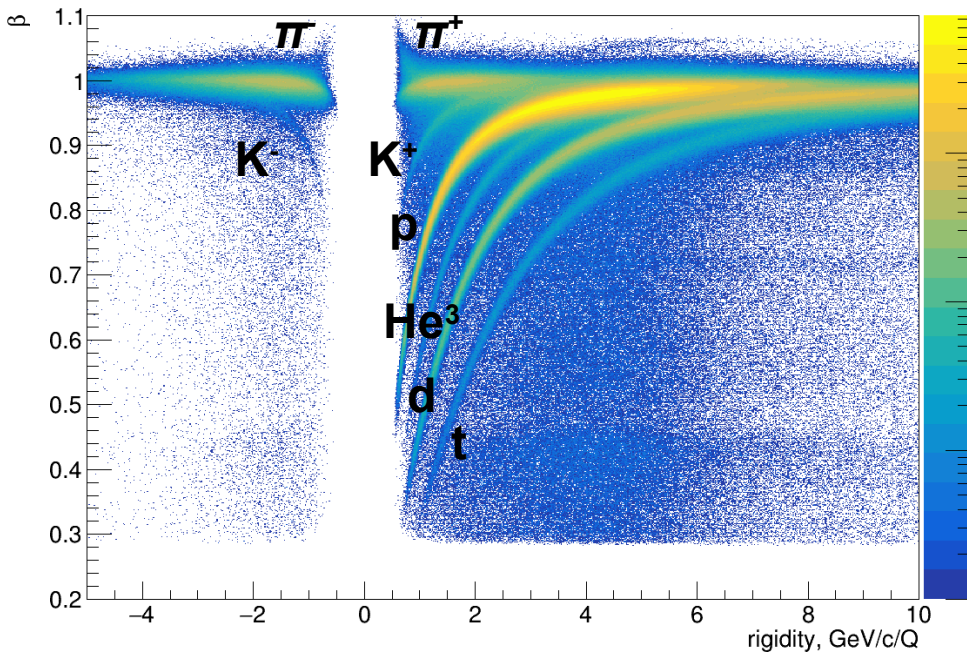


- Оценки времён жизни, полученные из эксперимента, согласуются с табличными значениями для **Λ (0.2632 нс)** и **K_s⁰ (0.0895 нс)**

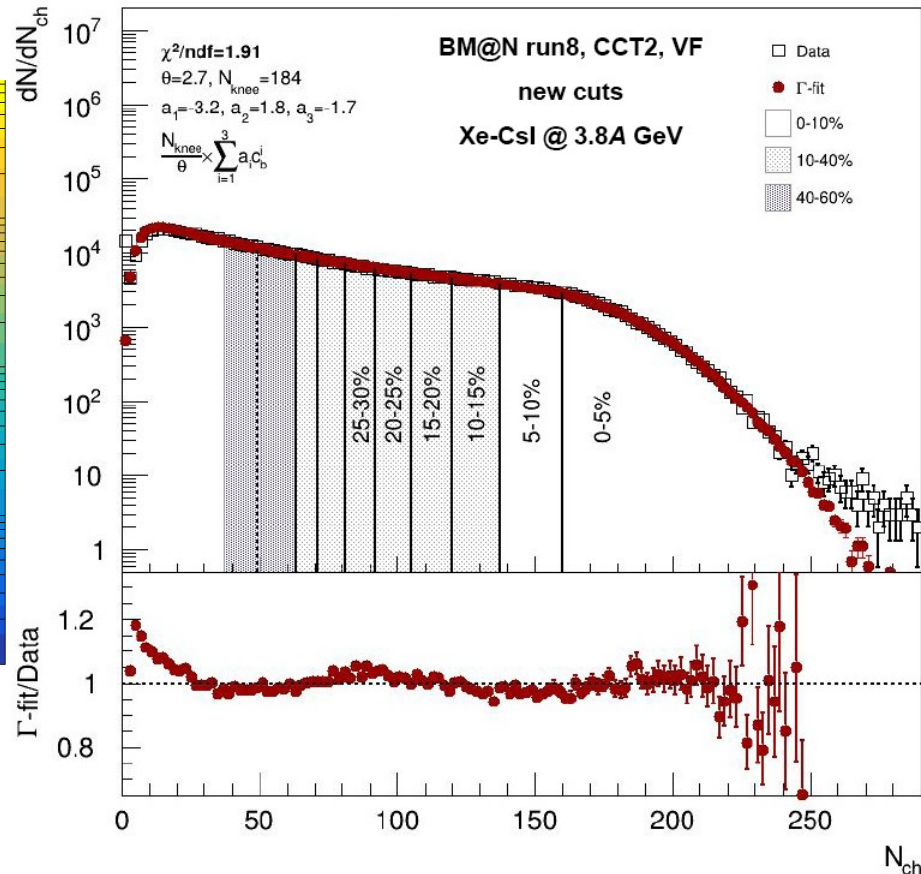
Xe+CsI: идентификация и центральность



Total β vs rigidity



Видны сигналы K^-



Γ -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^{ая} 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

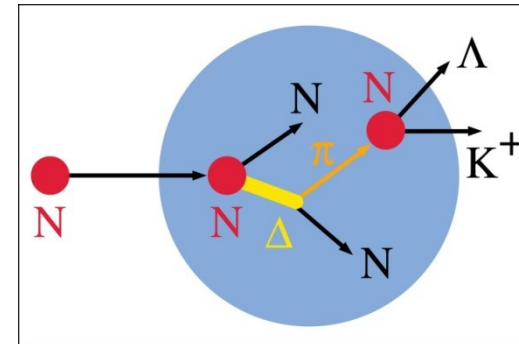
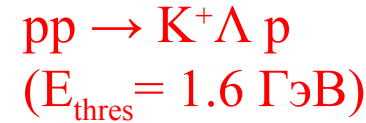
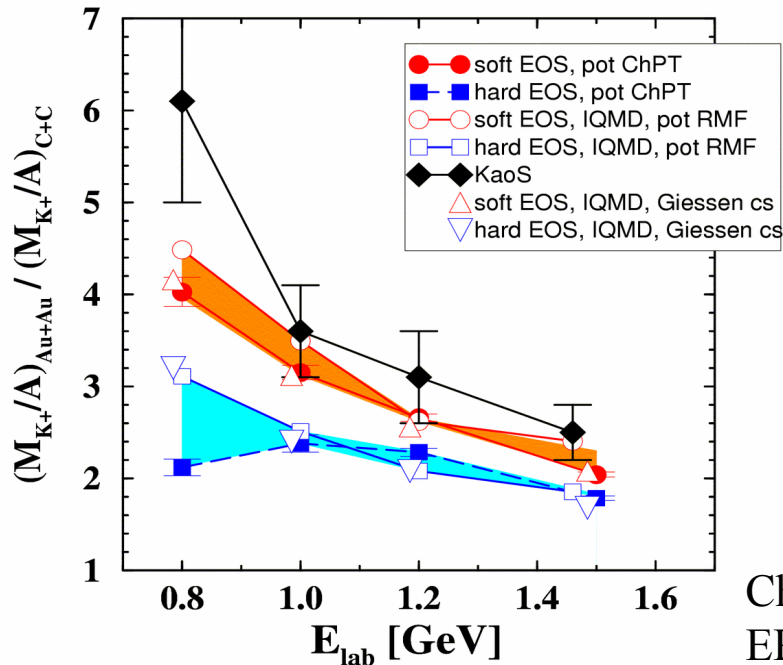
Архив



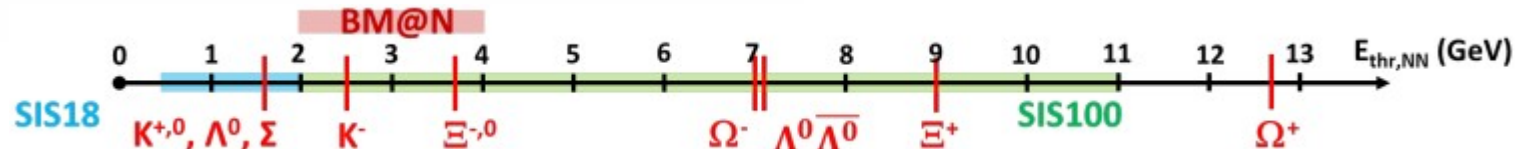
Уравнение состояния ядерной материи при высоких плотностях
Образование частиц при (под)пороговых энергиях через множественные последовательные столкновения

Пример: подпороговое рождение K^+ в GSI

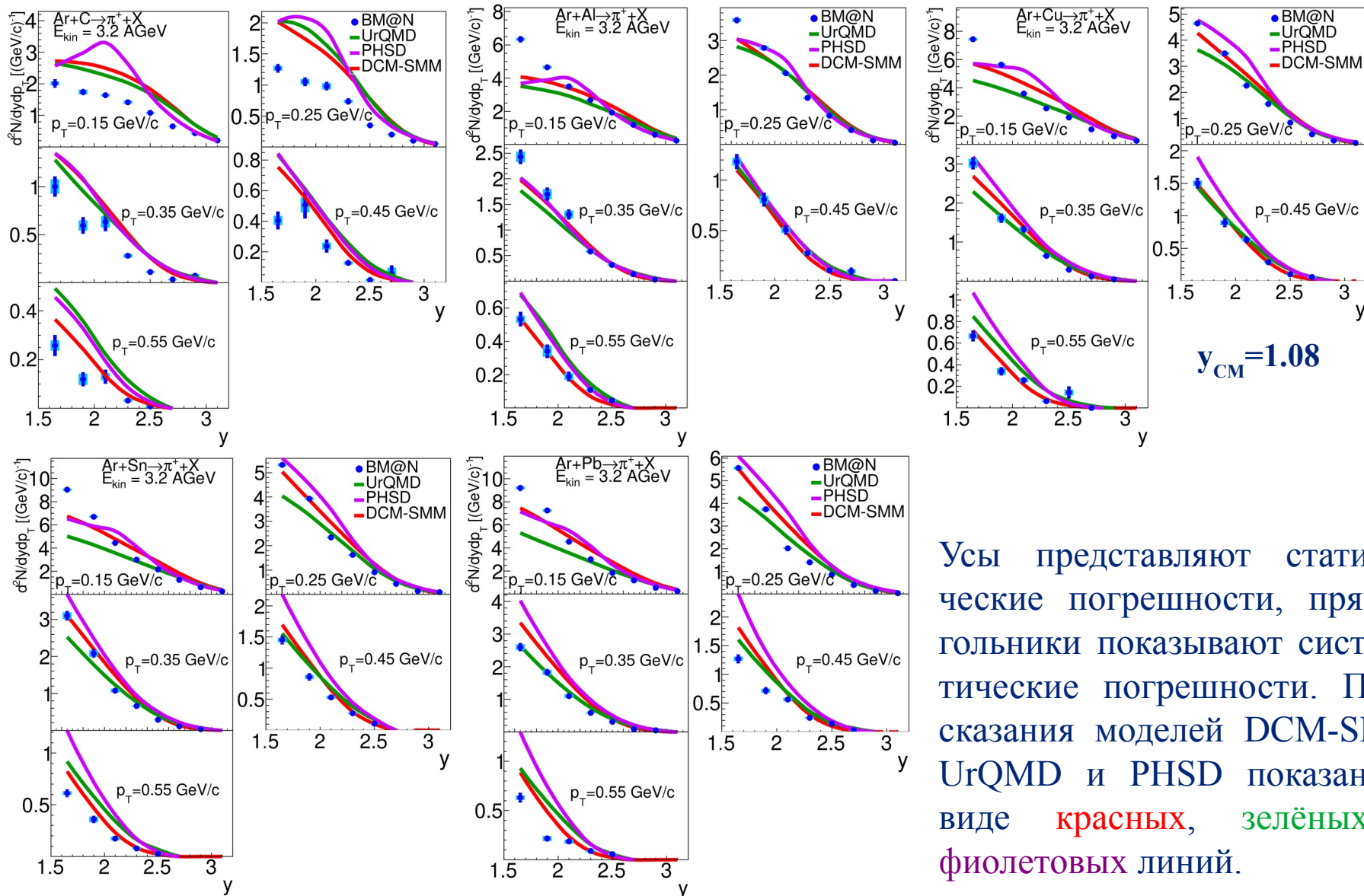
Идея: выходы K^+ \sim плотность \sim сжимаемость



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

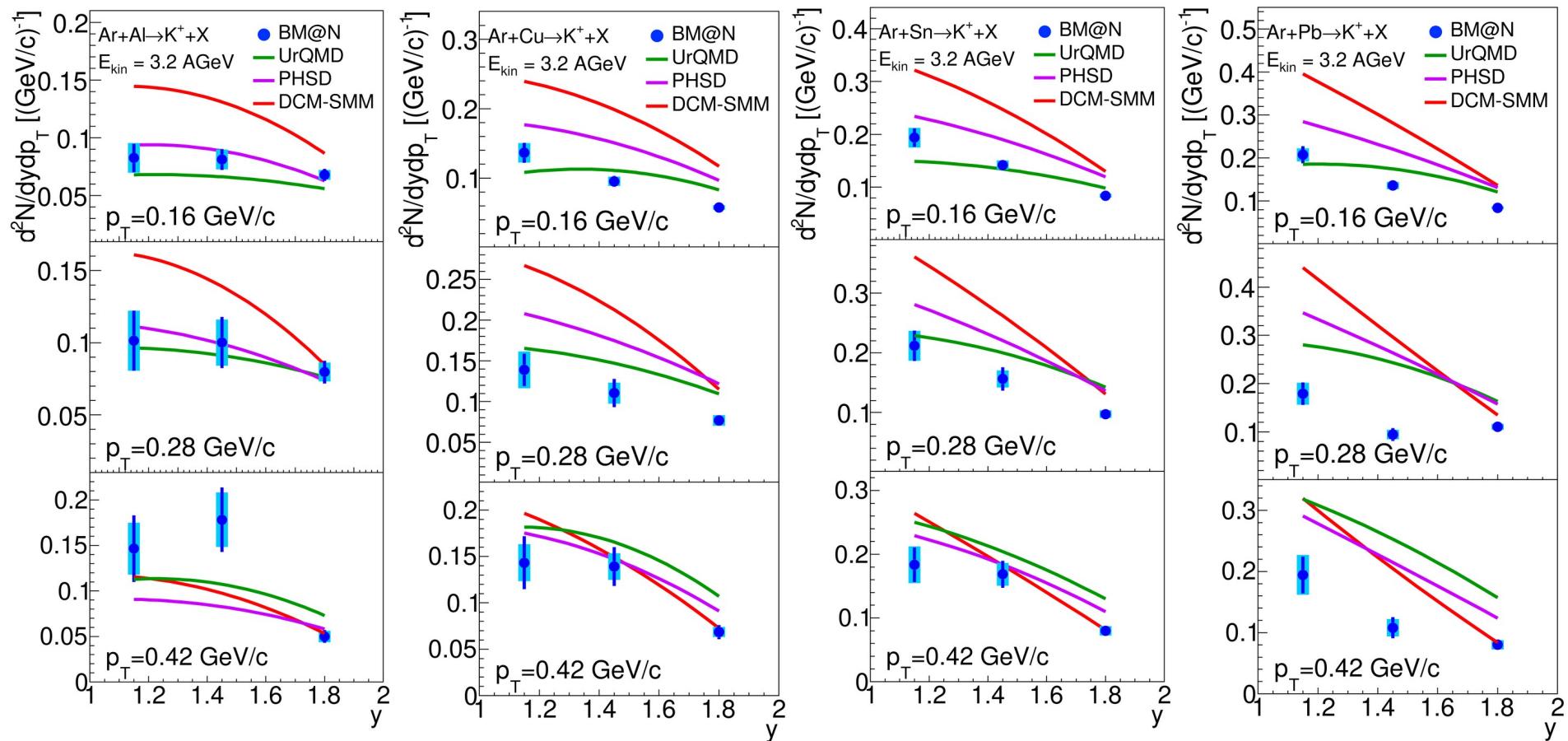


Спектры по y π^+ -мезонов



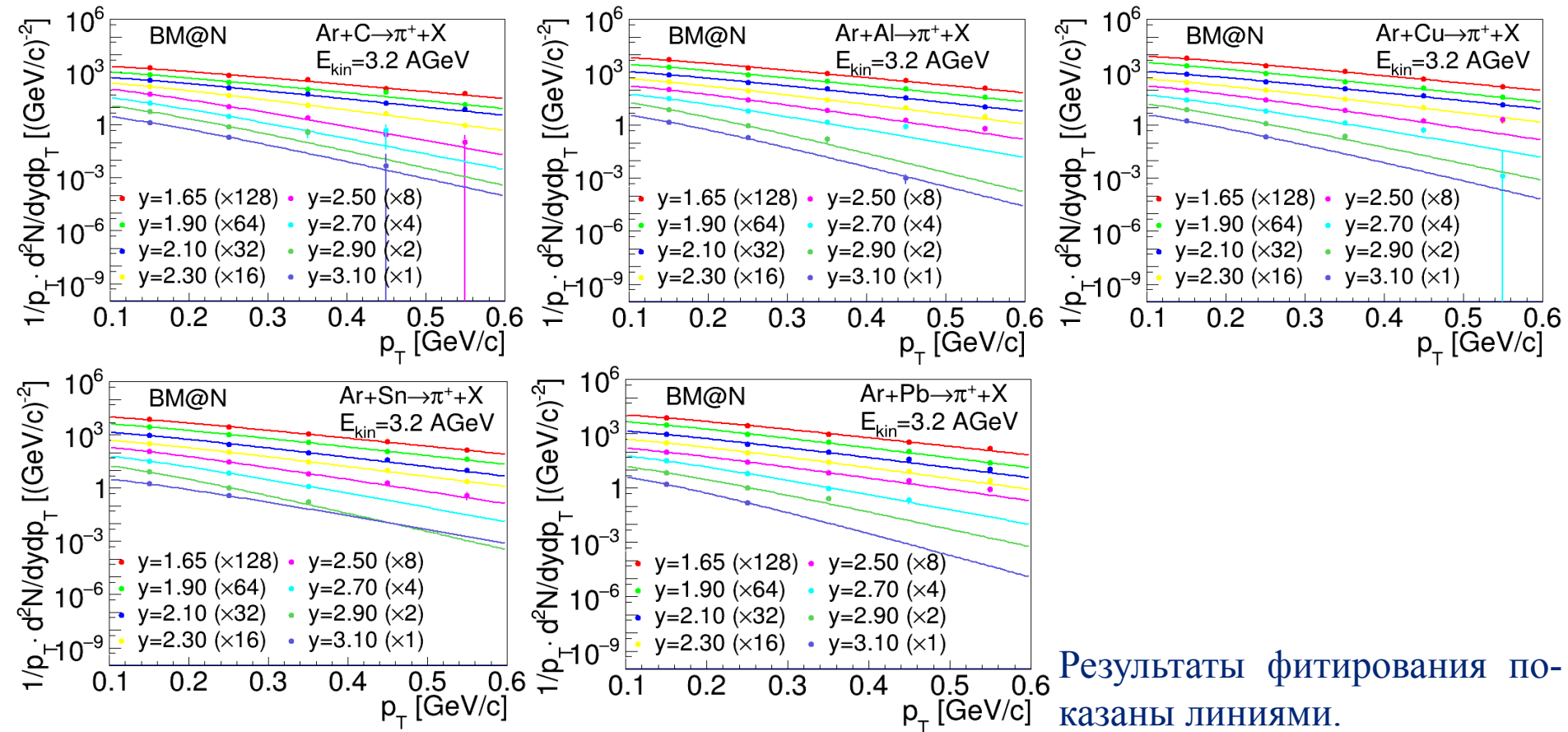
Усы представляют статистические погрешности, прямоугольники показывают систематические погрешности. Предсказания моделей DCM-SMM, UrQMD и PHSD показаны в виде красных, зелёных и фиолетовых линий.

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 π^+ -мезонов **BM@N**

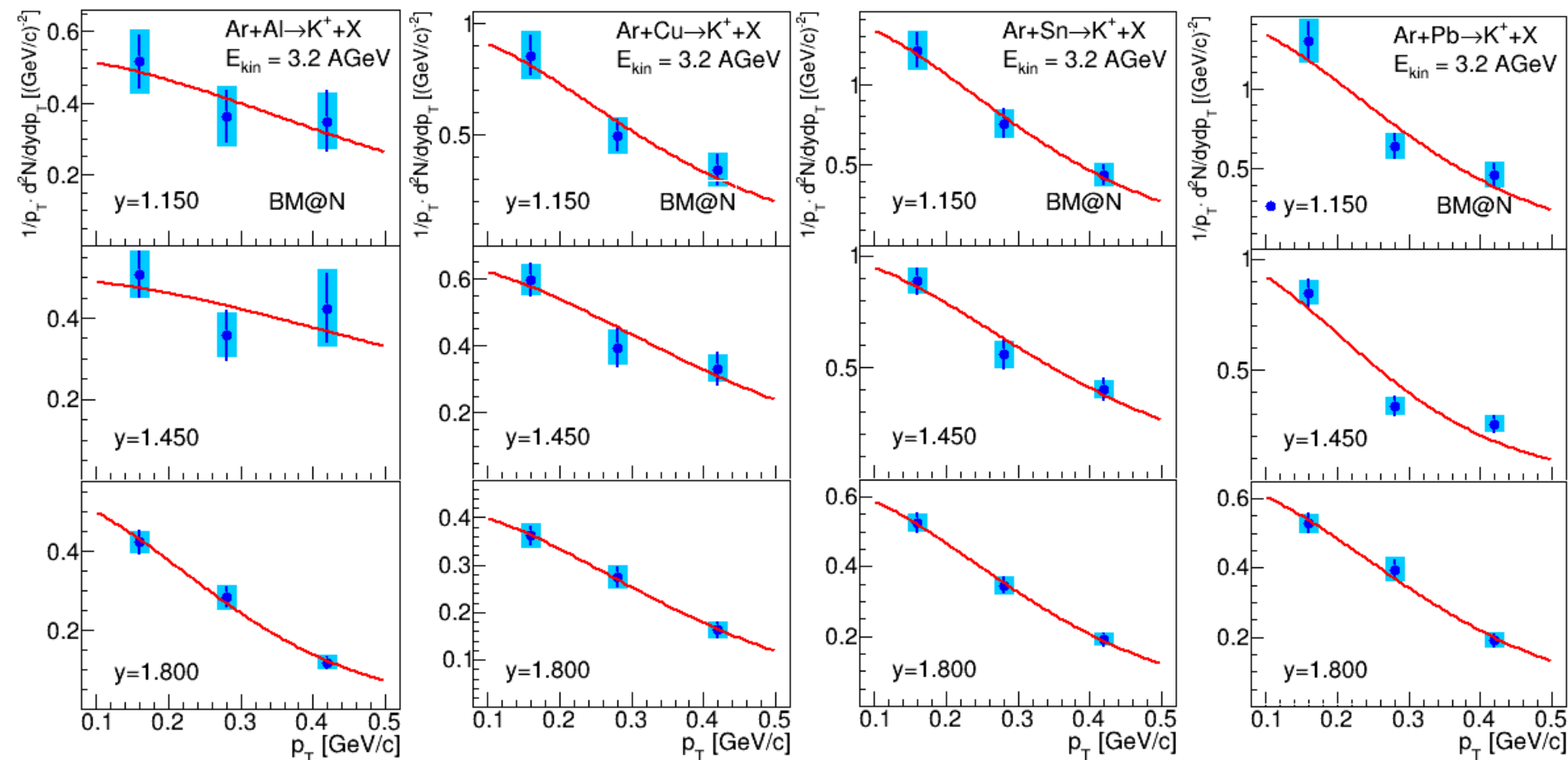


Результаты фитирования показаны линиями.

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

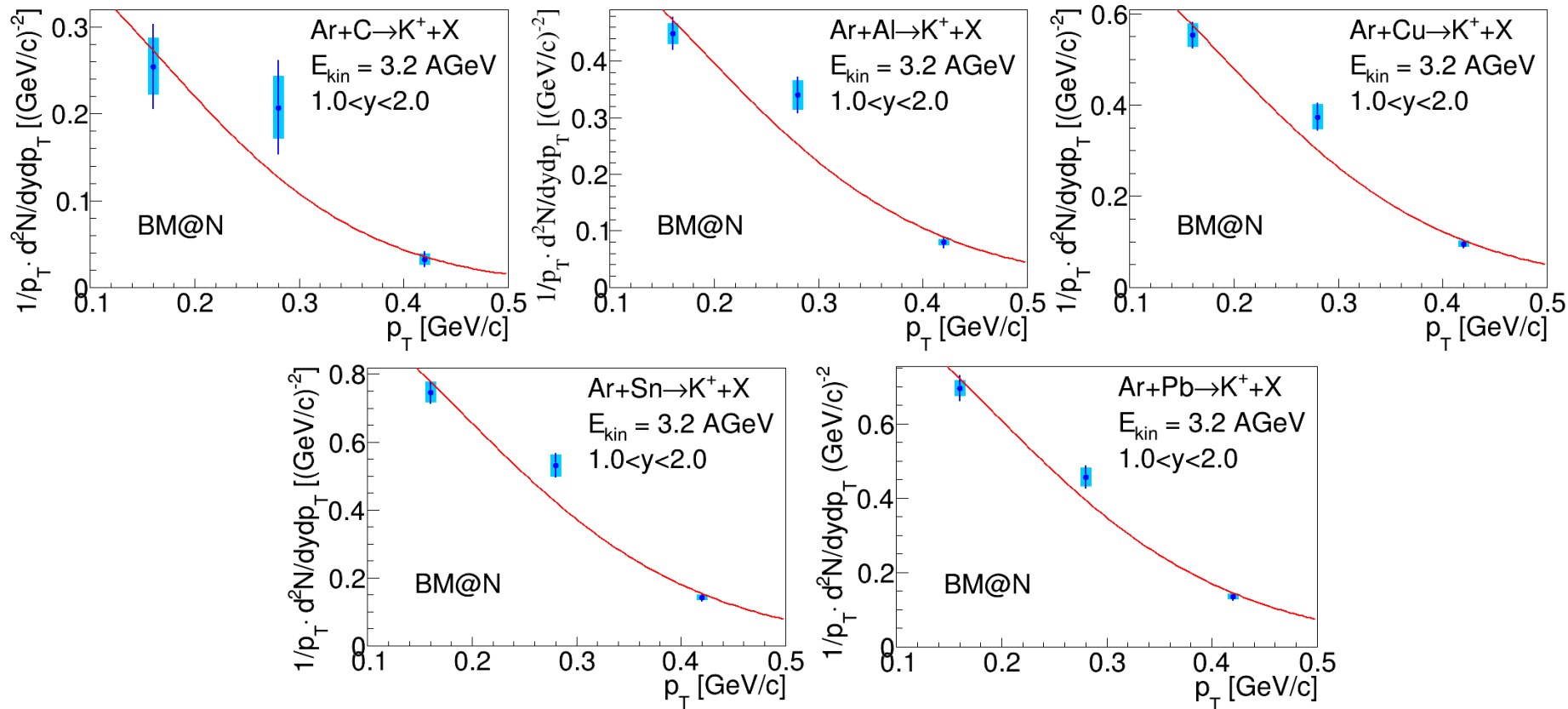
где $m_T = \sqrt{(m_{\pi,K}^2 + p_T^2)}$ – поперечная масса, C – нормировка (свободный параметр), T_0 – обратный наклон (свободный параметр), dy – ширина измеренного бина по y , dp_T – ширина измеренного бина по p_T .

Инвариантные p_T -спектры K^+ -мезонов



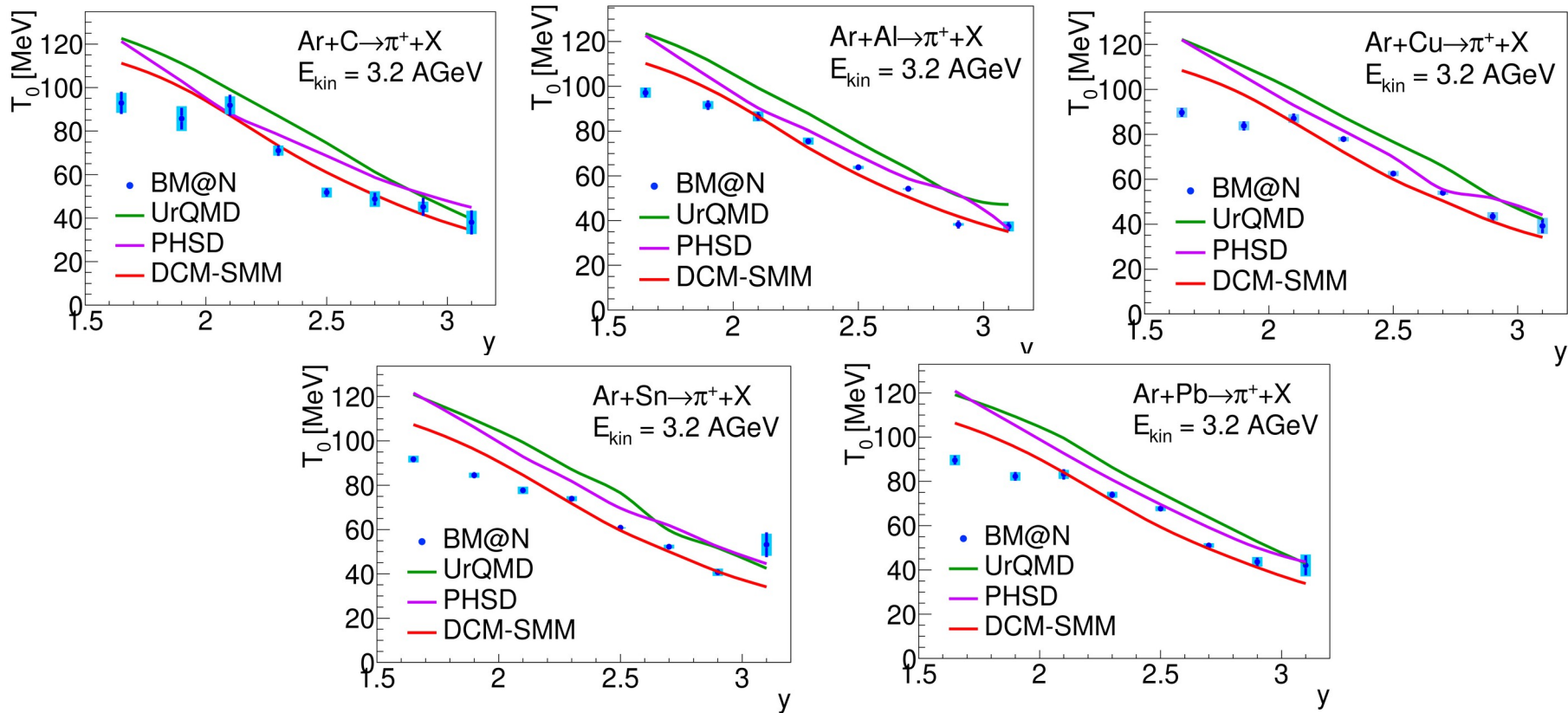
Усы представляют статистические погрешности, прямоугольники показывают систематические погрешности. Результаты фитирования показаны в виде красных кривых.

Инвариантные p_T -спектры K^+ -мезонов



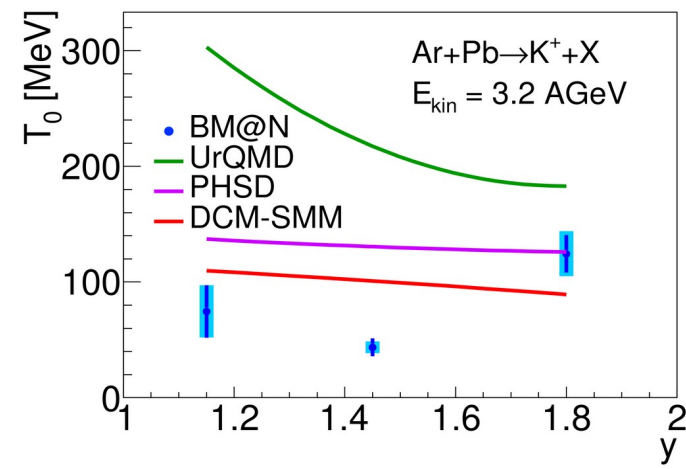
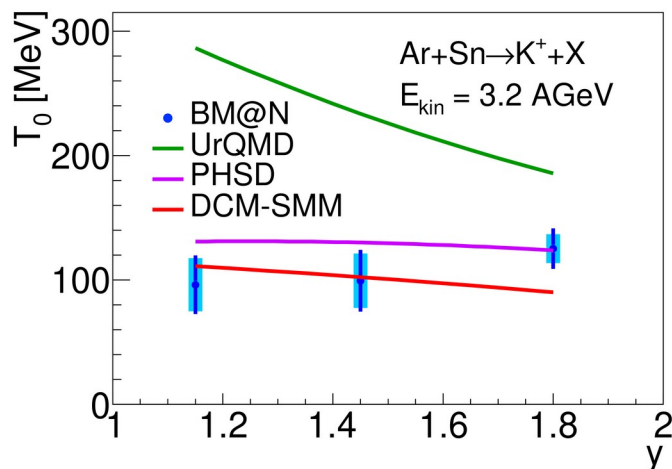
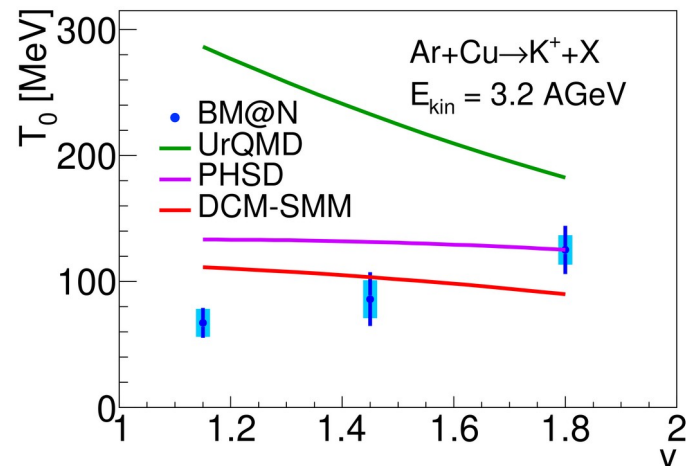
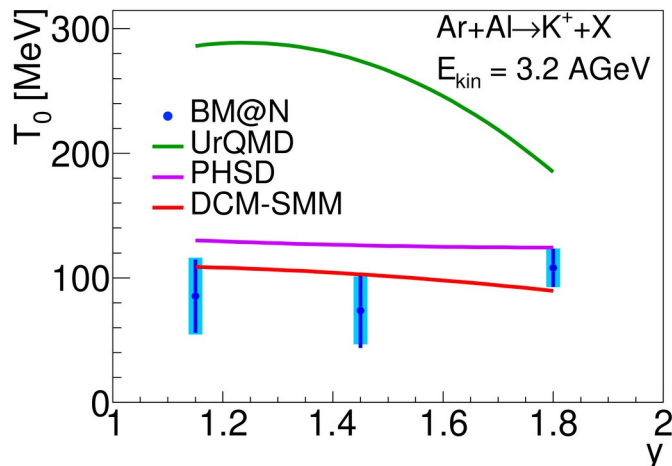
Измеренная область по быстроте. Результаты фитирования показаны в виде **красных** кривых.

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.

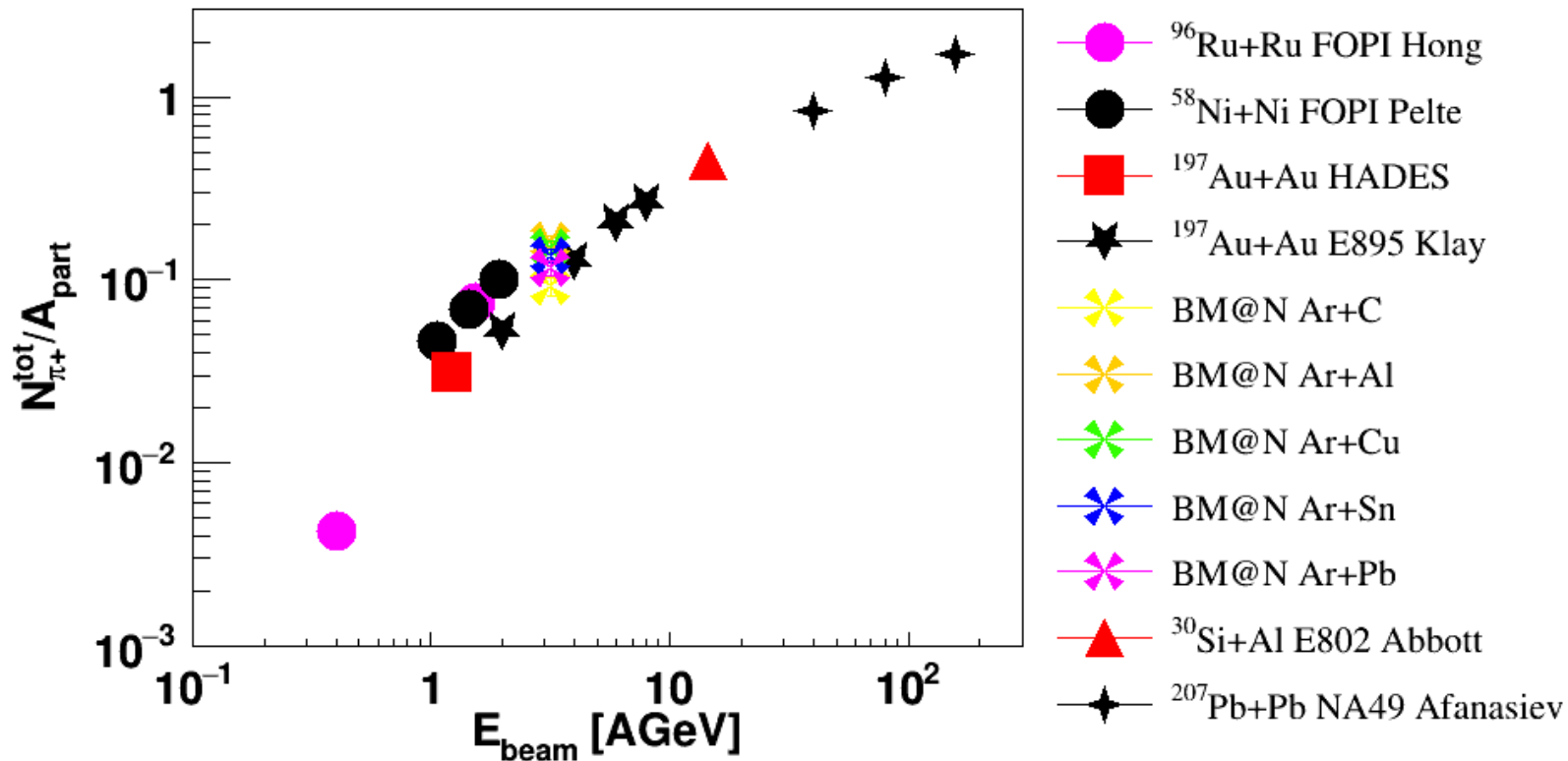
Обратные наклоны π^+ и K^+



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

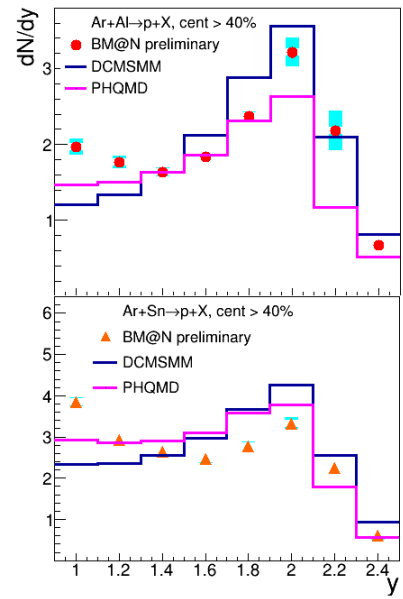
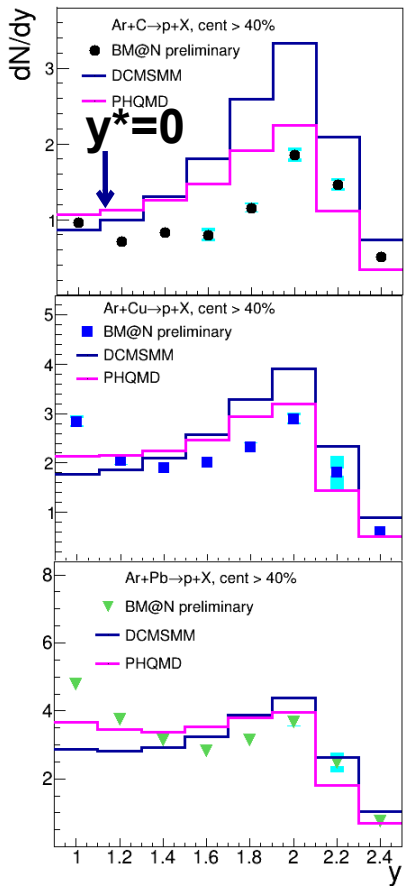
Взаимод. ядра / Кинет. энергия пучка / Эксперимент	T_{eff} at $y^* = 0$ (World), $y^* \approx 0.5$ (π^+ , BM@N), y^* in meas. range (K^+ , BM@N)
$Ar+KCl$, 1.76 АГэВ, HADES	$82.4 \pm 0.1^{+9.1}_{-4.6}$ (π^+ , $A_{part} = 38.5$) $89 \pm 1 \pm 2$ (K^+ , $A_{part} = 38.5$)
$Ni+Ni$, 1.93 АГэВ, FOPI	110.9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

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

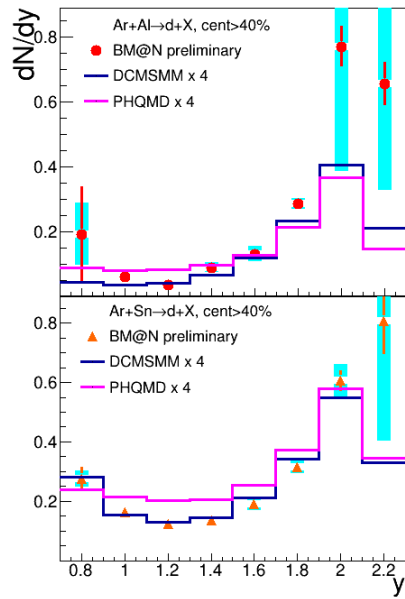
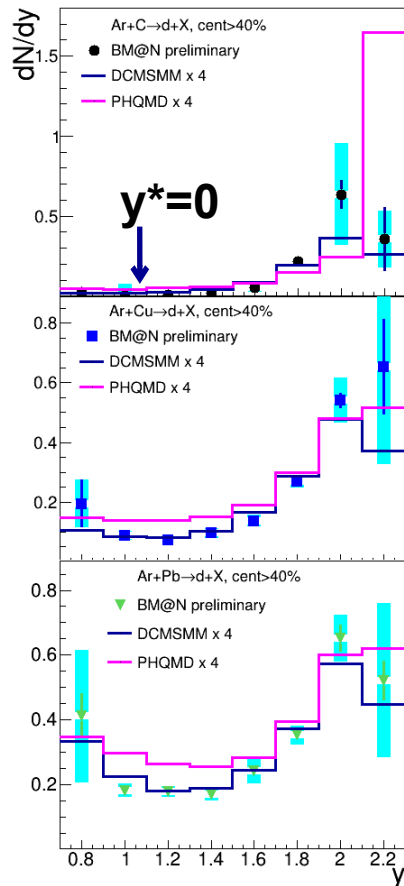


π^+ multiplicity per the mean number of nucleons-participants A_{part} shown as a function of the beam kinetic energy E_{beam} . The BM@N results are compared with the world measurements.

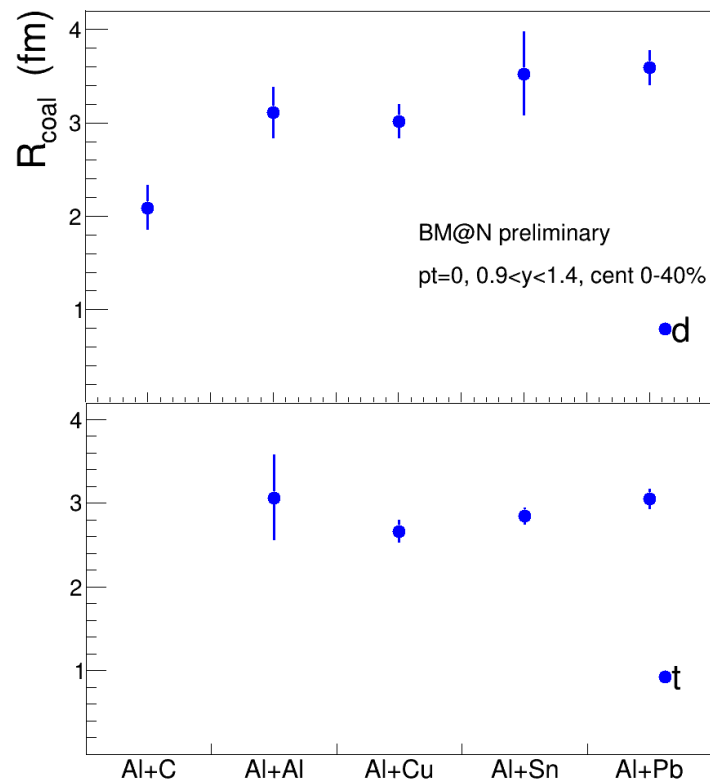
Образование p, d в аргон-ядерных взаимодействиях с энергией пучка 3.2 АГэВ



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



Центральность > 40%



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

