

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

научно-квалификационная работа аспиранта

# Анизотропные потоки протонов и заряженных пионов в столкновениях ядер свинца при энергиях CERN SPS.

Голосов Олег Владимирович

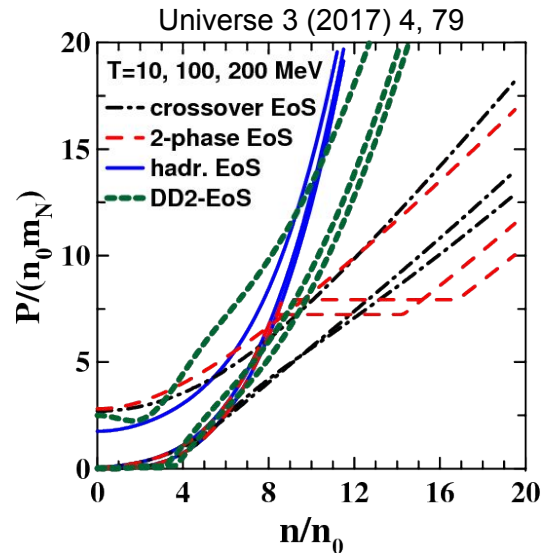
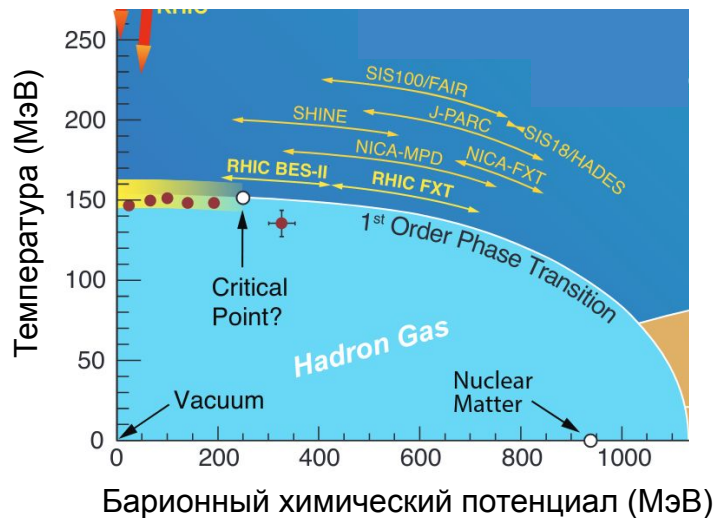
03.06.01 - Физика и астрономия

1.3.15 «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий»

Научный руководитель: к.ф-м.н., доцент, Блау Д.С.

22 июня 2023 г  
Москва

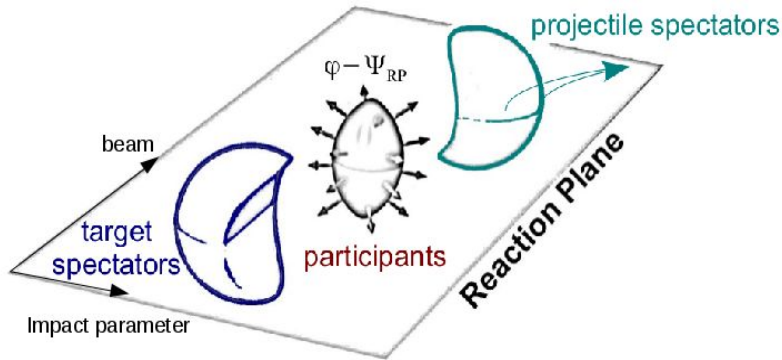
# Фазовая диаграмма сильно взаимодействующей материи



$\mu_B \sim 0$ : переход типа кроссовер (партонные и адронные состояния)

Критическая точка фазовой диаграммы - переход от фазового перехода типа кроссовер к фазовому переходу 1-го рода.

# Геометрия столкновения и коллективные потоки



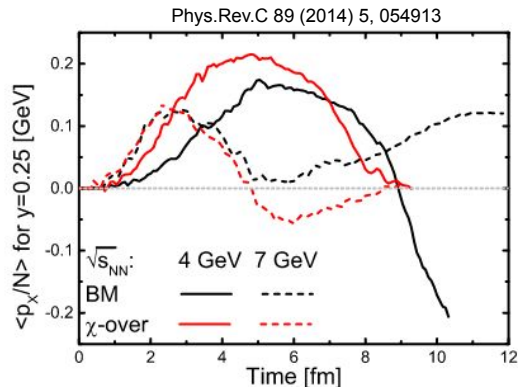
Азимутальная асимметрия в координатном пространстве в результате взаимодействия преобразуется в асимметрию импульсного пространства

$$\rho(\phi) = \frac{1}{2\pi} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos(n(\phi - \Psi_s)) \right]$$

$$v_n = \langle \cos(n[\phi - \Psi_s]) \rangle$$

$v_n = v_n(p_T, y, \text{центральность, тип адрона})$

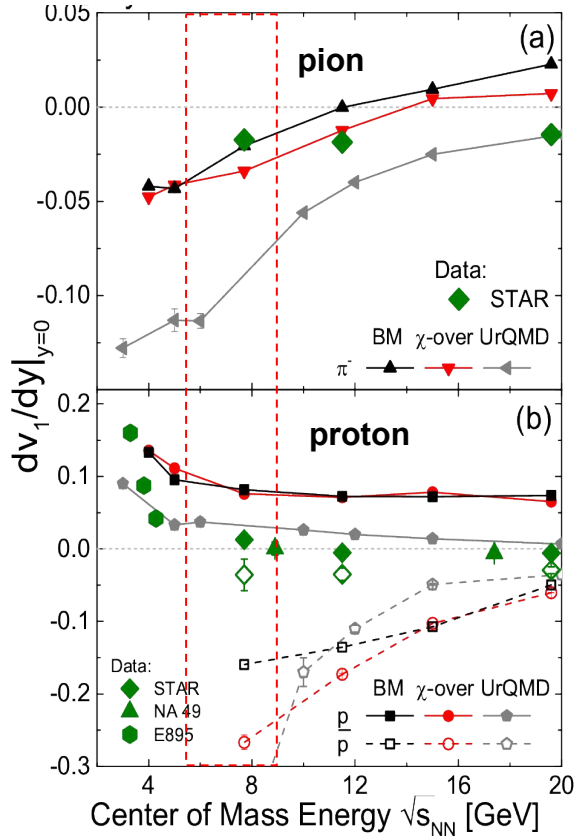
$\Psi_s$  - плоскость симметрии



Зависимость  $v_1$  от времени

# Направленный поток $v_1$

NA49+NA61/Shine



Phys.Rev.C 89 (2014) 5, 054913

- Чувствителен к:
  - параметрам уравнения состояния (в первую очередь несжимаемости)
  - условиям адронизации
  - характеру фазового перехода (возможно)
- При энергиях столкновения  $< 20$  ГэВ модели не воспроизводят зависимости  $v_1$  и требуют уточнения

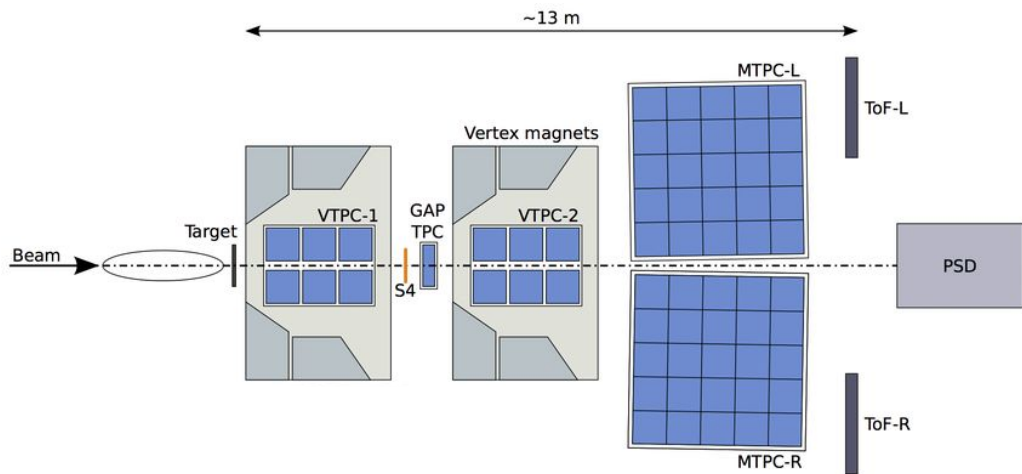
# Цель и задачи работы

**Цель:** измерение коллективных потоков протонов и заряженных пионов относительно плоскости симметрии спектаторов в столкновениях ядер свинца при импульсах пучка 13, 30 и 41А ГэВ/с для уточнения параметров уравнения состояния ядерной материи.

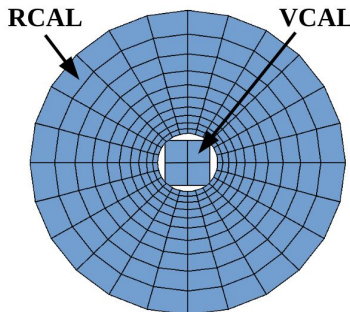
## **Задачи:**

1. Разработка метода измерения коллективных потоков в экспериментах на фиксированной мишени относительно плоскости симметрии, определённой направлением отклонения спектаторов, в столкновениях тяжелых ядер при импульсах пучка 13–41А ГэВ/с на основе моделирования отклика детектора CBM на продукты столкновений ядер золота и данных экспериментов NA49 и NA61/SHINE;
2. Измерение направленного потока протонов и заряженных пионов относительно плоскости симметрии, определённой направлением отклонения спектаторов, в зависимости от поперечного импульса, быстроты и центральности в столкновениях ядер свинца при импульсах пучка 13, 30 и 41А ГэВ/с ;
3. Оценка влияния спектаторов налетающего ядра на формирование направленного потока пионов в зависимости от их заряда в области быстрот, близких к скорости пучка;
4. Проведение модельных расчетов для столкновений ядер свинца с импульсом пучка 13, 30 и 41А ГэВ/с с целью сравнения с результатами измерений.

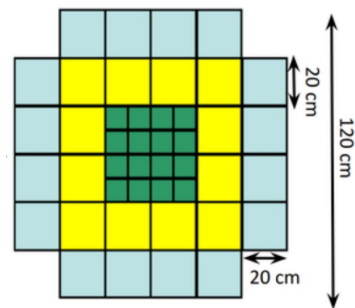
# Эксперименты NA49 и NA61/SHINE



Поперечная плоскость



VCAL+RCAL (NA49)

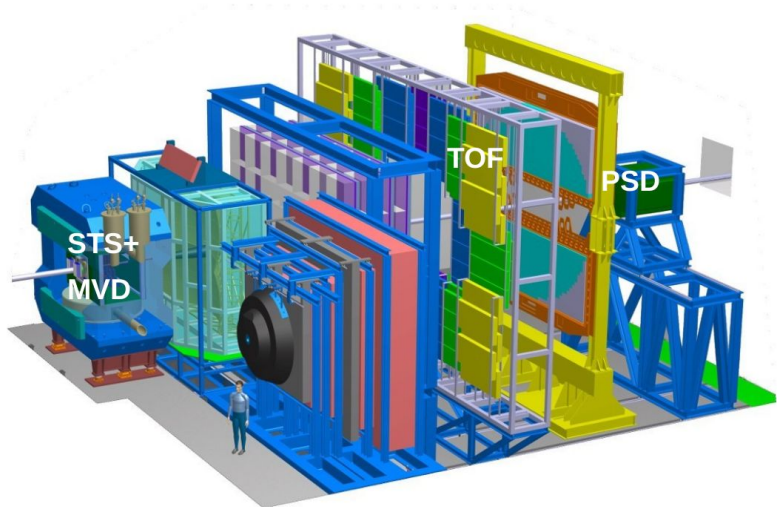


PSD (NA61/SHINE)

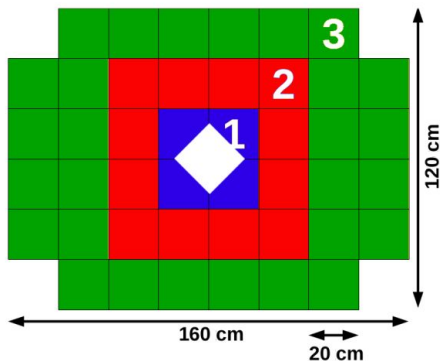
- 4 большие время-проекционные камеры (TPC)
- Дипольное магнитное поле (VTPC1/2)
- Идентификация частиц с помощью ионизационных потерь
- Передние адронные калориметры (центральность и плоскость симметрии спектров пучка)

Работа на пучке с импульсом 13-150 ГэВ/с.  
 В данной работе Pb+Pb @ 13A, 30A и 41A ГэВ/с  
 ( $\sqrt{s_{NN}} = 5.1, 7.6$  и  $8.9$  ГэВ).

# Эксперимент CBM



- 4 станции микро-вершинного детектора MVD + 8 станций силиконовой трековой системы STS
- Дипольное магнитное поле
- Время-пролетная стенка TOF
- Передний адронный калориметр (центральность и плоскость симметрии спектаторов пучка)



PSD (поперечная плоскость)

Работа на пучке с импульсом 3.3-12 ГэВ/с.  
В данной работе Au+Au @ 12A ГэВ/с  
( $\sqrt{s_{NN}} = 4.9$  ГэВ).

# Вычисление $v_1$ методом скалярного произведения

$u_n$ -вектор из треков

$$u_n = (u_x, u_y) = (\cos n\phi, \sin n\phi)$$

$\phi$  - азимутальный угол импульса частицы

**Направленный поток:**

$$v_{1,i} = \frac{2 \langle u_{1,i} Q_{1,i}^A \rangle}{R_{1,i}^A} \quad i=x,y; j=\text{PSD1, PSD2, PSD3 (6 независимых комбинаций)}$$

$R_1^A$  – поправка на разрешение плоскости симметрии

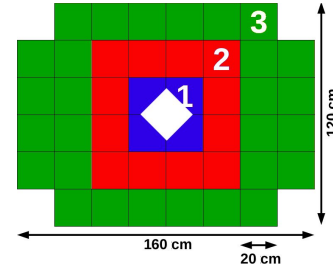
$Q_1$ -вектор из PSD

$$Q_{1,i}^A = \frac{1}{E_A} \sum_{j=1}^{N_A} E_j u_{1,i}^j \quad i = [x, y]$$

A – индекс подсобытия PSD

$E_j$  - энергия в модуле j,

$u_{1,i}^j$  - единичный вектор, указывающий в центр модуля j





# Поправка на разрешение плоскости симметрии

Метод трёх подсобытий

$$R_{i,A}[B,C] = \sqrt{2 \frac{\langle Q_{i,A} Q_{i,B} \rangle \langle Q_{i,A} Q_{i,C} \rangle}{\langle Q_{i,B} Q_{i,C} \rangle}}$$

Сигналы в соседних подсобытиях дополнительно скоррелированы вследствие распространения адронного ливня между соседними модулями.

Метод четырёх подсобытий предложен с целью исключить корреляции соседних подсобытий  $\langle Q_{1,i}^{\text{PSD1}}, Q_{1,i}^{\text{PSD2}} \rangle$  и  $\langle Q_{1,i}^{\text{PSD2}}, Q_{1,i}^{\text{PSD3}} \rangle$ .

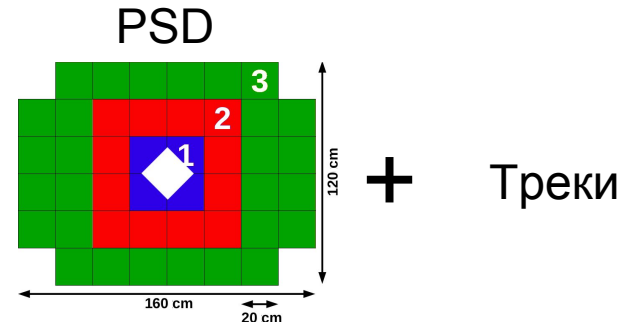
Метод четырёх подсобытий

$$R_{P1} = \langle Q_{P1} Q_{P3} \rangle R_T / \langle Q_T Q_{P3} \rangle$$

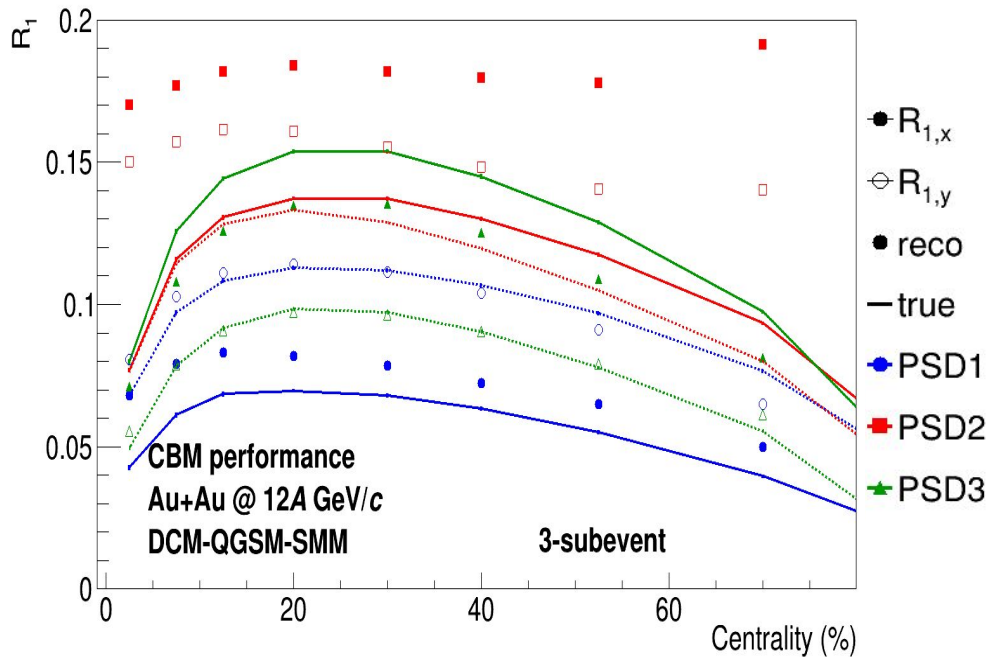
$$R_{P2} = \langle Q_{P2} Q_T \rangle / R_T$$

$$R_{P3} = \langle Q_{P3} Q_{P1} \rangle R_T / \langle Q_T Q_{P3} \rangle$$

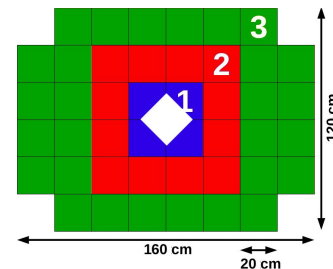
$$R_T[Q_{P1}, Q_{P3}] = \sqrt{2 \frac{\langle Q_T Q_{P1} \rangle \langle Q_T Q_{P3} \rangle}{\langle Q_{P3} Q_{P1} \rangle}}$$



# Метод трёх подсобытий



3 подсобытия из PSD

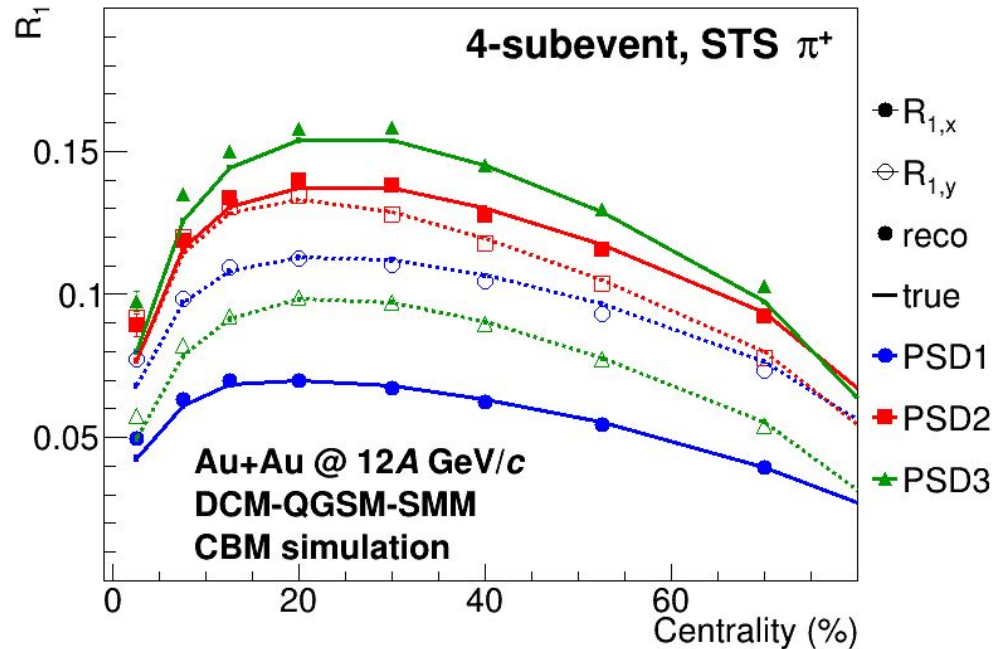


$$R_{1,x}^{A,true} = \langle \cos \Psi_{RP} Q_{1,x}^A \rangle$$

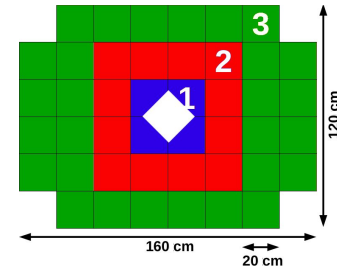
$$R_{1,y}^{A,true} = \langle \sin \Psi_{RP} Q_{1,y}^A \rangle$$

- Расхождение между истинными и реконструированными значениями
- Особенно выражено для PSD2 - две корреляции между соседними подсобытиями в числителе выражения для разрешения

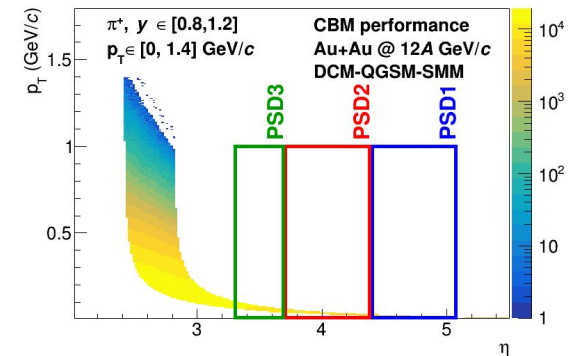
# Метод четырёх подсобытий



3 подсобытия из PSD



4-е подсобытие из треков  
положительно заряженных пионов

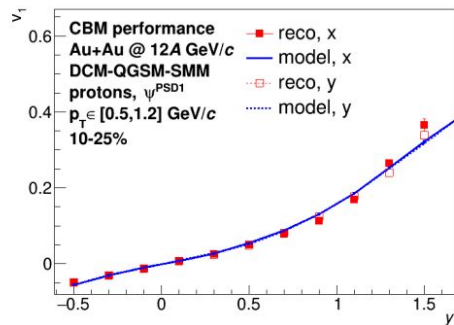


- Согласие между истинными и реконструированными значениями
- Расхождение при малых центральностях вследствие более низкого направленного потока пионов

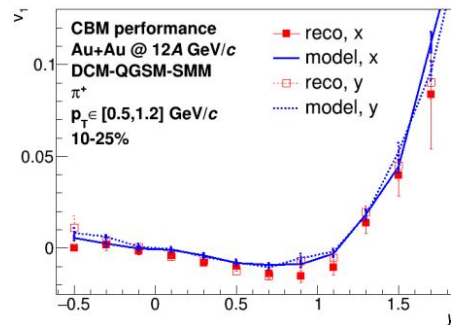
# Вычисление $v_1$ протонов и заряженных пионов

Вариация  
 $Q_x - Q_y$

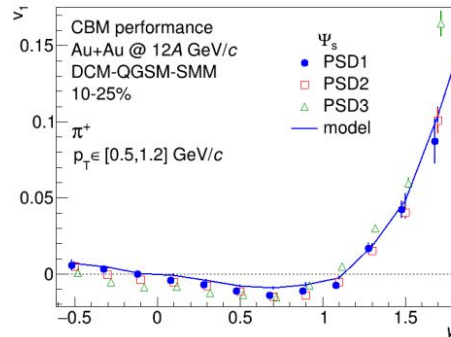
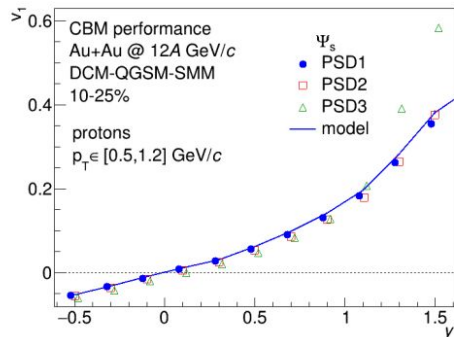
протоны



$\pi^+$

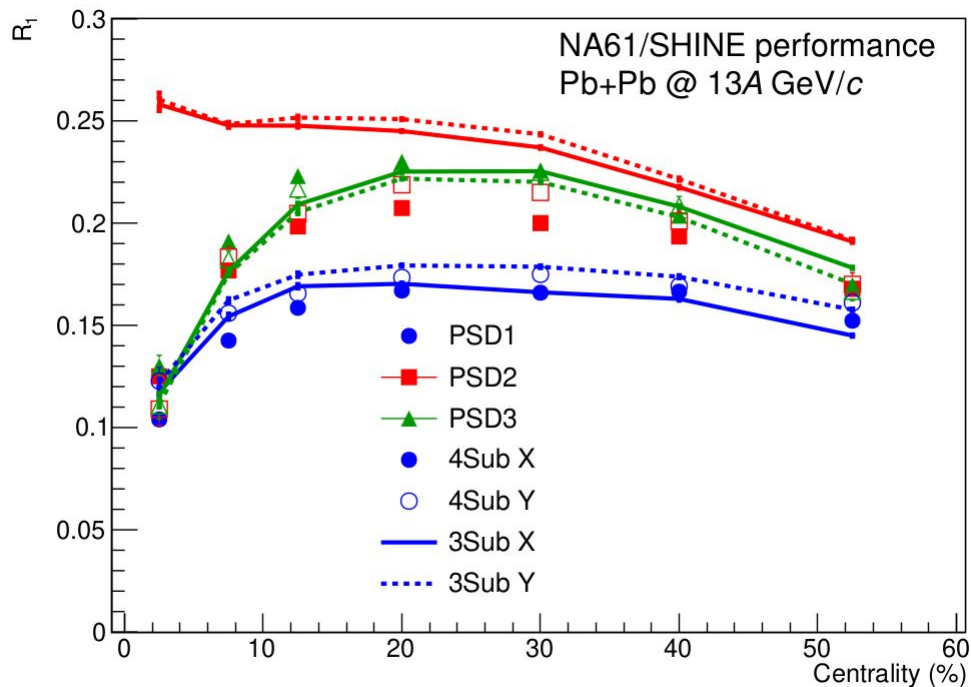


Вариация  
PSD1-PSD2-PSD3



- Согласие между смоделированными и вычисленными значениями для  $Q_x$  и  $Q_y$
- Расхождение для вычислений  $v_1$  относительно PSD3 при больших быстротах

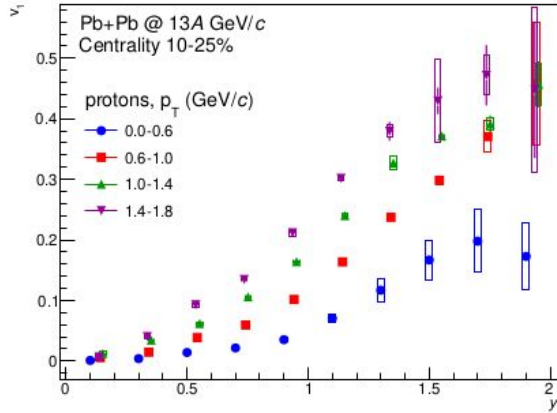
# Применение метода четырех подсобытий в данных



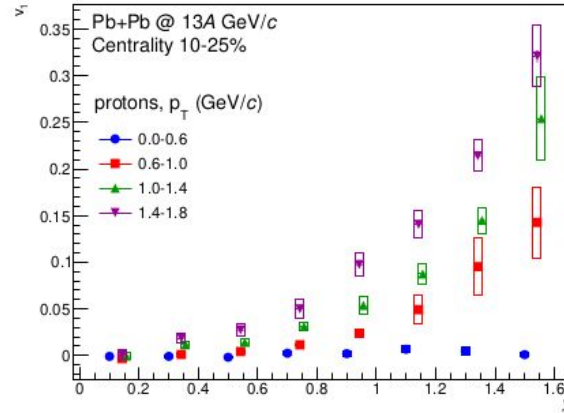
- подавление непотоковых корреляций, наиболее выраженное для PSD2

# Направленный поток $v_1(y)$ протонов в интервалах по $p_T$

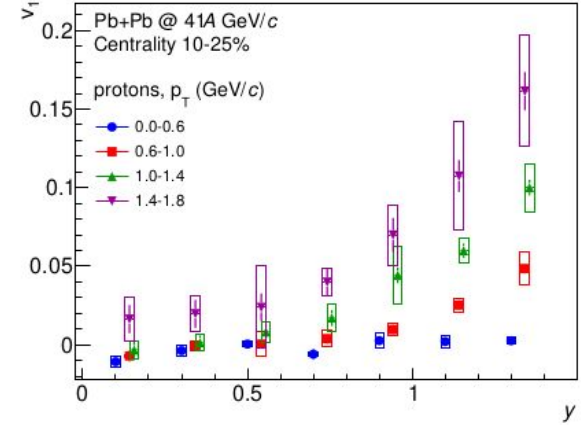
13A ГэВ



30A ГэВ



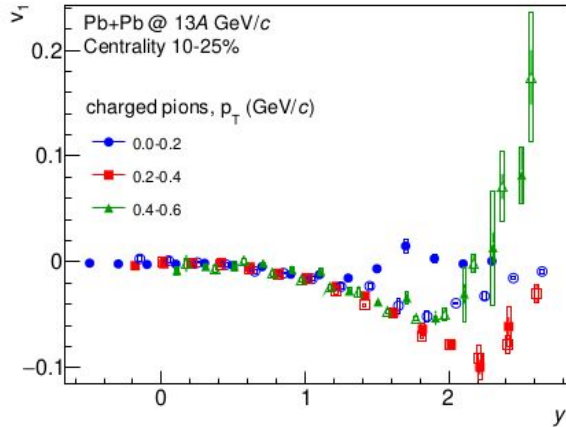
41A ГэВ



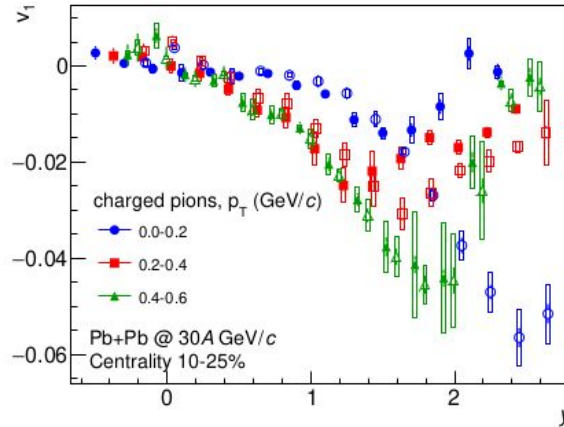
Наклон в окрестности нулевой быстроты положительный, уменьшается с ростом энергии - более жесткое уравнение состояния?

# Зарядовая зависимость $v_1(y)$ для пионов в интервалах $p_T$

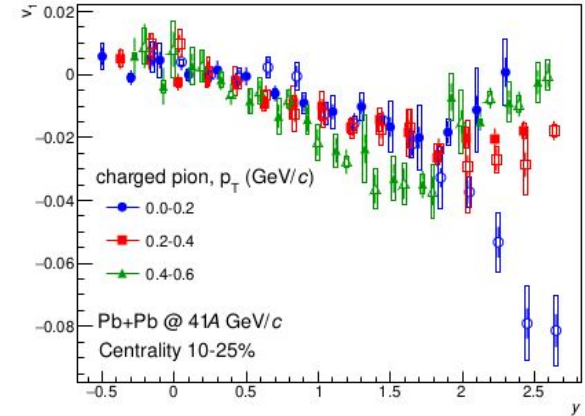
13A ГэВ



30A ГэВ

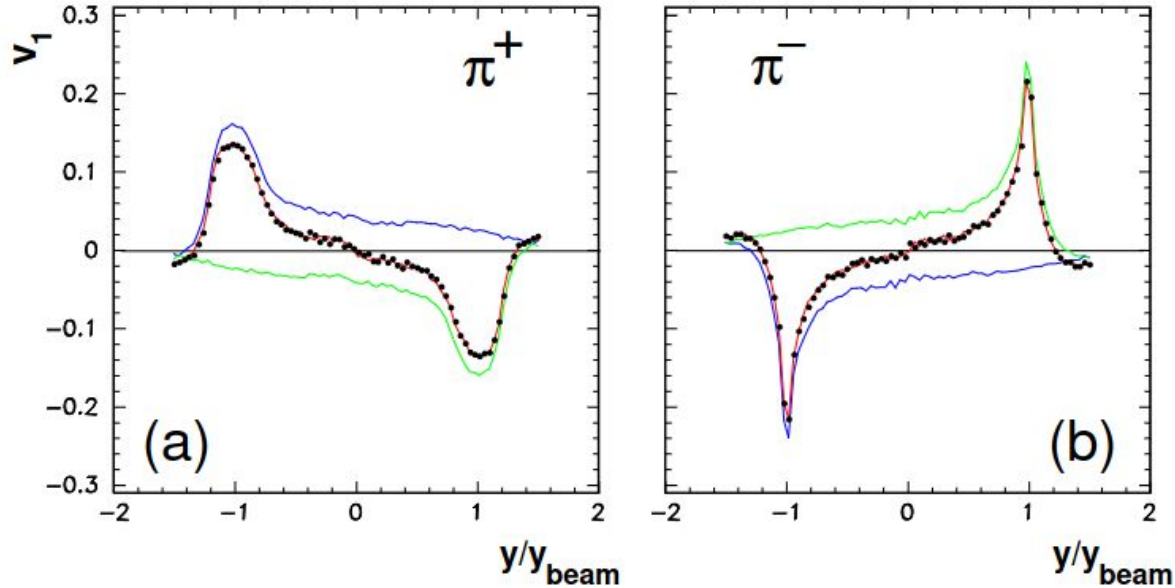


41A ГэВ



- Расщепление в области больших быстрот и малых поперечных импульсов - кулоновское взаимодействие со зрителями столкновения?
- С ростом энергии от 5.1 до 8.9 ГэВ эффект не исчезает

# Зарядовая зависимость $v_1(y)$ для пионов в интервалах $p_T$

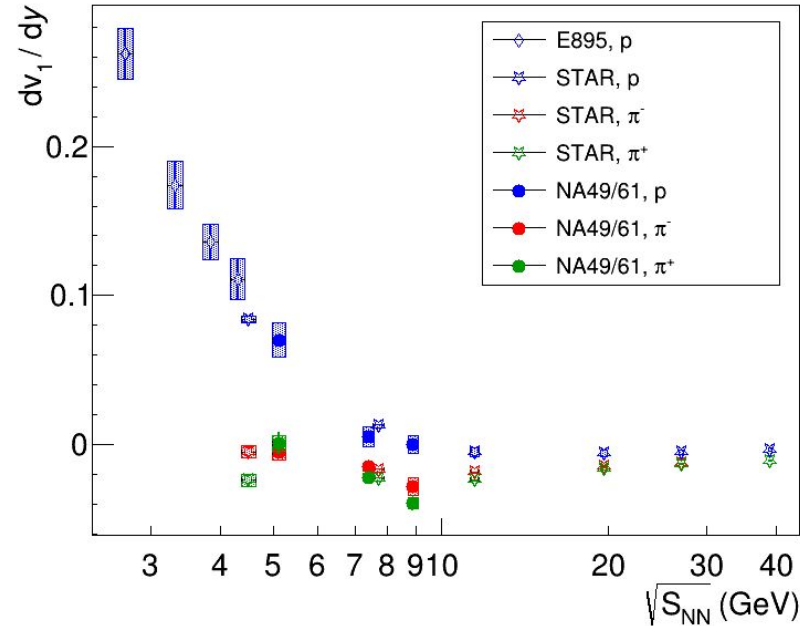


Эффект предсказан для энергий SPS (*Phys.Rev.C* 87 (2013) 5, 054909).

Зеленые и синие линии - вклад от спектаторов налетающего ядра и мишени, соответственно.



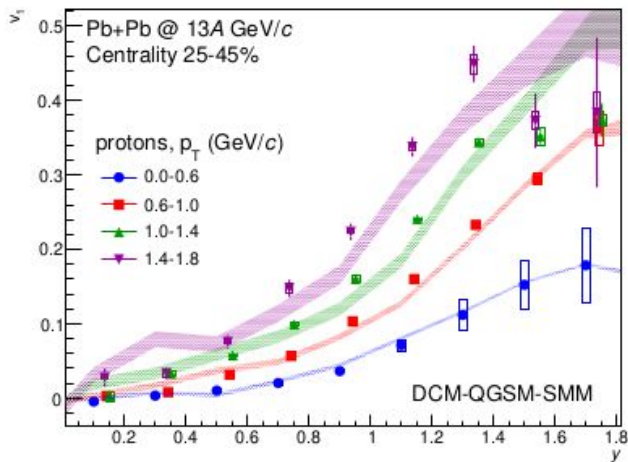
# Зависимость $dv_1/du$ от энергии столкновения



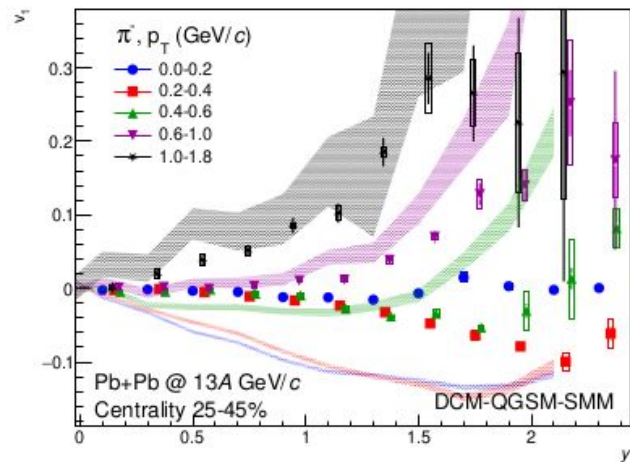
- Новые измерения при  $\sqrt{S_{NN}}=5.1$  и  $8.9$  ГэВ (импульсы пучка 13А и 41А ГэВ/с)
- Согласие с имеющимися измерениями для протонов
- Расхождение с измерениями STAR для заряженных пионов при  $\sqrt{S_{NN}} \sim 5$  ГэВ

# Сравнение с моделью DCM-QGSM-SMM (13A ГэВ/с)

протоны



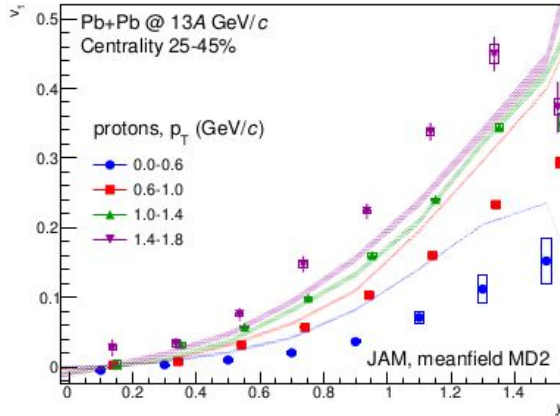
$\pi^-$



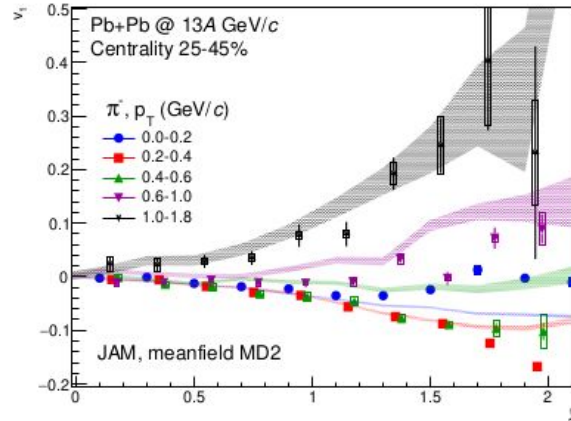
- хорошее согласие с  $v_1$  протонов
- расхождение с  $v_1$  пионов при умеренных  $p_T$

# Сравнение с моделью JAM, MD2 EoS (13A ГэВ/с)

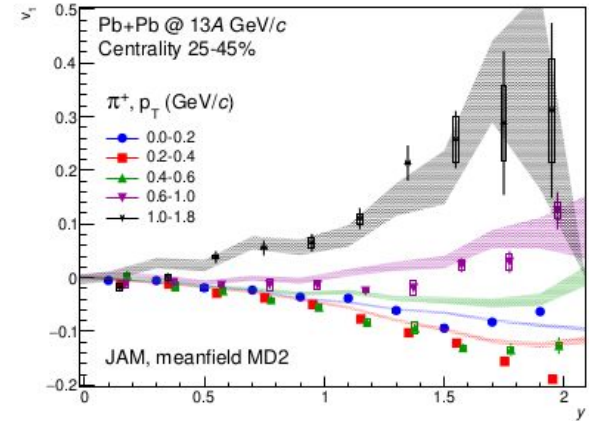
протоны



$\pi^-$



$\pi^+$



- умеренное согласие с  $v_1$  протонов и заряженных пионов
- требуется доработка моделей с использованием дифференциальных измерений
- расщепление  $v_1$  пионов по заряду не наблюдается

# Заключение

- Предложен новый метод вычисления поправки на разрешение плоскости симметрии столкновения по азимутальному углу при использовании неразделенных по псевдобыстроте подсобытий.
- Впервые получены зависимости направленного потока протонов и заряженных пионов от поперечного импульса, быстроты и центральности в столкновениях ядер свинца при импульсах пучка 13, 30 и 41А ГэВ/с.
- Впервые для ядерных столкновений в диапазоне  $\sqrt{s_{NN}} = 5.1 - 8.9$  ГэВ показано влияние спектаторов налетающего ядра на формирование направленного потока пионов в зависимости от их заряда в области быстрот, близких к быстрой пучка, и низкого поперечного импульса.

# Положения, выносимые на защиту

- Метод вычисления поправки на разрешение по азимутальному углу для плоскости симметрии столкновения ядер в случае неразделенных по псевдобыстроте подсобытий.
- Измеренные зависимости направленного потока протонов и заряженных пионов от поперечного импульса, быстроты и центральности в столкновениях ядер свинца при импульсах пучка 13, 30 и 41А ГэВ/с.
- Спектаторы играют важную роль в формировании направленного потока пионов в зависимости от их заряда в области быстрот, близких к скорости пучка, и низких поперечных импульсов в диапазоне энергии столкновений  $\sqrt{s_{NN}} = 5.1 - 8.9$  ГэВ.

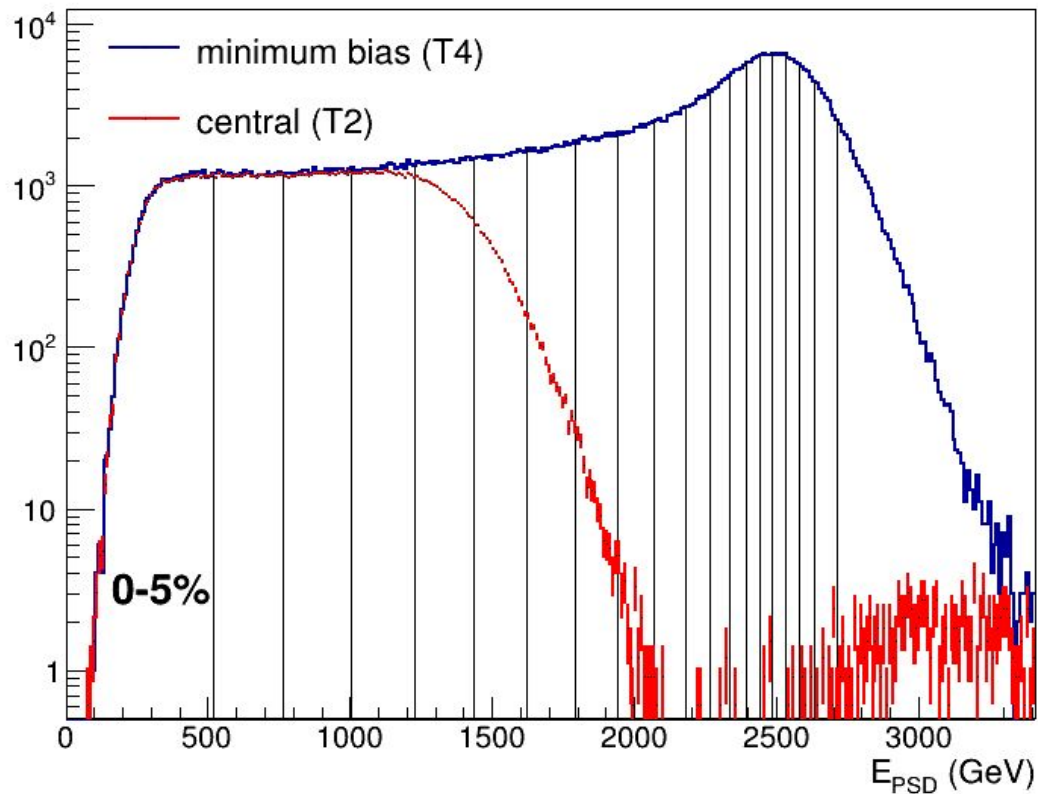
# Список публикаций

1. O. Golosov [и др.] Performance for proton anisotropic flow measurement of the CBM experiment at FAIR / O. Golosov [и др.] // J. Phys. Conf. Ser. Т. 1690. — 12.2020. — С. 012104. **(Scopus)**
2. O. Golosov [и др.] Physics Performance Studies for Anisotropic Flow Measurements with the CBM Experiment at FAIR // Phys. Part. Nucl. — 2020. — Май. — Т. 51, № 3. — С. 297—300. **(БАК, Scopus)**
3. O. Golosov [и др.] Physics Performance Studies for Anisotropic Flow Measurements with the CBM Experiment at FAIR / O. Golosov [и др.] // Phys. Part. Nucl. — 2020. — Т. 51, № 3. — С. 297—300. **(БАК, Scopus)**
4. O. Golosov [и др.] Data-Driven Methods for Spectator Symmetry Plane Estimation in CBM Experiment at FAIR // Particles. — 2021. — Т. 4, № 3. — С. 354—360. **(Scopus)**
5. O. Golosov [и др.] CBM Performance for Multi-Differential Measurements of Proton and Charged Kaon Directed Flow // Phys. Part. Nucl. — 2022. — Т. 53, № 2. — С. 207—211. **(БАК, Scopus)**
6. O. Golosov [и др.] Analysis of anisotropic transverse flow in Pb-Pb collisions at 40A GeV in the NA49 experiment // KnE Energy. — 2017. — Дек. — Т. 3, № 1. — С. 340.
7. O. Golosov [и др.] Effects of the detector non-uniformity in pion directed flow measurement relative to the spectator plane by the NA49 experiment at the CERN SPS / O. Golosov [и др.] // EPJ Web Conf. — 2018. — Ноябрь. — Т. 204. — С. 06011. **(Scopus)**
8. O. Golosov [и др.] Anisotropic flow measured in Pb-Pb collisions with the NA49 and NA61/SHINE experiments at CERN SPS // J. Phys. Conf. Ser. — 2019. — Т. 1390, № 1. — С. 012014. **(Scopus)**
9. O. Golosov [и др.] Directed flow measurement in Pb+Pb collisions at  $P_{lab} = 13A$  GeV/c collected with NA61/SHINE at SPS // J. Phys. Conf. Ser. — 2020. — Т. 1690, № 1. — С. 012127. **(Scopus)**

# Запасные слайды

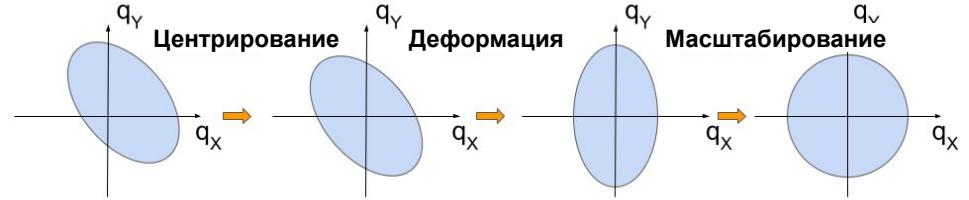
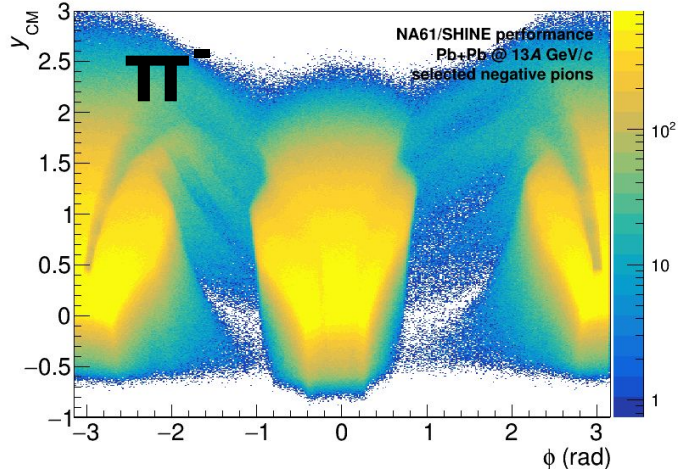
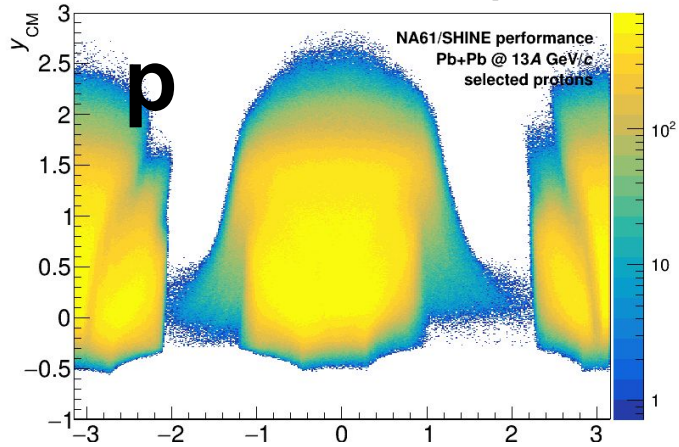
# Centrality determination

NA61/SHINE performance  
Pb+Pb @ 13A GeV/c





# Неоднородность азимутального акцептанса



Метод коррекции описан в

I. Selyuzhenkov and S. Voloshin [PRC77 034904 (2008)]

**Для Q-векторов из TPC:** центрирование, деформация, масштабирование дифференциально по  $p_T$ ,  $y$ , центральности

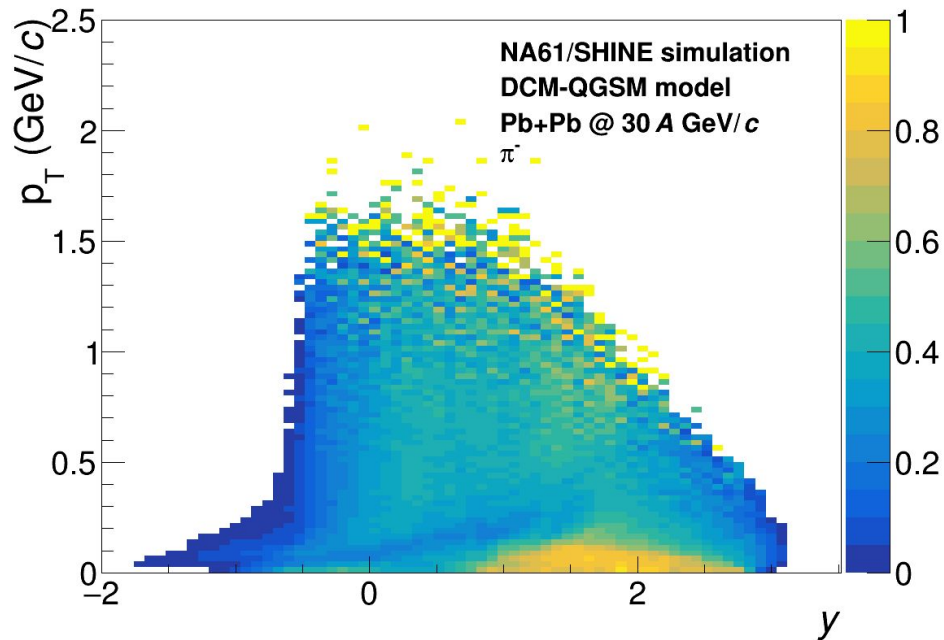
**Для Q-векторов из PSD:** центрирование дифференциально по центральности

# Неоднородность акцептанса [ $p_T$ , $y$ ] (Monte-Carlo)

- Монте-карло моделирование отклика с помощью GEANT4 и генератора столкновений DCM-QGSM-SMM

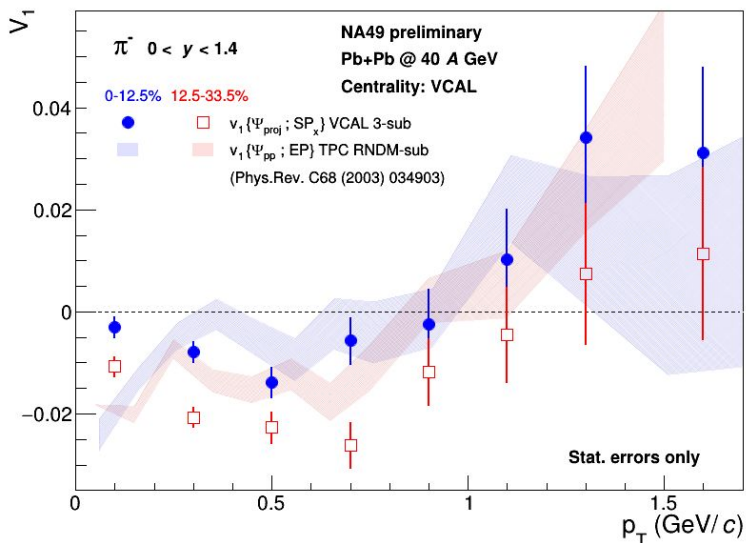
- Весовые множители в Q-вектора:

$$w_i = N^{\text{reco}} / N^{\text{MC}}(p_T, y, \text{множественность})$$

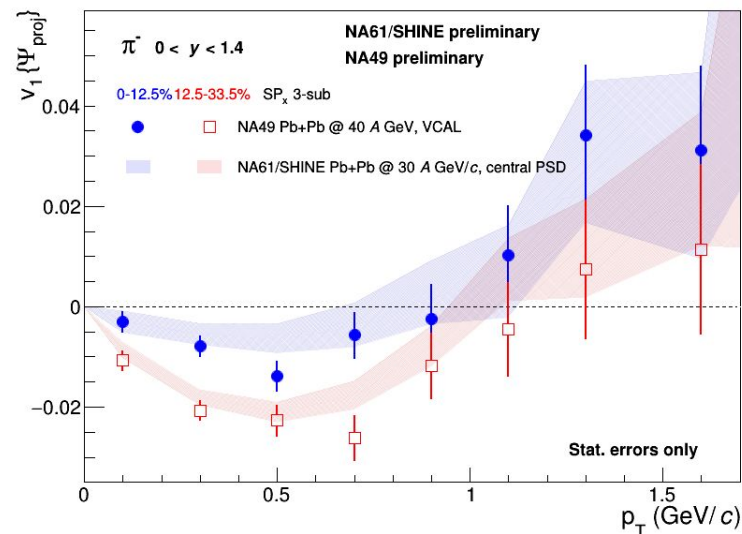


# Comparison with NA49: published and new VCAL analysis

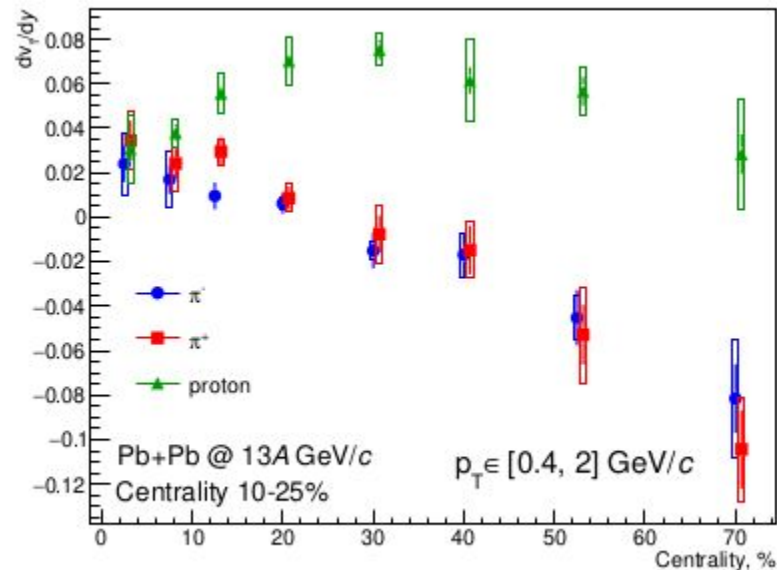
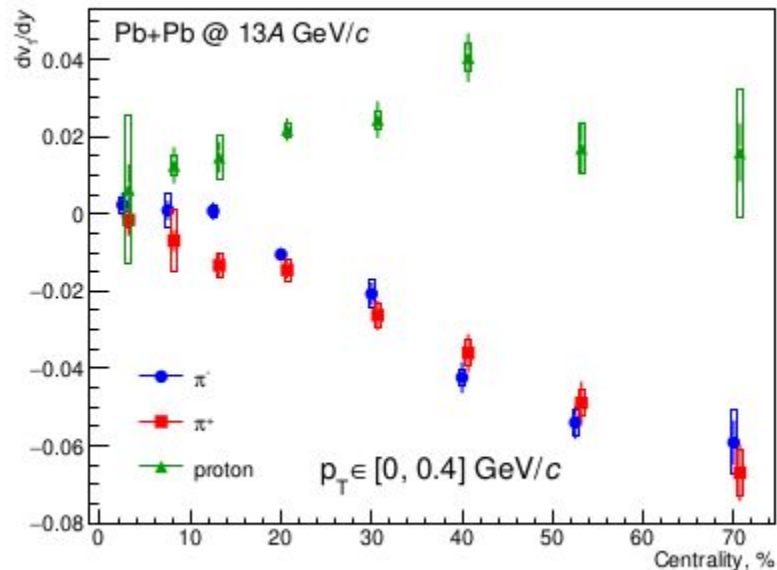
NA49 [TPC:cumulants] vs NA49 [VCAL:spectators]



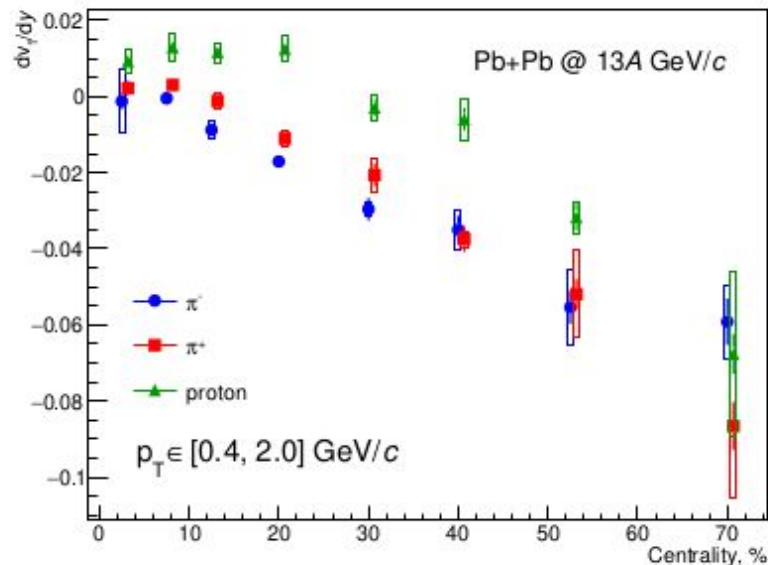
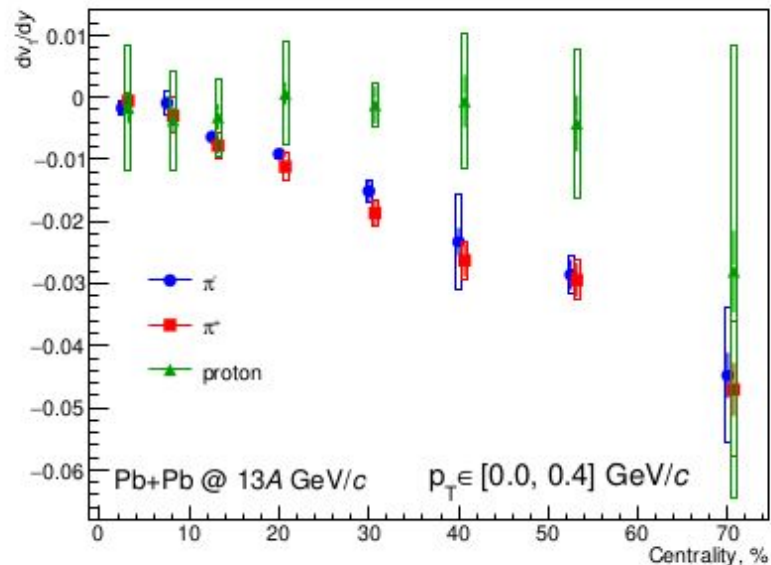
NA61 [PSD:spectators] vs NA49 [VCAL:spectators]



# Наклон $v_1(y)$ в $y = 0$ в интервалах $p_T$ (13A ГэВ)



# Наклон $v_1(y)$ в $y = 0$ в интервалах $p_T$ (13A ГэВ)



# Наклон $v_1(y)$ в $y = 0$ в интервалах $p_T$ (41A ГэВ)

