

Отчет группы НИЯУ МИФИ

по тематике VM@N в рамках гранта ОИЯИ

М. Мамаев, И. Сегаль, П. Парфенов, А. Трутце

Основные задачи в рамках гранта

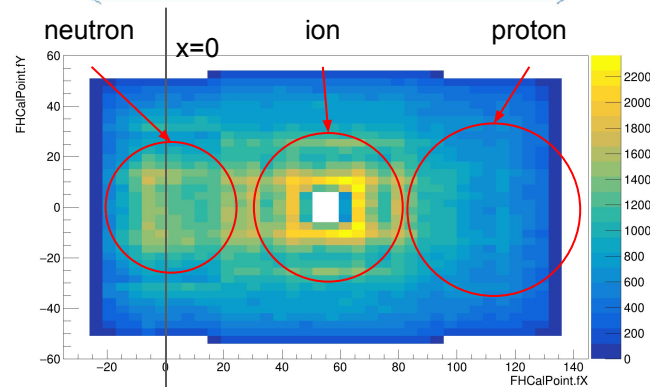
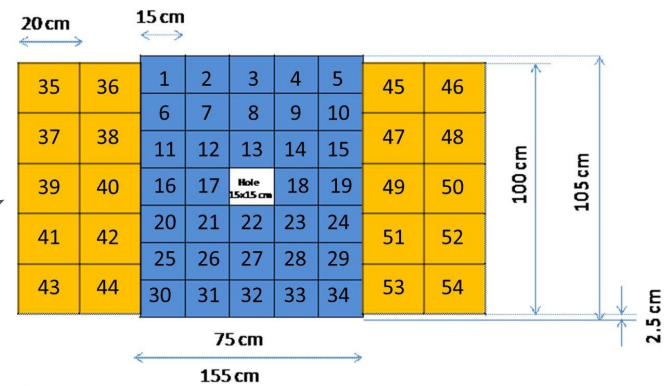
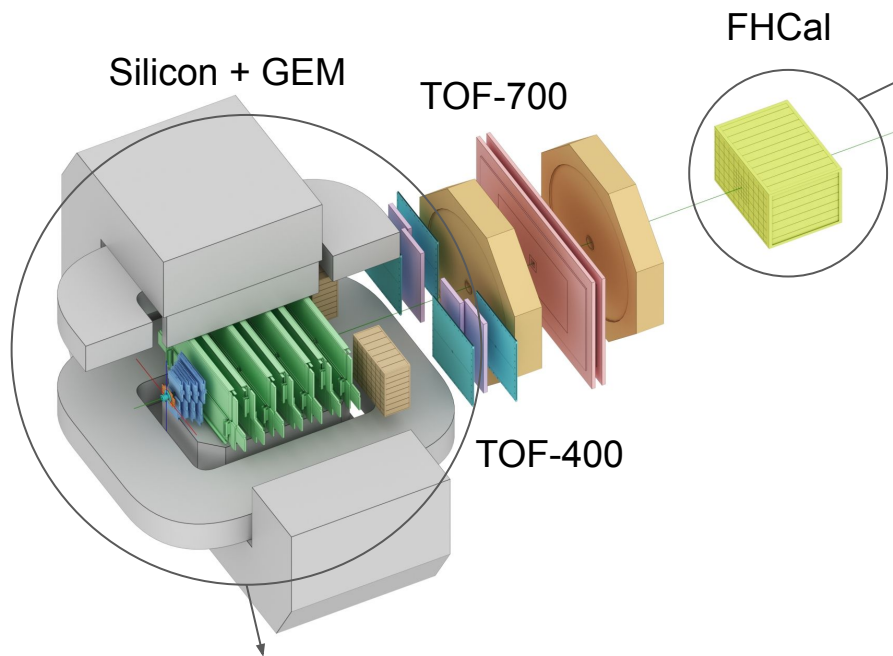
- Подготовка и тестирование пакета QnTools для измерения анизотропных потоков адронов на экспериментальных данных сеанса Xe+Cs(I) (Run8). Получение первых данных по прямому и эллиптическому потокам протонов и пионов. Калибровка экспериментальных данных сеанса Xe+Cs(I) (Run8).
- Интеграция и апробация методов коррекции на неоднородный аксептанс трекинговой системы и переднего калориметра FHCAL для последующих измерений коллективных потоков
- Определение центральности столкновений тяжелых ионов в экспериментальных данных сеанса Xe+Cs(I) (Run8) с использованием методов определения центральности на основе множественности рожденных заряженных частиц (MC-Glauber, inverse Bayes), разработка и тестирование новых методов, основанных на информации о спекторных фрагментах
- Развитие основного программного фреймворка эксперимента BM@N, BmnRoot. Поиск и исправление утечек памяти, а также сообщений об ошибках и предупреждений при выполнении моделирования и реконструкции.

Reports on the conferences and meetings in 2023

- **INFINUM-2023 (23.02-03.03):**
 - P. Parfenov “The heavy-ion program at the upgraded Baryonic Matter@Nuclotron Experiment at NICA”
- **10th BM@N Collaboration Meeting (14.05-19.05):**
 - P. Parfenov “Review of existing models and results on flow at the BM@N energy range”
 - M. Mamaev “ToF-400 calibration in the Xe run”
 - M. Mamaev “On event plane and flow measurements in Xe run”
 - I. Segal “Possibilities for centrality determination in the BM@N experiment”
- **LomCon-2023 (24-30.08):**
 - I. Segal “Methods for centrality determination in heavy-ion collisions with the BM@N experiment”
 - P. Parfenov “Anisotropic flow and its scaling properties at Nuclotron-NICA energies”
 - M. Mamaev “On the proton directed and elliptic flow in the few-GeV heavy ion collisions with BM@N”
- **ISHEPP-2023 (18-23.09):**
 - M. Mamaev “Directed and elliptic flow of protons in the heavy ion collisions at 2-4 GeV”
 - I. Segal “Methods for centrality determination in heavy-ion collisions based on Monte-Carlo sampling of spectator fragments “
- **BM@N Analysis & Software Meeting (12.09-13.09):**
 - M. Mamaev “On the Performance for the flow measurements in the recent Xe+Cs experimental run”
 - I. Segal “Prospects for centrality determination in run8 “
- **AYSS-2023 (30.10-3.11):**
 - I. Segal “Methods for centrality determination in heavy-ion collisions”
 - M. Mamaev “On the azimuthal flow of protons in the heavy ion collisions at 2-4 GeV”
- **+ Regular reports at BERDS meetings**

The BM@N experiment (GEANT4 simulation)

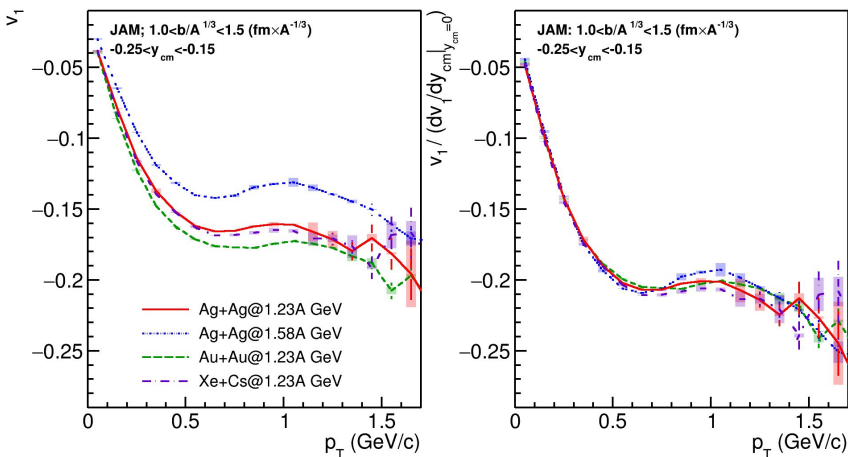
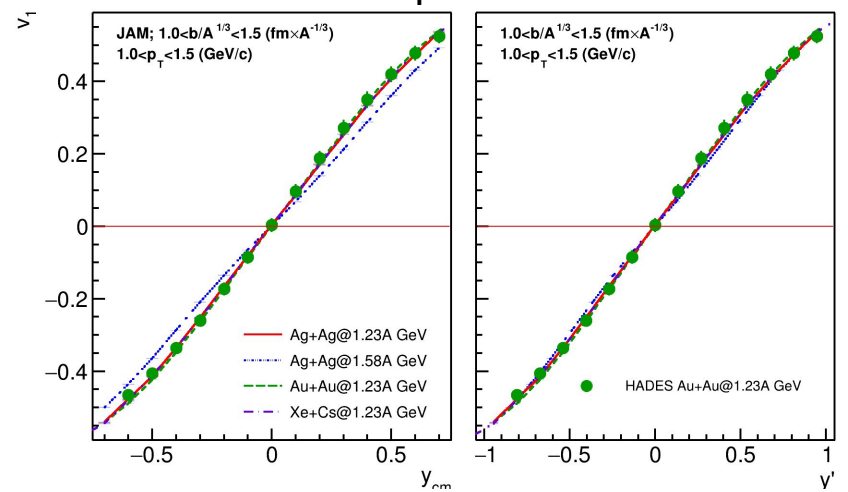
- Xe+Csl at $E_{kin} = 3.8A$ GeV
- First physical run



Symmetry plane estimation with the azimuthal asymmetry of projectile spector energy

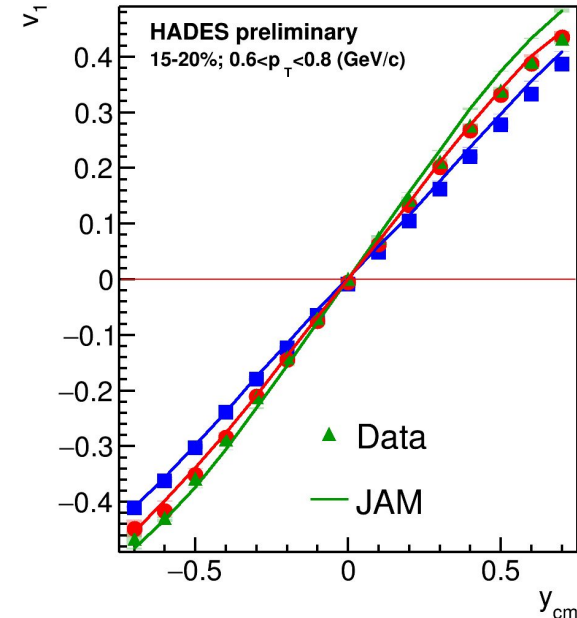
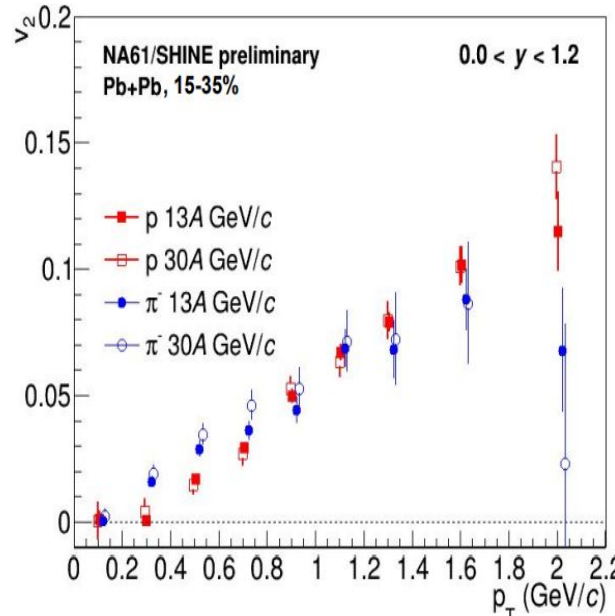
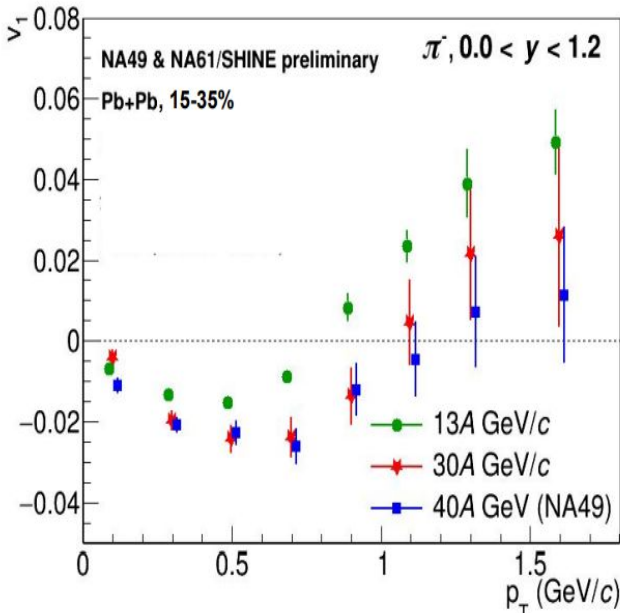
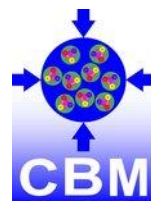
Tracking system within the magnetic field

HADES: dv_1/dy scaling with collision energy and system size



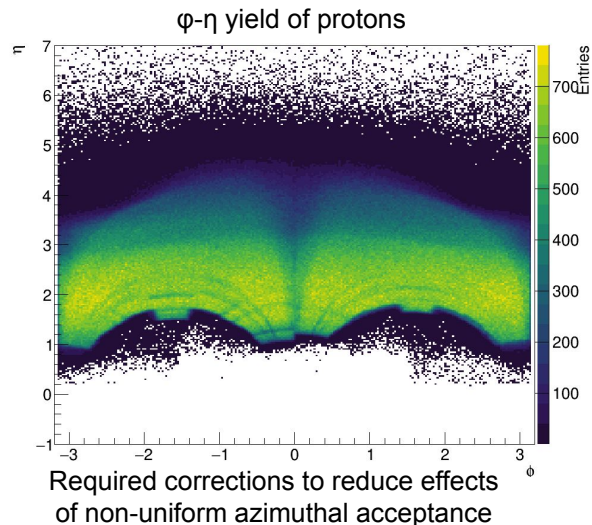
- Scaling with collision energy is observed in model and experimental data
- Scaling with system size is observed in model and experimental data
- We can compare the results with HIC-data from other experiments (e.g. STAR-FXT Au+Au)

QnTools framework

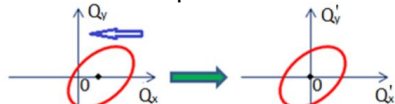


- All the methods used for performance study were carried out using QnTools framework: <https://github.com/HeavyIonAnalysis/QnTools> (well documented and well-tested)
- Methods for flow measurements in fixed-target experiments were tested on experimental data from NA61/SHINE, HADES and ALICE
- Tested and implemented for BM@N experimental and simulation data

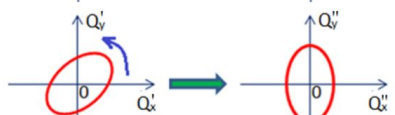
Azimuthal asymmetry of the BM@N acceptance



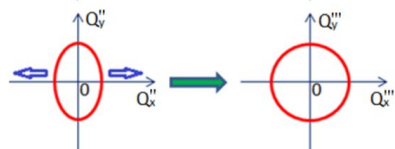
1. Recentering



2. Twist

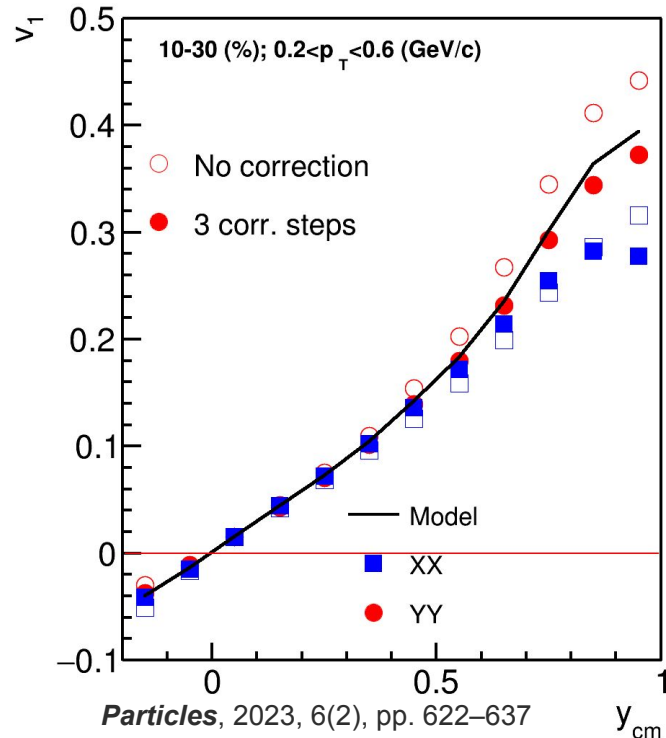


3. Rescaling



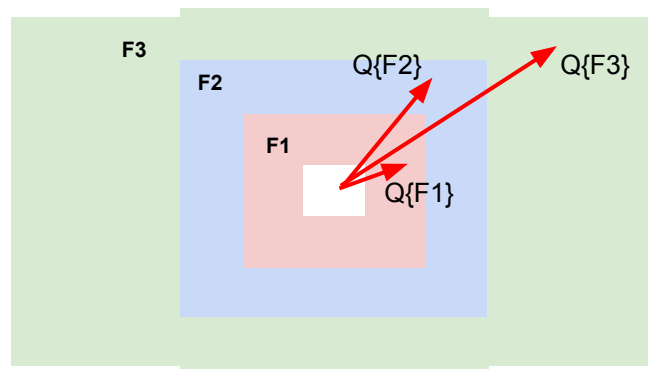
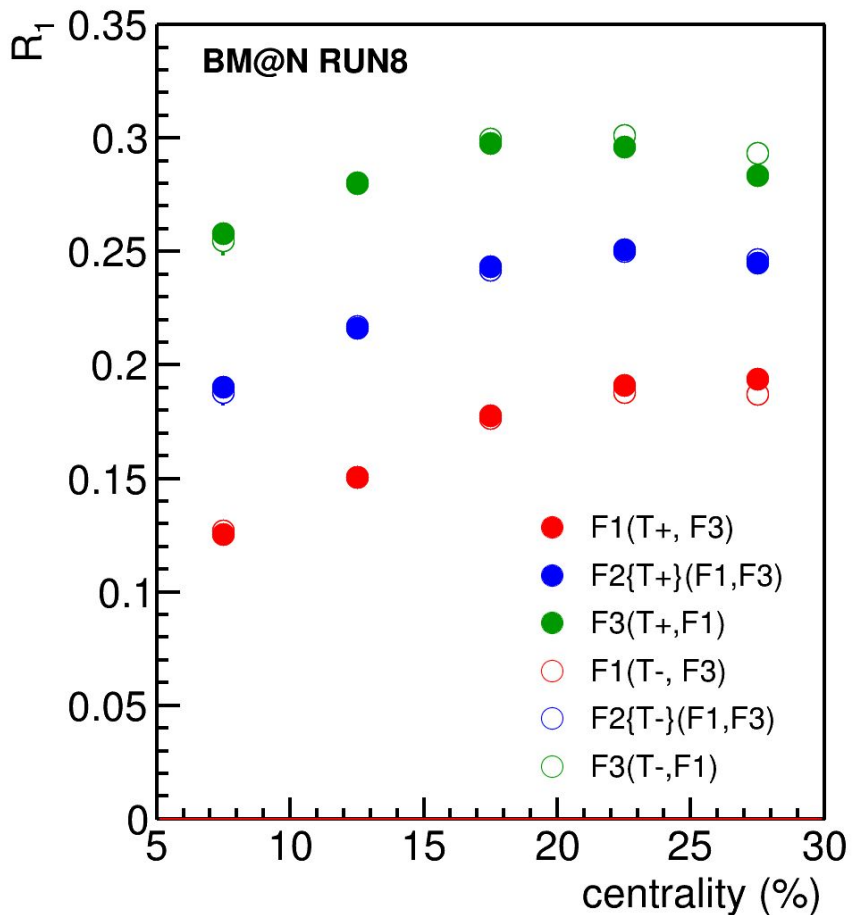
Corrections are based on method in:

I. Selyuzhenkov and S. Voloshin PRC77, 034904 (2008)



- Better agreement after rescaling for YY
- XX component has too large bias (due to magnetic field)

R1: BM@N Run8 DATA: Xe+Cs@3.8A GeV



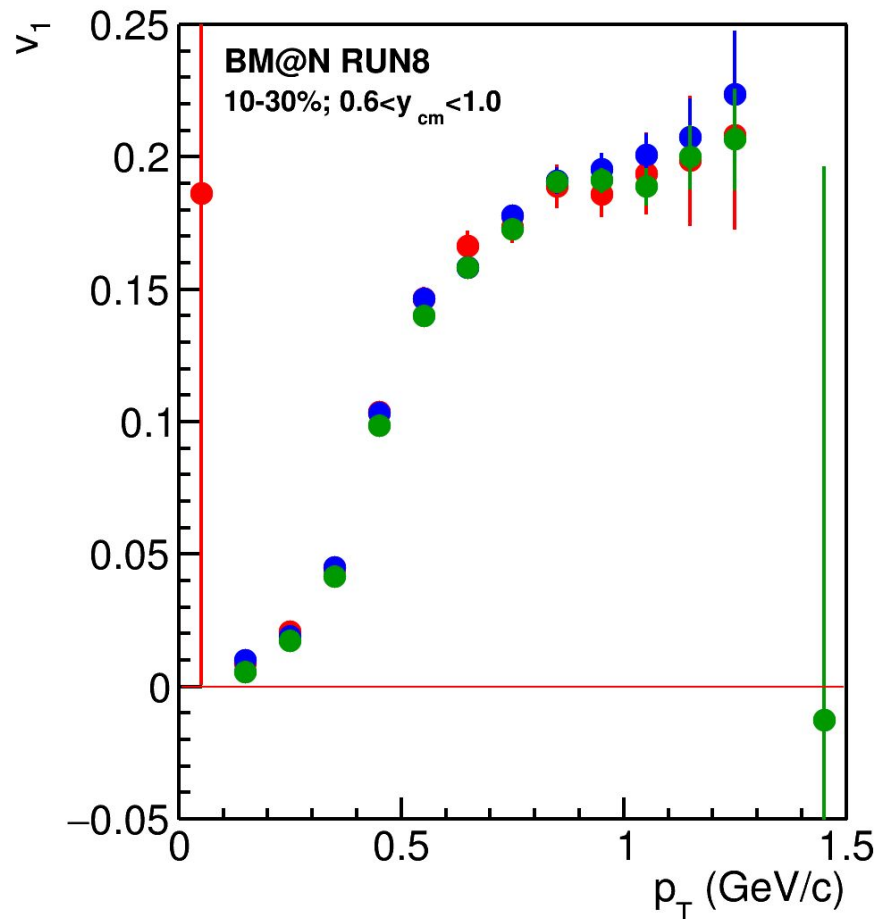
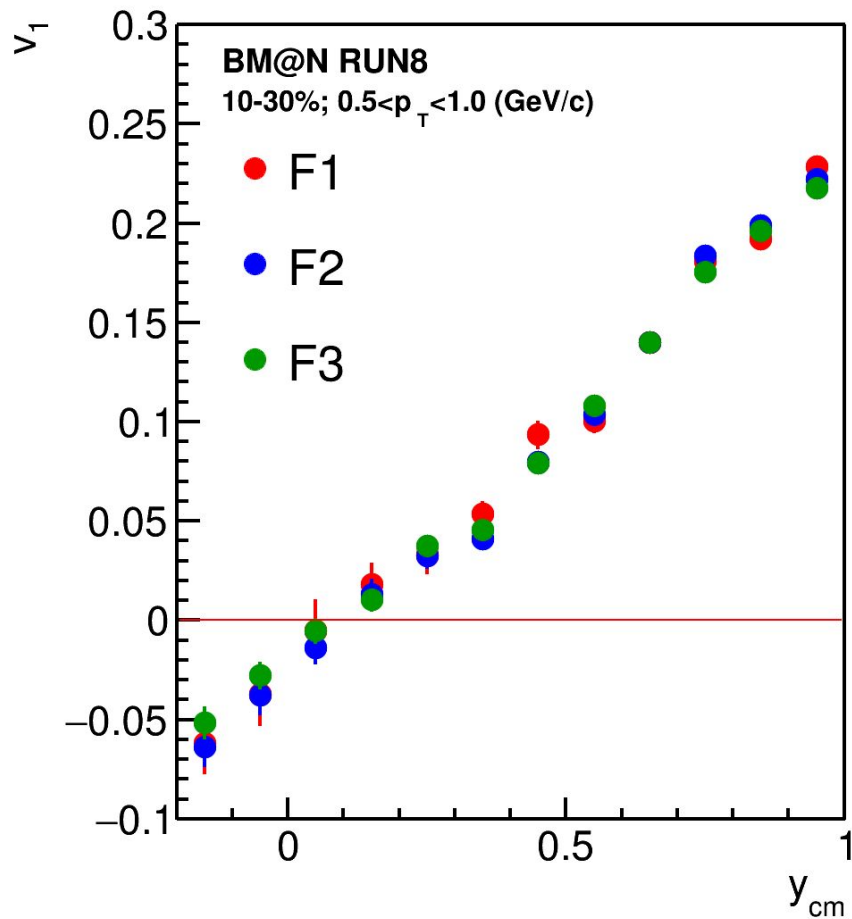
T-: all negatively charged particles with:

- $1.5 < \eta < 4$
- $p_T > 0.2 \text{ GeV}/c$

T+: all positively charged particles with:

- $2.0 < \eta < 3$
- $p_T > 0.2 \text{ GeV}/c$

v1: BM@N Run8 DATA: Xe+Cs@3.8A GeV



Centrality determination based on Monte-Carlo sampling

For **multiplicity of produced particles** used in HADES, CBM, BM@N, NA61/SHINE

For **spectators energy** from hadron calorimeters tested based on NA61/SHINE results

Get (N_{part}, N_{coll}) from MC-Glauber

Get (N_{spec}, b) from MC-Glauber

$$\text{Calculate } N_a = fN_{part} + (1-f)N_{coll}$$

Calculate total mass of fragments
 $A_{tot} = A^{1-f} N_{spec}^f$
 (based on the results of DCM-QGSM-SMM model)

Sample multiplicity of produced particles (S_i) N_a times from NBD (μ, k)

Sample hadron calorimeter response (S_i) A_{tot} times from Gauss (μ, k)

Mixing of produced particles contribution based on Monte-Carlo events

Result: total S_{tot}

MC-Glauber distribution

Full Monte-Carlo (real data) distribution

Evaluate χ^2 between $dN/dE_{MC/data}$ and dN/dE_{GI}

Scan phase space of parameters to find their values for minimum of χ^2

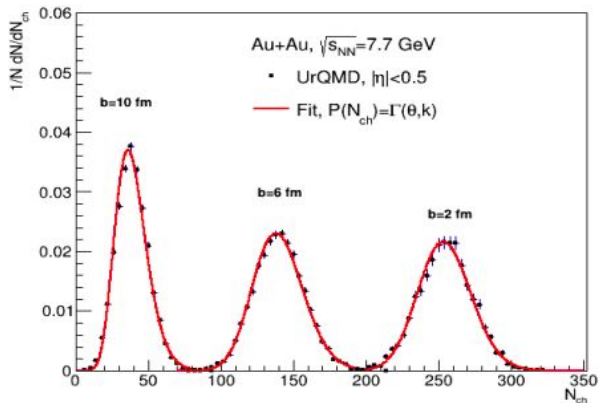
Extract relation between geometry parameters and centrality estimator

The Bayesian inversion method (Γ -fit): main assumptions

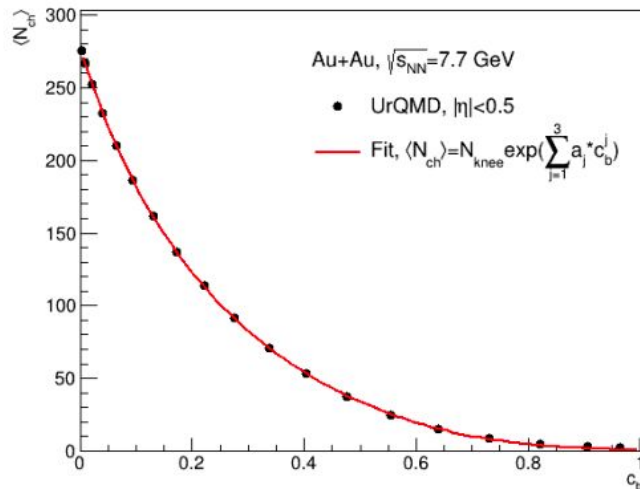
- Relation between multiplicity N_{ch} and impact parameter b is defined by the fluctuation kernel:

$$P(N_{ch}|c_b) = \frac{1}{\Gamma(k(c_b))\theta^k} N_{ch}^{k(c_b)-1} e^{-N_{ch}/\theta}$$

$$c_b = \int_0^b P(b') db' \simeq \frac{\pi b^2}{\sigma_{inel}} \quad \text{-- centrality based on impact parameter}$$



The results of fitting the multiplicity distribution for a fixed impact parameter



The dependence of the average value of multiplicity on centrality and the results of its fit

$$\frac{\sigma^2}{\langle N_{ch} \rangle} = \theta \simeq const$$

$$\langle N_{ch} \rangle = N_{knee} \exp\left(\sum_{j=1}^3 a_j c_b^j\right), \quad k = \frac{\langle N_{ch} \rangle}{\theta}$$

Five fit parameters

N_{knee}, θ, a_j

Reconstruction of b

- Normalized multiplicity distribution $P(N_{ch})$

$$P(N_{ch}) = \int_0^1 P(N_{ch}|c_b)dc_b$$

- Find probability of b for fixed range of N_{ch} using Bayes' theorem:

$$P(b|n_1 < N_{ch} < n_2) = P(b) \frac{\int_{n_1}^{n_2} P(b|N_{ch})dN_{ch}}{\int_{n_1}^{n_2} P(N_{ch})dN_{ch}}$$

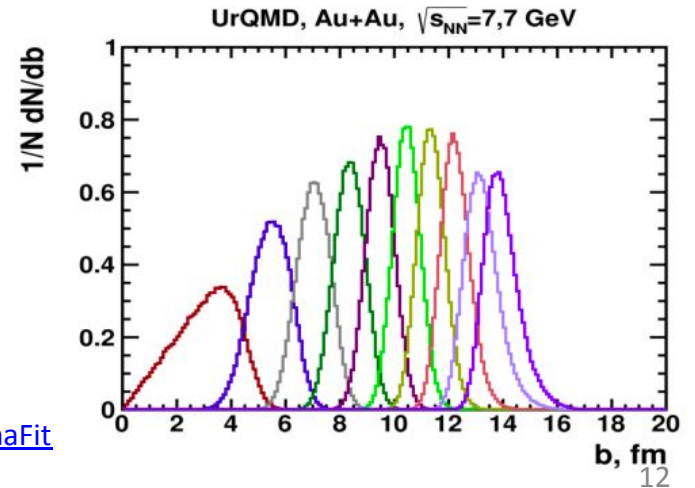
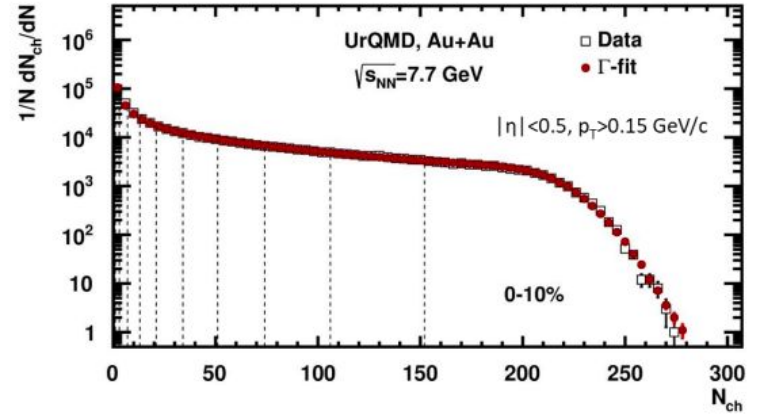
- The Bayesian inversion method consists of 2 steps:**

- Fit normalized multiplicity distribution with $P(N_{ch})$
- Construct $P(b|N_{ch})$ using Bayes' theorem with parameters from the fit

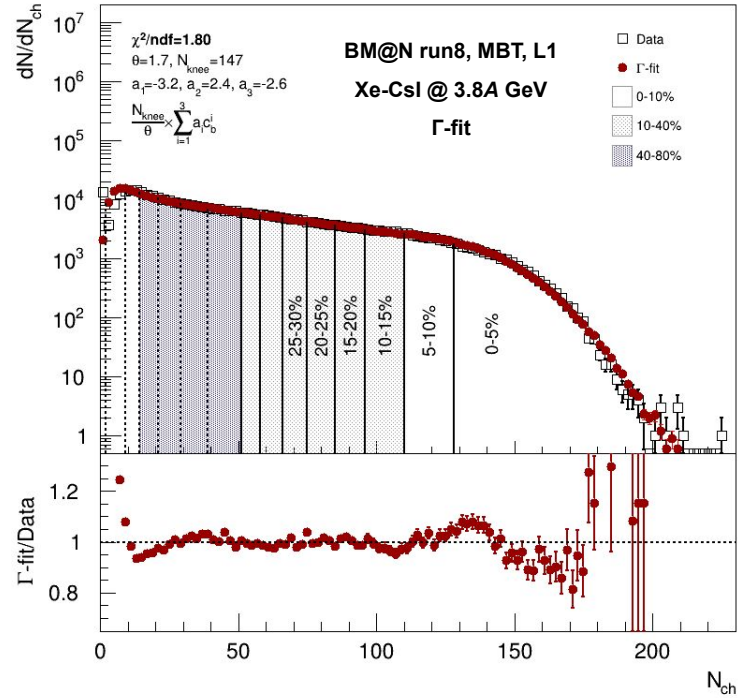
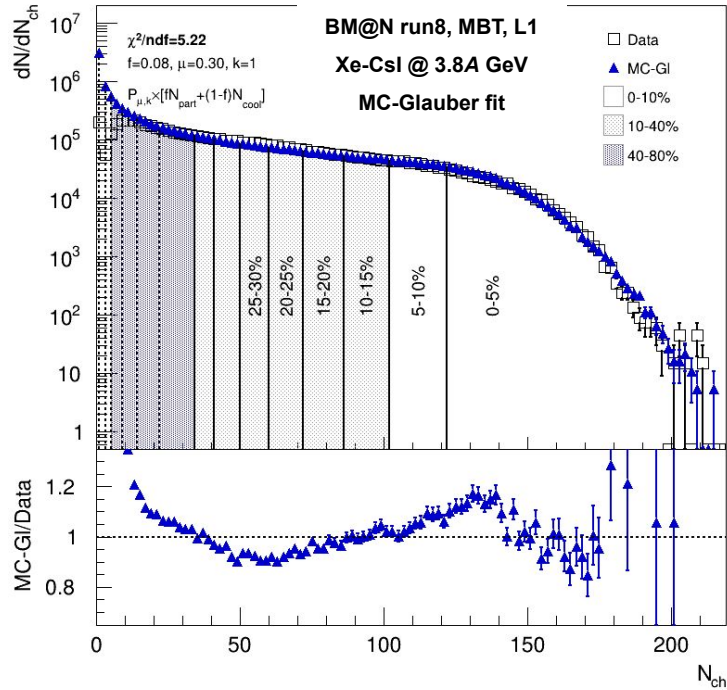
R. Rogly, G. Giacalone and J. Y. Ollitrault, Phys.Rev. C98 (2018) no.2, 024902

Implementation for MPD and BM@N by D. Idrisov: <https://github.com/Dim23/GammaFit>

Example of application in MPD: P. Parfenov et al., Particles 4 (2021) 2, 275-287

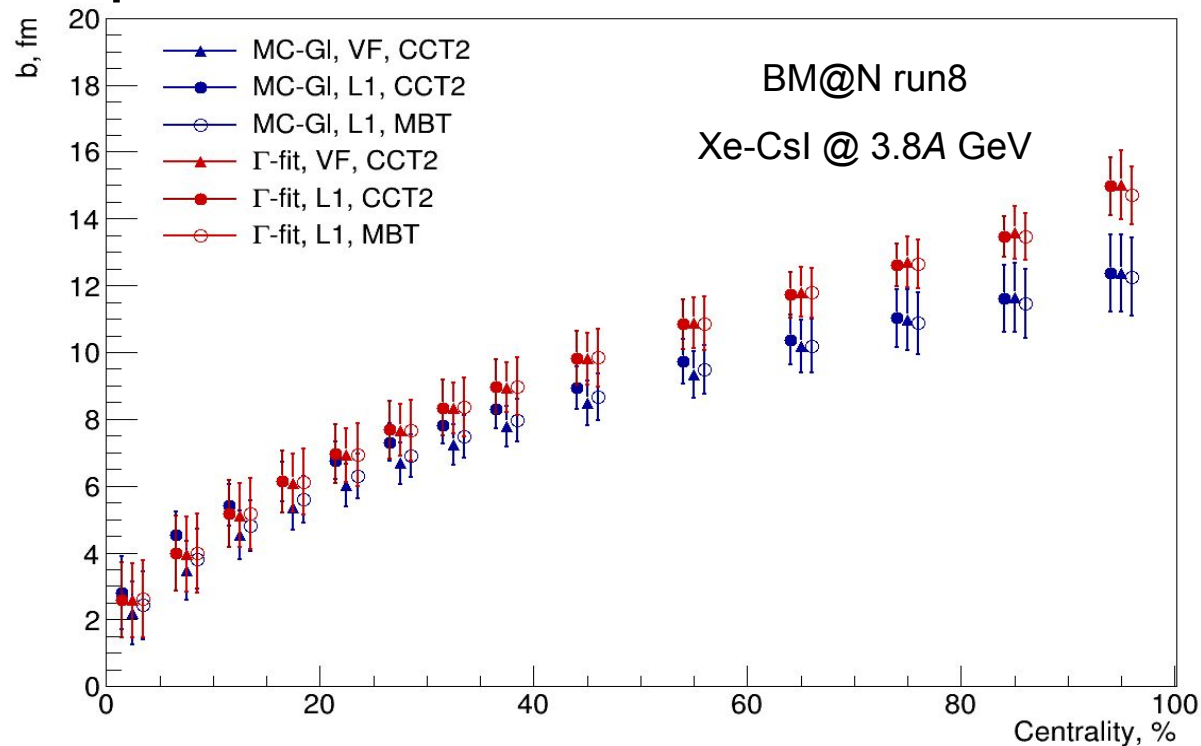


Results of the fits for run8 data



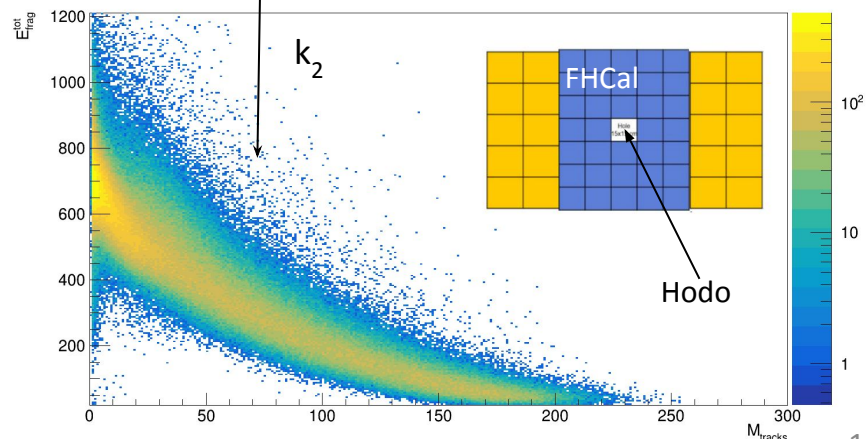
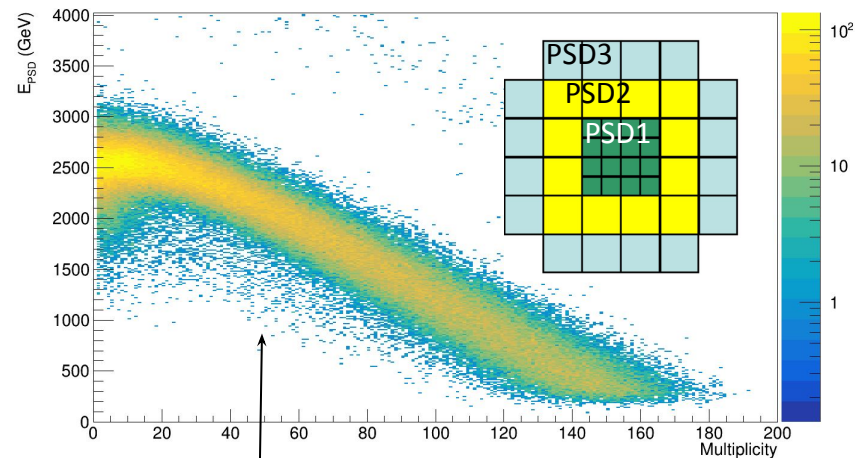
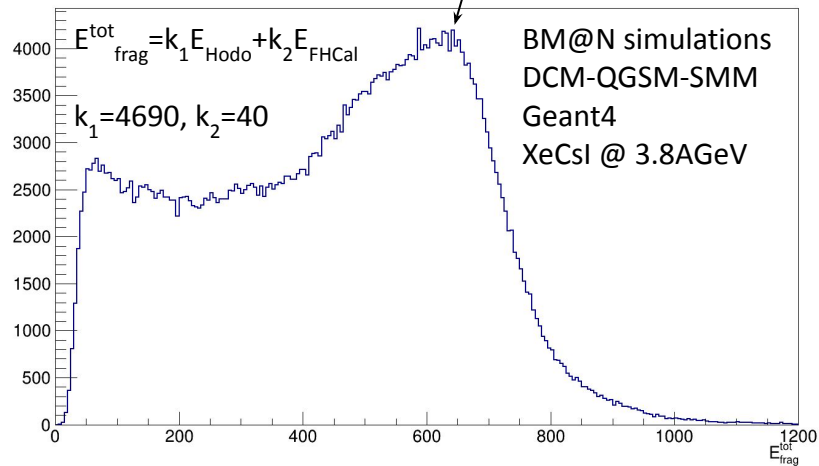
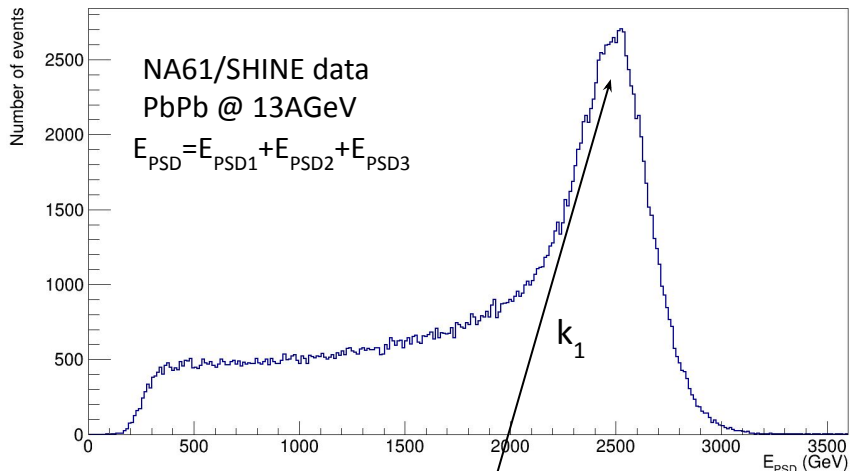
- Developed procedures for multiplicity is performed for BM@N run8 data
- Fit result is good and might be improved

Comparison of the results for run8 data

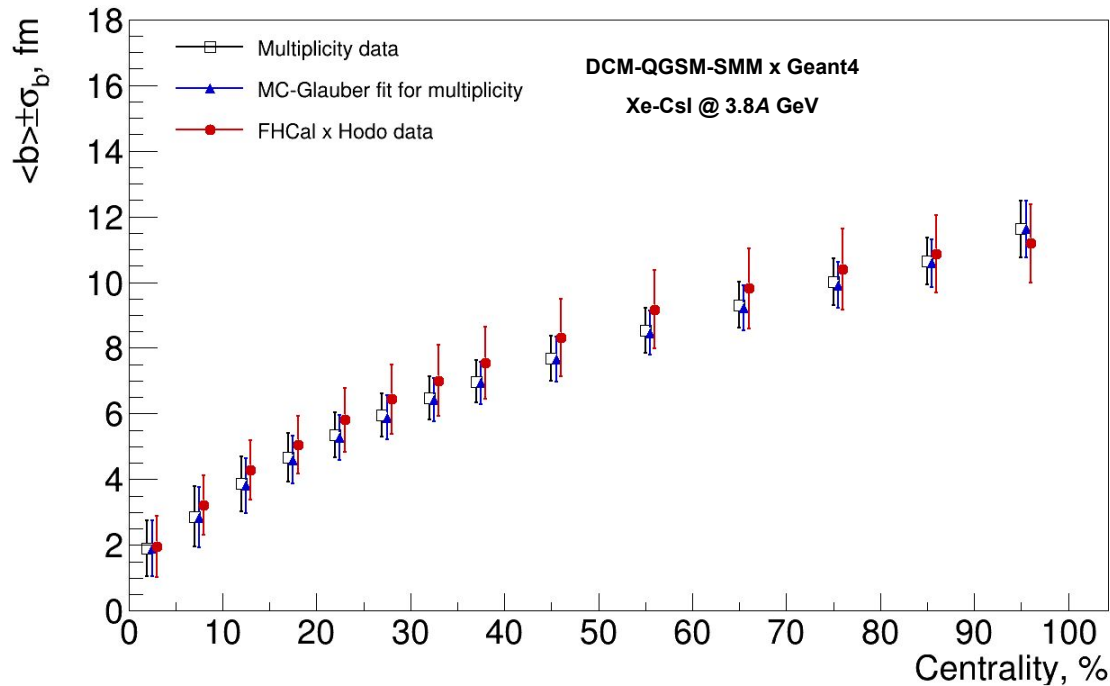
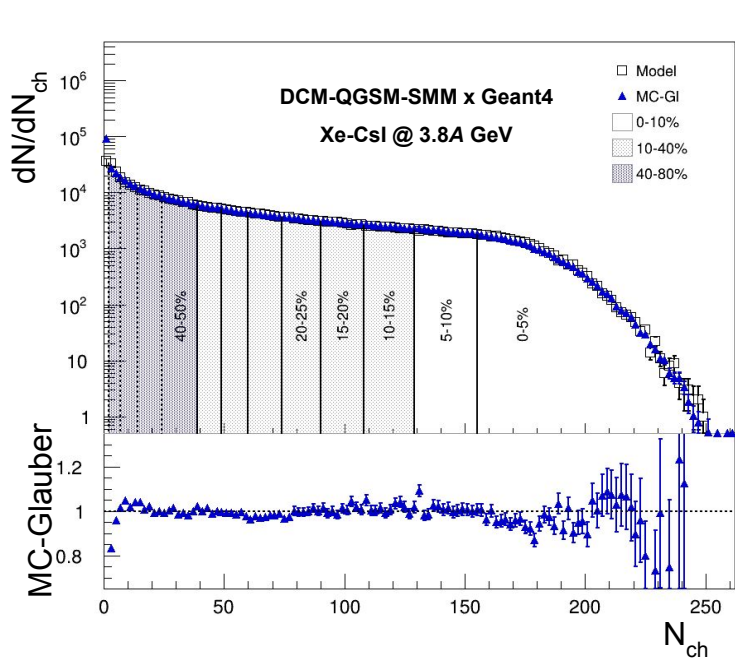


- Comparison between different methods, tracking algorithms and triggers is provided
- Results are comparable

Possibilities of spectators fragments as estimators



Comparison of different estimators and methods



- Possibilities of using forward detectors for centrality determination was investigated
- Impact parameter distributions in different centrality classes are similar for different centrality estimators
- These distributions for spectators energy is wider because of the width of b and energy correlation

Статус работ по оптимизации VmnRoot



- На ферме "Басов"
Высокопроизводительного
Вычислительного Центра НИЯУ МИФИ
развернуто окружение для тестирования
VmnRoot:
 - пакет готов для работы на кластере (в том числе в системе DIRAC)
 - доработаны скрипты профилирования для выявления утечек

Это важно не только для тестирования VmnRoot, но и в контексте планирующегося дальнейшего использования этих вычислительных ресурсов в эксперименте NICA при помощи DIRAC

Статус работ по оптимизации VmnRoot

Проведено тестирование процессов симуляции и реконструкции данных использованием VmnRoot:

Утечка памяти	Симуляция	Реконструкция
Точно утеряно	~350КБ	~220КБ
Возможно утеряно	~600КБ	~50КБ
Число ошибок	463	~3.5М
Число контекстов, в которых обнаружены ошибки	463	284

В данный момент производится сортировка и приоритизация ошибок:

- Обнаруженные в ROOT и FairRoot отмечаются для игнорирования;
- Обнаруженные в VmnRoot сортируются по частоте встречаения

Заключения

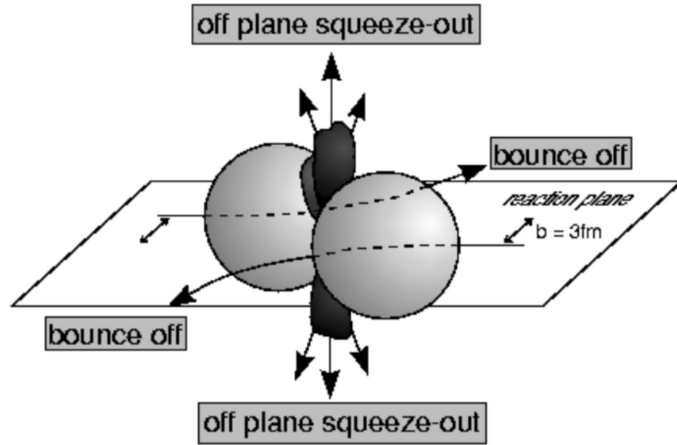
- **Измерение анизотропных потоков в VM@N с помощью пакета QnTools:**
 - Были проведены исследования детекторных возможностей эксперимента VM@N для измерения потоков.
 - Проведено сравнение результатов с использованием нескольких оценок плоскости симметрии. Показано, что результаты сходятся между собой.
 - Показана эффективность применяемых методов коррекции на эффекты детектора (неизотропных акцептанс, влияние магнитного поля).
 - Получены первые результаты измерений коллективных потоков в данных физического набора (Run8) Xe+Cs(l) при энергии 3.8 ГэВ/нуклон.
- **Оценка центральности в VM@N:**
 - Успешно внедрен метод определения центральности с использованием множественности заряженных частиц. Получены результаты для физического набора (Run8) Xe+Cs(l) при энергии 3.8 ГэВ/нуклон.
 - Разработана процедура определения центральности, использующая энергию спектаторов в передней области быстрот. Методика проверена на симулированных и реальных данных эксперимента NA61/SHINE.
 - Изучена возможность определения центральности, используя сигналы с передних детекторов в VM@N.
- **Оптимизация программного пакета VmnRoot:**
 - Полностью развернут пакет VmnRoot на вычислительном кластере “Басов”. Пакет готов к использованию для задач тестирования и распределенных вычислений с помощью DIRAC.
 - Выявлен список утечек памяти и ошибок при работе пакета. Производится сортировка и приоритезация.

Планы на будущее

- **Анализ анизотропных азимутальных потоков**
 - Измерение направленного и эллиптического потоков адронов (p , π , Λ)
 - Исследование систематики, связанной с магнитным полем и азимутальным аксептансом трекинговой системы, а также алгоритмом трекинга
- **Измерение центральности**
 - Измерение геометрических параметров сталкивающейся системы двух ядер, оценка систематики, связанной с методом их измерения
 - Оценка систематической ошибки, связанной с выбором эстиматора центральности
- **Оптимизация программного пакета VmnRoot**
 - Исправление выявленных ошибок и утечек памяти
 - Оптимизация алгоритмов, примененных в пакете
- **Привлечение новых студентов**
 - Ирина Жаворонкова выполняет работы по калибровке данных с детектора TOF-400
 - Тимофей Куимов производит идентификацию заряженных адронов в экспериментальных данных

Backup slides

Anisotropic flow & spectators



The azimuthal angle distribution is decomposed in a Fourier series relative to reaction plane angle:

$$\rho(\varphi - \Psi_{RP}) = \frac{1}{2\pi} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos n(\varphi - \Psi_{RP}) \right)$$

Anisotropic flow:

$$v_n = \langle \cos [n(\varphi - \Psi_{RP})] \rangle$$

Anisotropic flow is sensitive to:

- Time of the interaction between overlap region and spectators

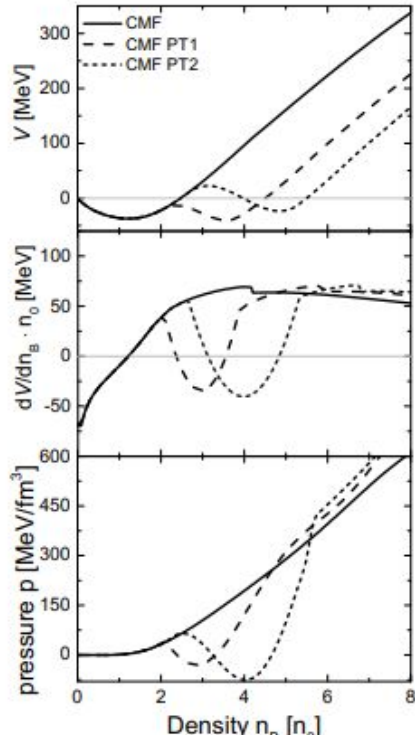
$$t_p = \frac{2R}{\gamma\beta}$$

- Time of the expansion of the created in the collision matter (c_s is speed of sound)

$$t_{exp} = \frac{R}{c_s}$$

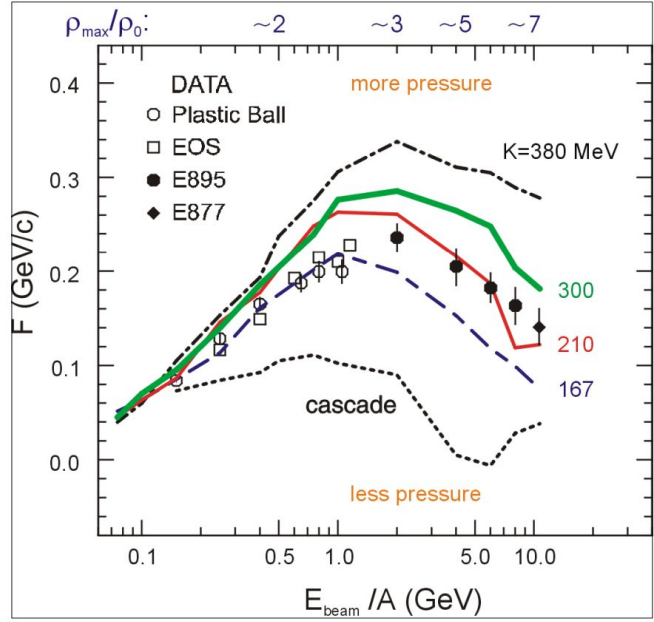
v_n as a function of collision energy

P. DANIELEWICZ, R. LACEY, W. LYNCH
[10.1126/science.1078070](https://doi.org/10.1126/science.1078070)

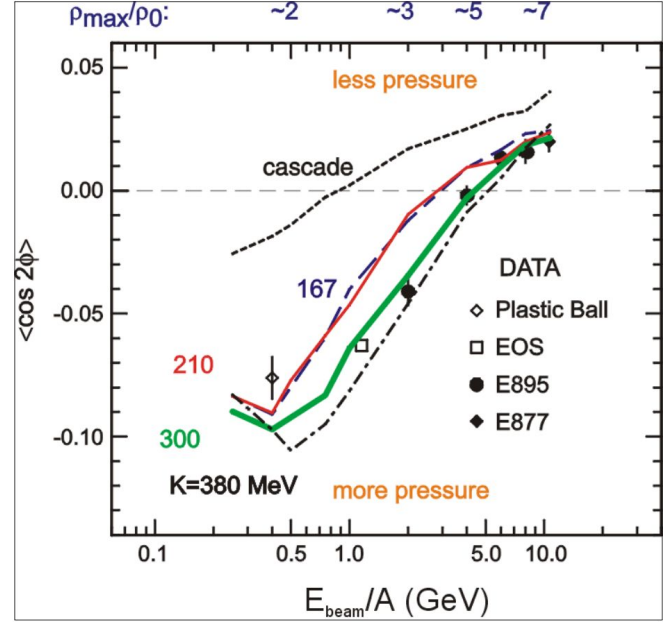


EPJ Web of Conferences 276, 01021 (2023)

v_1 suggests $K \approx 210$ MeV



v_2 suggests $K = 310 \div 380$ MeV



Describing the high-density matter using the mean field
 Flow measurements constrain the mean field

Discrepancy is probably due to non-flow correlations in E895 measurements

Flow methods for v_n calculation

Tested in HADES: M Mamaev et al 2020 PPNuclei 53, 277–281
 M Mamaev et al 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1690 012122

Scalar product (SP) method:

$$v_1 = \frac{\langle u_1 Q_1^{F1} \rangle}{R_1^{F1}} \quad v_2 = \frac{\langle u_2 Q_1^{F1} Q_1^{F3} \rangle}{R_1^{F1} R_1^{F3}}$$

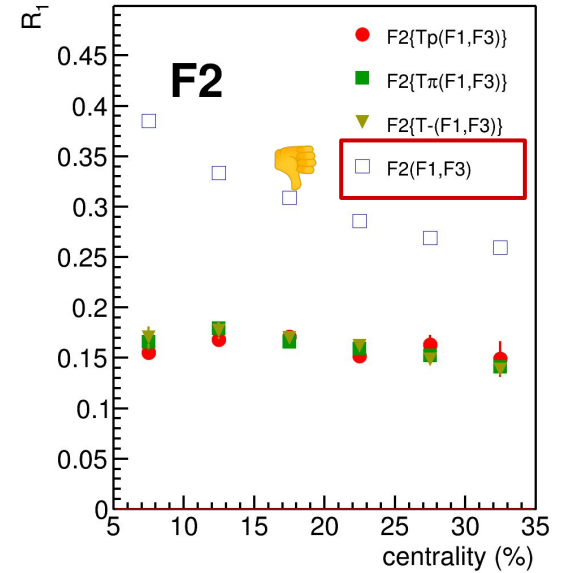
Where R_1 is the resolution correction factor

$$R_1^{F1} = \langle \cos(\Psi_1^{F1} - \Psi_1^{RP}) \rangle$$

Symbol “F2(F1,F3)” means R_1 calculated via
 (3S resolution):

$$R_1^{F2(F1,F3)} = \frac{\sqrt{\langle Q_1^{F2} Q_1^{F1} \rangle \langle Q_1^{F2} Q_1^{F3} \rangle}}{\sqrt{\langle Q_1^{F1} Q_1^{F3} \rangle}}$$

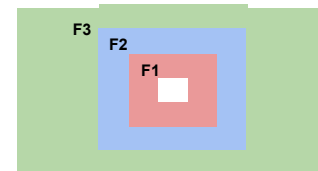
Method helps to eliminate non-flow
 Using 2-subevents doesn't



Symbol “F2{Tp}(F1,F3)” means R_1
 calculated via (4S resolution):

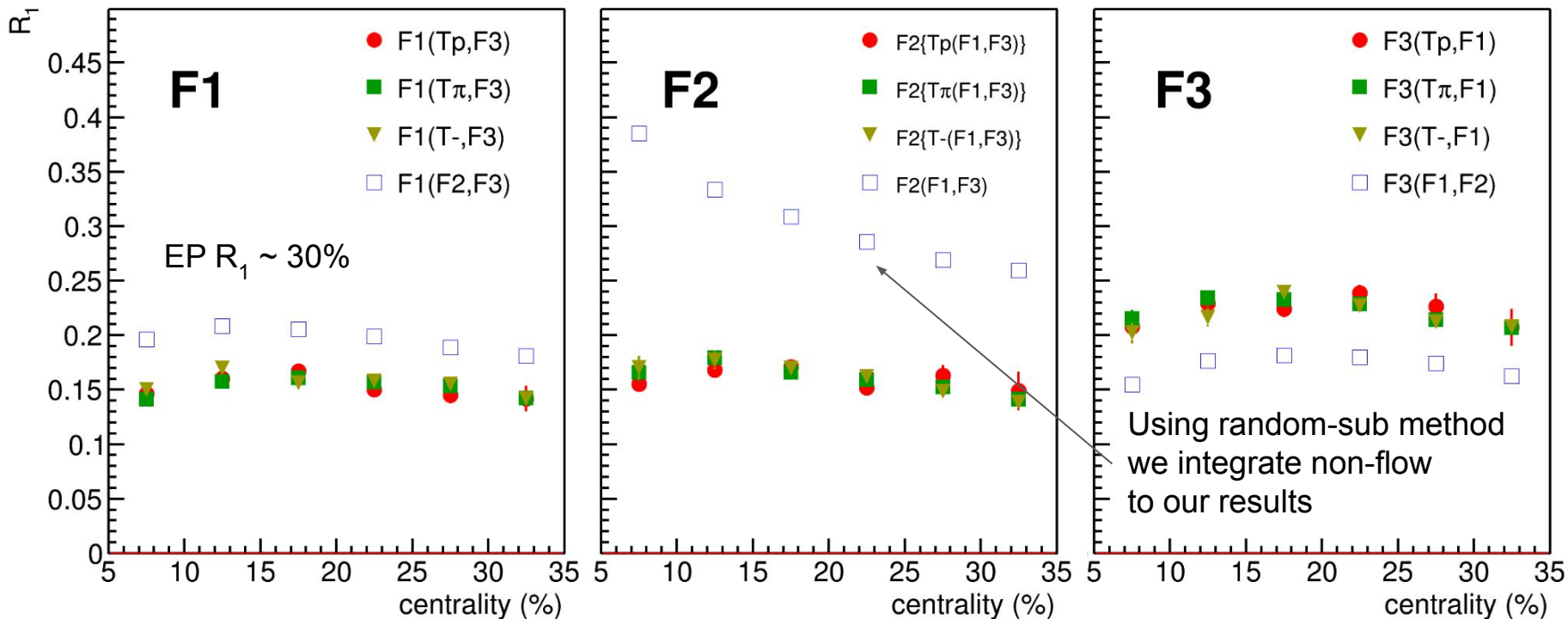
$$R_1^{F2\{Tp\}(F1,F3)} = \langle Q_1^{F2} Q_1^{Tp} \rangle \frac{\sqrt{\langle Q_1^{F1} Q_1^{F3} \rangle}}{\sqrt{\langle Q_1^{Tp} Q_1^{F1} \rangle \langle Q_1^{Tp} Q_1^{F3} \rangle}}$$

SP R1: DCMQGCM-SMM Xe+Cs@4A GeV



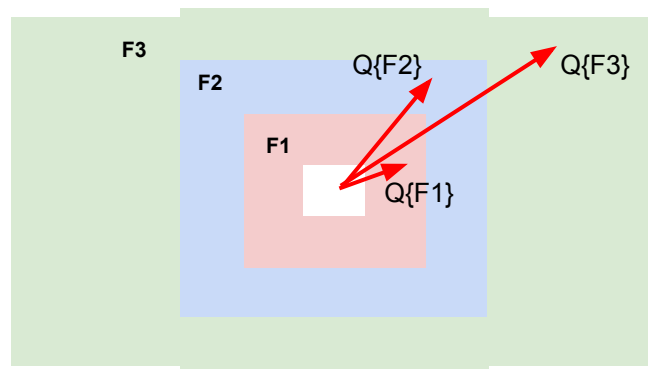
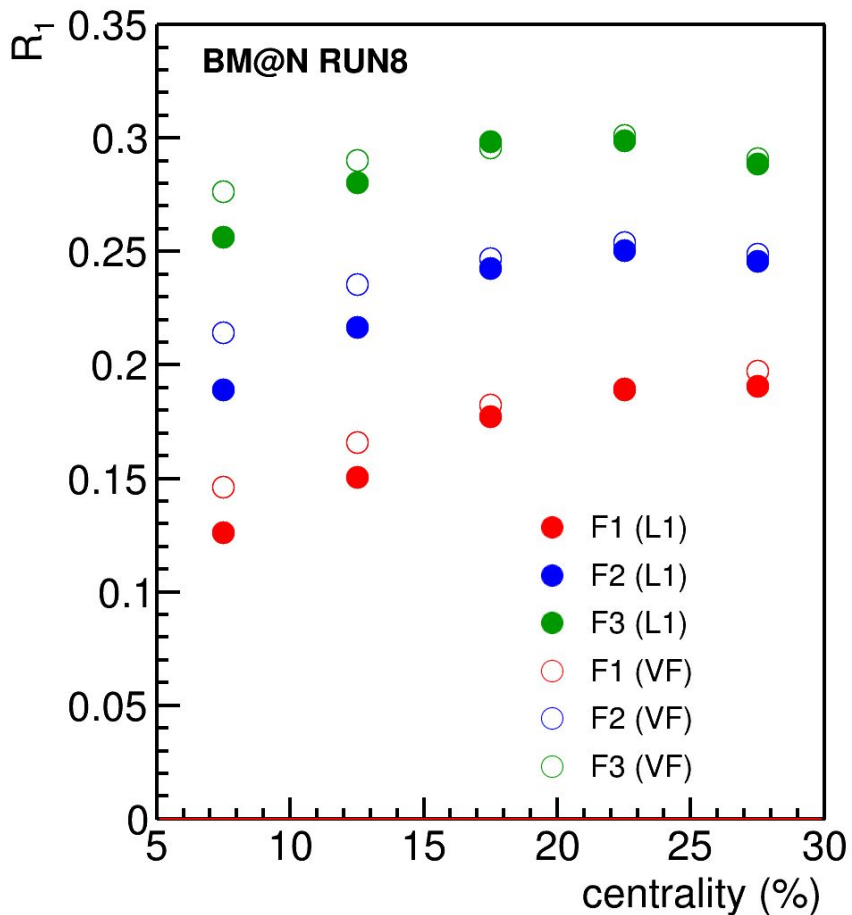
SP gives unbiased estimation of v_n (root-mean-square)

EP gives biased estimation (somewhere between mean and RMS)



Using the additional sub-events from tracking provides a robust combination to calculate resolution 25

R1: BM@N Run8 DATA: Xe+Cs@3.8A GeV



T-: all negatively charged particles with:

- $1.5 < \eta < 4$
- $p_T > 0.2 \text{ GeV}/c$

T+: all positively charged particles with:

- $2.0 < \eta < 3$
- $p_T > 0.2 \text{ GeV}/c$

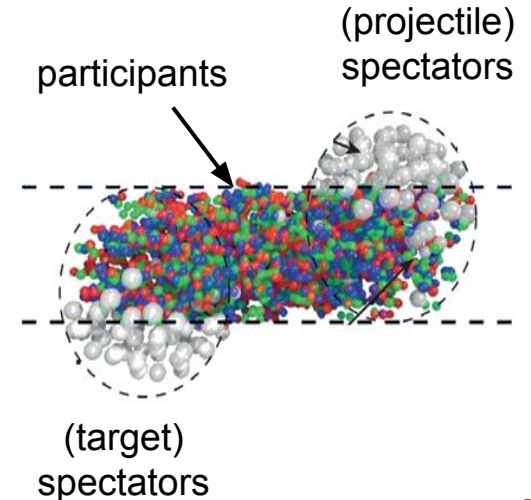
Motivation for centrality determination

- Evolution of matter produced in heavy-ion collisions depends on its initial geometry

- **Goal of centrality determination:**
map (on average) the collision geometry parameters
to experimental observables (centrality estimators)

- Centrality class S_1 - S_2 : group of events corresponding to a given fraction (in %) of the total cross section:

$$C_S = \frac{1}{\sigma_{inel}^{AA}} \int_{S_1}^{S_2} \frac{d\sigma}{dS} dS$$

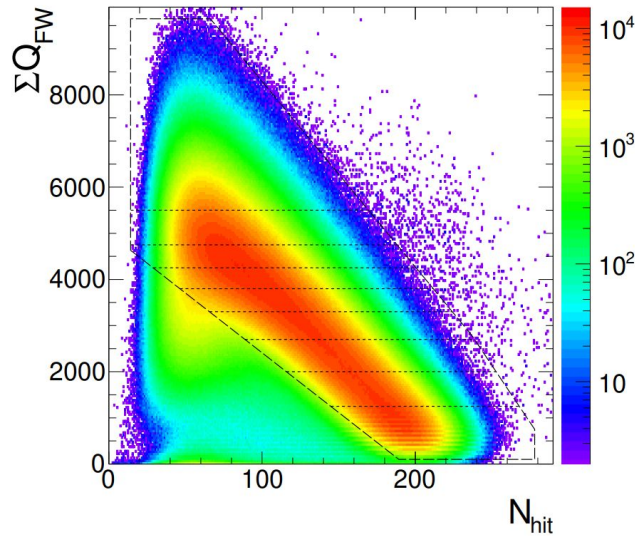


Why several alternative centrality estimators

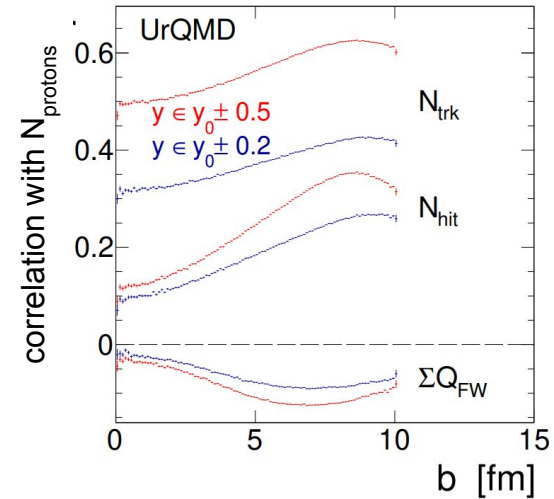
Anticorrelation between charge of the spectator fragments (FW) and particle multiplicity (hits)

A number of produced protons is stronger correlated with the number of produced particles (track & RPC+TOF hits) than with the total charge of spectator fragments (FW)

HADES; Phys.Rev.C 102 (2020) 2, 024914

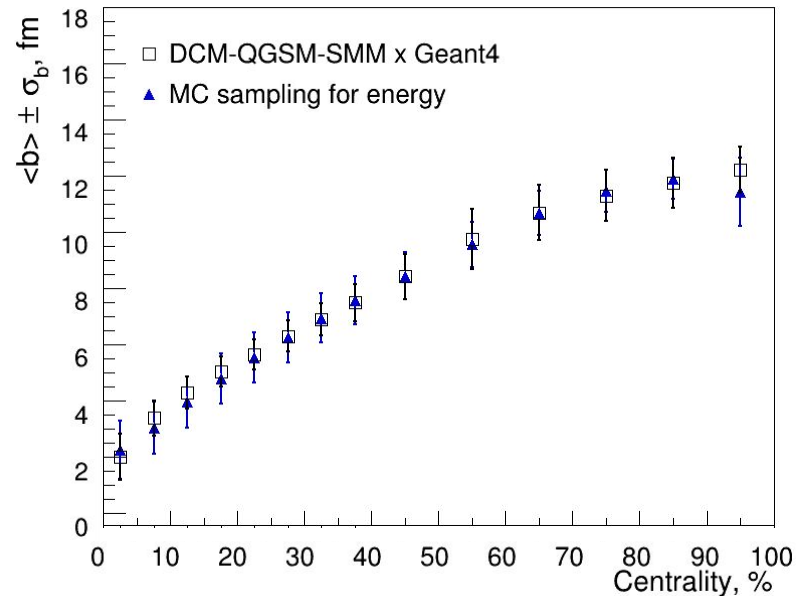
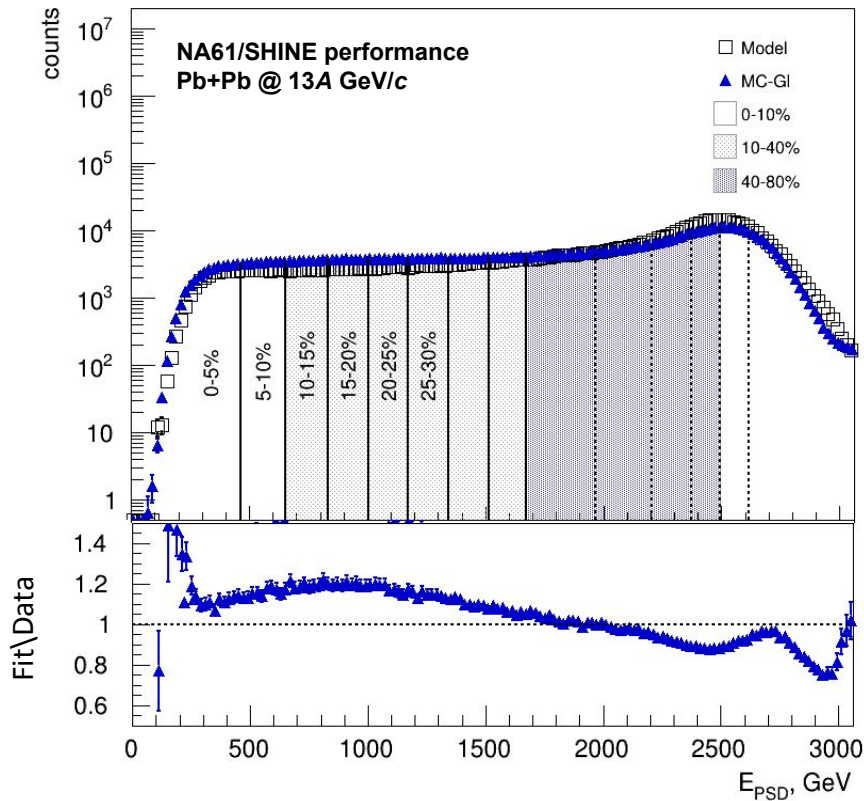


HADES; Phys.Rev.C 102 (2020) 2, 024914



Avoid self-correlation biases when using spectators fragments for centrality estimation

Test of procedure for spectators energy



- Procedure for spectators energy was tested based on NA61 data
- Centrality classes comparable with classes directly determined from DCM-QGSM-SMM
- There is still imbalance between the central and peripheral events which should be improved with more realistic mixing of produced particles in central events