

# Столкновения тяжелых ионов



Деманов Александр

18.06.2024

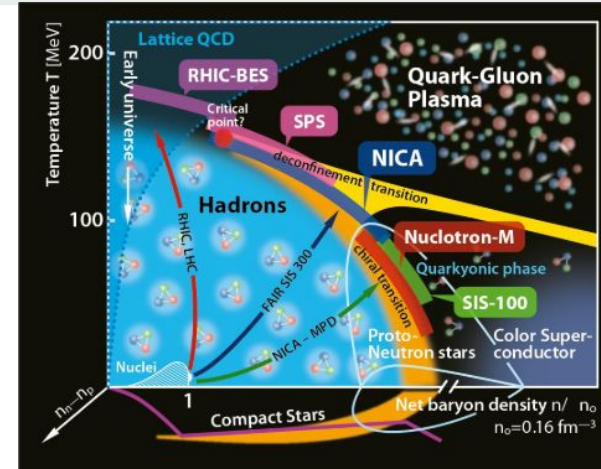
# Столкновение тяжелых ионов

В столкновениях тяжелых ионов образуется сильновзаимодействующая материя.

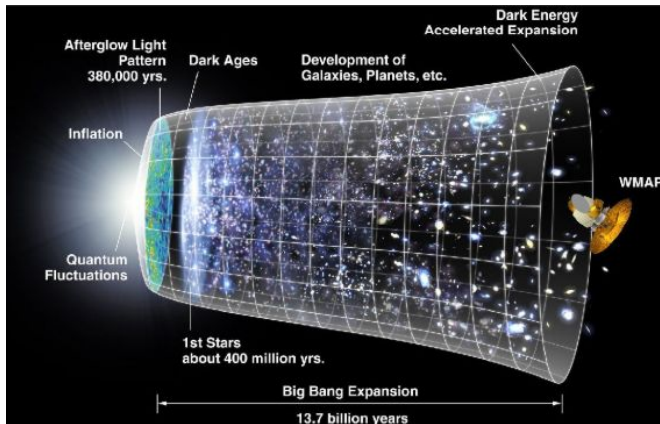
- Изучить свойства КГМ

Чем интересно изучение свойств КГМ:

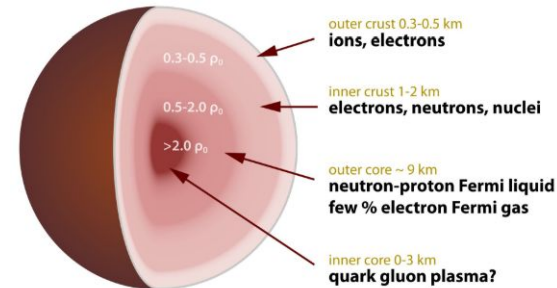
- присутствует в первые микросекунды Большого взрыва
- свойства/слияний нейтронных звезд



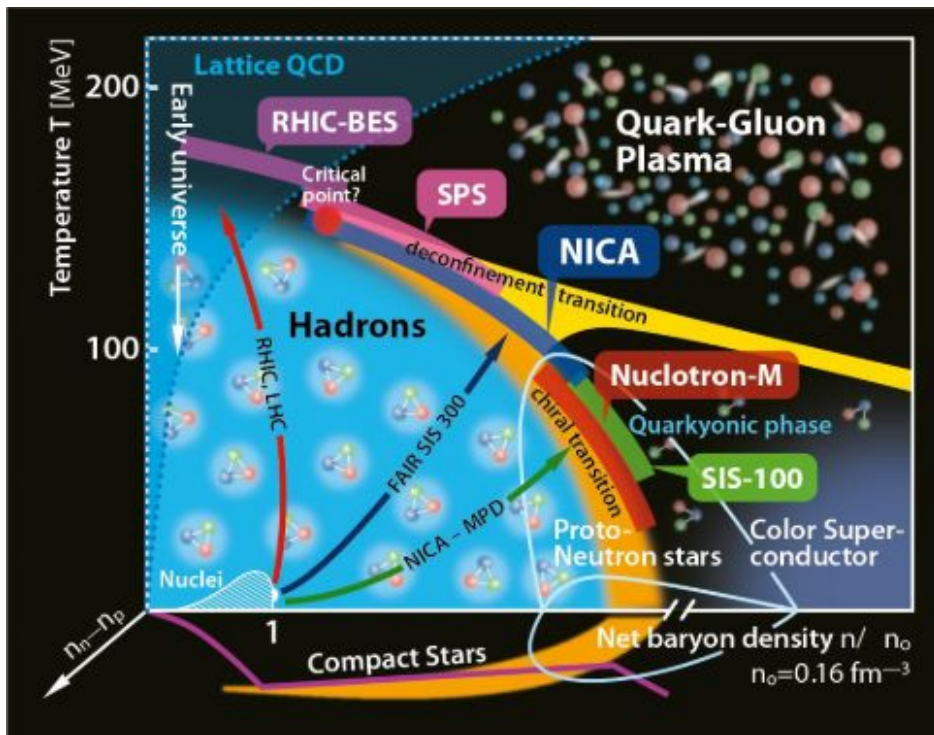
## Высокие энергии



## Низкие энергии ( $\sqrt{s_{NN}} = 2.3-3.5 \text{ GeV}$ )



# Фазовая диаграмма КХД материи



Large Hadron Collider (LHC)

- $\sqrt{s_{NN}} \sim 5 \text{ TeV}$

Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)

- $\sqrt{s_{NN}} \sim 3 - 200 \text{ GeV}$

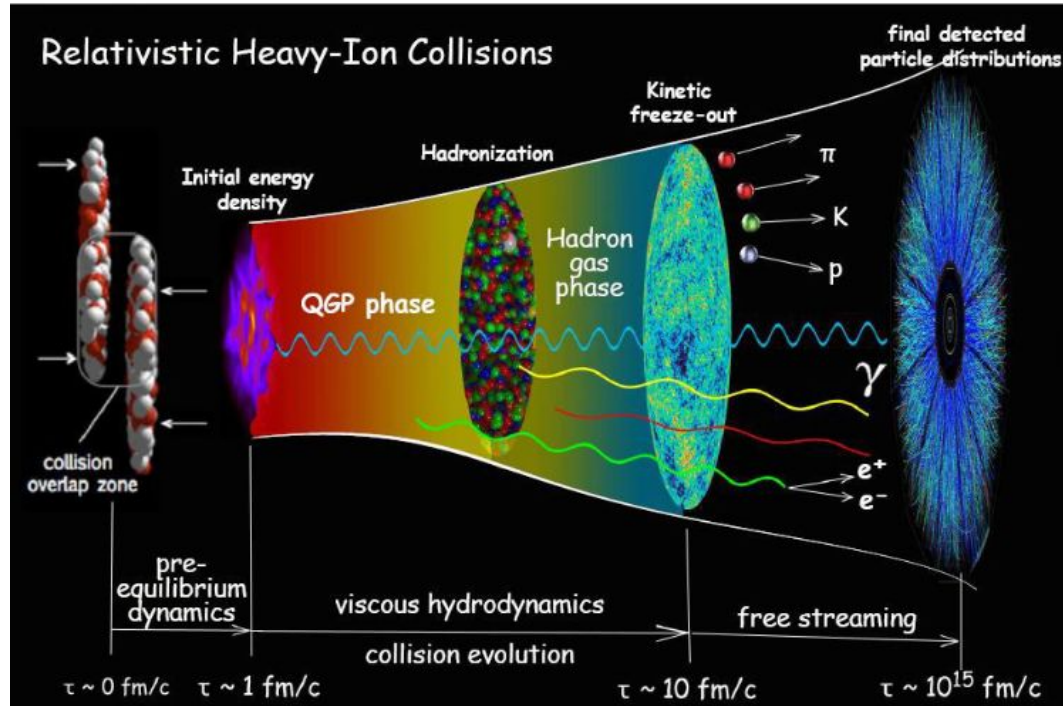
SIS-18

- $\sqrt{s_{NN}} \sim 2.5 \text{ GeV}$

Nuclotron

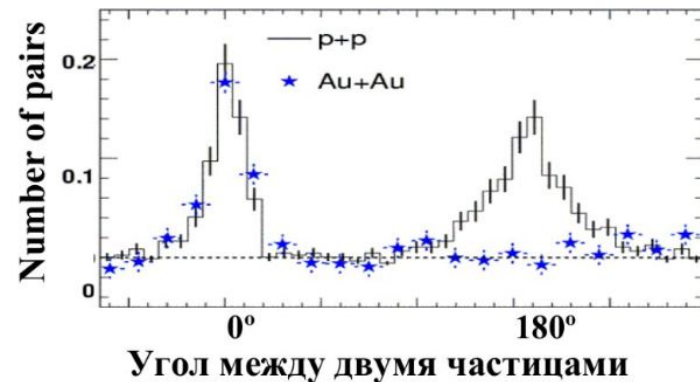
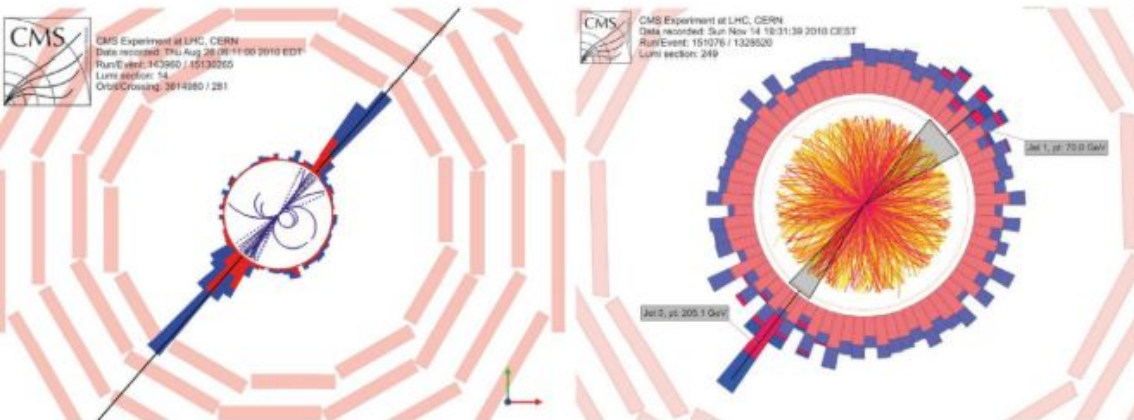
- $\sqrt{s_{NN}} \sim 2-4 \text{ GeV}$

# Эволюция системы в столкновениях тяжелых ионов



- В экспериментах мы можем измерить частицы только в конечном состоянии
- Вывод о свойствах раннего состояния столкновений делается на основе сравнения результатов измерений наблюдаемых величин с модельными прогнозами.

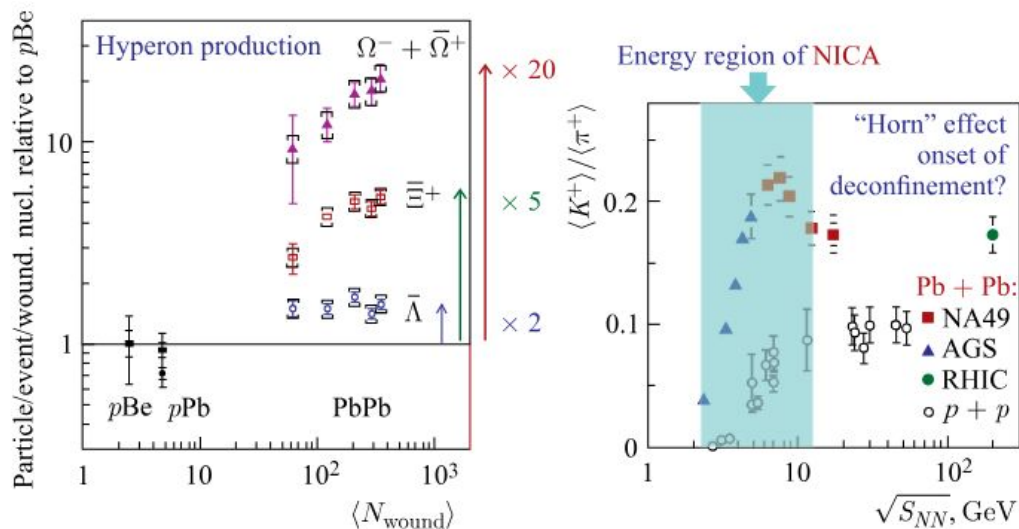
# Сигнал КГМ: Гашение струй (jet quenching)



- В p-p столкновениях образуются две «back-to-back» струи
- В A-A столкновениях вторая струя подавляется при прохождении через плотную среду за счёт сильных взаимодействий

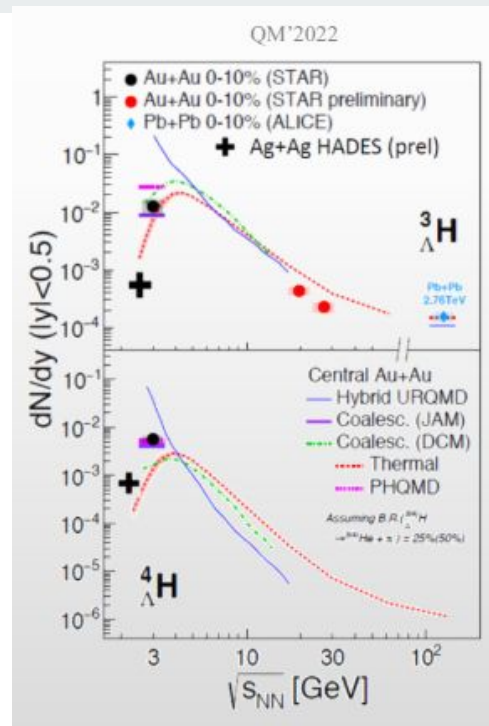
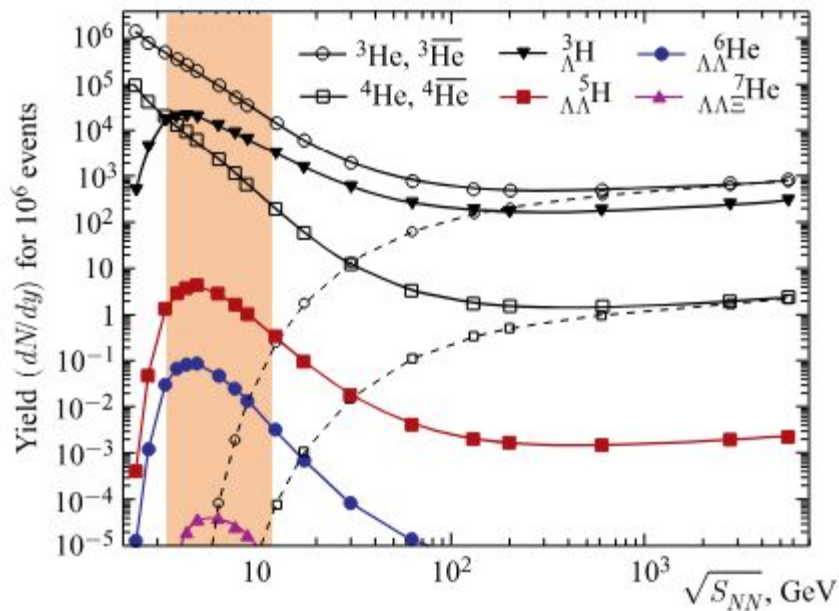
# Сигнал КГМ: усиление выхода странных частиц

- С середины 80-х годов усиление странности считается признаком образования КГП (Phys. Rev. Lett. 48, 1066)
- Экспериментально наблюдается в столкновениях тяжелых ионов при энергиях AGS, SPS, RHIC и LHC.
- При возникновении КГП глюоны будут создавать  $ss$  пары, приводящие к увеличению выхода странных частиц
- Также наблюдаем этот эффект и для малых систем в столкновениях с высокой множественностью





# КГП: гиперядра



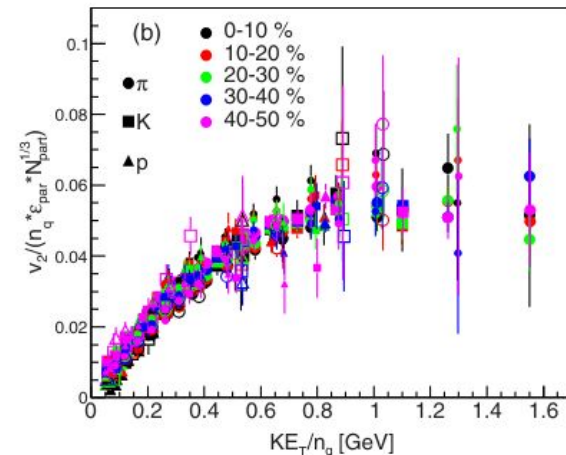
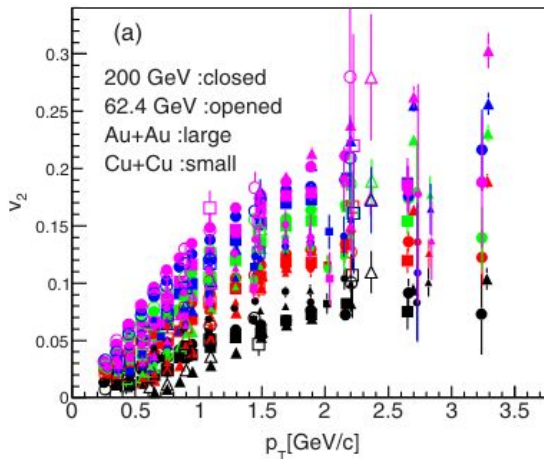
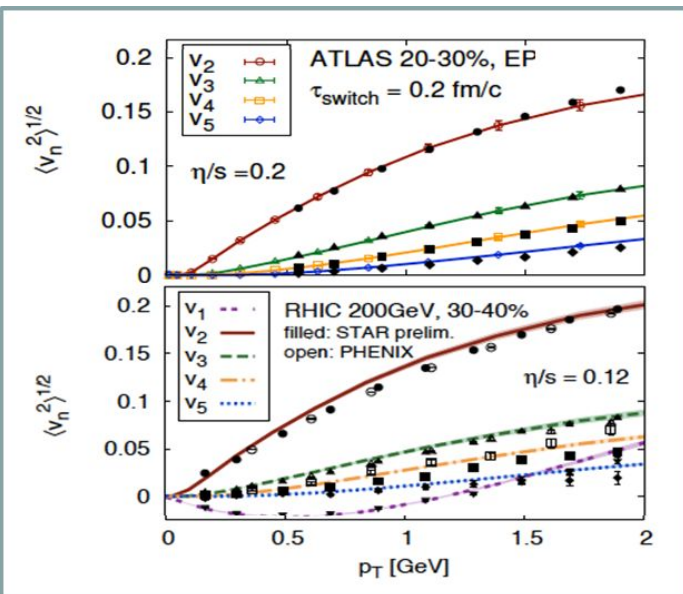
- Ожидается увеличенный выход гиперядер при низких энергиях
- Представляет интерес для ядерной астрофизики: ожидается, что гиперядра будут существовать во внутреннем ядре нейтронных звезд

# Сигнал КГП: коллективные потоки (высокие энергии)

- Сравнивая экспериментальные данные с гидродинамическими прогнозами, было установлено, что QGM ведет себя как идеальная жидкость.
- NCQ-скейлинг -> коллективные эффекты зарождаются на стадии деконфайнмента

Gale, Jeon et al., Phys. Rev. Lett. 110, 012302

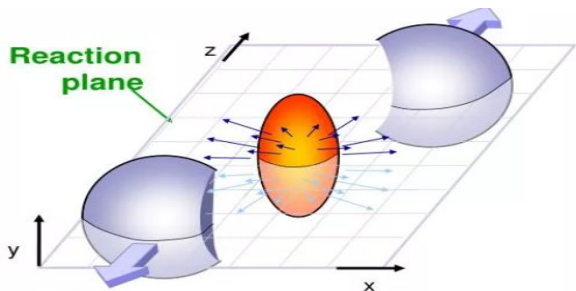
Phys.Rev.C 92 (2015) 3, 034913





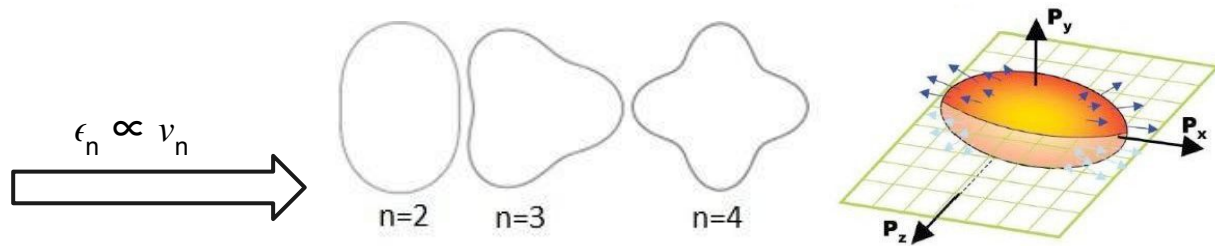
# Коллективные потоки

Spatial anisotropy of the nuclear overlap region



$$\epsilon_n = \sqrt{\frac{\langle r^n \cos n\phi \rangle + \langle r^n \sin n\phi \rangle}{\langle r^n \rangle}}$$

Azimuthal distribution of produced particles wrt to reaction plane ( $\Psi_n$ )



$$\frac{dN}{d\phi} \propto \left( 1 + 2 \sum_n v_n \cos[n(\phi - \Psi_n)] \right)$$

**Collective flow:**  $v_n = \langle \cos[n(\phi - \Psi_n)] \rangle$

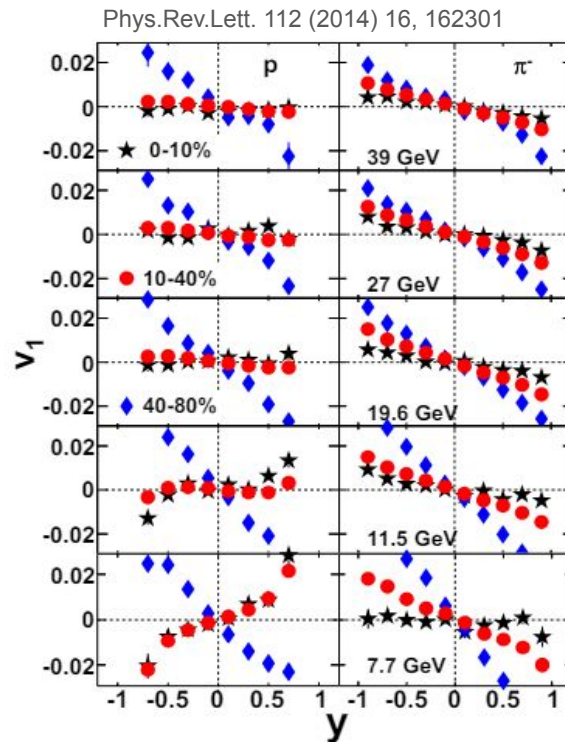
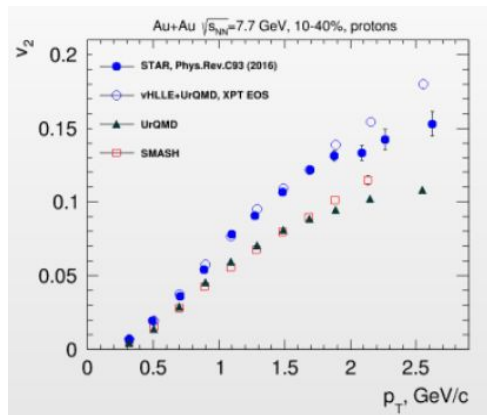
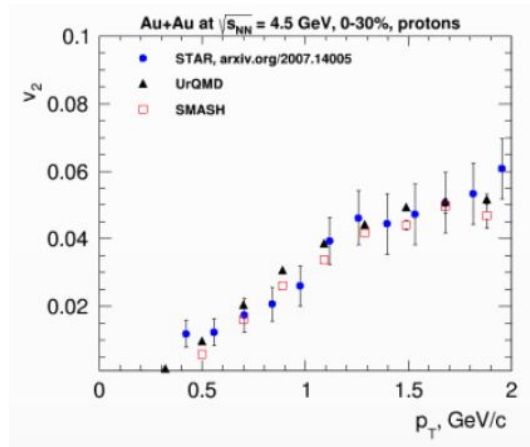
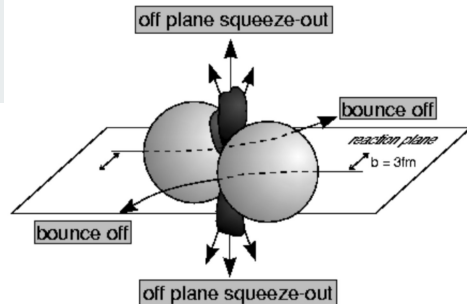
$v_1$  is called directed and  $v_2$  is called elliptic flow

# Коллективные потоки (низкие энергии)

При более низких энергиях, потоки чувствительны к расширению области взаимодействия и к взаимодействию с спектаторами:

- RHIC @ 200 GeV ( $2R/\gamma$ )  $\sim 0.1$  fm/c
- AGS @ 3-4.5 GeV ( $2R/\gamma$ )  $\sim 9-5$  fm/c

$v_1$  и  $v_2$  демонстрируют сильную зависимость от центральности, энергии столкновения и типа частиц.



Область энергии NICA -> Исследование транспортные свойства КГП и начало фазового перехода



## Запасные слайды

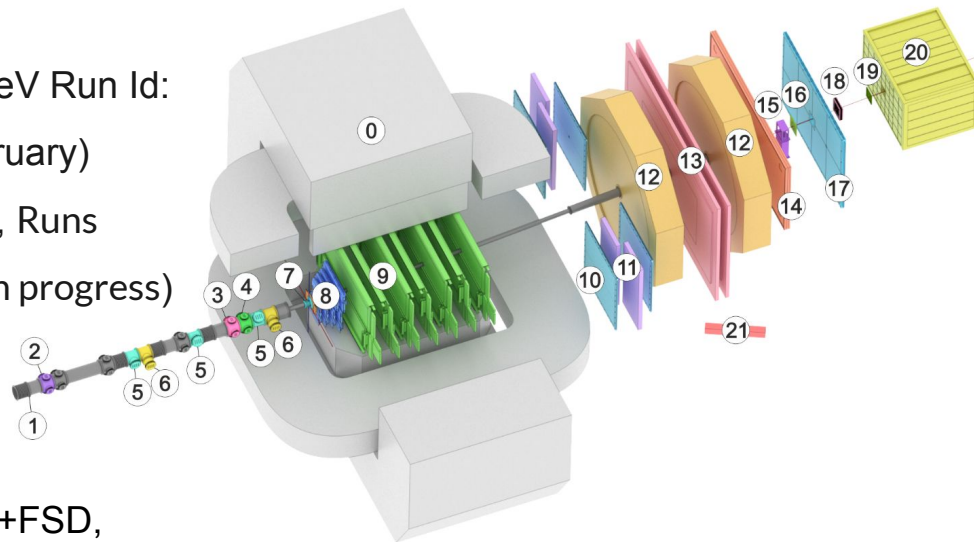
# The BM@N experiment

## Data:

- run8 Xe-Csl @3.8A GeV Run Id:
  - 6600-8300 (February)
  - 7200-8300 (May, Runs 6900-7200 are in progress)
- VF tracking was used

## QA Run-by-Run:

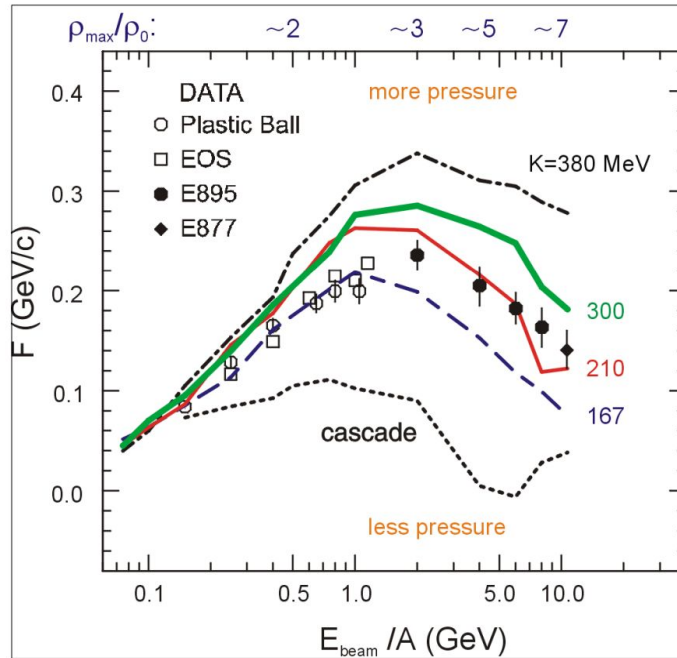
- Tracking system GEM+FSD,
- BC, FD
- FHCal
- FQH
- TOF-400, TOF-700



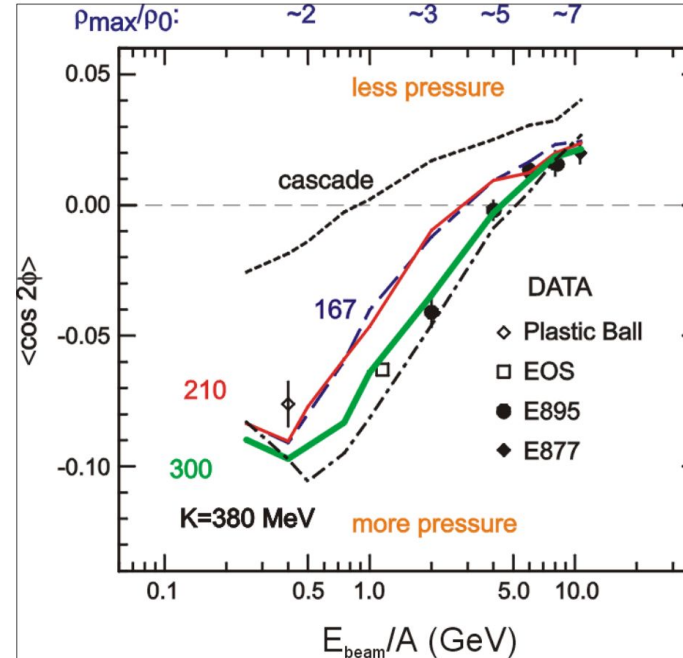
- Magnet SP-41 (0)
- Vacuum Beam Pipe (1)
- BC1, VC, BC2 (2-4)
- SiBT, SiProf (5, 6)
- Triggers: BD + SiMD (7)
- FSD, GEM (8, 9)
- CSC 1x1 m<sup>2</sup> (10)
- TOF 400 (11)
- DCH (12)
- TOF 700 (13)
- ScWall (14)
- FD (15)
- Small GEM (16)
- CSC 2x1.5 m<sup>2</sup> (17)
- Beam Profilometer (18)
- FQH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

# Interpretation of the previous flow data

$v_1$  suggests  $K \approx 210$  MeV



$v_2$  suggests  $K = 310 \div 380$  MeV



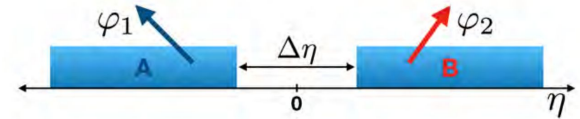
- Данные в эксперименте E895 имеют неоднозначную интерпретацию:  $v_1$  предполагает жесткое EOS, тогда как  $v_2$  соответствует мягкому EOS.
- Дополнительные измерения необходимы для уточнения предыдущих измерений.

# Methods for $v_n$ measurements

- **Sub-event 2-particle Q-cumulants  $v_2\{2\}$** :  $\Delta\eta=0.1$  is applied between 2 sub-events A, B to suppress non-flow

$$Q_n = \sum_{i=1}^M e^{in\phi} \quad \langle 2 \rangle_{a|b} = \frac{Q_{n_a} Q_{n,b}^*}{M_a M_b}$$

$$v_2\{2\} = \sqrt{\langle \langle 2 \rangle \rangle_{a|b}}$$

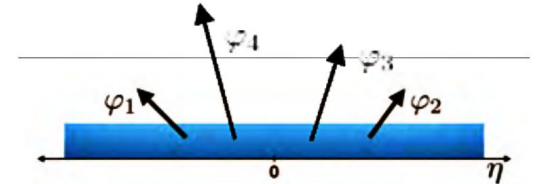


- **4-particle Q-cumulants  $v_2\{4\}$**

$$\langle 2 \rangle = \frac{|Q_n|^2 - M}{M(M-1)}$$

$$\langle 4 \rangle = \frac{|Q_n|^4 + |Q_{2n}|^2 - 2\Re[Q_{2n} Q_n^* Q_n^*] - 4(M-2)|Q_n|^2 - 2M(M-3)}{M(M-1)(M-2)(M-3)}$$

$$v_2\{4\} = \sqrt[4]{2 \langle \langle 2 \rangle \rangle^2 - \langle \langle 4 \rangle \rangle}$$





# Sensitivity of $v_2\{QC\}$ to flow fluctuations and non-flow

- Non-flow contribution for k-particle cumulants:

$$\delta_k \sim 1/M^{k-1}$$

- Elliptic flow fluctuations:  $\sigma_{v_2}^2 = \langle v_2^2 \rangle - \langle v_2 \rangle^2$
- Assuming  $\sigma_{v_2} \ll \langle v_2 \rangle$ , fluctuations enhance

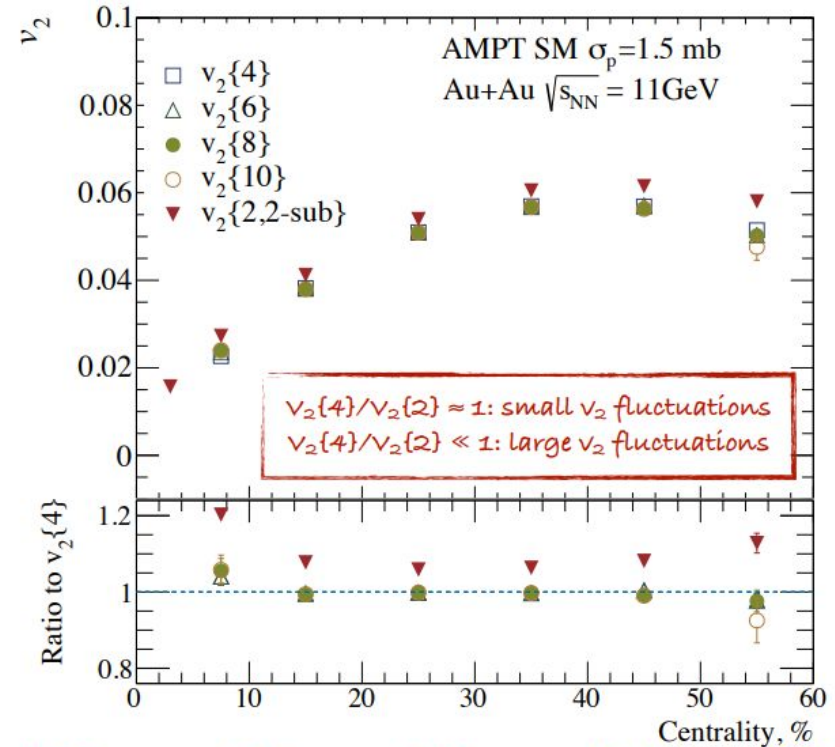
$v_2\{2\}$  and suppress  $v_2\{2k, k>1\}$  compared to  $\langle v_2 \rangle$

$$v_2\{2\} \approx \langle v_2 \rangle + \frac{1}{2} \frac{\sigma_{v_2}^2}{\langle v_2 \rangle}$$

$$v_2\{4\} \approx \langle v_2 \rangle - \frac{1}{2} \frac{\sigma_{v_2}^2}{\langle v_2 \rangle}$$

- Assuming a Gaussian form of fluctuations

$$v_2\{4\} \approx v_2\{6\} \approx v_2\{8\} \approx v_2\{10\}$$

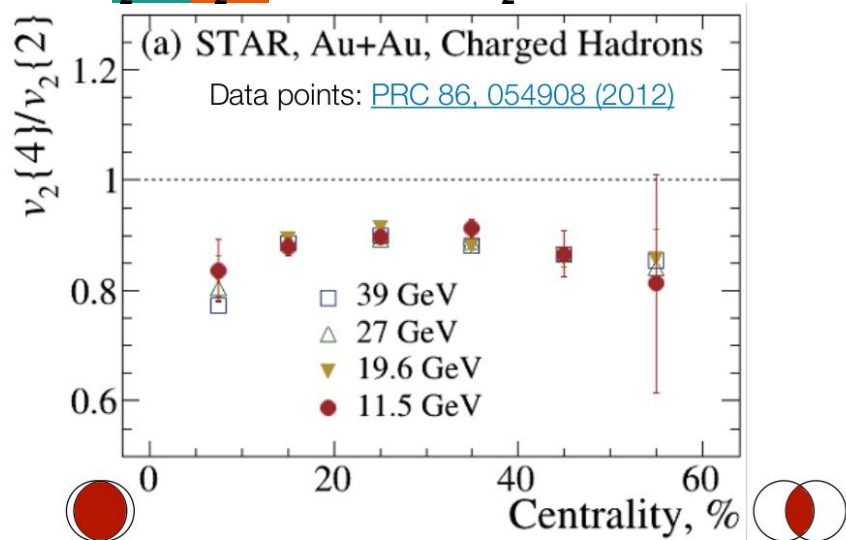


$$v_2\{2\} > v_2\{4\} \approx v_2\{6\} \approx v_2\{8\} \approx v_2\{10\}$$

# Motivation: study of $v_2$ fluctuation

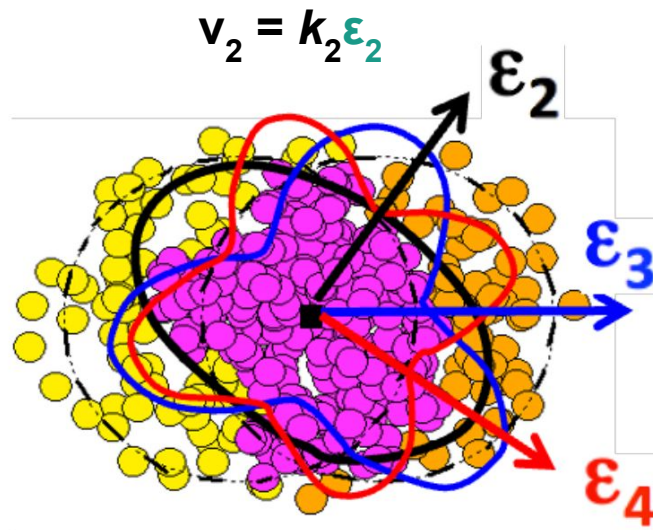
$v_2\{4\}/v_2\{2\} \approx 1$ : small  $v_2$  fluctuations

$v_2\{4\}/v_2\{2\} \ll 1$ : large  $v_2$  fluctuations



$v_2$  fluctuations at  $\sqrt{s_{NN}} = 11.5 - 39$  GeV  
observed in STAR:

- Weak dependence on collision energy



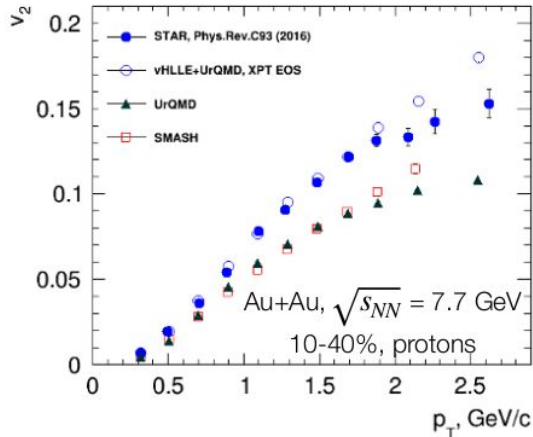
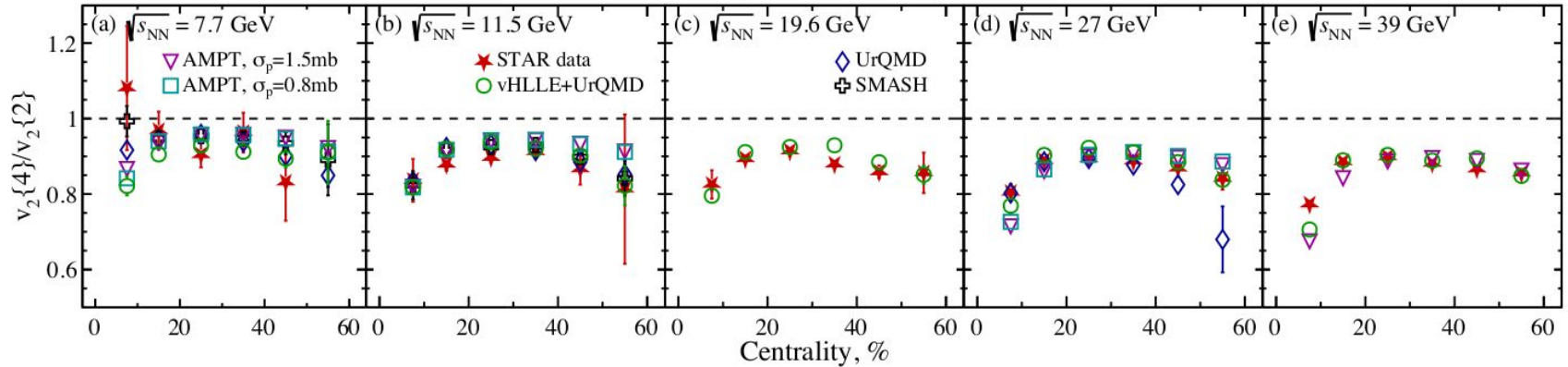
- Indicate a dominated initial state driven fluctuations  $\sigma\epsilon_2$
- Provide constraints for IS models and shear viscosity  $\eta(T/s)$

How about  $v_2$  fluctuations at NICA energies?

# $v_2$ fluctuations at $\sqrt{s_{NN}} = 7.7 - 39$ GeV

Au+Au, charged hadrons,  $|\eta| < 1$

Particles 2023, 6(1), 17-29;



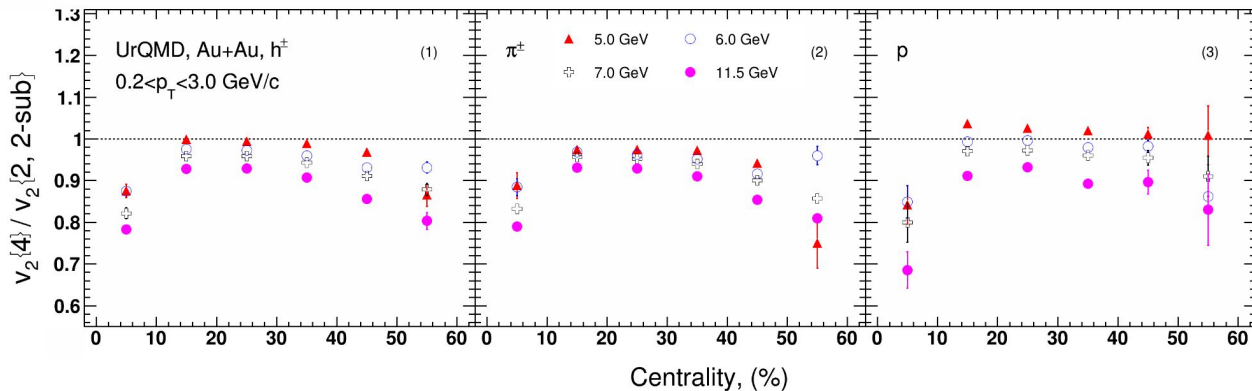
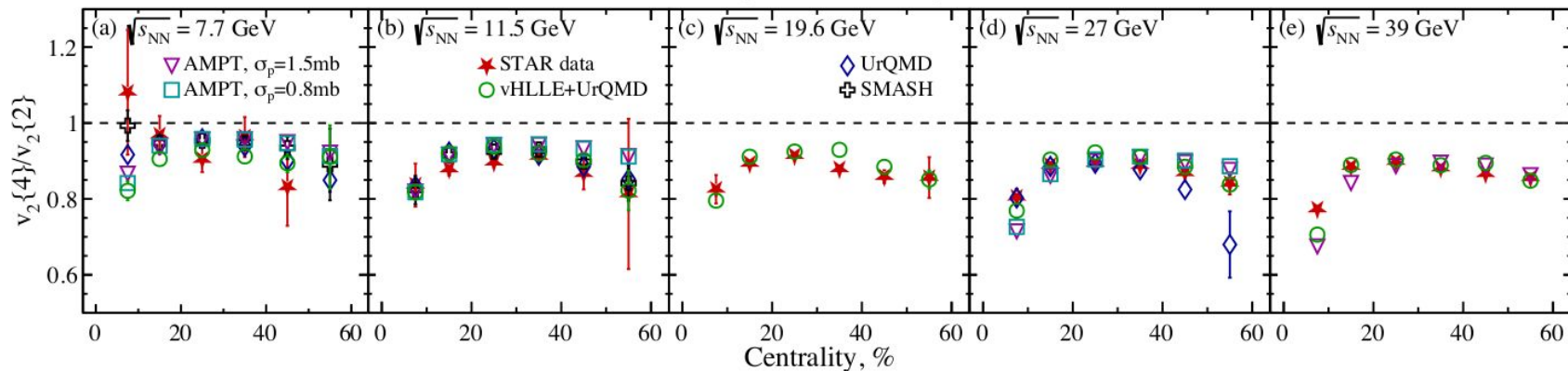
- At  $\sqrt{s_{NN}} > 7.7$  GeV pure string/cascade models without QGP phase underestimate  $v_2$
- $v_2$  fluctuations observed in STAR can be reproduced by model either with or without partonic phase description
  - $v_2$  fluctuations dominated by  $\epsilon_2$  fluctuations
  - $v_2\{4\}/v_2\{2\}$ : direct probe for the initial state conditions

What about  $v_2$  fluctuations at lower energies?

# $v_2$ fluctuations at $\sqrt{s_{NN}} = 7.7 - 39$ GeV

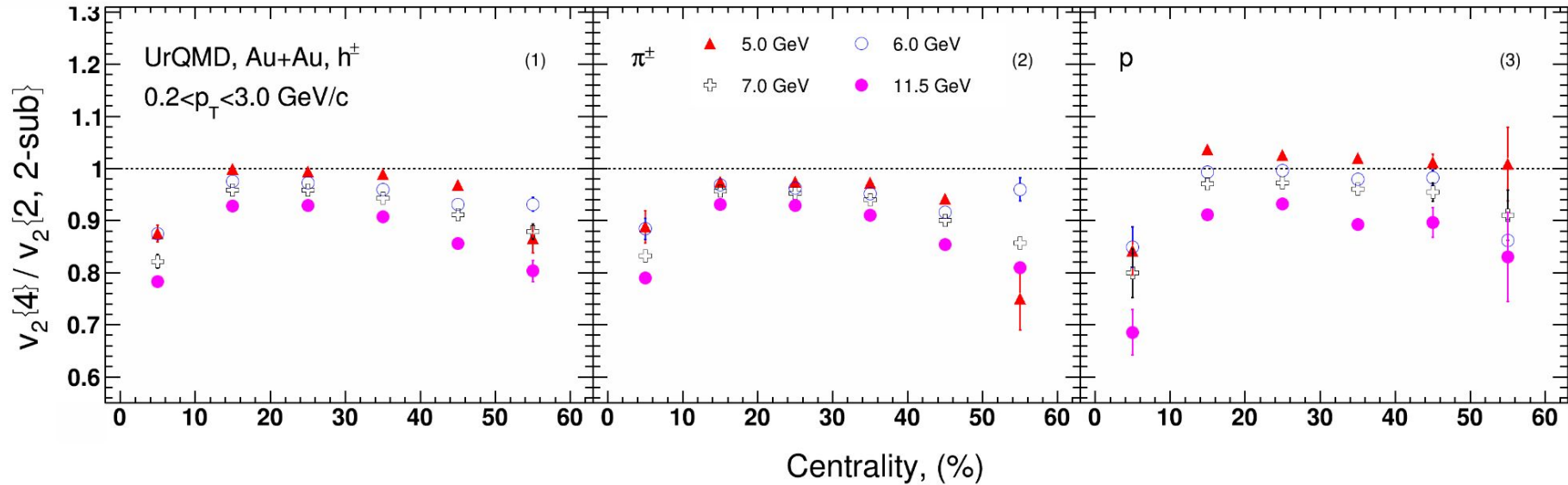
Au+Au, charged hadrons,  $|\eta| < 1$

Particles 2023, 6(1), 17-29;



$v_2$  fluctuations decrease with decreasing energy at NICA energy range at  $\sqrt{s_{NN}} = 4-11.5$  GeV

# $v_2$ fluctuations at $\sqrt{s_{NN}} = 5 - 11.5$ GeV

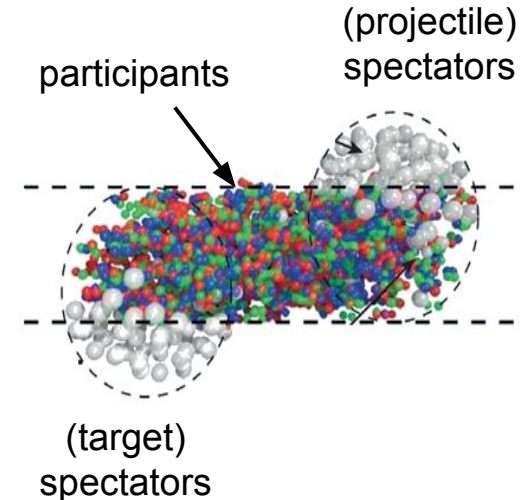


- $v_2$  fluctuations decrease with decreasing energy at NICA energy range at  $\sqrt{s_{NN}} = 4-11.5$  GeV
- The ratio  $v_2\{4\}/v_2\{2}$  has particle dependence

# 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:

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

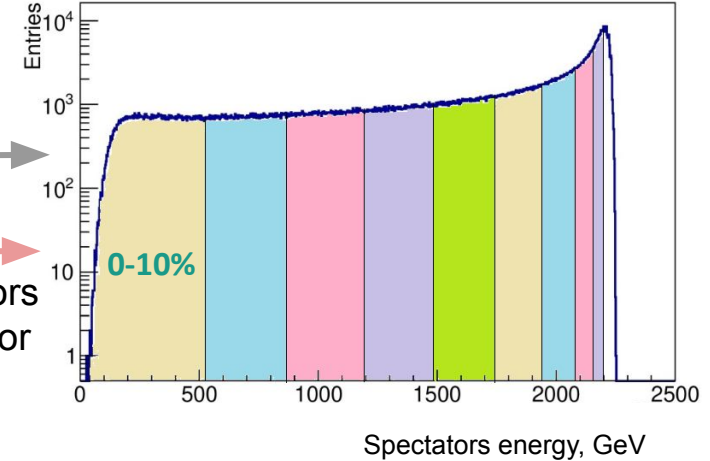
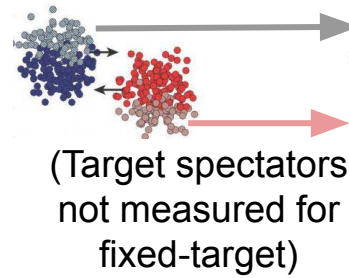
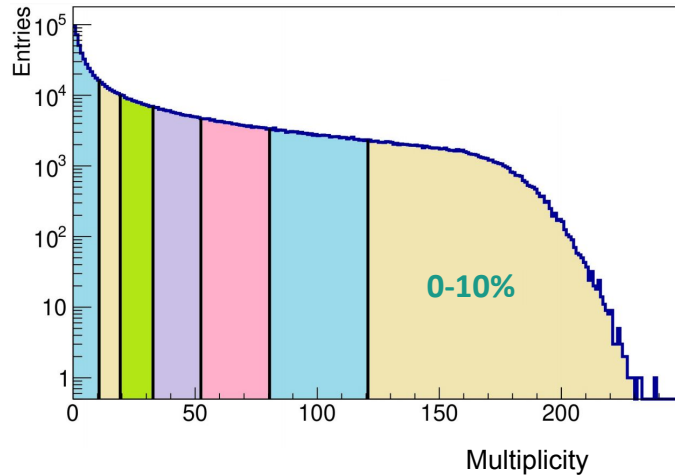




# Types of centrality estimators

Produced charged particles

Spectators



# MC Glauber model

MC Glauber model provides a description of the initial state of a heavy-ion collision

- Independent straight line trajectories of the nucleons
- A-A collision is treated as a sequence of independent binary NN collisions
- Monte-Carlo sampling of nucleons position for individual collisions

## Main model parameters

- Colliding nuclei

- Inelastic nucleon-nucleon cross section ( $\sigma_{\text{inel}}^{\text{NN}}$ )  
(depends on collision energy)

- Nuclear charge densities (Wood-Saxon distribution)

$$\rho(r) = \rho_0 \cdot \frac{1 + w(r/R)^2}{1 + \exp\left(\frac{r-R}{a}\right)}$$

## Geometry parameters

$b$  – impact parameter

$N_{\text{part}}$  – number of nucleons participating in the collision

$N_{\text{spec}}$  – number of spectator nucleons in the collision

$N_{\text{coll}}$  – number of binary NN collisions

Glauber Modeling in High Energy Nuclear Collisions:  
ARNPS57:205-243,2007

