



Определение центральности столкновения ядер при использовании адронного калориметра

А.Б.Курепин (ИЯИ РАН), А.Г.Литвиненко и Е.И.Литвиненко (ОИЯИ)

Содержание

- 1.Значение определения центральности в физике тяжелых ионов
- 2.Определение центральности в проекте ALICE
- 3.Прямая и обратная задачи при определении центральности
- 4.Оценка разрешения параметра столкновения при энергиях NICA и FAIR
- 5.Роль вторичных процессов
- 6.Возможные методы определения центральности в проектах MPD и BM&N
- 7.Выводы

XIII Черенковские чтения, ФИАН, Москва, 14 апреля 2020 г.

Для определения коэффициентов анизотропного потока частиц в зависимости от центральности точность определения центральности должна быть не хуже 10 %

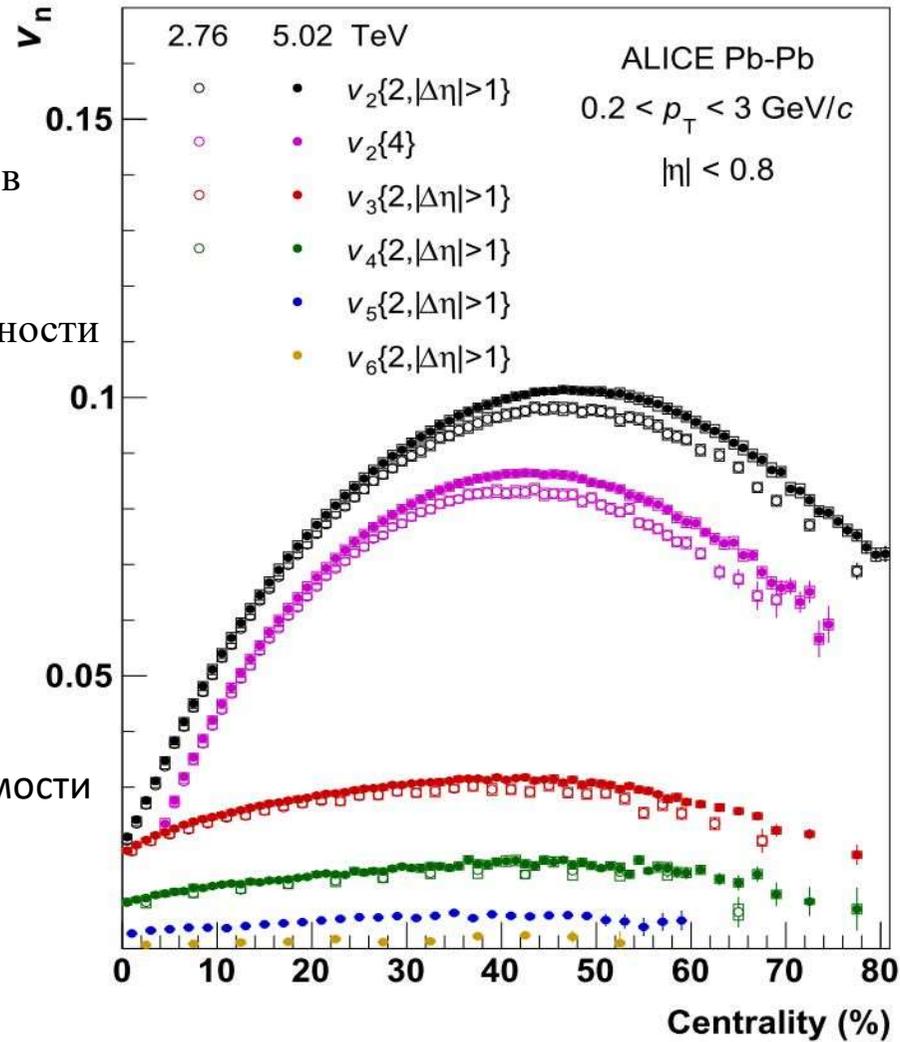


Рис. 1. Коэффициенты анизотропного потока в зависимости от центральности столкновения ядер свинца

ALICE Collaboration
 JHEP 1807 (2018) 103

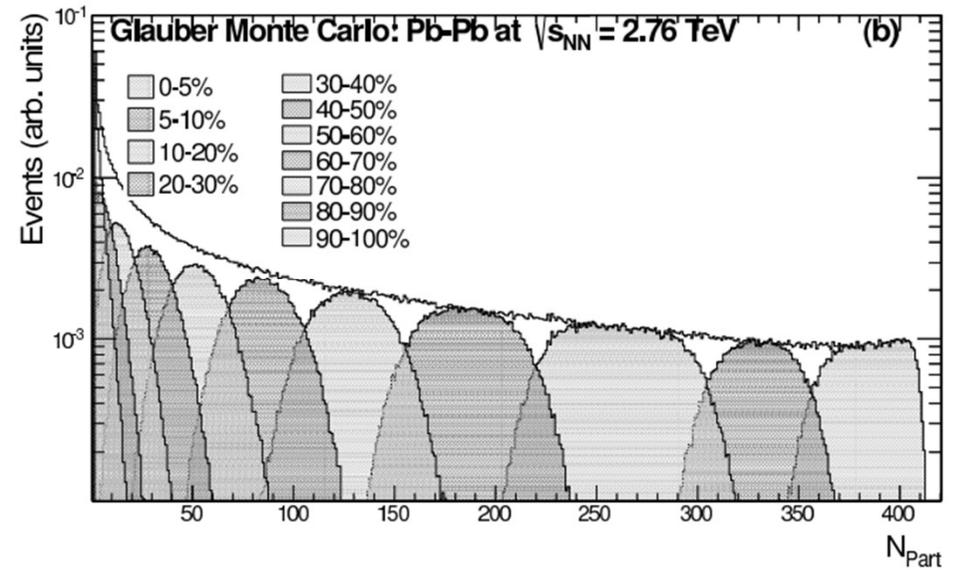
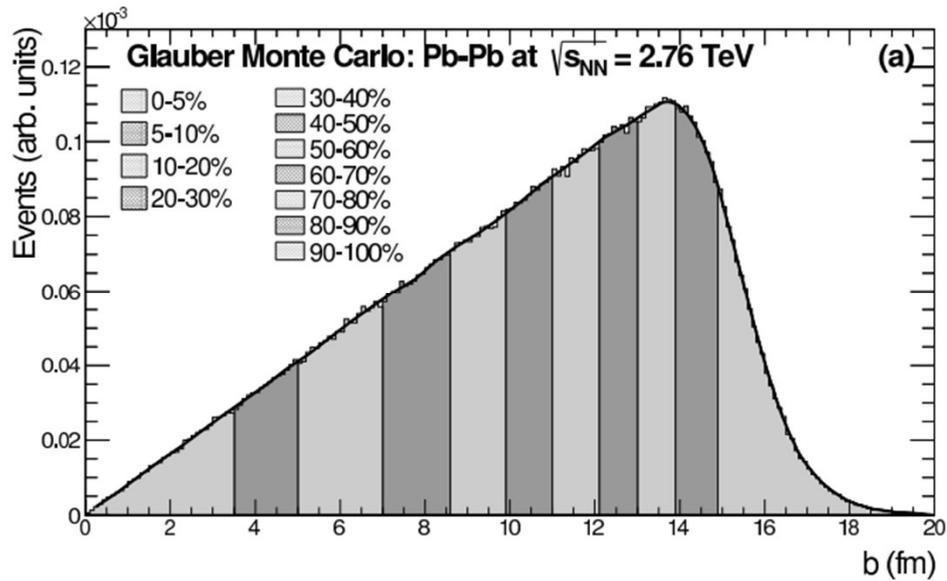


Рис.2. Распределение параметра столкновения (слева) и числа участников (справа) по классам центральности, выбранным по величине адронного сечения в процентах

Определение центральности возможно по измерению числа «участников»

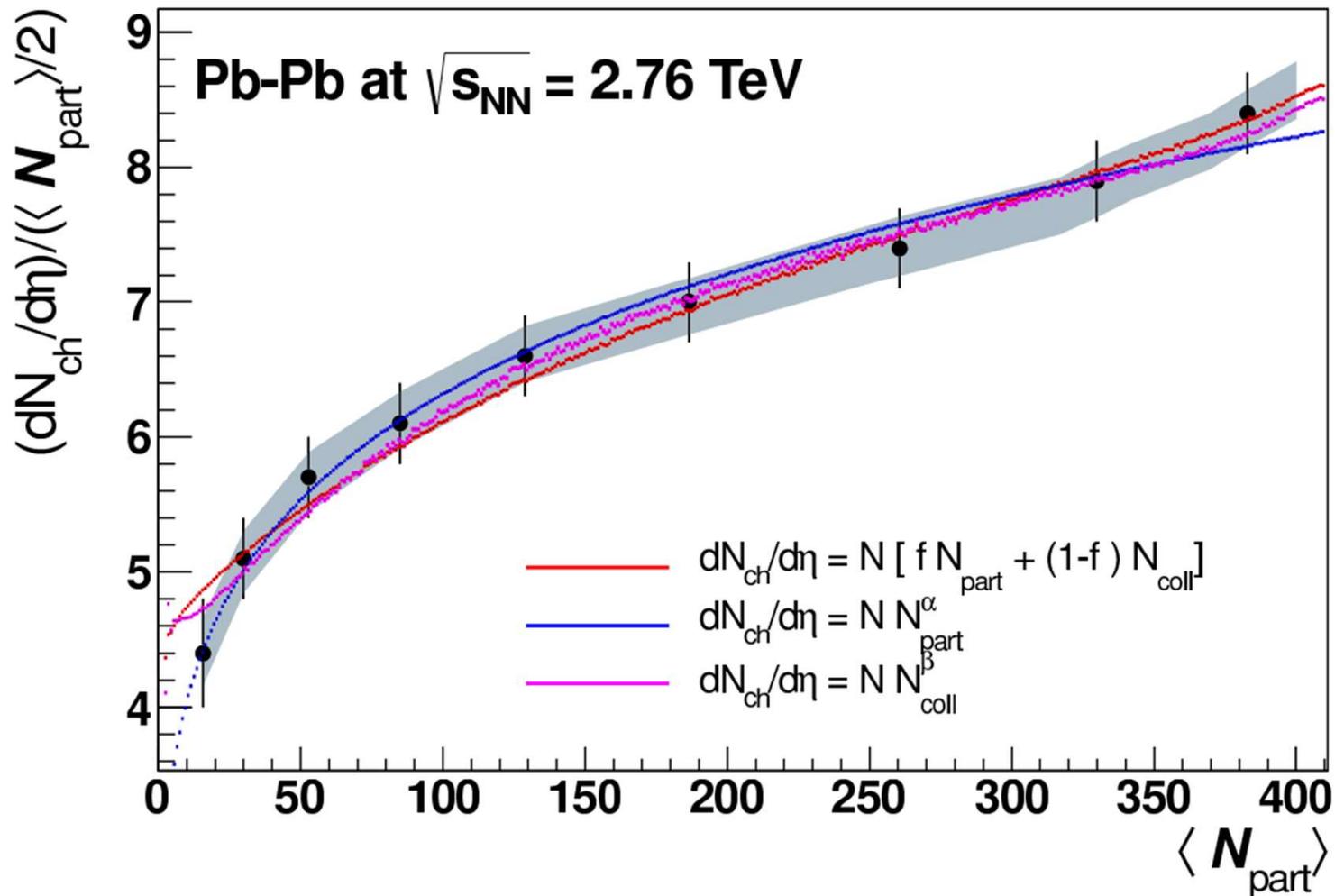


Рис.3. Зависимость полного числа выхода заряженных частиц от числа участников в сравнении с моделью Глаубера

ALICE Collaboration Phys. Rev. C88 (2013) 044909

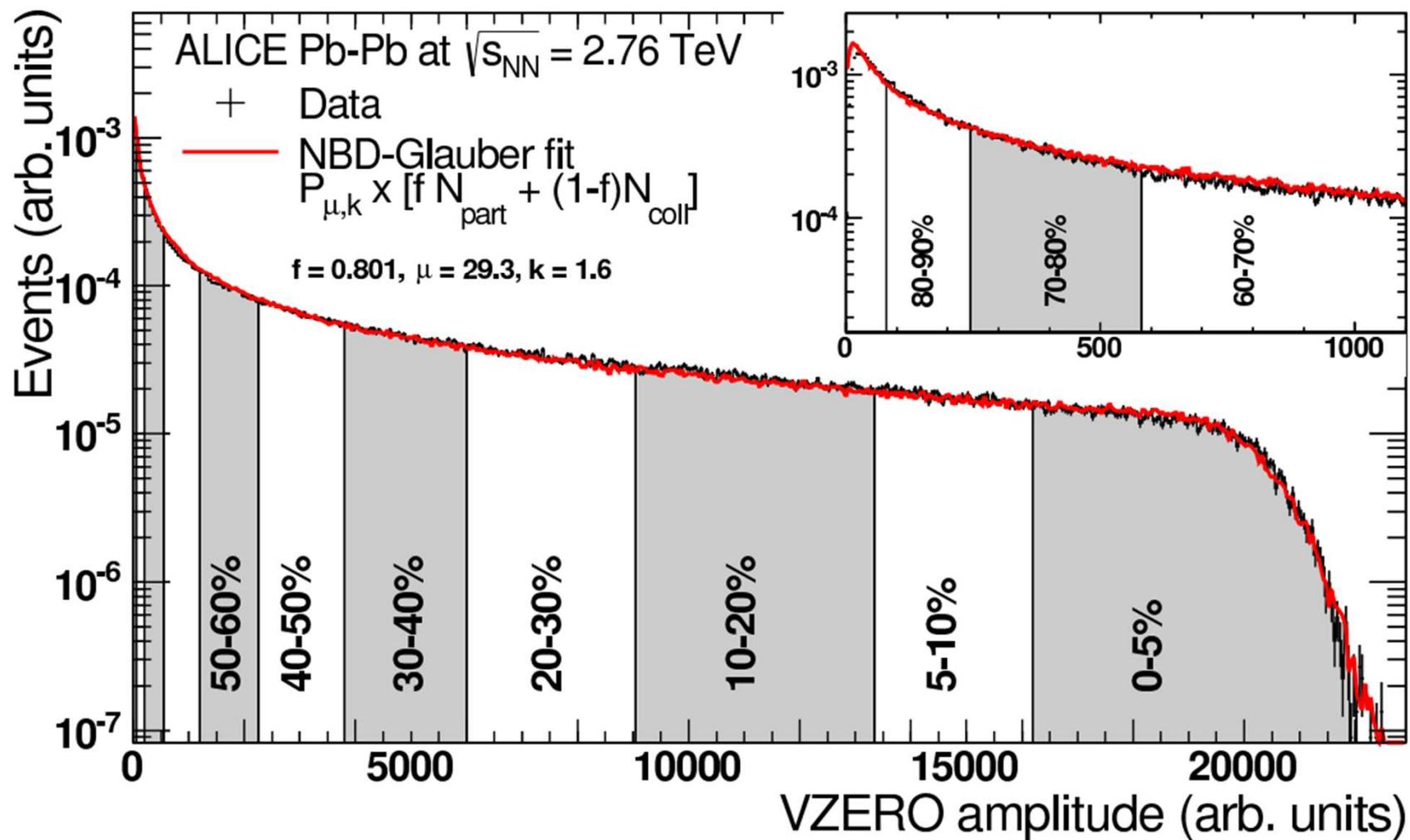


Рис.4. Распределение амплитуд V0 детектора и сравнение с расчетом по модели Глаубера

Стандартный метод определения центральности в эксперименте ALICE
 ALICE Collaboration Phys. Rev. C88 (2013) 044909

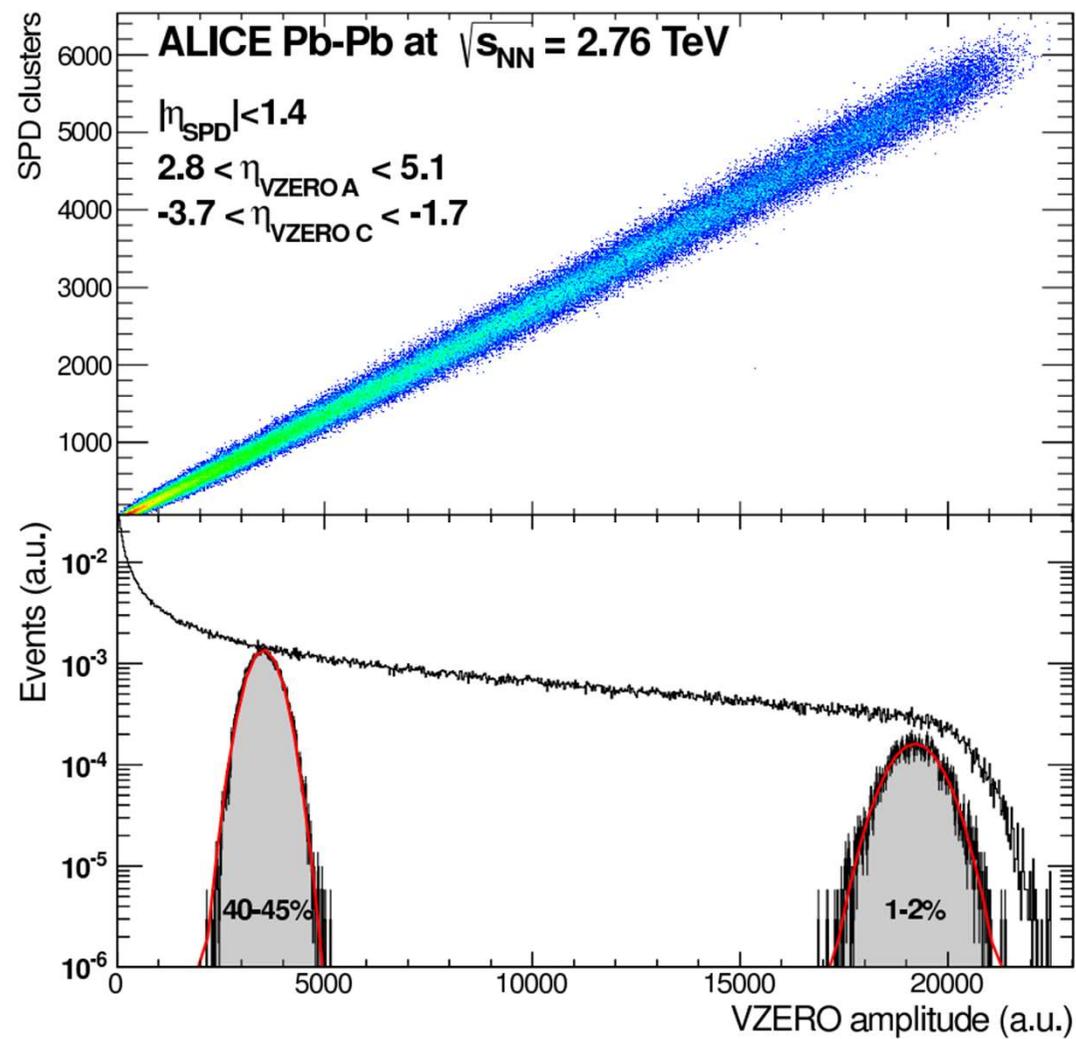


Рис.5. Корреляция множественности SPD детектора и амплитуды V0 детектора
 ALICE Collaboration Phys. Rev. C88 (2013) 044909

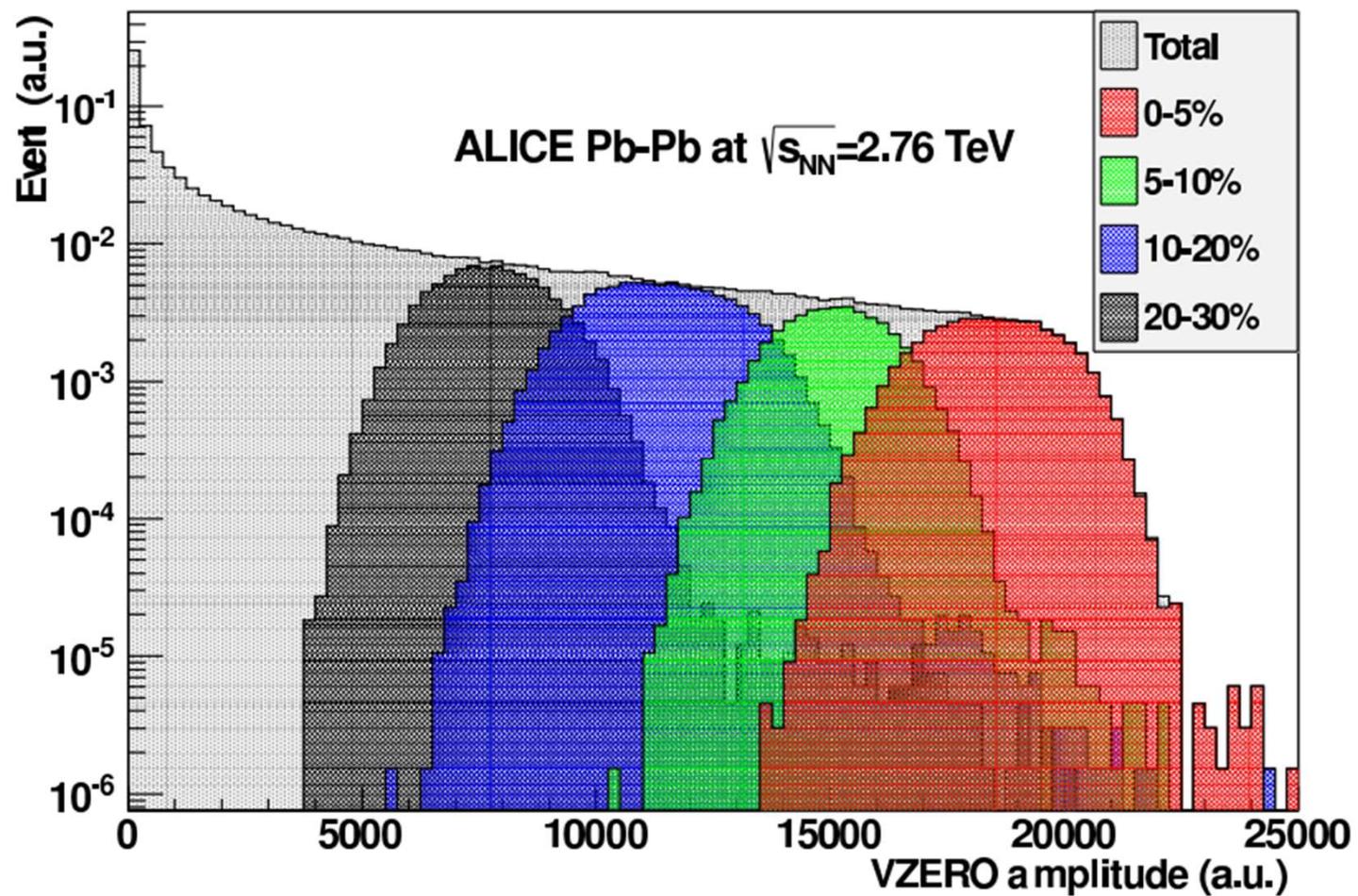


Рис.6. Амплитуда V0 детектора для разных классов центральности
ALICE Collaboration Phys. Rev. C88 (2013) 044909

Zero Degree Calorimeter (ZDC)
можно использовать для
определения центральности
при условии его хорошего
разрешения по энергии
на уровне 5-10 %

$$N_{\text{part}} = 2A - E_{\text{ZDC}} / E_b$$

$A = 208.$

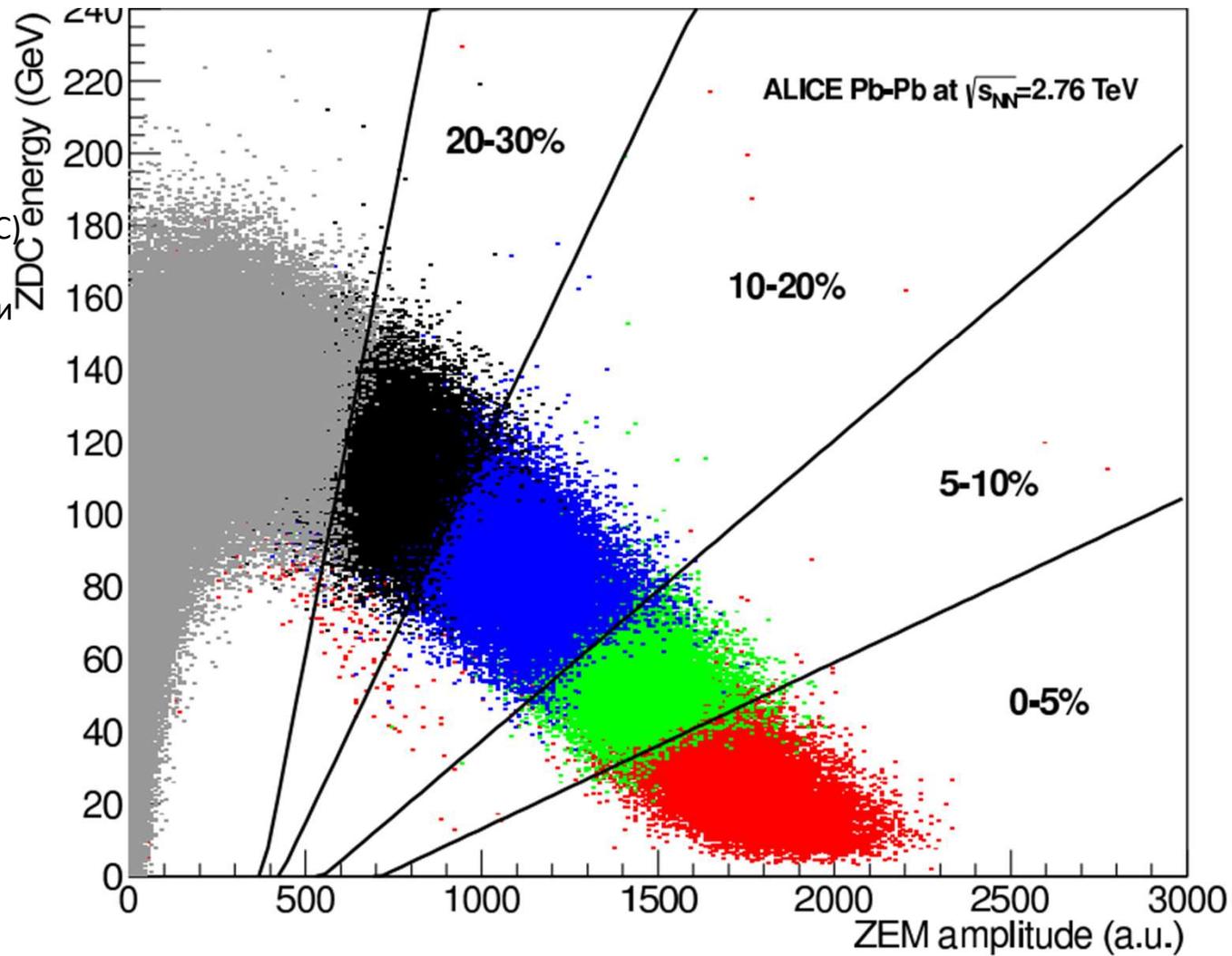


Рис.7. Зависимость энергии, выделенной в ZDC от амплитуды электромагнитного калориметра ZEM с отдельными классами по центральности
ALICE Collaboration Phys. Rev. C88 (2013) 044909

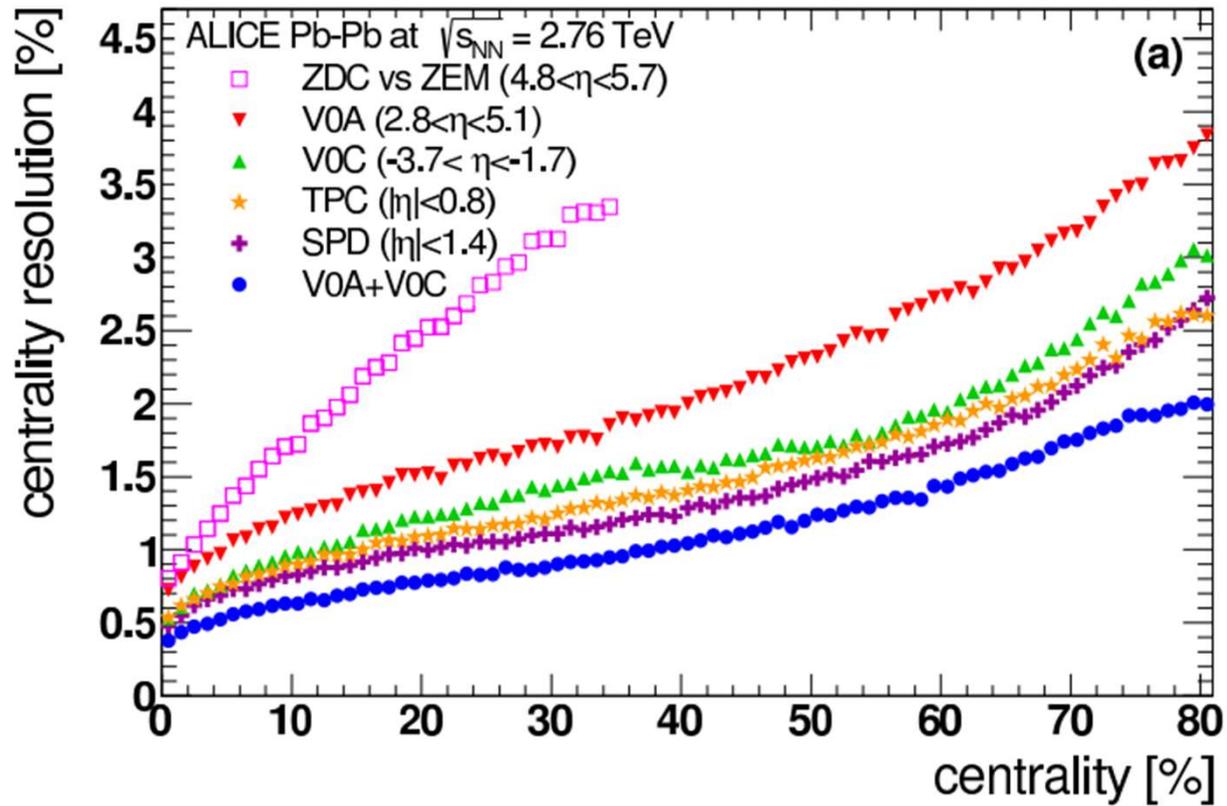
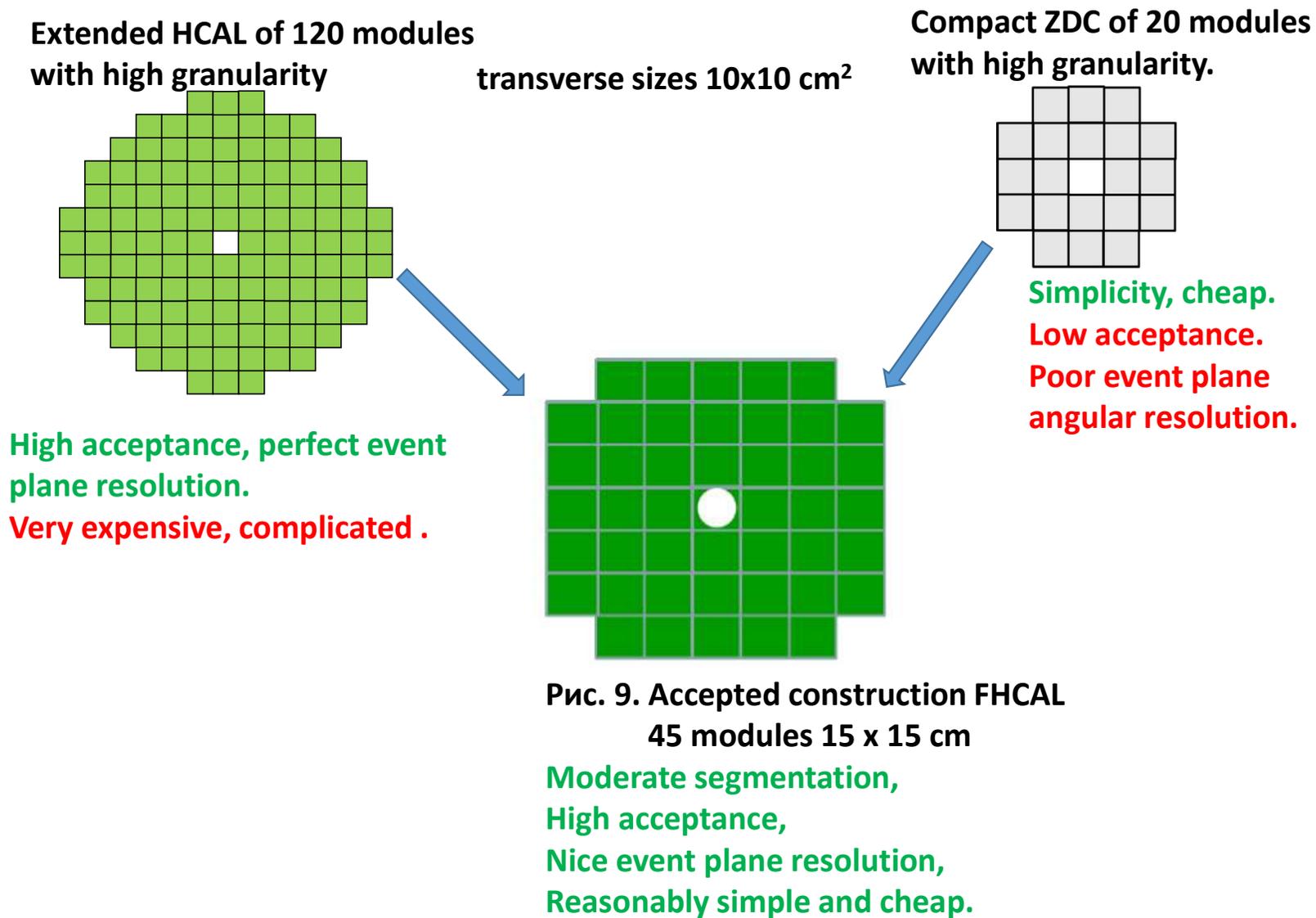


Рис.8. Разрешение детекторов по центральности, рассчитанное по отклонению от среднего значения

Разрешение по центральности (или по значению параметра столкновения) составляет несколько процентов в ALICE

ALICE Collaboration Phys. Rev. C88 (2013) 044909

Проблема FHCAL/MPD – наличие отверстия для прохождения пучка



Centrality determination from the energy depositions in calorimeter.

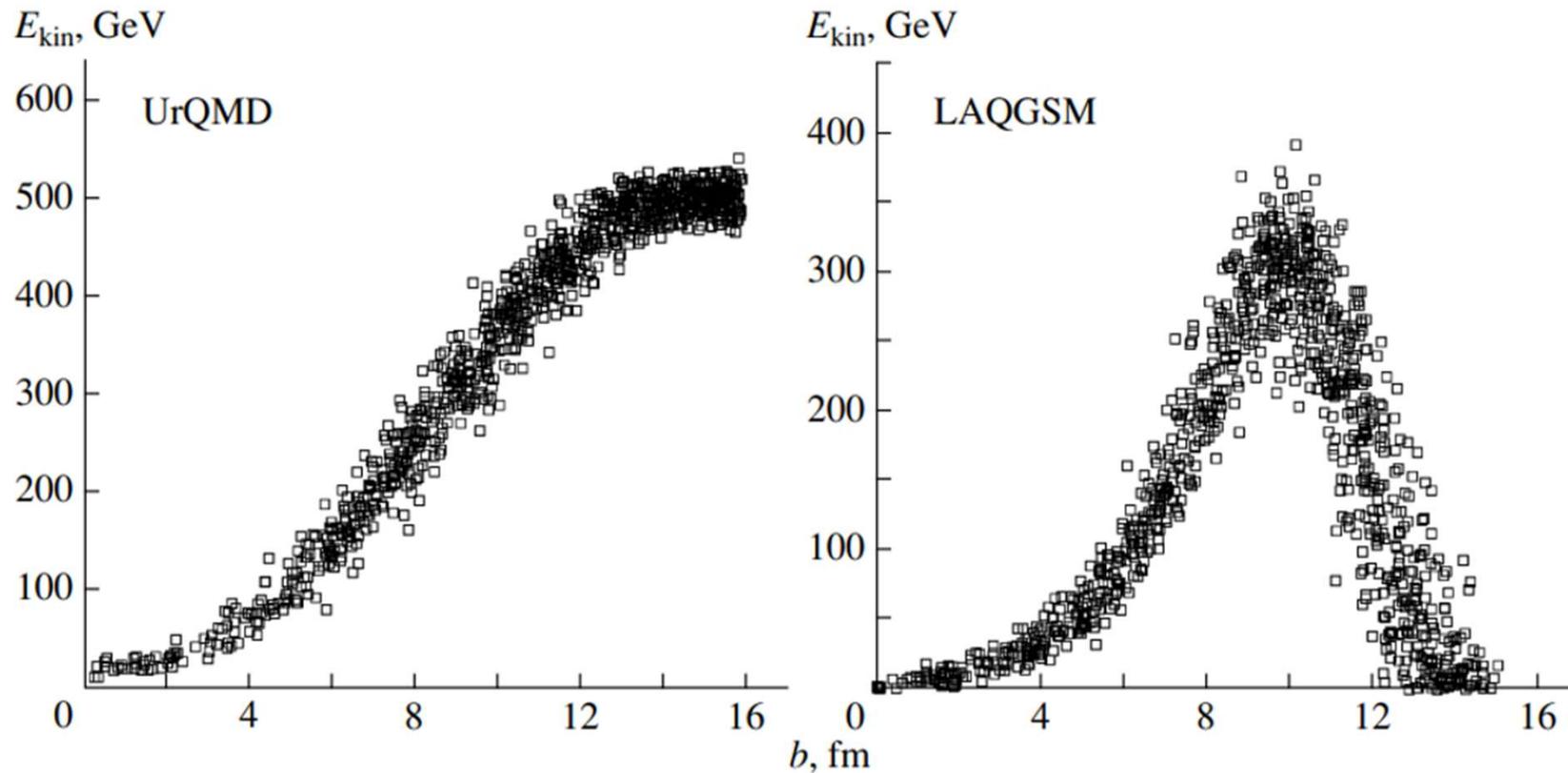


Рис. 10. Столкновение ядер золота при энергии 5 ГэВ в с.ц.м.

UrQMD дает неправильный результат, т.к. не учитывает наличие фрагментов. При больших параметрах столкновения (b) фрагменты уходят в отверстие для пучка.

M.Golubeva et al. “ Nuclear-Nuclear Collision Centrality Determination by the Spectators Calorimeter for the MPD Setup at the NICA Facility “

Yad.Fiz. 76 (2013) 2-17

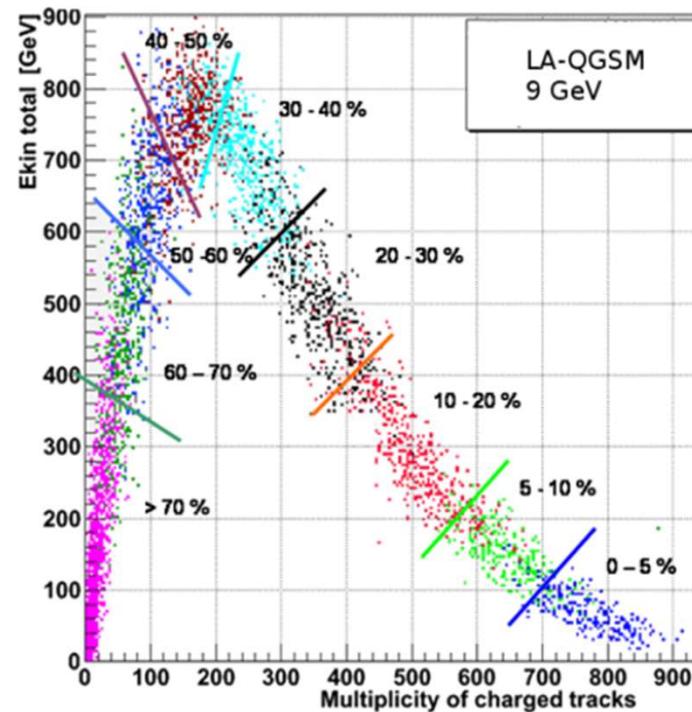
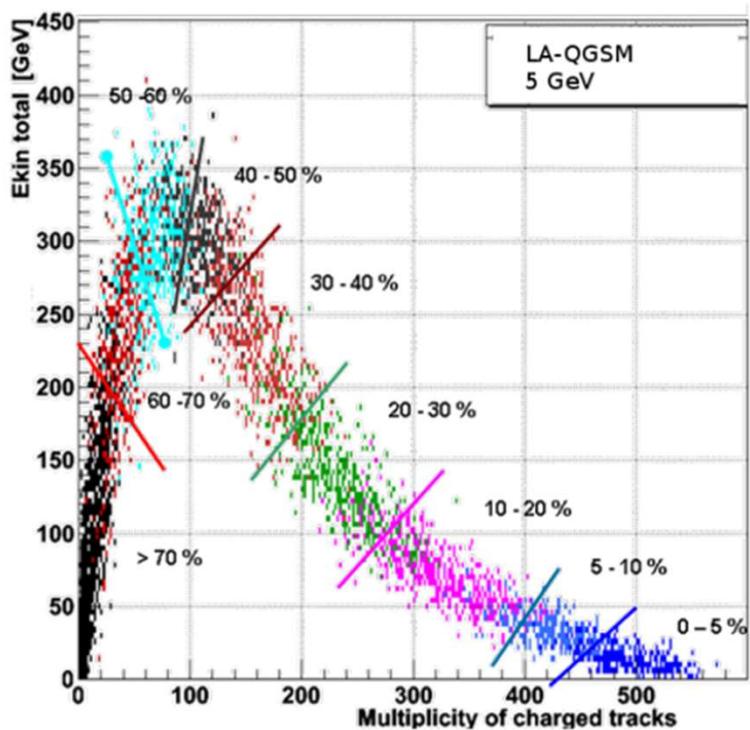


Рис.11. Проблему неоднозначности можно решить, если использовать корреляцию с данными о множественности заряженных частиц детектора TPC/ALICE. Расчет для столкновения ядер золота при двух энергиях:

M.Golubeva et al. Yad.Fiz. 76 (2013) 2-17

Оценка разрешения параметра столкновения при энергиях NICA и FAIR

(Прямая и обратная задачи при определении центральности)

1) Калибровка адронного спектрометра на пучке протонов

Калибровка калориметра была проведена на протонном пучке в широком диапазоне энергий. Для описания экспериментальных данных необходимо привязать сигнал с адронного калориметра к энергии падающего нуклона. При привязке считалось, что максимум спектра сигнала калориметра соответствует отклику на протон с энергией пучка E_b

При калибровке калориметра получено, что отклик калориметра E , по шкале, привязанной к энергии пучка описывается распределением Гаусса [*]:

$$dP(E) = W(E)dE = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(E - E_b)^2}{2\sigma^2}\right) dE, \quad (1)$$

а дисперсия D численно равна:

$$D(\text{GeV}^2) = \sigma^2 = 0.31 E_b(\text{GeV}), \quad (2)$$

и среднеквадратичная ошибка:

$$\sigma(\text{GeV}) = 0.58\sqrt{E_b(\text{GeV})} \quad (3)$$

Относительная среднеквадратичная ошибка:

$$\delta_1 = \frac{\sigma}{E_b} = \frac{58\%}{\sqrt{E_b(\text{GeV})}} \quad (4)$$

[*] A.Ivashkin et al. NIMA 958 (2020) 162240

Очевидно, что распределение поглощенной энергии для одного спектатора имеет такую же форму Гаусса с тем же значением дисперсии:

$$W(E_s)dE_s = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(E_s - E_b)^2}{2\sigma^2}\right) dE_s, \quad (5)$$

где E_s - энергия спектатора.

При испускании нескольких спектаторов в калориметре выделяется энергия E_t

$$E_t = E_b \cdot \tilde{N}_s \quad (6)$$

где \tilde{N}_s - среднее значение числа спектаторов для данного события с некоторой центральностью

2) Постановка задачи по определению центральности по данным адронного калориметра

Величину E_t могут дать события с другой центральностью, т.е. с другим числом спектаторов N_s , таким что $N_s \neq \tilde{N}_s$. Для определения точности центральности надо рассчитать ширину распределения величины N_s при условии:

$$E_t = E_s \cdot N_s \quad (7)$$

Распределение E_s известно (см. (5)). Однако надо учесть, что полная энергия E_t , выделенная в калориметре при заданной центральности, также флуктуирует по распределению Пуассона с дисперсией:

$$D(E_t) = E_b^2 \cdot \tilde{N}_s \quad (8)$$

3) Оценка дисперсии распределения спектаторов

Для нахождения распределения:

$$N_s = \frac{E_t}{E_s} \quad (9)$$

используем определение дисперсии частного двух случайных величин x и y , с математическими ожиданиями X и Y [**]:

$$D \left(\frac{x}{y} \right) = \frac{\sigma_x^2}{Y^2} - \frac{2X}{Y^3} \text{cov}(x, y) + \frac{X^2}{Y^4} \sigma_y^2. \quad (10)$$

[**] Д.Худсон «Статистика для физиков», Издательство Мир, (1970)

Для случайных величин E_t и E_s :

$$X = E_b \cdot \tilde{N}_s. \quad (11)$$

$$Y = E_b, \quad \sigma_x = E_b \cdot \sqrt{\tilde{N}_s}, \quad \sigma_y = \sigma \quad (12)$$

Поскольку E_t и E_s независимы:

$$\text{cov}(E_t, E_s) = 0. \quad (13)$$

В итоге получаем:

$$D(N_s) = D\left(\frac{E_t}{E_s}\right) = \sigma_n^2 \left(\frac{E_t}{E_s}\right). \quad (14)$$

$$\sigma_n = \sqrt{\left(\tilde{N}_s + \frac{\tilde{N}_s^2}{E_b^2} \sigma^2\right)} \quad (15)$$

Можно сравнить относительные погрешности для одиночного спектатора:

$$\delta_1 = \frac{\sigma}{E_b}, \quad (16)$$

и для \tilde{N}_s — спектаторов:

$$\delta_{\tilde{N}_s} = \frac{\sigma_n}{\tilde{N}_s} = \sqrt{\frac{1}{\tilde{N}_s} + \frac{\sigma^2}{E_b^2}} = \sqrt{\frac{1}{\tilde{N}_s} + \delta_1^2}. \quad (17)$$

Видно, что вклад первого члена под корнем является существенным только для наиболее центральных событий. Для всех остальных событий $\delta_{\tilde{N}_s} \cong \delta_1$ и точность определения центральности определяется величиной разрешения калориметра по энергии.

Численная оценка для периферического события при энергии 5,5 ГэВ на нуклон и $\tilde{N}_s = 100$ дает оценку нижнего предела точности определения центральности 26%. При 2.5 ГэВ на нуклон точность 37 %.

4) Постановка задачи по определению центральности по данным адронного калориметра в TDR адронного калориметра для MPD/NICA

Оценка разрешения распределения спектров проведена для определенной фиксированной центральности, т.е. для фиксированного значения числа спектров M .

Тогда учитывая, что дисперсия суммы случайных величин равна сумме их дисперсий, получим:

$$D(E_t) = \sigma_M^2 = \sum \sigma^2 = M \sigma^2,$$

а относительная ошибка для:

$$E_t = E_b \cdot M$$

$$\delta_E = \frac{\sigma_M}{E_t} = \frac{1}{\sqrt{M}} \delta_1,$$

т.е. разрешение калориметра улучшается при увеличении числа спектров. Таким образом решается задача обратная, той для которой создается калориметр - определение центральности по данным калориметра, а не наоборот

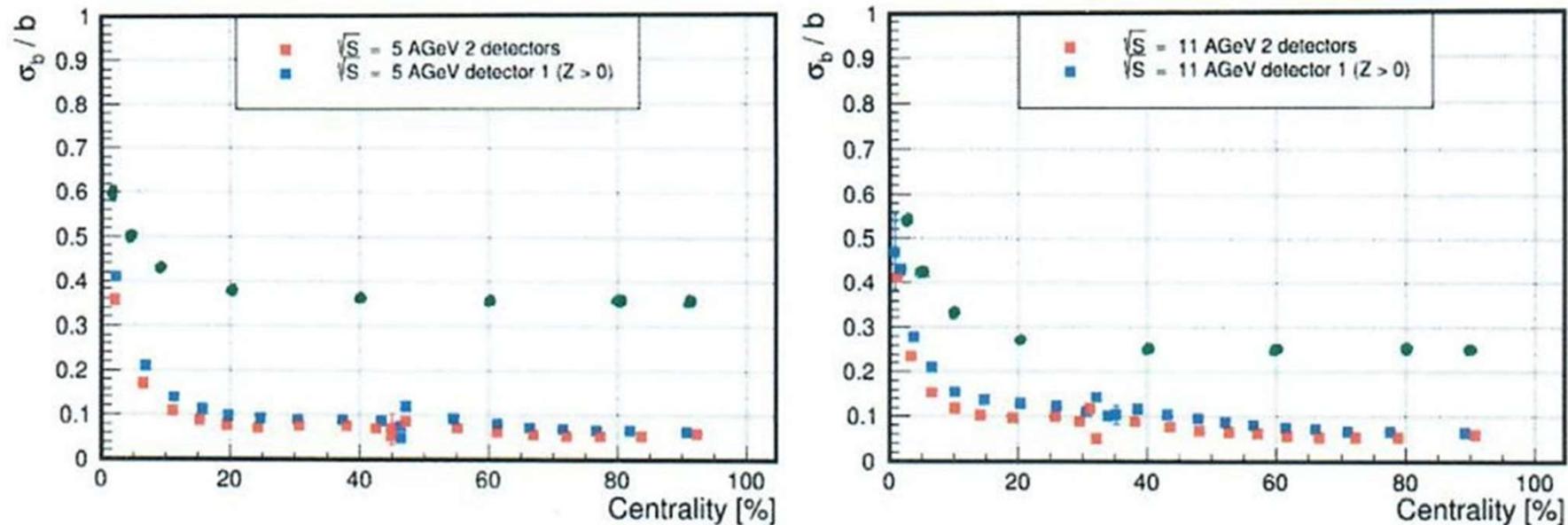


Рис. 12. Разрешающая способность определения параметра столкновения, полученная по измерению выделенной энергии в FHCал для энергии пучка $\sqrt{s} = 5$ ГэВ (слева) и $\sqrt{s} = 11$ ГэВ (справа). Синие и красные точки соответствуют одной и двум частям FHCал от точки столкновения при фиксированном значении параметра столкновения (TDR/ FHCал) (**).

Зеленые точки - оценка с учетом рассчитанного распределения числа спектаторов в настоящей работе.

(**) “Forward Hadron Calorimeter (FHCал) “, Technical Design Report for the MPD Experiment” (2018)

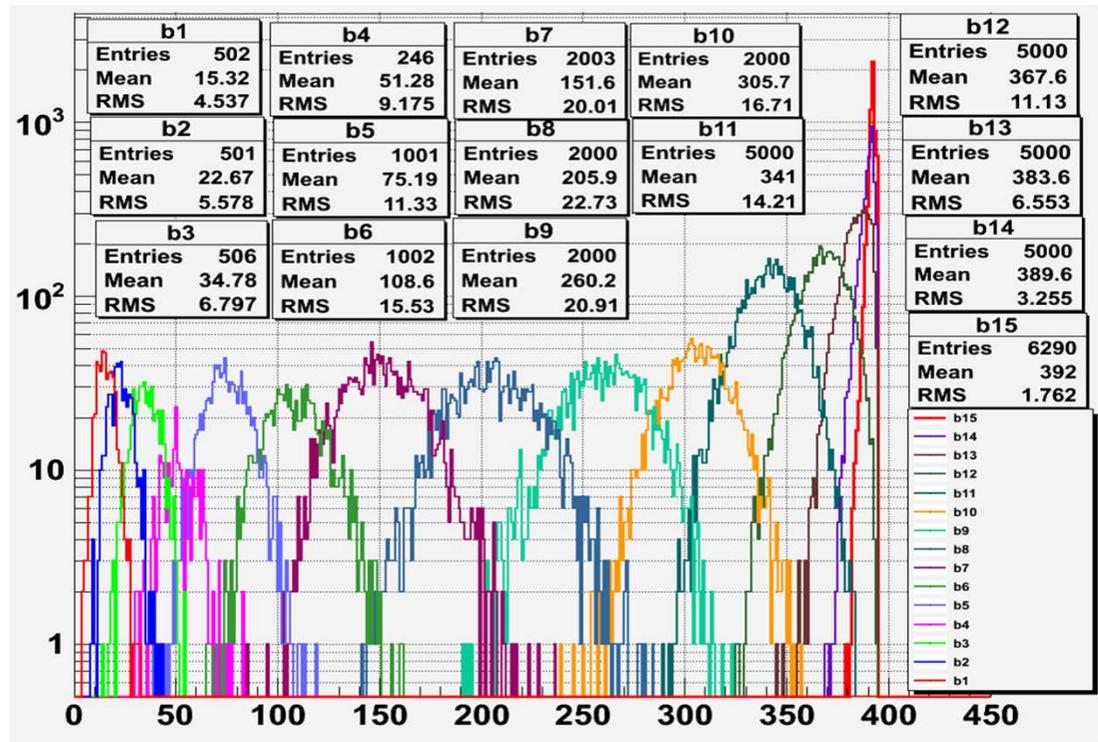


Рис. 13. Распределение числа зрителей при фиксированном значении параметра столкновения при энергии 4.5 ГэВ на нуклон по программе LAQGSM при идеальном разрешении калориметра по энергии

Из рисунка 13 о распределении числа спектаторов при фиксированном значении параметра столкновения при энергии 4.5 ГэВ на нуклон по программе LAQGSM при **идеальном** разрешении калориметра видно, что при разных значениях центральности в результате вторичного взаимодействия спектаторов наблюдается различная ширина распределения числа спектаторов как следствие эффектов рассеяния и поглощения при различных величинах пробега спектатора в ядре. Таким образом даже при **идеальном** разрешении по энергии адронного калориметра точность определения центральности по регистрации числа спектаторов не может быть лучше 25 % для центральных событий и около 10 % для событий со средним значением параметра столкновения

Возможный метод определения центральности с достаточной точностью

Как показано на следующих рисунках прямое использование детектора множественности при энергиях NICA невозможно из-за вклада спектаторов в спектры множественности (максимум в спектре протонов)

Однако введение порога по энергии спектаторов в калориметре на уровне 1.5 -3.5 Гэв в режиме антисовпадений с детектором множественности позволяет практически полностью очистить спектр от спектаторов.

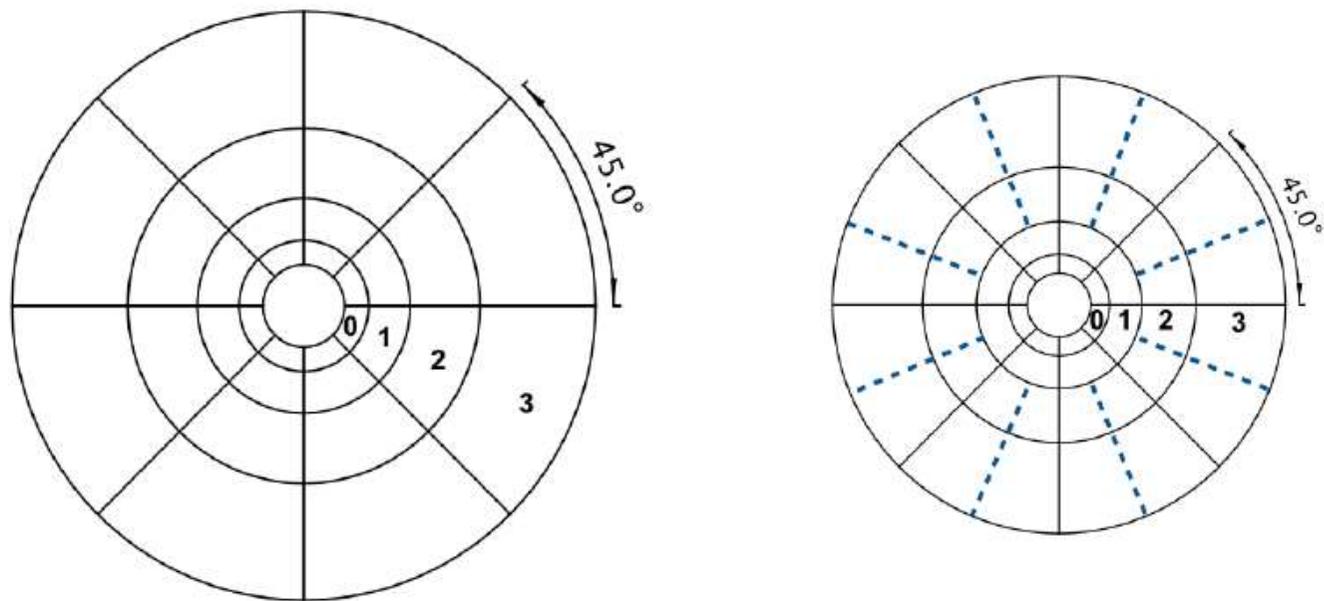
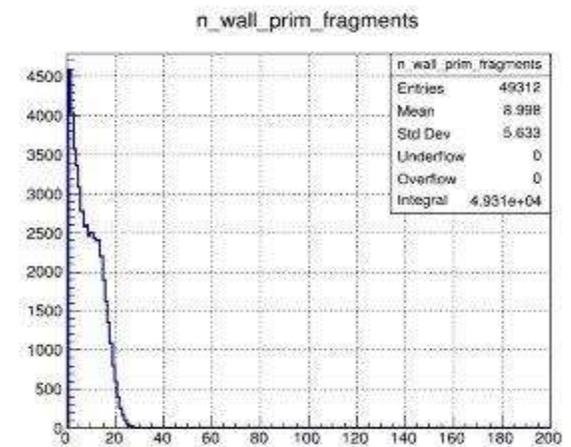
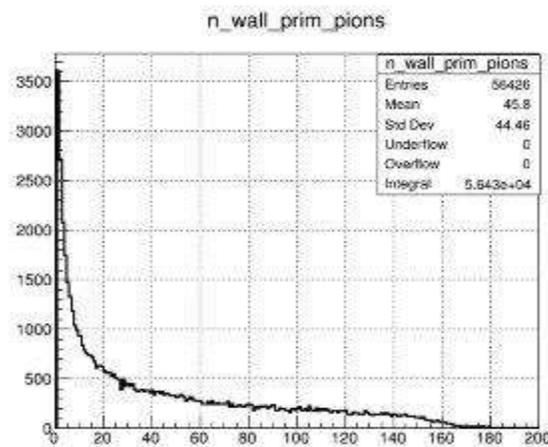
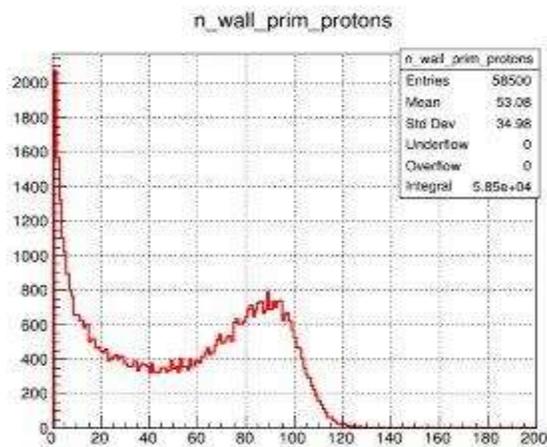


Рис. 14. Схема сегментированного детектора множественности. Толщина сцинтиллятора 2.5 см.
 Радиус отверстия 6 см. Внешний радиус 70 см.

[A. Kurepin](#), [A. Litvinenko](#), [E. Litvinenko](#) , EPJ Web Conf. 204 (2019) 03014, ISHEPP XIV



Wed Sep 12 15:14:23 2018

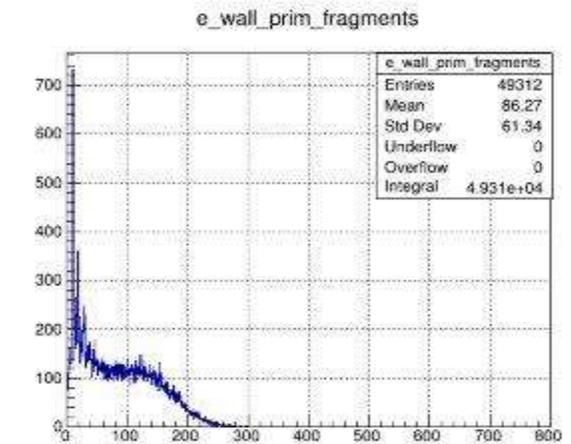
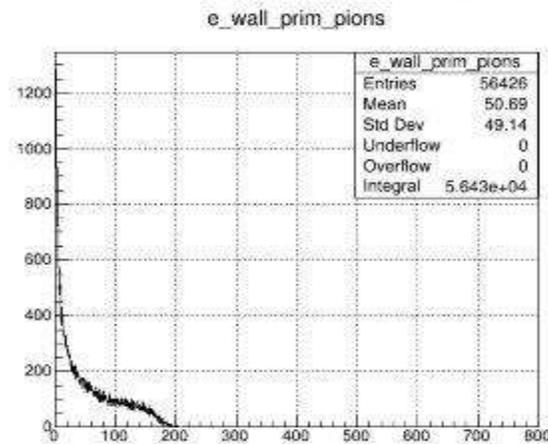
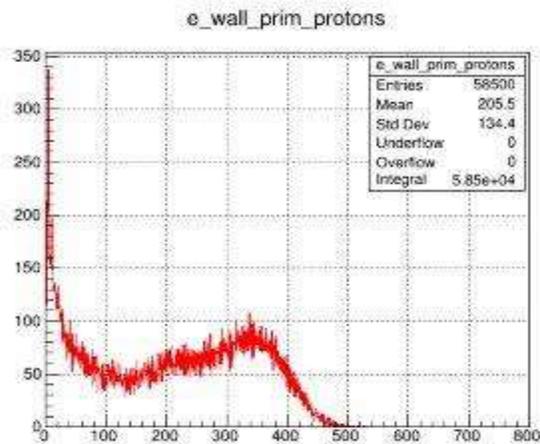
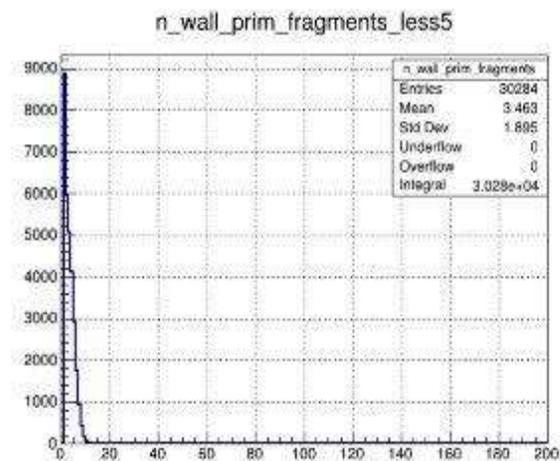
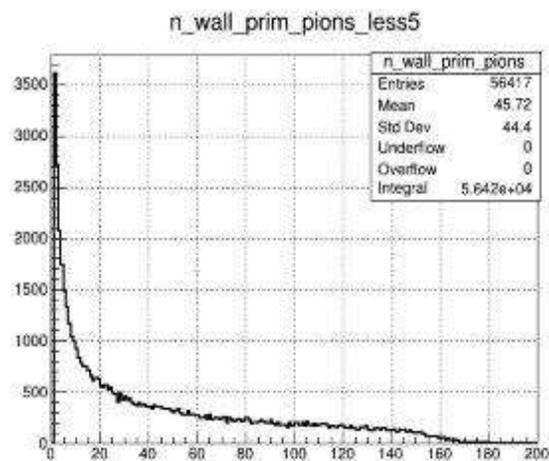
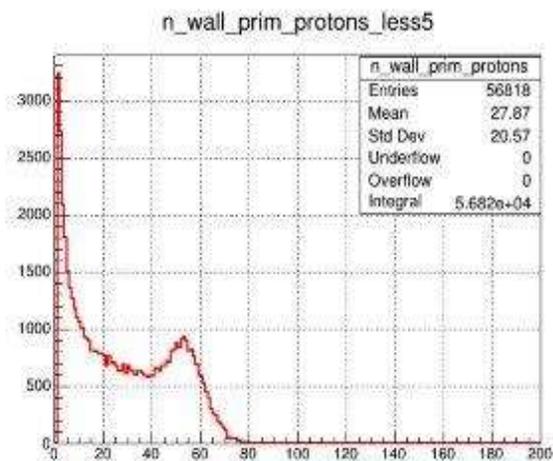


Рис. 15. Multiplicity and energy distributions of protons, pions and fragments hitting the FMD detector



Thu Sep 13 13:17:23 2018

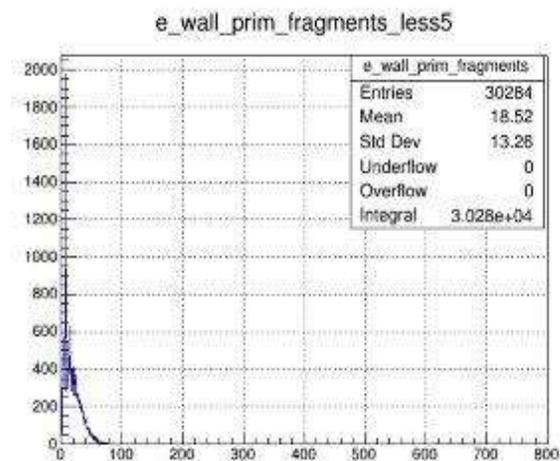
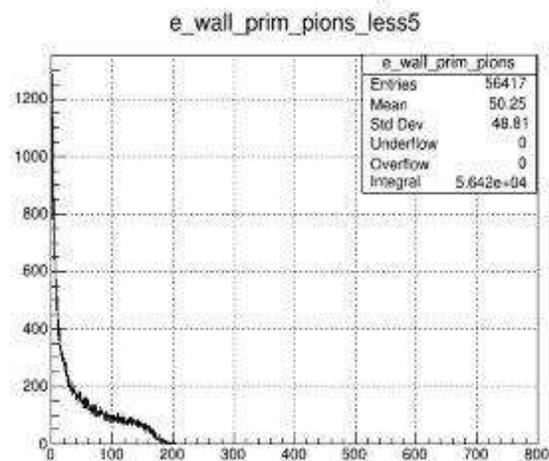
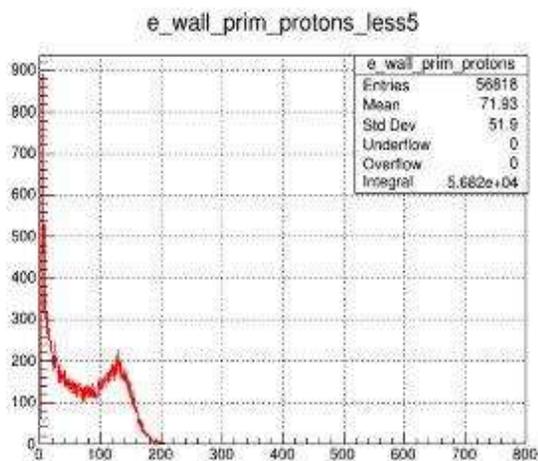
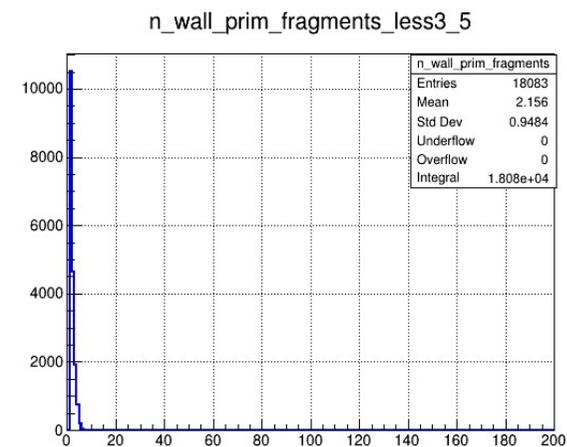
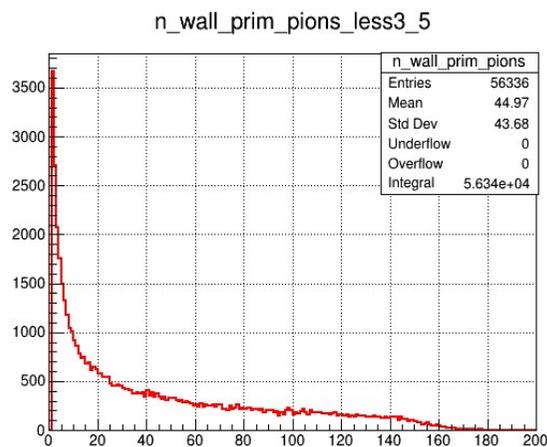
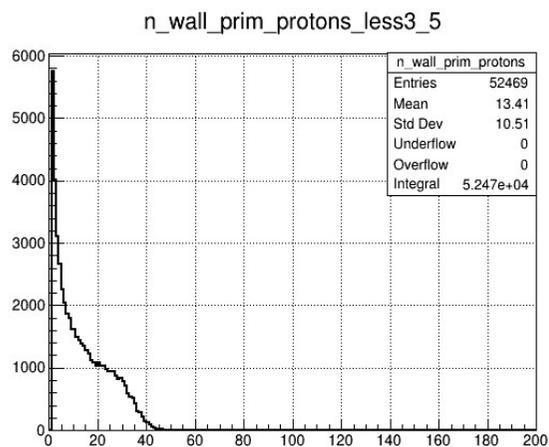


Рис. 16. Multiplicity and energy distributions of protons, pions and fragments with energy less 5 GeV hitting the FMD detector



Fri Sep 14 14:30:18 2018

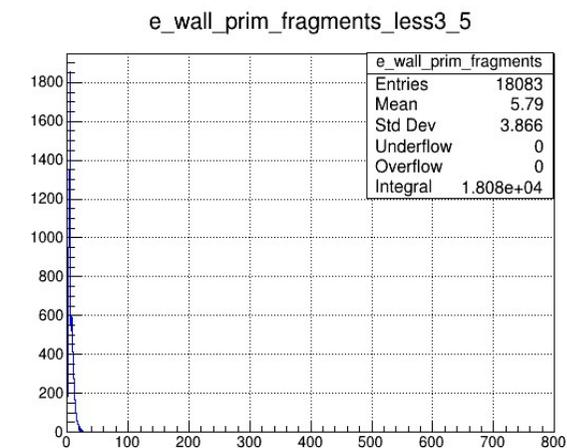
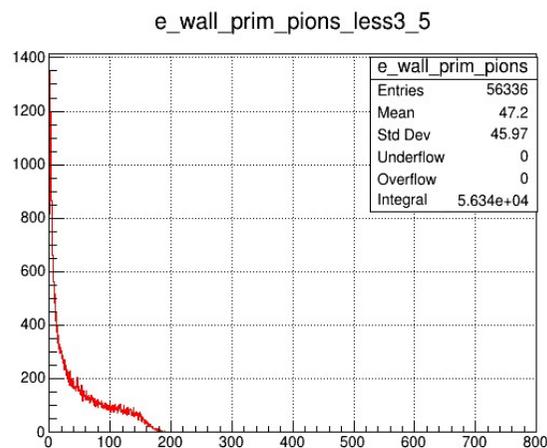
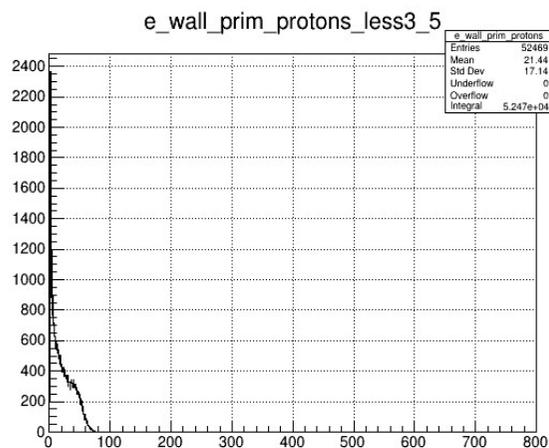
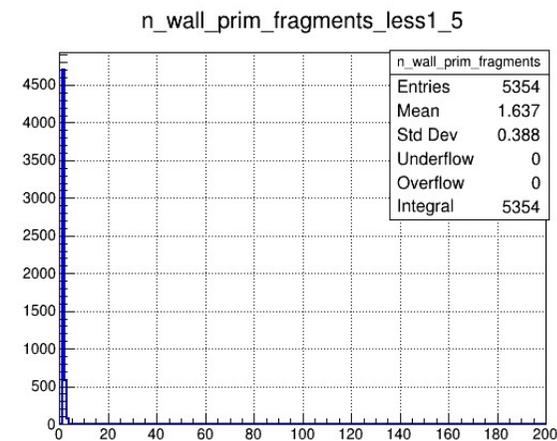
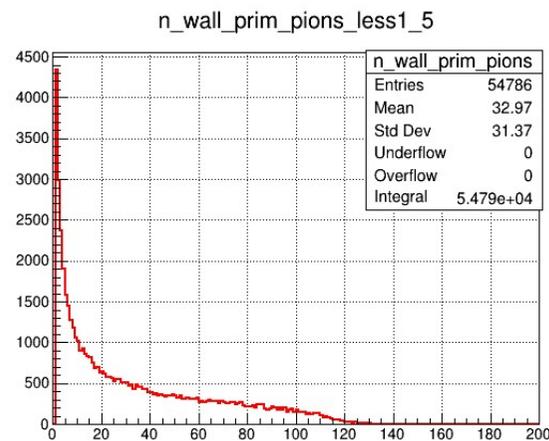
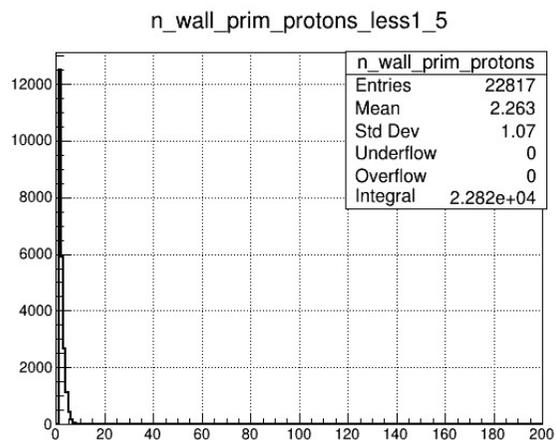


Рис. 17. Multiplicity and energy distributions of protons, pions and fragments with energy less 3.5 GeV hitting the FMD detector



Fri Sep 14 12:15:45 2018

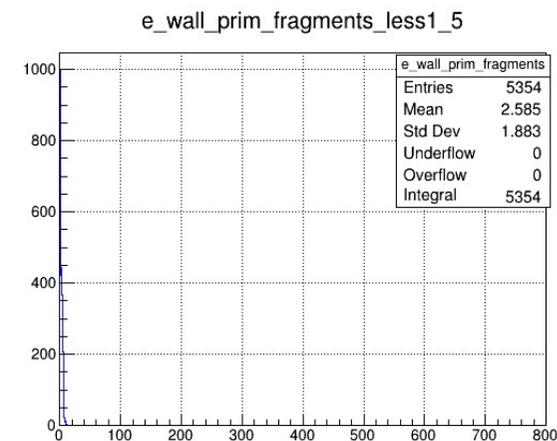
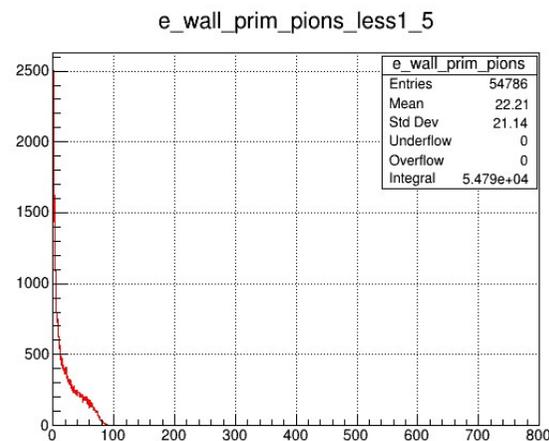
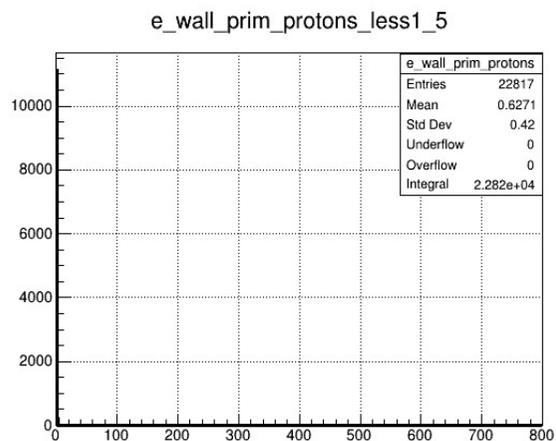


Рис. 18. Multiplicity and energy distributions of protons, pions and fragments with energy less 1.5 GeV hitting the FMD detector

Выводы

- 1) Практически во всем диапазоне центральности относительная ошибка в определении прицельного параметра равна или больше относительной ошибки калибровки при энергии протонов равной энергии спектатора, или энергии на нуклон сталкивающихся ядер, которая при энергиях NICA и FAIR достигает 25-35 %.
- 2) Вторичные процессы при прохождении спектаторов через ядро дают дополнительный вклад в ошибку для центральных столкновений и при средних центральностях.
- 3) Невозможность улучшения разрешения по энергии калориметра при низких энергиях приводит к необходимости создания дополнительного детектора множественности, который в сочетании с адронным калориметром позволит определить прицельный параметр с точностью не хуже 10% во всем диапазоне центральности.

Спасибо за внимание