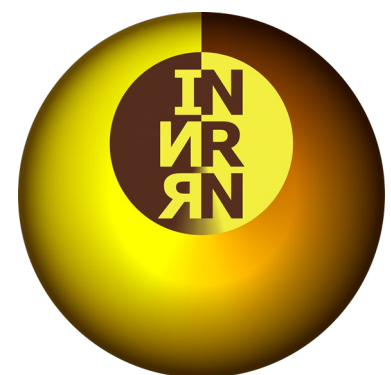


Выпускная квалификационная работа
на тему:

Геометрия и механизмы фрагментации спектаторной материи в ядро-ядерных СТОЛКНОВЕНИЯХ



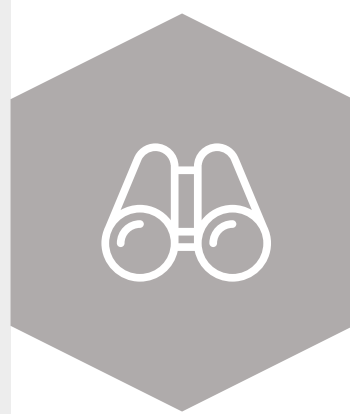
Выполнил: Роман Сергеевич Непейвода
Научный руководитель: д.ф.-м.н. Игорь Анатольевич Пшеничнов

Цели исследования

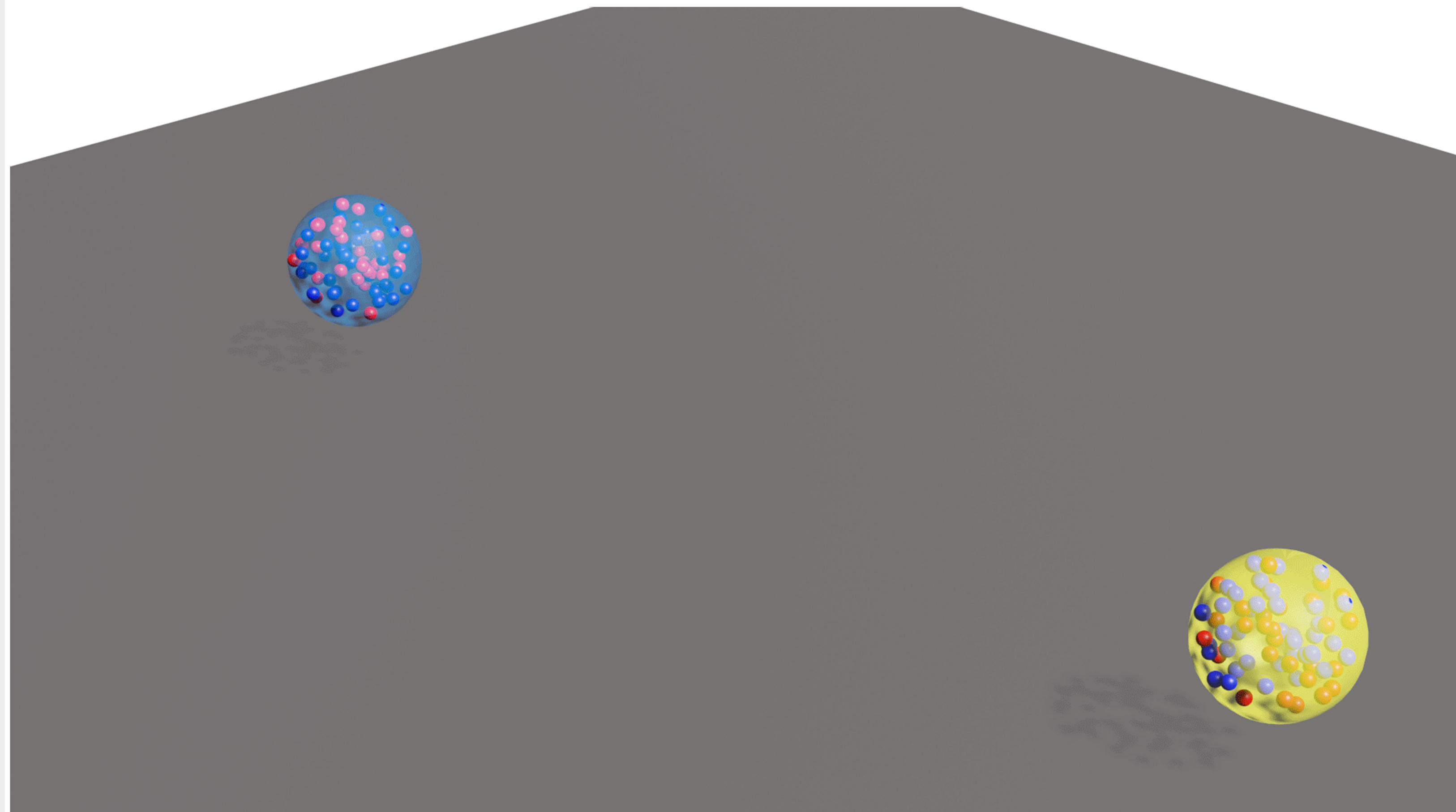
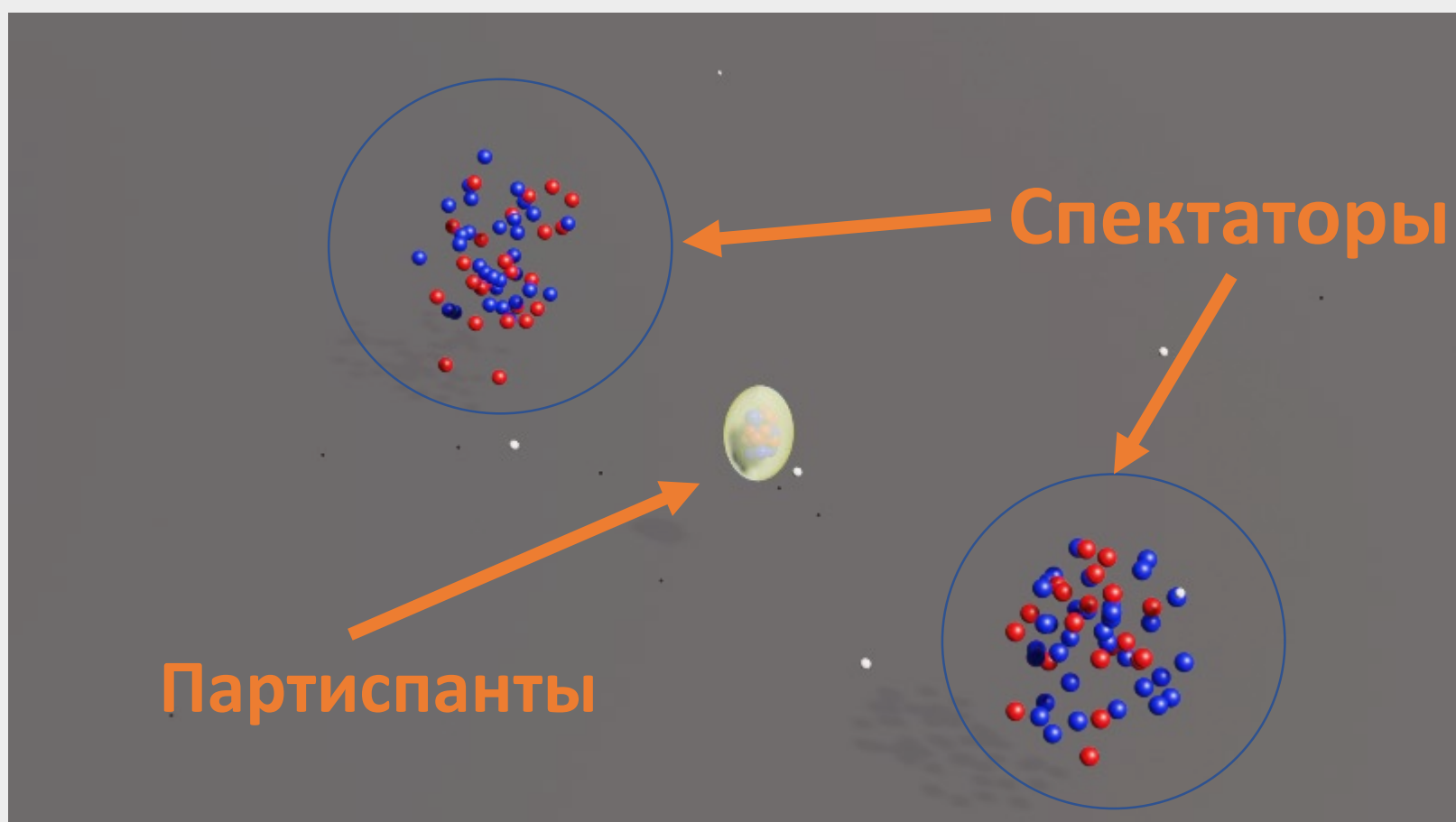
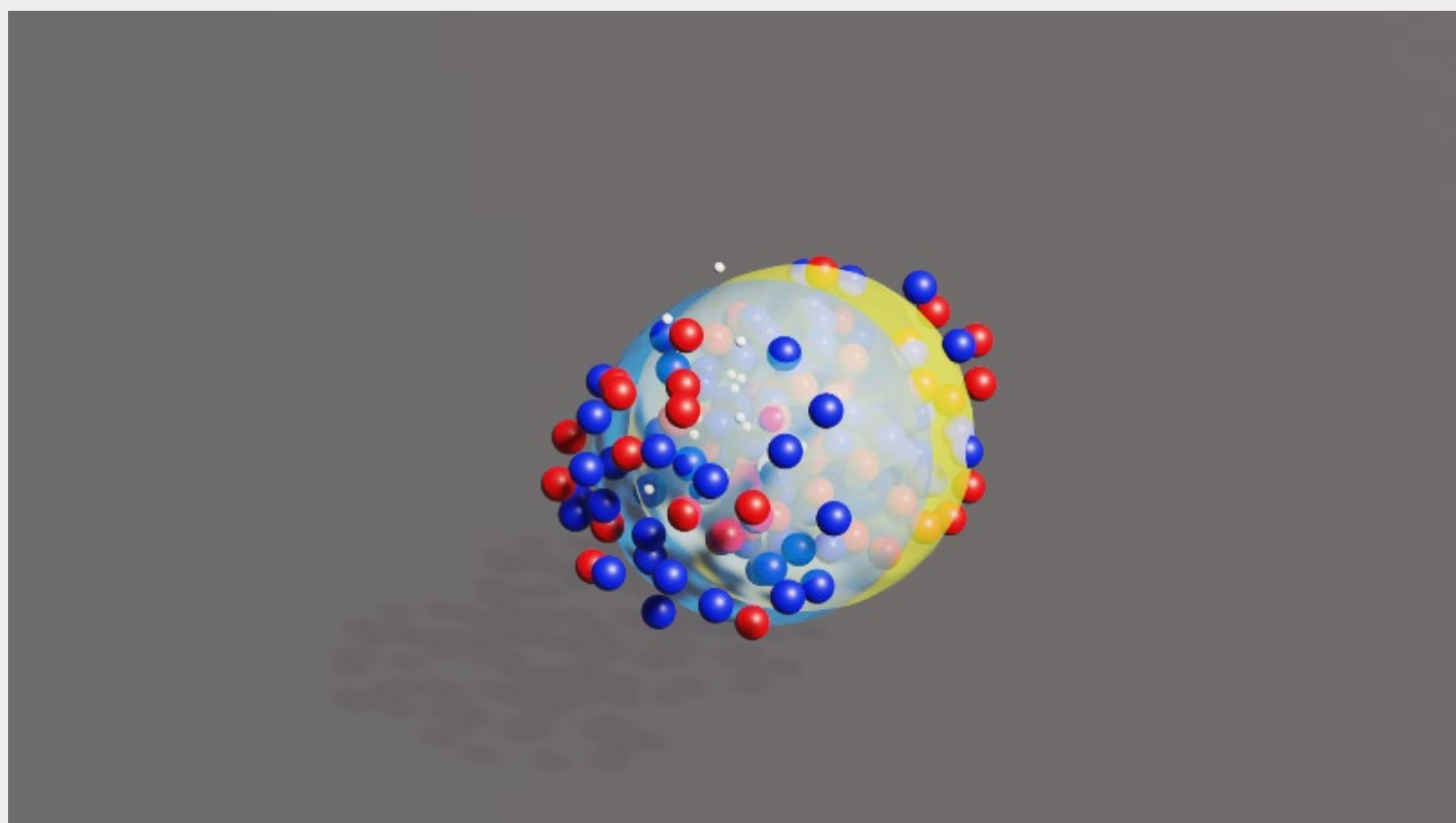
- Моделирование свойств спектаторной материи и её распада в ядро-ядерных столкновениях с учетом геометрии префрагментов
- Изучение влияния эффектов предравновесной кластеризации префрагмента на конечный состав спектаторов
- Применение модели ААМСС-MST для моделирования откликов передних калориметров в экспериментах по изучению ядро-ядерных столкновений

Актуальность исследования

- В противоположность экспериментам при низких энергиях свойства спектаторной материи в столкновениях ультрарелятивистских ядер остаются малоизученными
- Моделирование свойств спектаторной материи и сравнение их с измеренными позволяет определить форму и степень геометрического перекрытия ядер в событии
- Для современных экспериментов по изучению ядро-ядерных столкновений необходим современный генератор спектаторной материи



Визуализация столкновений релятивистских ядер



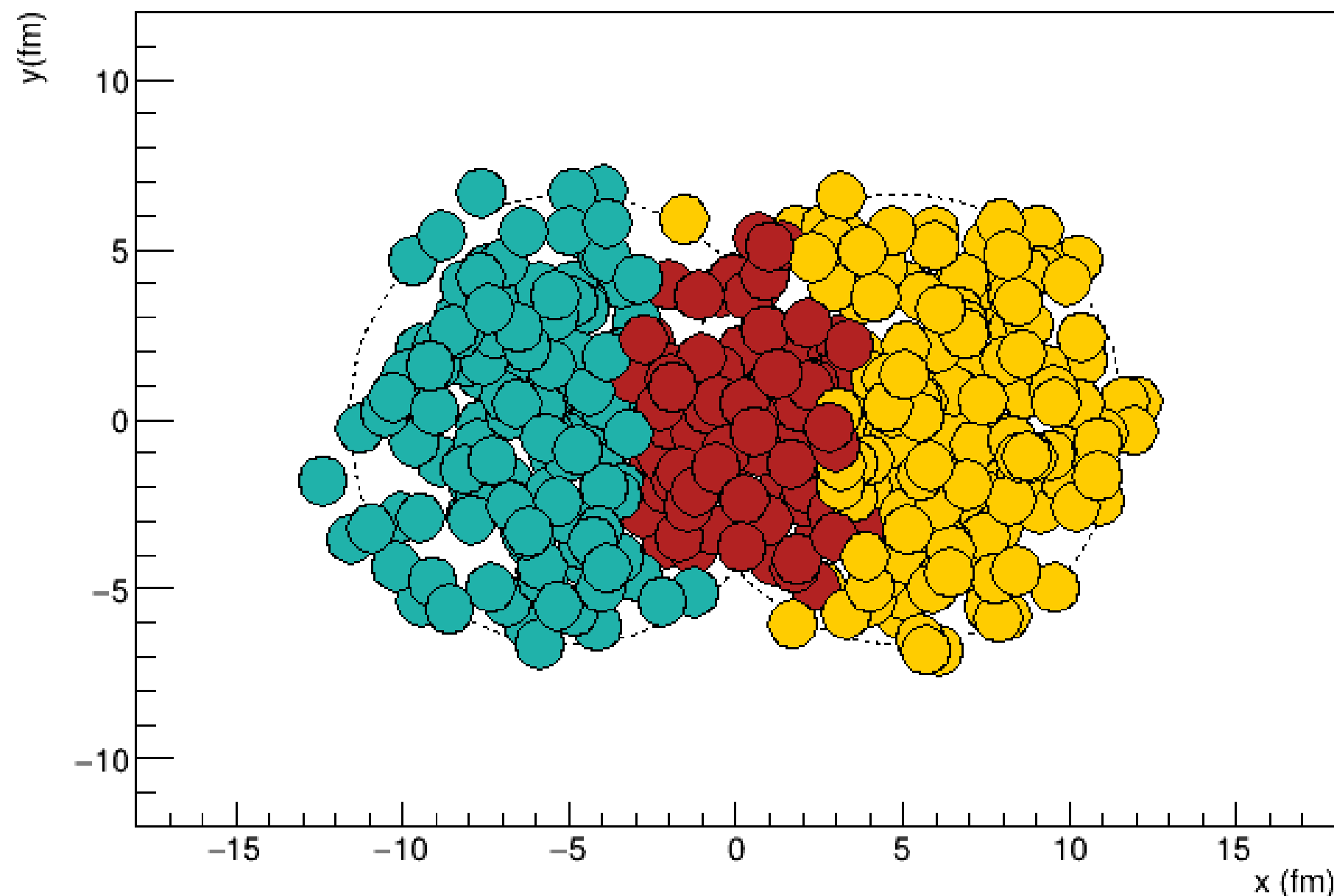
Визуализация выполнена в Blender

- - протоны
- - нейтроны

Специфическая форма префрагмента в центральных событиях

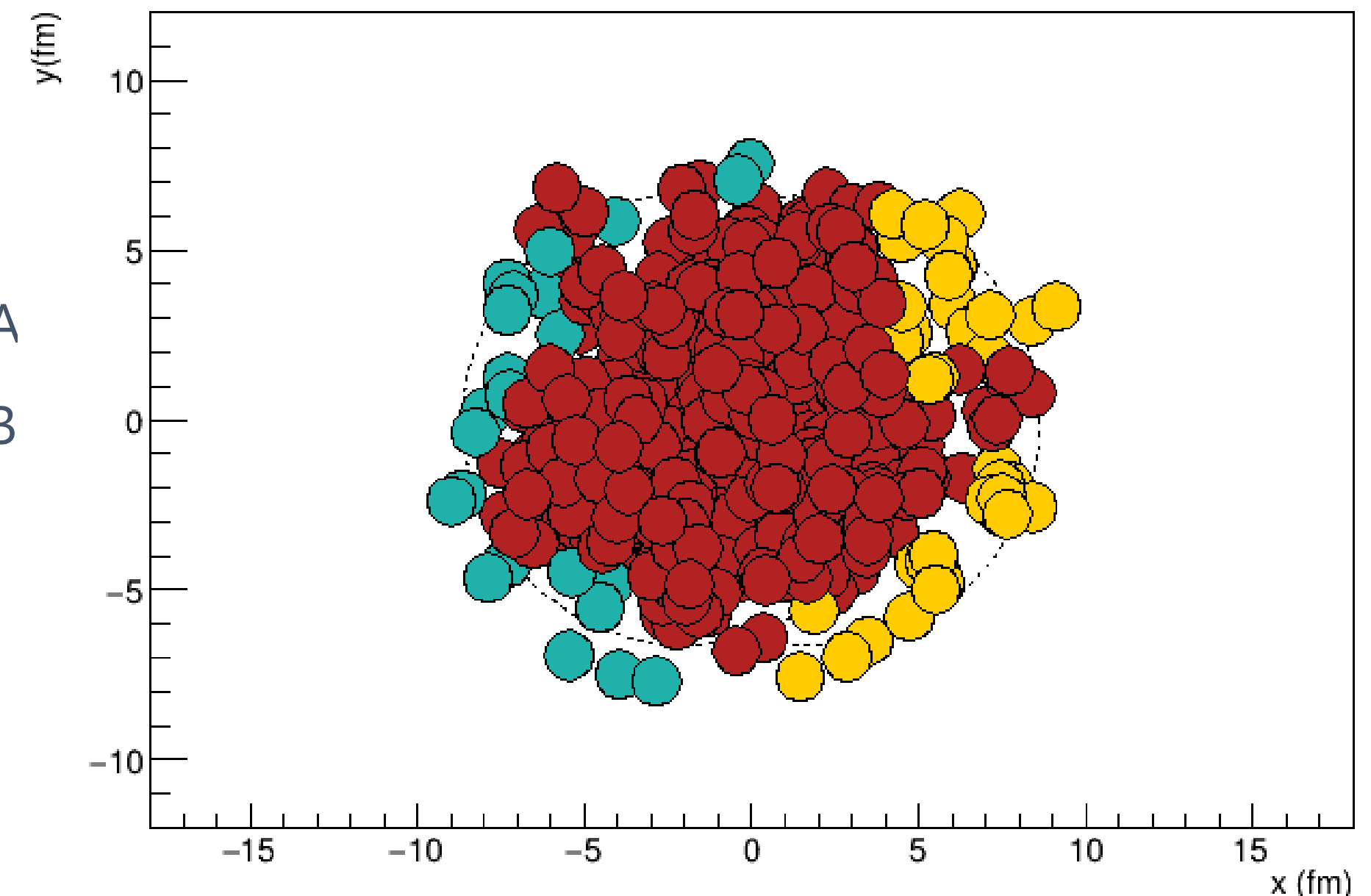
Glauber Monte Carlo v3.2 иллюстрация столкновений ^{208}Pb - ^{208}Pb ($\sigma_{NN} = 67.7 \text{ mb}$)

Периферическое столкновение



Префрагменты представляют собой две связанные системы

Центральное столкновение



Менее плотная спектаторная материя имеет характерную форму узкого полумесяца

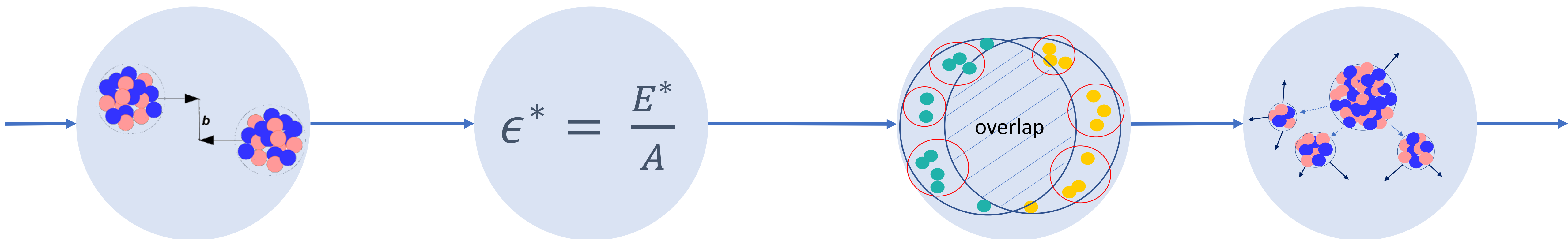
Необходима дополнительная "геометрическая" фрагментация спектаторного префрагмента, отсутствующая в традиционных моделях abrasion-ablation



AAMCC model

Abrasion-Ablation Monte Carlo for Colliders*

Выбивание нуклонов Возбуждение spectatorного префрагмента **MST – кластеризация** Фрагментация кластеров



Glauber Monte Carlo

1. Параметризация ALADIN¹
2. Формула Ericson²
3. Гибридная параметризация

Вычисление энергии возбуждения spectatorного префрагмента по одной из трёх приведённых выше параметризаций

Распадные модели Geant4³

- $\epsilon^* > 4$ МэВ/нуклон: Мультифрагментация (SMM)⁴
- Испарение⁵
- Fermi BreakUp ($A < 19, Z < 9$)⁶

Розыгрыш положений нуклонов

Разделение нуклонов на партисипанты и спектаторы

C. Loizides, J. Kamin, D. d'Enterria
Phys. Rev. C 97 (2018) 054910

¹A. Botvina et al. Nuclear Physics A 584 (1995) 737-756

²T. Ericson Adv. In Physics 9 (1960) 737-756

³J. Alison et al. Nucl. Inst. A 835 (2016) 186-225

⁴J. Bondorf et al. Phys. Rep. 444 (1985) 460-476

⁵V. Weisskopf Phys. Rev. 52 (1937) 295

⁶E. Fermi Progress of Th. Phys. 5 (1950) 570

*A. Svetlichnyi, R. Nepeivoda, I. Pshenichnov Particles. 4 (2021) 227-235

Алгоритм MST-кластеризации

Minimum Spanning Tree

Алгоритм Краскала

Поиск минимального остовного дерева

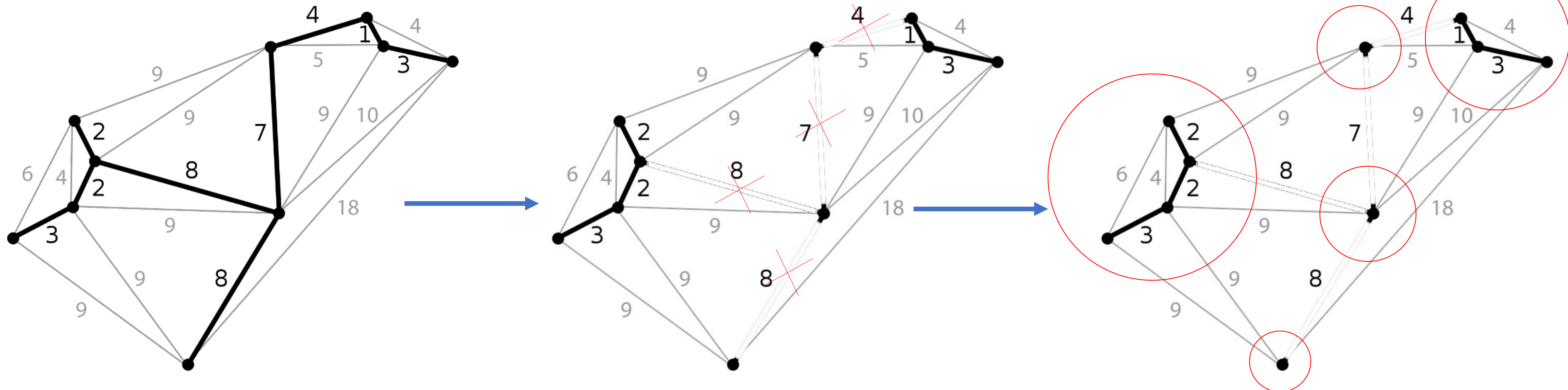
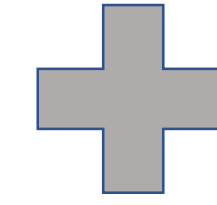
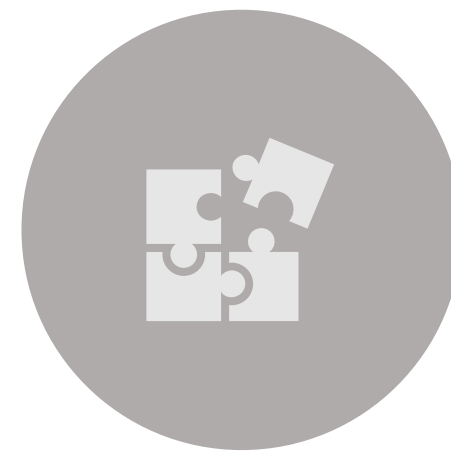
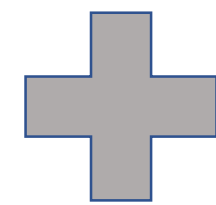
Критическое расстояние

Учёт расширения разогретого префрагмента

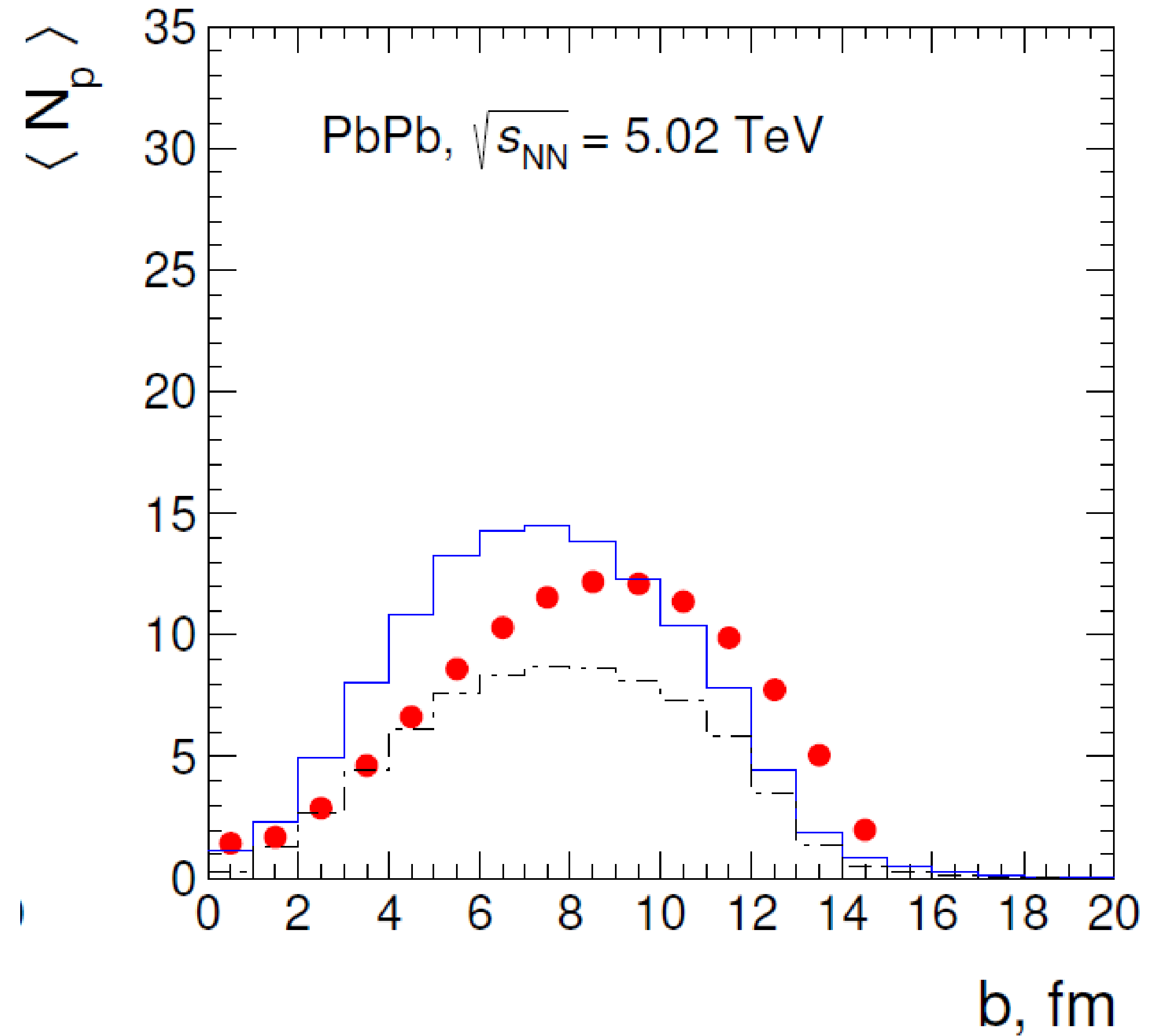
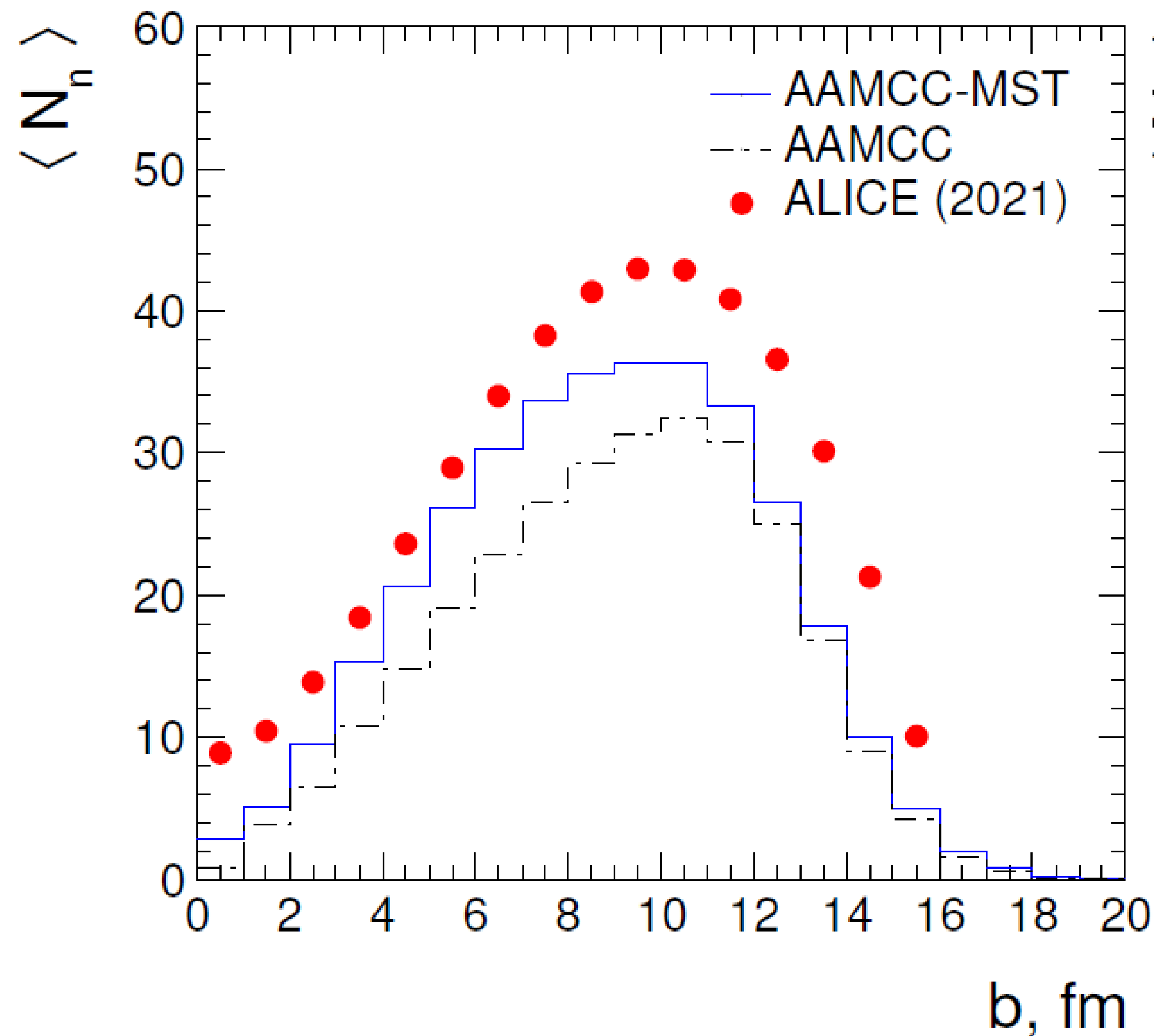
Обрывание длинных рёбер

Компоненты связности

Поиск в глубину

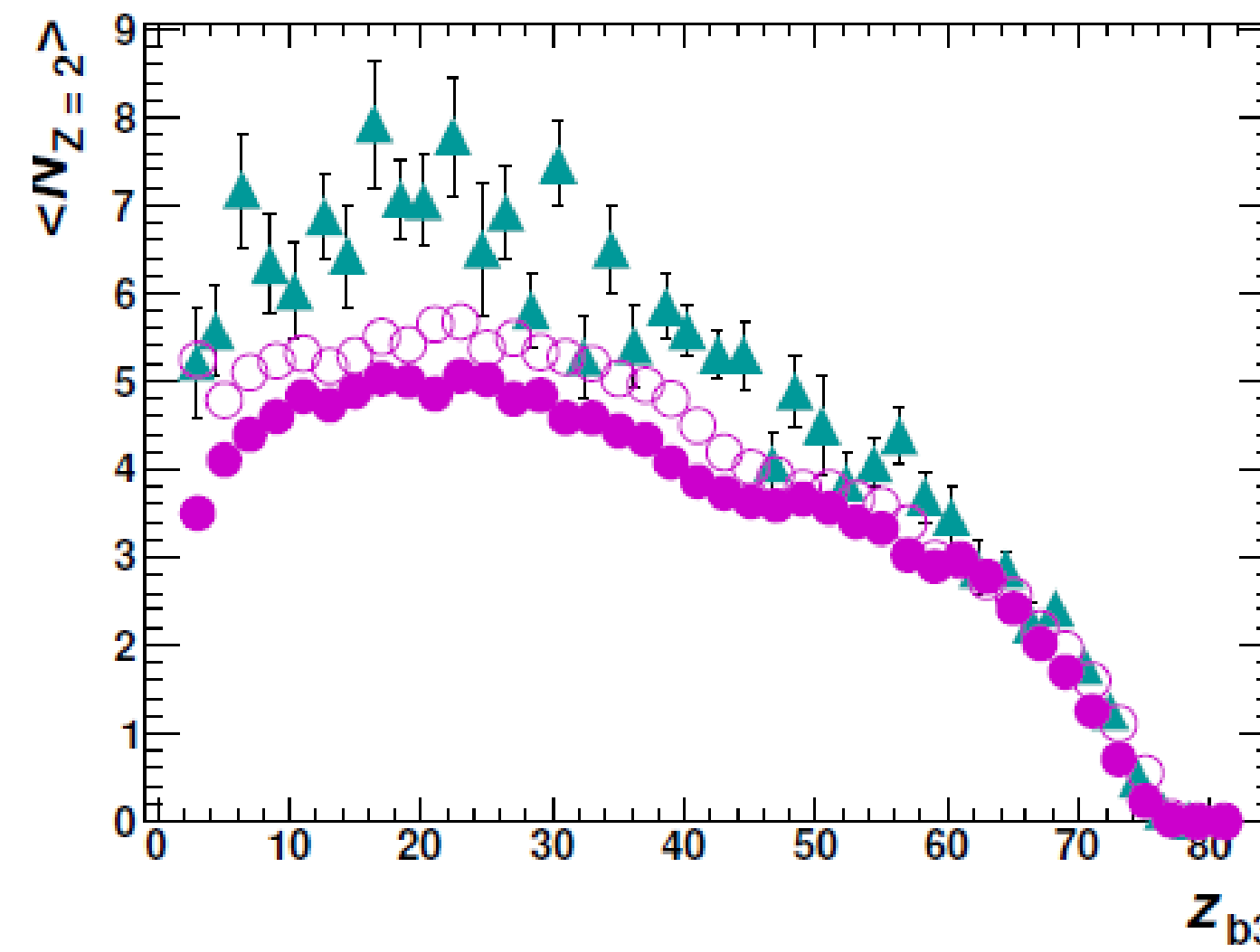
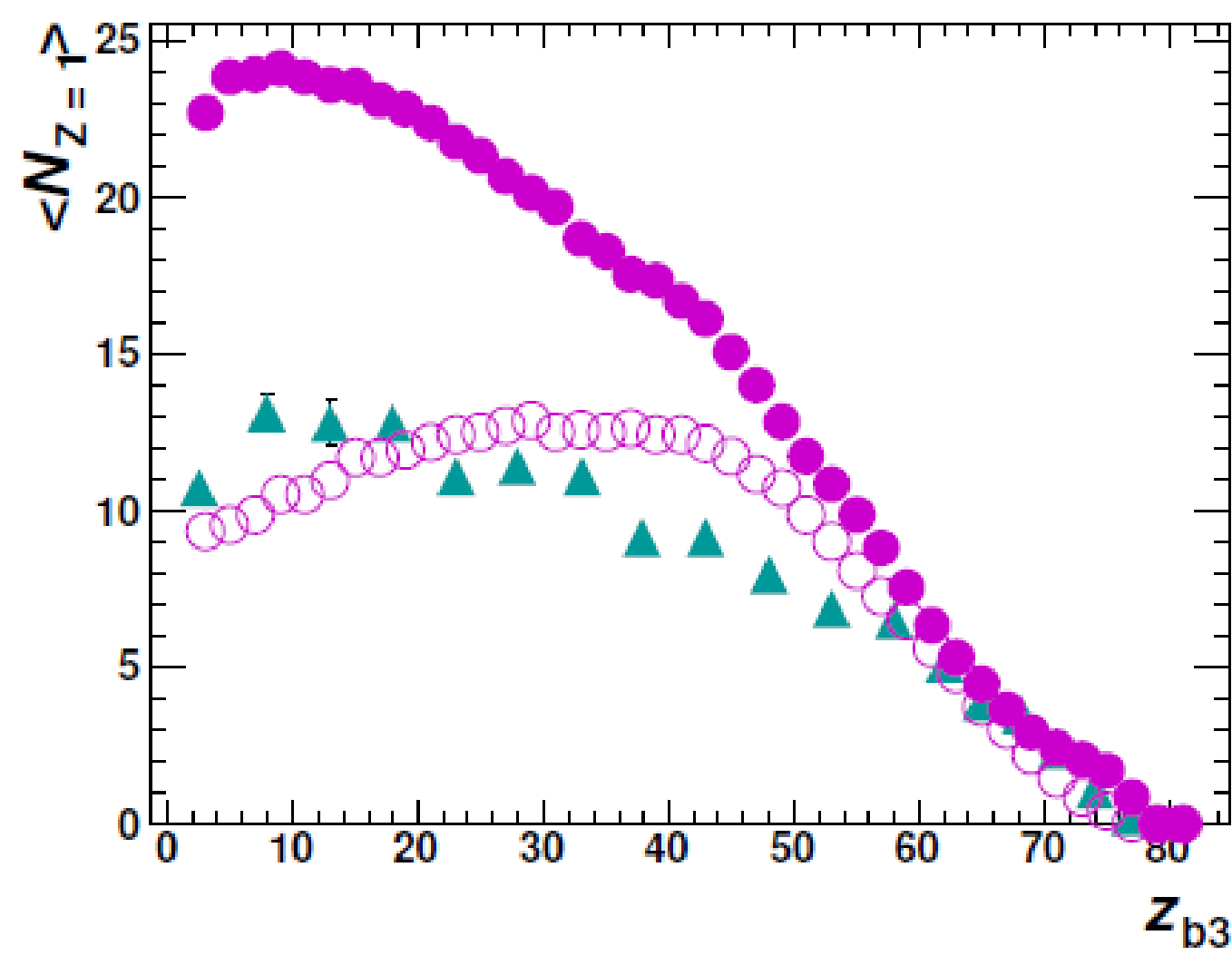
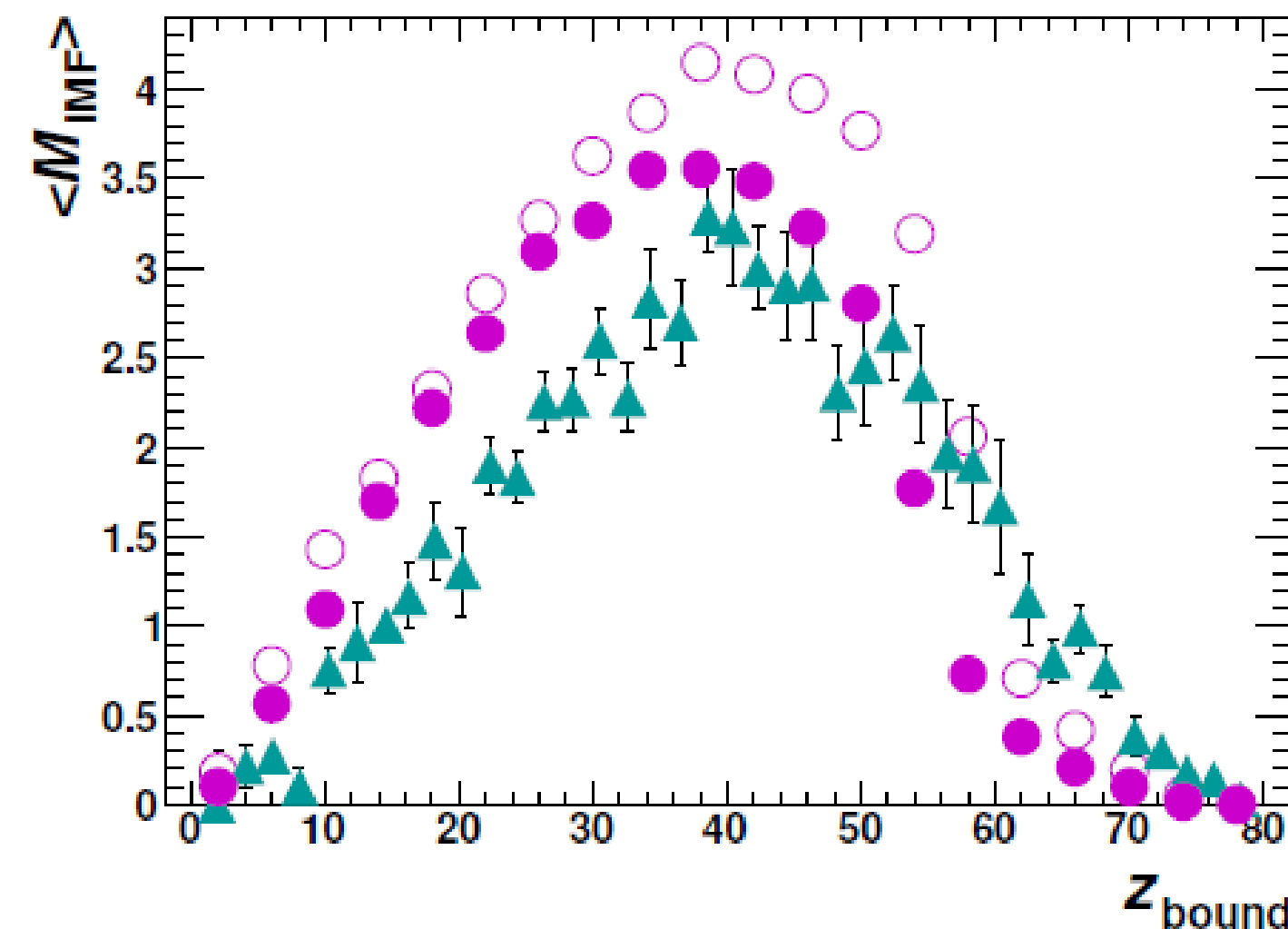
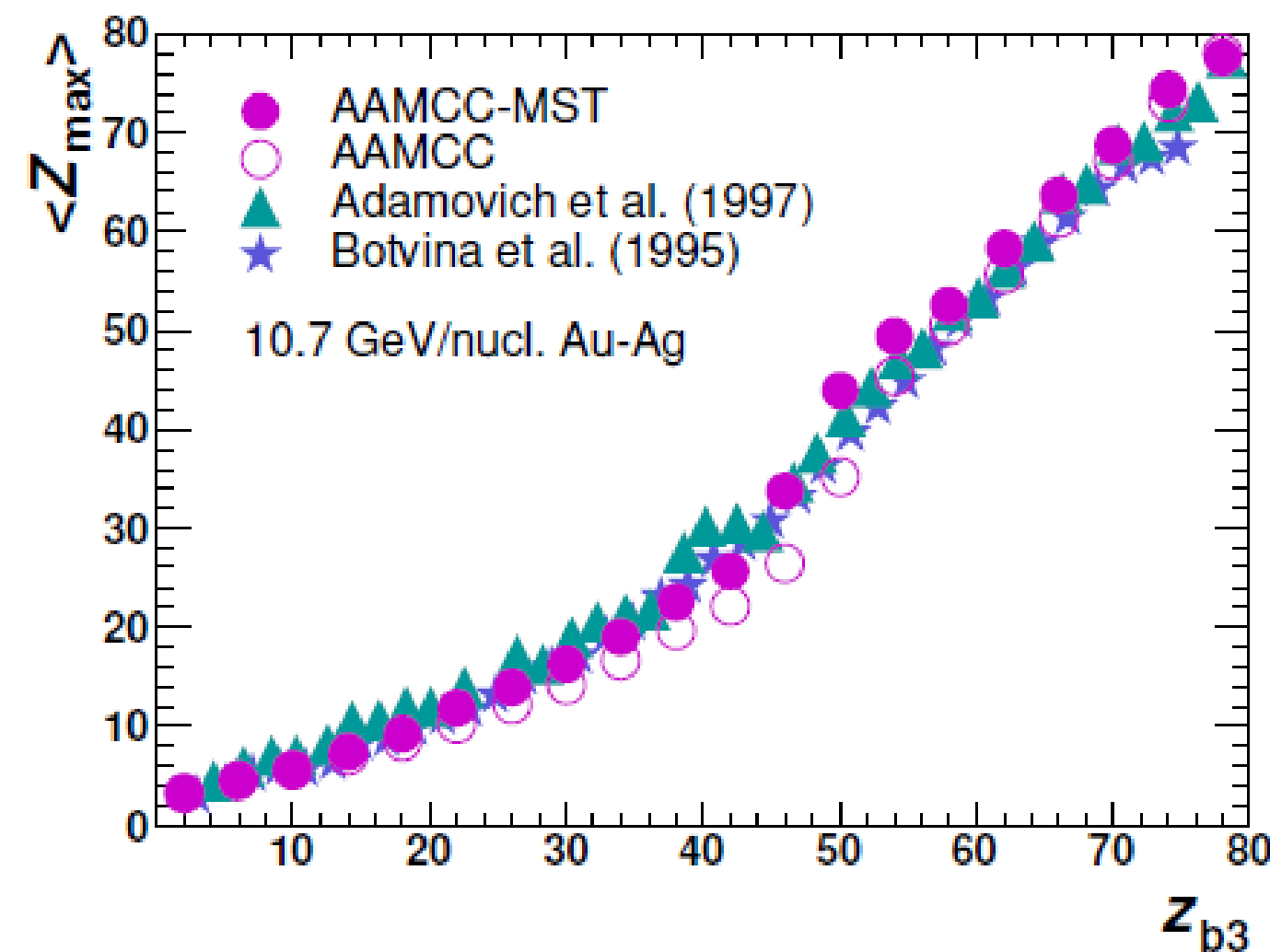


Кластеризация в столкновениях $^{208}\text{Pb}—^{208}\text{Pb}$



Включение MST-алгоритма в расчётах уменьшает расхождение между теорией и экспериментом в центральных и полуцентральных событиях при $b < 10$ фм

Фрагментация ^{197}Au в ядерной фотоэмульсии



1. Z_{bound} – total charge confined in fragments with $Z \geq 2$
2. Z_{bn} – same as Z_{bound} , but for $Z \geq n$.
3. M_{IMF} – number of intermediate mass fragments ($3 \leq Z \leq 30$)
4. $N_{Z=n}$ – number of fragments with $Z = n$, $N_{Z=1}$ of H, $N_{Z=2}$ of He ...
5. Z_{max} – charge of fragment with largest Z

MST-кластеризация позволяет улучшить описание

- максимального заряда фрагментов,
- выходов фрагментов промежуточной массы.

Выходы ядер гелия и водорода лучше описываются без MST.

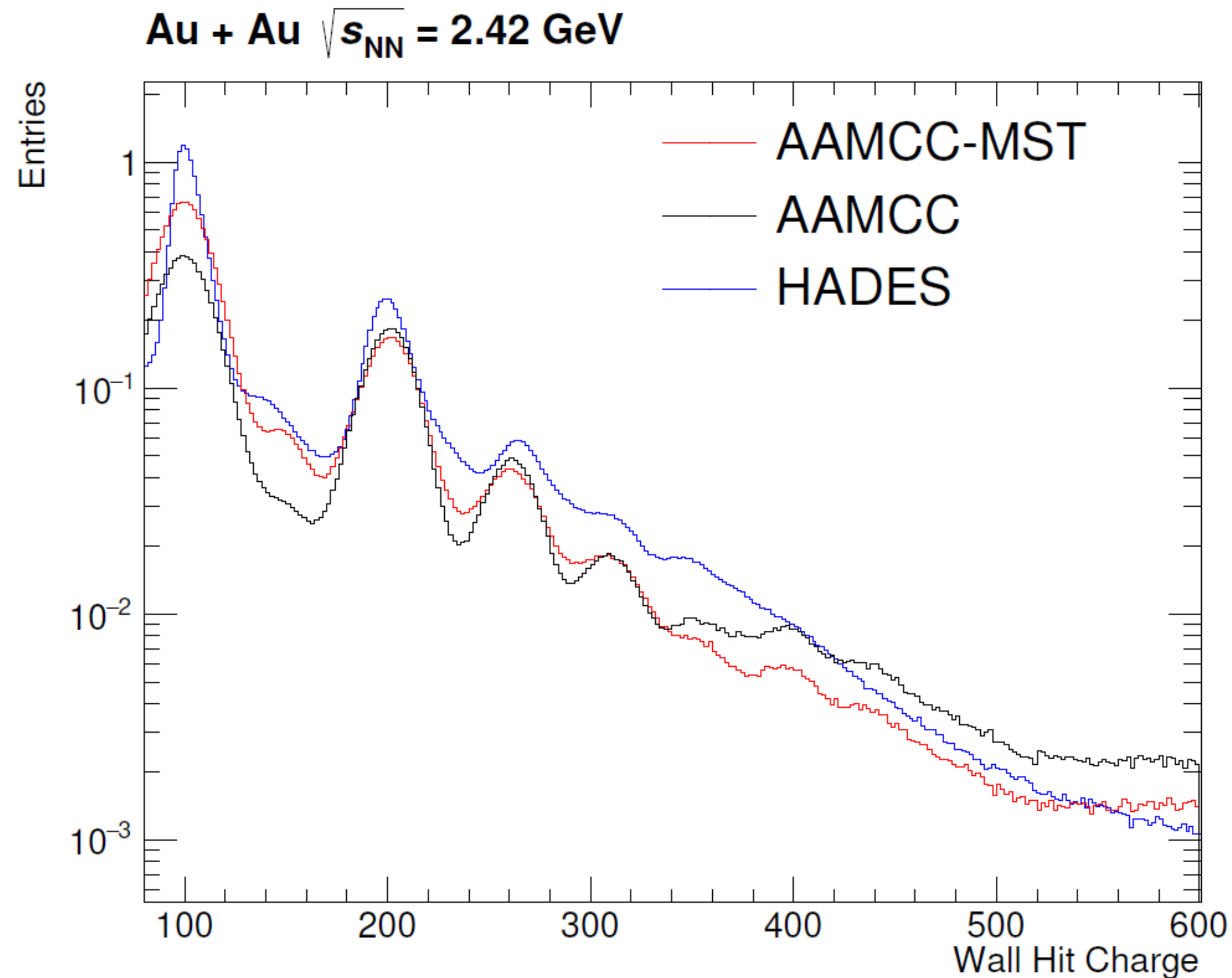
Требуется дальнейшая настройка параметров модели.

Расхождение может быть связано с несовершенством описания поперечных импульсов в модели

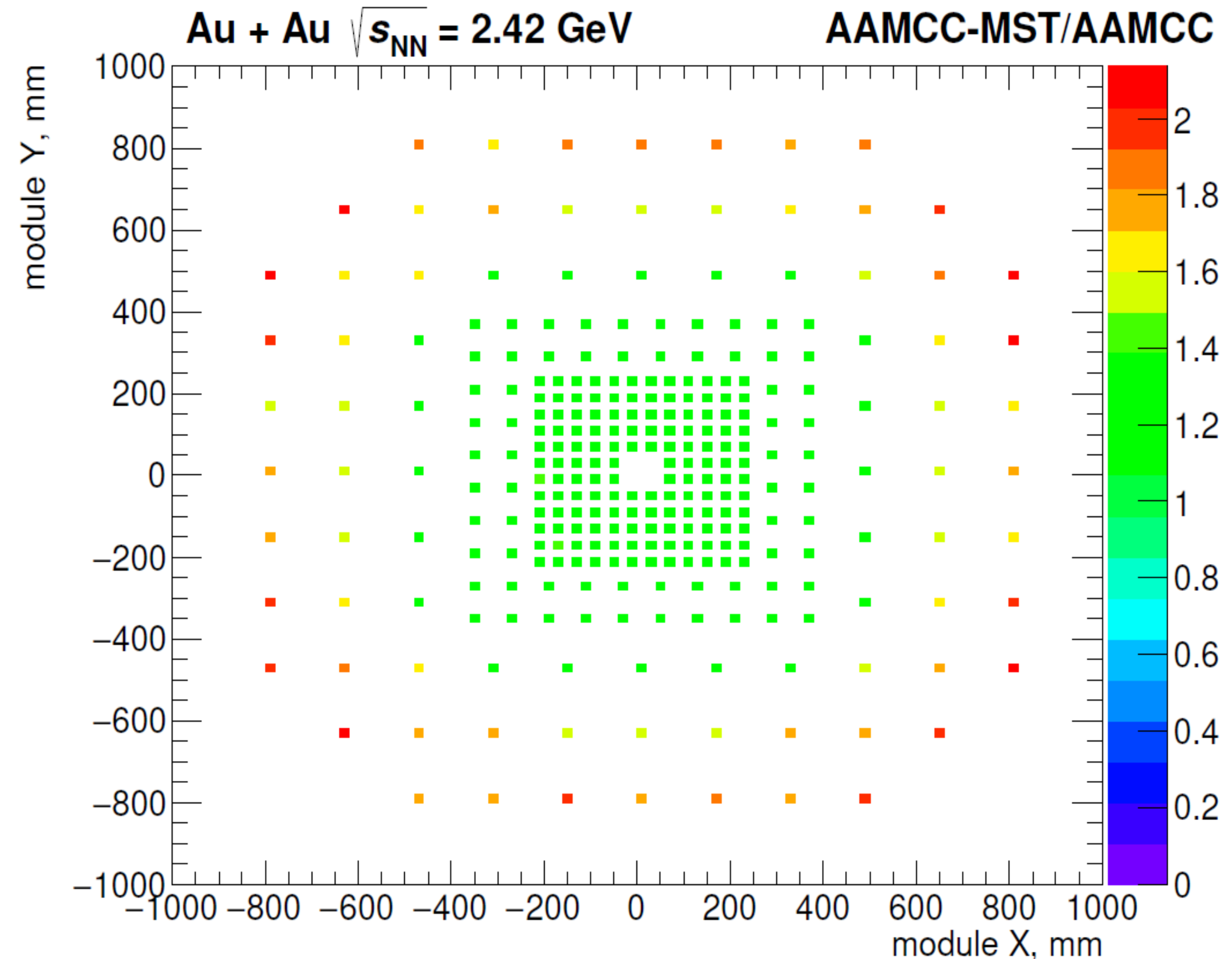
EMU-01/12-collaboration. 359 (1997) 277-290

A.S. Botvina et al. Nuclear Physics A. 584(1995) 737-756

Моделирование отклика FWall в эксперименте HADES



Включение предравновесной кластеризации MST позволяет увеличить число свободных нуклонов и улучшить согласие с экспериментом



Учёт предравновесных распадов с помощью MST приводит к почти двукратному увеличению частоты срабатывания внешних модулей FWall

Выводы

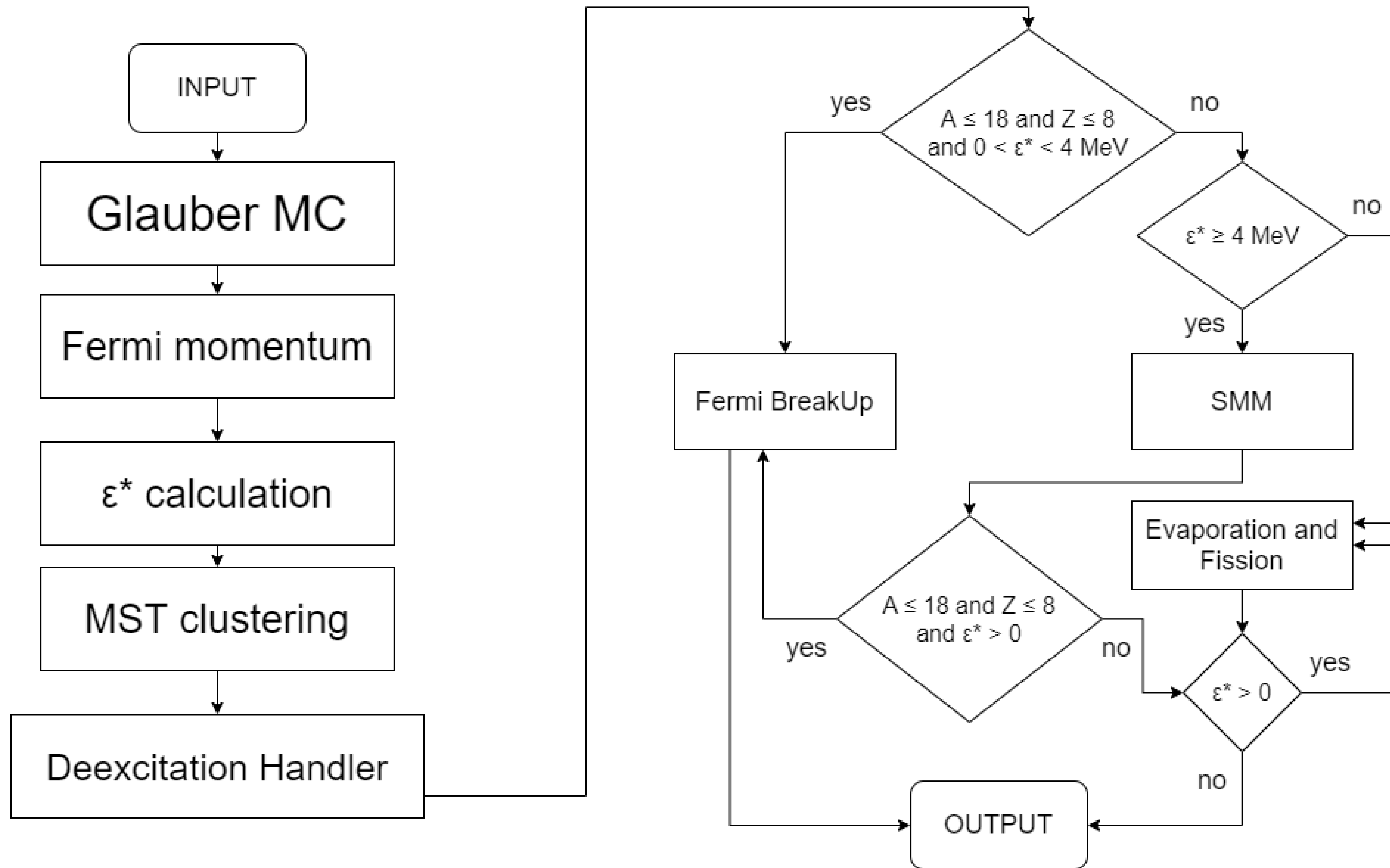
- Модель ААМСС была дополнена алгоритмом предравновесной кластеризации Minimum Spanning Tree (MST), учитывающим сложную геометрию спектаторной материи и расширение возбуждённого префрагмента.
- Выполнено сравнение результатов модели ААМСС-MST с экспериментальными данными по фрагментации спектаторов, вычислен отклик переднего годоскопа в эксперименте HADES.
- Показано, что MST-кластеризация позволяет улучшить описание
 1. Максимального заряда среди спектаторных фрагментов в событии
 2. Множественности фрагментов промежуточной массы
 3. Свободных нейтронов и протонов
- Расхождение теории и эксперимента в отношении выходов ядер водорода и гелия может указывать на несовершенство описания поперечных импульсов в модели, что требует дальнейшей работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в
рамках научного проекта №18-02-40035-мега.

Спасибо за внимание!

BACKUP SLIDES

Диаграмма демонстрирующая схемы работы ААМСС-MST



Prefragment Expansion

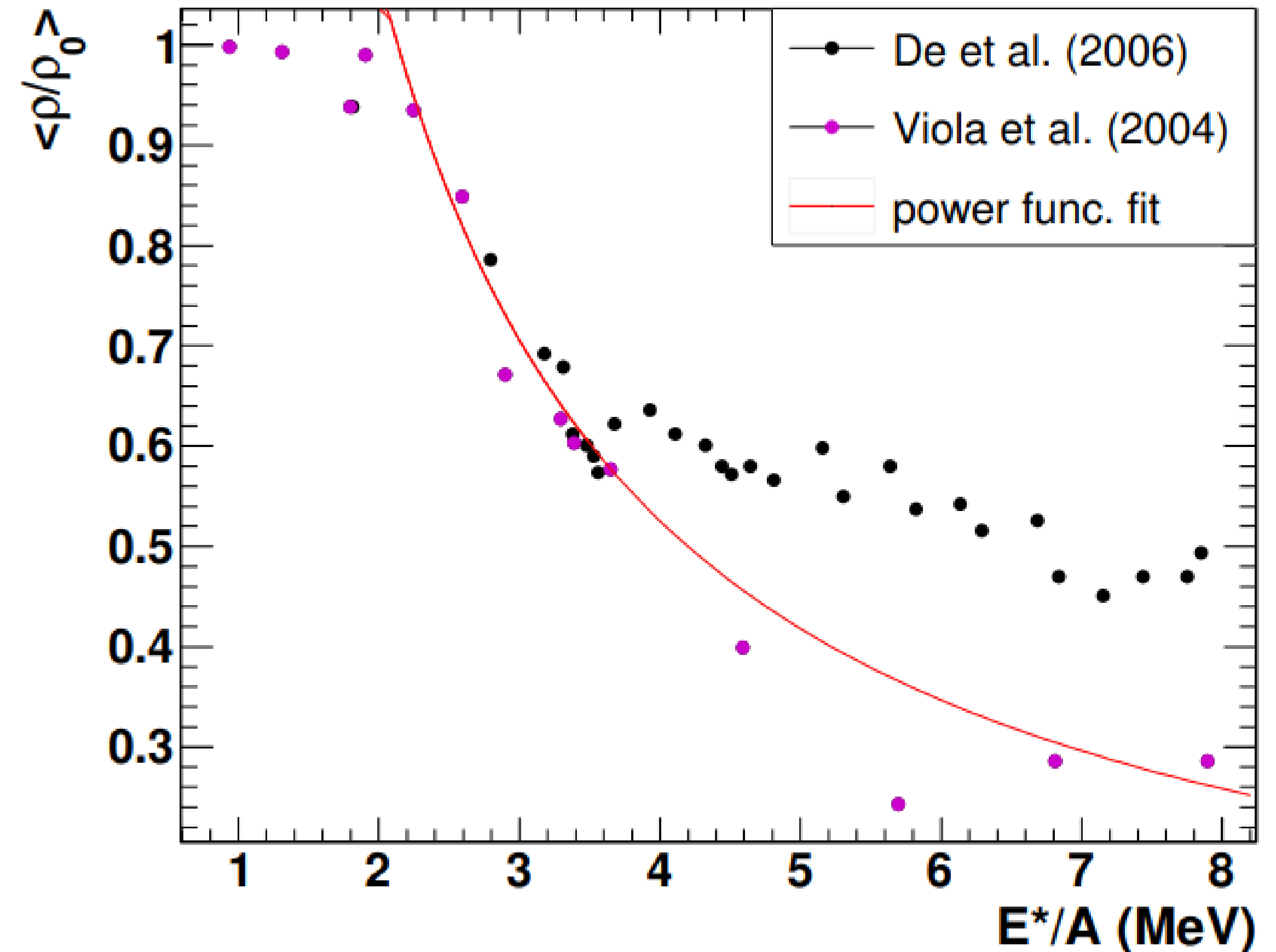
- When $\epsilon^* > 2 \text{ MeV}/\text{nucl}$, nuclear matter undergoes liquid-gas phase transition
- The larger the size of the prefragment, the longer the average distance between nucleons
- Therefore, d increases with the density of the prefragment:

$$d \propto V^{-1/3} \longrightarrow d \propto \rho^{1/3}(\epsilon^*)$$

Following J. De (2006) and V. Viola (2004) we assume:

$$d = \begin{cases} d_0, & \epsilon^* < 2 \text{ MeV}/\text{nucl} \\ d_0 \cdot (\epsilon^*/\epsilon_0)^{\frac{\alpha}{3}}, & \epsilon^* > 2 \text{ MeV}/\text{nucl} \end{cases}$$

Where $d_0 = 2.7 \text{ fm}$, while $\alpha = -1.02 \pm 0.10$, $\epsilon_0 = 2.17 \pm 0.23 \text{ MeV}$ are the fitting parameters



J. De et al. Phys. Lett. B 638 (2006) 160-165

V. Viola et al. Phys. Rev. Lett. B 93 (2004) 1-4

Momentum for nucleons from MST

$$M_{pf} = M_{ground} + E_{ex} > M_{\Sigma \text{ after MST}} = \sum_f M_f \quad (*)$$

the excitation energy is distributed only between the fragments with $A > 1$

$$M_f = \begin{cases} M_{f_{ground}}, & \text{for nucleons} \\ M_{f_{ground}} + E_{f_{ex}}, & \text{not nucleons} \end{cases} \quad E_{f_{ex}} = E_{ex} \cdot \frac{A_f}{A_{pf}}$$

The difference in masses (*) is converted into the impulses

G4FermiPhaseSpaceDecay :: Decay(M_{pf} , std::vector < G4double > MstMassVector)

This method returns std::vector<G4LorentzVector *>

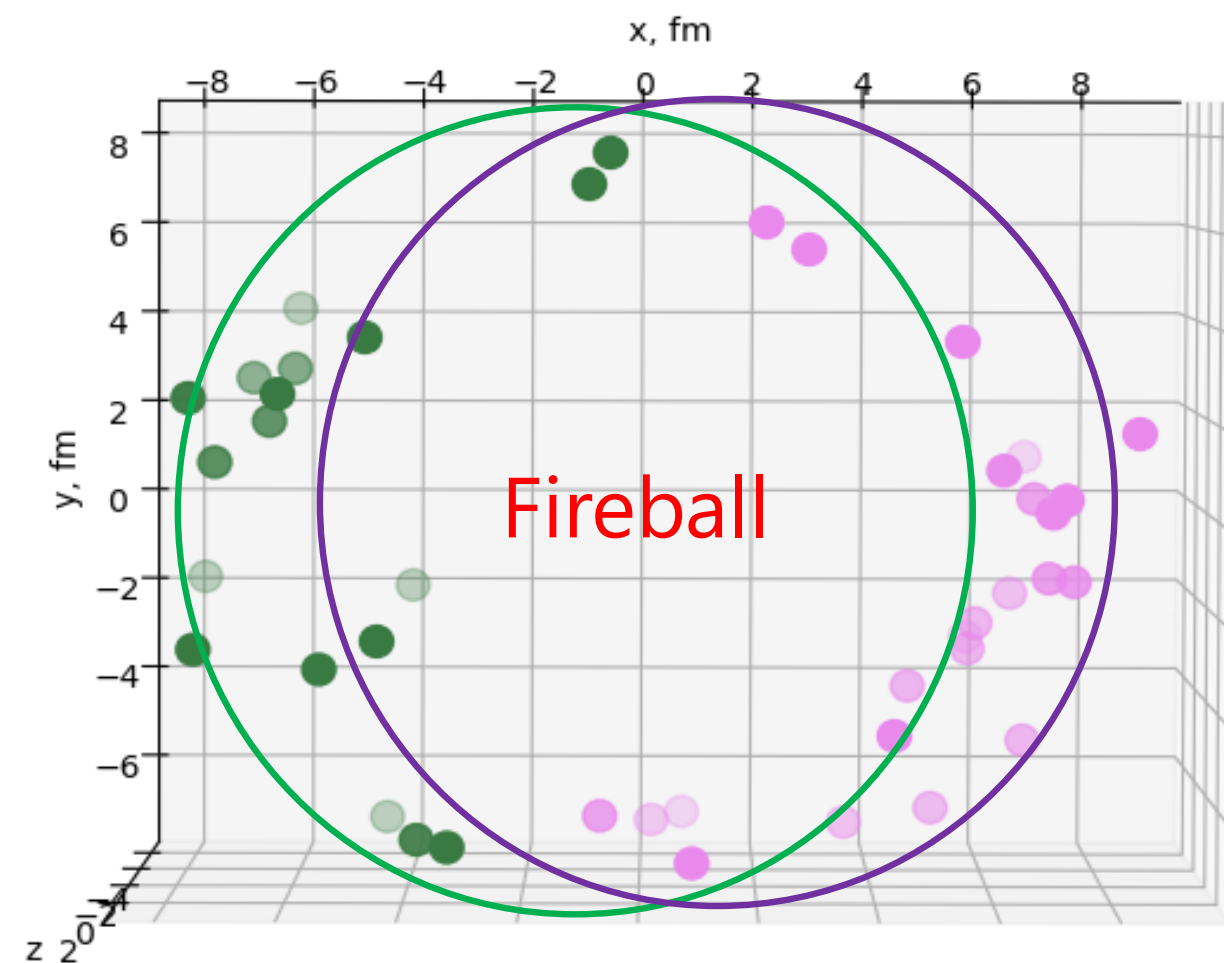
(MstMassVector is the vector of M_f s)

then the boost into the LabSystem is made

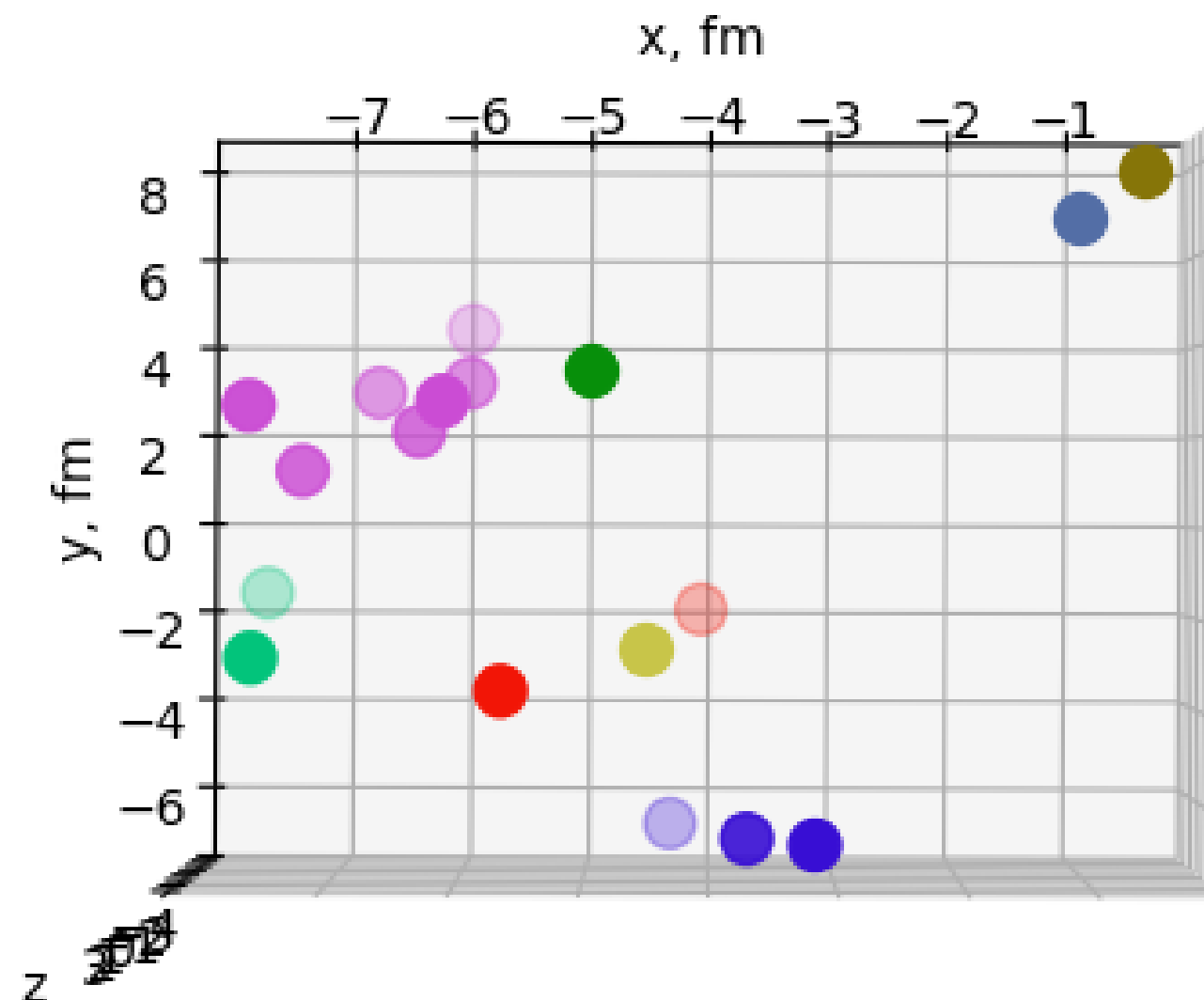
Visualization of the results of the MST algorithm in central collisions

Clusters representation from both sides

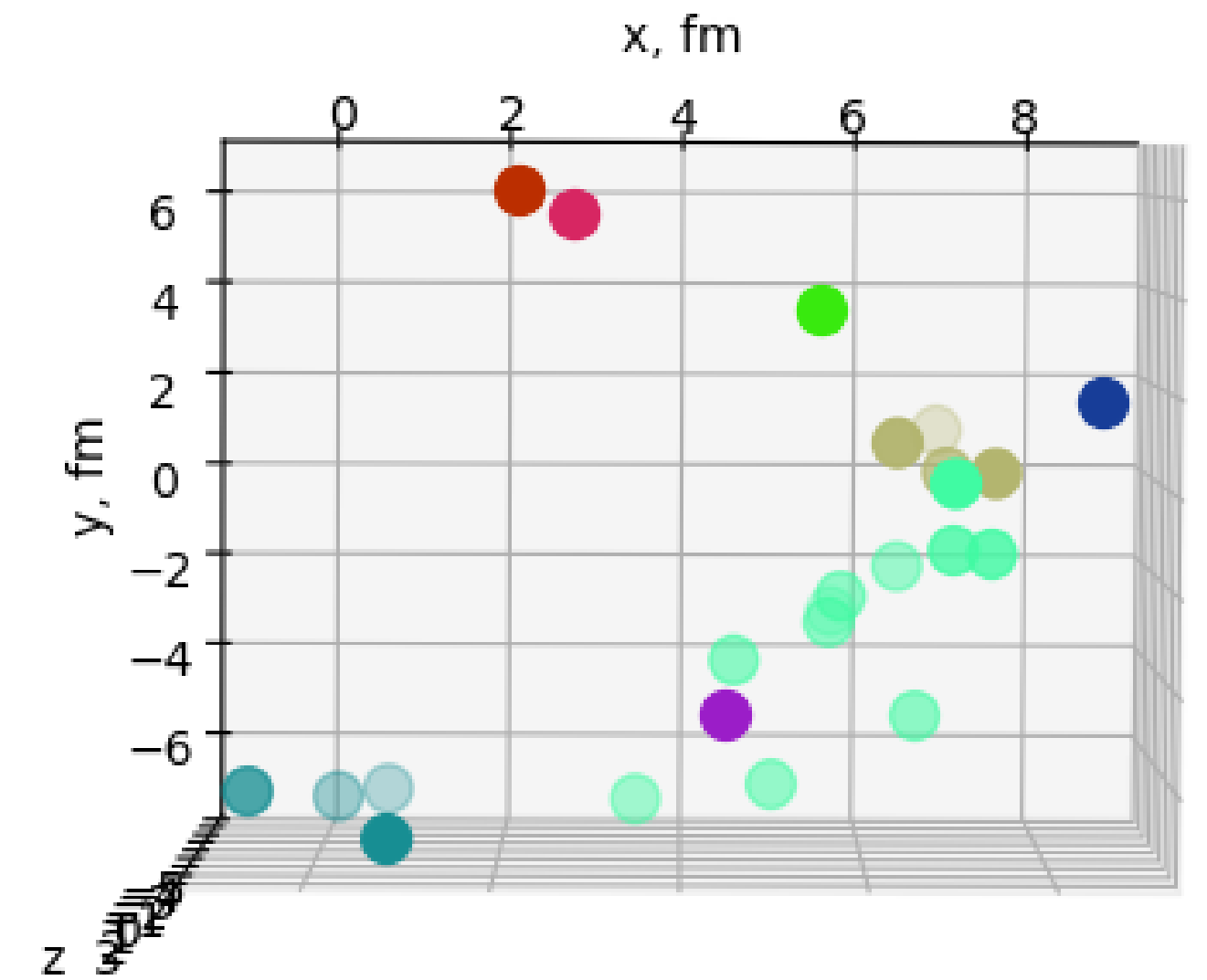
PbPb 158A GeV, $b = 2 \text{ fm}$



Clusters representation on the Side A

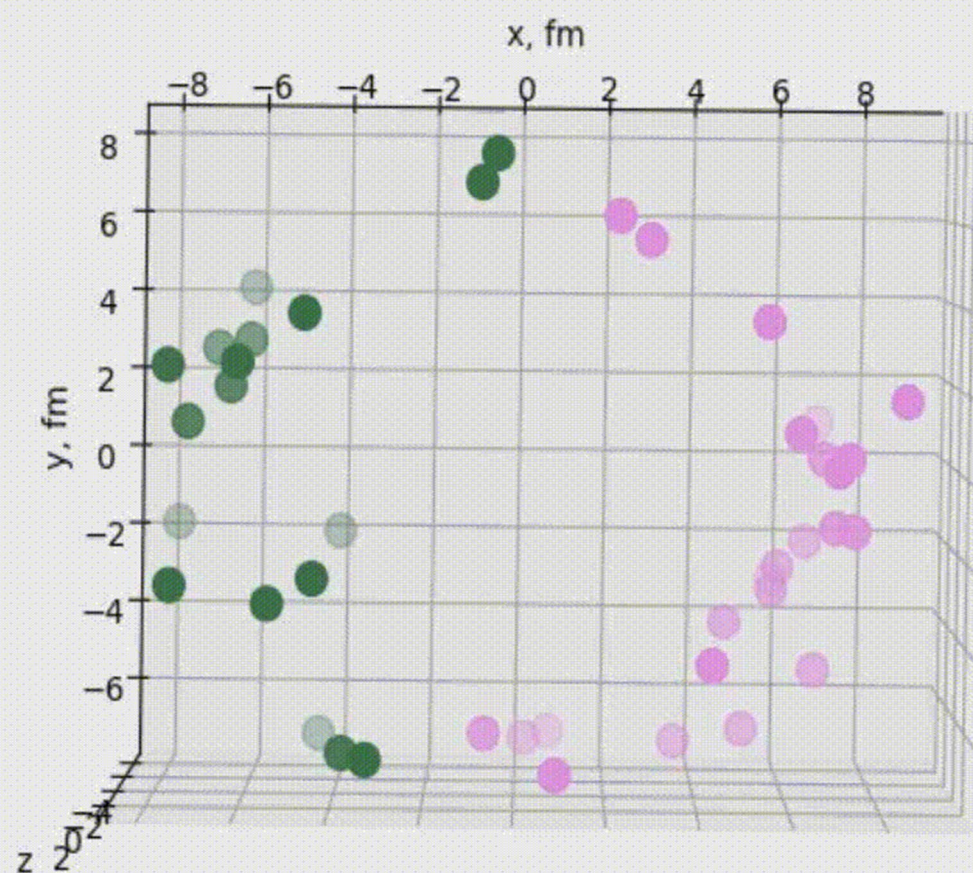


Clusters representation on the Side B



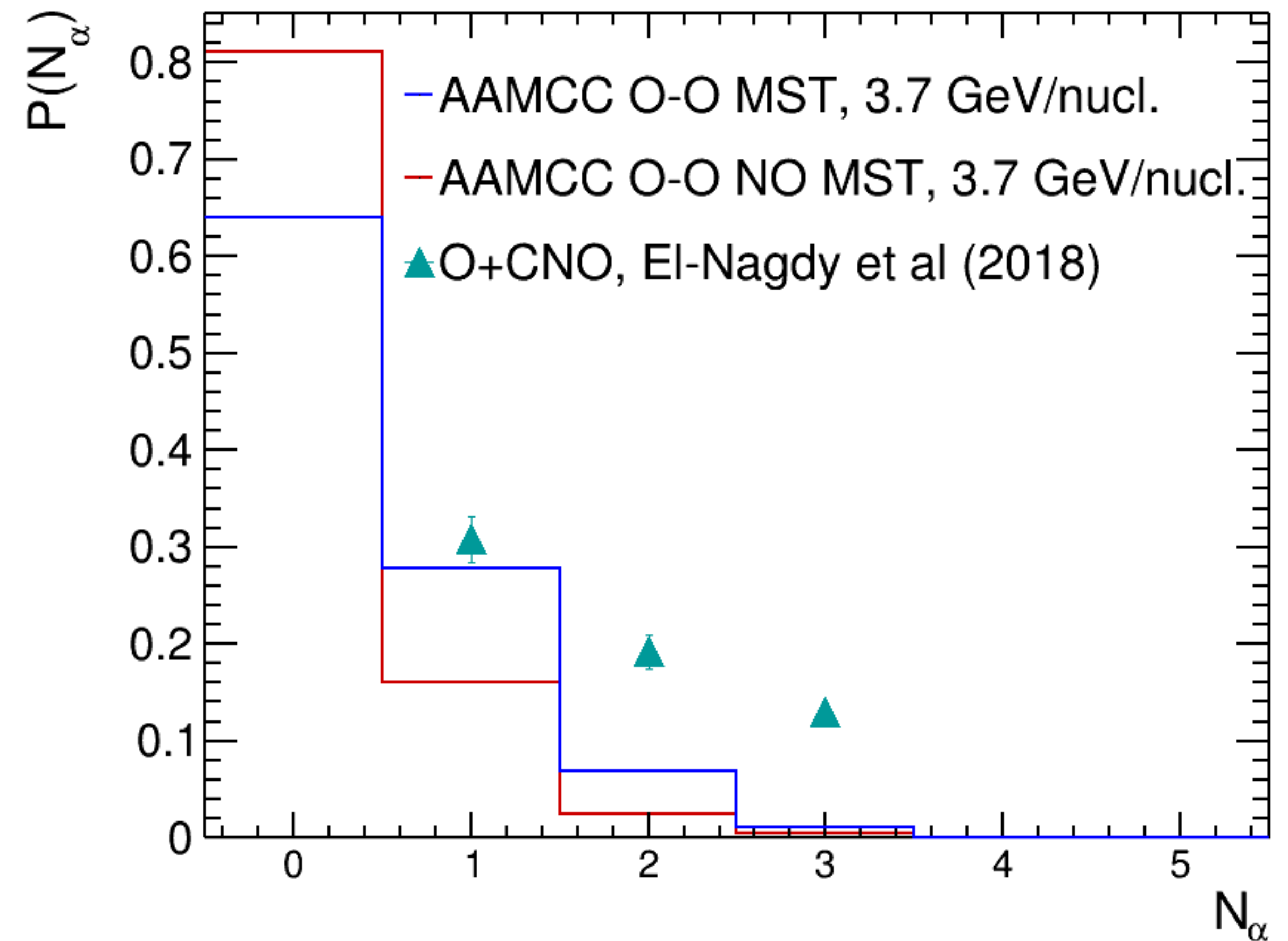
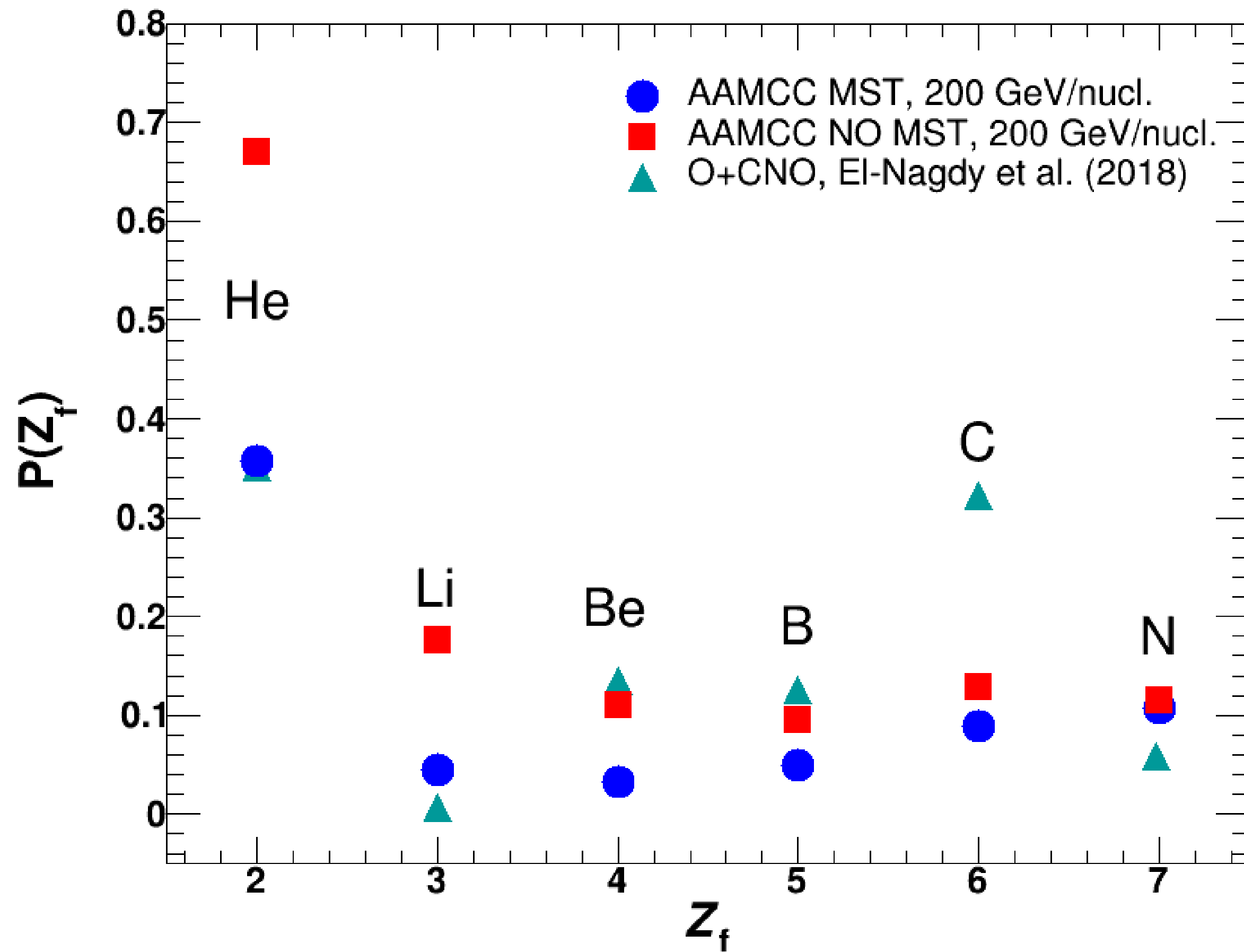
Axis Z – beam axis, XY – transverse plane*

Clusters representation from both sides



- The colors of the nucleons indicate different clusters
- In the central collisions, the prefragment has the shape of a narrow crescent
- MST-clustering increases the yield of free nucleons

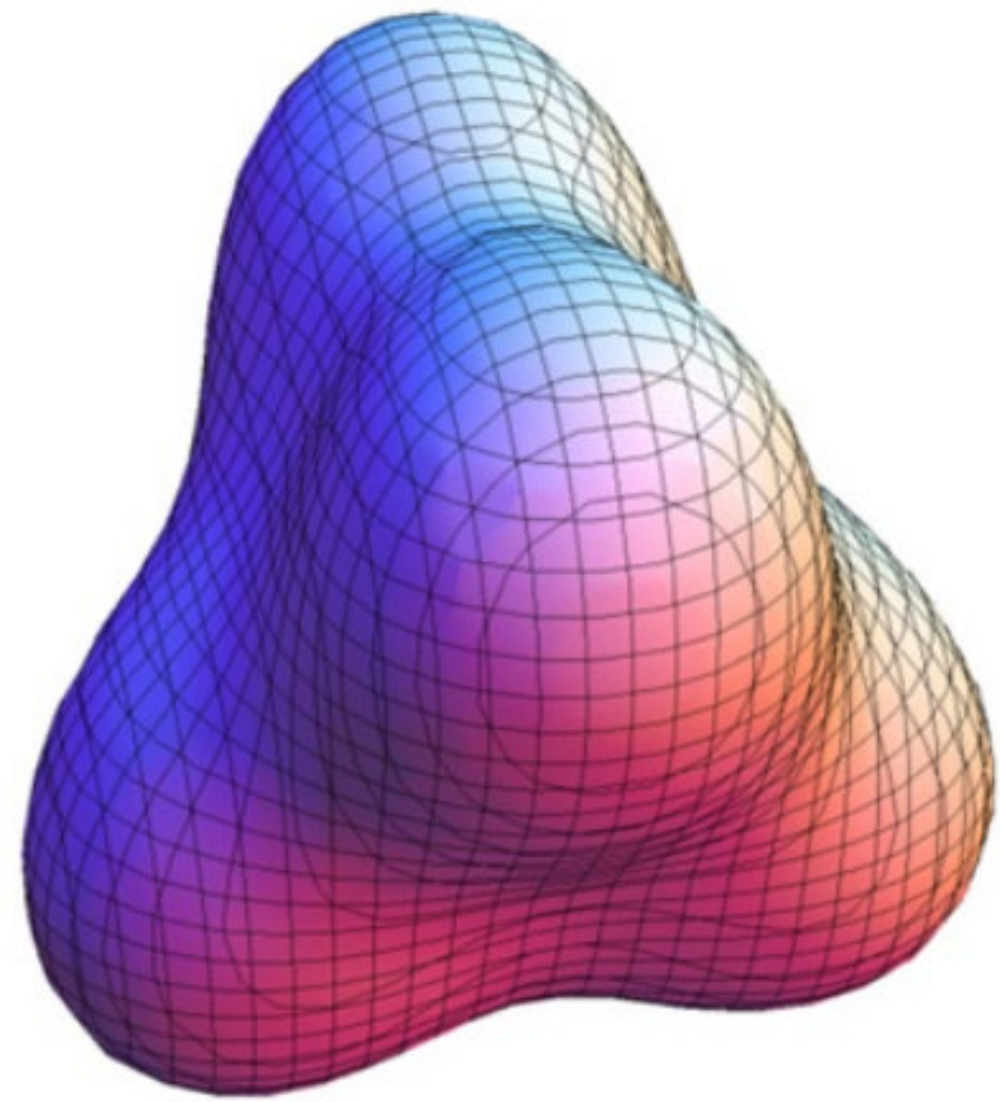
Spectator fragments from ^{16}O — ^{16}O collisions at the LHC



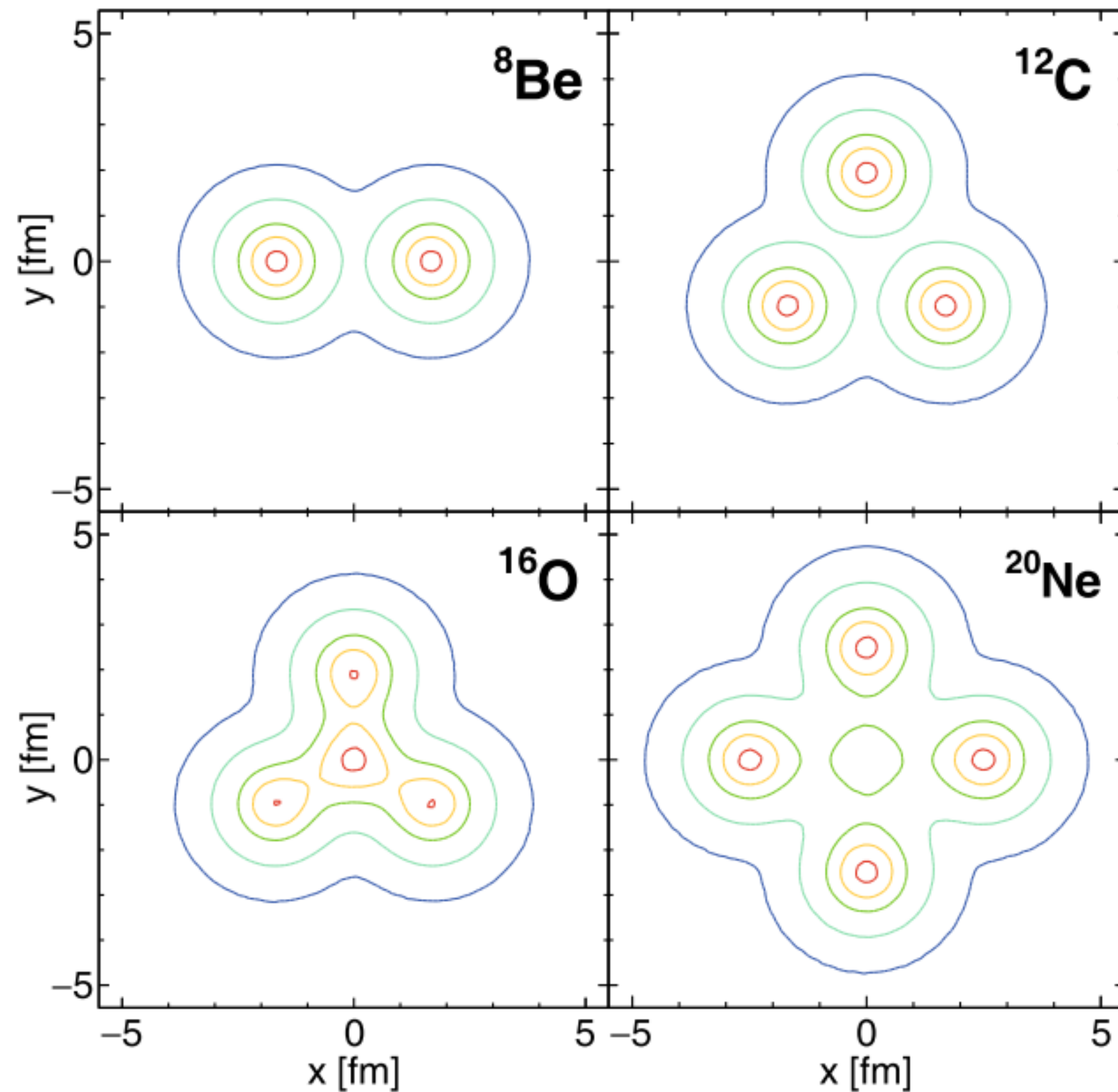
- Production of He, Li, Be, B and N is described well by the AAMCC-MST
- However AAMCC-MST underestimates the production of C
- The rates of one, two and three alphas are underestimated in contrast to the helium production in the left panel.
- The overestimation of ^3He could be a reason

Note: the α —clustering in initial ^{16}O is neglected in AAMCC-MST.

Alpha-cluster model of ^{16}O



Density distributions of ^{16}O calculated by HF based on SkV functional



Shapes of nuclei with α –clustering. The isodensity lines correspond to 1, 15, 50, 75 and 95% of the maximum density

- Accounting for the α –clustering structure of ^{16}O can change the composition of spectator matter produced in the relativistic ^{16}O – ^{16}O collisions.
- MST-clustering algorithm can also improve the description of the yield of secondary ^{12}C due to their α –clustering structure.

See the talk by A. Svetlichnyi at EPS HEP Conference 2021 explaining the need in accounting for α –clustering in ^{16}O – ^{16}O collisions.