

# Моделирование спектаторной материи в столкновениях релятивистских ядер с учетом эффектов ядерной структуры

Козырев Никита Алексеевич

*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия*

*Институт ядерных исследований Российской Академии Наук, Москва, Россия*

Научный руководитель: Пшеничнов Игорь Анатольевич

# Цели работы

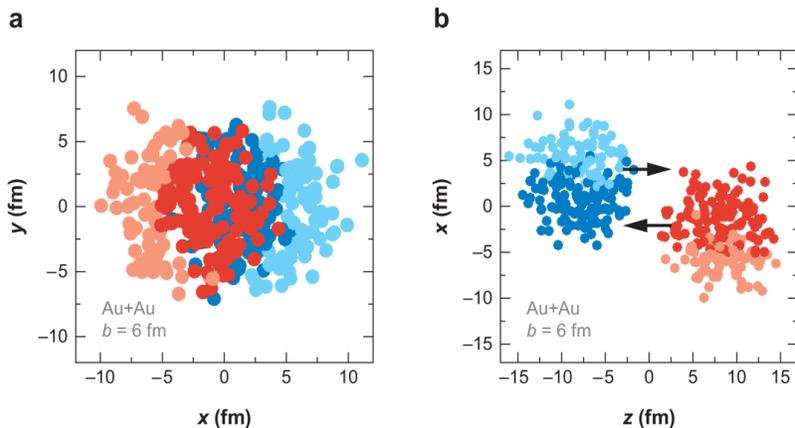
- Поиск характеристик спектаторной материи, чувствительных к свойствам поверхностного нейтронного слоя сталкивающихся релятивистских ядер.
- Исследование влияния взаимной ориентации деформированных ядер в их столкновениях и степени их деформации на состав спектаторной материи.
- Изучение возможности использования ААМСС-MST в эксперименте СВМ в качестве модели спектаторной материи.

# Abrasion-Ablation Monte Carlo for Colliders (AAMCC-MST)

## 1. Определение количества нуклонов-спектаторов и партисипантов

- Модель Glauber Monte Carlo

*C. Loizides et al., Phys. Rev. C, 97(2018), 054910.*



Пример Монте-Карло моделирования столкновения Au–Au.

Более темные кружки обозначают нуклоны-партисипанты, а светлые относятся к префрагментам.

- Nepeivoda R., Svetlichnyi A., **Kozyrev N.**, Pshenichnov I. *Particles* 5(1),40-51 (2022). <https://doi.org/10.3390/particles5010004>
- Pshenichnov I., **Kozyrev N.** et al. *Phys. Part. Nuclei* 52, 591–597 (2021). <https://doi.org/10.1134/S1063779621040493>

## 2. Возбуждение префрагмента

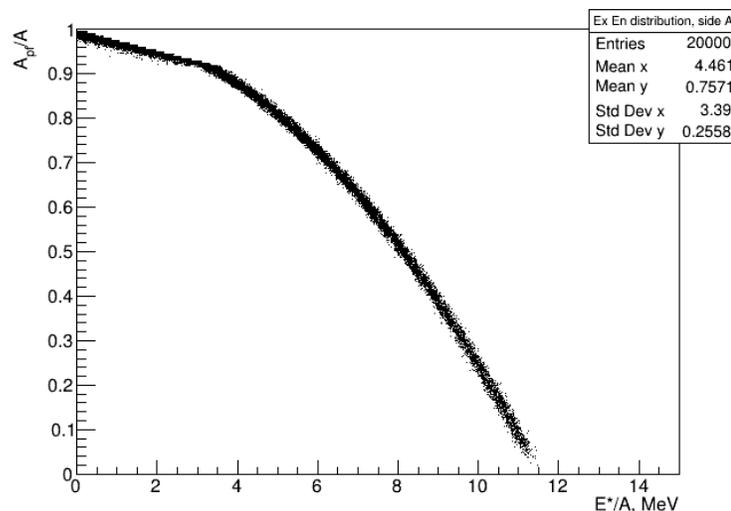
- Формула Эриксона

*T. Ericson, Advances in Physics, 9(1960), 425–511*

- Аппроксимация ALADIN

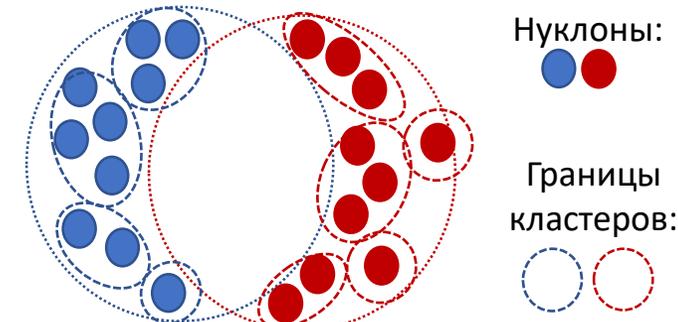
*A.S Botvina et al., Nucl. Phys. A, 584(1995), 737–756.*

- Гибрид формулы Эриксона и аппроксимации ALADIN

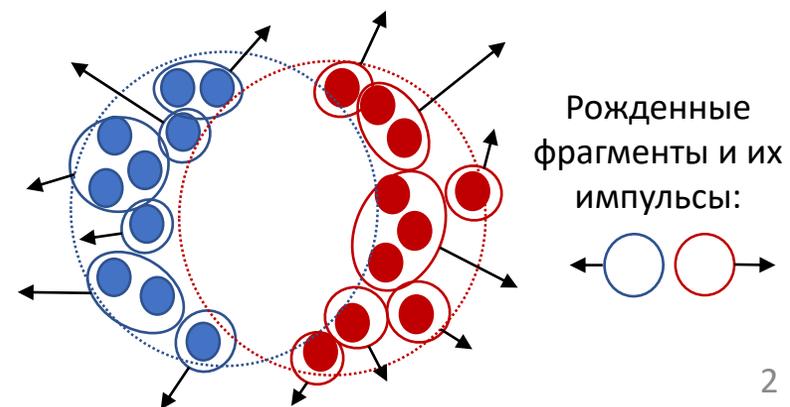


## 3. Распад префрагмента

1. Разделение префрагмента на кластеры с помощью MST-алгоритма.

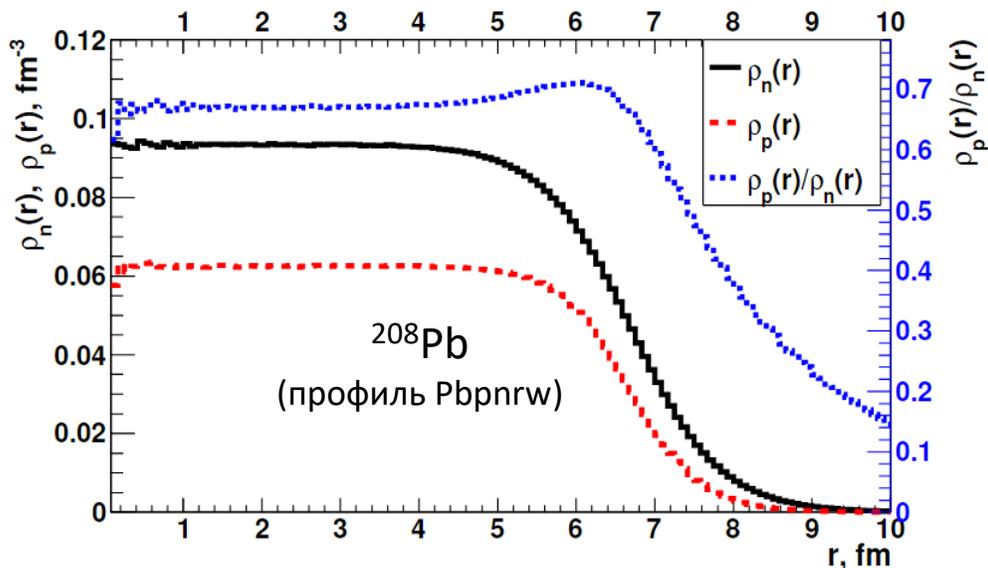


2. Последующий распад этих кластеров с помощью моделей девозбуждения ядер из Geant4.



# Исследование поверхностного нейтронного слоя в столкновениях релятивистских ядер

**Поверхностный нейтронный слой** (ПНС, neutron skin, NS) – явление увеличения соотношения между локальными плотностями нейтронов и протонов на периферии тяжелых и легких ядер с избытком нейтронов:

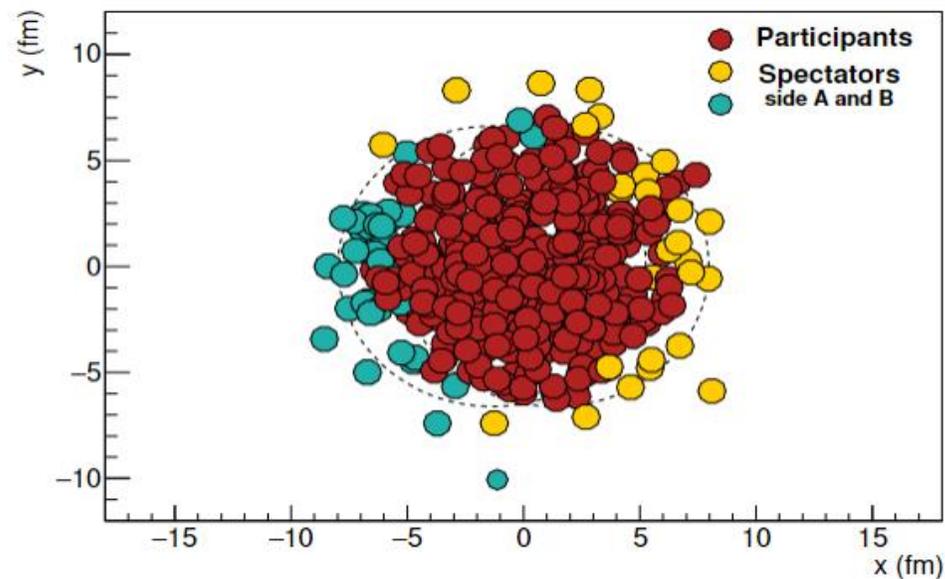


$$\rho_{n,p}(r) = \frac{\rho_{0n,p}}{1 + \exp[(r - R_{n,p})/a_{n,p}]},$$

$$\int d^3r (\rho_n(r) + \rho_p(r)) = A.$$

$$\Delta r_{np} = \langle r_n^2 \rangle^{1/2} - \langle r_p^2 \rangle^{1/2}$$

Спектаторная материя в **ультрацентральных** столкновениях состоит в основном из нуклонов из «срезаемой» периферии ядра, в которой и проявляется эффект NS:



- Сечения выходов определенных чисел спектаторных нейтронов и протонов должны **зависеть от параметров NS**.
- Альтернативный способ изучения NS полезен, так как существующие предсказания моделей и экспериментальные данные, полученные разными методами, **противоречат друг другу**.

# Состав спектаторной материи зависит от параметров NS

Проведем моделирование  $^{208}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}$  столкновений с различными исходными профилями **нуклонных плотностей** в свинце:

	$R_n$ , фм	$a_n$ , фм	$R_p$ , фм	$a_p$ , фм	$\Delta r_{np}$ , фм
NFB-8	6.679	0.546	6.683	0.451	0.115
NL1	6.940	0.587	6.718	0.463	0.321
Pbpnrw	6.69	0.56	6.68	0.447	0.15
PREX	6.81	0.60	6.68	0.447	0.283
PREX1	6.68	0.66	6.68	0.447	0.283
PREX2	6.94	0.53	6.68	0.447	0.283

Отличия заметны уже в **средних** выходах спектаторных нуклонов и дейтронов:

	$\Delta r_{np}$ , фм	$\langle N_n \rangle$	$\langle N_p \rangle$	$\langle N_d \rangle$
NFB-8	0.115	12.45	6.82	0.87
NL1	0.321	13.88	6.44	0.77
Pnpnrw	0.15	12.73	6.74	0.85
PREX	0.283	13.59	6.42	0.80
PREX1	0.283	13.79	6.49	0.78
PREX2	0.283	13.41	6.32	0.82
NA49		$9.0 \pm 1.8$	$7.0 \pm 1.4$	0.5

(  $\sqrt{s_{NN}} = 17.21$  ГэВ,  $b = 2$  фм )

Наибольшую зависимость от параметризации NS проявляют сечения событий с **фиксированными множественностями** спектаторных нейтронов и протонов:

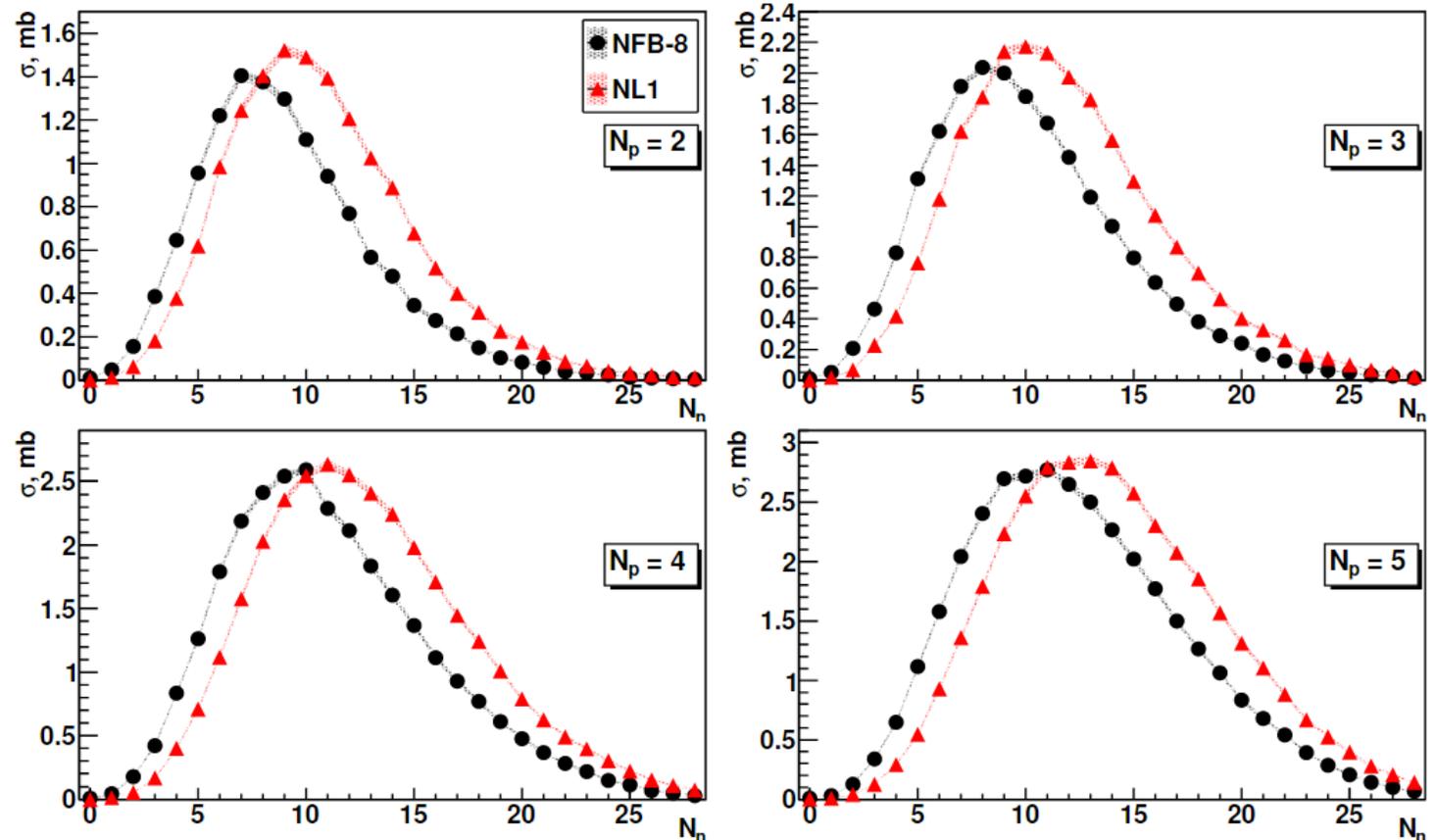


Рис.: Зависимости сечений событий с фиксированным числом спектаторных протонов  $N_p$  от числа спектаторных нейтронов  $N_n$ .

$0 \leq b \leq 3.49$  фм и  $\sqrt{s_{NN}} = 17.21$  ГэВ

# Состав спектаторной материи зависит от параметров NS

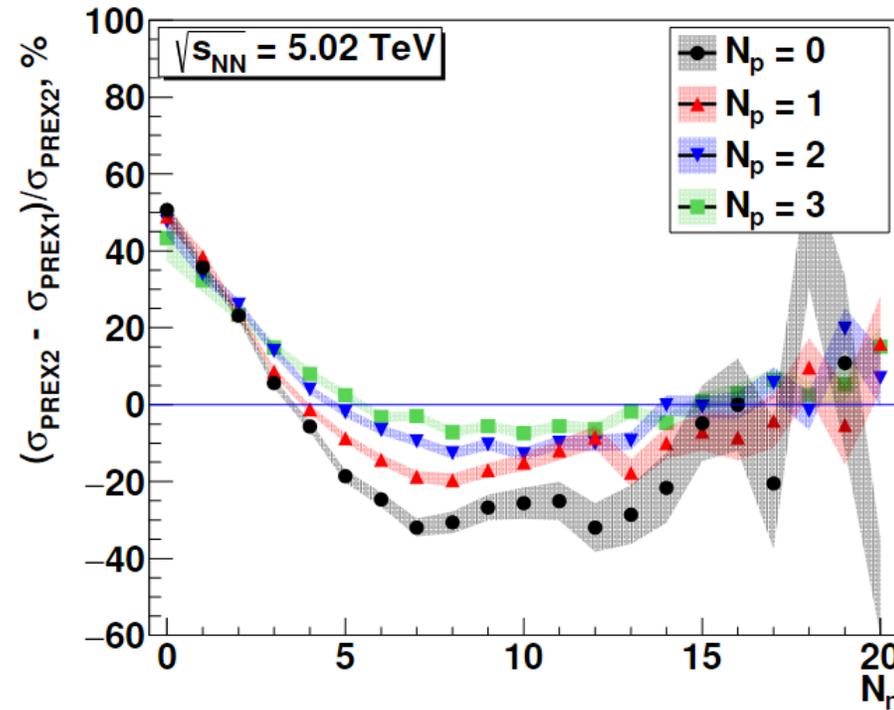
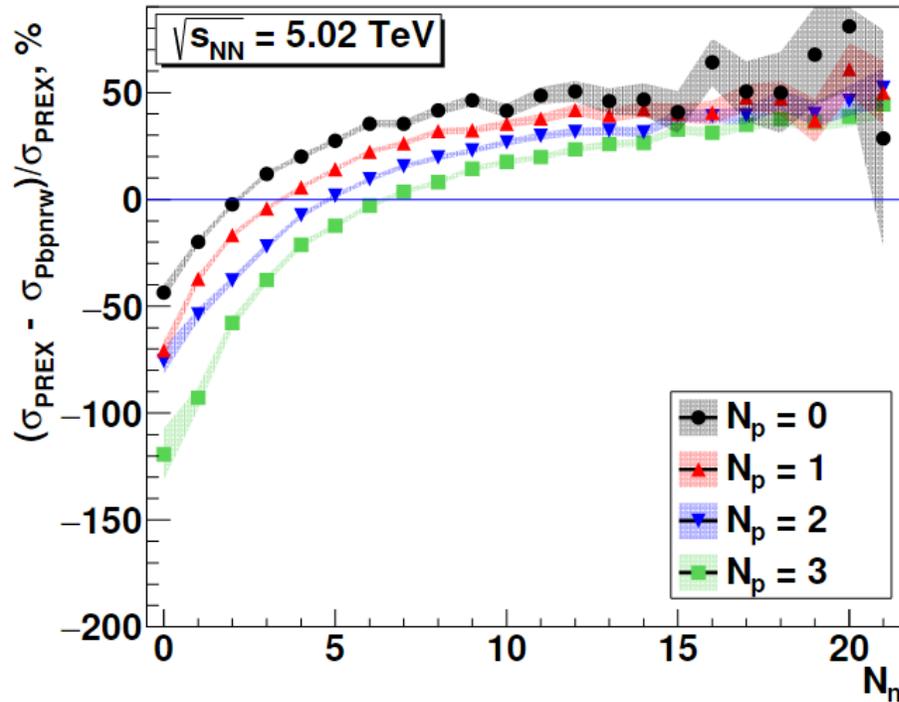
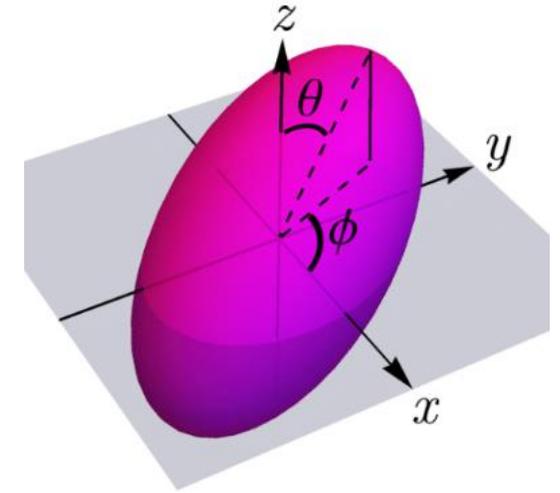


Рис.: Относительная разница между сечениями  $\sigma(N_n, N_p)$  событий с определенным числом спектаторных нейтронов  $N_n$  и фиксированным числом спектаторных протонов  $0 \leq N_p \leq 3$ , вычисленных с разными профилями нейтронных плотностей в  $^{208}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}$  столкновениях,  $0 \leq b \leq 3.49 \text{ fm}$ .

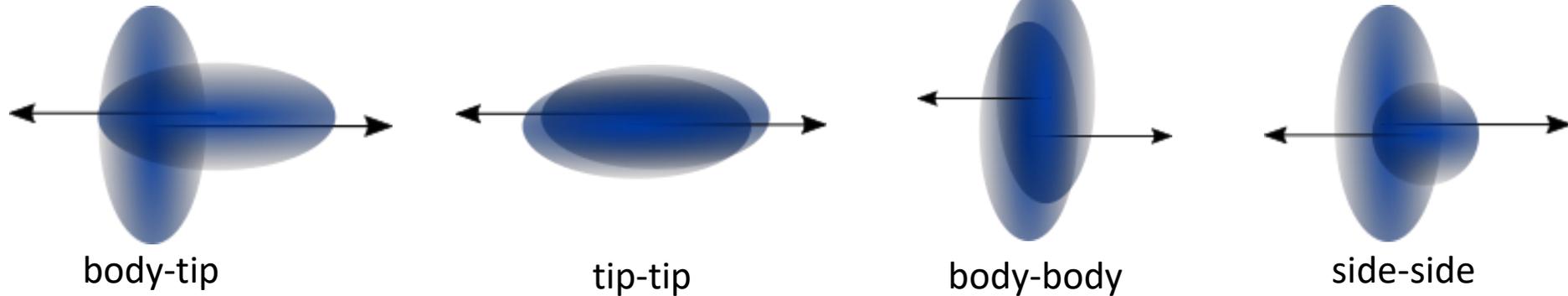
- Таким образом, впервые было показано, что сечения  $\sigma(N_n, N_p)$  событий с **низкими множественностями** спектаторных нейтронов и протонов в ультрацентральных столкновениях чувствительны как к толщине NS, так и к соотношению между  $a_n$  и  $R_n$  при фиксированной  $\Delta r_{np}$ .
- Данные сечения были предложены для **измерения** в эксперименте **ALICE** на LHC с помощью ZDCs.
- **N. Kozyrev**, A. Svetlichnyi, R. Nepeivoda, I. Pshenichnov, submitted to EPJ A, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.07189>
- U. Dmitrieva, **N. Kozyrev**, A. Svetlichnyi, I. Pshenichnov, AIP Conference Proceedings 2377, 030005 (2021), <https://doi.org/10.1063/5.0063284>

# Столкновения релятивистских деформированных ядер

- Большинство известных ядер имеет **несферическую** форму.
- Форма факела в столкновениях деформированных ядер высоких энергий может быть разной в зависимости от **начальной ориентации ядер**.
- Это приводит к разным значениям **радиальных потоков** и изменяет среднюю **плотность энергии** в факеле, которая определяет дальнейшую эволюцию системы.
- Поэтому возникает задача **отбора событий** с определенной ориентацией сталкивающихся ядер, например, по свойствам **спектраторов** в таких событиях.



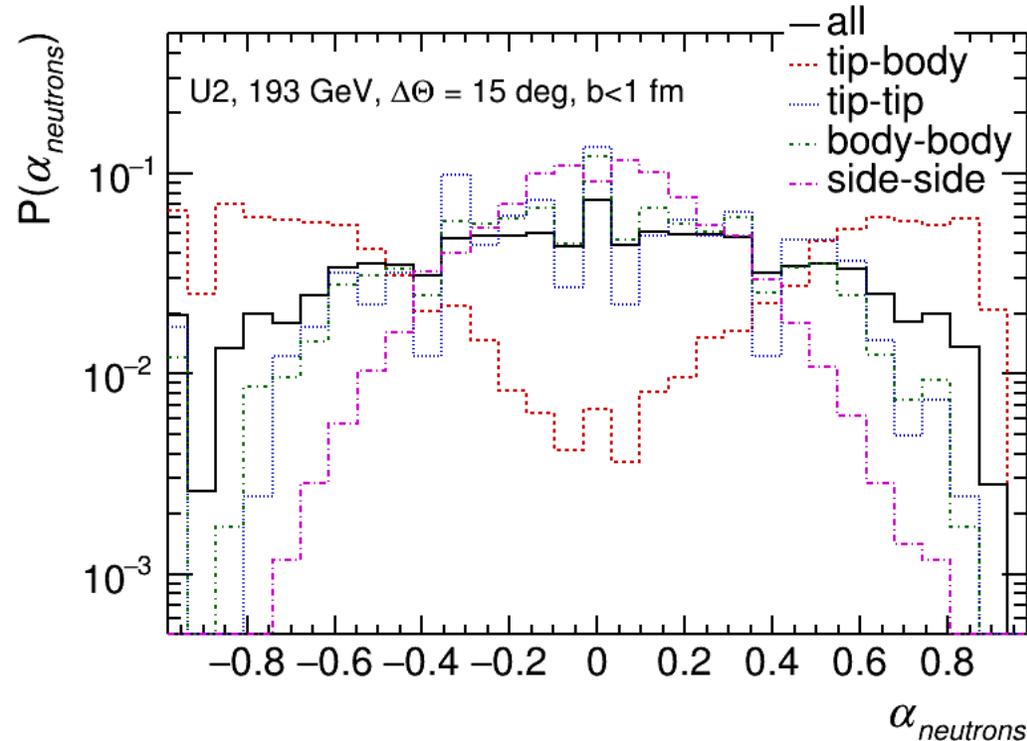
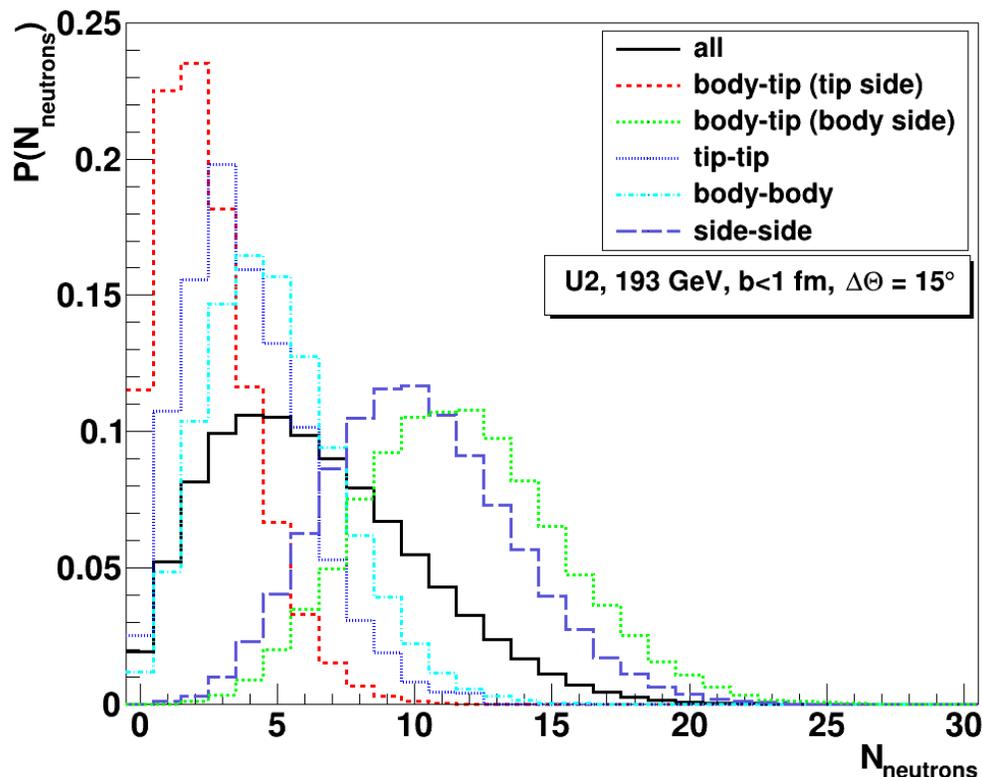
Вид сбоку:



Вид вдоль оси пучка:



# Влияние ориентации сталкивающихся ядер на выходы спектаторных нейтронов



Нейтронная асимметрия:

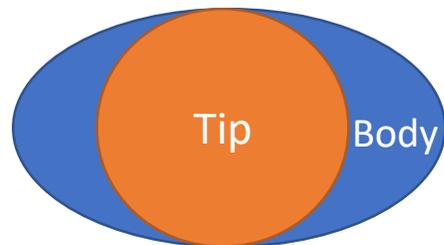
$$\alpha_N = \frac{N_A - N_B}{N_A + N_B}$$

Выходы (слева) и асимметрия (справа) спектаторных нейтронов в столкновениях  $^{238}\text{U}-^{238}\text{U}$  при  $\sqrt{s_{NN}} = 193$  ГэВ,  $b < 1$  фм,  $\Delta\theta = 15^\circ$  в случаях различных исходных ориентациях сталкивающихся ядер.

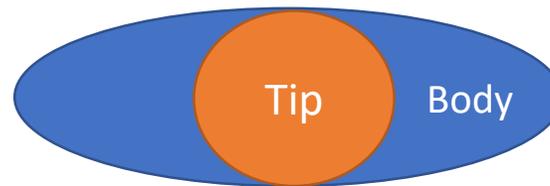
- Наибольшая нейтронная асимметрия предсказывается для событий **tip-body**.
- Напротив, события **side-side** с большим объемом спектаторной материи характеризуются малой асимметрией.
- Число спектаторных нейтронов наименьшее в событиях **tip-tip** и **body-body**. Асимметрия в этих событиях одинаково мала: их трудно различить.

# Средняя множественность нейтронов в tip-body событиях растет с увеличением $\beta_2$

Вид вдоль пучка



1. Слабая деформация



2. Сильная деформация

$$\beta_{2 \text{ for } 1} < \beta_{2 \text{ for } 2} \Rightarrow N_{n \text{ for } 1} < N_{n \text{ for } 2}$$

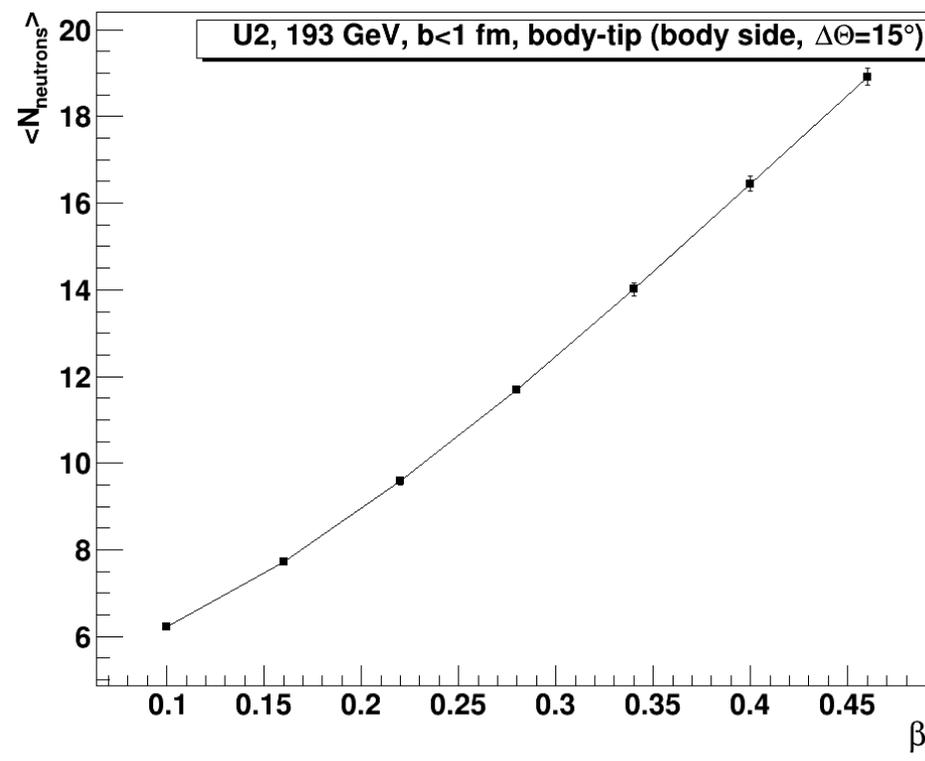
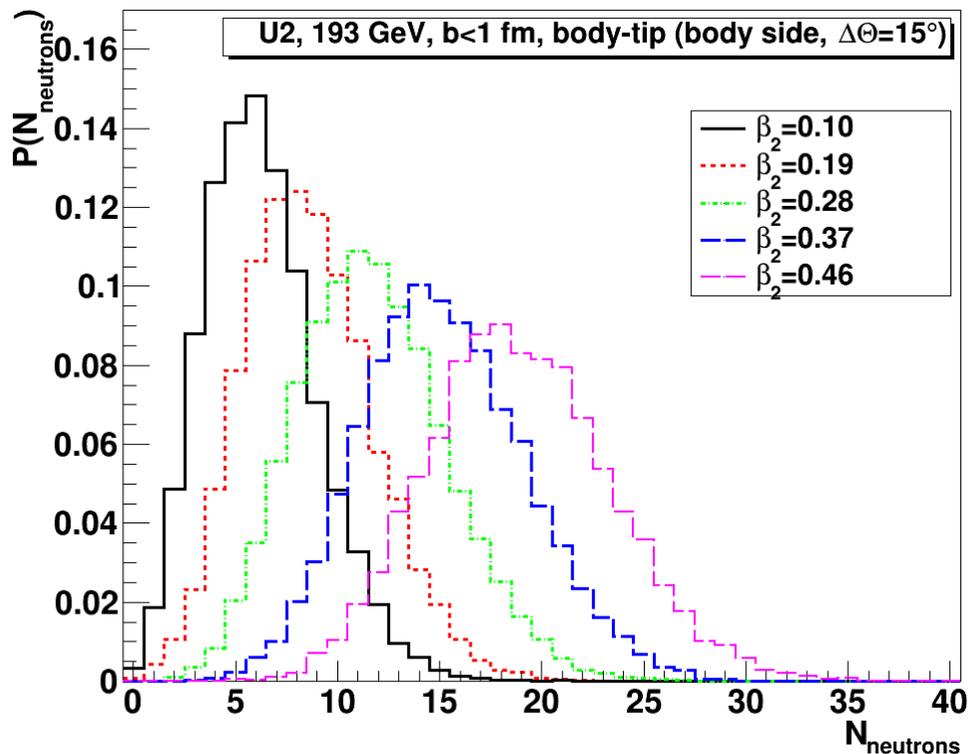


Рис.: Выходы (слева) и средняя множественность (справа) спектаторных нейтронов для различных значений  $\beta_2$  сталкивающихся ядер  $^{238}\text{U}$  в tip-body событиях при  $\sqrt{s_{NN}} = 193 \text{ GeV}$ ,  $b < 1 \text{ фм}$  и  $\Delta\theta = 15^\circ$ .

# Спектаторная материя на эксперименте CBM

- Эксперимент **CBM** на ускорительном комплексе FAIR будет оснащен детектором спектаторов от ядра-снаряда (Projectile Spectator Detector, **PSD**).
- Корректное моделирование спектаторных фрагментов необходимо для выполнения задач определения **центральности** и **плоскости реакции** в каждом столкновении, для которых будет использоваться PSD.
- Проведено сравнение результатов моделирования планируемых на эксперименте  $^{197}\text{Au}-^{197}\text{Au}$  столкновений с результатами модели **DCM-QGSM**.

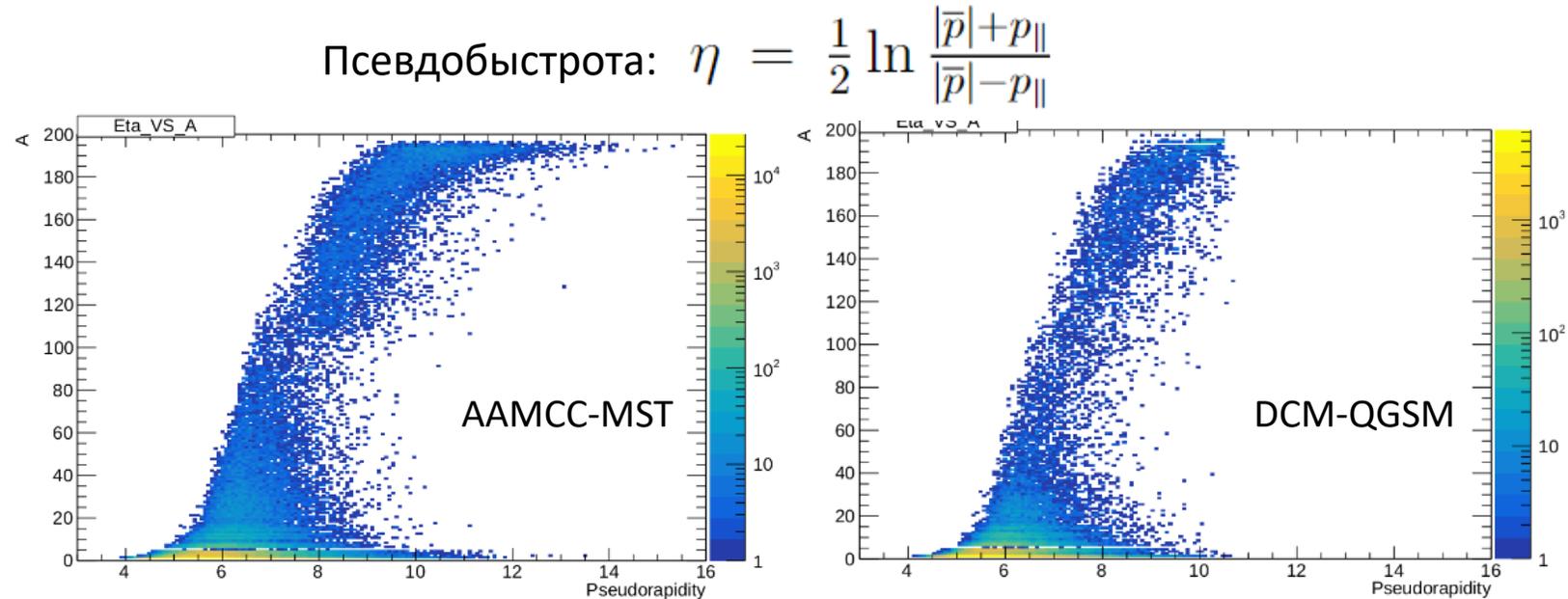
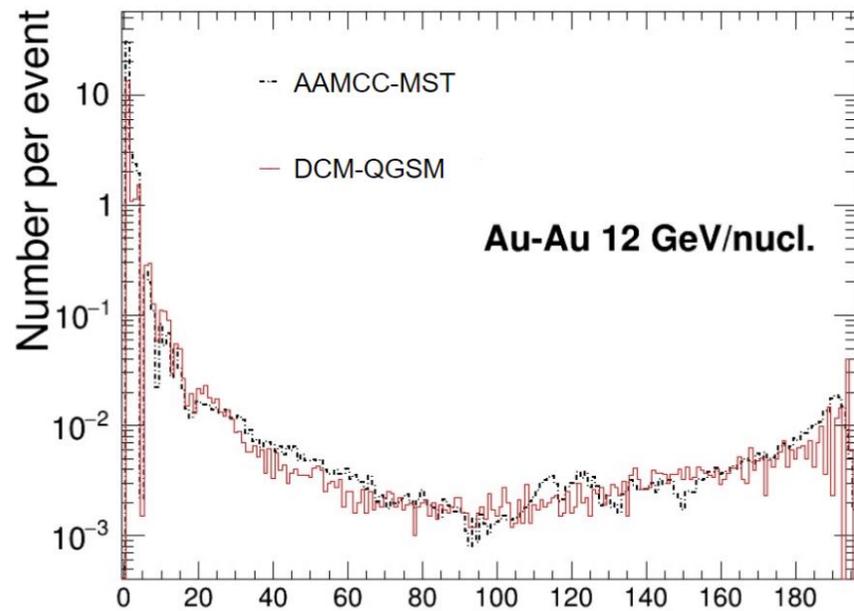


Рис.: Зависимости средней множественности спектаторов от их массового числа  $A$  (слева) и зависимости  $A$  от псевдобыстроты спектаторов (справа) в  $^{197}\text{Au}-^{197}\text{Au}$  при импульсе пучка в 12 АГэВ/с, полученные с помощью AAMCC-MST и DCM-QGSM.

# Отклик детектора PSD в эксперименте CBM

- Был смоделирован **отклик детектора PSD** на спектры, сгенерированные с помощью AAMCC-MST и DCM-QGSM.
- Результаты сравнения двух моделей показывают, что отсутствие учета в AAMCC-MST частиц, рожденных в области **перекрывания ядер**, приводит к расхождению во множественностях нуклонов и легких ядер в AAMCC-MST и DCM-QGSM.

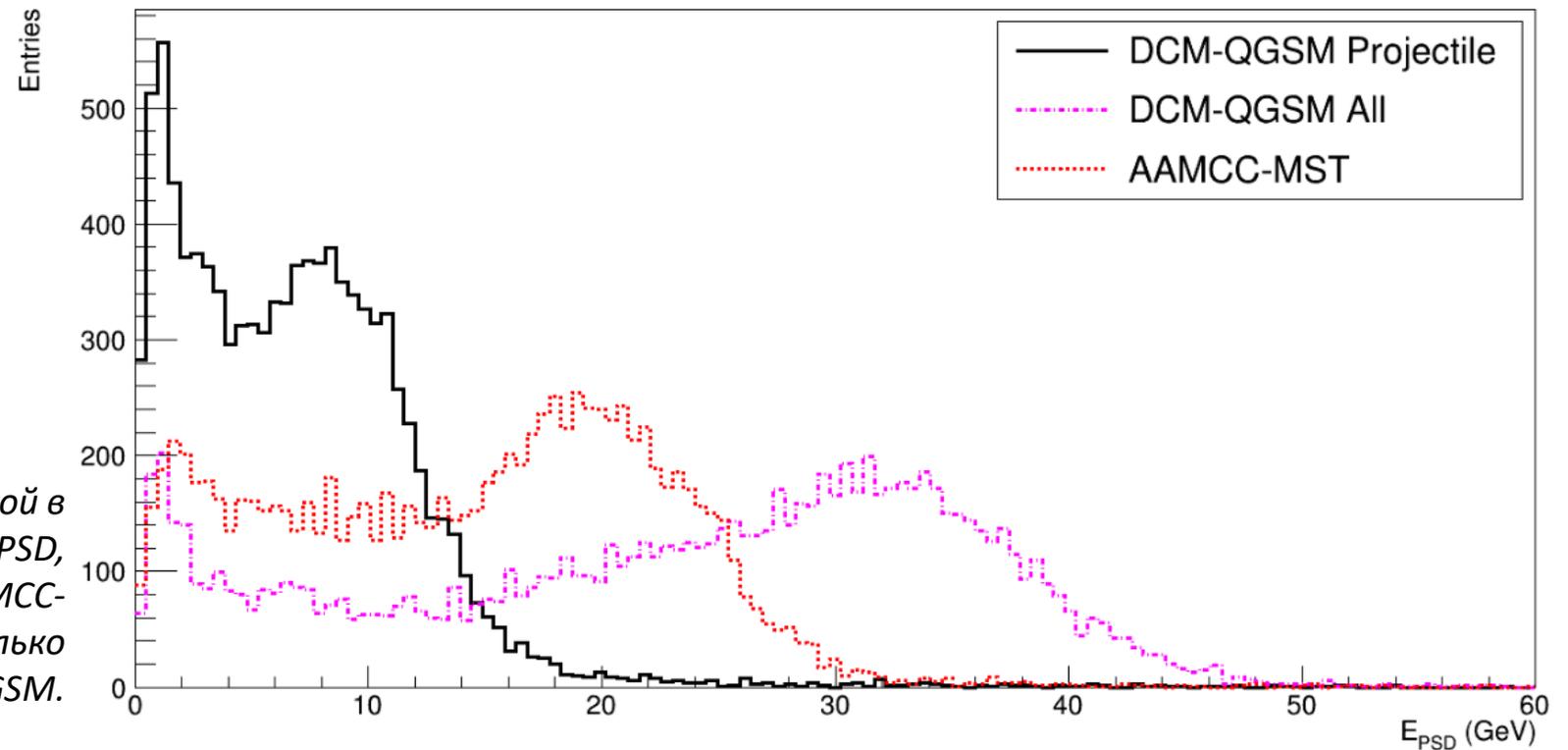
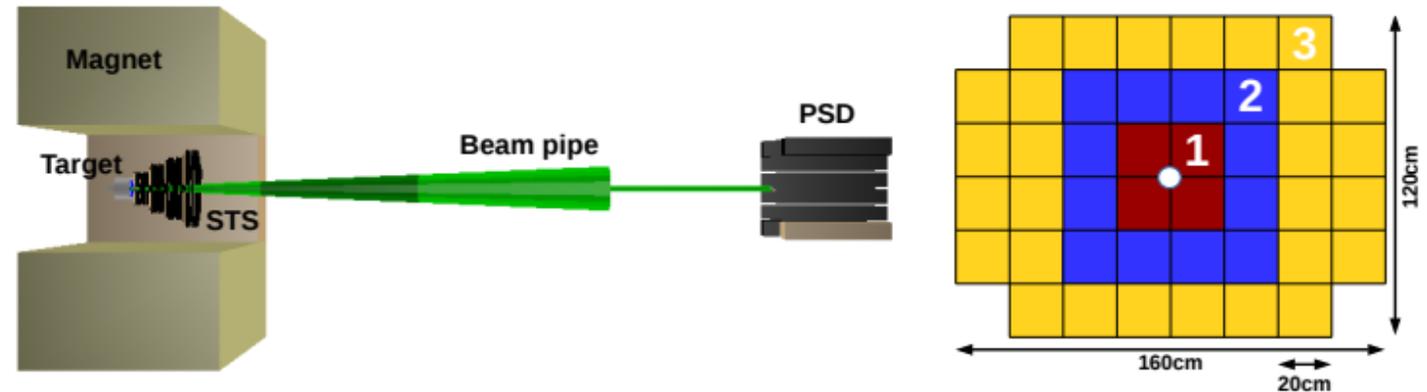


Рис.: Распределение энергии  $E_{\text{PSD}}$ , выделенной в активной части калориметров в составе PSD, как отклик на спектры на выходе AAMCC-MST, а также всех частиц и только спектров на выходе DCM-QGSM.

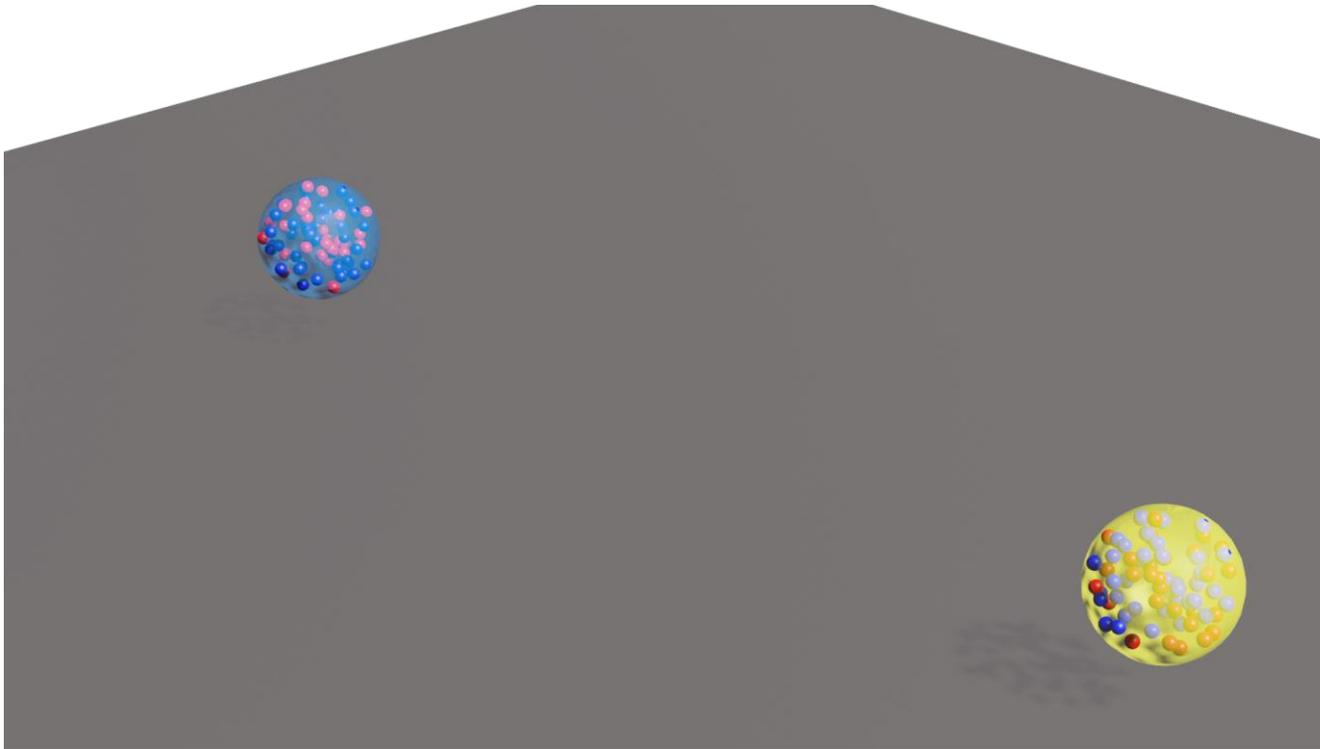
# Заключение

- Сечения образования спектаторных нейтронов и протонов с множественностями  $N_n \leq 6$  и  $N_p \leq 5$  сильно зависят от параметризации NS в сталкивающихся ядрах. Измерение этих сечений может быть использовано для изучения NS в  $^{208}\text{Pb}$  в эксперименте ALICE.
- Множественность и асимметрия спектаторных нейтронов могут быть использованы для определения взаимной ориентации сталкивающихся ядер  $^{238}\text{U}$ , а также для ограничения параметра их квадрупольной деформации.
- Сравнение результатов моделирования  $^{197}\text{Au}$ - $^{197}\text{Au}$  столкновений в эксперименте CBM с помощью AAMCC-MST и DCM-QGSM демонстрирует необходимость учета в AAMCC-MST партисипантов.

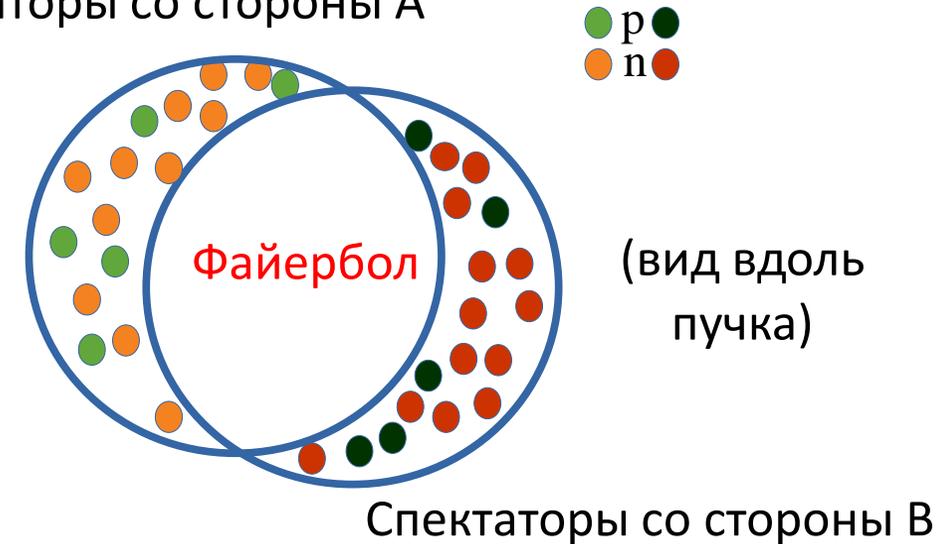
Спасибо за внимание!

# Back-up

# Спектаторная материя в столкновениях релятивистских ядер

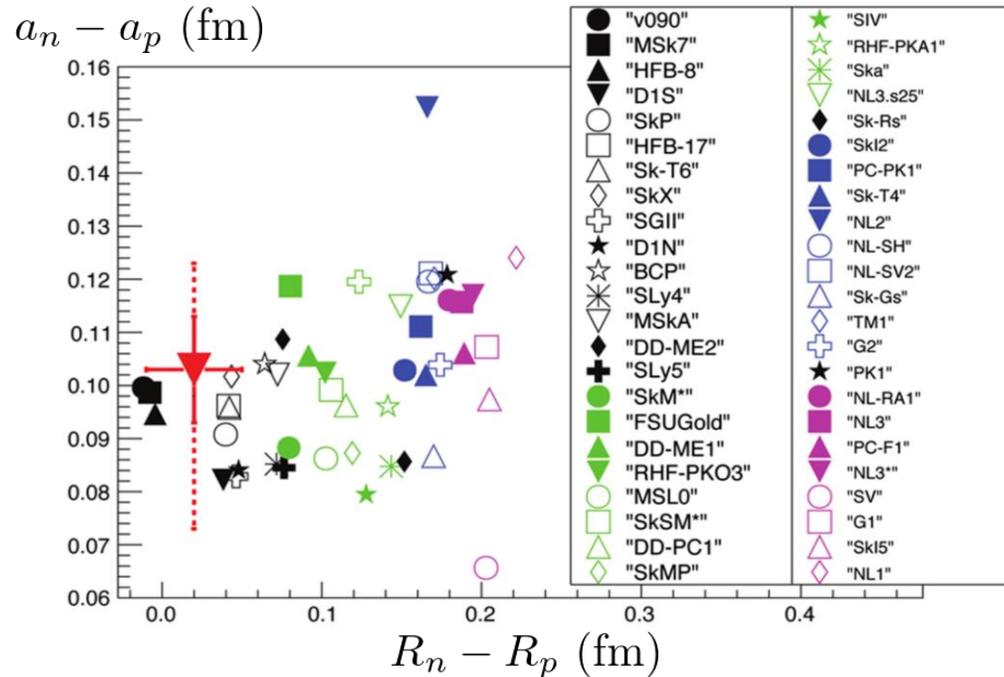


Спектаторы со стороны А



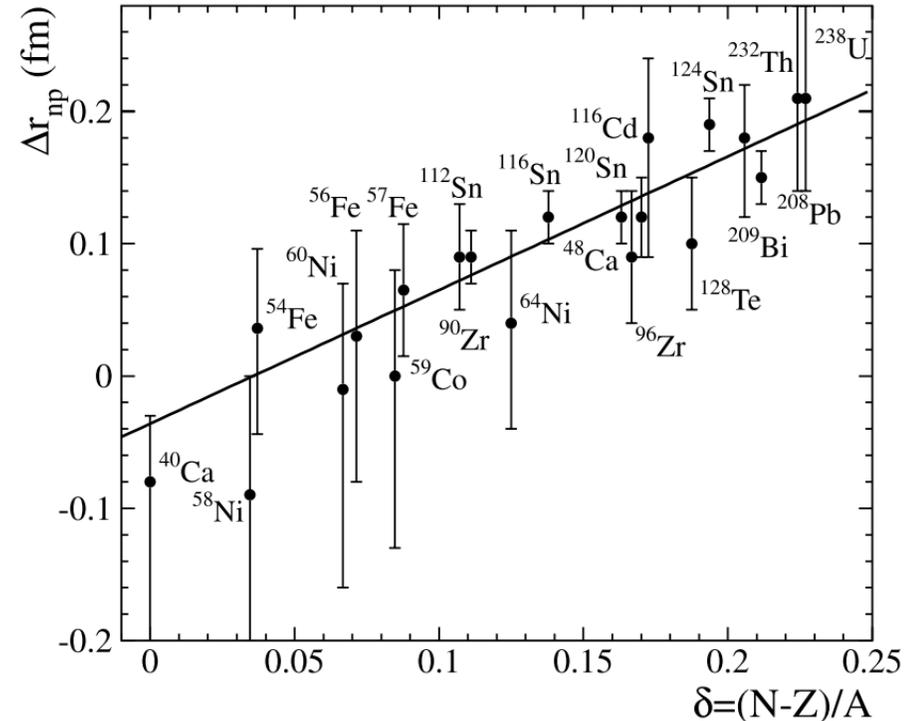
- При столкновении без полного перекрытия сталкивающихся ядер в них остаются нуклоны, которые оказываются **вне области перекрытия**.
- Такие нуклоны практически сохраняют свои импульсы и образуют возбужденную **спектаторную материю** (префрагмент), которая в дальнейшем может распасться на фрагменты и отдельные нуклоны.

# Why is it important to study neutrons skin?



Different theoretical prediction for  $\Delta r_{np}$  and  $\Delta a_{np}$  in  $^{208}\text{Pb}$

*C.M. Tarbert et al., PRL 112 (2014) 242502*



*A. Trzcíńska et al., PRL, 2001, 87 (2001), 082501.*

- Wide range of both theoretical predictions and experimental measurements:

Pb:  $\Delta r_{np} = 0.05 - 0.35$  fm

*M. Centelles et al., PRC 82 (2010) 054314*

- Directly connected to nuclear equation of state and thus neutron star structure

*C.A. Bertulani, J. Valecia, PRC 100 (2019) 015802*

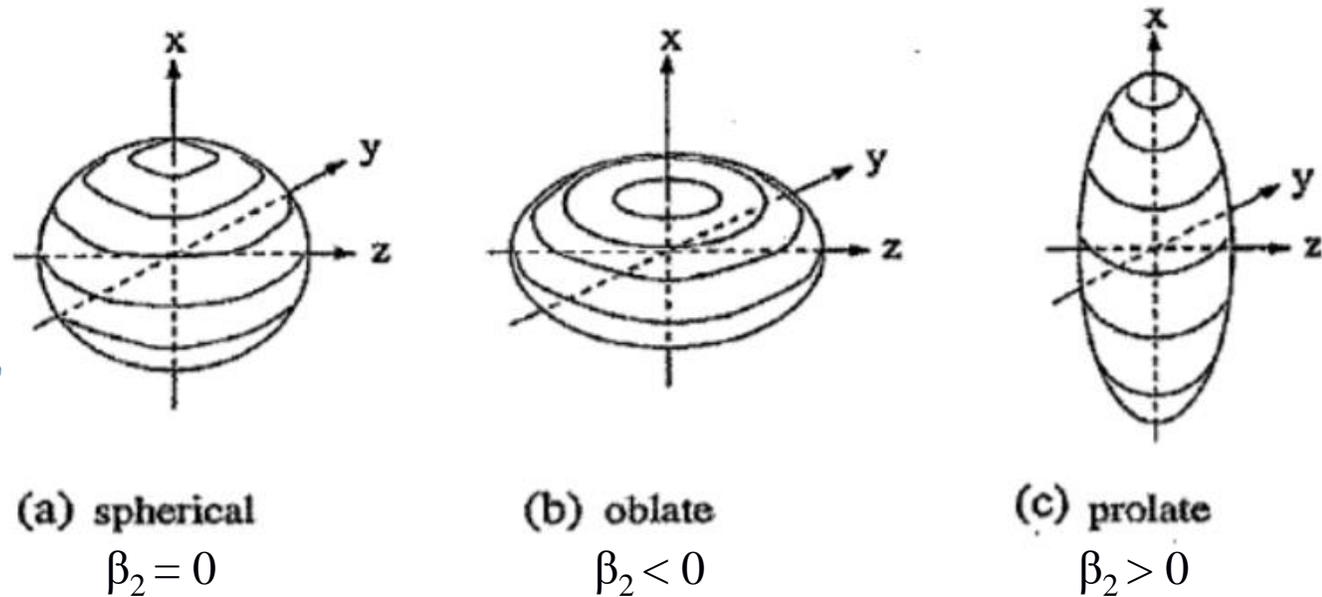
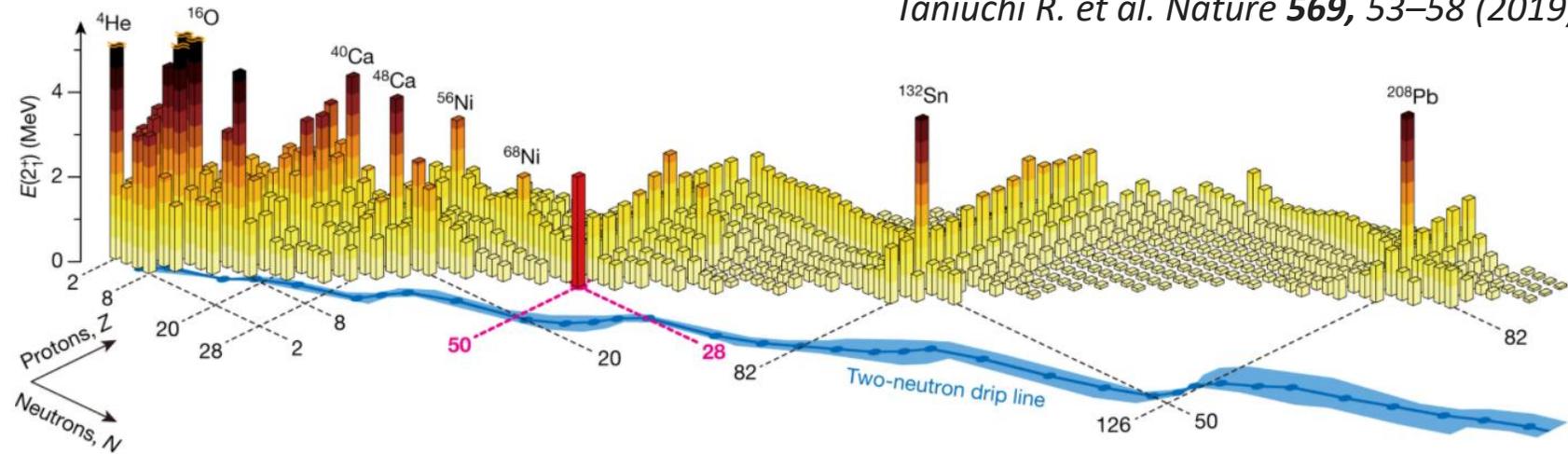
- Influence the cross sections of  $\gamma$  and  $W^\pm$  production in relativistic nucleus-nucleus collisions

*S. De, J. Phys. G 44 (2017) 024912*

*H. Paukkunen, Phys.Lett.B 745 (2015) 73-78*

# Деформированные ядра

- Сферическую форму имеют ядра с полностью заполненными нуклонными уровнями. Для них характерно большое значение энергии первого  $2^+$  уровня.
- Остальные ядра сферически несимметричны (**деформированы**).
- Распределения нуклонной плотности деформированных ядер описываются **распределением Вудса-Саксона** с использованием сферических функций:

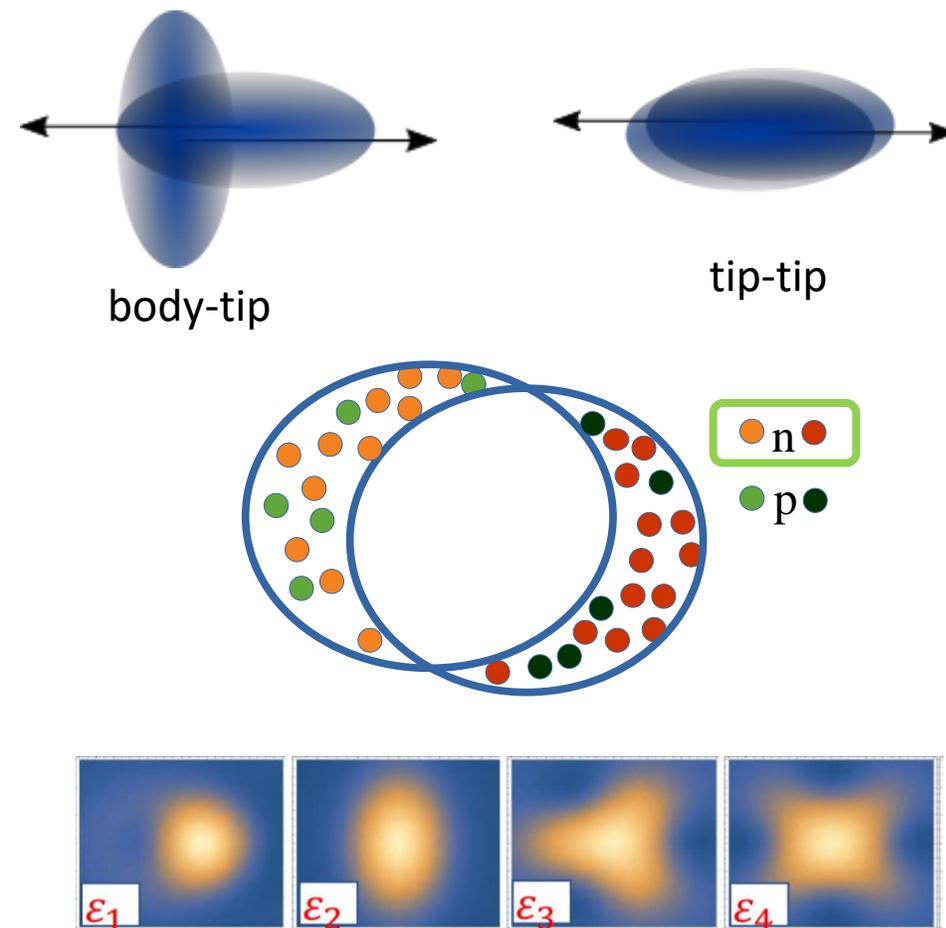


$$\rho(x, y, z) = \frac{\rho_{0n,p}}{1 + \exp \left| (r - R_{n,p}(1 + \beta_2 Y_{20} + \beta_4 Y_{40})) / a_{n,p} \right|},$$

$$Y_{20} = \sqrt{\frac{5}{\pi}} \frac{2z^2 - x^2 - y^2}{4r^2}, \quad Y_{40} = \frac{3}{\sqrt{\pi}} \frac{35z^4 - 30z^2 r^2 + 3r^4}{16r^4}$$

# Спектаторные нейтроны в центральных $^{238}\text{U}$ - $^{238}\text{U}$ столкновениях

- Мы ожидаем, что состав спектаторной материи чувствителен к ориентации сталкивающихся ядер в **ультрацентральных** столкновениях.
- Мы наблюдаем за **спектаторными нейтронами**, так как они могут быть зарегистрированы с помощью нейтронных ZDCs на RHIC и LHC.
- Мы изучаем столкновения **существенно деформированных** ядер урана:  $\beta_2 = 0.280$  и  $\beta_4 = 0.093$ ,  $R_{\parallel}/R_{\perp} = 1.29$ .  
Такие столкновения изучались на RHIC при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 193$  GeV.



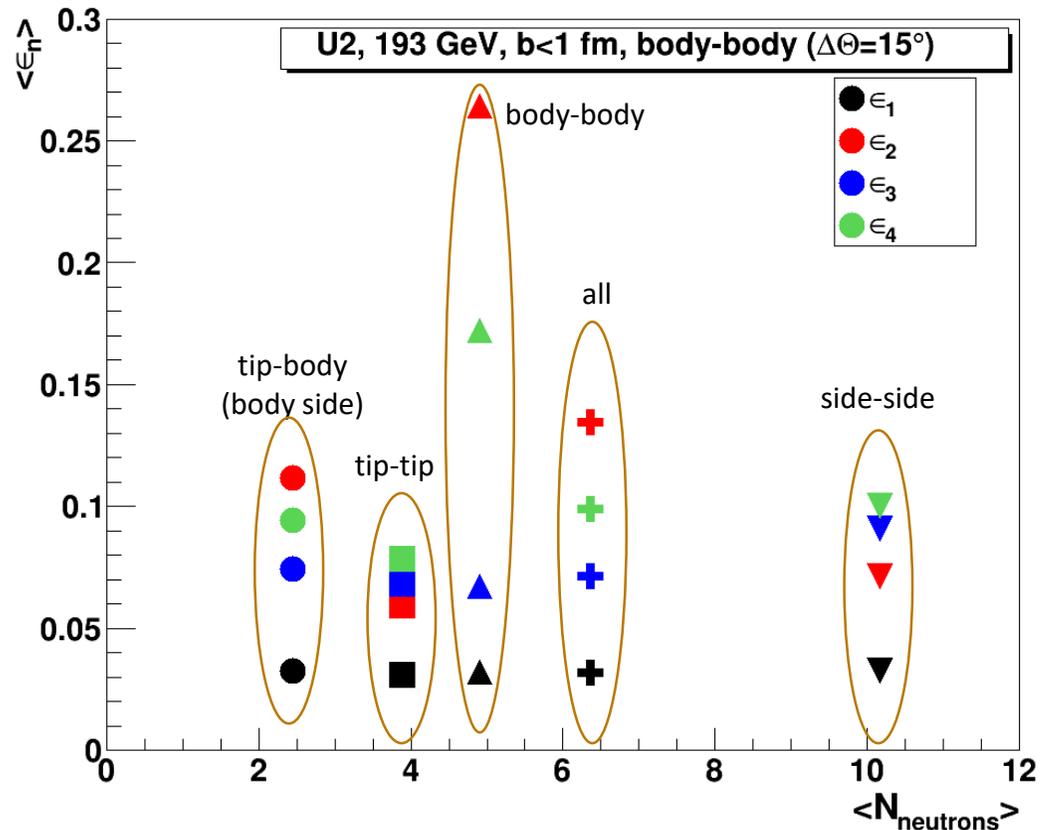
$$\rho(x, y, z) = \frac{\rho_{0n,p}}{1 + \exp \left[ (r - R_{n,p}(1 + \beta_2 Y_{20} + \beta_4 Y_{40})) / a_{n,p} \right]},$$

$$\frac{dN}{d\phi_s} \propto 1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2\varepsilon_n \cos[n(\phi_s - \Psi_{rs})],$$

$$\varepsilon_n = \langle \cos[n(\phi_s - \Psi_{rs})] \rangle,$$

# Зависимость коэффициентов эксцентричности

	tip-body	tip-tip	body-body	side-side	all
$\langle \epsilon_1 \rangle$	0.0323	0.0309	0.0321	0.0324	0.0317
$\langle \epsilon_2 \rangle$	0.1119	0.0591	0.2645	0.0712	0.1342
$\langle \epsilon_3 \rangle$	0.0741	0.0681	0.067	0.0809	0.0714
$\langle \epsilon_4 \rangle$	0.0945	0.0785	0.1721	0.1001	0.0986
$N_{\text{neutrons}}$	2.44	3.89	4.9	10.17	6.36



- Коэффициенты эксцентричности событий существенно зависят от взаимной ориентации сталкивающихся ядер. Наибольшие изменения наблюдаются в значениях  $\epsilon_2$  и  $\epsilon_4$

- Известно, что коэффициенты эксцентричности  $\epsilon_n$  пропорциональны  $v_n$ :  $\epsilon_n = kv_n$ <sup>1)</sup>

$$\frac{dN}{dyd\phi} = \frac{dN}{dy} [1 + 2v_1 \cos(\phi - \psi_1) + 2v_2 \cos[2(\phi - \psi_2)] + \dots],$$

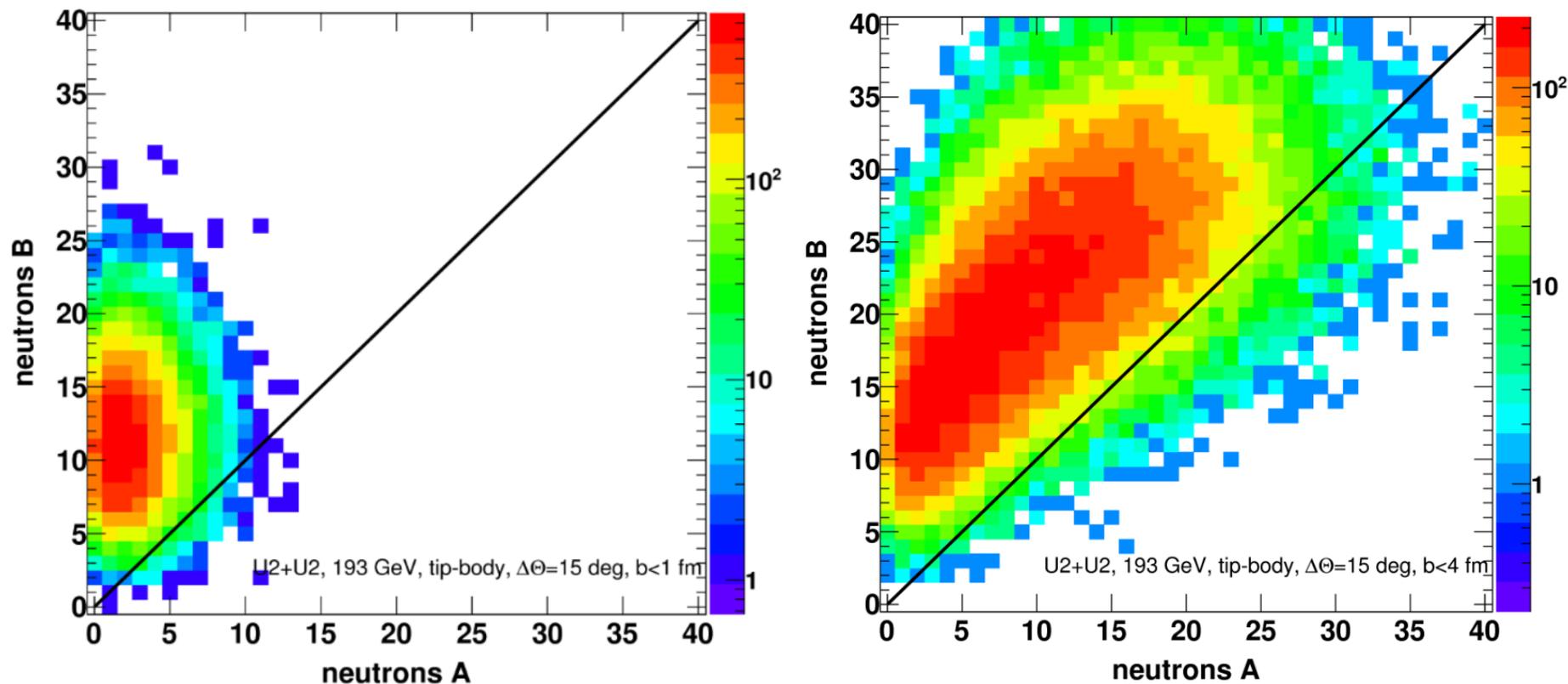
$$v_n = \frac{\int d\phi \cos[n(\phi - \psi_n)] \frac{dN}{dyd\phi}}{\int d\phi \frac{dN}{dyd\phi}} = \langle \cos[n(\phi - \psi_n)] \rangle,$$

- Согласно ААМСС, **body-body** события характеризуются в особенности большим значением  $\epsilon_2$
- Кроме того, видна зависимость среднего числа **спектаторных нейтронов** от взаимной ориентации сталкивающихся ядер

<sup>1)</sup>H. Niemi et al. Phys. Rev. C **87**, 054901 (2013)

# Ограничения прицельного параметра

Мы выбираем ультрацентральные события ( $b < 1$  фм), так как в них наиболее заметны эффекты деформации. В частности, распределения множественности нейтронов уже по сравнению с другими диапазонами центральности.

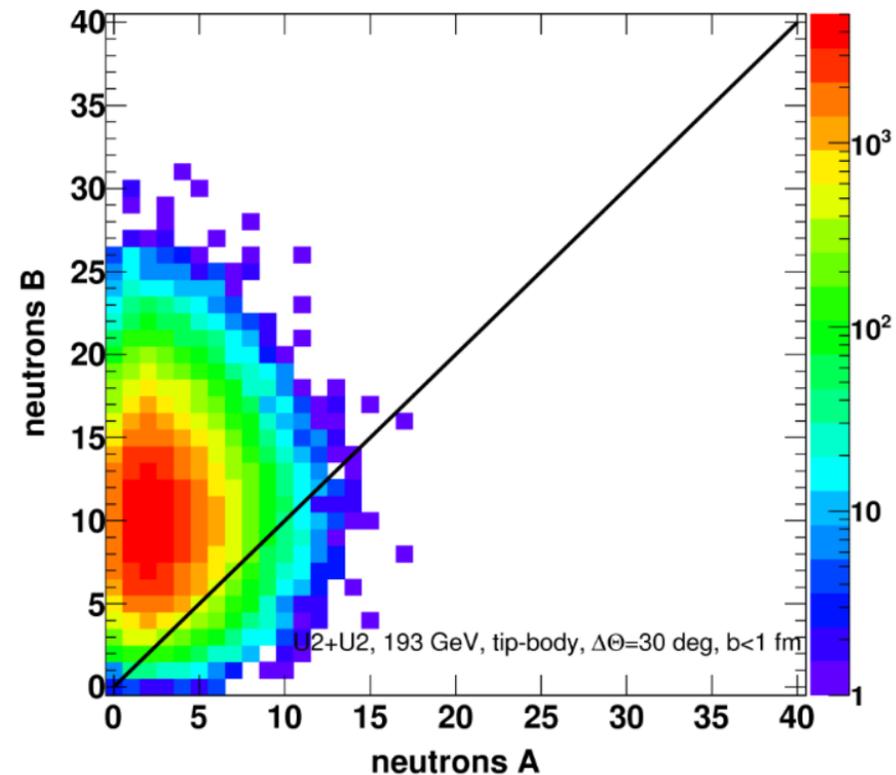
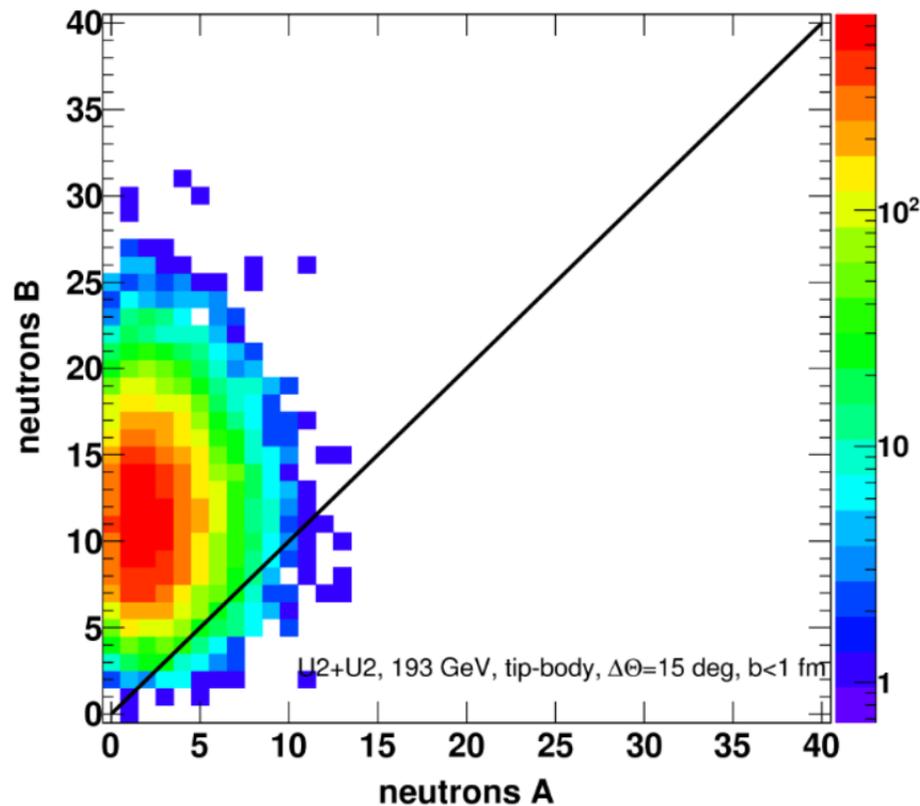


Распределение число событий с определенным числом спектаторных нейтронов на стороне A (ось X) и стороне B (ось Y) в tip-body столкновениях ядер  $^{238}\text{U}$  при  $\sqrt{s_{NN}} = 193$  GeV для двух диапазонов прицельного параметра:  $b < 1$  фм (слева) и  $b < 4$  фм (справа).

# Неопределенность угла

$\Delta\theta$  представляет собой диапазон углов на который ядро может отклоняться от определенной ориентации (tip-tip, body-body etc.).

Больших отличий между распределениями множественности нейтронов, вычисленных с  $\Delta\theta < 15^\circ$  и  $\Delta\theta < 30^\circ$ , не наблюдается. В представленных вычислениях мы используем  $\Delta\theta < 15^\circ$ .



Распределение число событий с определенным числом спектаторных нейтронов на стороне A (ось X) и стороне B (ось Y) в tip-body столкновениях ядер  $^{238}\text{U}$  при  $\sqrt{s_{NN}} = 193$  GeV для двух диапазонов угла:  $\Delta\theta < 15^\circ$  (слева) и  $\Delta\theta < 30^\circ$  (справа).

# $^{197}\text{Au}$

