

Коллективные эффекты во взаимодействиях малых систем на РНС

В. Рябов, ЛРЯФ ОФВЭ

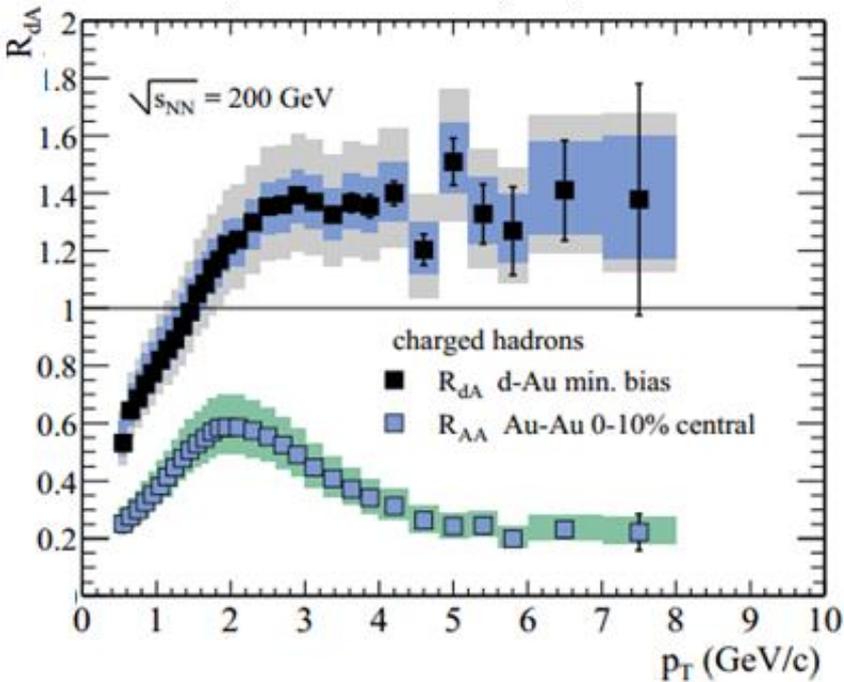
RHIC: циклы работы, сталкивающиеся системы

RHIC Run	Year	Species	Energy	Ldt
Run-1	2000	Au+Au	130 GeV	1 μb^{-1}
Run-2	2001-2	Au+Au	200 GeV	24 μb^{-1}
		Au+Au	19 GeV	
		p+p	200 GeV	150 nb ⁻¹
Run-3	2002/3	d+Au	200 GeV	2.74 nb ⁻¹
		p+p	200 GeV	0.35 nb ⁻¹
Run-4	2003/4	Au+Au	200 GeV	241 μb^{-1}
		Au+Au	62.4 GeV	9 μb^{-1}
Run-5	2005	Cu+Cu	200 GeV	3 nb ⁻¹
		Cu+Cu	62.4 GeV	0.19 nb ⁻¹
		Cu+Cu	22.4 GeV	2.7 μb^{-1}
Run-6	2006	p+p	200 GeV	10.7 pb ⁻¹
		p+p	62.4 GeV	100 nb ⁻¹
Run-7	2007	Au+Au	200 GeV	813 μb^{-1}
Run-8	2007/2008	d+Au	200 GeV	80 nb ⁻¹
		p+p	200 GeV	5.2 pb ⁻¹
		Au+Au	9.2 GeV	
Run-9	2009	p+p	200 GeV	16 pb ⁻¹
		p+p	500 GeV	14 pb ⁻¹
Run-10	2010	Au+Au	200 GeV	1.3 nb ⁻¹
		Au+Au	62.4 GeV	100 μb^{-1}
		Au+Au	39 GeV	40 μb^{-1}
		Au+Au	7.7 GeV	260 mb ⁻¹
Run-11	2011	p+p	500 GeV	27 pb ⁻¹
		Au+Au	200 GeV	915 μb^{-1}
		Au+Au	27 GeV	5.2 μb^{-1}
		Au+Au	19.6 GeV	13.7 M events
Run-12	2012	p+p	200 GeV	9.2 pb ⁻¹
		p+p	510 GeV	30 pb ⁻¹
		U+U	193 GeV	171 μb^{-1}
		Cu+Au	200 GeV	4.96 nb ⁻¹
Run-13	2013	p+p	510 GeV	130 pb ⁻¹
Run-14	2014	Au+Au	15 GeV	2.56 nb ⁻¹
		He ³ +Au	200 GeV	44.2 μb^{-1}

- ❖ RHIC – исключительно гибкий и надежный ускоритель с обширной физической программой
- ❖ Четырнадцать циклов работы:
 - ✓ 11 энергий (\sqrt{s})
 - ✓ 7 комбинаций ядер
- ❖ Непрерывное повышение светимости пучков
- ❖ Программа сканирования по энергиям взаимодействия
- ❖ Малые системы:
 - ✓ p+p @ 200, 500 GeV
 - ✓ d+Au @ 200 GeV (2003, 2008)
 - ✓ He³+Au @ 200 GeV (2014)

Малые системы – контрольный эксперимент

Phys.Rev.Lett. 91 (2003) 072303



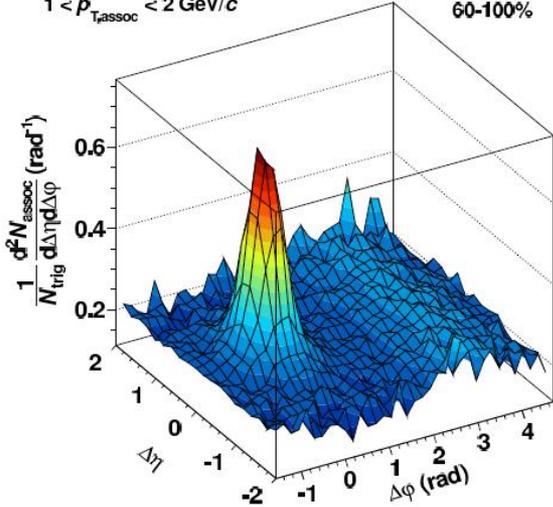
- ❖ Первоначальная идея для малых систем – контрольные эксперименты
- ❖ d(p)+Au – суперпозиция N+N столкновений за исключением эффектов начального состояния и эффектов холодной ядерной материи
- ❖ Отсутствие подавления для адронов в d+Au → эффект гашения струй ответственен за подавление выхода адронов в центральных Au+Au взаимодействиях

❖ Появление новых экспериментальных данных на RHIC и LHC указывает на то, что малые системы выходят далеко за пределы просто контрольных измерений

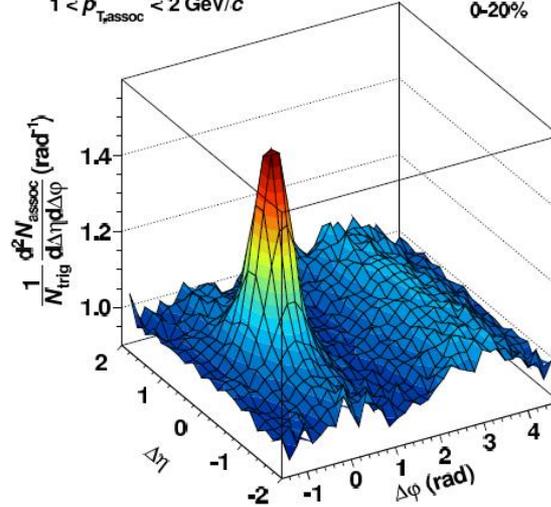
“Double ridge”, p+Pb @ 5 TeV

PLB 719, 29

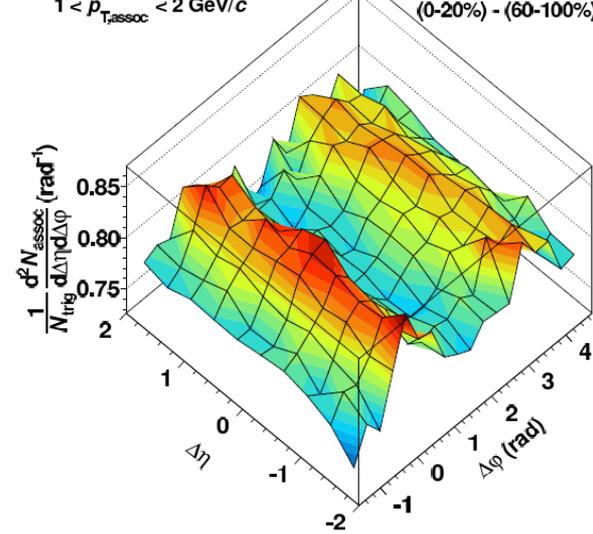
$2 < p_{T, \text{trig}} < 4 \text{ GeV}/c$
 $1 < p_{T, \text{assoc}} < 2 \text{ GeV}/c$
p-Pb $\sqrt{s_{NN}} = 5.02 \text{ TeV}$
60-100%



$2 < p_{T, \text{trig}} < 4 \text{ GeV}/c$
 $1 < p_{T, \text{assoc}} < 2 \text{ GeV}/c$
p-Pb $\sqrt{s_{NN}} = 5.02 \text{ TeV}$
0-20%



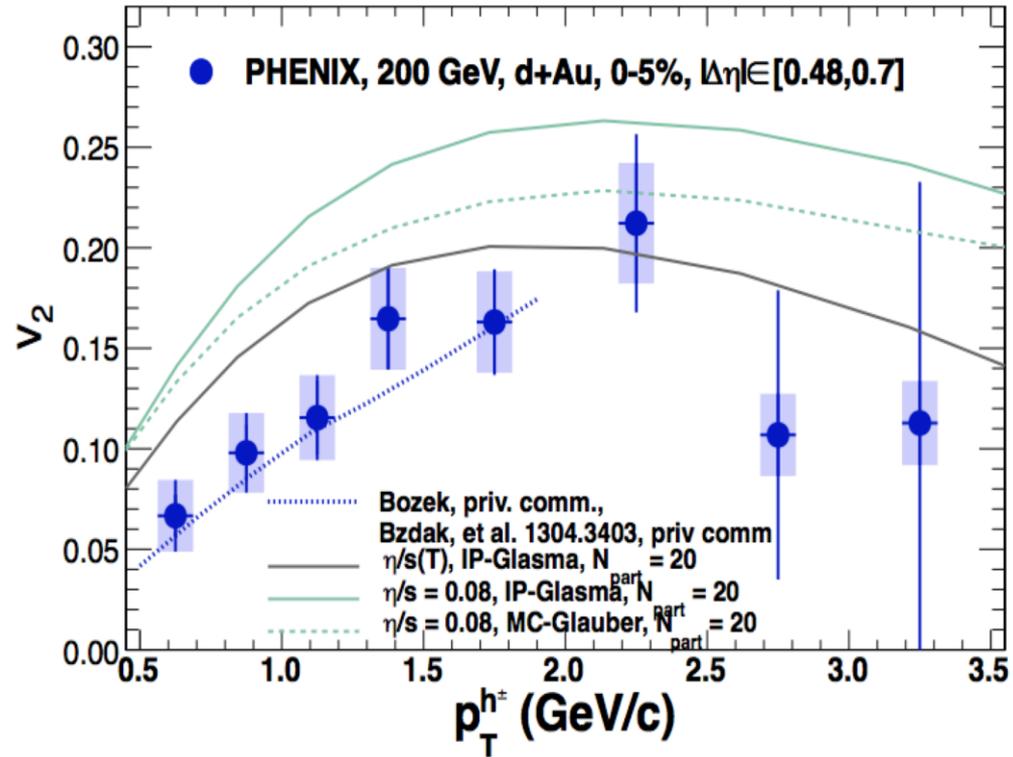
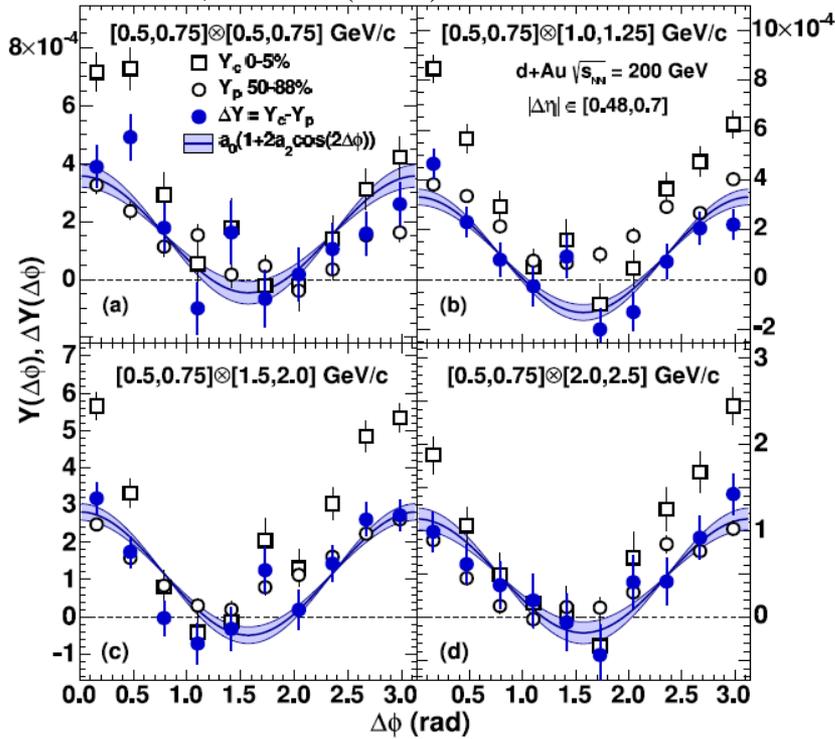
$2 < p_{T, \text{trig}} < 4 \text{ GeV}/c$
 $1 < p_{T, \text{assoc}} < 2 \text{ GeV}/c$
p-Pb $\sqrt{s_{NN}} = 5.02 \text{ TeV}$
(0-20%) - (60-100%)



- ❖ Угловые корреляции между триггерными (2-4 ГэВ/с) и ассоциированными (1-2 ГэВ/с) адронами имеют различную форму в центральных и периферийных столкновениях
- ❖ После вычитания периферийных столкновений из центральных остаются только модуляции, связанные с какими-то другими эффектами
- ❖ Аналогичные корреляции ранее наблюдались в А+А взаимодействиях и объяснялись развитием коллективного эллиптического потока

$\Delta\phi$, $|\Delta\eta| = 0.48-0.7$, d+Au @ 200 GeV (ФЕНИКС)

PRL 11, 212301 (2013)



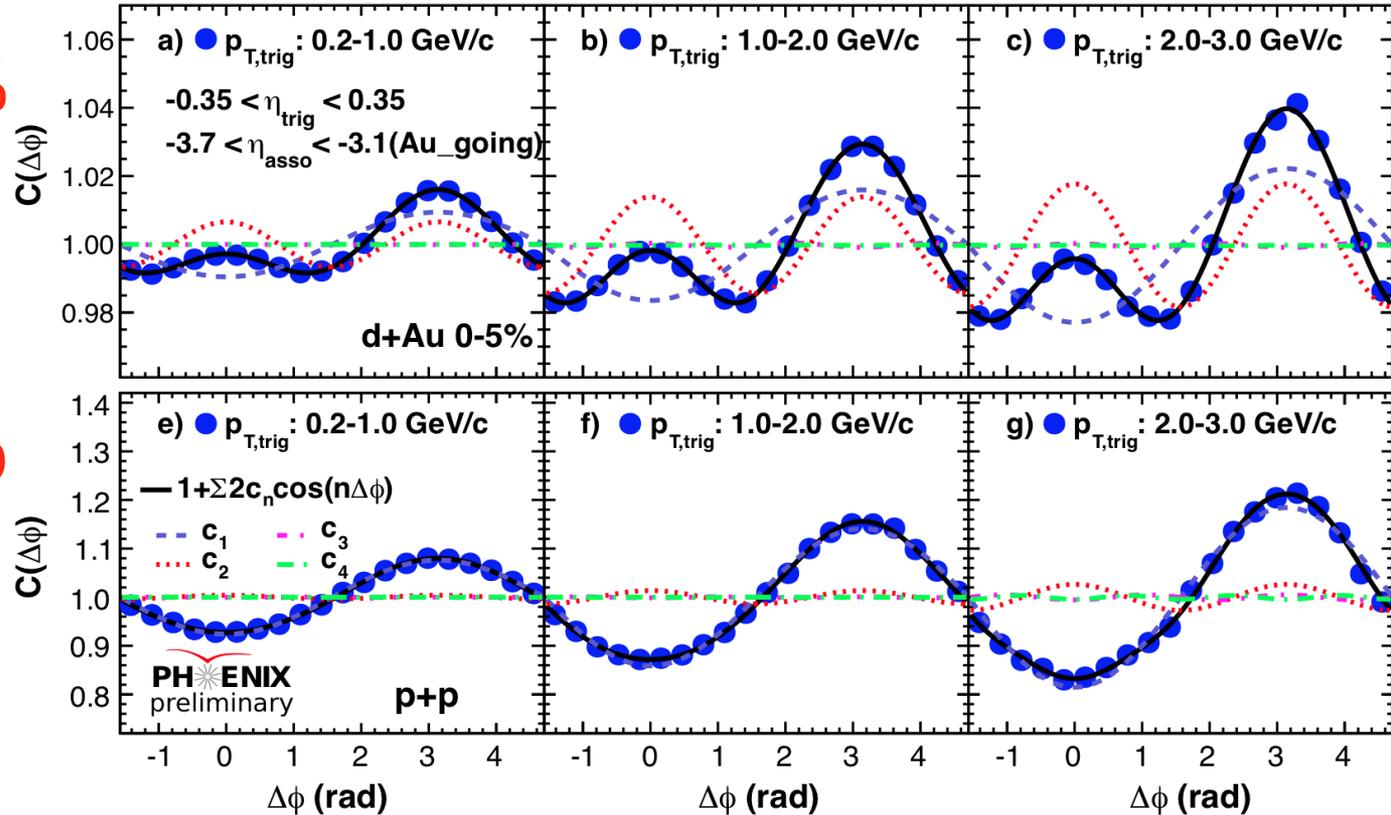
- ❖ Азимутальные корреляции между адронами, разделенными на 0.48-0.7 единиц по быстрой при различных импульсах триггерных частиц.
- ❖ Корреляции показаны для центральных (Y_c), периферийных (Y_p) столкновений и их разницы, $\Delta Y = Y_c - Y_p$
- ❖ Остаточные азимутальные корреляции для ΔY согласуются с предположением о наличии эллиптического потока.

$\Delta\phi$, $|\Delta\eta| \sim 3.4$, p+p, d+Au @ 200 ГэВ (ФЕНИКС)

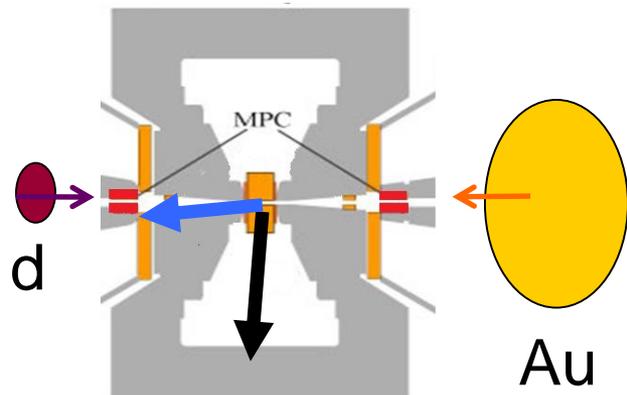
- ❖ Угловые корреляции между заряженной частицей ($|y| < 0.35$) и кластером в MPC ($3.1 < |y| < 3.9$)

arXiv:1404.7461

d+Au, 0-5%



p+p

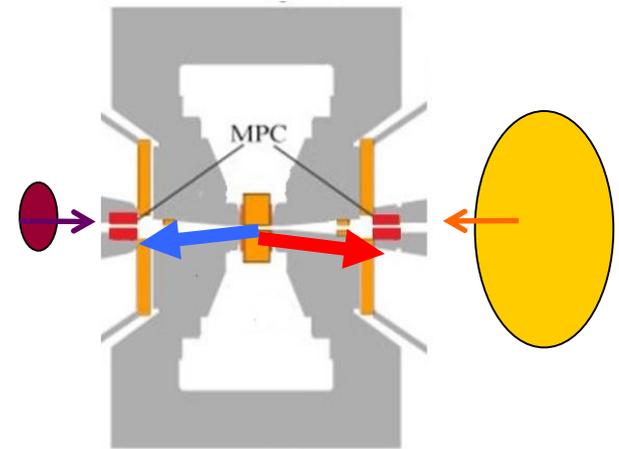
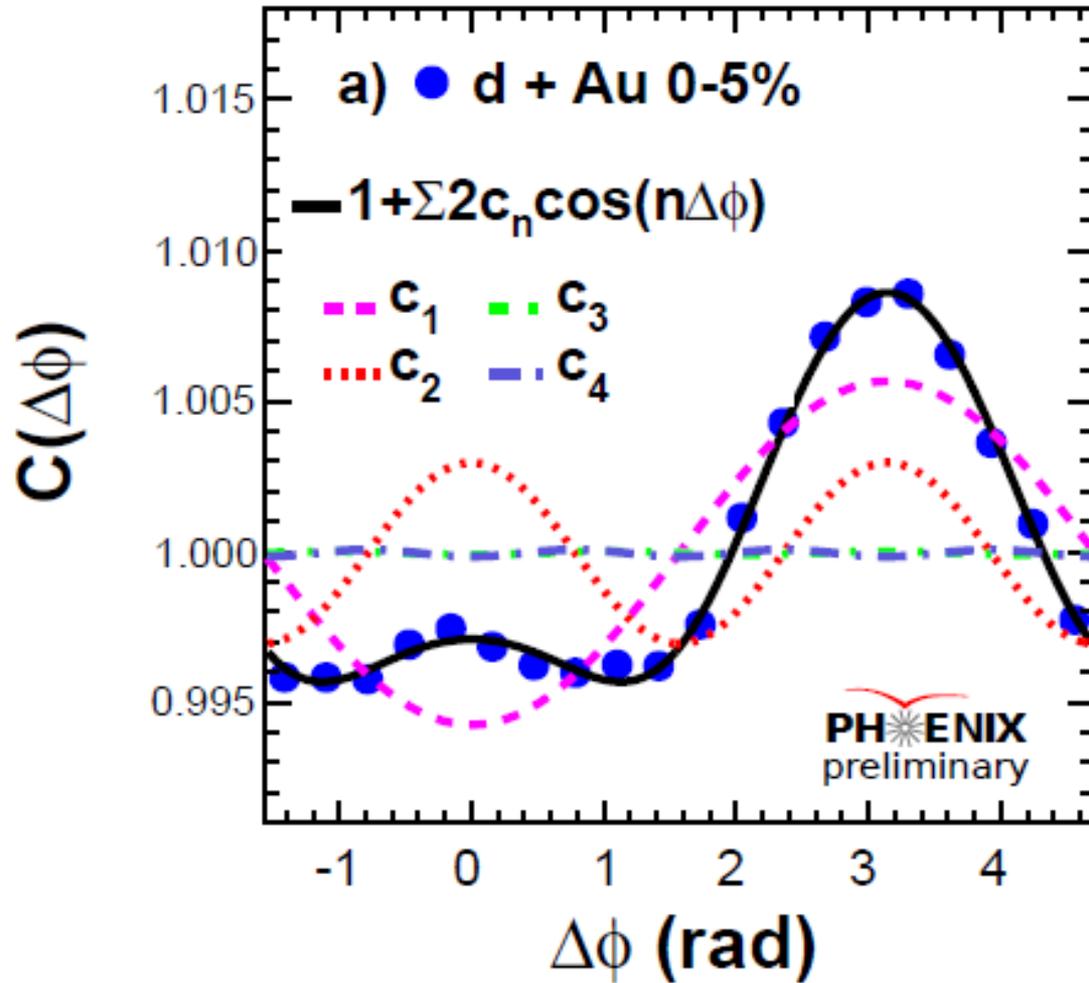


$$S(\Delta\phi, p_T) = \frac{d(w_{\text{Tower}} N_{\text{Track}(p_T)}^{\text{Same event}} - \text{Tower})}{d\Delta\phi}$$

$$C(\Delta\phi, p_T) = \frac{S(\Delta\phi, p_T)}{M(\Delta\phi, p_T)} \frac{\int_0^{2\pi} M(\Delta\phi, p_T) d\Delta\phi}{\int_0^{2\pi} S(\Delta\phi, p_T) d\Delta\phi}$$

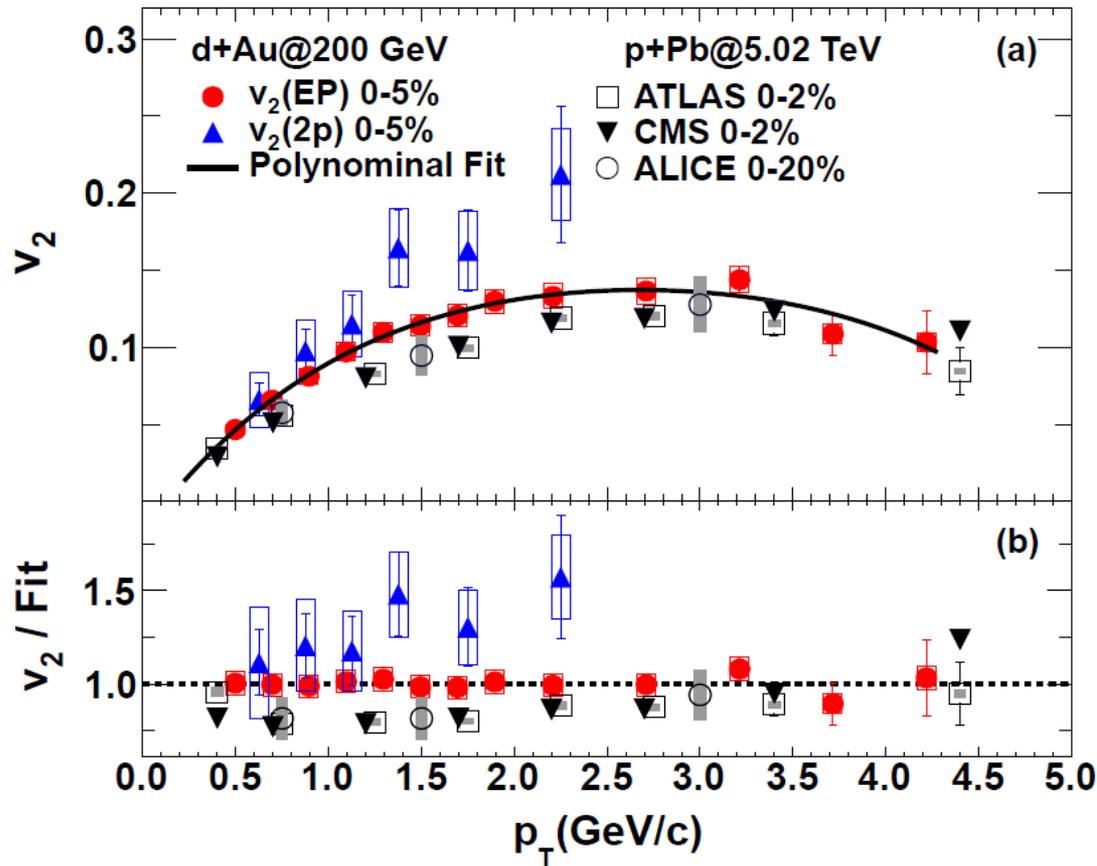
$\Delta\phi, |\Delta\eta| \sim 6, d+Au @ 200 \text{ ГэВ}$ (ФЕНИКС)

❖ Угловые корреляции между кластерами в северном (d) и южном (Au) MPC



$v_2(\text{EP})$ для h^\pm , RHIC и LHC

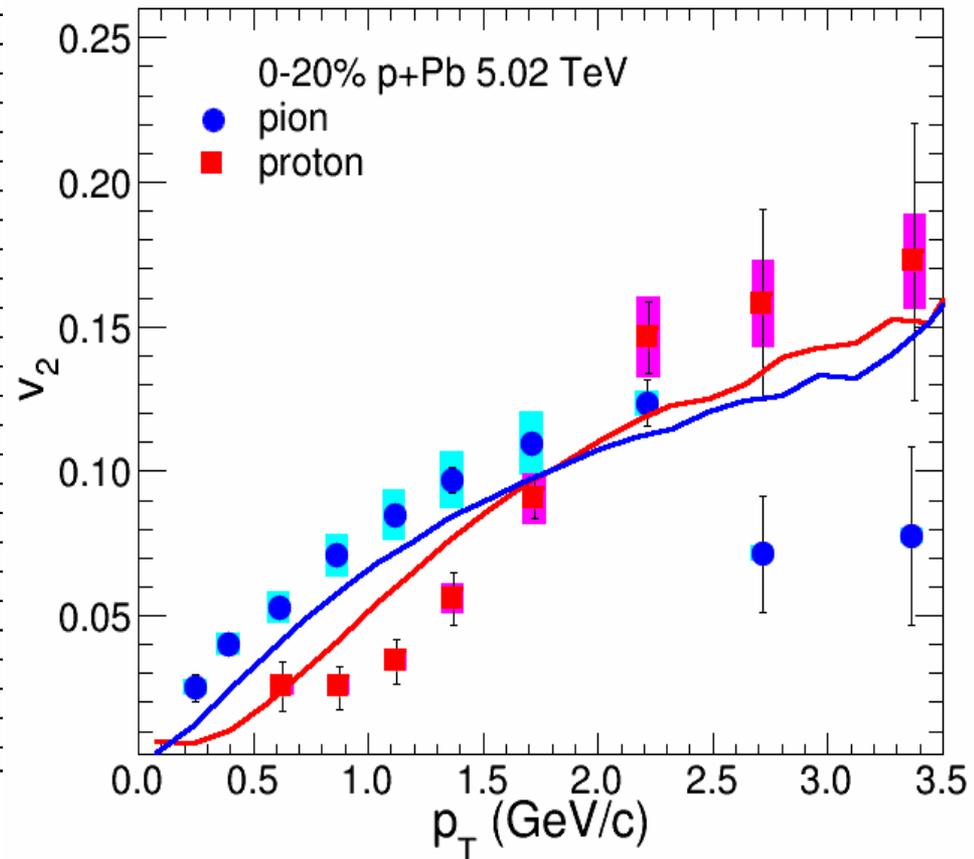
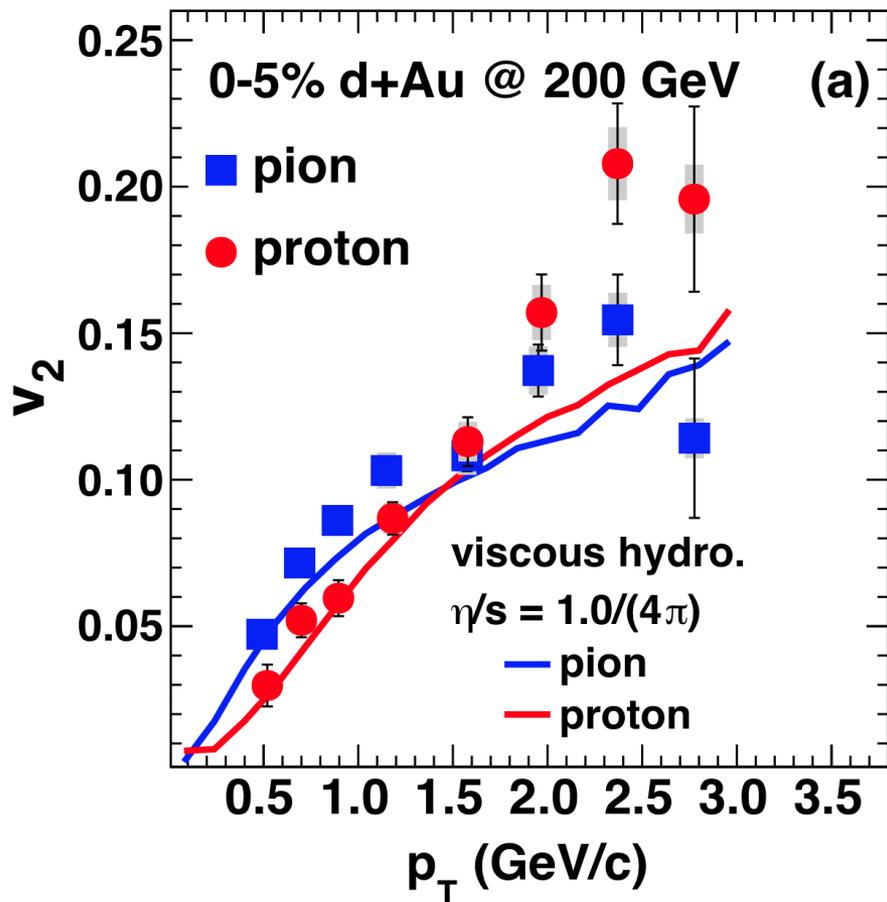
arXiv:1404.7461



- ❖ $v_2(p_T)$ – зависимости характерные для эллиптического потока
- ❖ При имеющейся статистике $v_3(p_T)$ не отличим от нуля

$v_2(\text{EP})$ для π^\pm и p^\pm , RHIC и LHC

arXiv:1404.7461

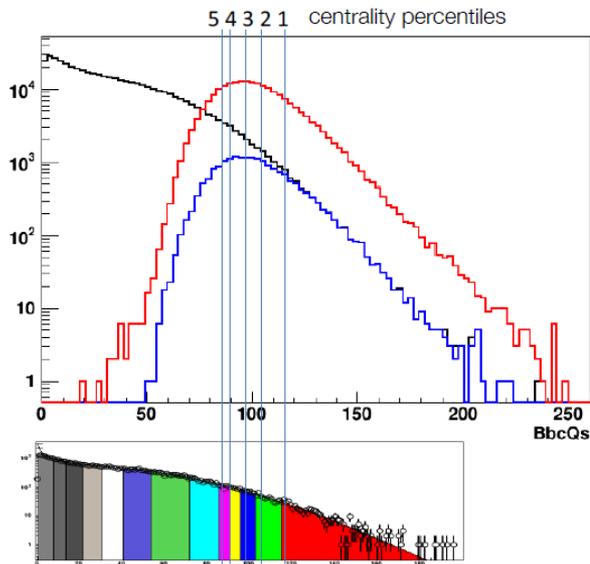
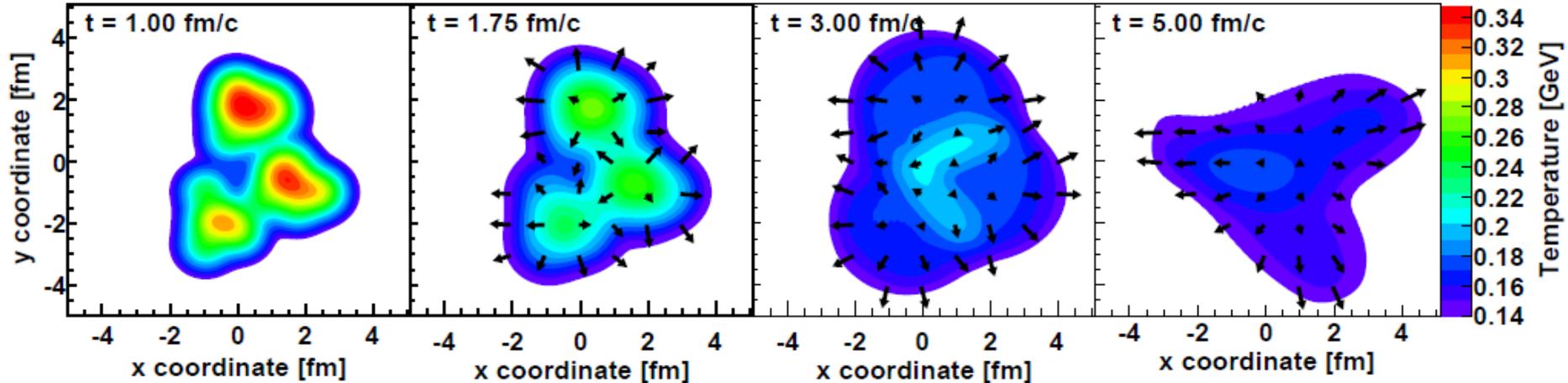


- ❖ $v_2(p_T)$ – зависимости от массы характерные для эллиптического потока
- ❖ Зависимость от массы сильнее на LHC – более сильный радиальный поток?

Изменение начального состояния

- ❖ $d+Au \rightarrow {}^3\text{He} + Au$ – существенное различие в начальной геометрии
- ❖ ${}^3\text{He}+Au$ – треугольная начальная пространственная геометрия $\rightarrow v_3$

[hVp://arxiv.org/abs/arXiv:1312.4565](http://arxiv.org/abs/arXiv:1312.4565)

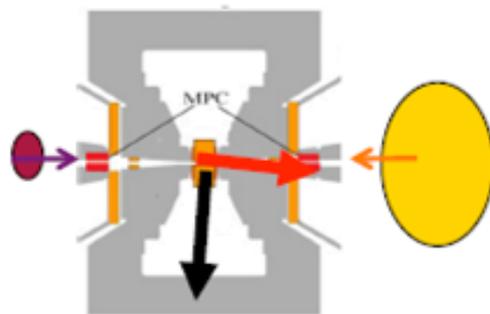
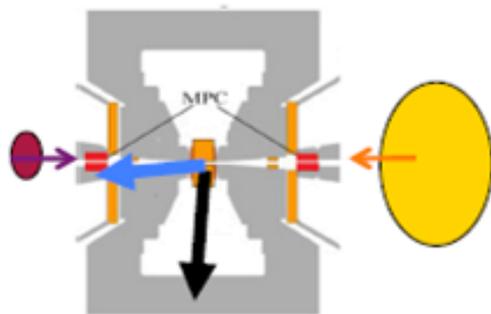
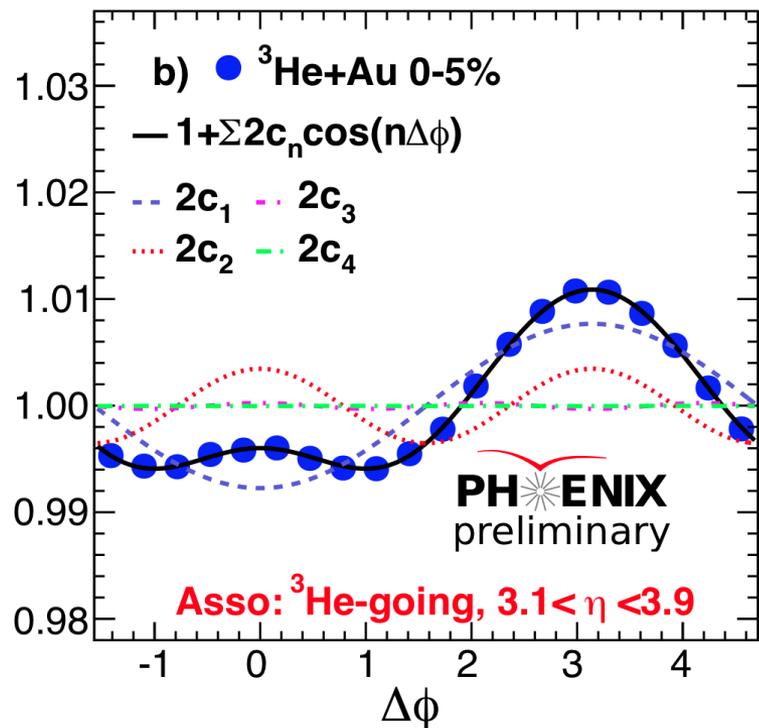
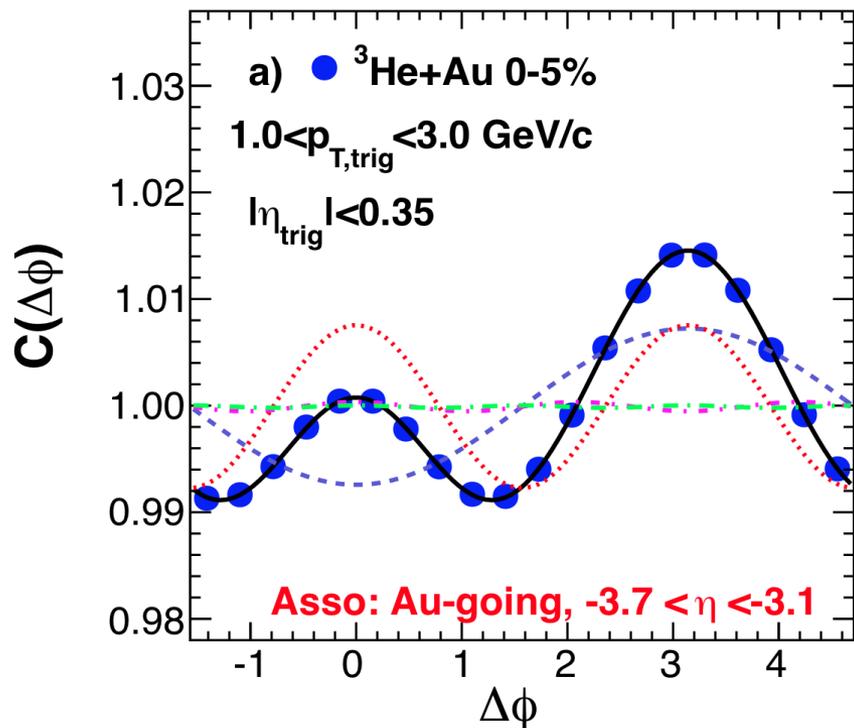


❖ Центральный онлайн триггер на основе измерения заряда (множественности) в ВВС в направлении ядер золота:

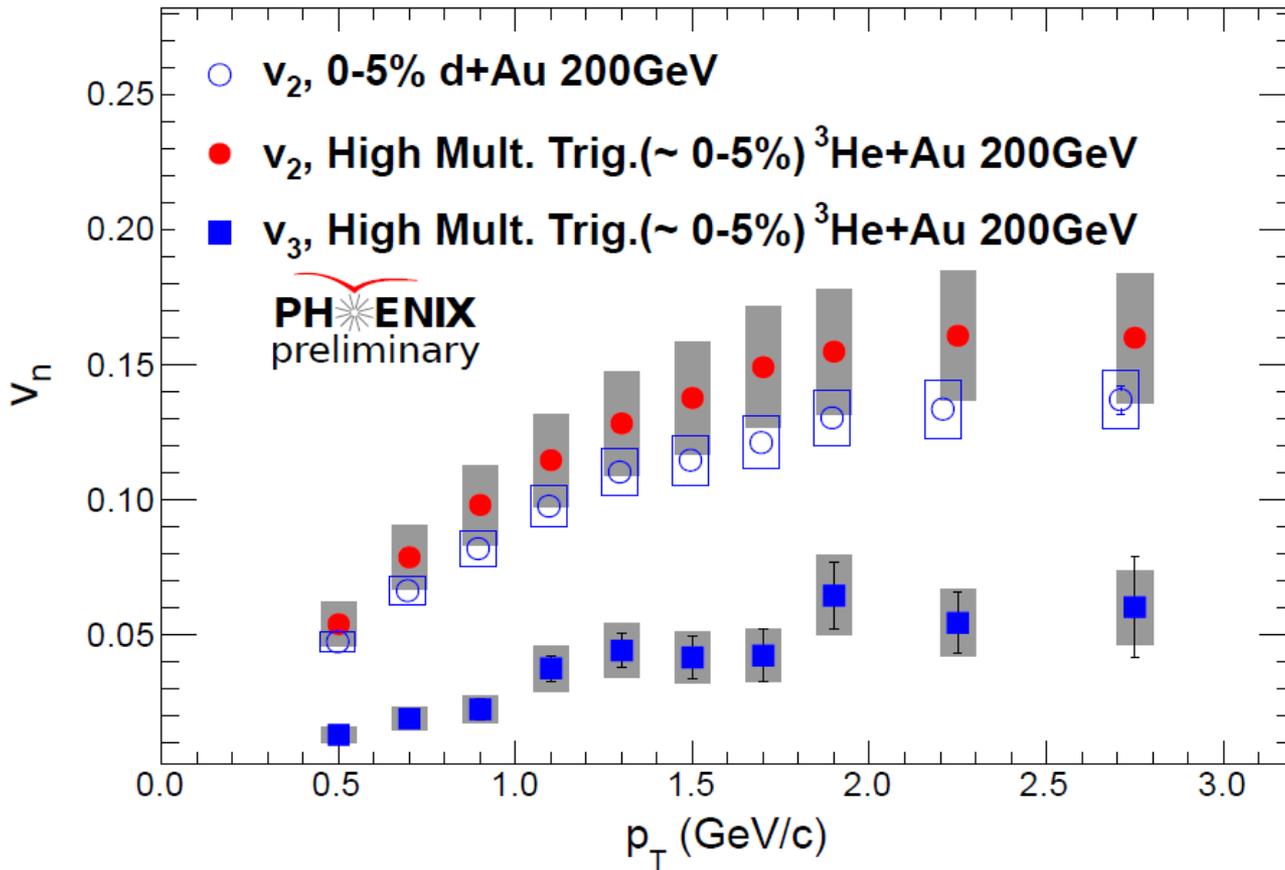
- ❖ $2.2 \cdot 10^9$ событий (minbias);
- ❖ $0.8 \cdot 10^9$ событий (central).

$\Delta\phi, |\Delta\eta| \sim 3.4, {}^3\text{He}+\text{Au} @ 200 \text{ ГэВ} (\text{ФЕНИКС})$

- ❖ Угловые корреляции между заряженной частицей ($|y| < 0.35$) и кластером в MPC ($3.1 < |y| < 3.7$)



$v_2(\text{EP}), v_3(\text{EP})$ для $h^\pm, {}^3\text{He}(d)+\text{Au}$ @ 200 ГэВ (ФЕНИКС)

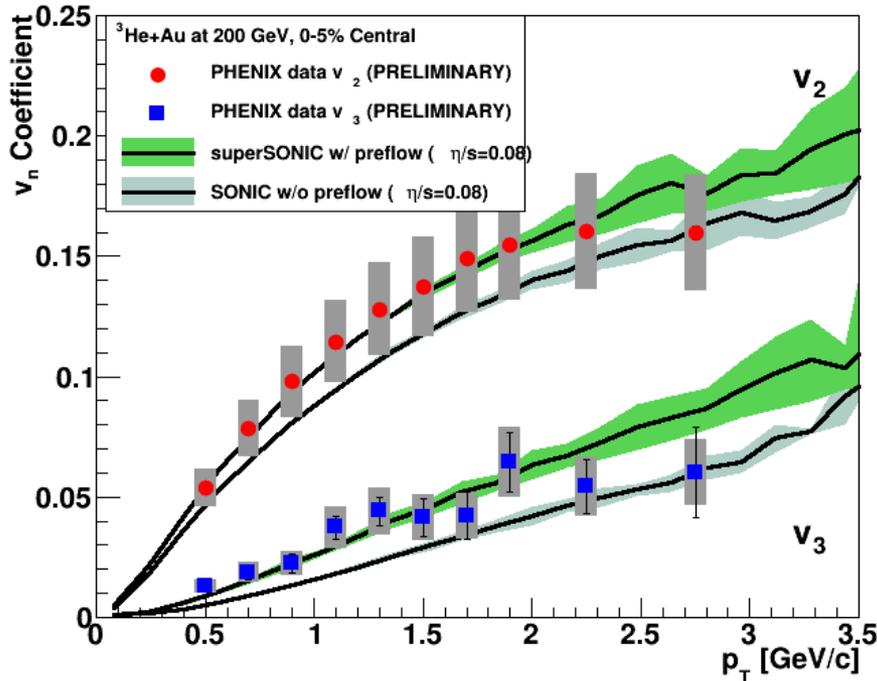


❖ $v_2(p_T)$ в ${}^3\text{He}+\text{Au} \sim v_2(p_T)$ d+Au

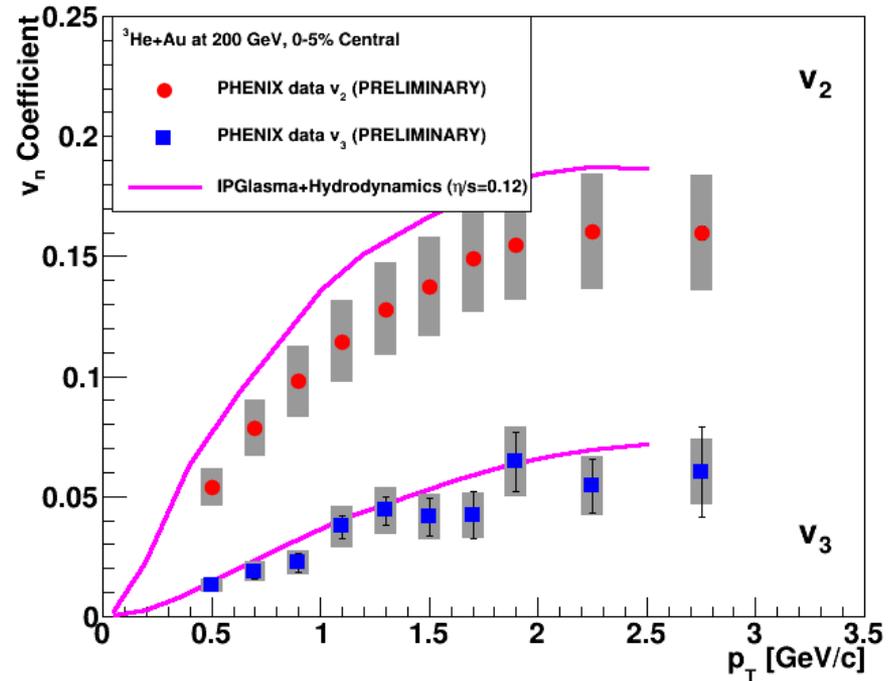
❖ Ненулевой $v_3(p_T)$ в ${}^3\text{He}+\text{Au}$

$v_2(EP)$ для h^\pm , ${}^3\text{He}(d)+\text{Au}$ @ 200 ГэВ (ФЕНИКС)

arxiv.org/abs/1502.04745



arxiv.org/abs/1407.7557

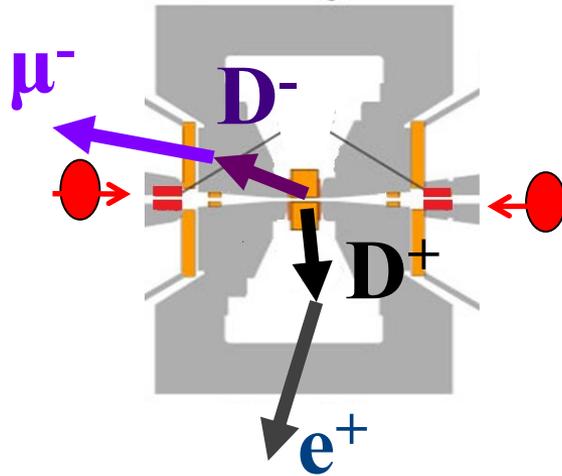


Glauber IC + PreFlow + Hydro
($\eta/s=1/4\pi$) + Hadronic Cascade
[superSONIC]

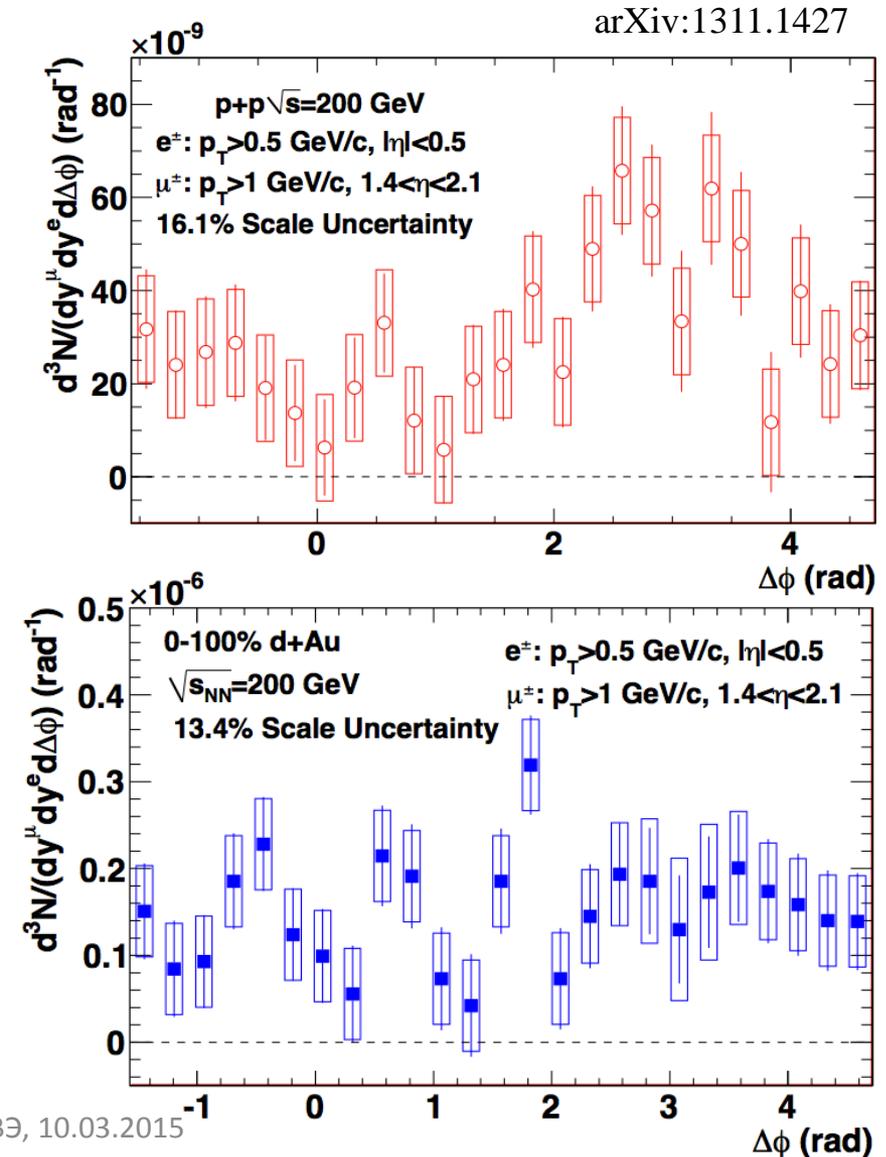
IP Glasma + MUSIC ($\eta/s = 1.5 \times 1/4\pi$)

- ❖ Модели достаточно хорошо согласуются с результатами измерений
- ❖ Нужны новые контрольные эксперименты при одной и той же энергии для тестирования различных начальных состояний \rightarrow p+Au и p+Al в Run-15!

Open charm de-correlation, p+p d+Au @ 200 ГэВ (ФЕНИКС)

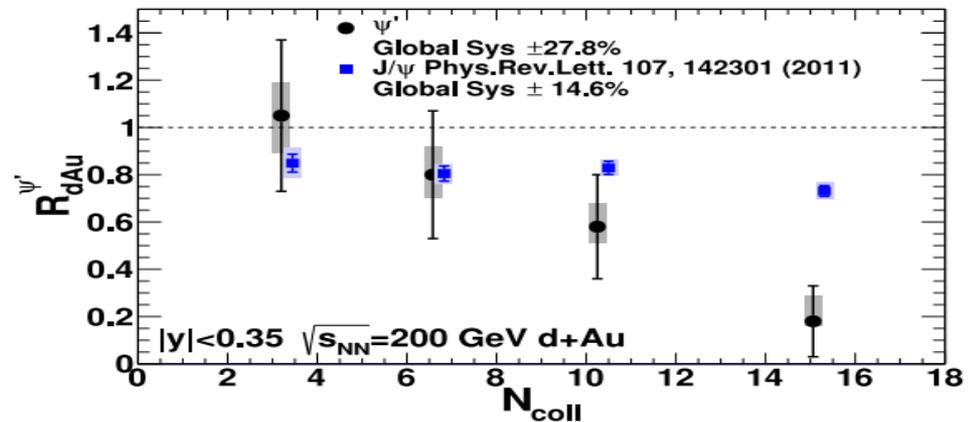
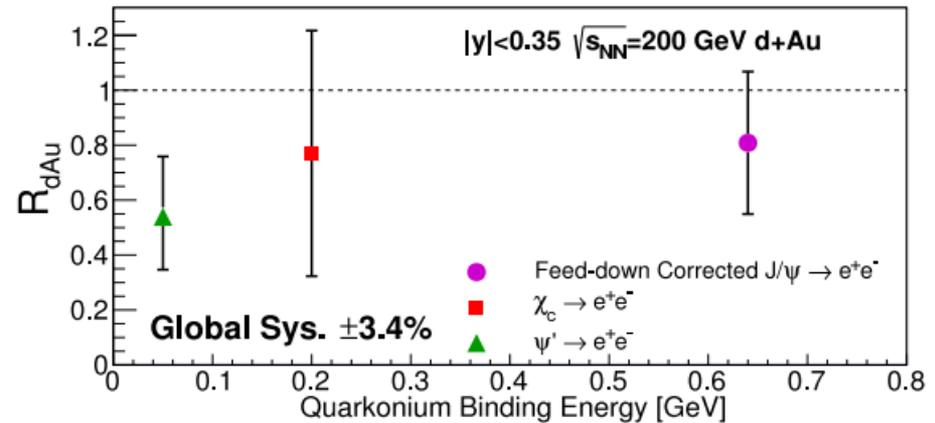
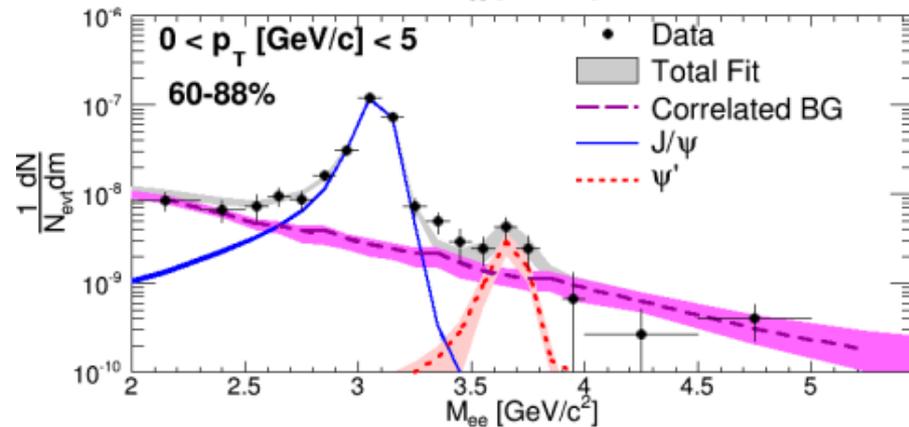
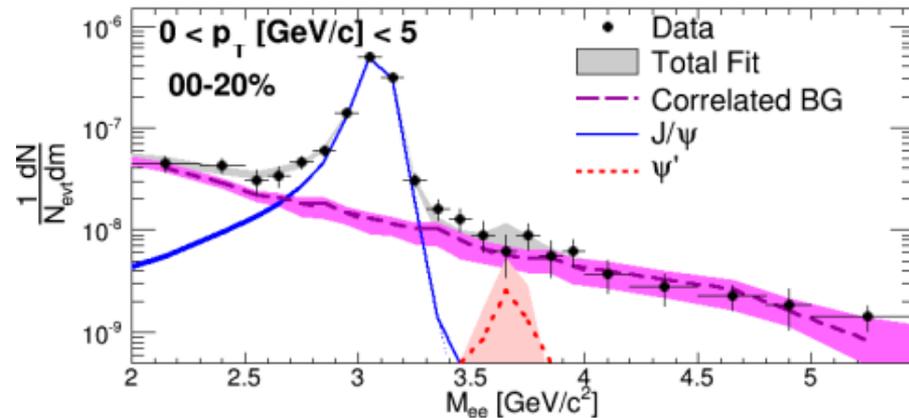


- ❖ Полулептонные распады D мезонов приводят к возникновению корреляций между e-μ парами
 - ❖ Измерения в p+p показывают корреляцию, согласуются с Pythia
 - ❖ Корреляция размывается в d+Au взаимодействиях
- перерассеяние в “плотной” среде?



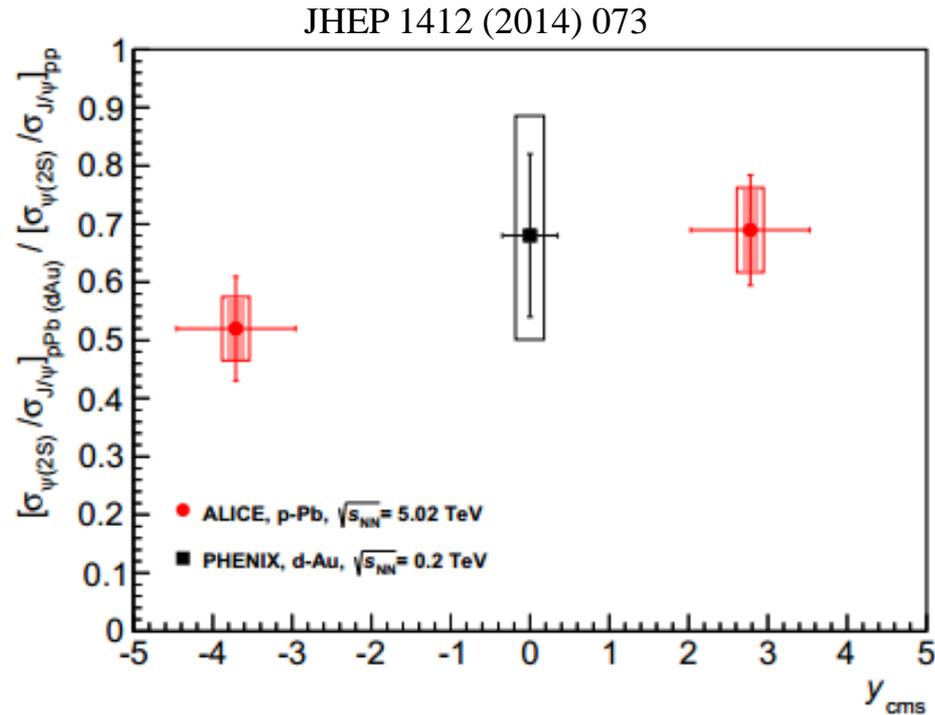
Подавленный выход кваркония, d+Au @ 200 ГэВ (ФЕНИКС)

Phys.Rev.Lett. 111 (2013) 20, 202301



- ❖ Выход Ψ' подавлен в три раза сильнее, чем J/Ψ в центральных столкновениях
- ❖ Подавление зависит от энергии связи

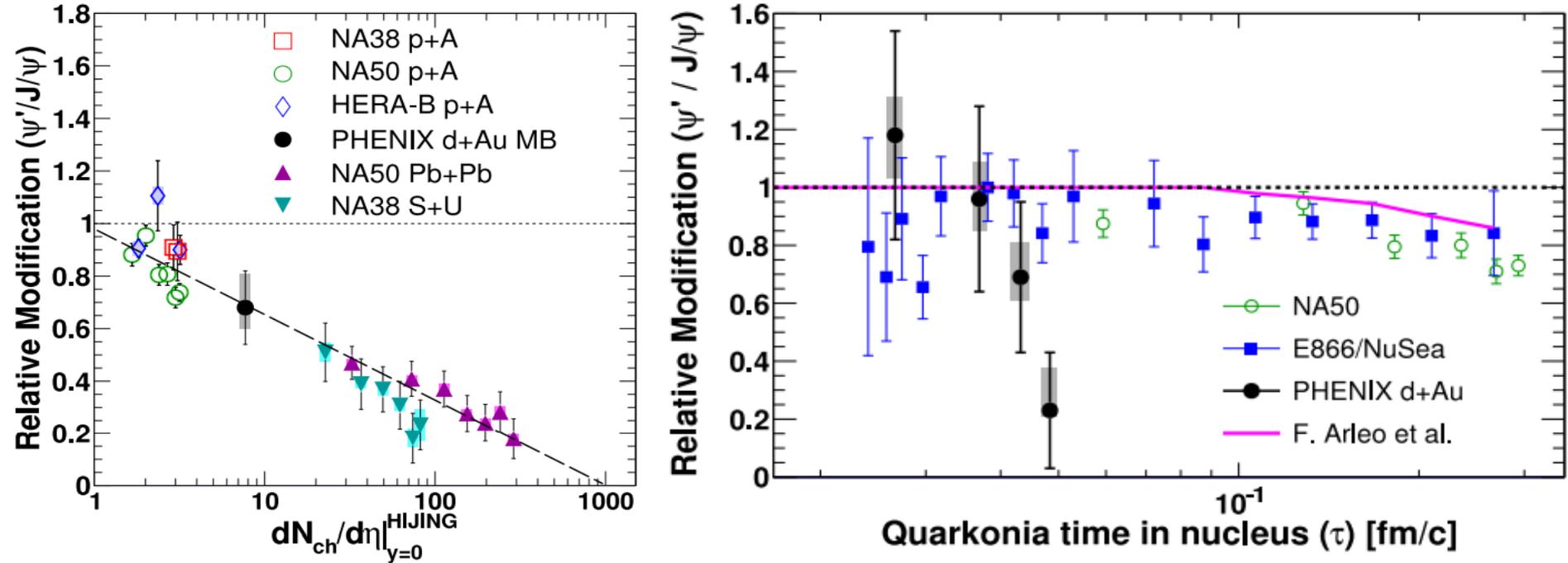
Подавленный выход кваркония, сравнение RHIC и LHC



❖ Аналогичное подавление Ψ' наблюдается в p+Pb @ 5.02 ТэВ в области больших быстрот

Подавленный выход кваркония, d+Au @ 200 ГэВ (ФЕНИКС)

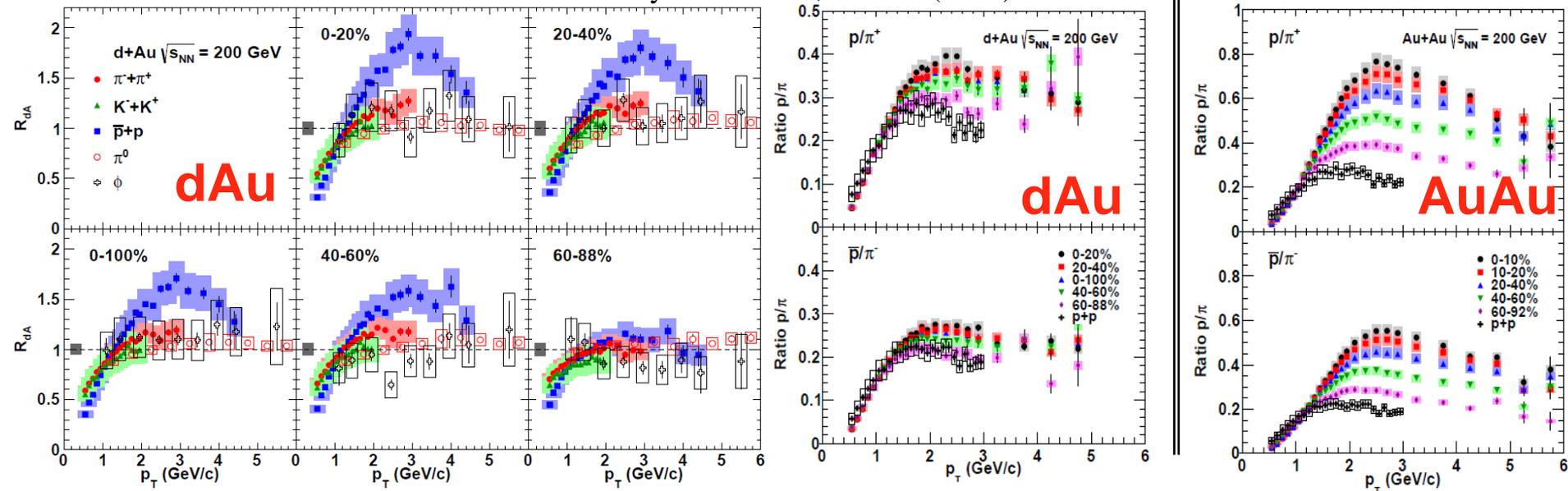
Phys.Rev.Lett. 111 (2013) 20. 202301



- ❖ $\Psi'/J/\Psi$ линейно зависит от множественности ($y=0$) и не зависит от энергии взаимодействия
- ❖ $\Psi'/J/\Psi \sim 1$ если время формирования $>$ времени нахождения в ядре
- ❖ Теоретическая кривая хорошо согласуется с данными при более низких энергиях, но не согласуется с RHIC
 \rightarrow эффект перерасеяния в плотной адронной среде?

R_{dA} , p/π : d+Au, Au+Au @ 200 ГэВ (ФЕНКС)

Phys. Rev. C 88, 024906 (2013)

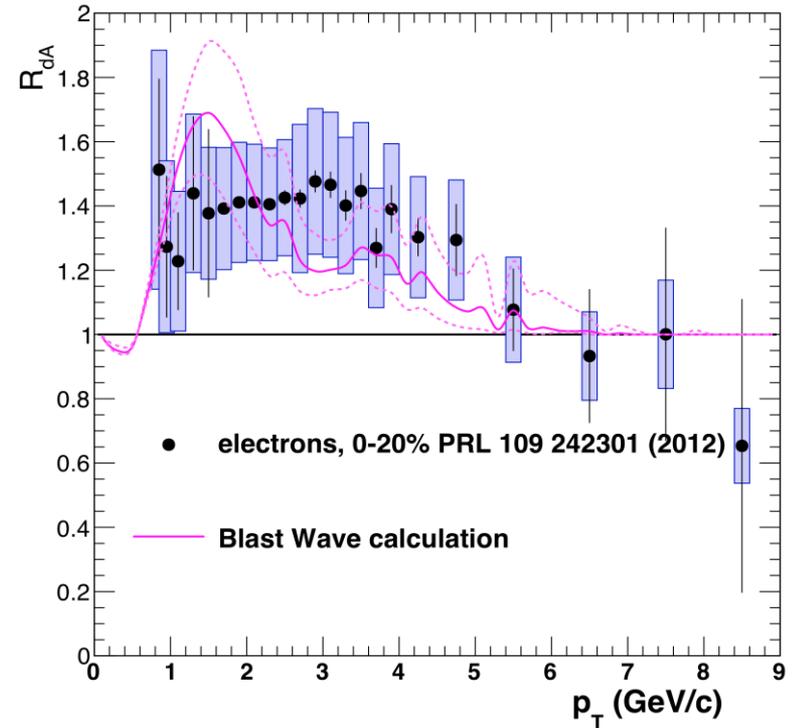
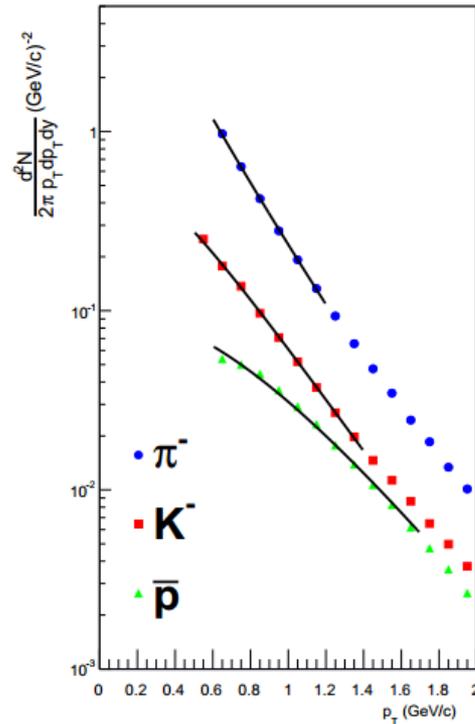
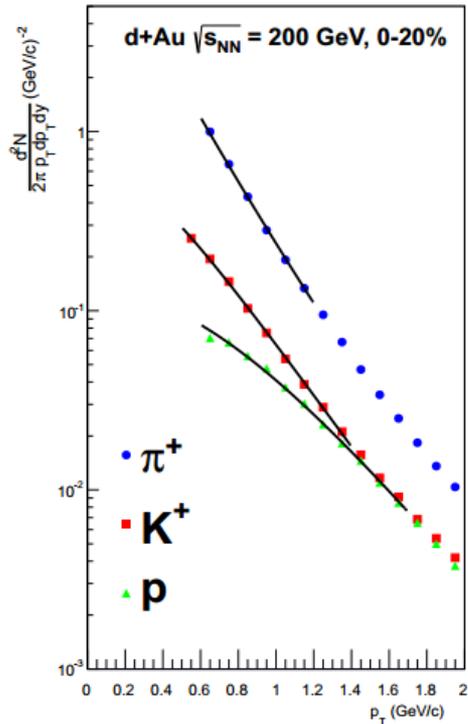


- ❖ Сильная эволюция R_{AA} с центральностью для протонов, но не для π , K, ϕ
- ❖ p/π монотонно возрастает с центральностью d+Au и Au+Au столкновений
- ❖ Центральные d+Au = периферийные Au+Au
- ❖ перерассеяния в начальном состоянии, рекомбинация, радиальный поток?

Радиальный поток?

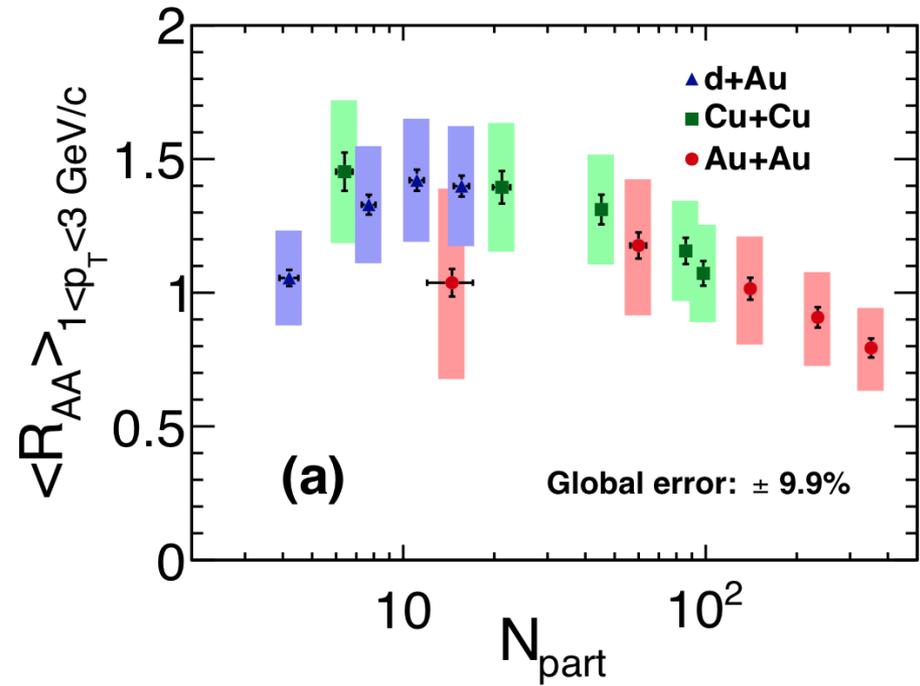
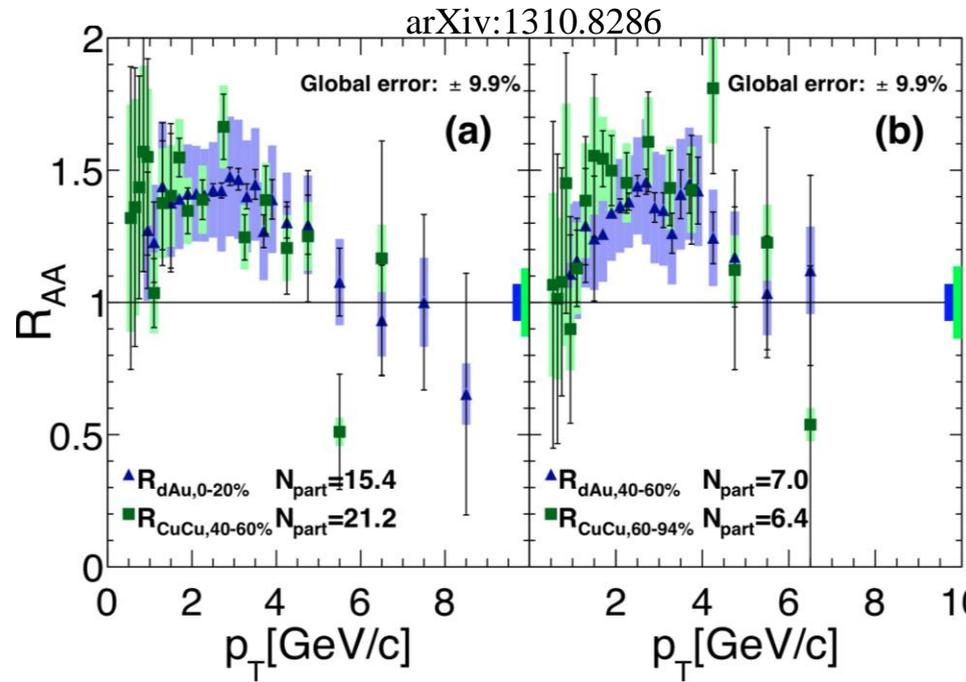
d+Au @ 200 ГэВ (ФЕНИКС)

Phys. Lett. B731 51-56 (2014)



- ❖ Blast-Wave для идентифицированных адронов: $\beta \sim 0.7$, $T_{f0} \sim 140$ МэВ
- ❖ Предсказания для eНФ хорошо согласуются с экспериментом
- ❖ Радиальный поток работает и объясняет эффект Кронины?

Выход e_{HF} в зависимости от N_{part} (ФЕНИКС)

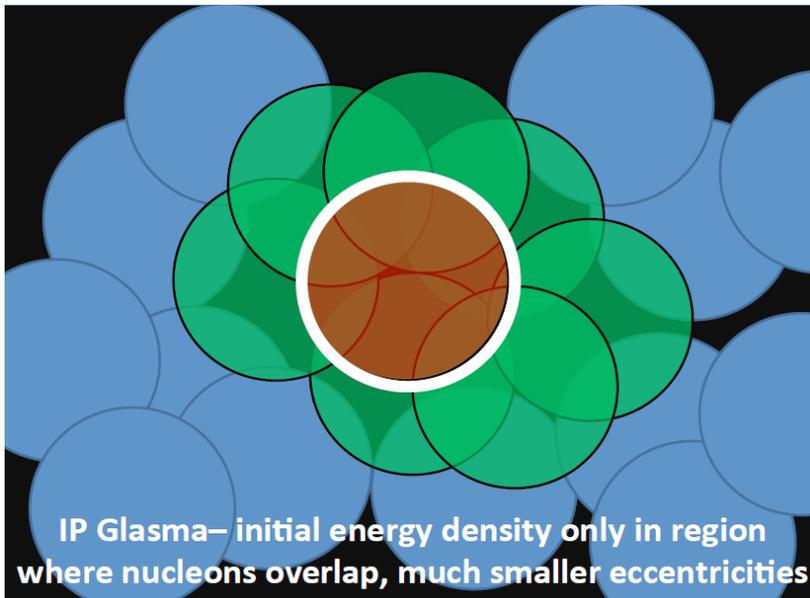
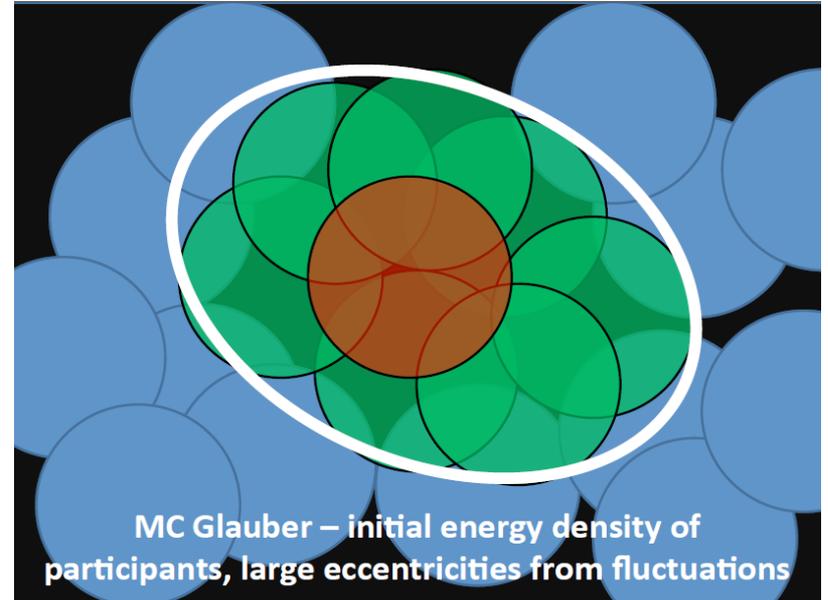
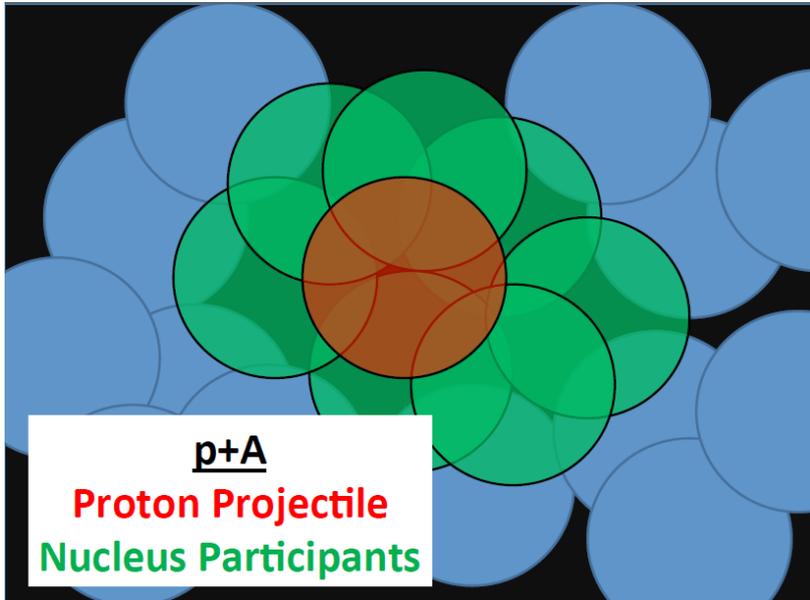


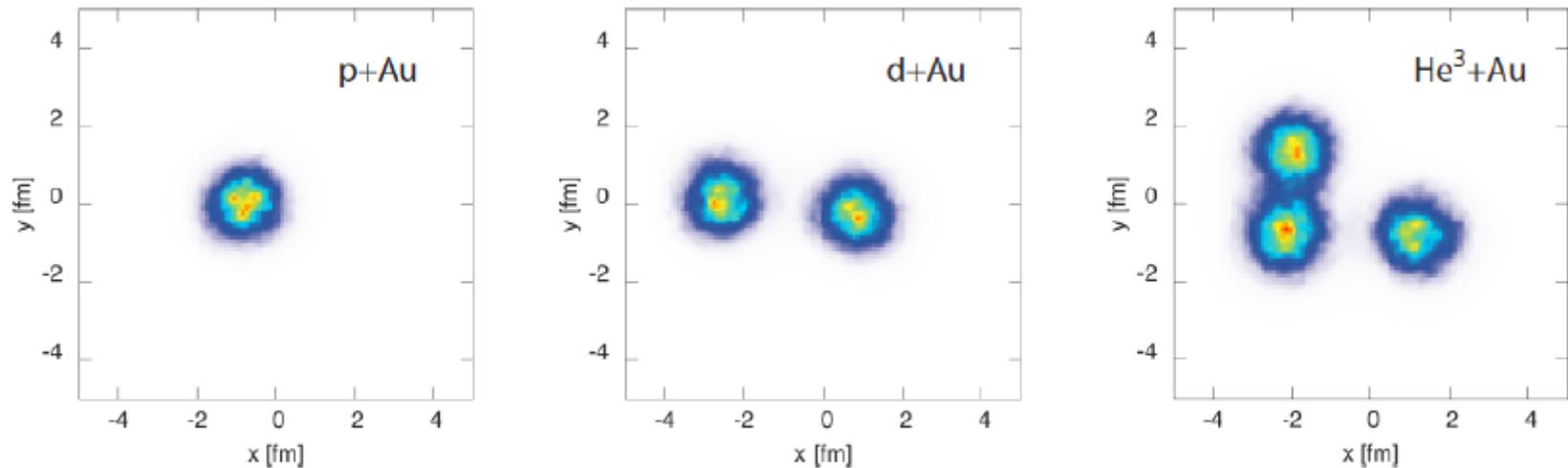
- ❖ Сравнение R_{AA} для e_{HF} в трех системах: **Au+Au**, **Cu+Cu** и **d+Au**
- ❖ При одинаковых N_{part} величины $R_{\text{AA}}(p_{\text{T}})$ согласуются для трех систем
- ❖ Схожесть механизмов?

Заключение

- ❖ Изучение малых систем давно вышло за рамки контрольных экспериментов
- ❖ Большое количество новых экспериментальных результатов
- ❖ Указания на коллективные эффекты:
 - ✓ наблюдение риджей и импульсной анизотропии (v_2, v_3)
 - ✓ признаки развития радиального потока в легком и тяжелом секторах
 - ✓ подавление различных состояний чармония, разрушение e - μ корреляций
- ❖ Результаты не имеют однозначной интерпретации
- ❖ Перспективы:
 - ✓ $p+A$ (Si, Al) на RHIC
 - ✓ те же переменные в $p+p$ столкновениях при высоких множественностях

BACKUP

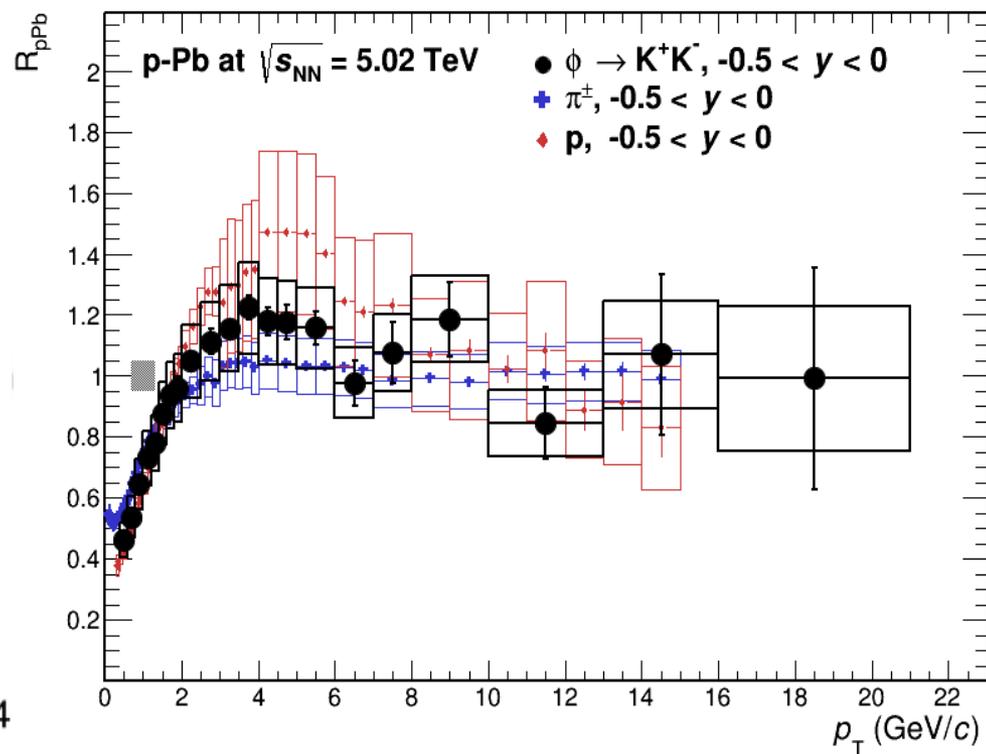
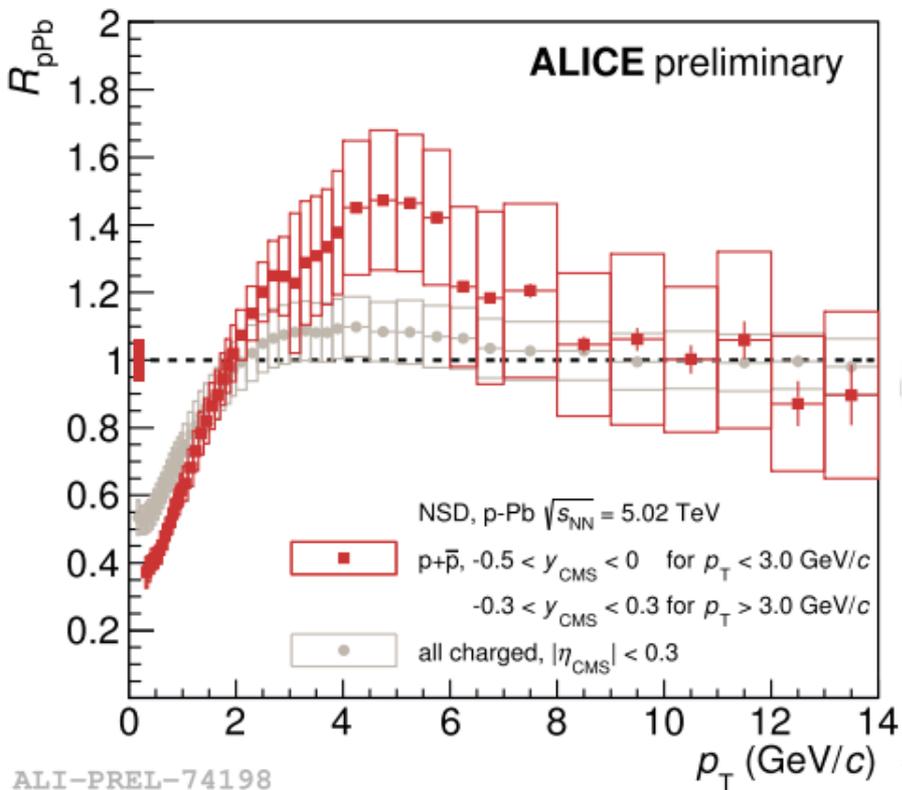




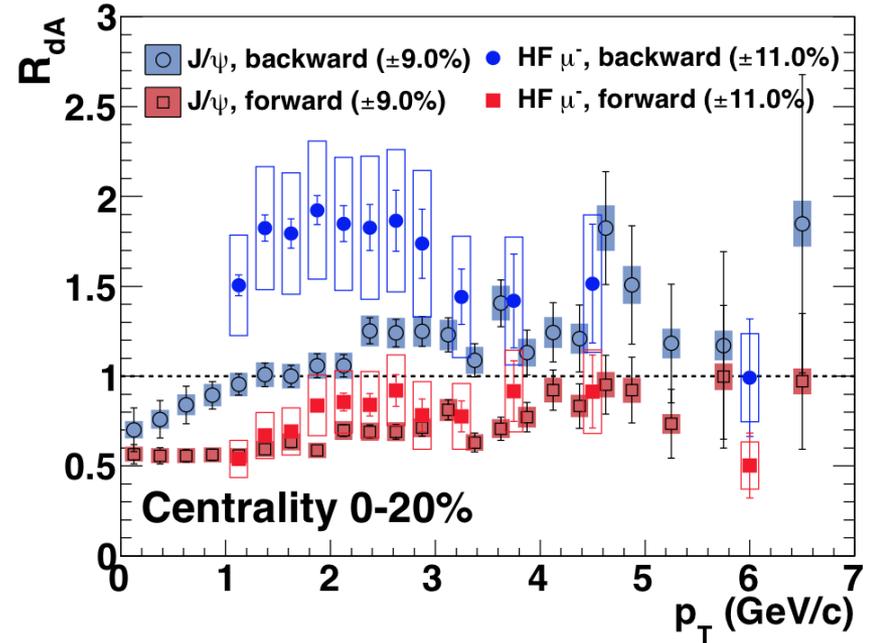
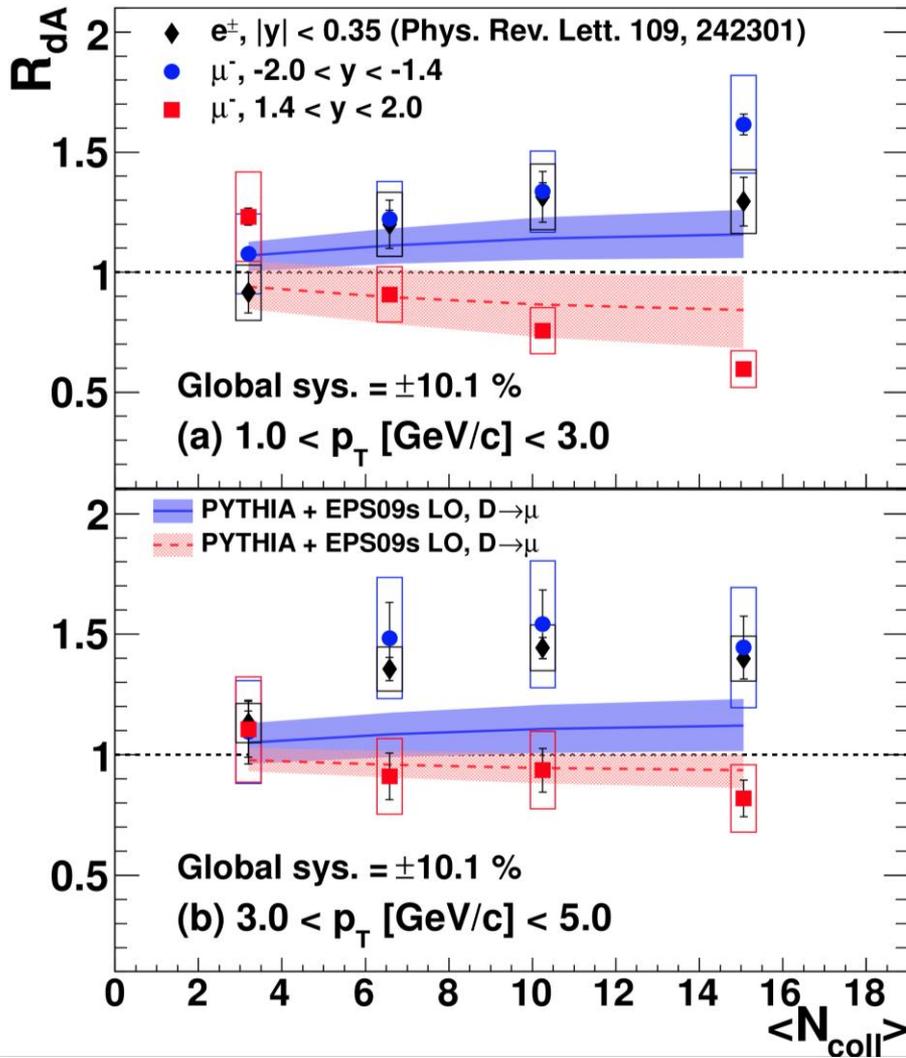
IP Glasma gives very different eccentricity from Glauber in pA

However, in d+Au and ³He+Au,
the eccentricity is driven by the 2 and 3 hot spots,
not their individual geometry

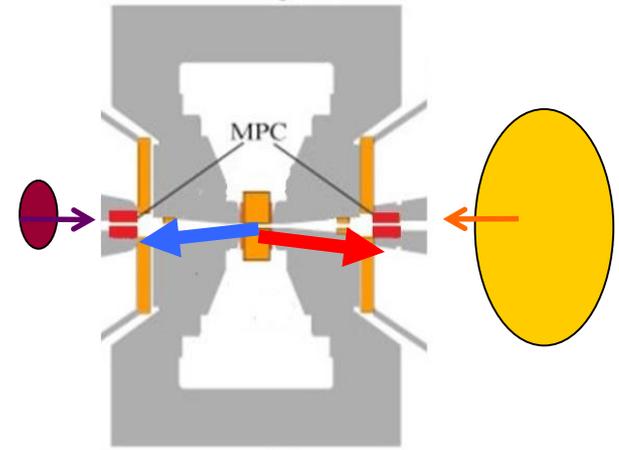
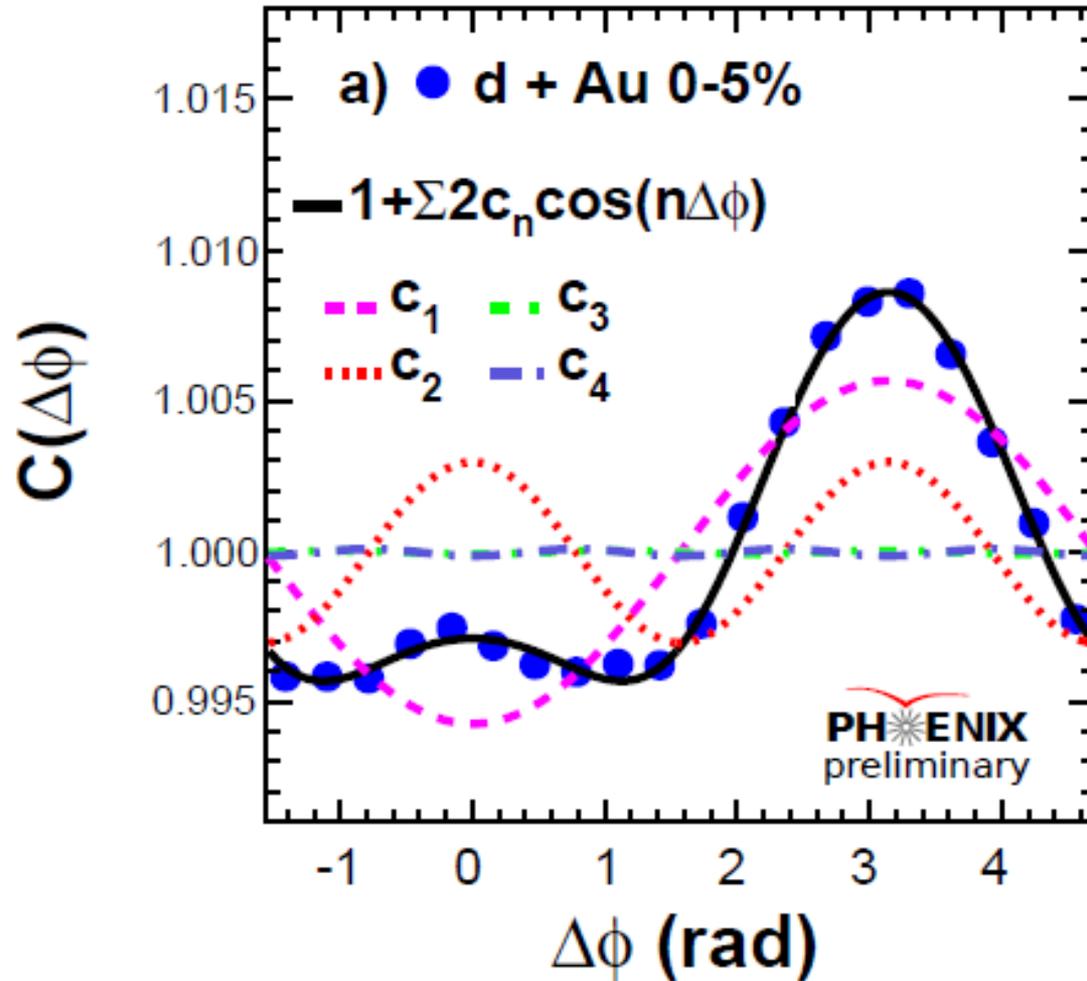
Note though that the IPGlasma has a smaller hot spots
with higher energy density that result in
more rapid radial expansion



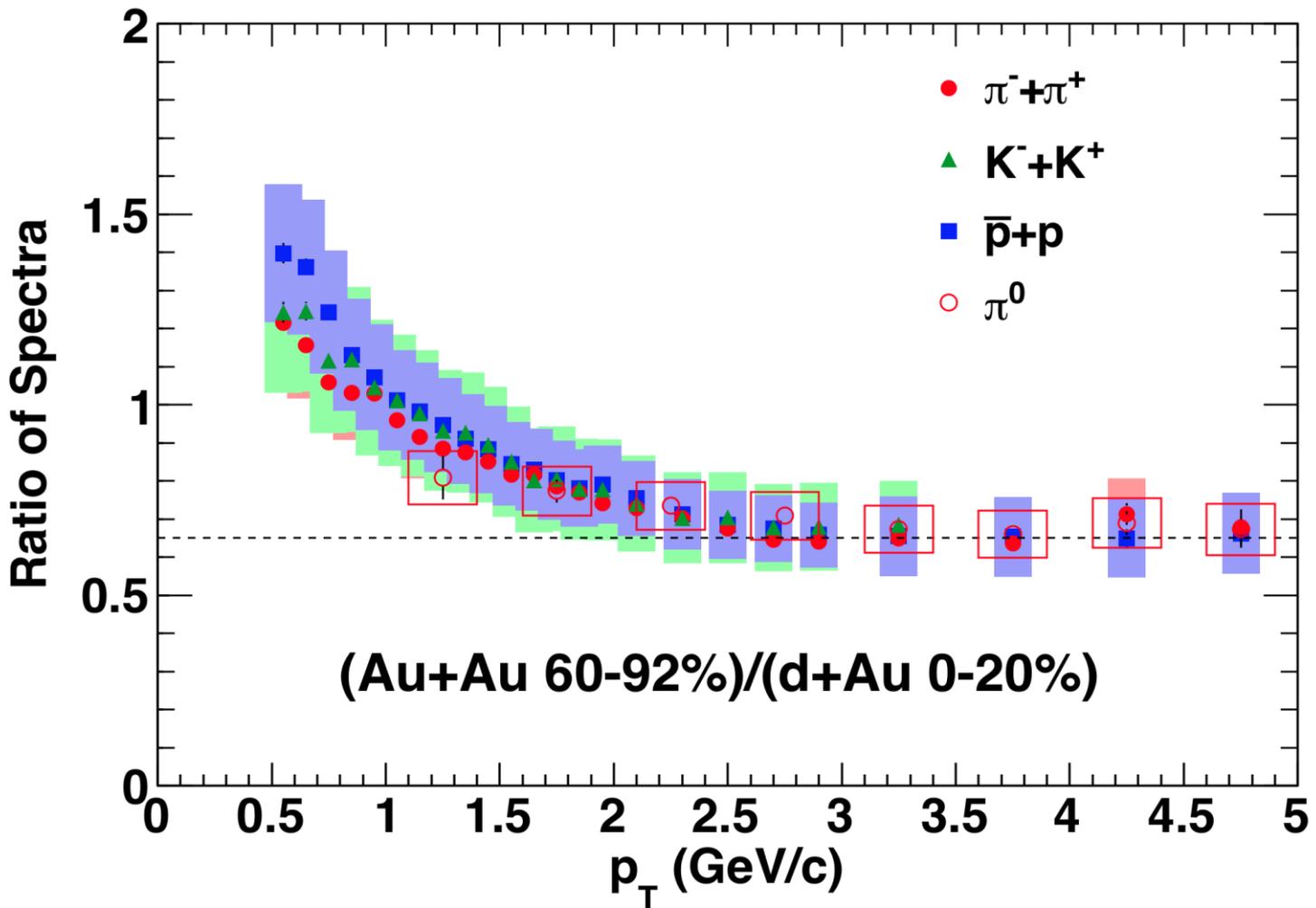
ALI-PREL-74198



A ridge is observed with $|\Delta\eta| > 6.0$



□ Correlation between Au-going and d-going MPC towers



$e^\pm + A, E_{e^\pm} = 27.6 \text{ ГэВ (HERMES)}$

- ❖ R_A^h – отношение множественностей на ядре A к множественности на ядре дейтерия (d)
- ❖ В области импульсов 1-1.5 ГэВ/с наблюдается избыточный выход π, K, p возрастающий со значением A
- ❖ Избыточность выхода зависит от типа/массы частицы как и в ионных столкновениях
- ❖ $e+A$ – нет перерасеяний в начальном состоянии
- ❖ Перепасеяние партонов, взаимодействие адронов в конечном состоянии?

