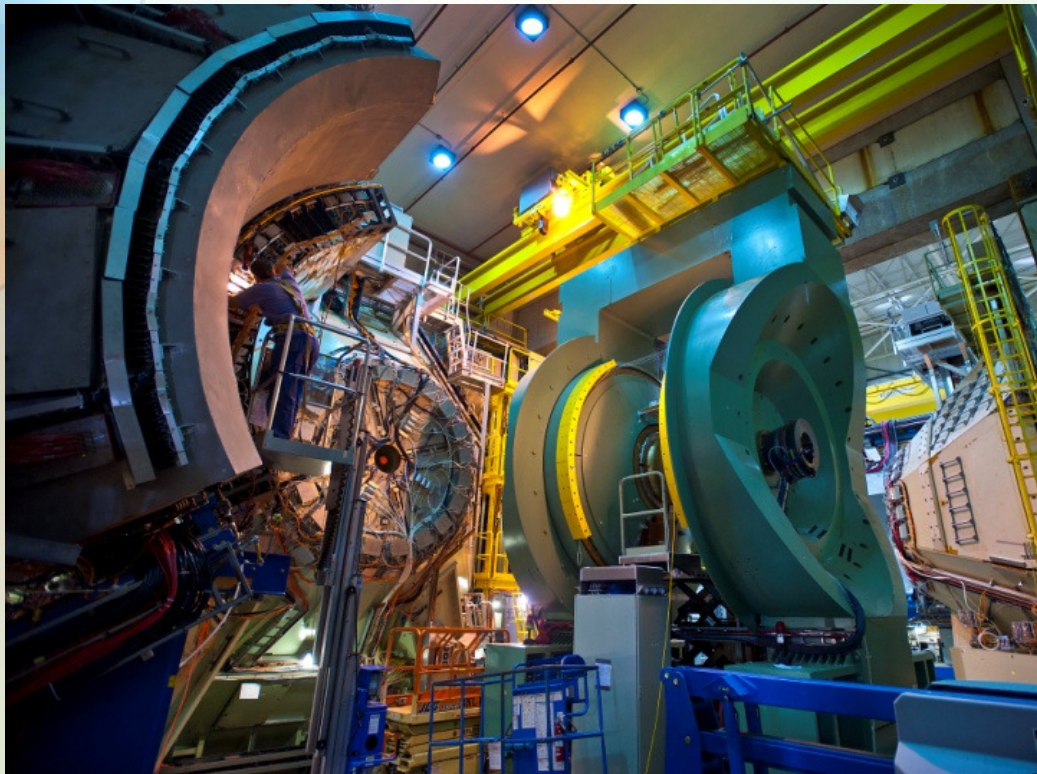


Изучение столкновений легких и тяжелых ядер в эксперименте PHENIX на коллайдере RHIC

В. Рябов (ЛРЯФ)



Циклы работы

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

❖ Двенадцать циклов работы:

✓ 10 энергий (\sqrt{s})

✓ 6 комбинаций ядер

❖ Непрерывное повышение светимости пучков

❖ Программа сканирования по энергиям взаимодействия

❖ Run13 – p+p @ 500 ГэВ

Открытие сКГП

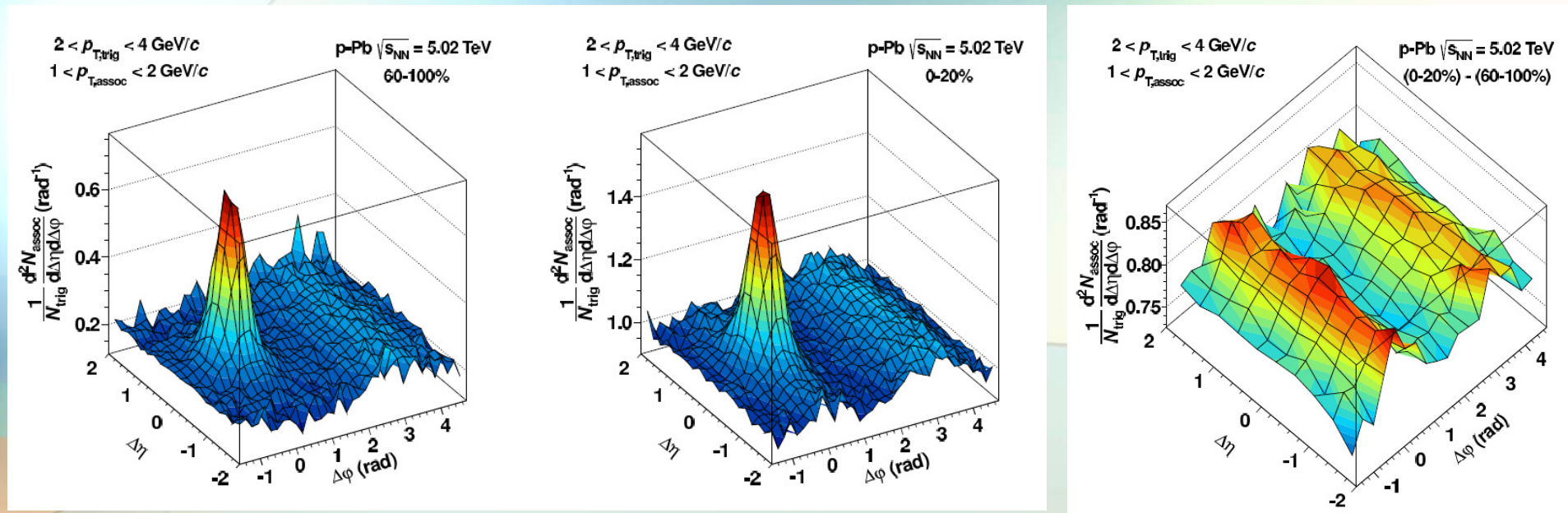
❖ В 2005 году (QM-2005) все коллаборации на RHIC сделали заявление об открытии нового состояния – сильновзаимодействующей КГП:

- ✓ гашение струй
- ✓ эллиптический поток, зависимость потока от массы, p_q
- ✓ мягкие прямые фотоны, $T > 200$ МэВ
- ✓ “барионная загадка”

❖ Интерпретация результатов и численное описание требуют понимания CNM эффектов, доступных для изучения в столкновениях легких и тяжелых ядер:

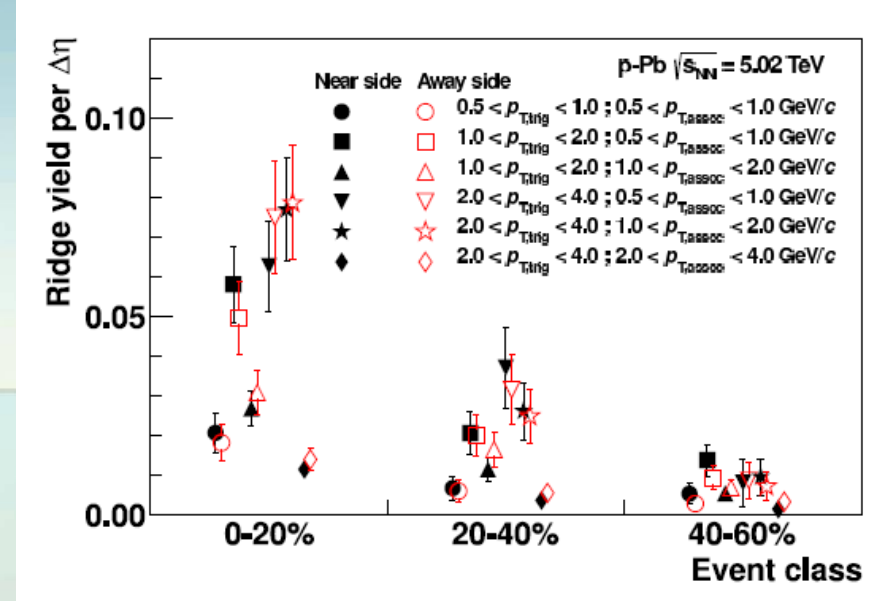
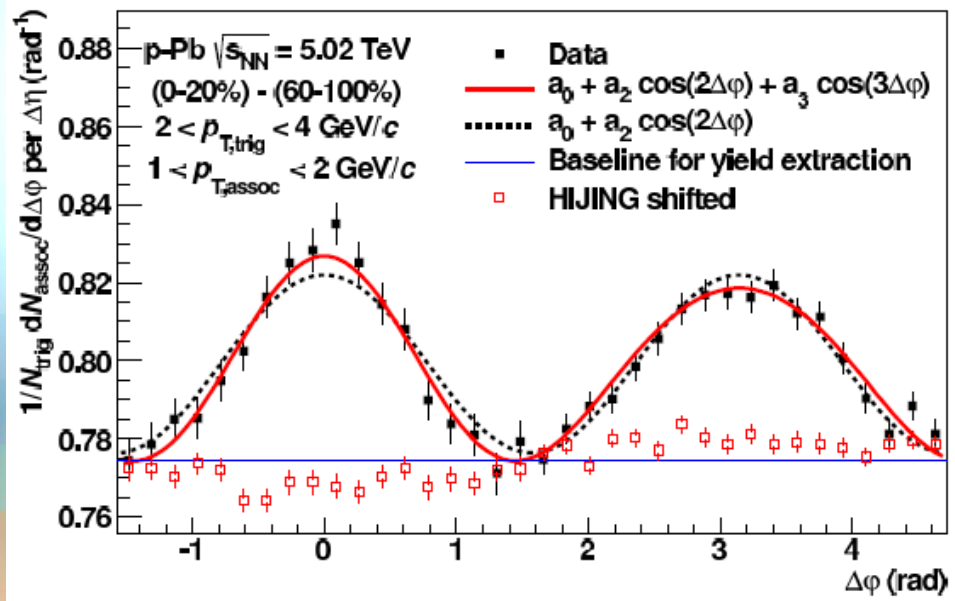
- ✓ RHIC, d+Au @ 200 ГэВ
- ✓ LHC, p+Pb @ 5 ТэВ

Double ridge, p+Pb @ 5 TeV (ALICE, PL B719,29) - I



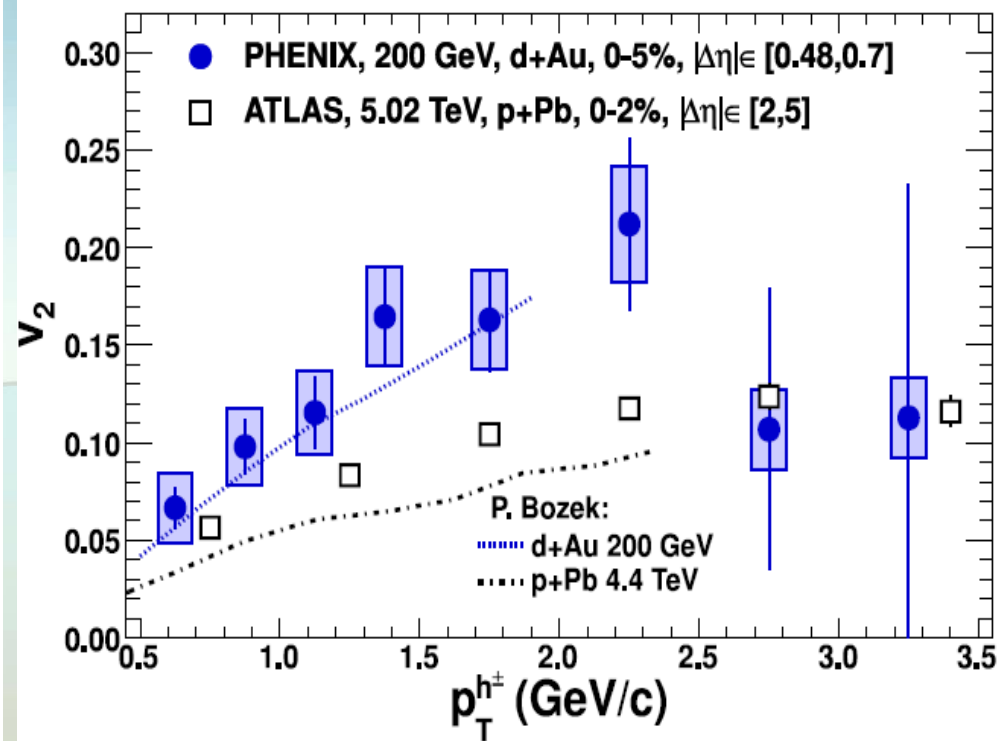
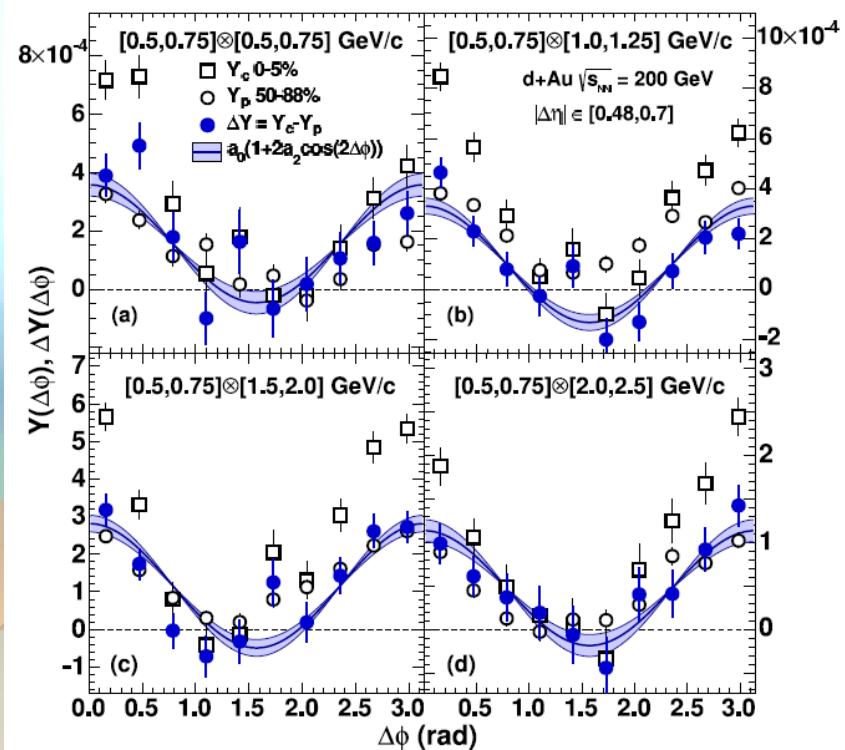
- ❖ Two long-range ridge-like structures, one on the near side and one on the away side, are observed when the per-trigger yield obtained in low-multiplicity events is subtracted from the one in high multiplicity events

Double ridge, p+Pb @ 5 TeV (ALICE, PL B719,29) - II



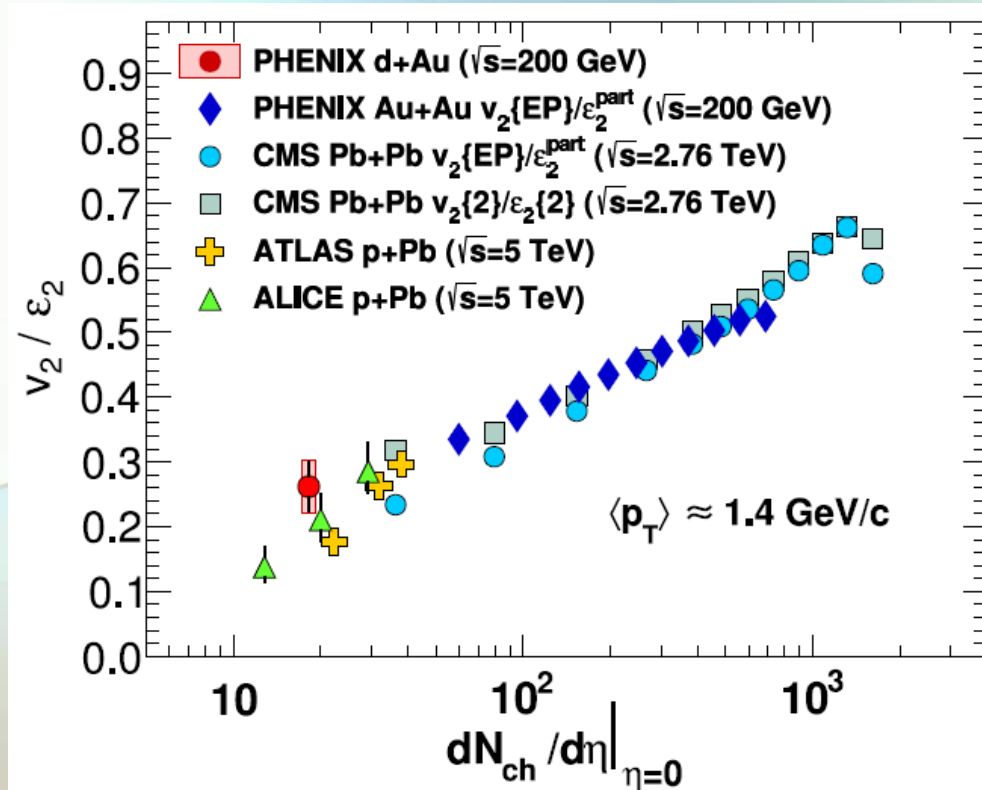
- ❖ The yields on the near side and on the away side are equal within the uncertainties for all studied event multiplicity and p_T bins, and the widths show no significant evolution with event multiplicity or p_T
- ❖ Near-side ridge is accompanied by an essentially identical away-side ridge.
- ❖ The two-ridge structure projected onto azimuthal angle is quantified with the second and third Fourier coefficients

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



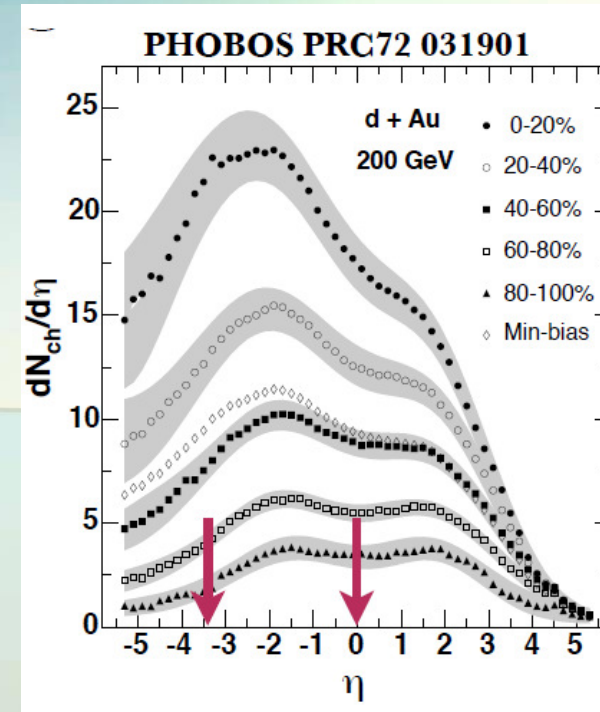
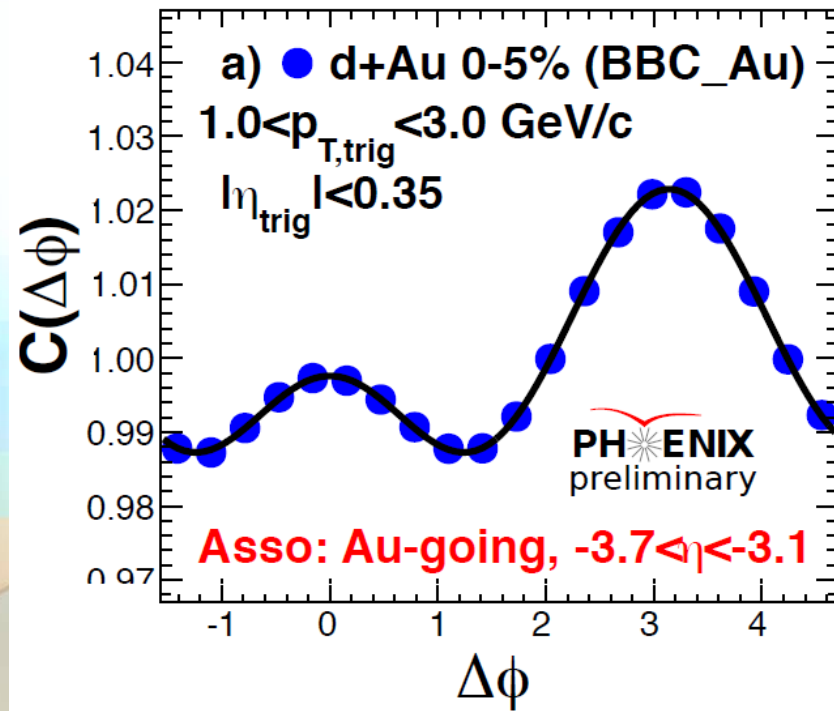
- ❖ Азимутальные корреляции между адронами, разделенными на 0.48-0.7 единиц по быстроте при различных импульсах триггерных частиц.
- ❖ Корреляции показаны для центральных (Y_c), периферийных (Y_p) столкновений и их разницы, $\Delta Y = Y_c - Y_p$
- ❖ Остаточные азимутальные корреляции для ΔY согласуются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

Угловые $\Delta\phi$, $|\eta| = 0.48-0.7$, ФЕНИКС



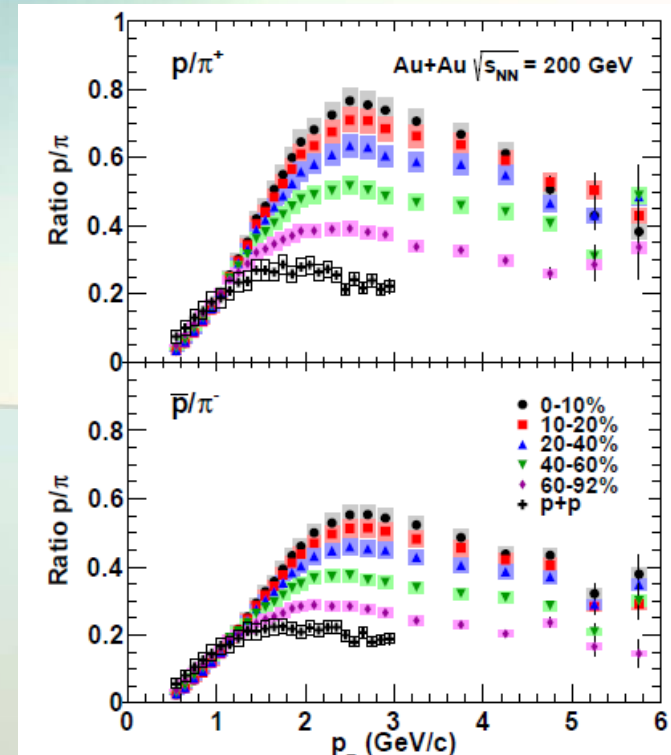
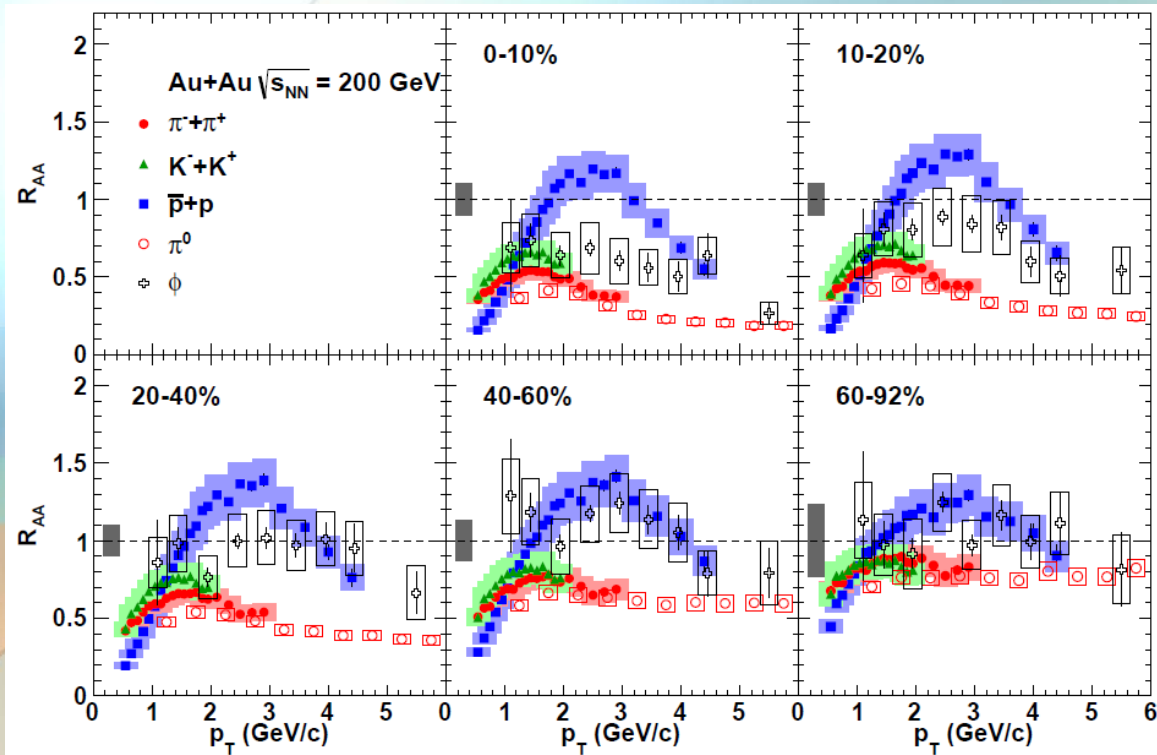
- ❖ Результаты RHIC и LHC, v_2/ϵ , в зависимости от множественности
- ❖ v_2/ϵ следует одной универсальной зависимости не смотря на различие в энергии взаимодействия ядер (x25) и эксцентриситете (x1.5)
- ❖ Измерения в d+Au/p+Pb и Au+Au/Pb+Pb взаимодействиями следуют одной универсальной зависимости.

Угловые $\Delta\phi$, $|\eta| = 3-4$, ФЕНИКС



- ❖ Наблюдаются пики в области прямой ($\Delta\phi \sim 0$) и обратной ($\Delta\phi \sim \pi$) струй
- ❖ Прямое указание на наличие азимутальной корреляции между адронами, разделенными на несколько единиц по быстрой
- ❖ Подтверждение, что ранее представленные результаты ФЕНИКС не являются артефактом остаточных струеподобных корреляций

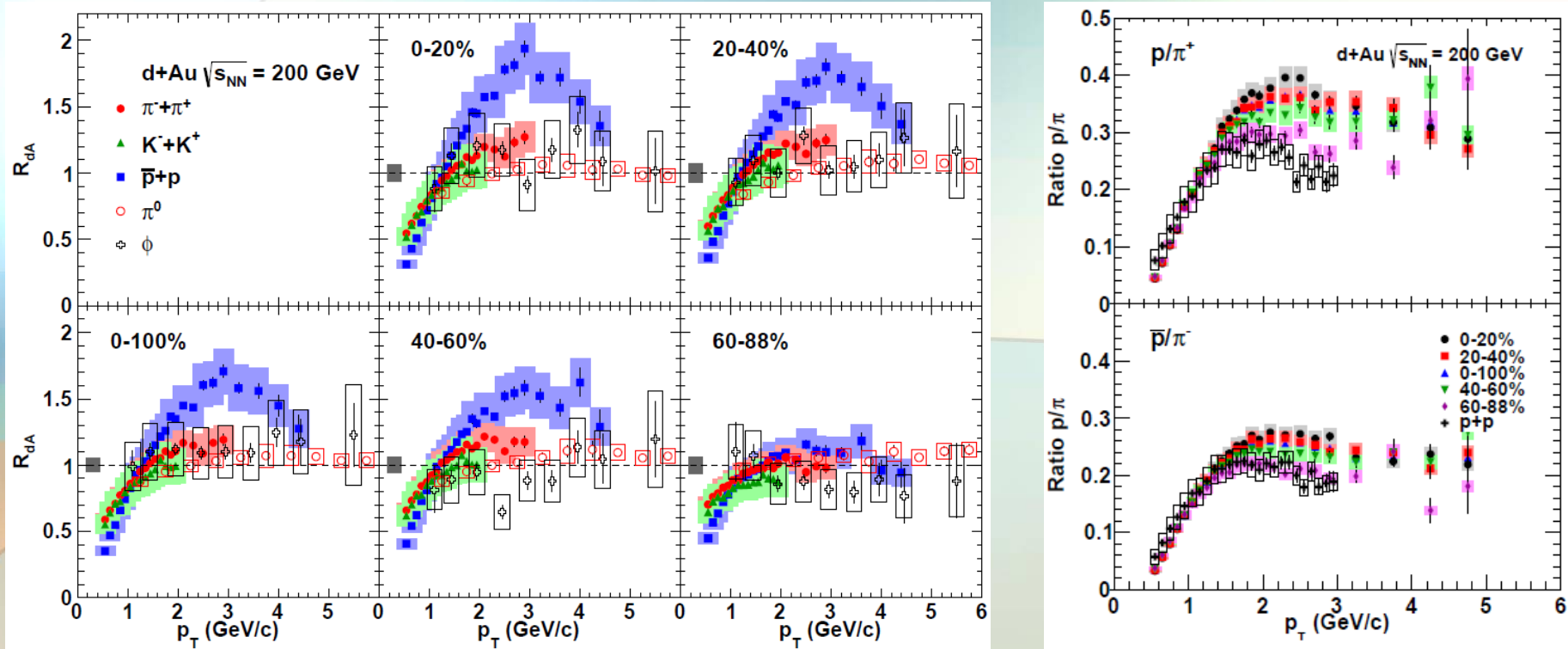
$R_{AA}, p/\pi$: Au+Au @ 200 ГэВ



$$R_{AA} = \frac{(dN/dp_T)^{Au+Au}}{N_{coll}^{Au+Au} (dN/dp_T)^{p+p}}$$

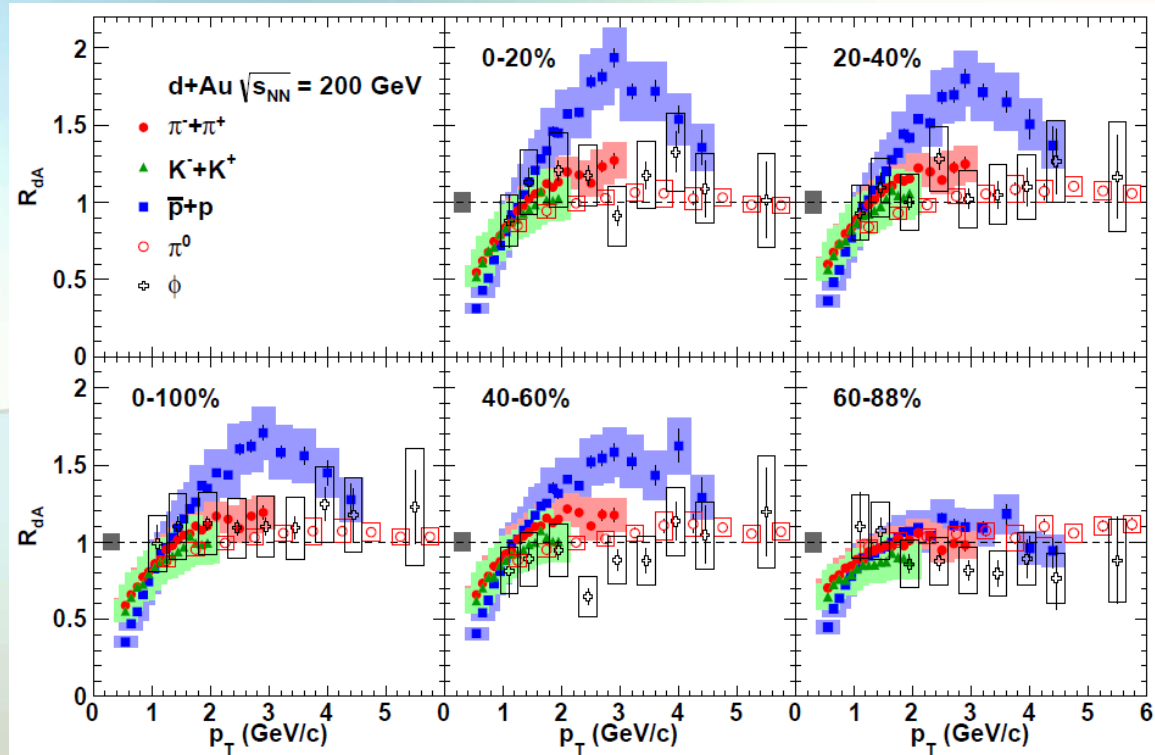
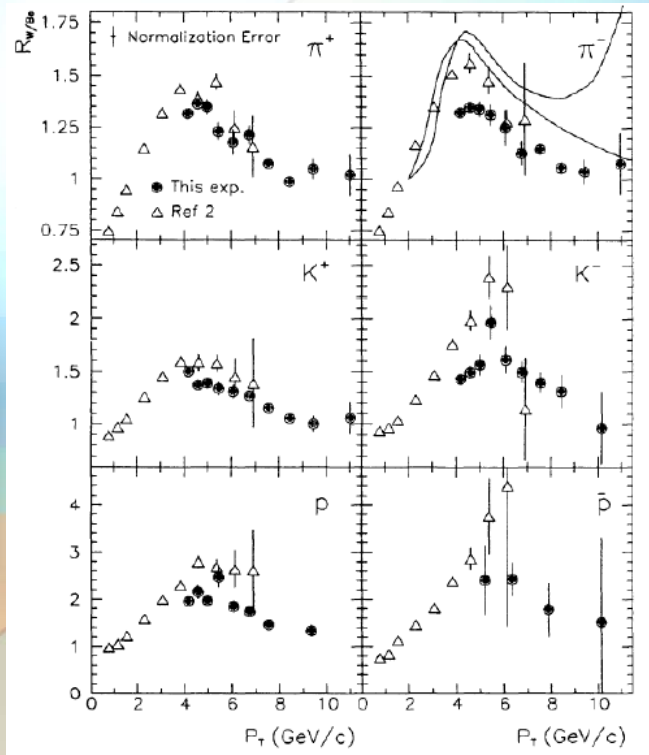
- ❖ Сильная эволюция R_{AA} с центральностью для π , K , ϕ , но не для протонов
- ❖ p/π монотонно возрастает с центральностью Au+Au столкновений
- ❖ Поведение ϕ мезона ближе к мезонам, чем к барионам
 \rightarrow рекомбинации партонов - доминирующий механизм адронизации \rightarrow тепловой источник партонов

$R_{dA}, p/\pi: d+Au @ 200 \text{ GeV}$



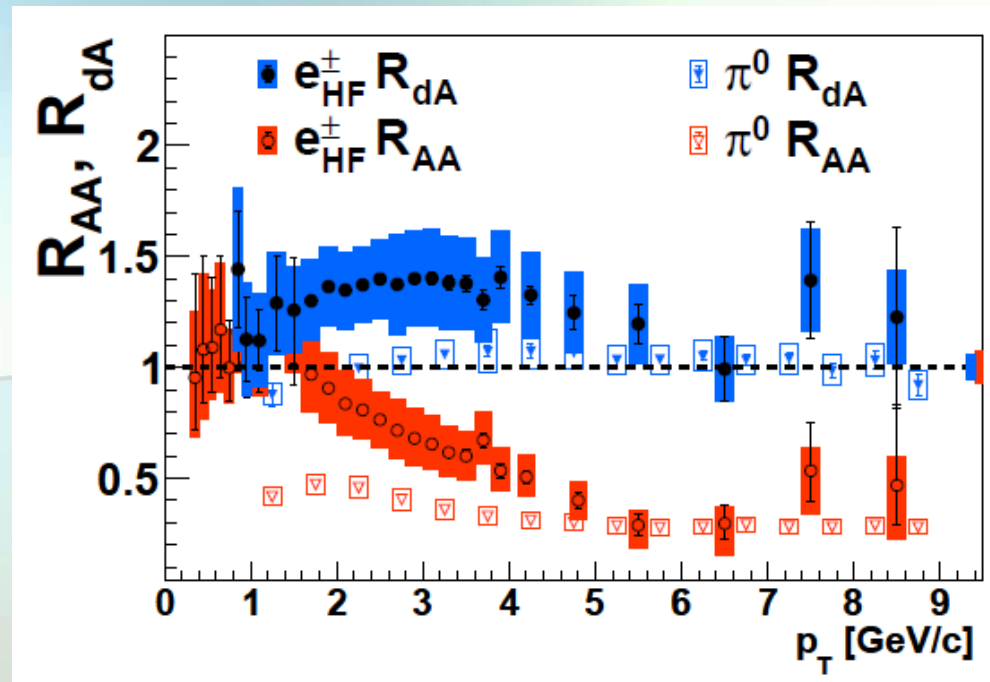
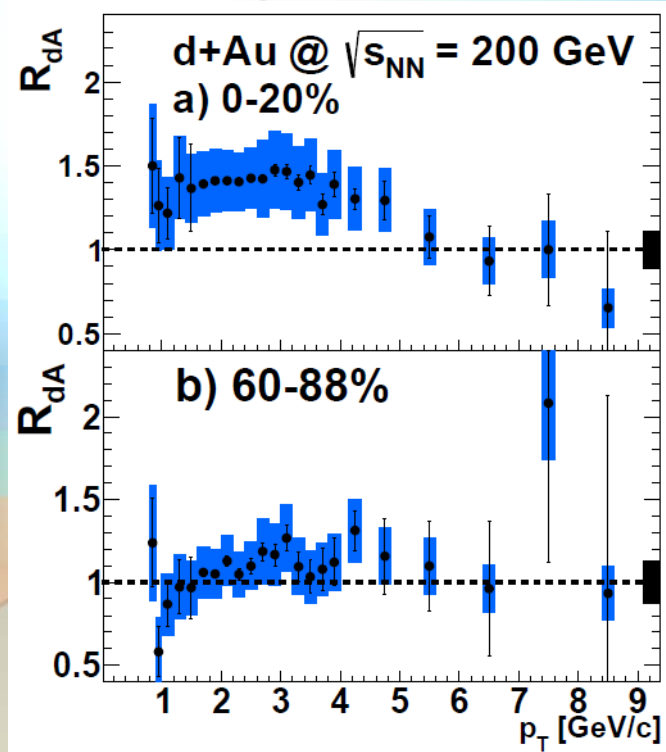
- ❖ Сильная эволюция R_{AA} с центральностью для протонов, но не π , K , ϕ
- ❖ p/π монотонно возрастает с центральностью $d+Au$ столкновений
- ❖ Аналогично случаю $Au+Au$, наблюдается зависимость эффектов от числа валентных кварков, а не от массы частиц

Cronin enhancement vs. \sqrt{s} and PID



- ❖ Cronin = многократное мягкое перерассеяние?
- ❖ Откуда партон знает в какой адрон он фрагментирует?

e_{HF} : d+Au/Au+Au @ 200 ГэВ



- ❖ e_{HF} от полулептонных распадов адронов, содержащих c и b - кварки
- ❖ $R_{dA}(e_{\text{HF}}) \sim 1$ в периферийных столкновениях, избыточный выход в центральных
- ❖ Различие в CNM эффектах может объяснить отличие в R_{dA} между π^0 и e_{HF}

e_{HF} : d+Au/Cu+Cu @ 200 ГэВ

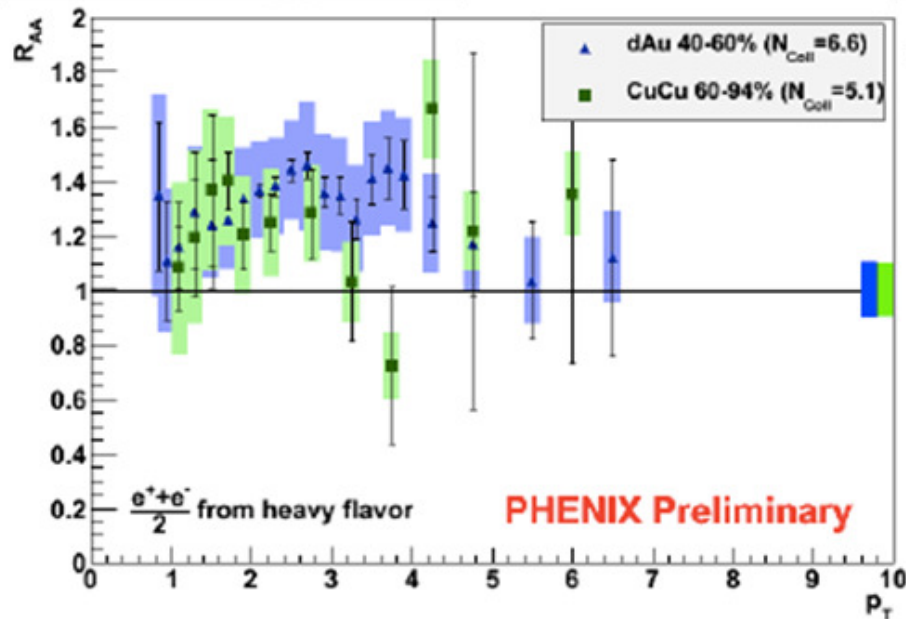
$$\langle N_{coll} \rangle_{dAu} = 6.6 \text{ \& } \langle N_{coll} \rangle_{CuCu} = 5.1$$

$$\langle N_{part} \rangle_{dAu} = 7.7 \text{ \& } \langle N_{part} \rangle_{CuCu} = 6.4$$

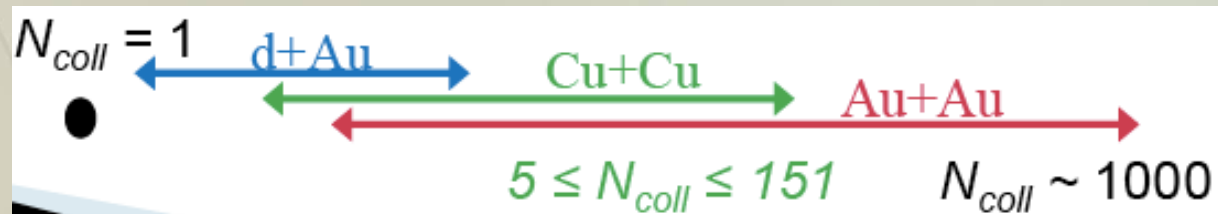
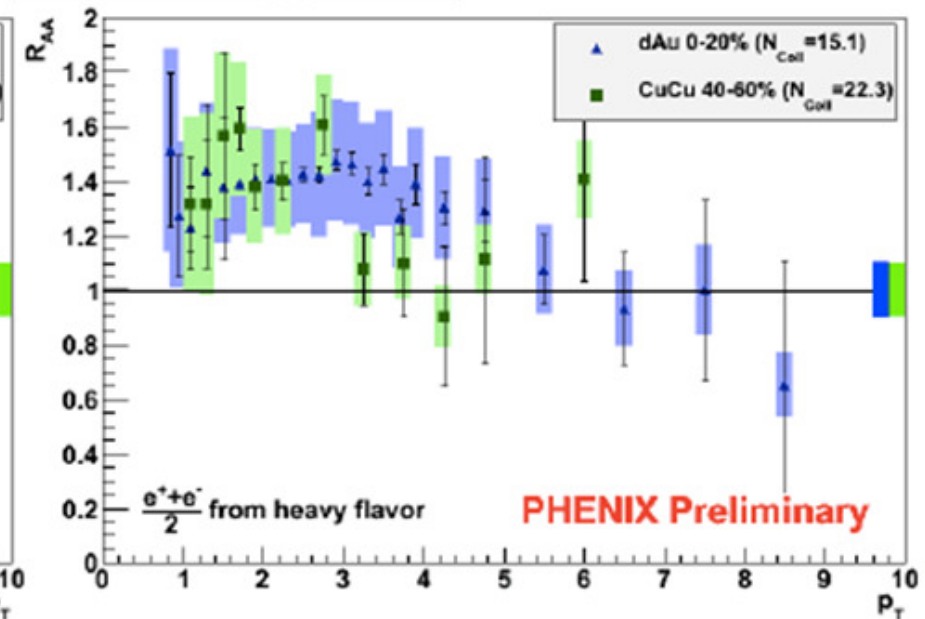
$$\langle N_{coll} \rangle_{dAu} = 15.1 \text{ \& } \langle N_{coll} \rangle_{CuCu} = 22.3$$

$$\langle N_{part} \rangle_{dAu} = 15.6 \text{ \& } \langle N_{part} \rangle_{CuCu} = 21.2$$

R_{dAu} : 40-60% & R_{CuCu} : 60-94%

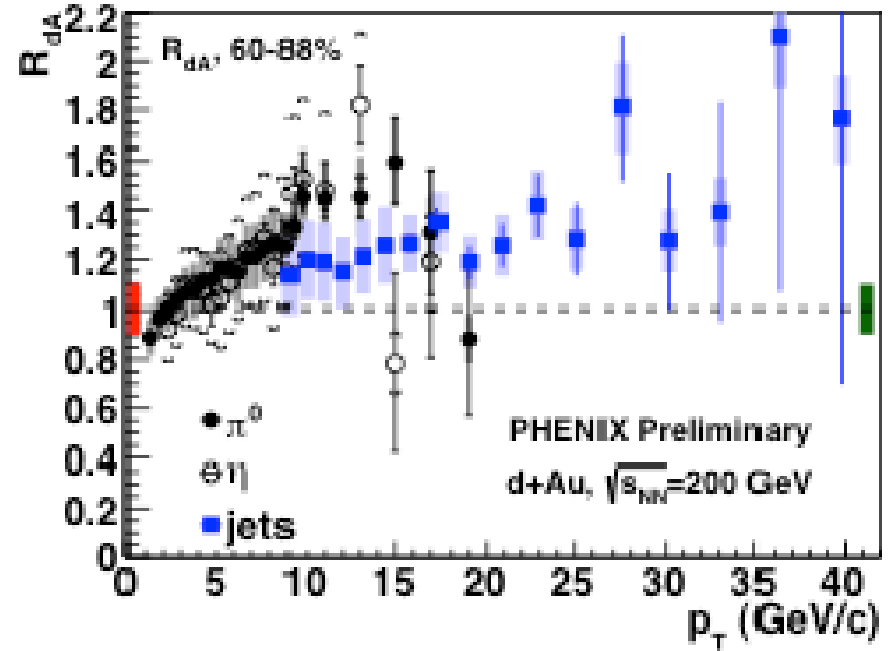
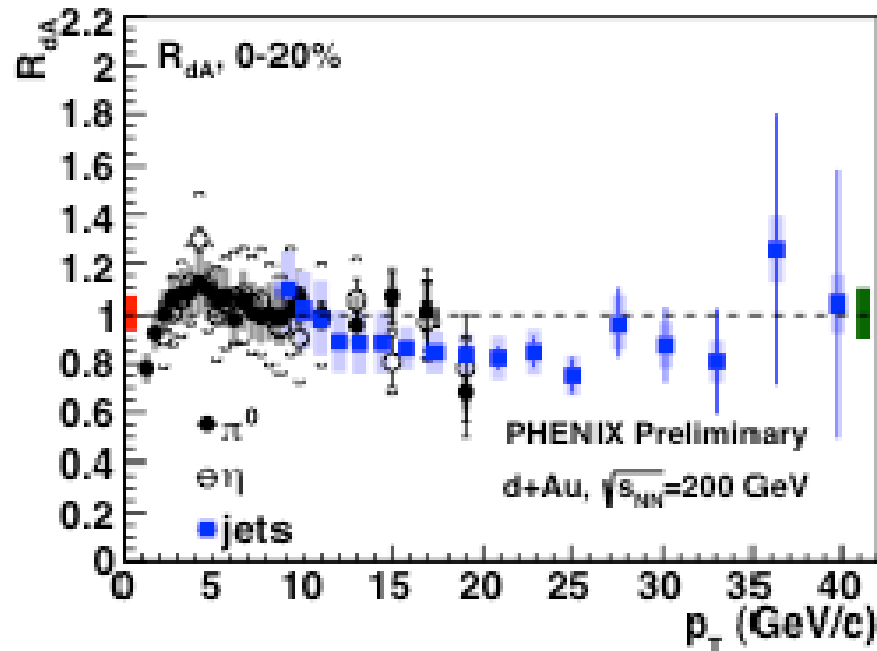


R_{dAu} : 0-20% & R_{CuCu} : 40-60%



❖ R_{AA} для e_{HF} в основном зависит от размера взаимодействующей системы

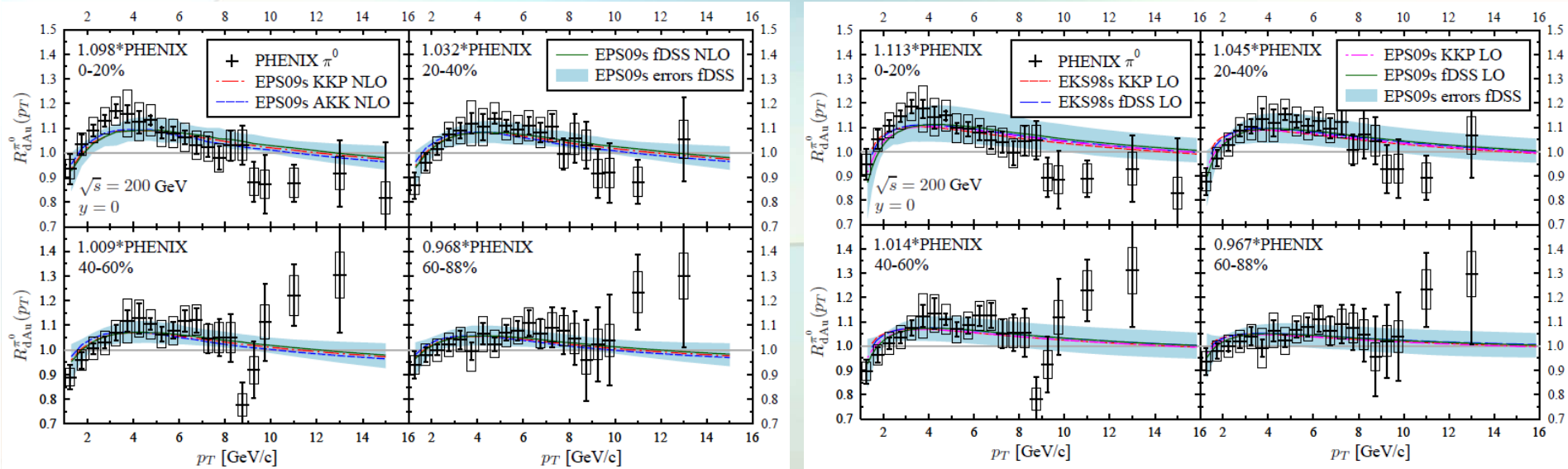
π^0 , η , jets: d+Au @ 200 ГэВ



- ❖ Сильная зависимость R_{dA} от центральности:
 - ✓ подавление $\sim 20\%$ в центральных столкновениях
 - ✓ сильный избыток выхода в периферийных столкновениях
- ❖ Необходимо учитывать автокорреляции между нахождением высокоэнергетичной струи в области малых быстрот и измерением центральности в области больших быстрот

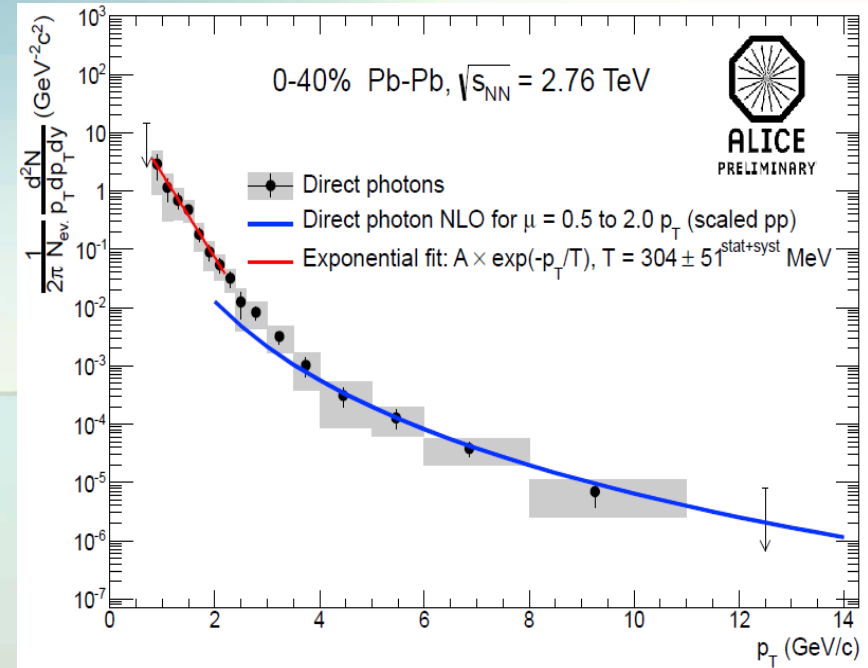
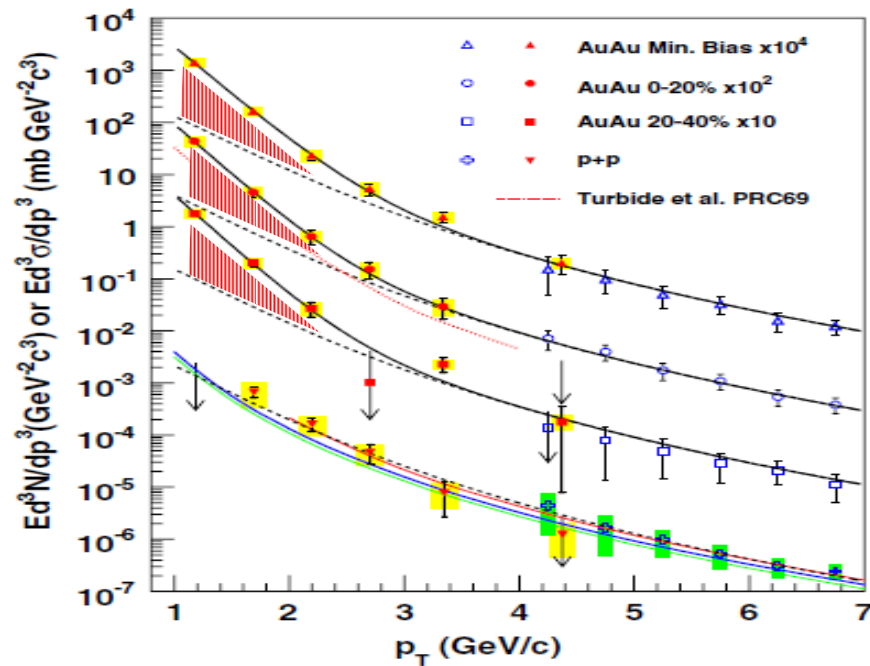
π^0 : d+Au @ 200 GeV

Ilkka Helenius, Kari J. Eskola et al. arXiv 1205.5359



❖ Модельные расчеты предсказывают слабую зависимость R_{dA} от центральности

γ_{dir} : Au+Au @ 200 ГэВ & Pb+Pb @ 2.76 TeV



❖ PHENIX:

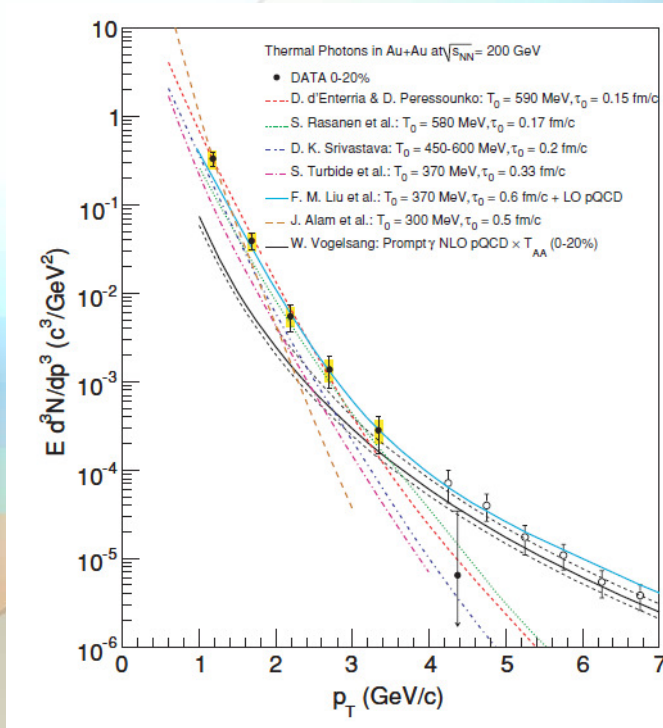
- ✓ NLO pQCD описывает выход прямых фотонов в p+p
- ✓ Избыточный выход прямых фотонов $1 < p_T \text{ (GeV/c)} < 3$ относительно $(p+p) \cdot N_{\text{coll}}$

❖ ALICE:

- ✓ Избыточный выход прямых фотонов относительно NLO pQCD

❖ Объясняется тепловым излучением из образовавшейся среды → возможность оценить температуру образующейся среды

γ_{dir} : Au+Au @ 200 ГэВ & Pb+Pb @ 2.76 TeV

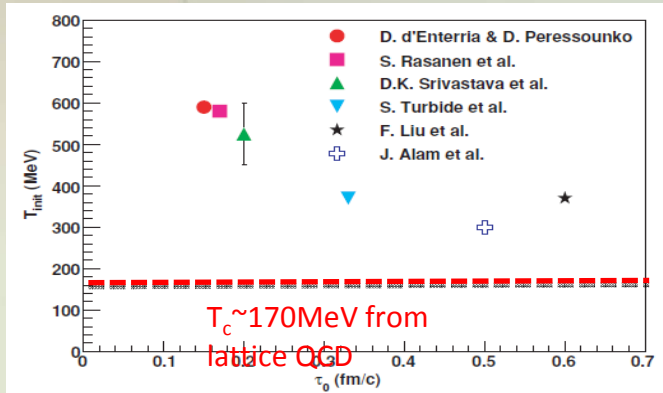


❖ Экспонента:

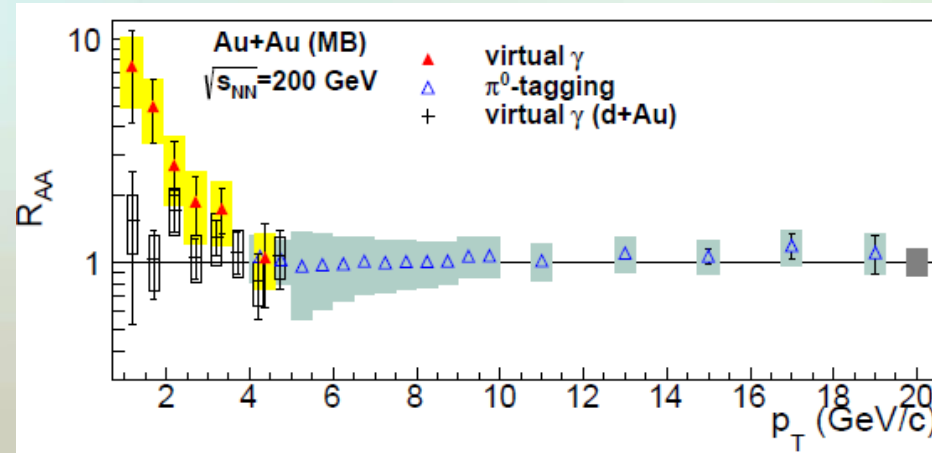
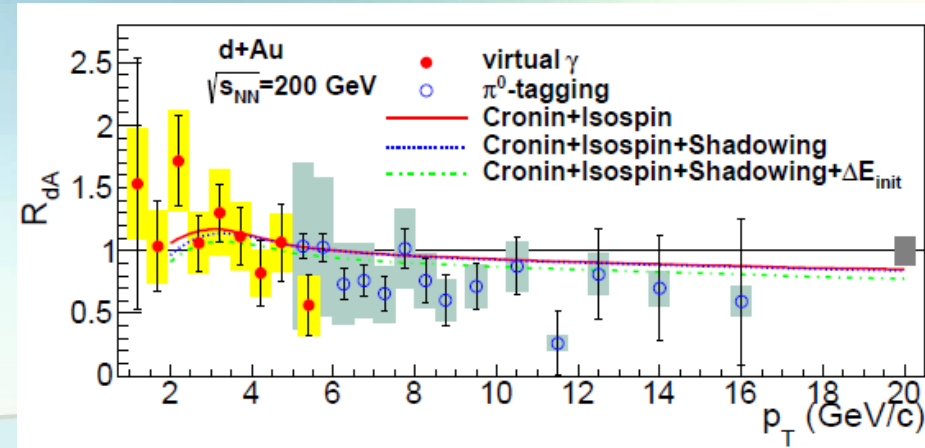
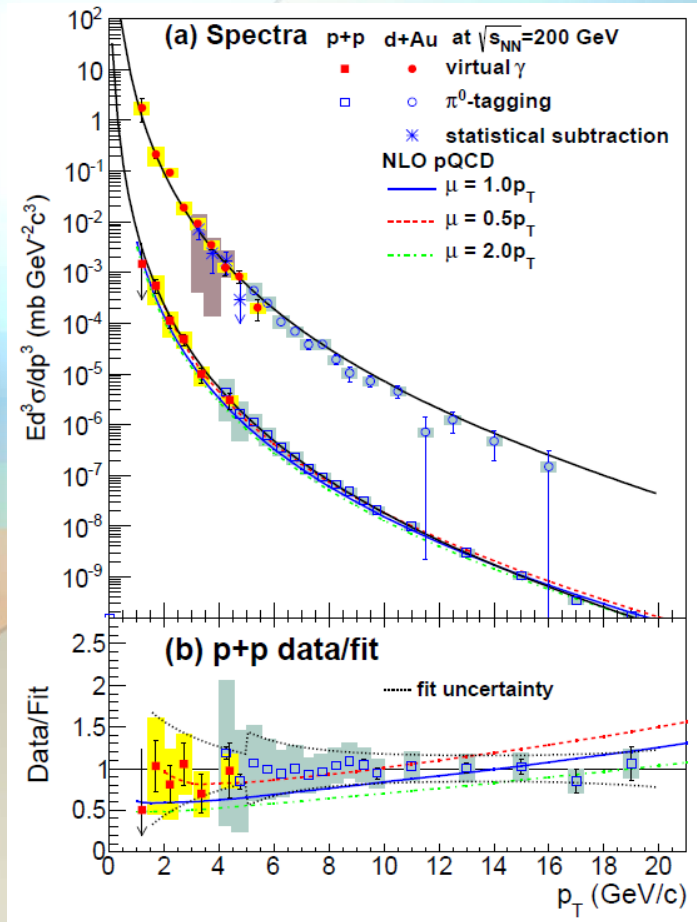
- ✓ $T_{ALICE} = 304 \pm 51$ МэВ (0-40%)
- ✓ $T_{PHENIX} = 221 + 27$ MeV (0-20%)

❖ PHENIX:

- ✓ $T \sim 300-600$ МэВ $\gg T_c$

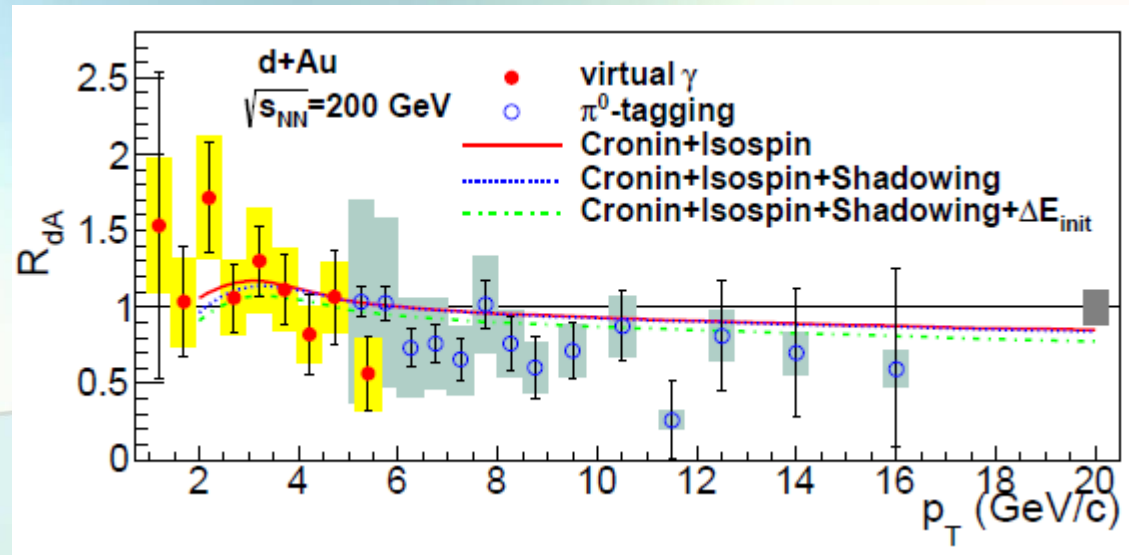
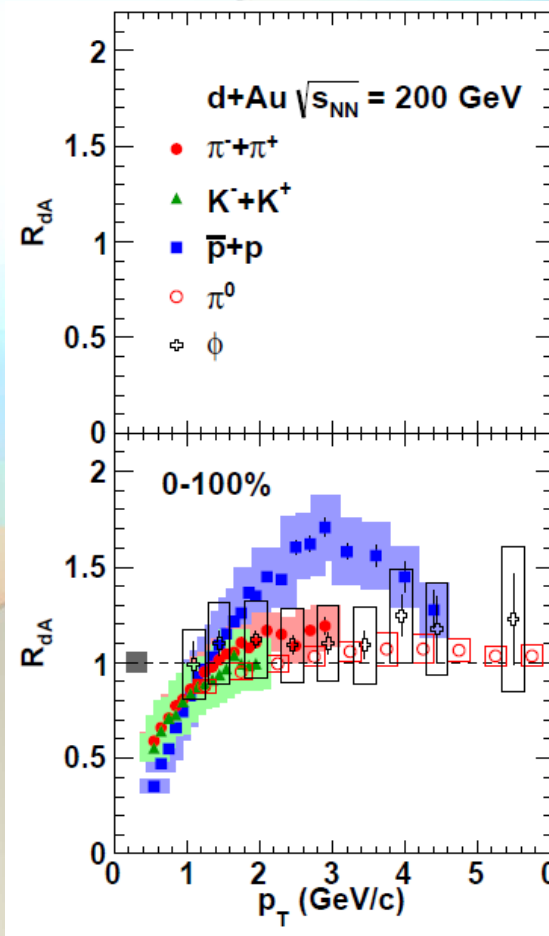


γ_{dir} : d+Au @ 200 ГэВ



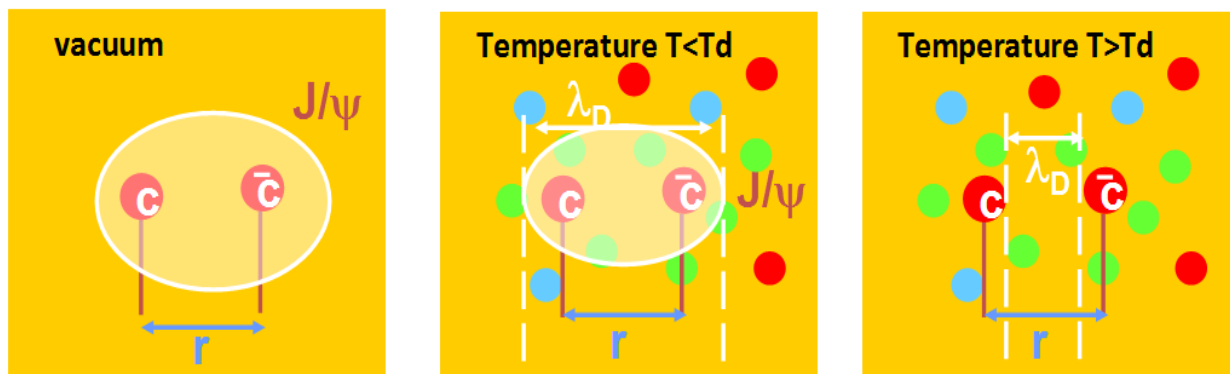
- ❖ Умеренное влияние CNM эффектов на выход прямых фотонов в d+Au
- ❖ R_{AA} увеличивается x7 при уменьшении $p_T \rightarrow$ не может быть объяснено CNM эффектами

Cronin: initial m.s. or recombination?



- ❖ Рекомбинация партонів (R. Hwa, Eur.Phys.J.C43:233(2005))
 → меньший эффект для фотонов по сравнению с пионами
- ❖ В пределах ошибок измерений эффект одинаков

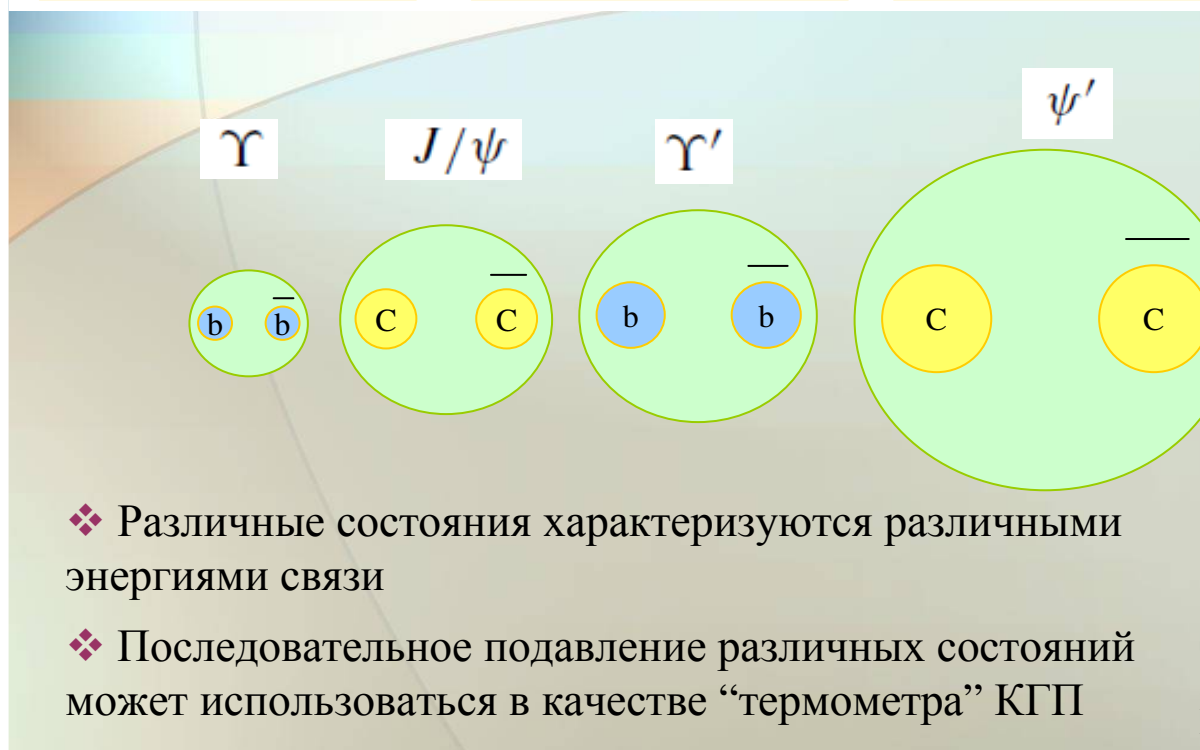
Кварконий - пробник КГП



Matsui & Satz, PLB 178, 416(1986)

$$\lambda_D(T) = \sqrt{\frac{2}{9\pi\alpha_{\text{eff}}}} \frac{1}{T}$$

T $1/\langle r \rangle$



- ❖ Различные состояния характеризуются различными энергиями связи
- ❖ Последовательное подавление различных состояний может использоваться в качестве “термометра” КГП

450 MeV

$\Upsilon(1S)$

χ_b

240 MeV

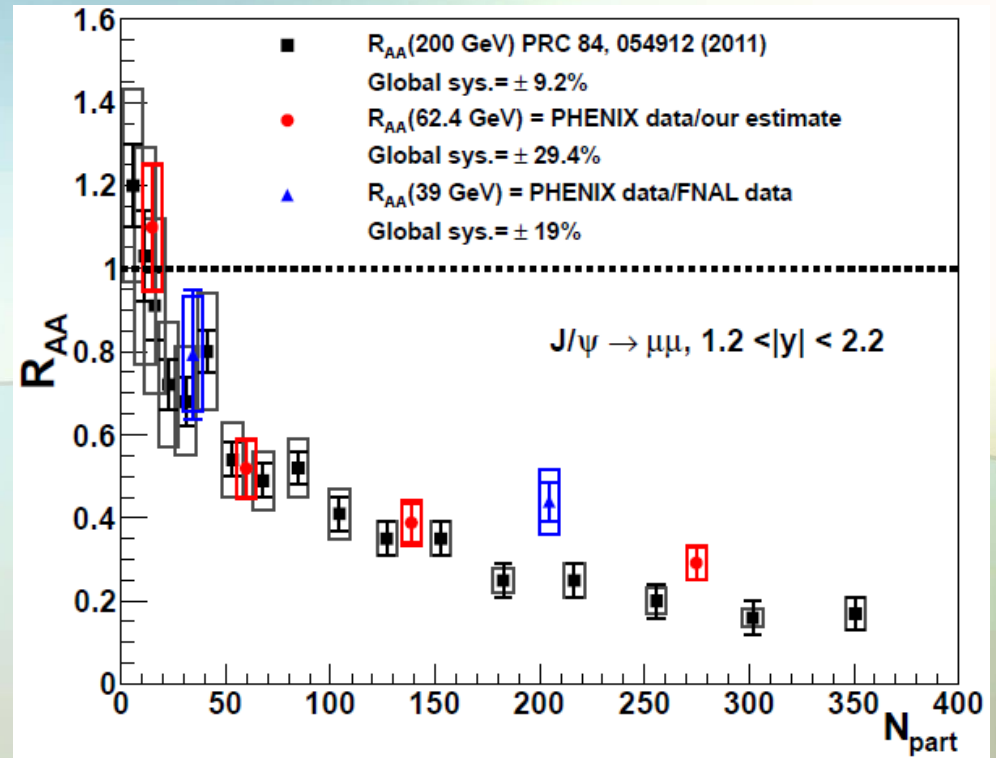
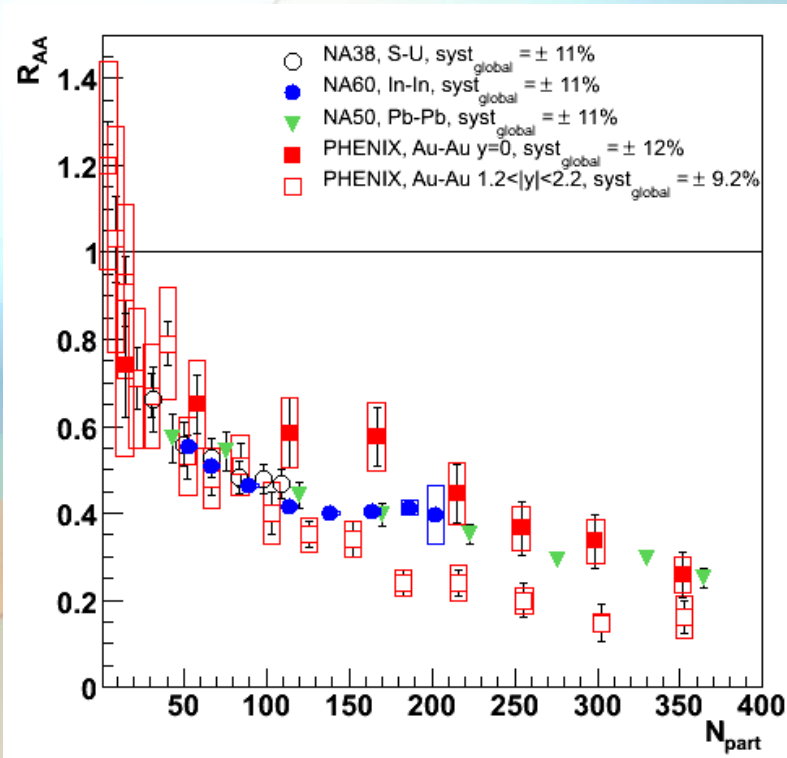
$J/\psi, \Upsilon(2S)$

200 MeV

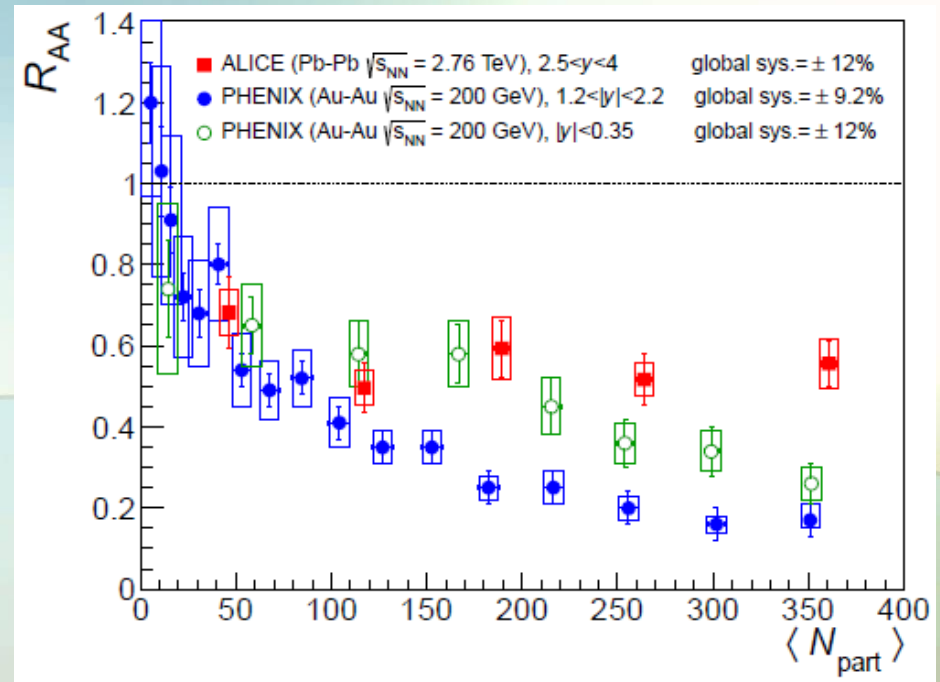
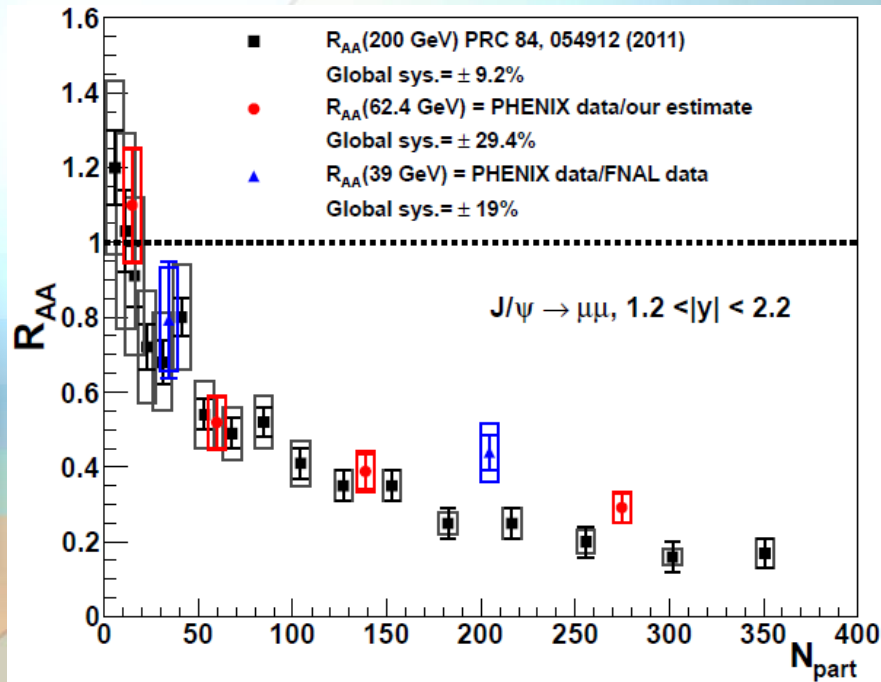
$\chi_c, \chi'_b, \phi', \Upsilon(3S)$

Mocsy & Petreczky, PRL. 99, 211602 (2007)

J/Ψ: Au+Au, $\sqrt{s_{NN}} = 39-200 \text{ GeV}$



J/Ψ: Au+Au/Pb+Pb, $\sqrt{s_{NN}} = 39-2760$ ГэВ

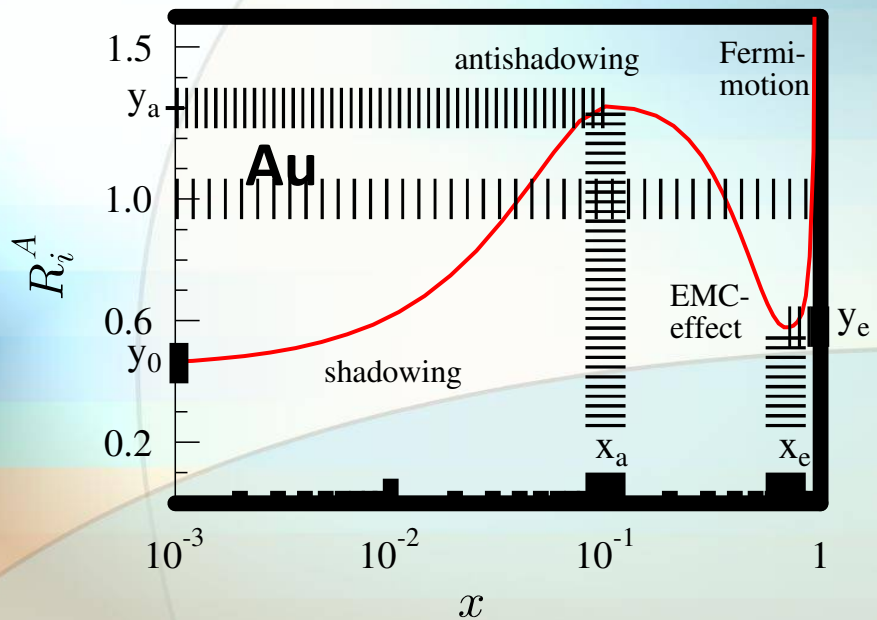


❖ Нет прямой зависимости между энергией взаимодействия тяжелых ядер и степенью подавления чармония

❖ Необходимо учитывать дополнительные эффекты:

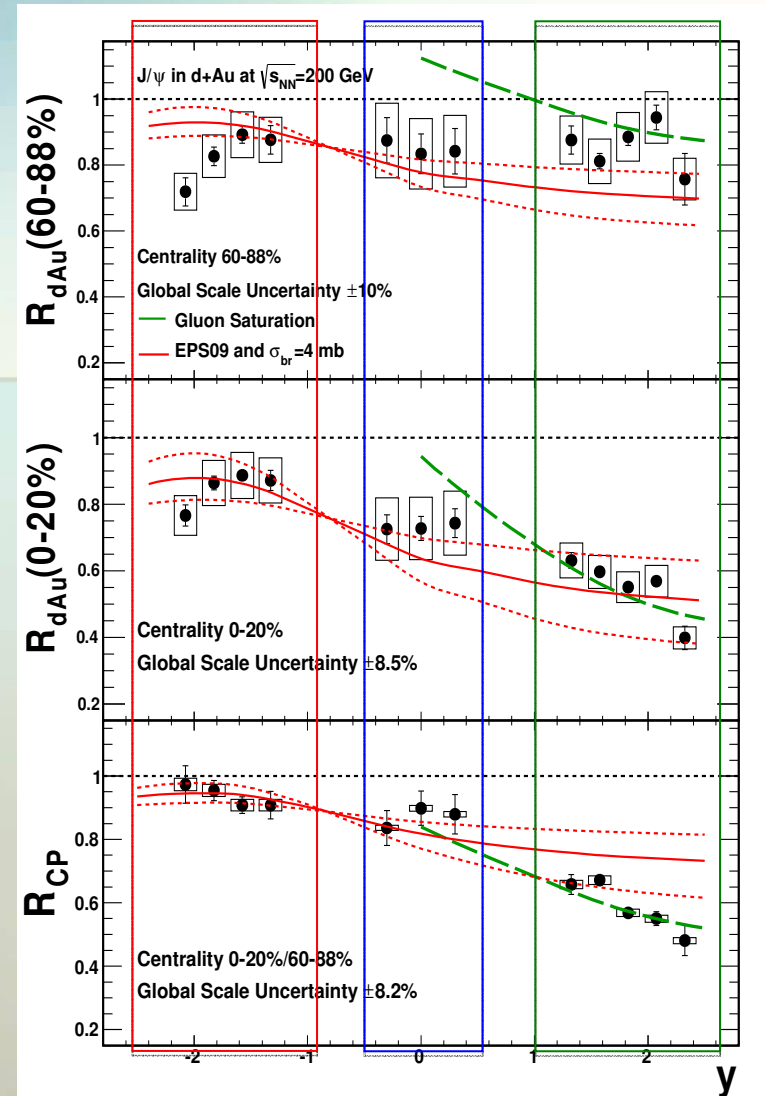
- ✓ регенерация
- ✓ CGC, nPDF
- ✓ $\sigma_{\text{break-up}}$
- ✓ E_{loss}
- ✓ Cronin

J/Ψ, распределение по скорости: d+Au @ 200 ГэВ

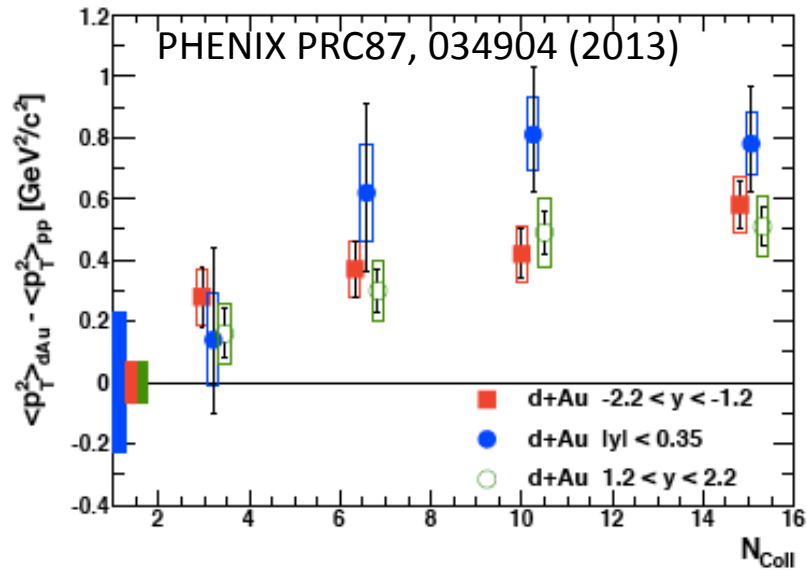


$y > 0$ $y < 0$
 d-going $y \sim 0$ Au-going
 $0.002 < x < 0.013$ $0.01 < x < 0.07$ $0.05 < x < 0.4$
 $10 < Q^2[\text{GeV}^2/c^2] < 74$

❖ Данные позволяют охватить большой диапазон по x и Q^2

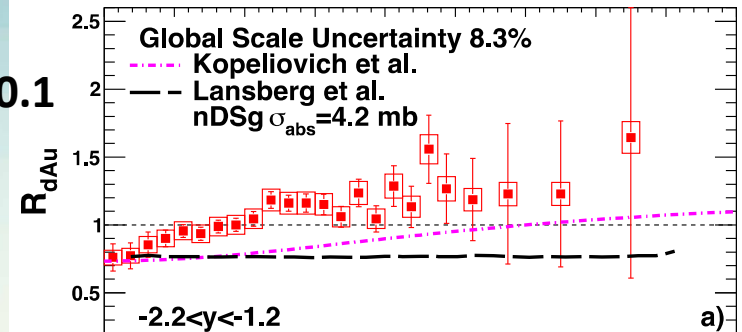


Ψ, распределение по p_T: d+Au @ 200 ГэВ

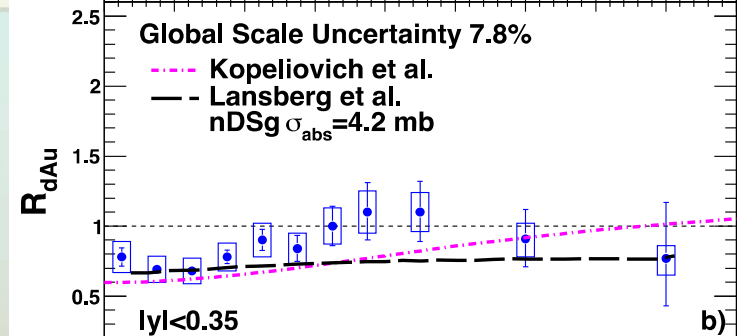


- ❖ $\langle p_T^2 \rangle$ возрастает при увеличении центральности столкновений и достигает максимума при $y \sim 0$
- ❖ $R_{dA} < 1$ при $p_T < 2$ ГэВ/с
- ❖ $R_{dA} \sim 1$ при $p_T > 4$ ГэВ/с и $y \geq 0$
- ❖ $R_{dA} \sim 1.27 \pm 0.13$ при $p_T > 4$ ГэВ/с и $y < 0$

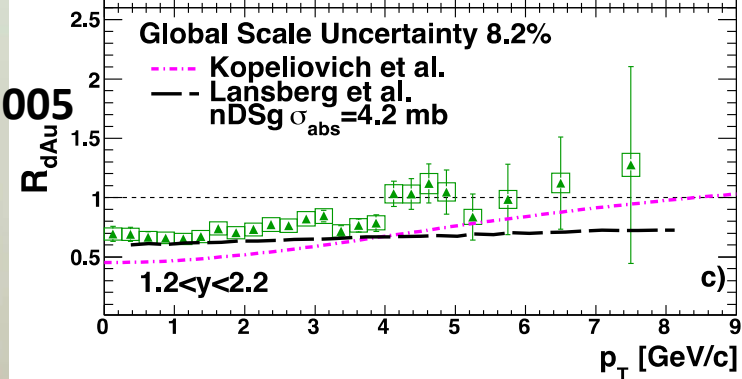
$X \sim 0.1$



a)



b)

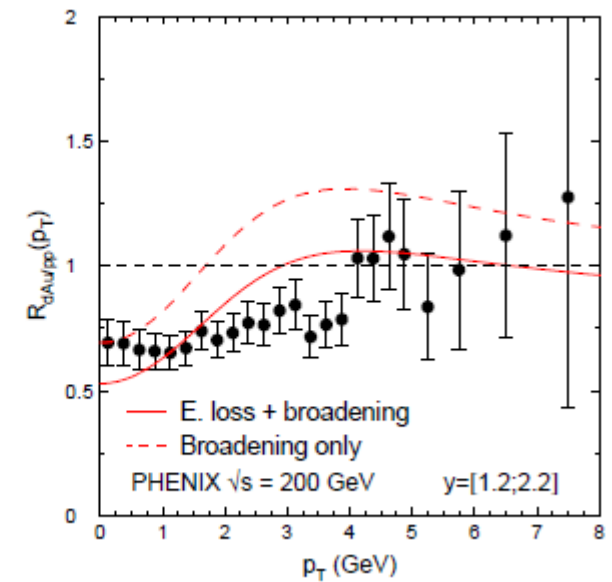
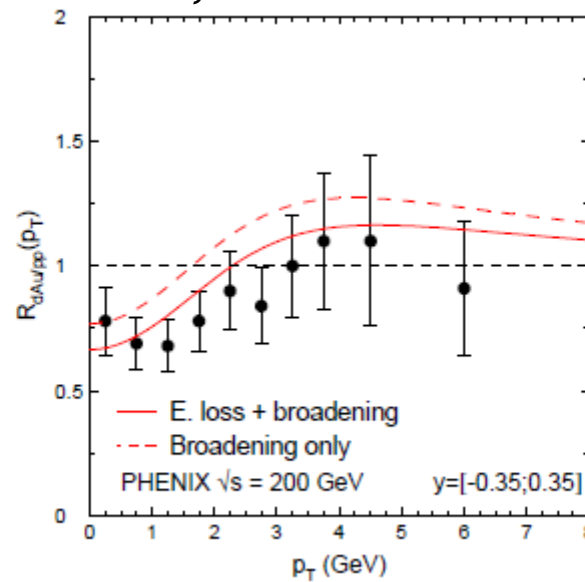
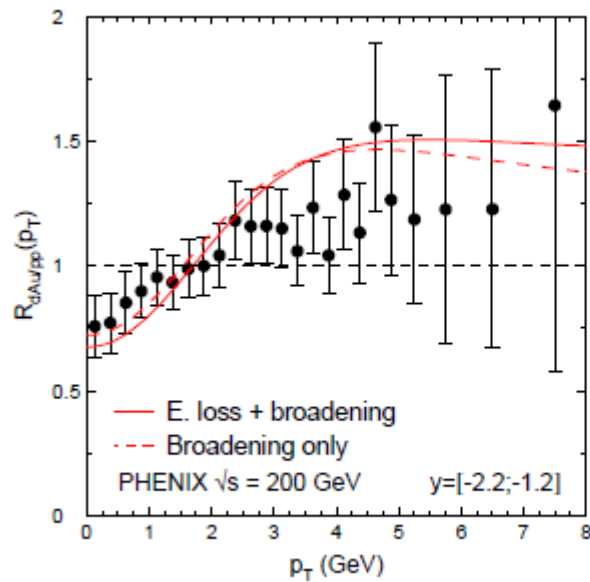


c)

$X \sim 0.005$

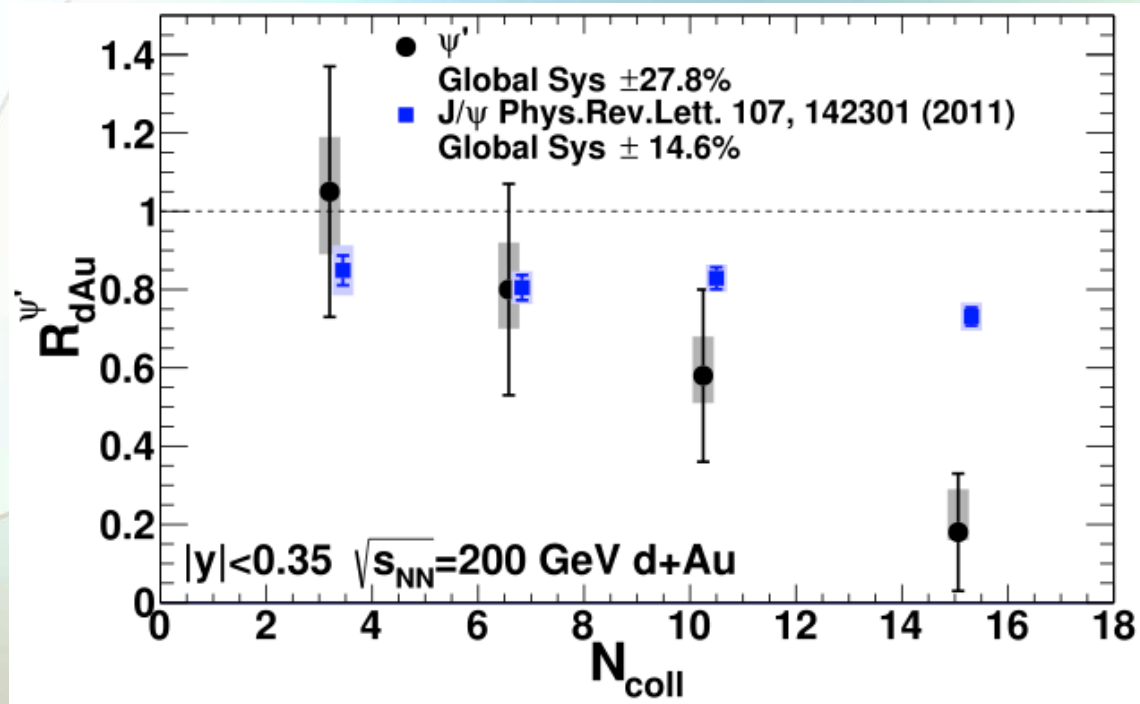
J/Ψ, распределение по p_T : d+Au @ 200 ГэВ

F.Arleo et al., arXiv:1304.0901v1



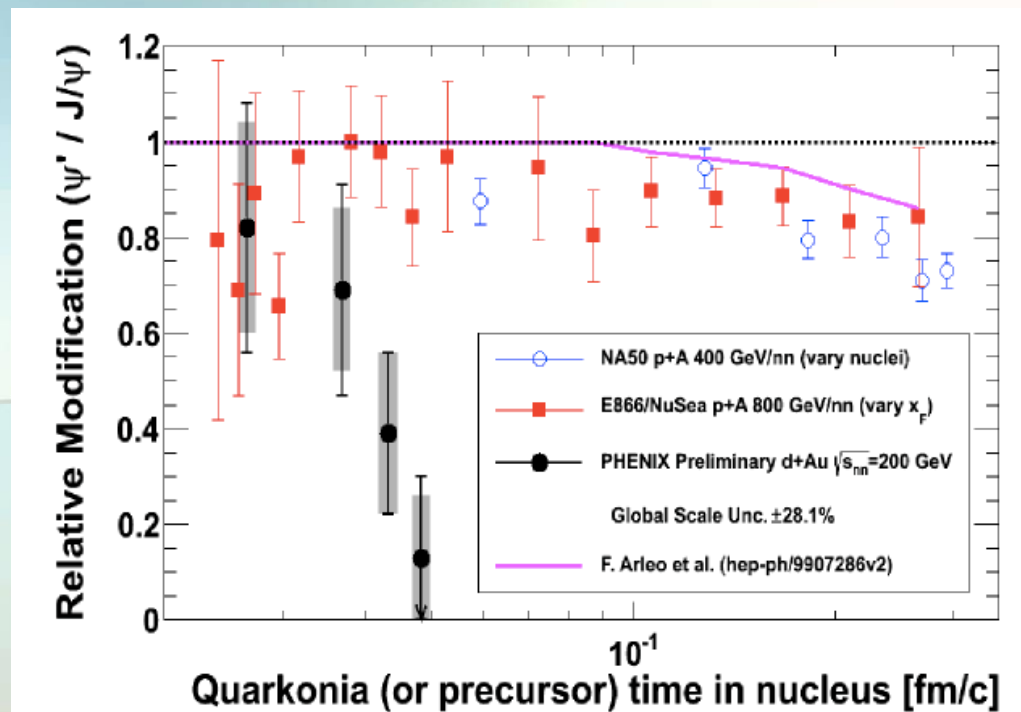
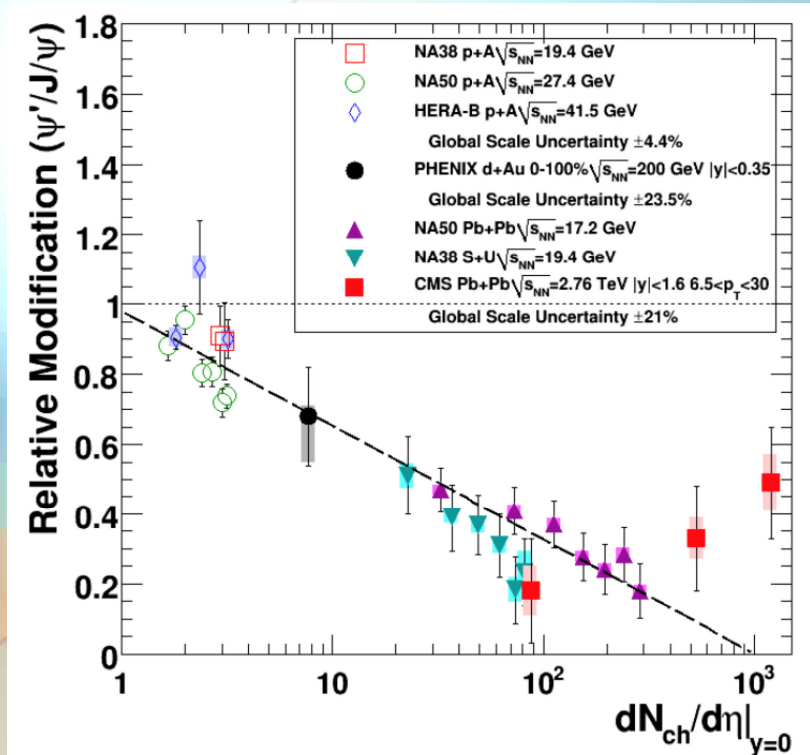
- ❖ Учитываются многократные мягкие перерассеяния и энергетические потери в начальном состоянии
→ согласие с экспериментом

Ψ' , R_{dAu} : d+Au @ 200 ГэВ



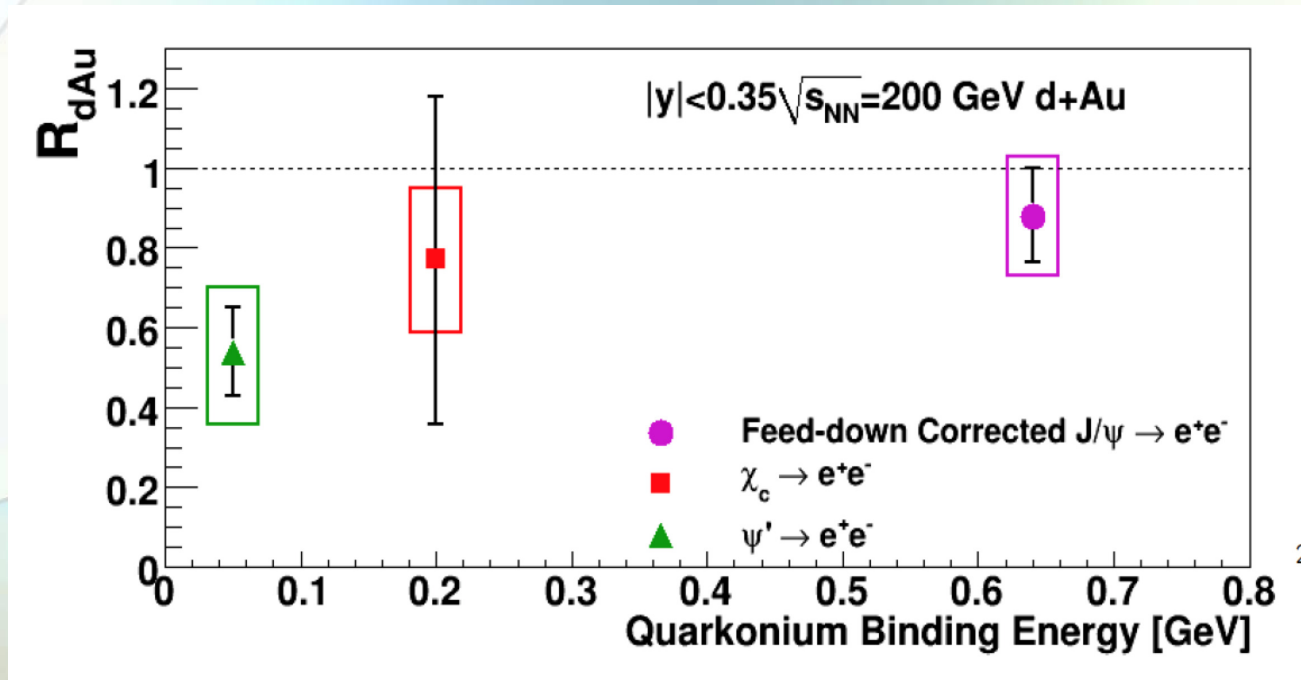
❖ Выход Ψ' подавлен в ~ 3 раза сильнее в центральных столкновениях

Ψ' : d+Au @ 200 ГэВ



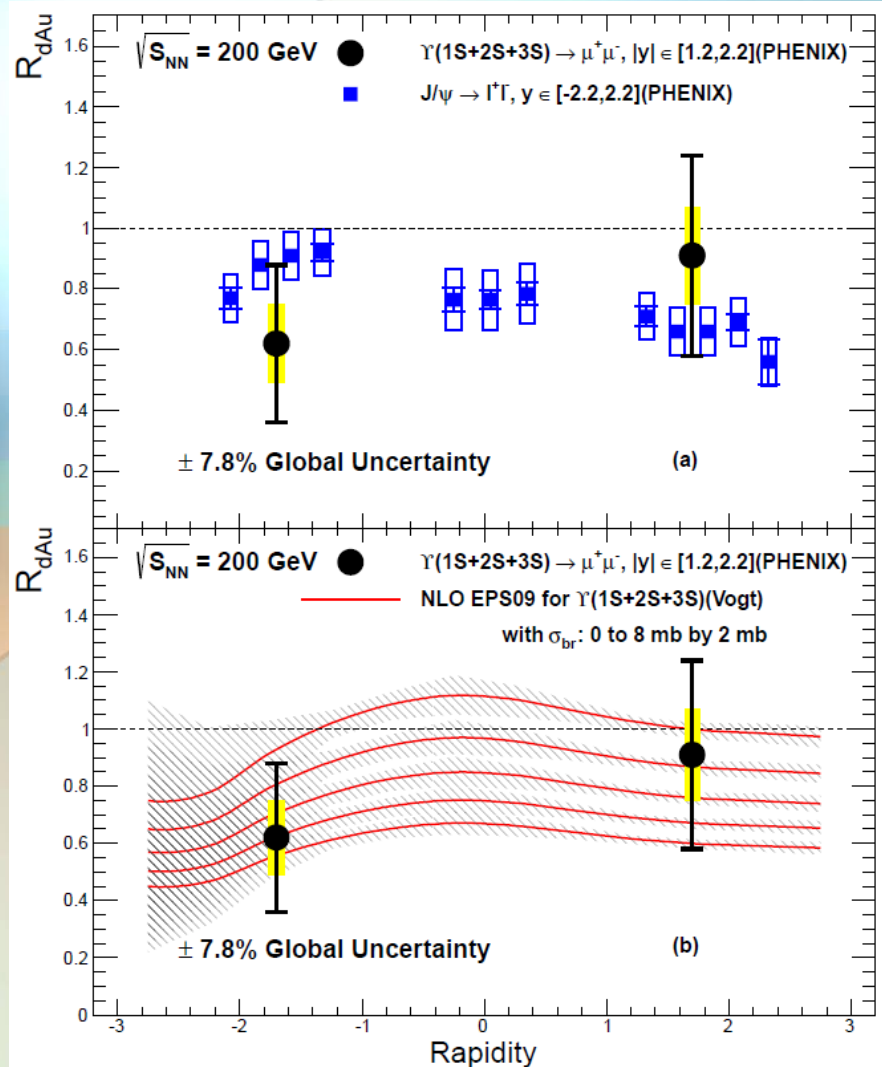
- ❖ Относительный выход $\Psi'/J/\Psi$ линейно зависит от множественности ($y=0$) и не зависит от энергии взаимодействия. PHENIX следует общей тенденции
- ❖ $\Psi'/J/\Psi \sim 1$ если время формирования $>$ времени нахождения в ядре
 \rightarrow теоретическая кривая хорошо согласуется с данными при более низких энергиях.
 Данные PHENIX не следуют общей тенденции

Ψ' , χ_c , J/Psi: d+Au @ 200 ГэВ



❖ R_{dA} чармония зависит от энергии связи

Y(1S+2S+3S): d+Au @ 200 ГэВ



❖ IQCD расчеты предсказывают различную энергию связи для $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$ и $\Upsilon(3S)$

❖ CMS, Pb+Pb @ 2.76 ТэВ
($p_T^\mu > 4$ ГэВ/с, $|\eta| < 2.4$):

$$\frac{\Upsilon(2S+3S)/\Upsilon(1S)|_{Pb+Pb}}{\Upsilon(2S+3S)/\Upsilon(1S)|_{p+p}} = 0.31_{-0.16}^{+0.19}(\text{stat}) \pm 0.03(\text{syst})$$

$$R_{PbPb}(\Upsilon(1S)) \sim 0.6$$

❖ E772, p+A @ 38.8 ГэВ:

✓ $\Upsilon(1S)$ и $\Upsilon(2S+3S)$

✓ Сравнимое подавление для всех состояний

Заключение

Измерения в $p(d)+A$ абсолютно необходимы для интерпретации и численного описания эффектов, связанных с образованием плотной и горячей среды в $A+A$

→ программа будет продолжена ($p+Au$, $p+Cu$, $p+Si$ @ 200 ГэВ)