

Изучение кварк-глюонной материи в соударениях ядер высоких энергий

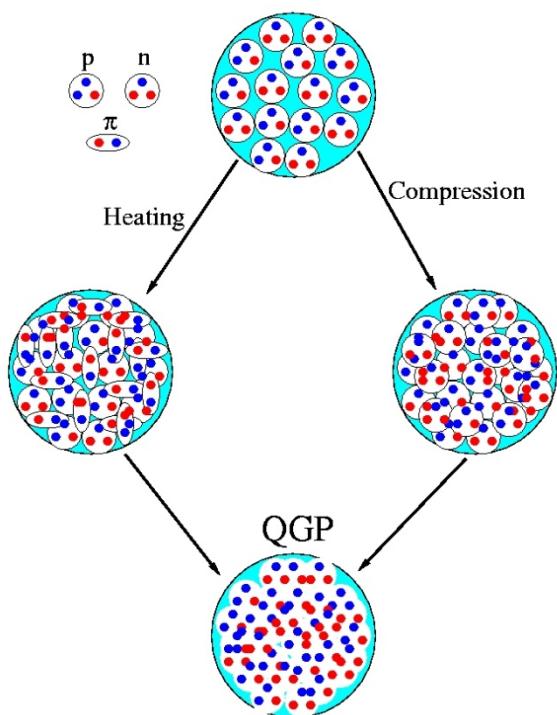
Семинар по ядерной физике НИИЯФ МГУ, 8 ноября 2011

И.П. Лохтин, Л.И. Сарычева

1. Условия реализации деконфайнмента адронной (ядерной) материи в квантовой хромодинамике.
2. Признаки формирования кварк-глюонной плазмы в релятивистских соударениях тяжелых ионов.
3. Диагностика формирования кварк-глюонной материи на коллайдере RHIC.
4. Диагностика формирования кварк-глюонной материи на коллайдере LHC.

Деконфайнмент

- Что, если мы сожмем или нагреем среду так, что адроны начнут перекрываться?

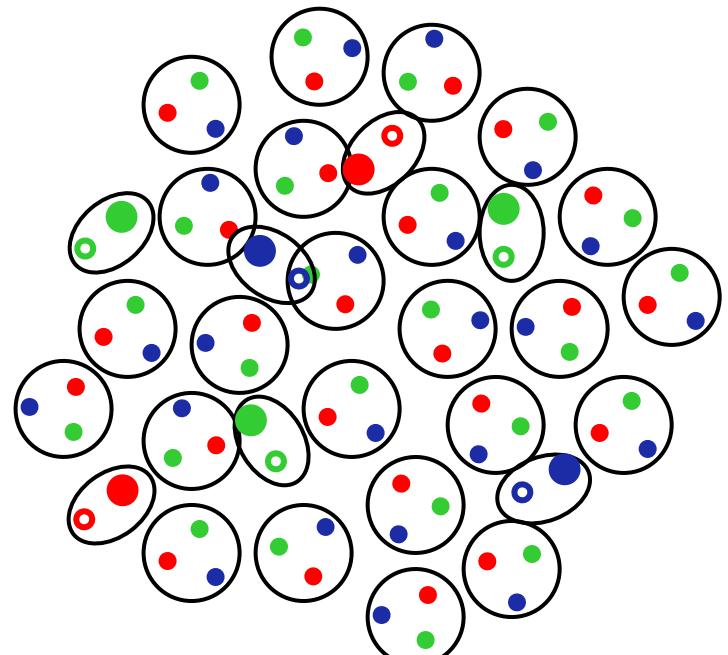
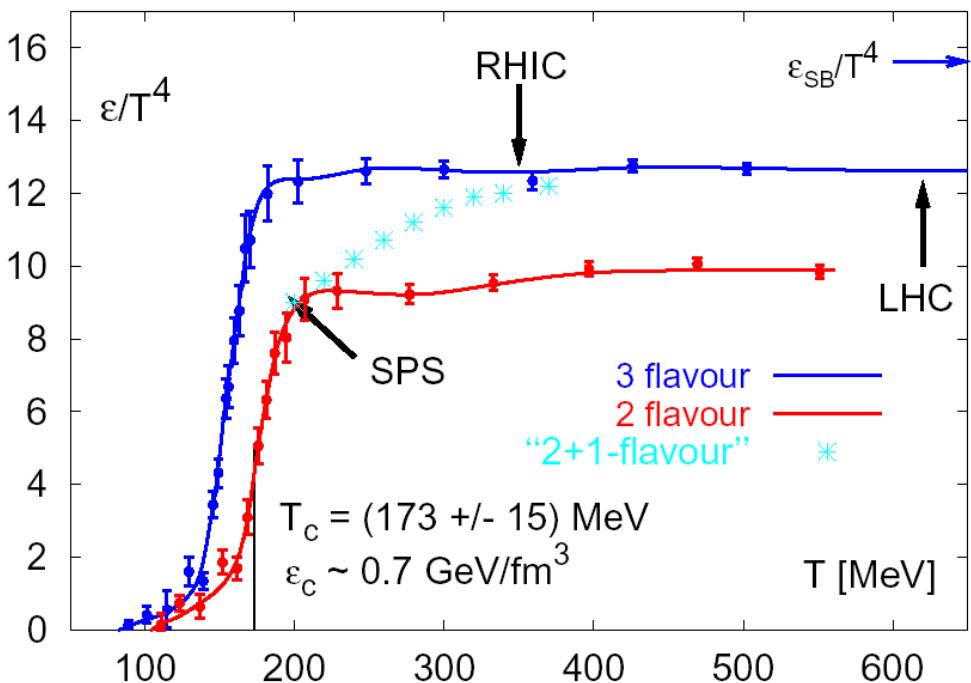


Расчеты КХД на решетках предсказывают, что если система адронов достигнет высокой плотности и/или температуры, то произойдет фазовый переход в состояние деконфайнента.

В новой фазе, называемой [кварк-глюонной плазмой](#) (КГП), кварки и глюоны больше не удерживаются внутри индивидуальных адронов, они начинают свободно передвигаться внутри большого

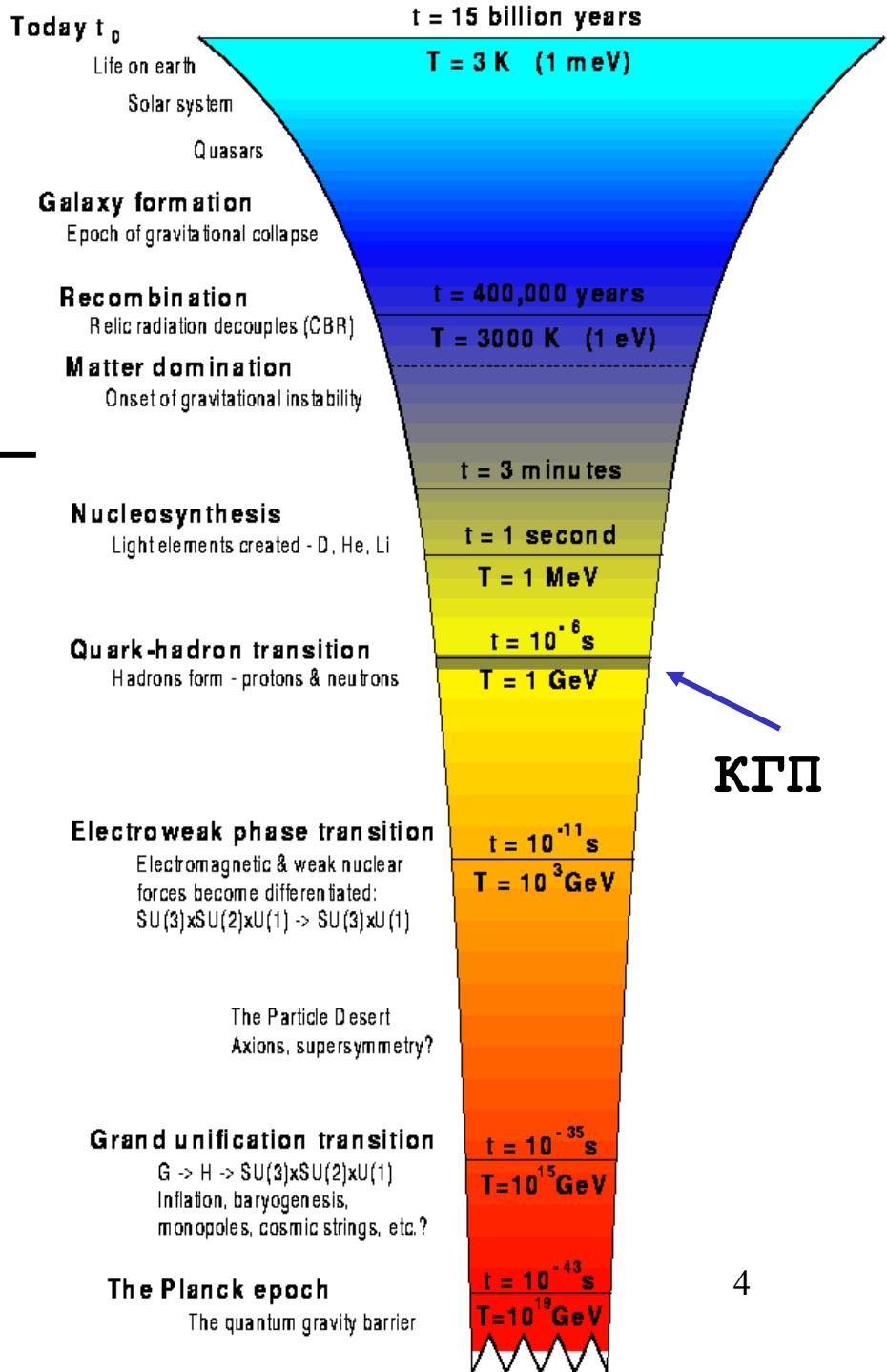
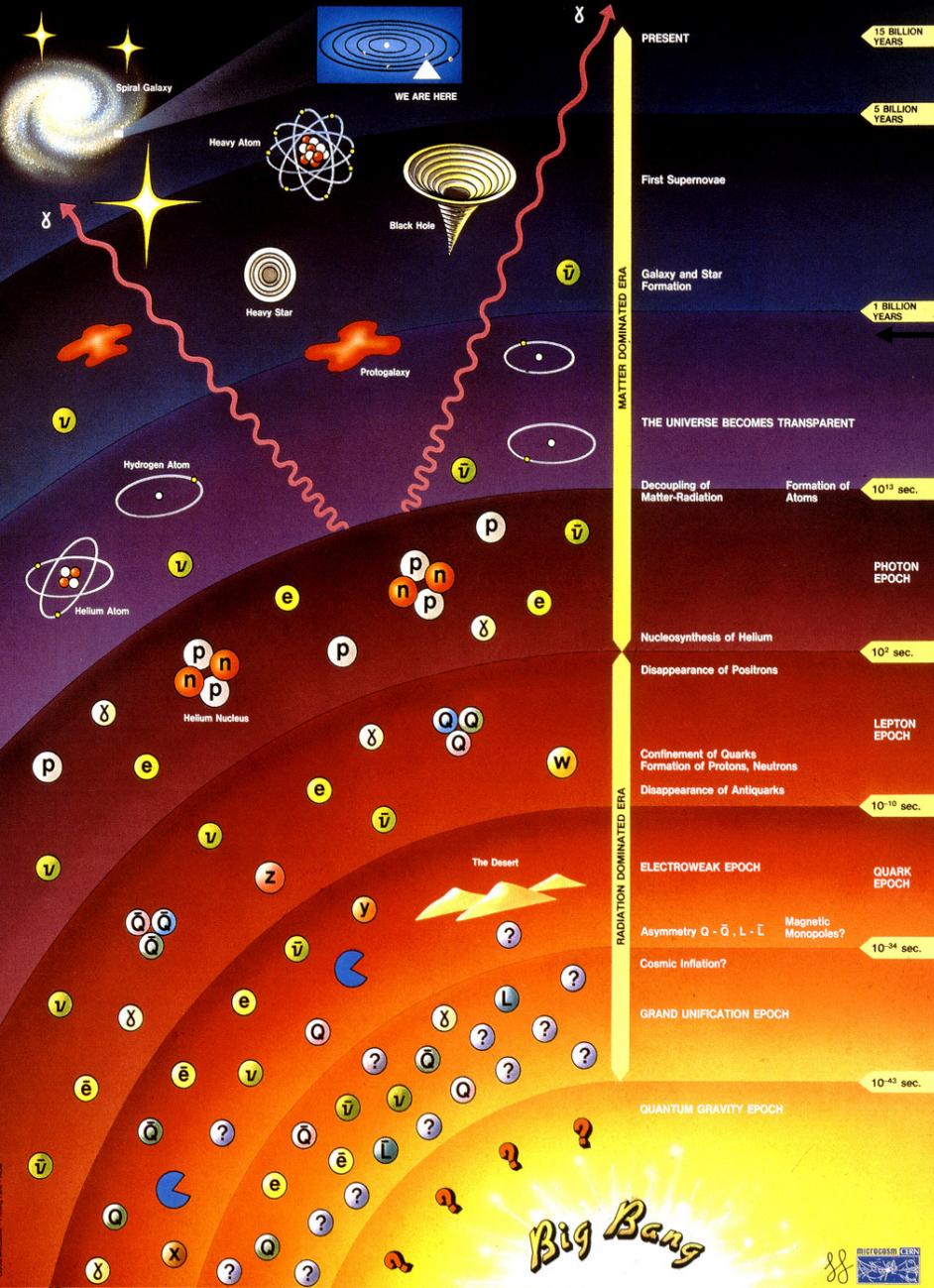
Иллюстрация достижения деконфайнмента

- нагревание
- сжатие

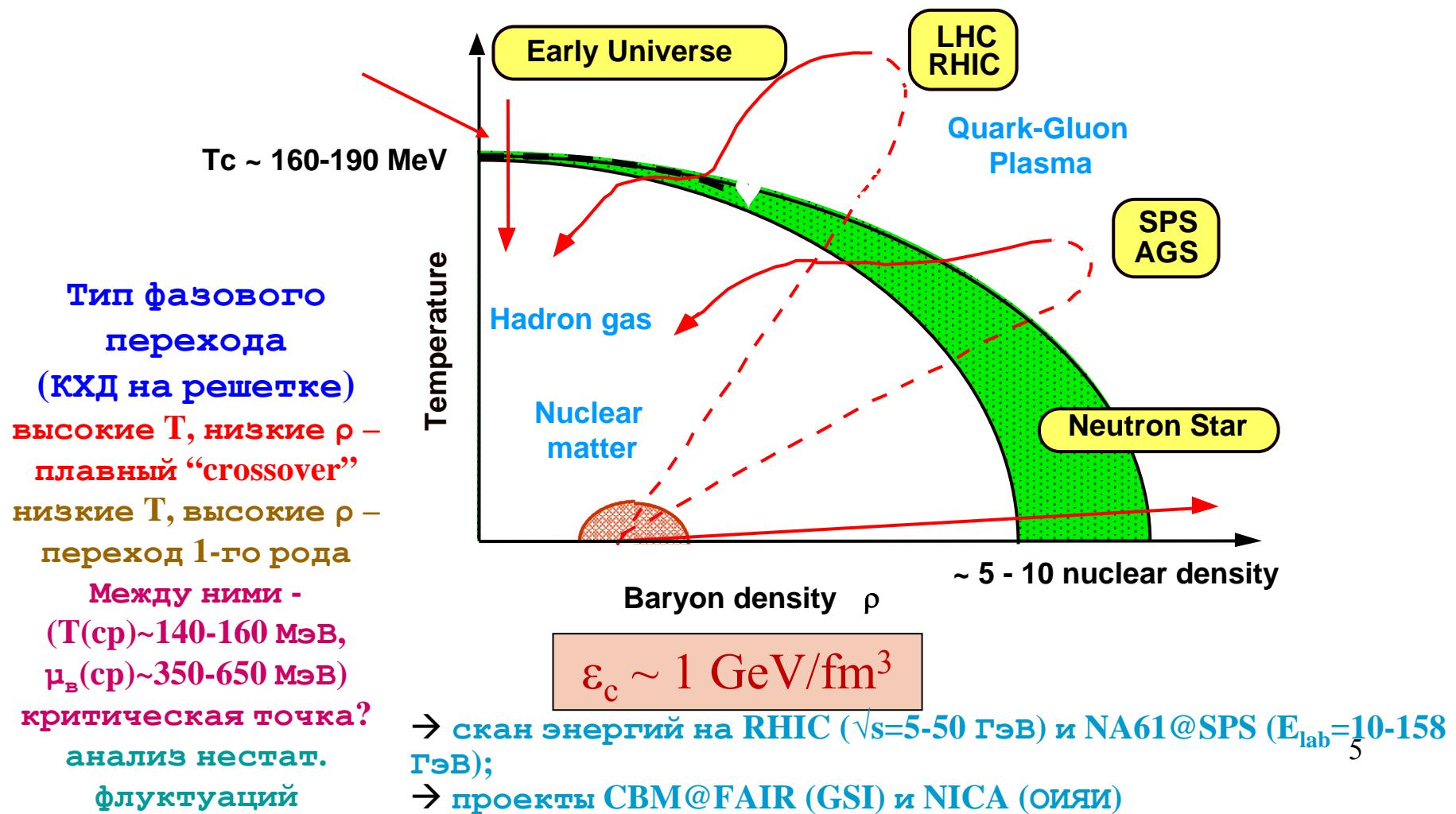


Адронная материя
Квирк-глюонная плазма
(конфайнмент)
(деконфайнмент) !

History of the Universe

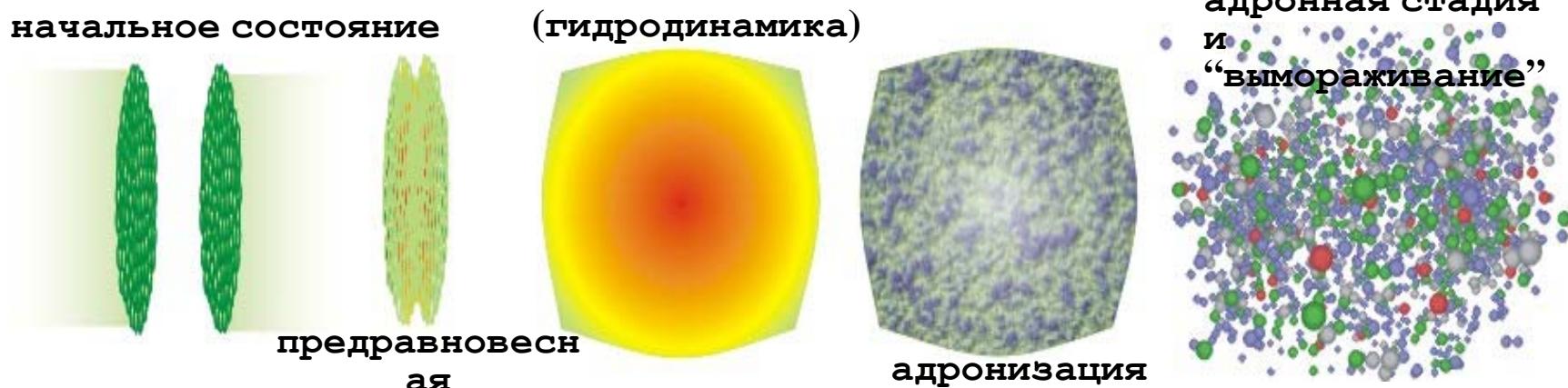


Фазовая диаграмма КХД



Поиск и изучение свойств КГП в релятивистских соударениях ионов

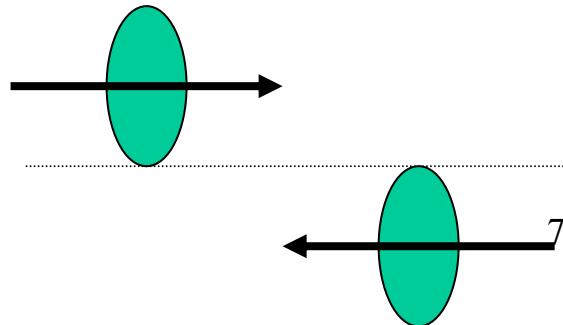
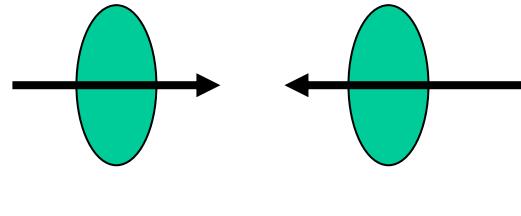
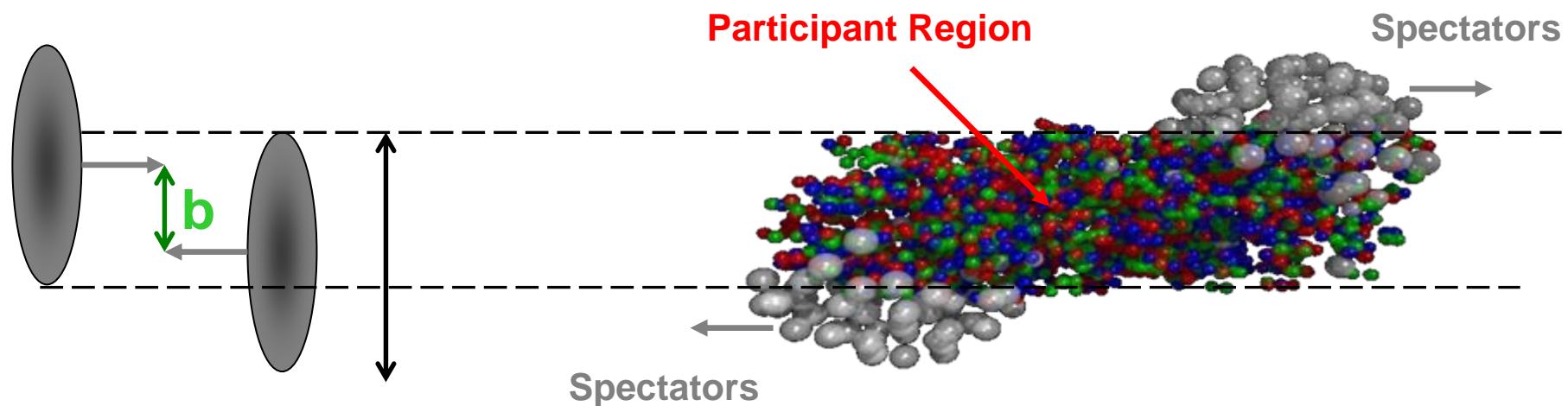
В релятивистских соударениях тяжелых ионов возможно формирование сверхплотного состояния КХД-материи в квазимакроскопических объемах (по сравнению с характерными адронными масштабами).

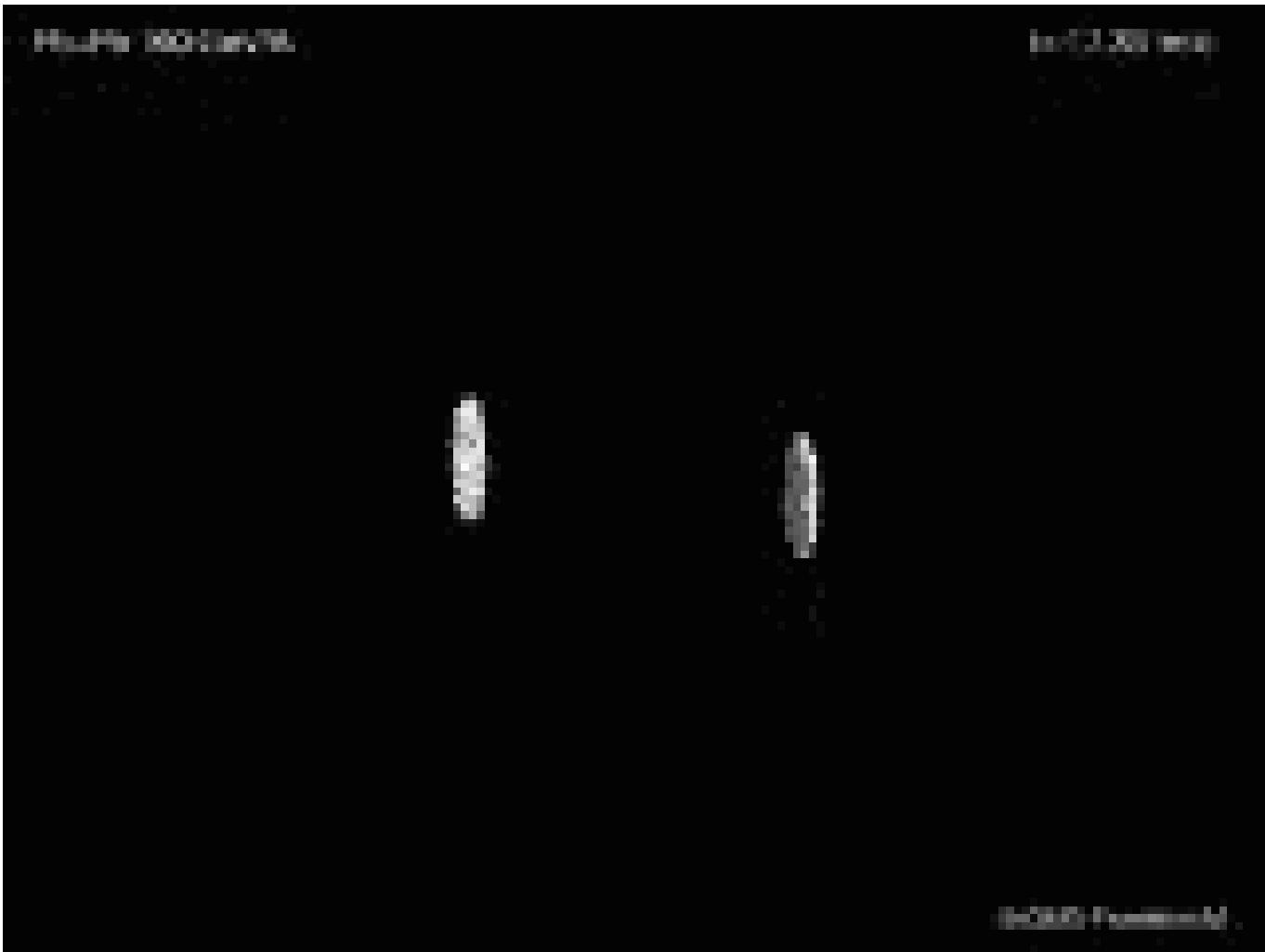


- «Мягкие» тесты ($p_T \sim \Lambda_{\text{QCD}} = 200$ МэВ)
- ✓ спектры частиц с малыми поперечными импульсами p_T и их импульсные корреляции;
 - ✓ потоковые эффекты;
 - ✓ тепловые фотоны и дилептоны;
 - ✓ выход странных частиц.

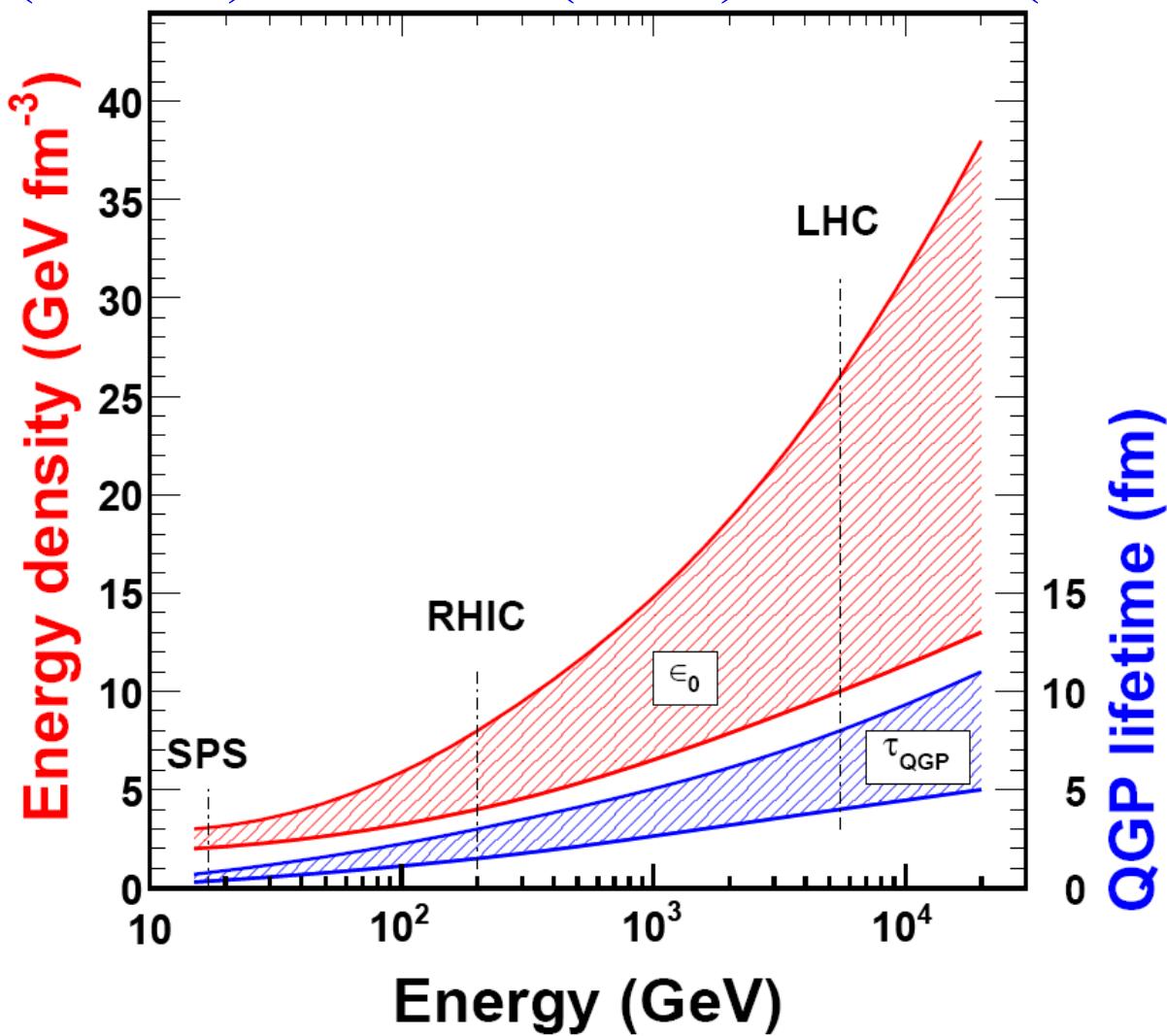
- «Жесткие» тесты ($p_T, M > \Lambda_{\text{QCD}} = 200$ МэВ)
- ✓ спектры частиц с большими поперечными импульсами p_T и их угловые корреляции;
 - ✓ адронные струи;
 - ✓ кварконии;
 - ✓ тяжелые кварки.

Физика столкновений релятивистских ядер





Основные параметры плотной КХД-
материи
в центральных соударениях Pb+Pb/Au+Au
SPS (CERN) → RHIC (BNL) → LHC (CERN)



Коллайдер RHIC

p + p , Au + Au, d + Au and Cu+Cu at $\sqrt{s}=20, 62, 130$ и 200 ГэВ

Установки

STAR, PHENIX, PHOBOS, BRAHMS

(обеспечивают сбор данных с 2000 г.)



RHIC

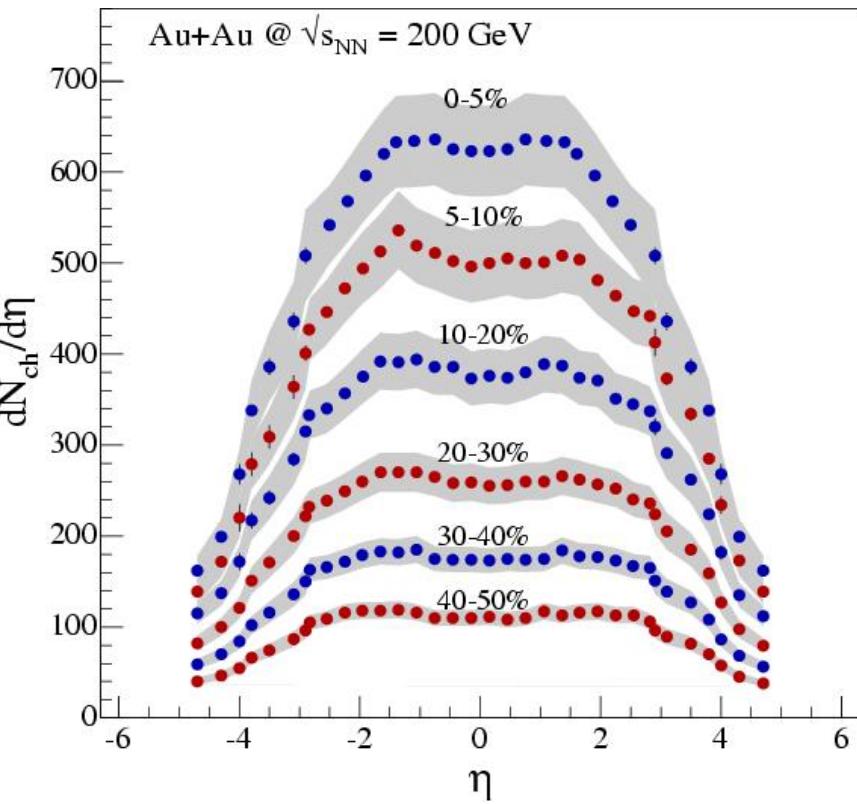


BOOSTER

LINAC

AGS

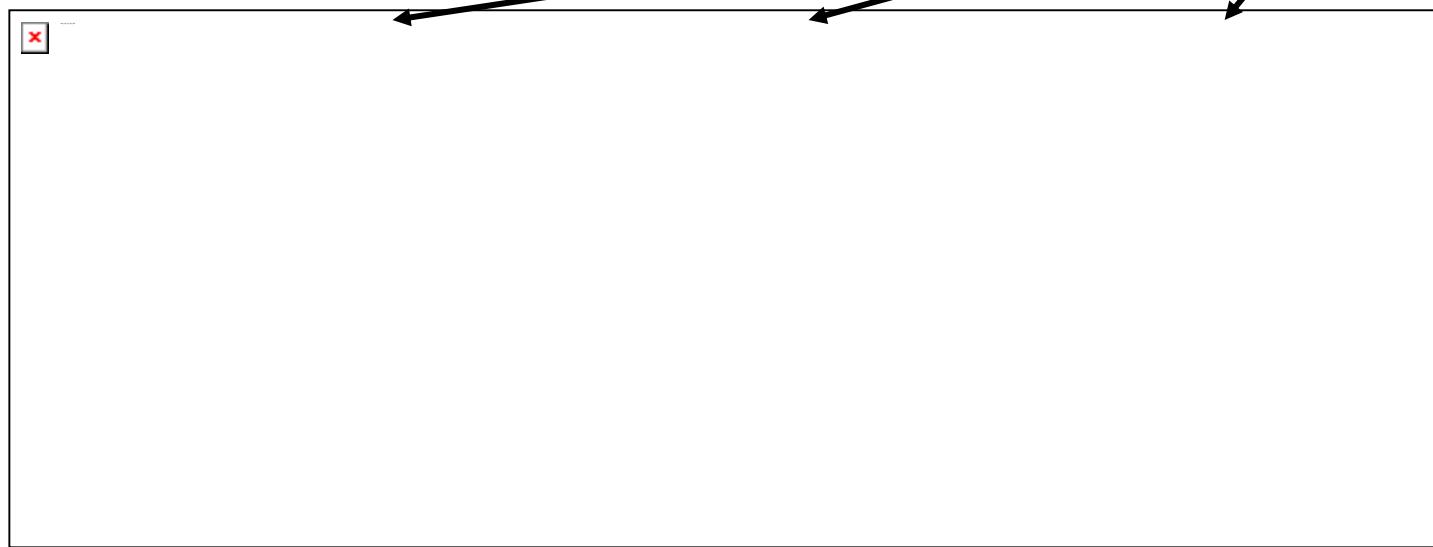
TANDEM



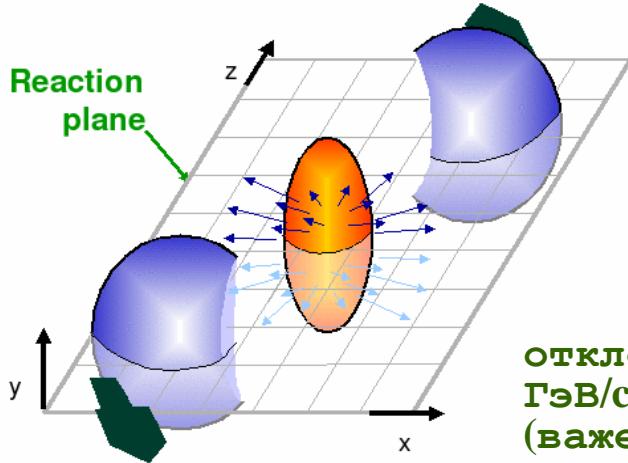
PHOBOS данные для $dN/d\eta$ in Au+Au как функция центральности столкновения и \sqrt{s}

← Распределение плотности по псевдобыстроте η для заряженных частиц при 200 ГэВ.

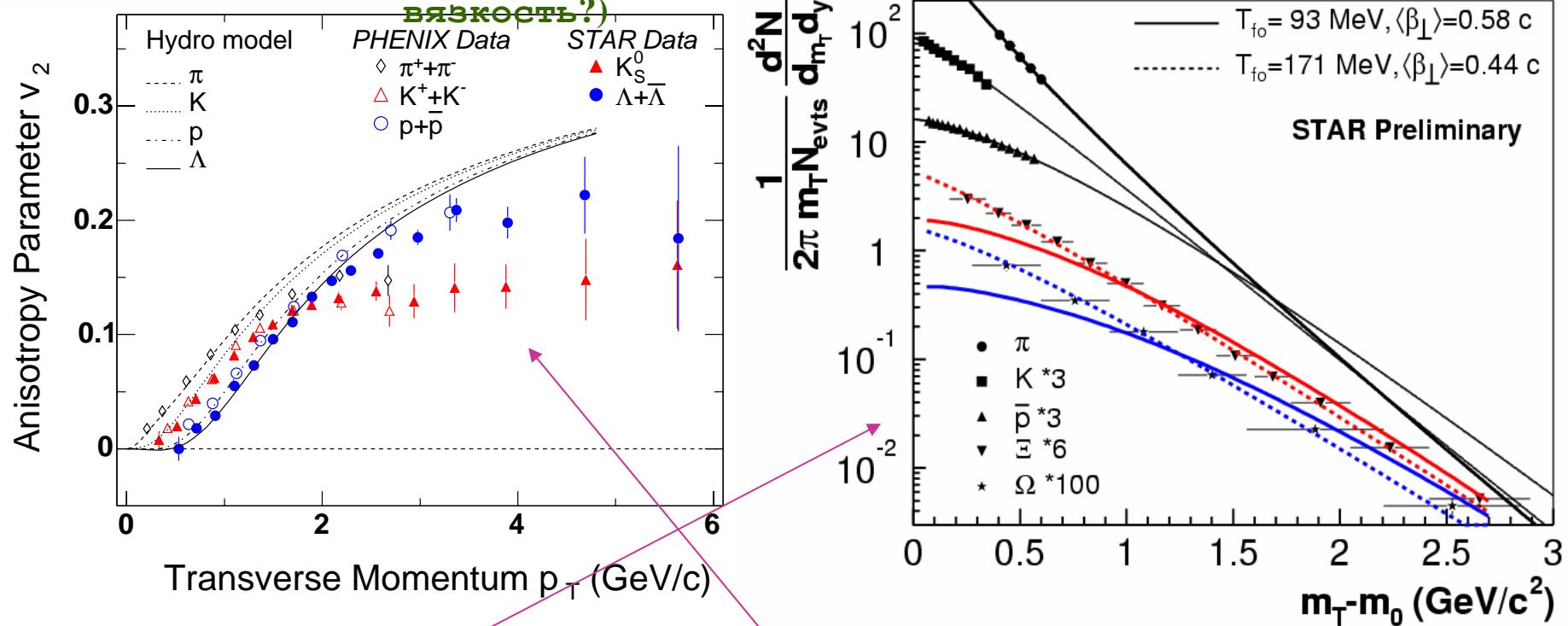
То же для трех значений энергии **20, 130 и 200 ГэВ**



Глобальные наблюдаемые и ядерные коллективные эффекты (идеальная КХД-жидкость на RHIC?)



отклонение от гидродинамического поведения при $p_T > 1.5\text{-}2$
ГэВ/с
(важен вклад от фрагментации струй жестких партонов!
вязкость?)

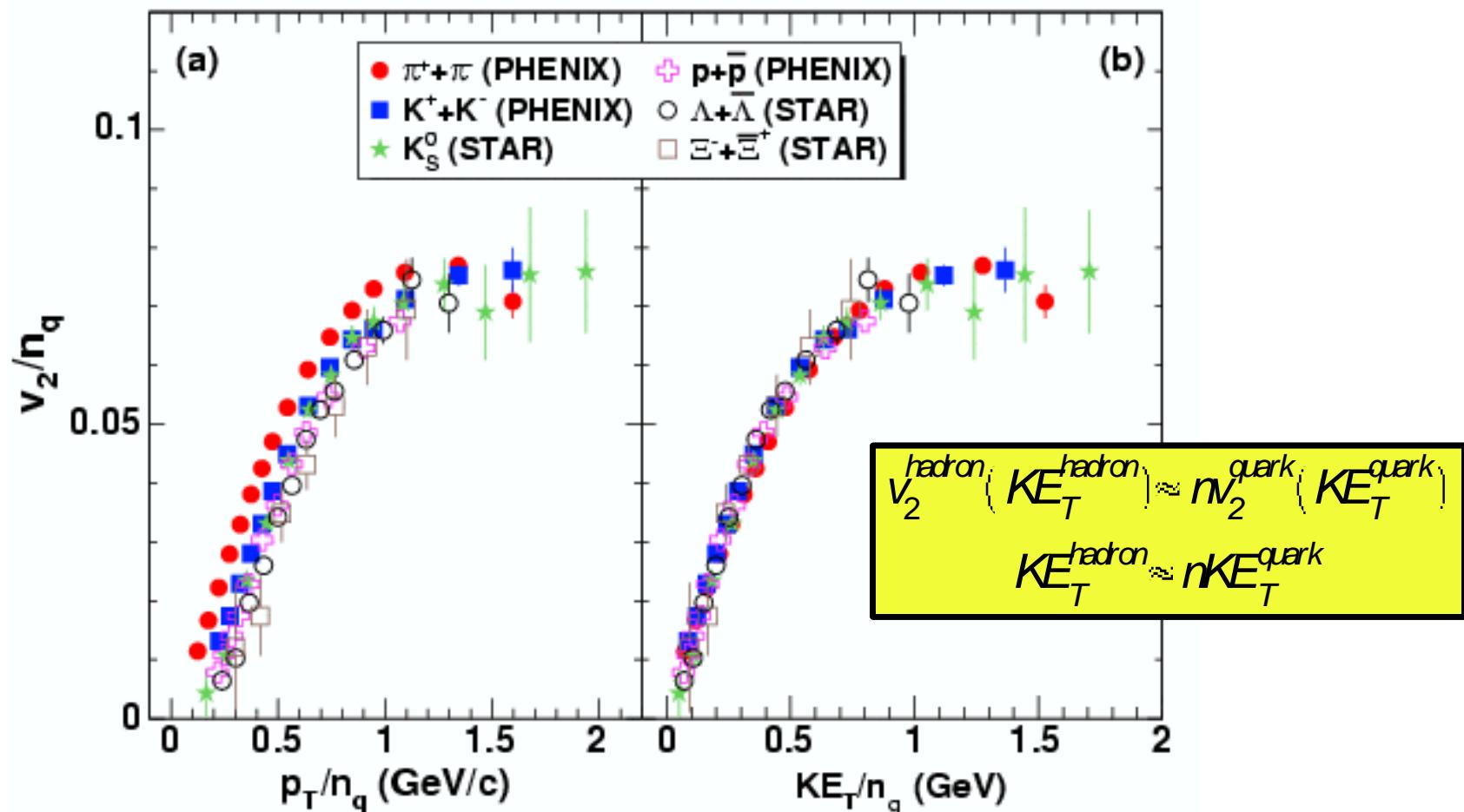


Сильные коллективные потоки: 1) эллиптический (в нецентральных соударениях вследствие трансформации начальной пространственной анизотропии в конечную импульсную);

(коэффициент эллиптического потока $v_2 = \langle \cos(2\phi) \rangle$ частиц относительно угла плоскости реакции)

2) радиальный (вследствие коллективного поперечного расширения) –

Кварковый скейлинг v_2

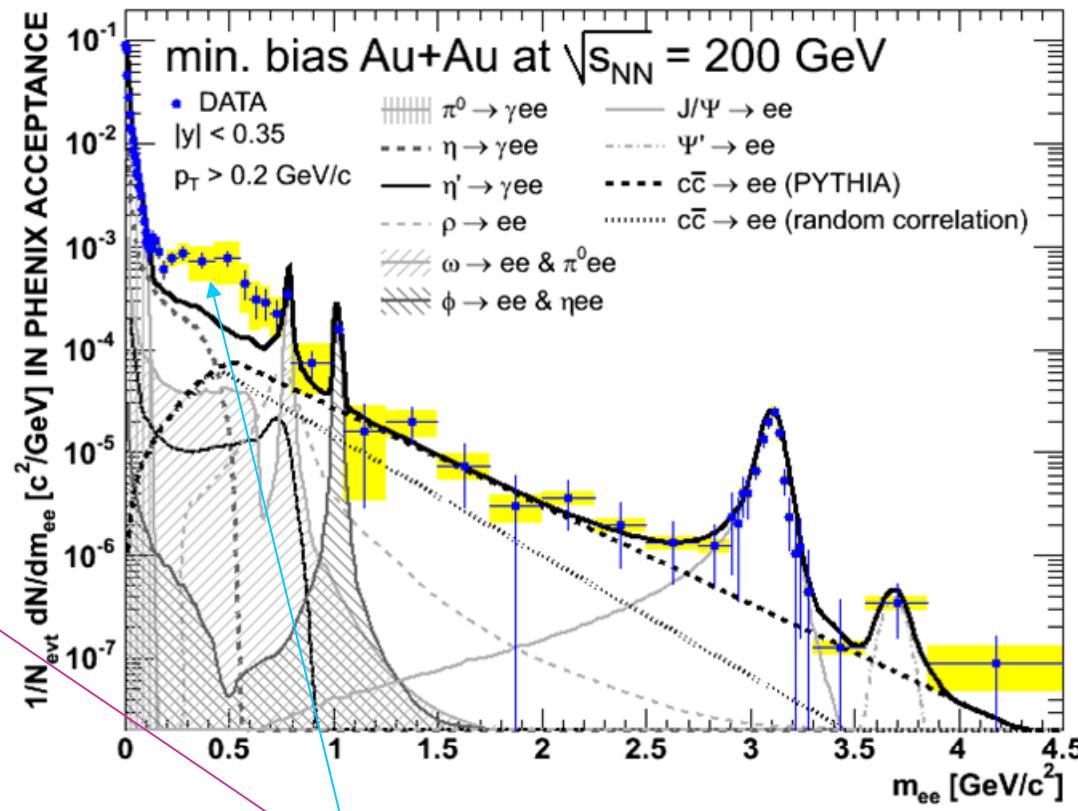
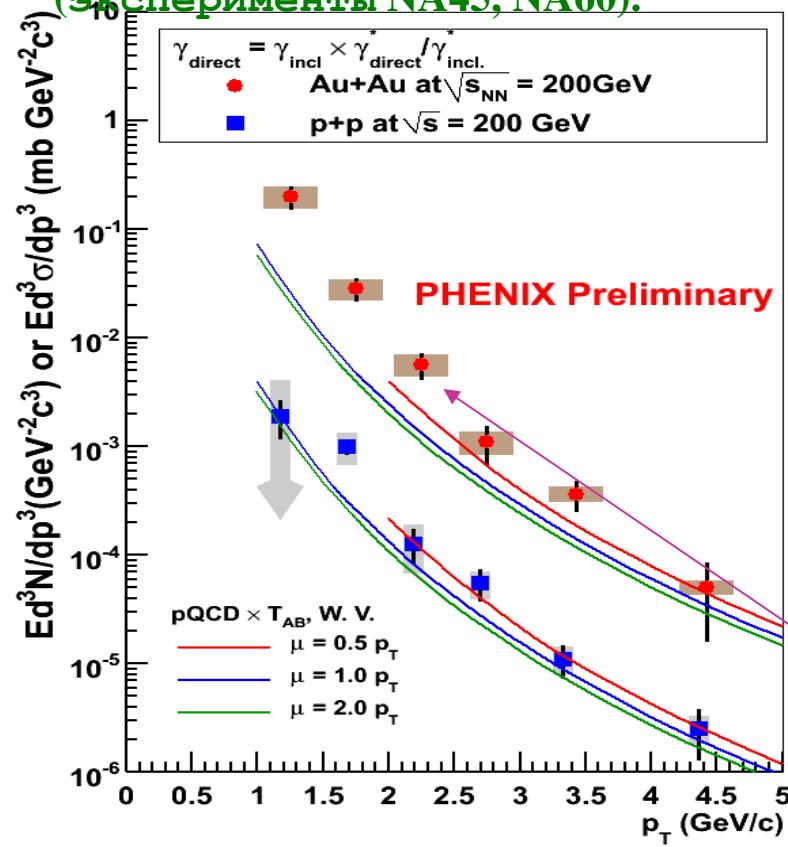


Phys. Rev. Lett. 98, 162301 (2007)

NCQ-скейлинг (number of constituent quarks, n_q) v_2 адронов как функции их кинетической поперечной энергии $KE_T = (E_T - m)$ указывает на то, что эллиптический поток формируется на партонной стадии и, возможно, на важность механизма кварковой рекомбинации.

Тепловые фотонны и дилептоны на RHIC

«Термальные» фотонны и дилептоны из горячей КХД-среды могут позволить определить температуру среды (идея была впервые предложена Фейнбергом и Шуряком в 70-е г.г.)
избыток диэлектронов в области инвариантных масс $350 < M_{ee} < 700 \text{ МэВ}/c^2$
наблюдался также при более низкой энергии SPS в соударениях Pb+Au
(эксперименты NA45, NA60).



PHENIX детектировал в соударениях Au+Au избыток фотонов с $p_T \sim 1-3 \text{ ГэВ}/c$ (по сравнению с pp и расчетом пертурбативной КХД - NLO pQCD) и диэлектронов в области инвариантных масс $150 < M_{ee} < 750 \text{ МэВ}/c^2$ (по сравнению с «коктейлем» из адронных распадов в pp) → Излучение из КГП или адронной материи? (модельная зависимость T_0) LHC ($T_0 \uparrow$)?

Жесткие тесты: фактор ядерной модификации

$$R_{AA} = \frac{\sigma_{pp}^{\text{inel}}}{\langle N_{\text{coll}} \rangle} \frac{d^2 N_{AA}/dp_T d\eta}{d^2 \sigma_{pp}/dp_T d\eta}$$

$R_{AA} = 1$ - для жестких процессов, некогерентная сумма p+p
неупругих бинарных столкновений в A+A, $N_{AA} = N_{pp} < N_{\text{coll}}(A,A) >$

$$R_{CP} = \frac{\langle N_{\text{coll}}^{\text{periph}} \rangle}{\langle N_{\text{coll}}^{\text{central}} \rangle} \frac{d^2 N_{AA}^{\text{central}}/dp_T d\eta}{d^2 N_{AA}^{\text{periph}}/dp_T d\eta}$$

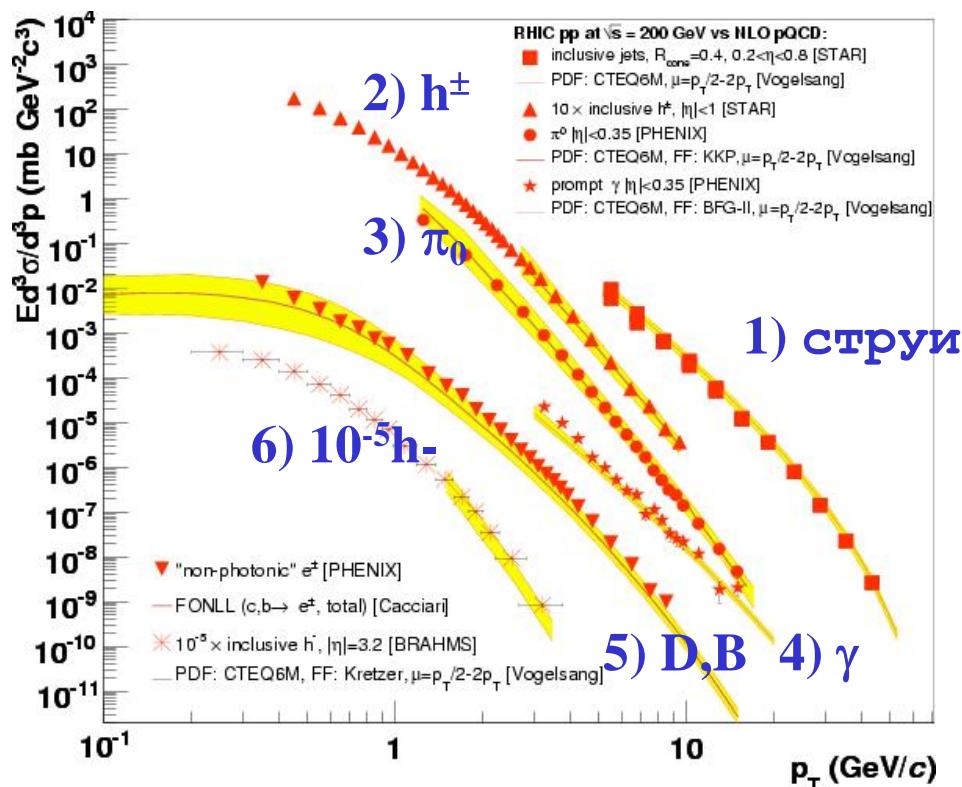
- не зависит от сечения в p+p столкновении

$$R_{AA}(p_T, \eta, b) = \frac{d^2 N^{AA}(b)/dp_T d\eta}{\langle N_{\text{coll}}(b) \rangle d^2 N^{NN}/dp_T d\eta}$$

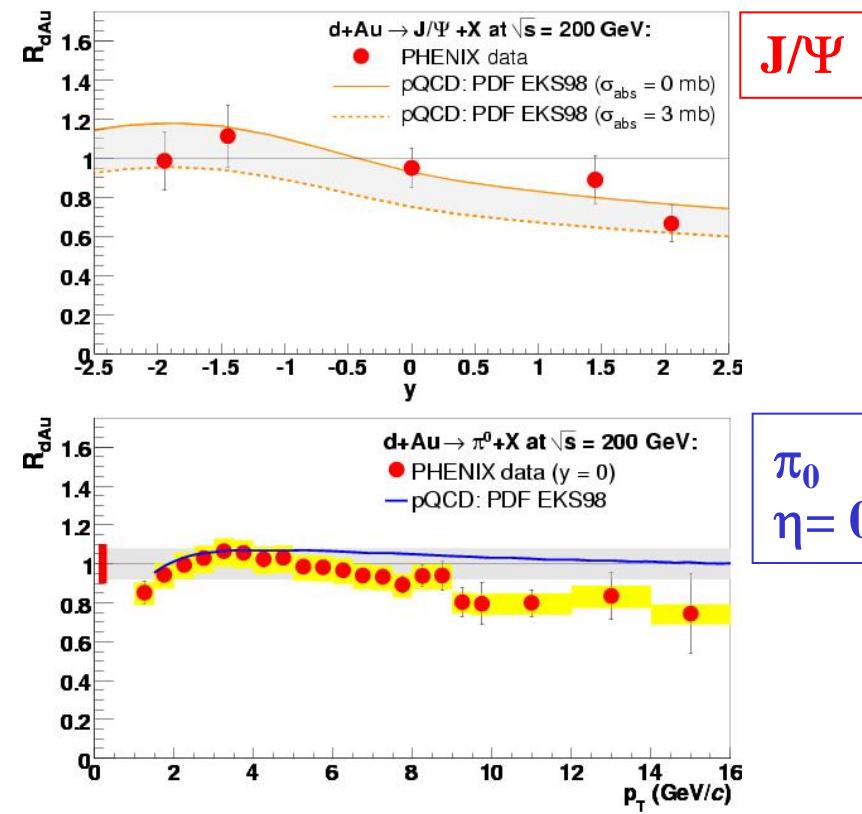
- дифференциальный фактор ядерной модификации

Хорошее описание разных наблюдаемых в p+p и d+A измерениях на RHIC в рамках пертурбативной КХД (NLO pQCD) для $p_T = 1\text{-}40 \text{ ГэВ/с}$
 (с точностью до 20 %)

p+p, 200 GeV



d+Au, 200 GeV



Слева p_T зависимость рождения: 1) струй, 2) зар. адронов, 3) нейтр. пионов, 4) прямых фотонов, 5) D, B ($\rightarrow e^\pm$) -мезонов и 6) адронов «вперед» ($\eta=3.2$) в p+p -столкновениях и сравнение с NLO (pQCD) – yellow bands

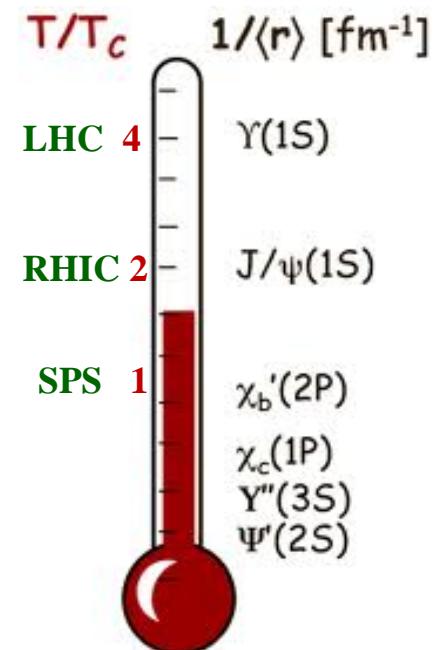
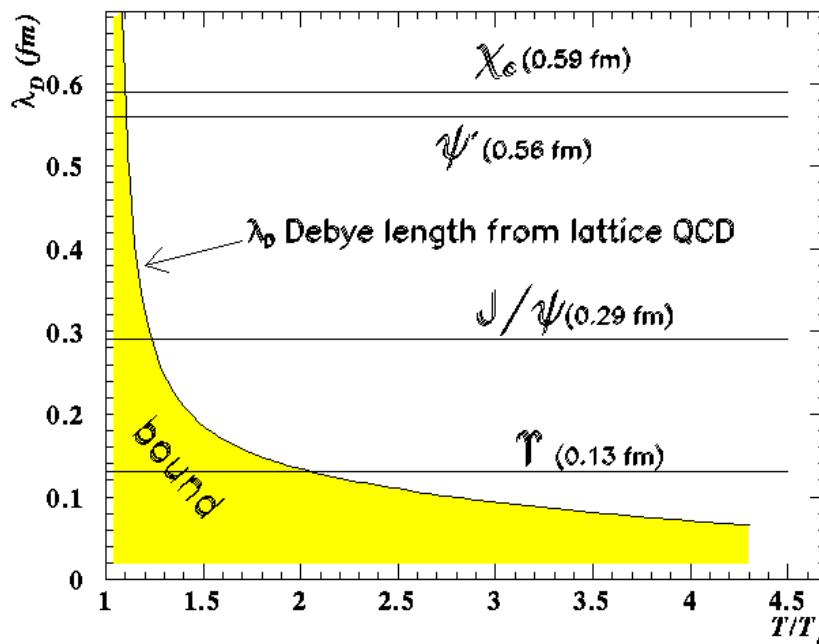
Справа J/Ψ и π_0 в d+Au столкновениях и сравнение с pQCD с¹⁷ учетом ядерного экранирования (модификации партонных

Подавление квартониев

- Ожидается, что в фазе КГП потенциал взаимодействия экранируется на расстоянии Дебаевской длины λ_D (по аналогии с Дебаевским электромагнитным экранированием (Matsui, Satz, 1986):

$$\frac{e^2}{r} \rightarrow \frac{e^2}{r} e^{-\frac{r}{\lambda_D}}$$

- Состояния чармониев (cc) и боттомониев (bb) при $r > \lambda_D$ не будут связанными состояниями (qq), их образование будет подавлено.
- Какие состояния будут подавлены – зависит от температуры КГП, T



Аномальное подавление J/ψ на SPS и RHIC

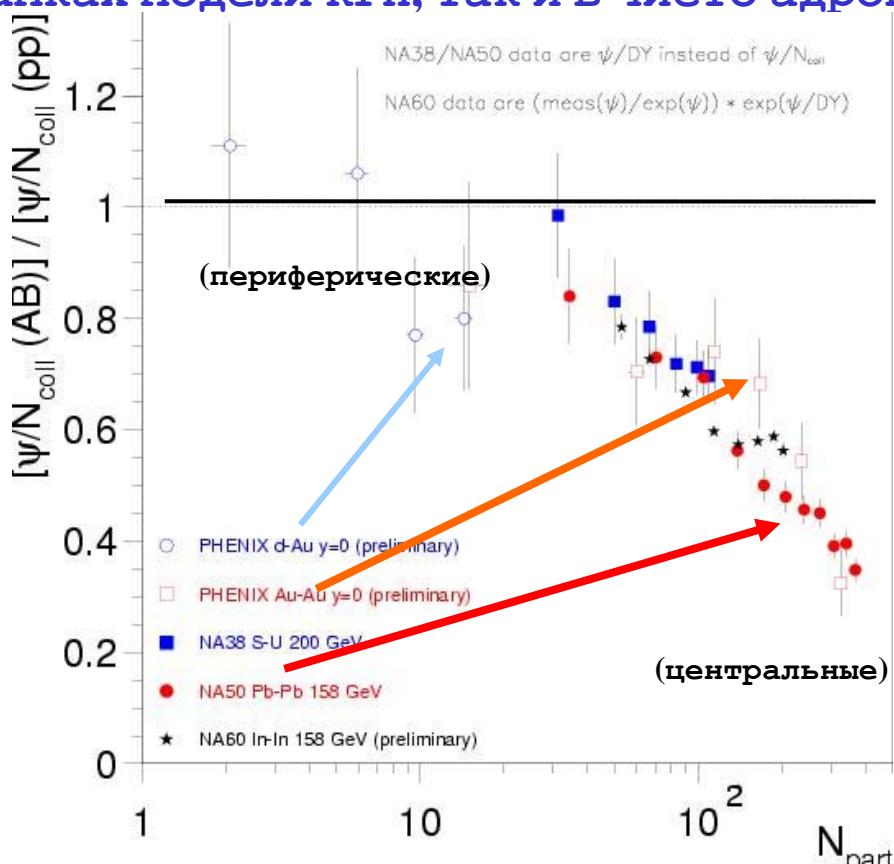
Расчеты КХД на решетках показывают, что при $T > 2 T_{\text{crit}}$ для J/ψ , $T > 4 T_{\text{crit}}$ для Υ и $T \sim T_{\text{crit}}$ для ψ' , χ_c дебаевский радиус экранирования в цветовом поле становится меньше радиуса связанных состояний. Данные SPS (NA38, NA50) и RHIC (PHENIX) свидетельствуют об аномальном (превышающем подавление в холодном ядерном веществе) подавлении рождения J/ψ в несколько раз. Однако степень подавления на SPS и RHIC одинакова! При этом подавление сильнее в передней области быстрот («ядерное экранирование»?). Делаются попытки описать данные как в рамках модели КГП, так и в чисто адронных сценариях.

Два возможных объяснения.

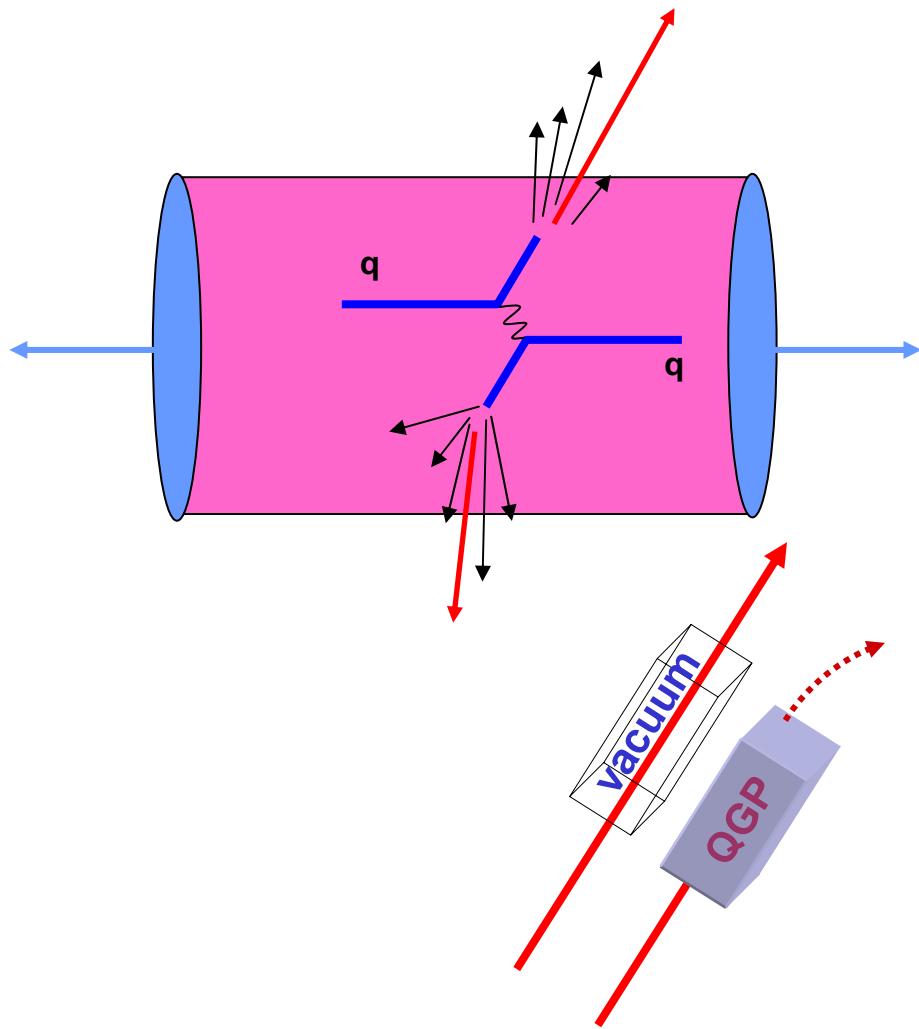
1. Регенерация J/ψ вследствие рекомбинации с-кварков из КГП на RHIC. Это согласуется и с большим подавлением в передней области быстрот, где меньше эффект регенерации (тогда на LHC возможно уменьшение подавления или даже усиление выхода J/ψ !).

2. Отсутствие подавления прямых J/ψ , а только тех, которые родились через ψ' и χ_c (тогда на LHC можно ожидать усиление подавления J/ψ).

Рис. Фактор ядерной модификации J/ψ для $A+A$ и $d+A$ столкновений в зависимости от числа нуклонов-участников на SPS и RHIC.

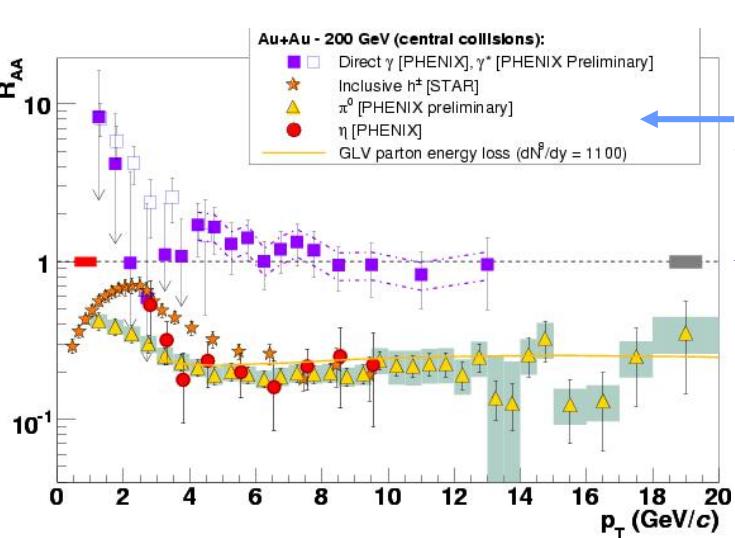


Прохождение партонных струй через плотную КХД- материю

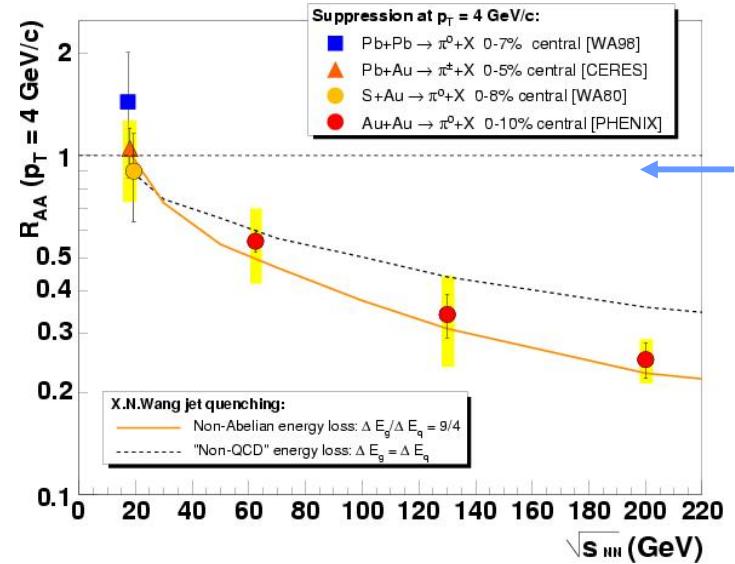


“Гашение струй” на RHIC (Au+Au)

Согласуется с формированием КГП при $T_0 \sim 300\text{-}450 \text{ MeV}$ и $dN^g/dy \sim 1100\text{-}1500$

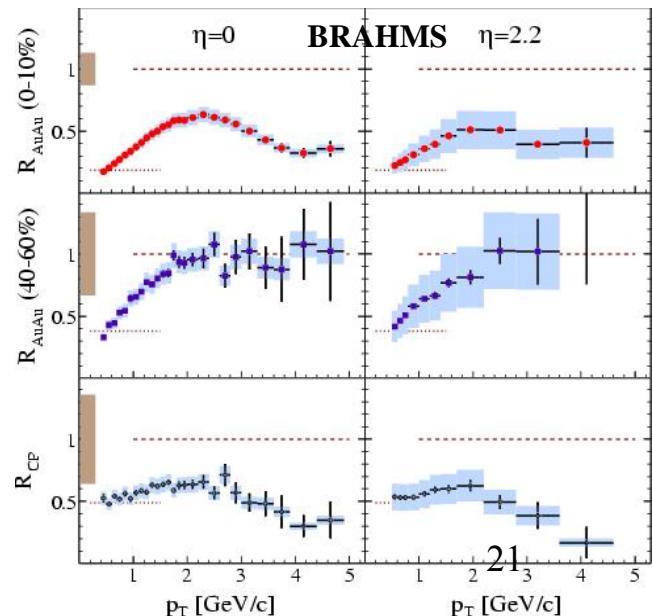
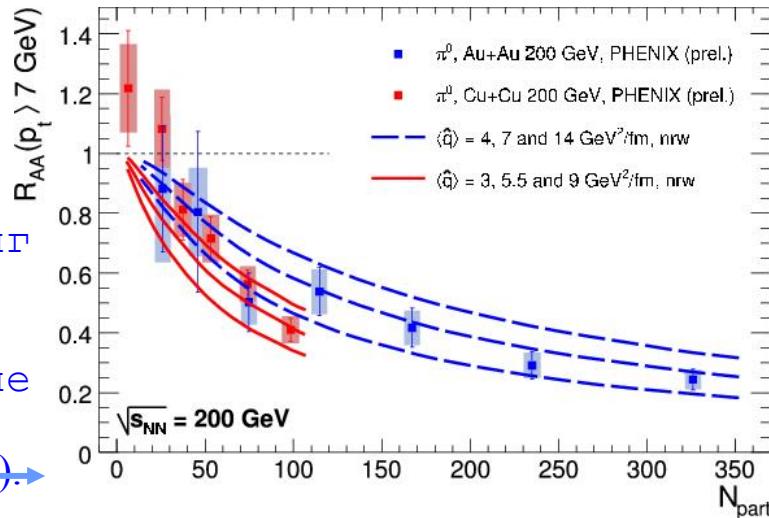


Сильное подавление жестких адронов на фактор ~ 5 (выход на скейлинг N_{part} вместо N_{coll} !) в центральных соударениях (но не для «прямых» фотонов).



Эффект ослабевает подавление. Уменьшает уменьшение энергии пучков и отсутствует для энергий SPS, LHC – усиление подавления или насыщение? До каких p_T ?

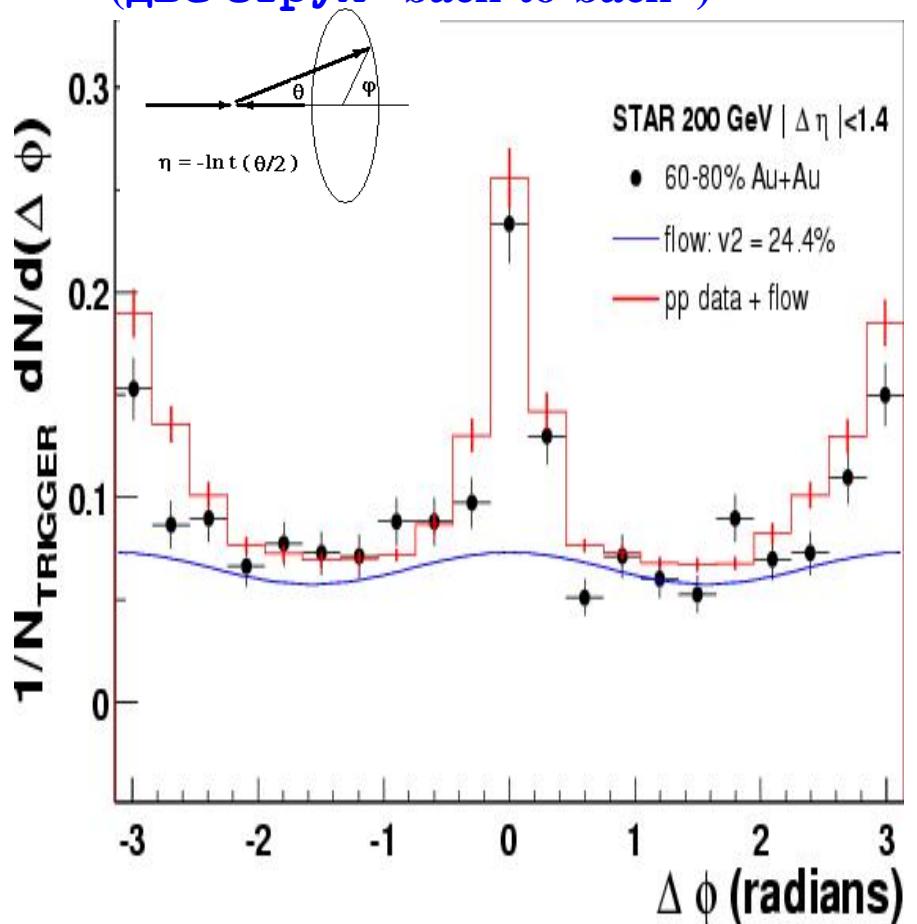
Эффект слабо



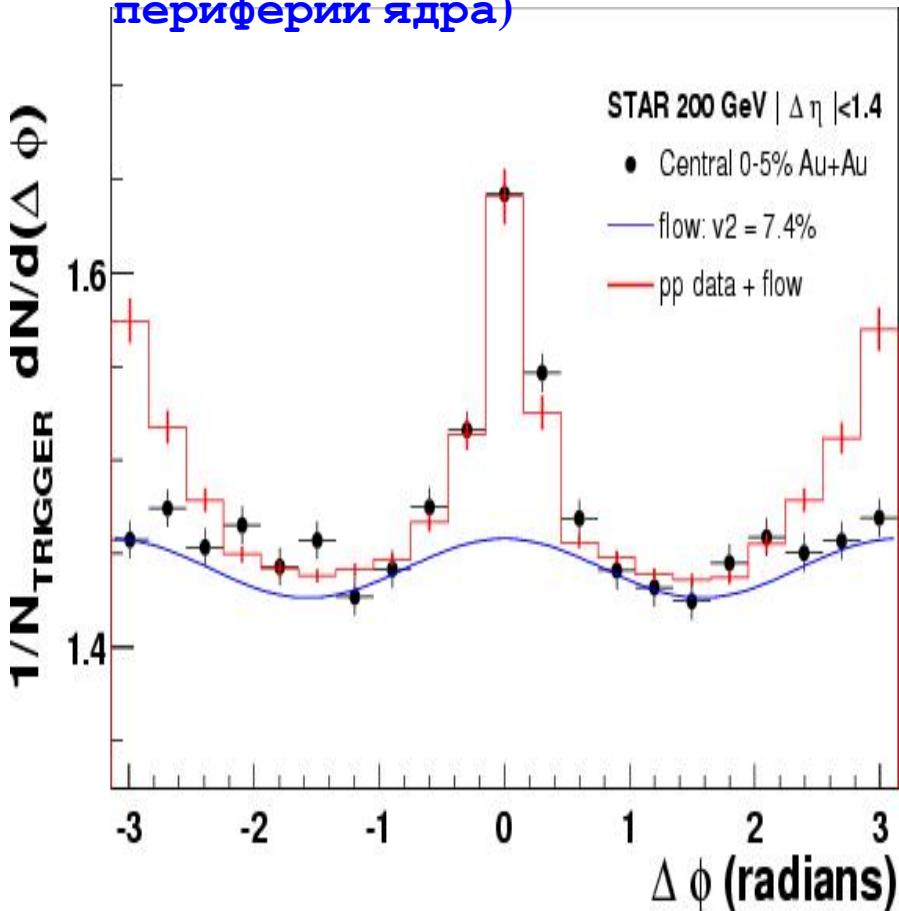
Азимутальная корреляция жестких адронов относительно угла

лидирующей частицы

Периферические Au+Au, d+Au и pp:
два пика, на $\Delta\phi=0$ и $\Delta\phi=\pi$
(две струи “back-to-back”)



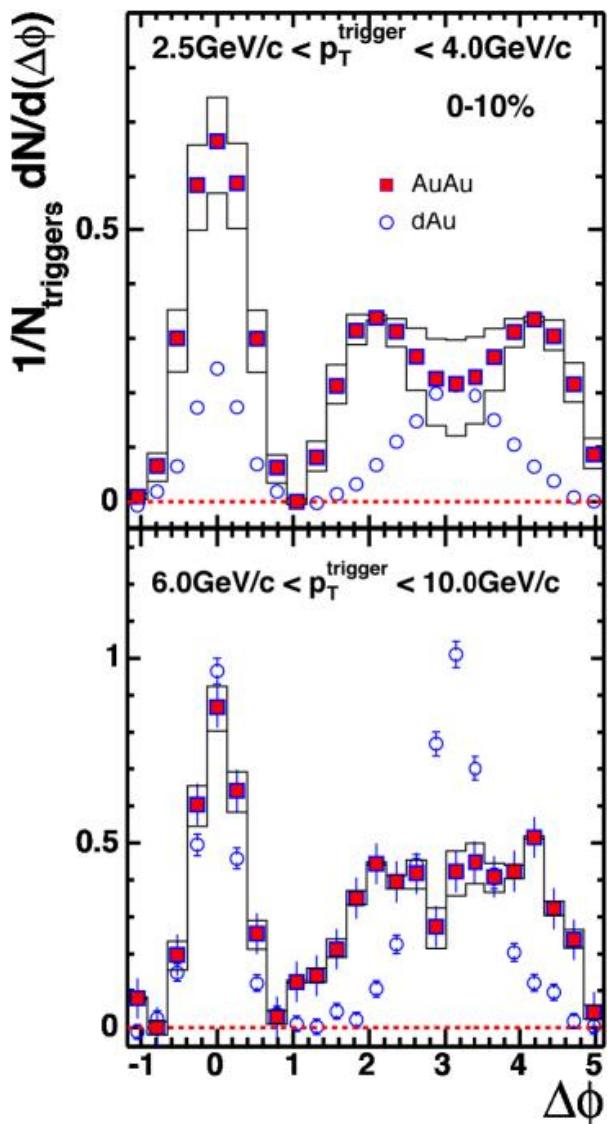
Центральные Au+Au: “back-to-back”
пик на $\Delta\phi=\pi$ исчезает
(регистрация моноструй с
периферии ядра)



Точки – данные Au+Au, гистограмма – данные p+p, кривая – оценка фона
в A-A

Азимутальная корреляция мягких адронов относительно угла лидирующей частицы

STAR, 200 GeV



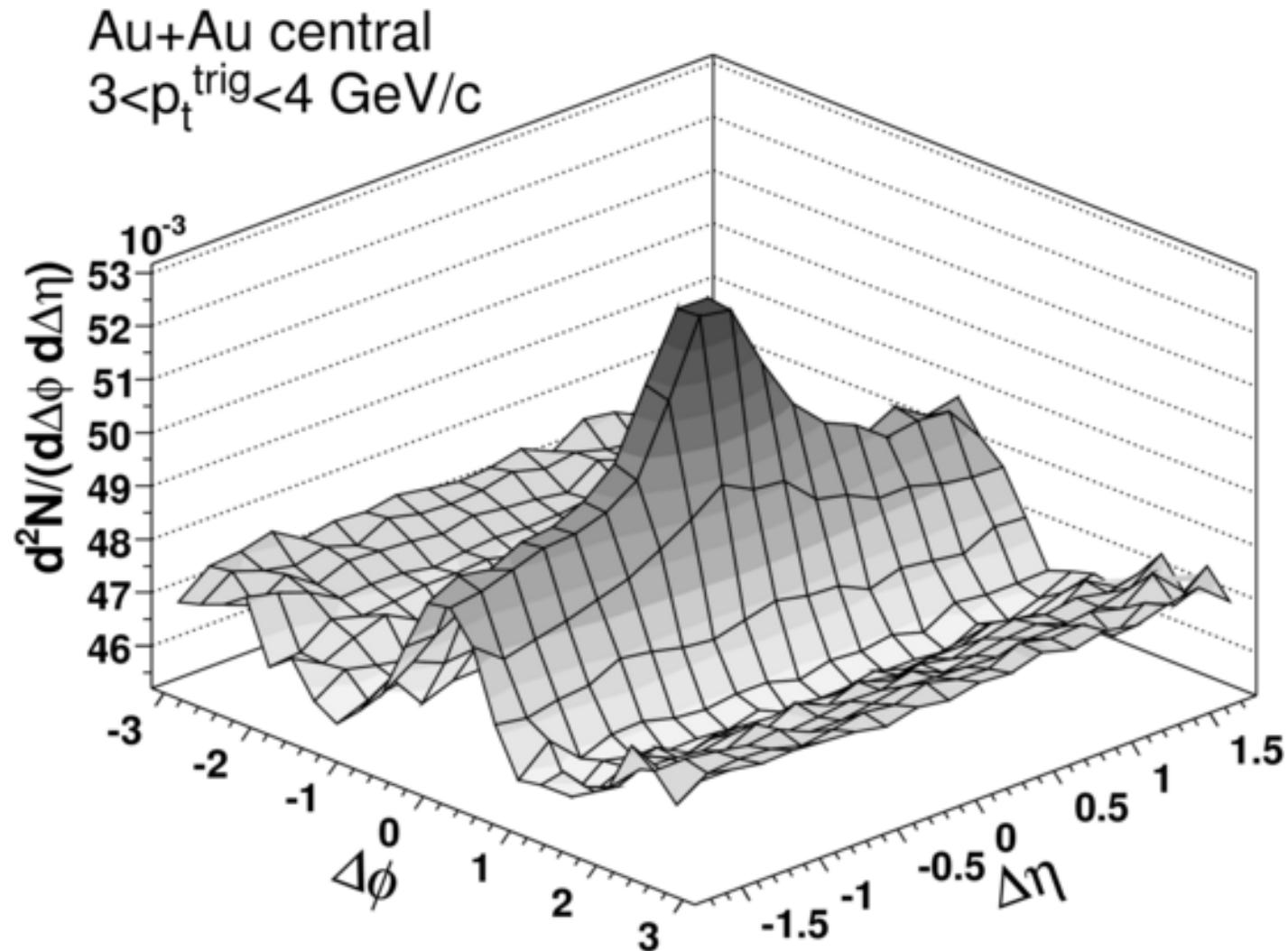
Результаты на RHIC (STAR, PHENIX) для угловых корреляций «мягких» адронов ($p_T^{\text{ass}} \sim 0.5\text{-}1 \text{ ГэВ/с}$) по отношению к триггерной частице говорят о конусо-подобном излучении частиц относительно оси этой частицы с большим p_T . «Отклик» плотной КХД-среды на прохождение через нее жестких партонов («возмущение»)?

LHC (полная реконструкция струй)

Минимум в распределении в заднюю полусферу при $\Delta\phi = \pi$ с локальными максимами при $\Delta\phi = \pi \pm 1.38$.

- 1) Ударные волны (волны Маха) от прохождения партонов в гидродинамически расширяющейся КГП?
- 2) Широкоугловые и/или столкновительные потери энергии партонов?
- 3) Партонный каскад?
- 4) Конусное черенковское глюонное излучение в плотной КХД-среде?

Дальнодействующие азимутальные корреляции (Ridge)

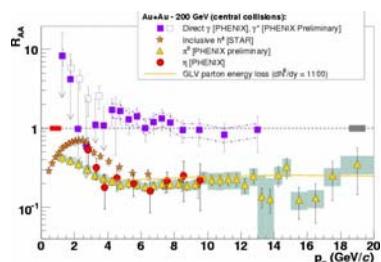
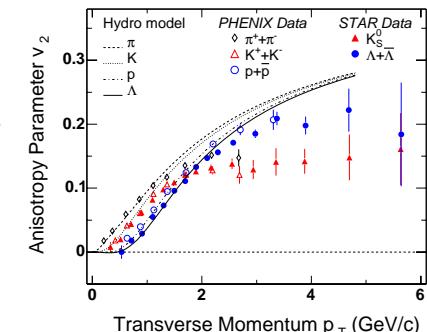
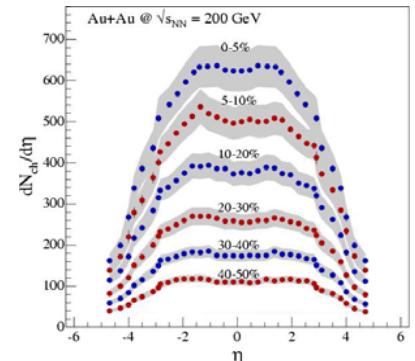


Основные результаты RHIC

Измеренная множественность частиц указывает на возможность достижения плотности энергии (связанной с формированием «горячей» КХД-среды на начальной стадии столкновения), значительно превышающей плотность энергии «холодной» ядерной материи.

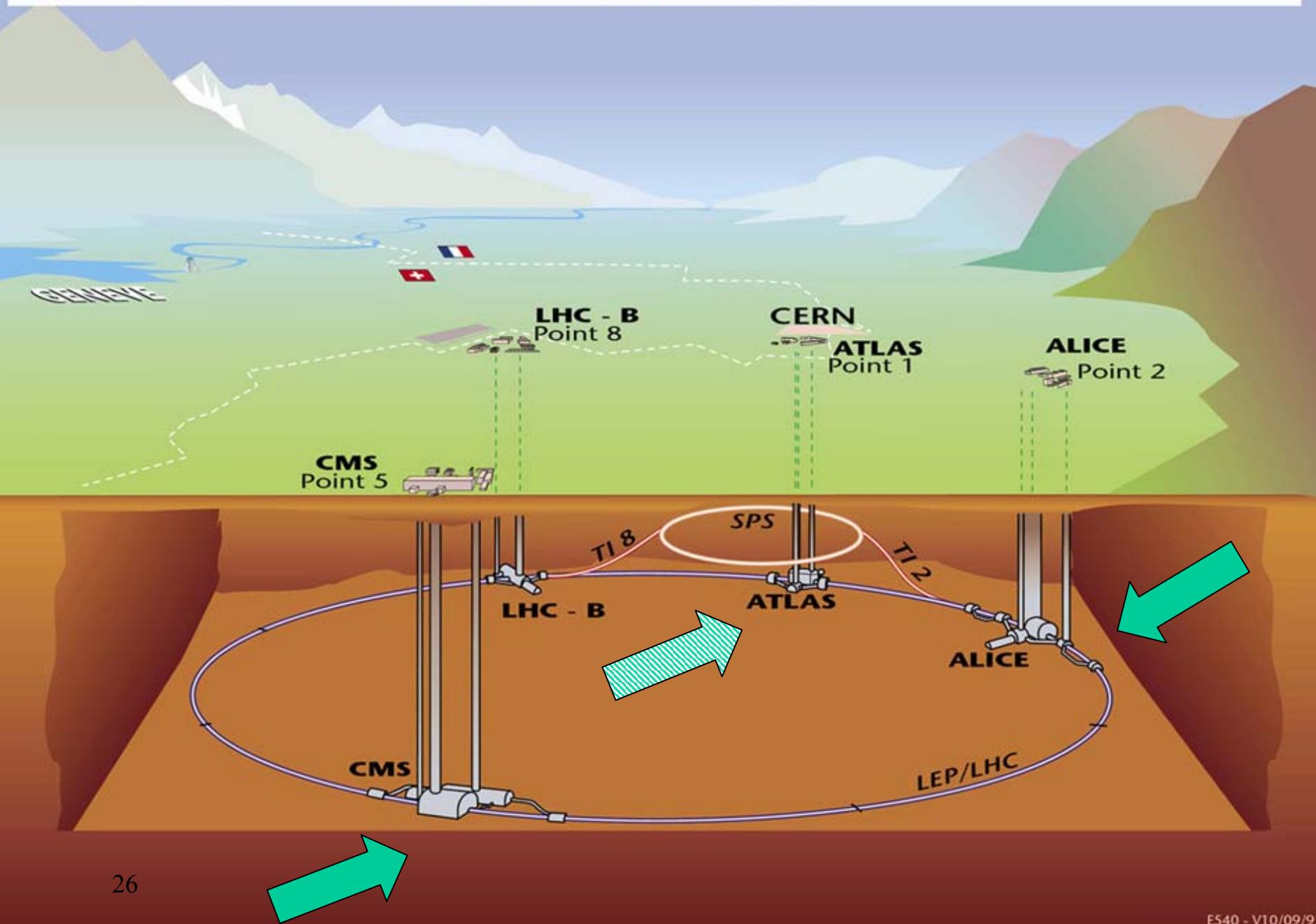
Измеренный эллиптический поток частиц (азимутальная анизотропия) согласуется с формированием (квази)идеальной адронной жидкости (ранняя термализация и малая вязкость).

Измеренная степень подавления выхода адронов с большими поперечными импульсами по сравнению с линейной суперпозицией нуклон-нуклонных соударений («гашение струй») указывает на образование очень плотной среды, поглощающей высокоэнергичные кварки и глюоны.



КХД-среда, образованная на LHC, может отличаться по свойствам от среды, образованной на RHIC (слабовзаимодействующая кварк-глюонная плазма? идеальная или вязкая кварк-глюонная жидкость?)

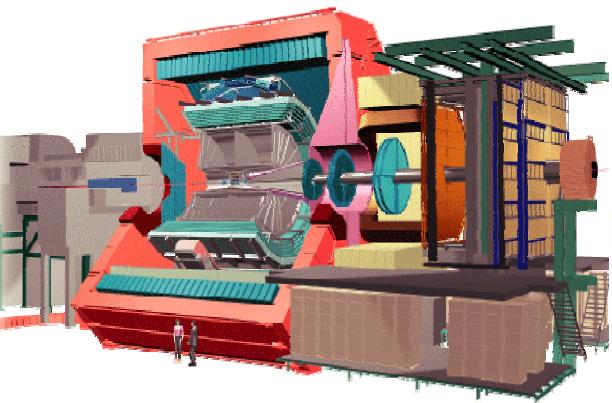
Overall view of the LHC experiments.



Потенциал физики тяжелых ионов на LHC (Pb+Pb: $\sqrt{s} = 2.76$ А ТэВ – 2010-2011 год; 5.5 А ТэВ – 2014 год?)

Новый режим физики тяжелых ионов с доминированием жестких КХД-процессов в горячей и долгоживущей КГП
взаимодополняющие измерения ALICE & CMS/ATLAS

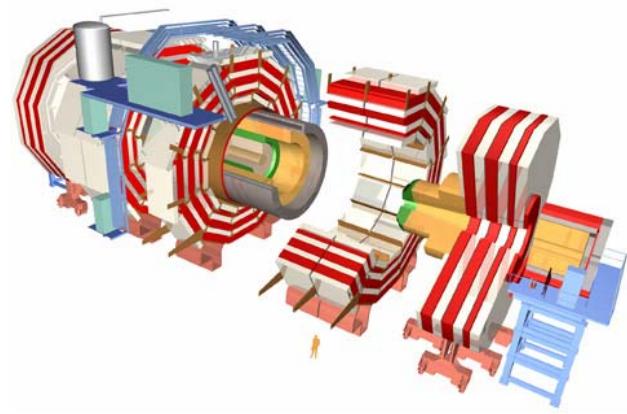
ALICE



ATLAS



CMS



ALICE (трекинг малых p_T , ID адронов, центральные e и передние μ (J/ψ , Y), γ ...)
мягкие тесты + некоторые жесткие

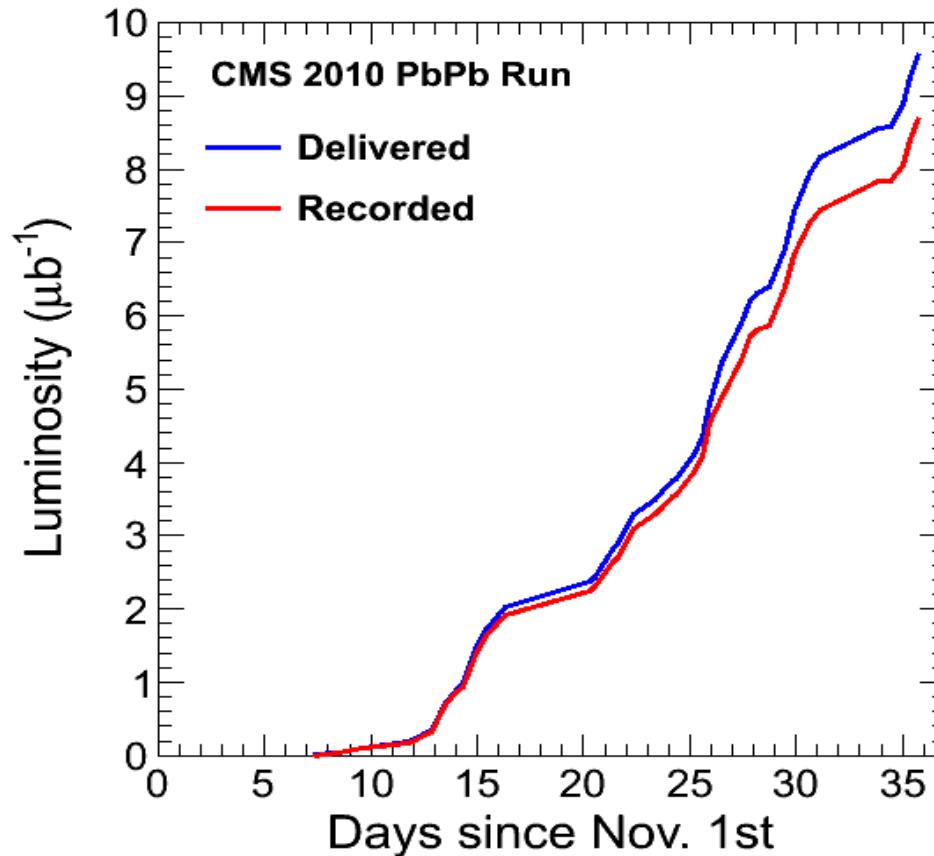
CMS/ATLAS (трекинг частиц больших p_T , центральные μ (J/ψ , Y , Z), γ , струи,...)
жесткие тесты + некоторые мягкие тесты

Новые каналы диагностики КГП на ЛНС

- **Боттомонии Y(1S), Y(2S), Y(3S) - оптимальный термометр КХД-среды (эффект регенерации из КГП мал по сравнению с чармонаями) .**
- **B-физика - потери энергии тяжелых夸克ов в КХД-среде ($m_b \gg m_c$)**
 - прямая реконструкция B-мезонов;
 - полулептонные распады пар B-мезонов;
 - вторичные J/ψ от распада B-мезонов;
 - B-струи меченные энергичными мюонами.
- **Адронные струи – потери энергии легких партонов в КХД-среде, угловое распределение излучения, различные механизмы потерь (до $p_T \sim 300$ ГэВ)**
 - Энергетические и угловые спектры струй и частиц в струях;
 - прямое измерение функции фрагментации струй с помощью лидирующих заряженных адронов и π^0 ;
 - анализ модифицированной в среде формы струй;
 - наблюдение дисбаланса поперечного импульса в процессах рождения

$\gamma +$ струя, $\gamma^*/Z(\rightarrow \mu^+ \mu^-) +$ струя.

LHC: 2010 Heavy Ion Run



2010: LHC delivered $8.7 \mu\text{b}^{-1}$ of PbPb data at $\sqrt{s}=2.76 \text{ A TeV}$
 $\sim 7 \mu\text{b}^{-1}$ used in hard probes analysis (equivalent to $\sim 300 \text{ nb}^{-1}$ of pp hard processes)

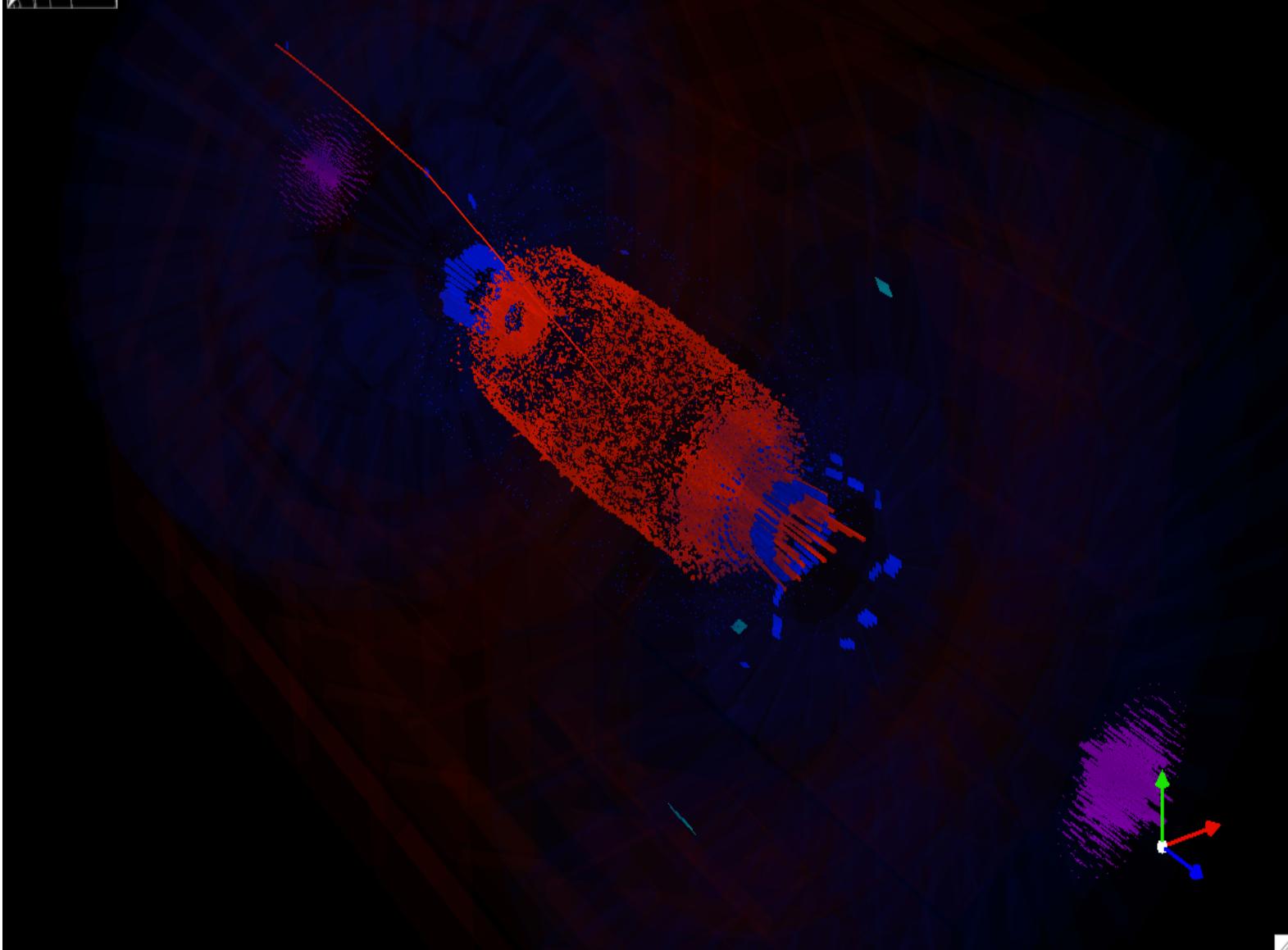
2011: LHC delivered 241 nb^{-1} of pp data at $\sqrt{s}=2.76 \text{ TeV}$
baseline measurement for PbPb (statistics are comparable)

Первые столкновения Pb+Pb на LHC при $\sqrt{s}=2.76$ А ТэВ

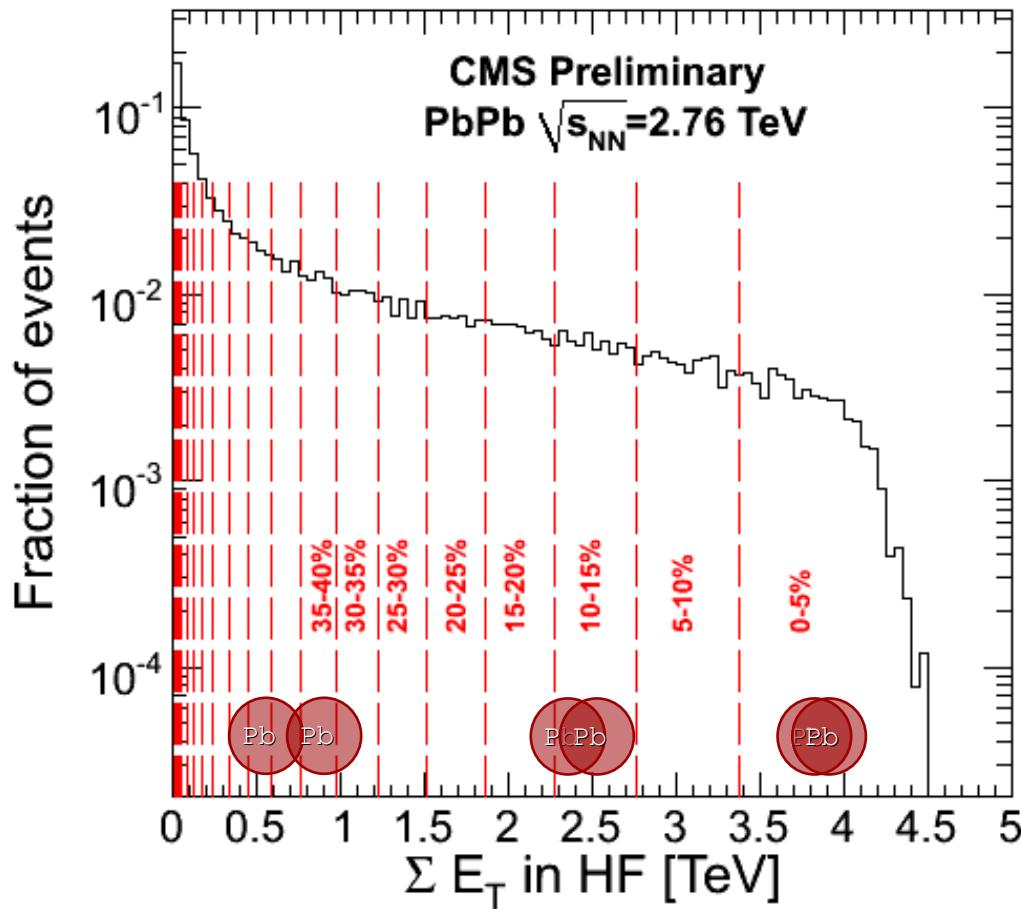
(07.11.2010)



CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Sun Nov 7 01:29:58 2010 CEST
Run/Event: 150304 / 486730
Lumi section: 73

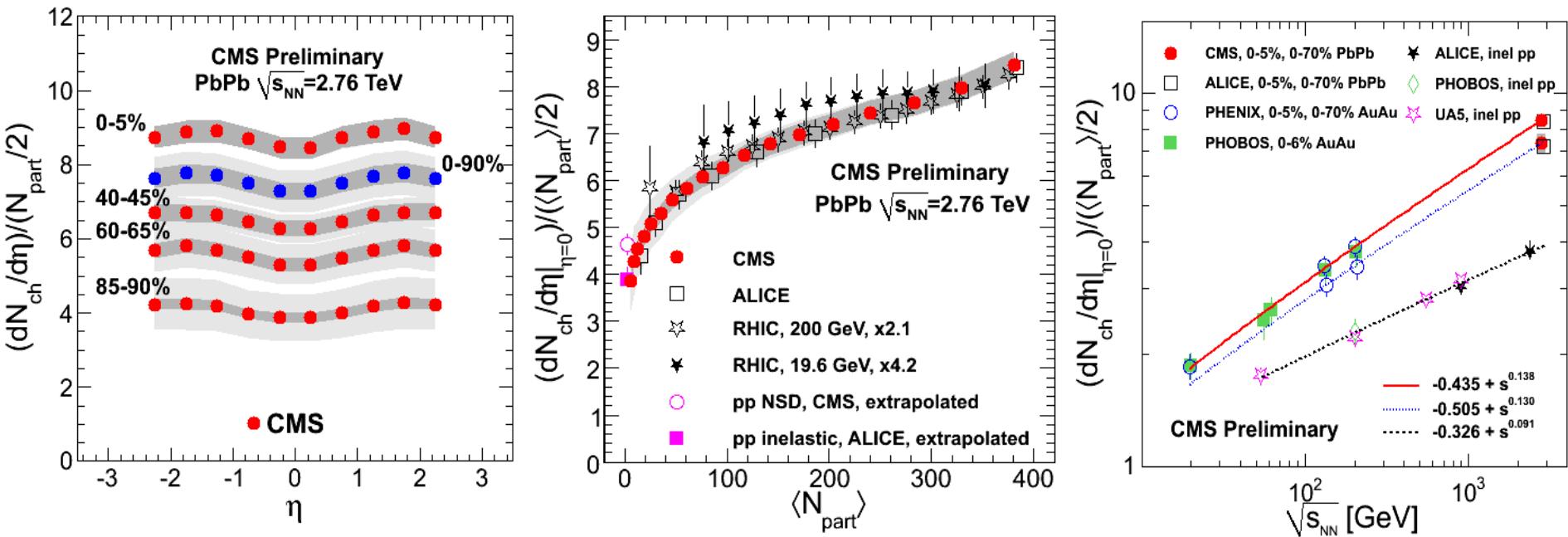


Event centrality determination (CMS)



Events are classified according to the percentile of the PbPb inelastic cross section based on total deposited HF energy

Hadron multiplicity vs. η , centrality and \sqrt{s}_{NN}



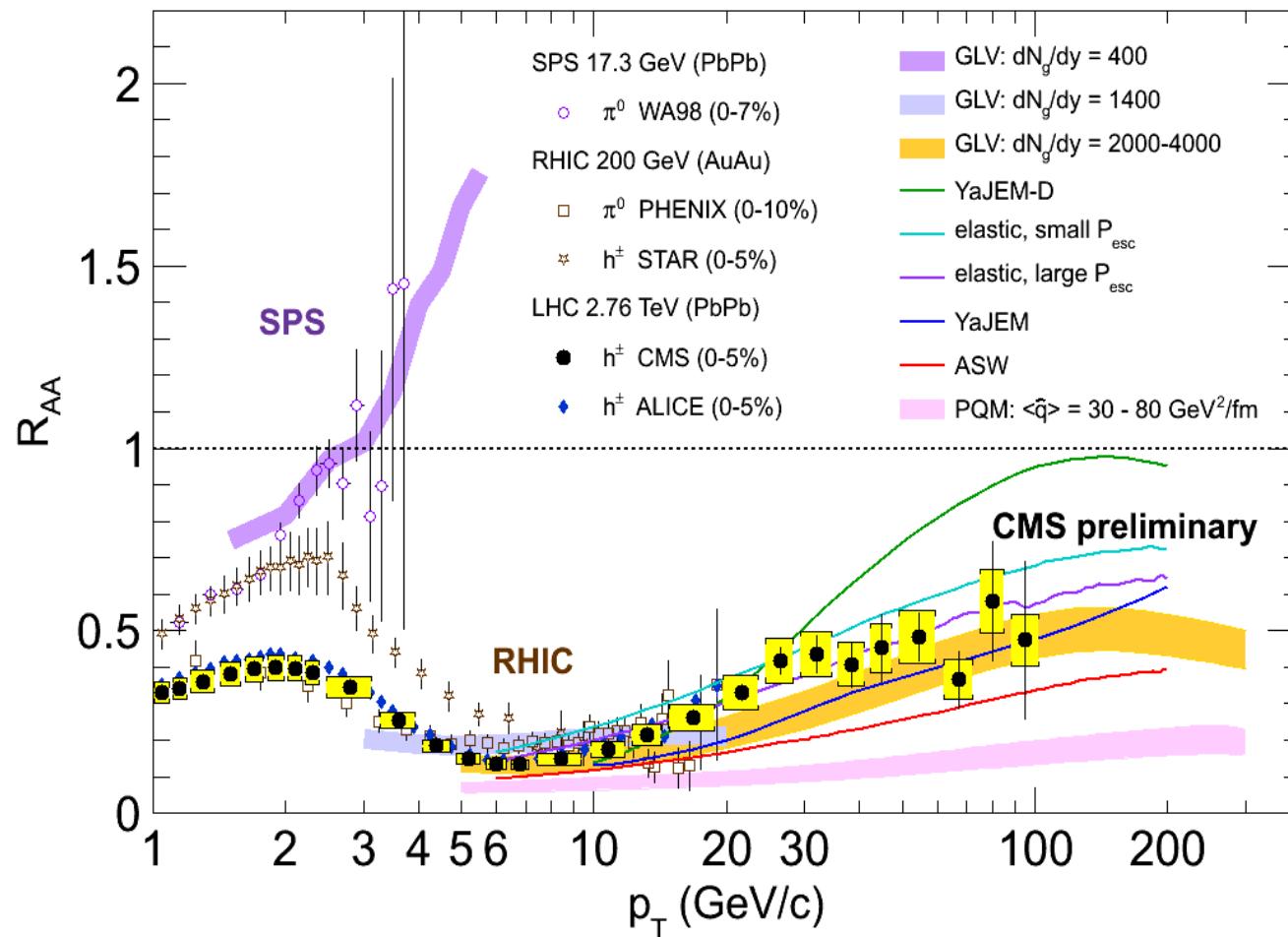
No strong rapidity dependence of hadron multiplicity is seen (<10% variation)

central PbPb (0-5%): $dN_{\text{ch}}/d\eta(\eta=0) = 1610 \pm 55$ (by a factor of 2.2 ± 0.1 higher than at RHIC)

Hadron multiplicity increases with centrality, CMS and ALICE are in the agreement

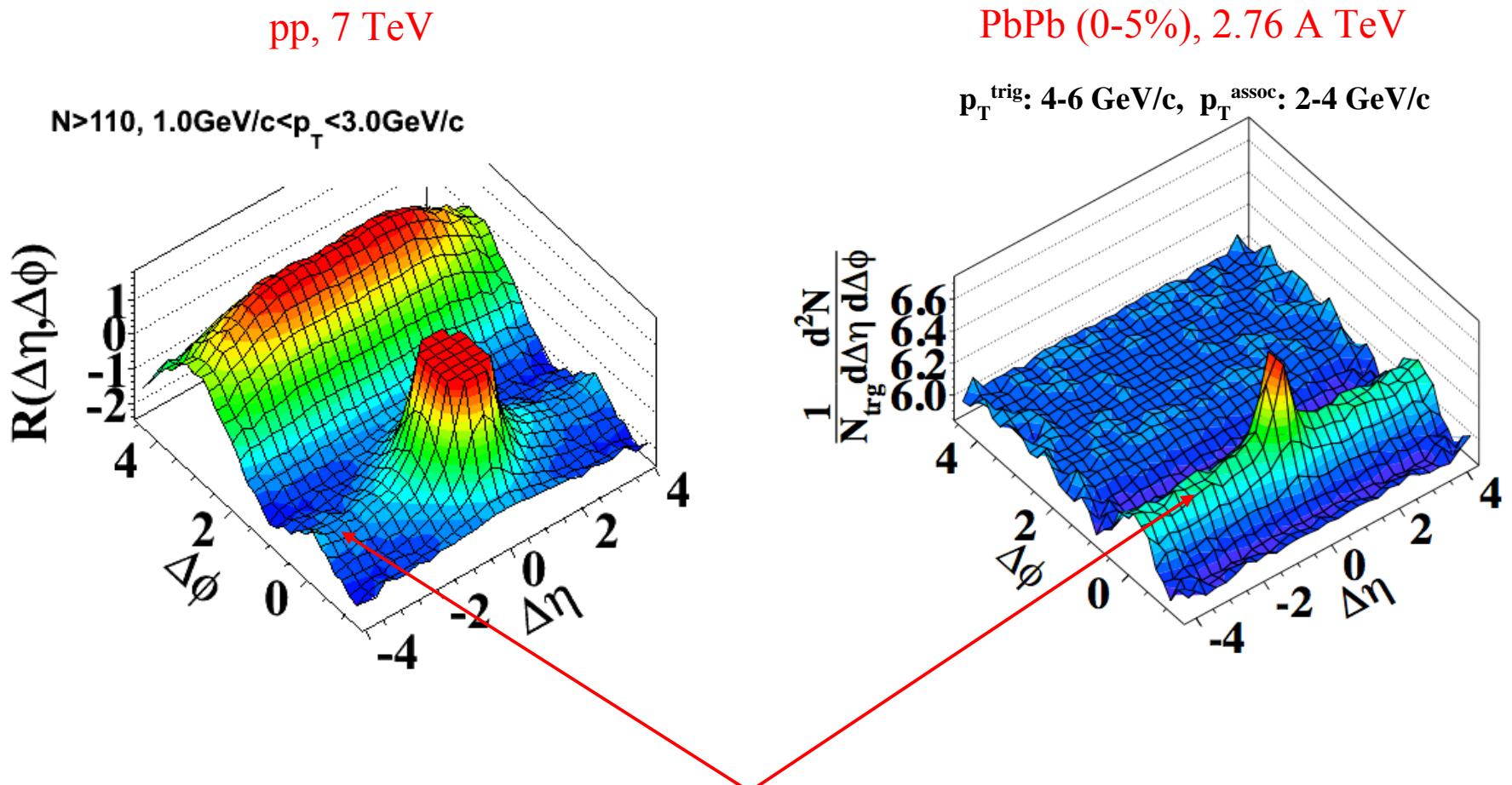
Hadron multiplicity rises with \sqrt{s}_{NN} in accordance with a power law (stronger than in pp)

R_{AA} : CMS vs. ALICE, RHIC and models



CMS and ALICE are in agreement, but CMS reaches higher p_T (due to using the jet trigger)
 Much higher p_T than at RHIC, up to ~ 100 GeV/c, are available
 $R_{AA}(p_T)$ – strong constraints on partonic energy loss model (access to medium properties)

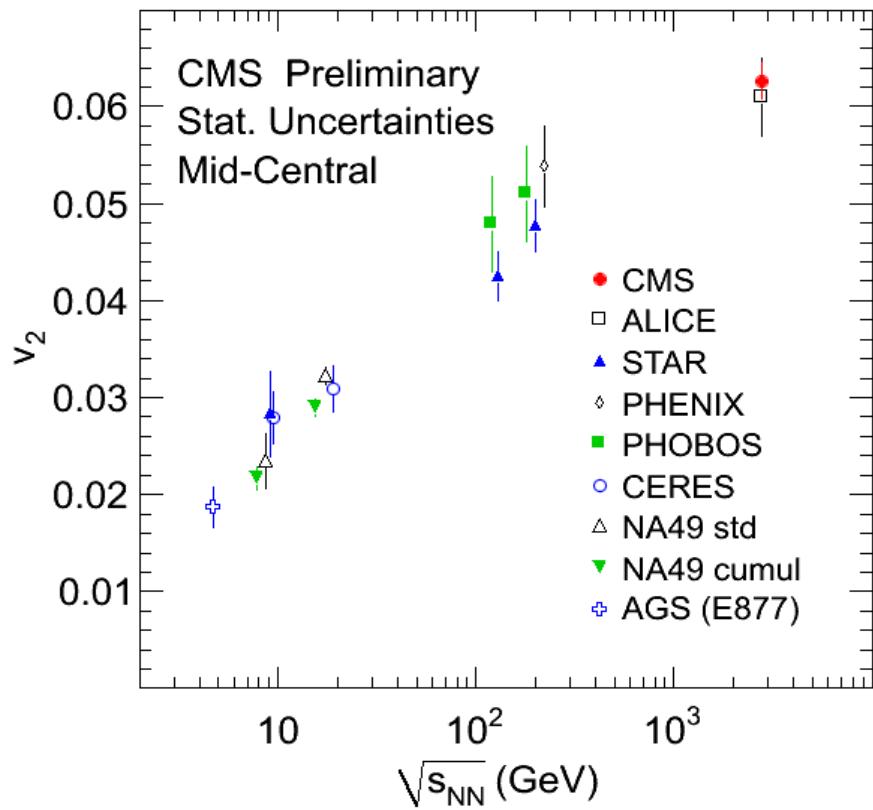
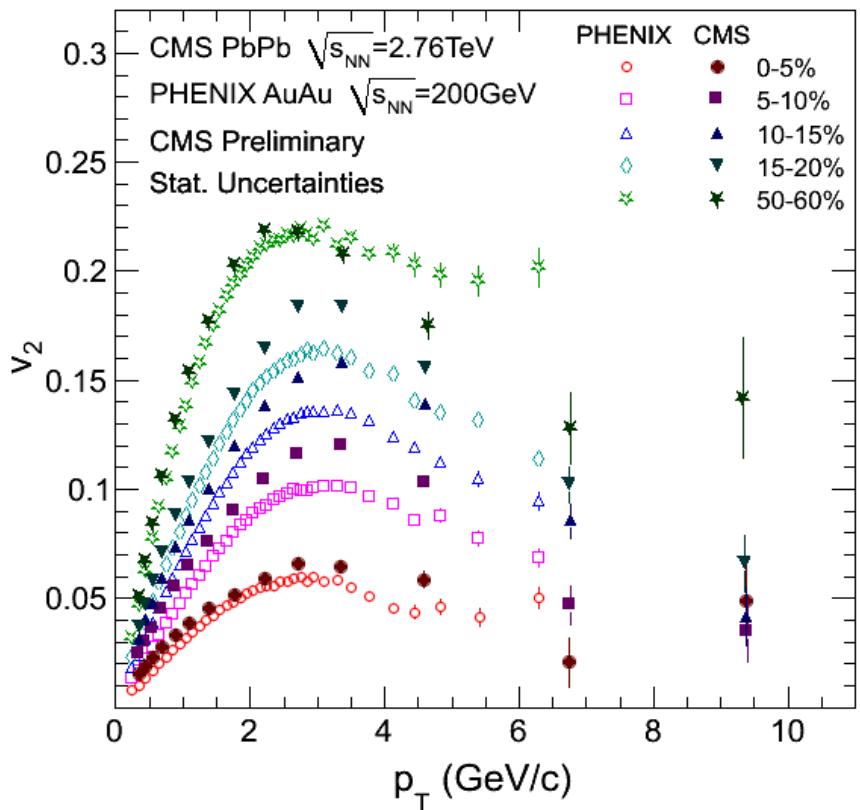
Two-particle correlations



"Ridge" (long-range azimuthal correlations) is observed by CMS in high multiplicity pp as well as in central PbPb collisions

Elliptic flow v_2 vs. p_T and $\sqrt{s_{NN}}$

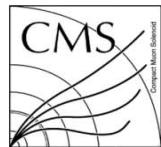
$$\frac{dN}{d^2 p_T dy} = \frac{dN}{2\pi p_T dp_T dy} (1 + v_2 \cos 2\phi + 2v_4 \cos 4\phi + \dots)$$



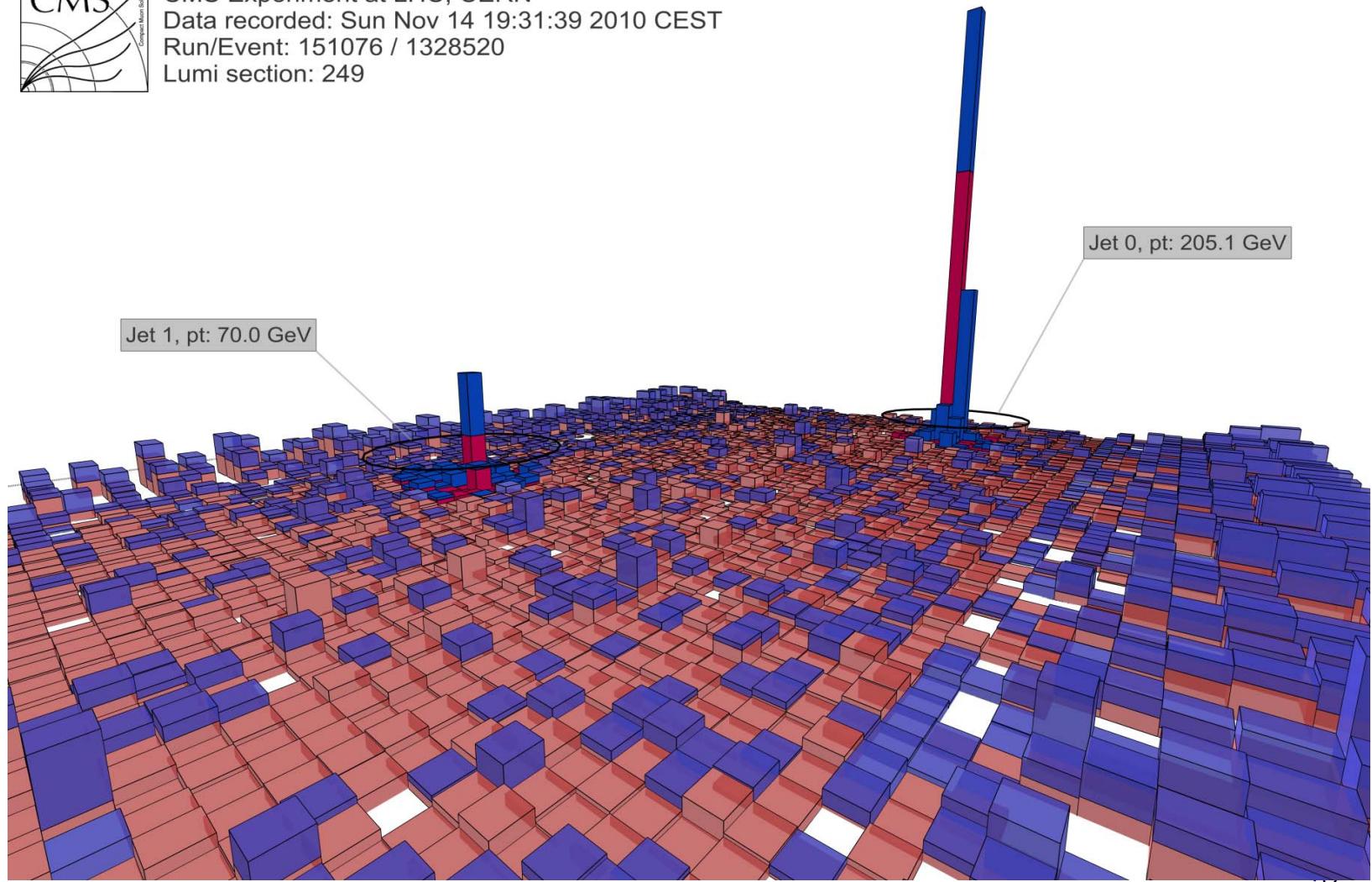
$v_2(p_T)$ peaks at ~ 3 GeV/c, finite at ~ 10 GeV/c, strongest for 40-50% centrality
 p_T -dependence of v_2 at LHC is similar to RHIC

Integral v_2 at the LHC is higher than at RHIC by $\sim 15\text{-}30\%$ (due to the rise of $\langle p_T \rangle$)

Imbalance (asymmetry) of dijet energy

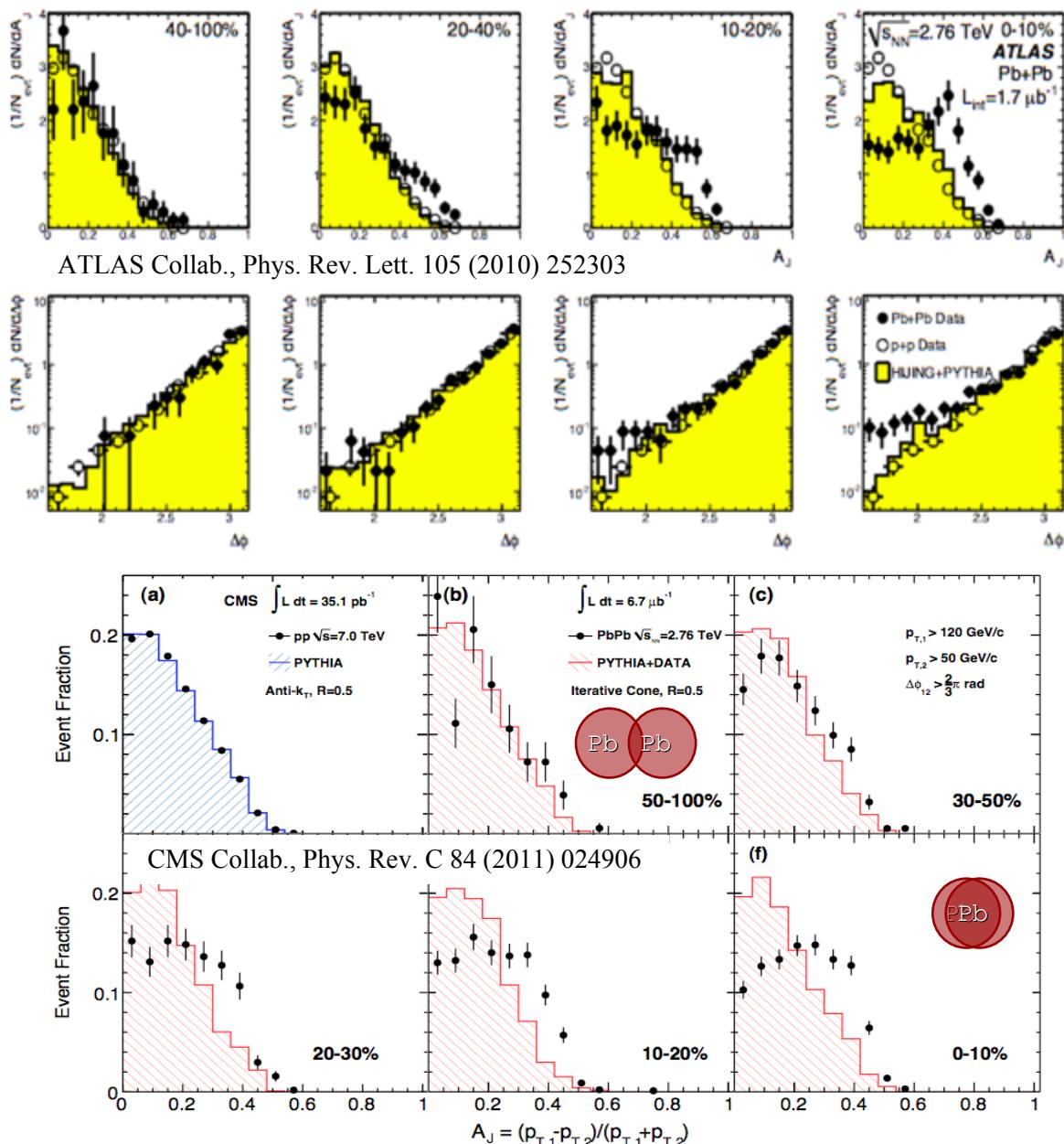
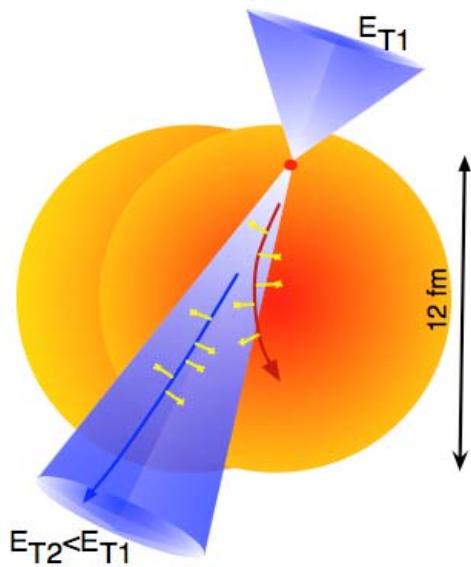


CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Sun Nov 14 19:31:39 2010 CEST
Run/Event: 151076 / 1328520
Lumi section: 249

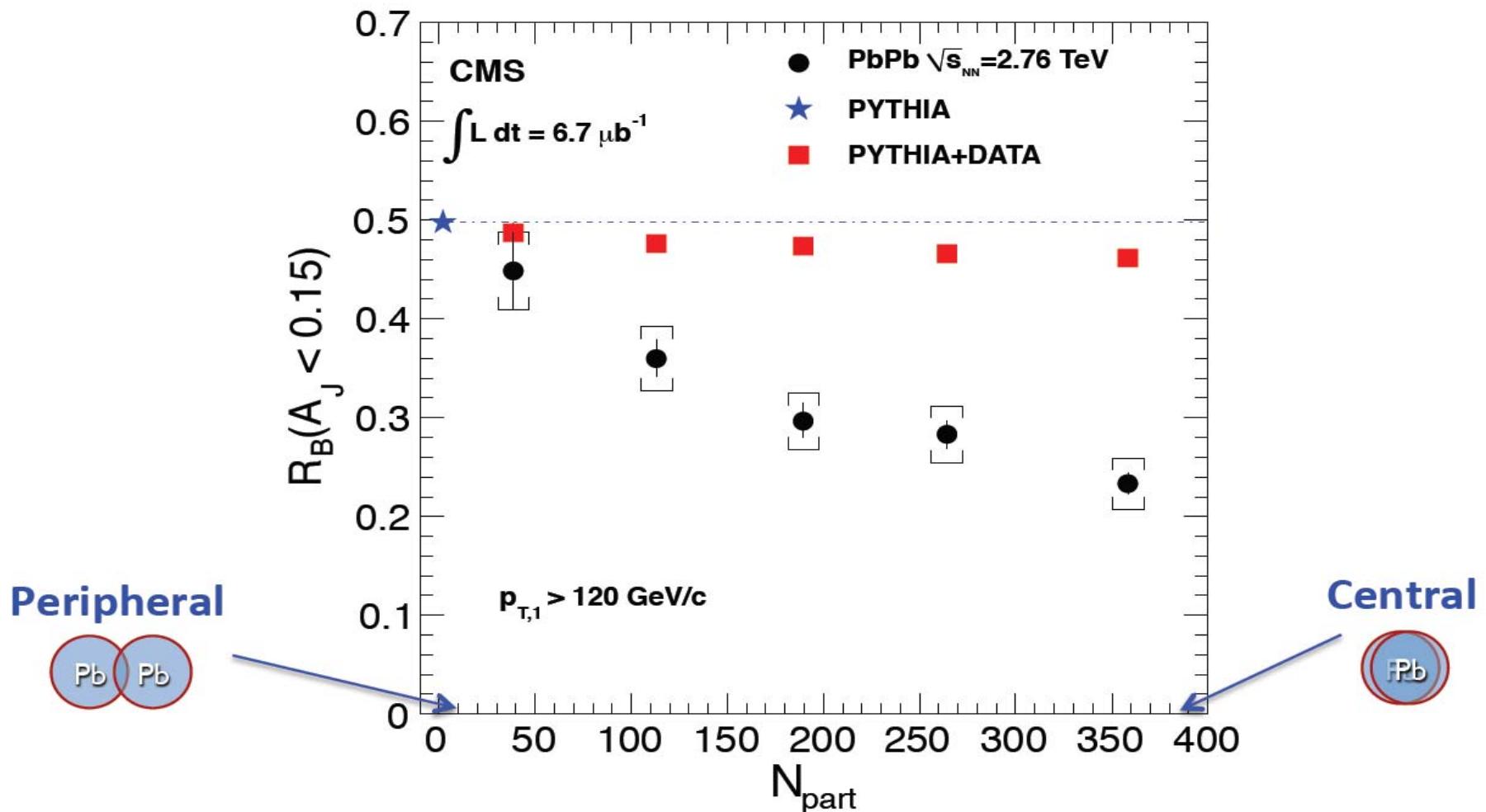


Direct observation of jet quenching

A strong increase in the fraction of highly unbalanced jets is seen by ATLAS and CMS in central PbPb collisions as compared with peripheral collisions and model calculations, that is consistent with jet quenching in hot quark-gluon medium



Imbalance (asymmetry) of dijet energy

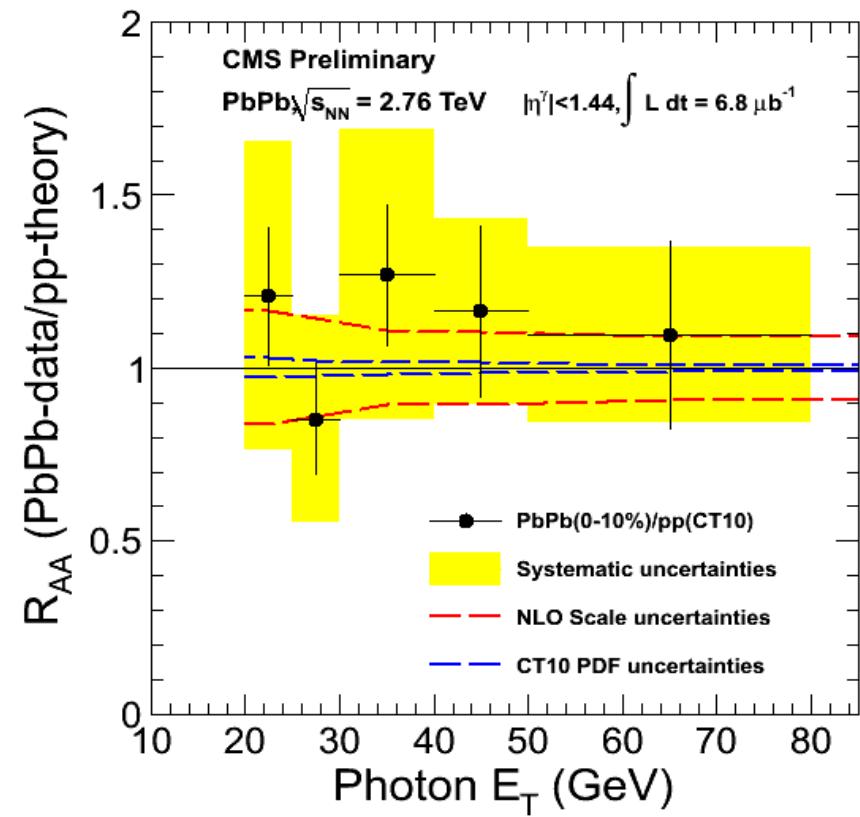
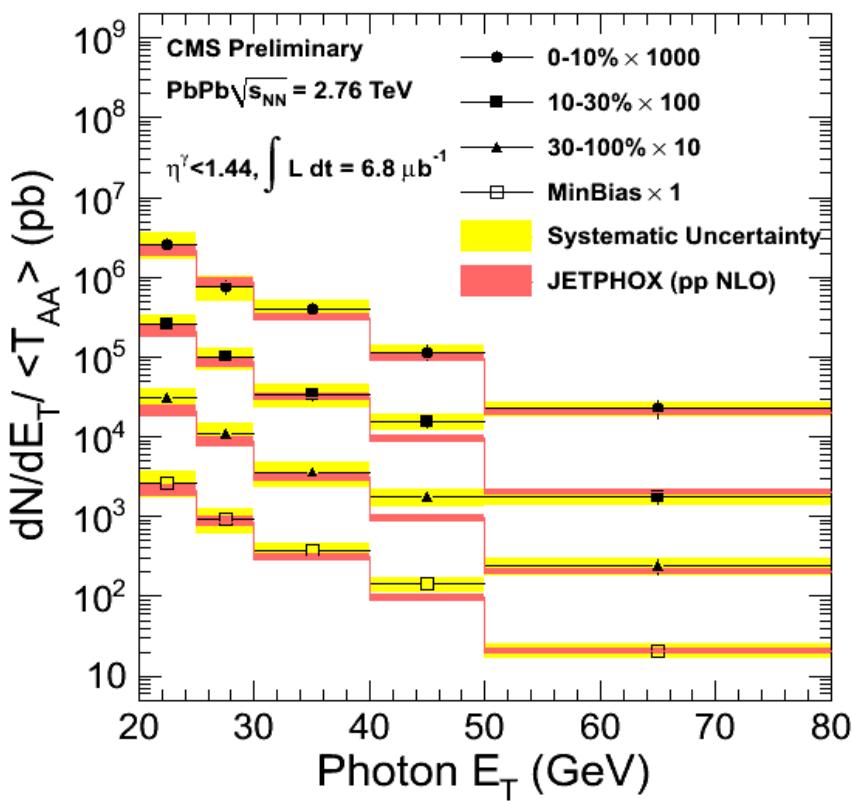


Fraction of “balanced” dijets ($A_J < 0.15$) drops with PbPb centrality & is constant for MC

Prompt photons E_T-spectra and R_{AA}

$$R_{AA} = \frac{\sigma_{pp}^{inel}}{\langle N_{coll} \rangle} \frac{d^2 N_{AA} / dp_T d\eta}{d^2 \sigma_{pp} / dp_T d\eta} \sim \frac{\text{"QCD Medium"}}{\text{"QCD Vacuum"}}$$

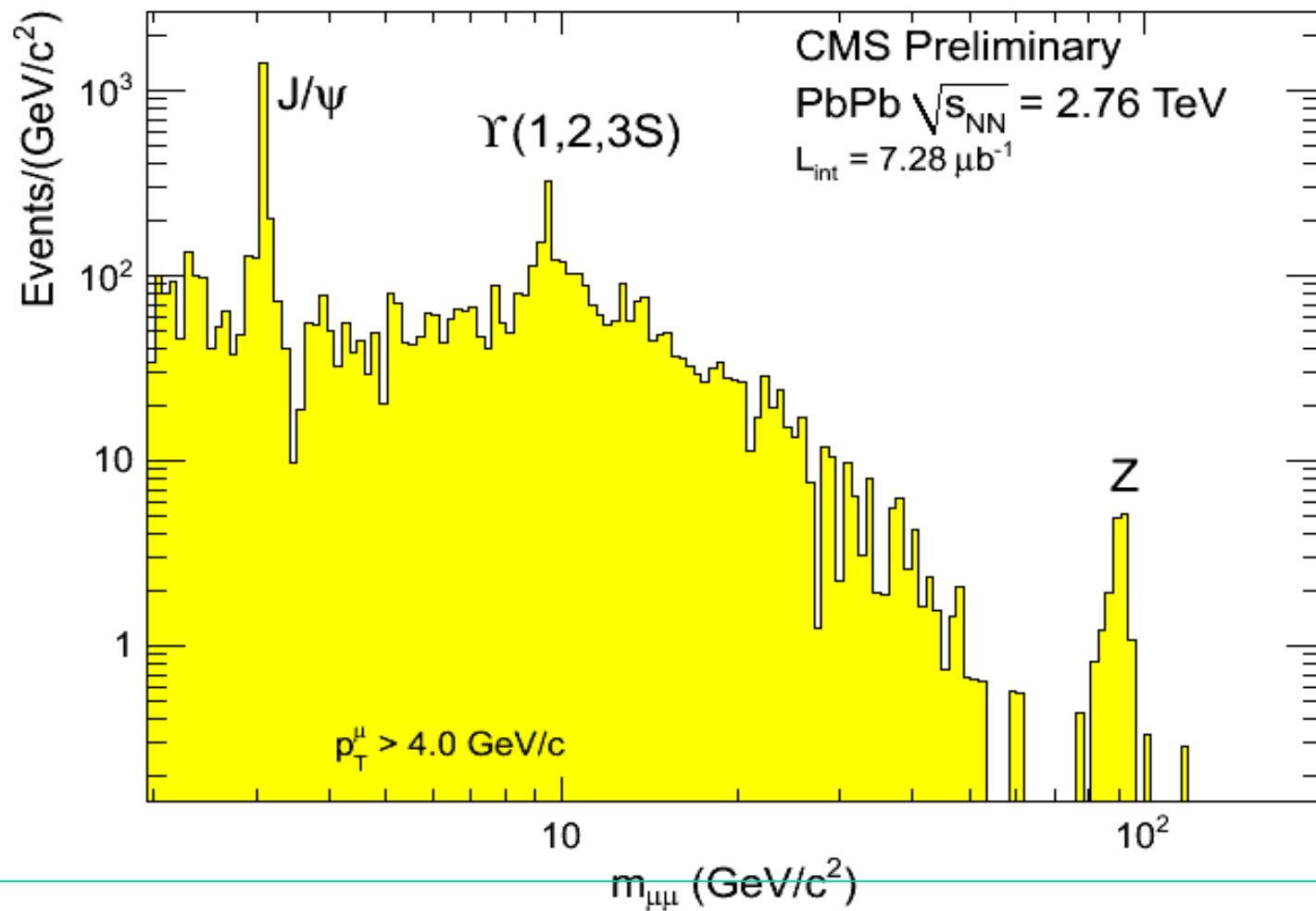
R_{AA}>1: enhancement
 R_{AA}=1: no medium effect
 R_{AA}<1: suppression



Energy spectrum is consistent with next-to-leading order pQCD calculations

Within uncertainties, no violation of binary NN collision scaling is observed

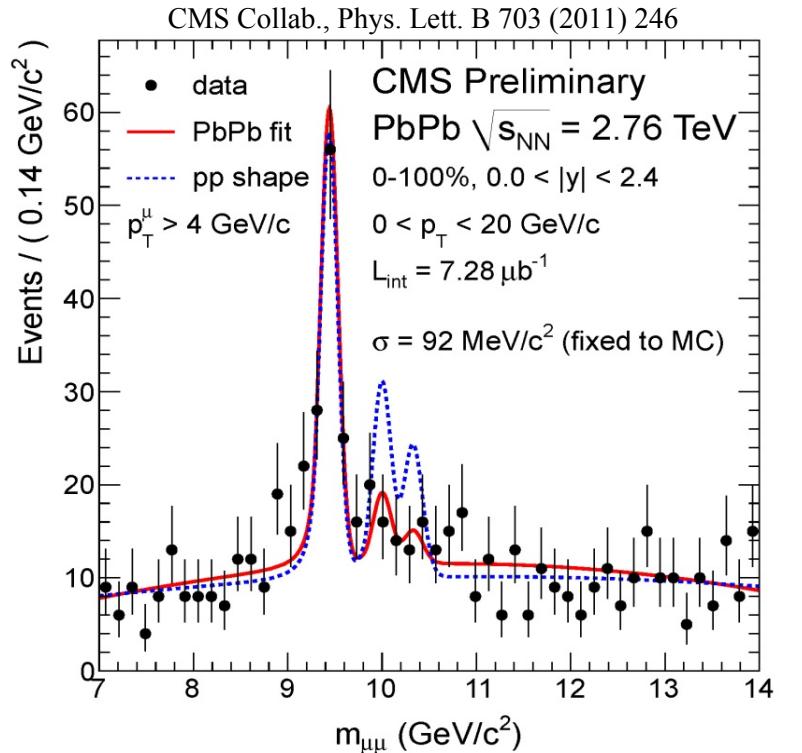
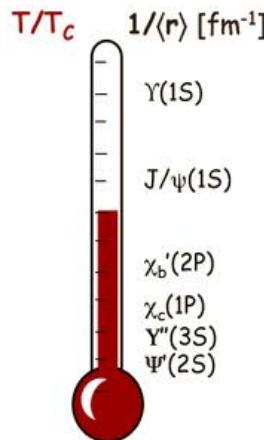
Dimuon mass spectrum



J/ ψ , Y(1S, 2S, 3S) and Z 0 peaks are clearly visible
(best mass resolution of all LHC experiments in heavy ion collisions) 40

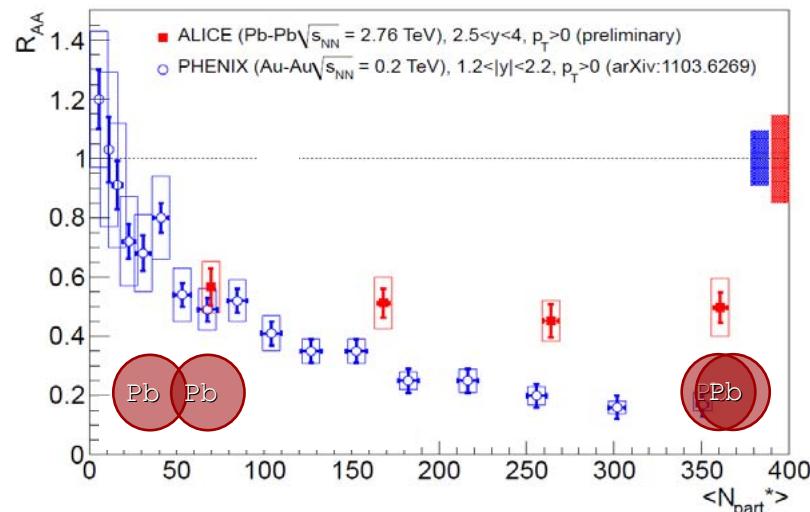
Quarkonium melting

CMS observes for the first time an additional suppression of excited Υ -states ($2S+3S$) relatively to $\Upsilon(1S)$ by a factor ~ 3 in PbPb vs. pp collisions, that is consistent with the Debye screening of colour charge in hot quark-gluon medium

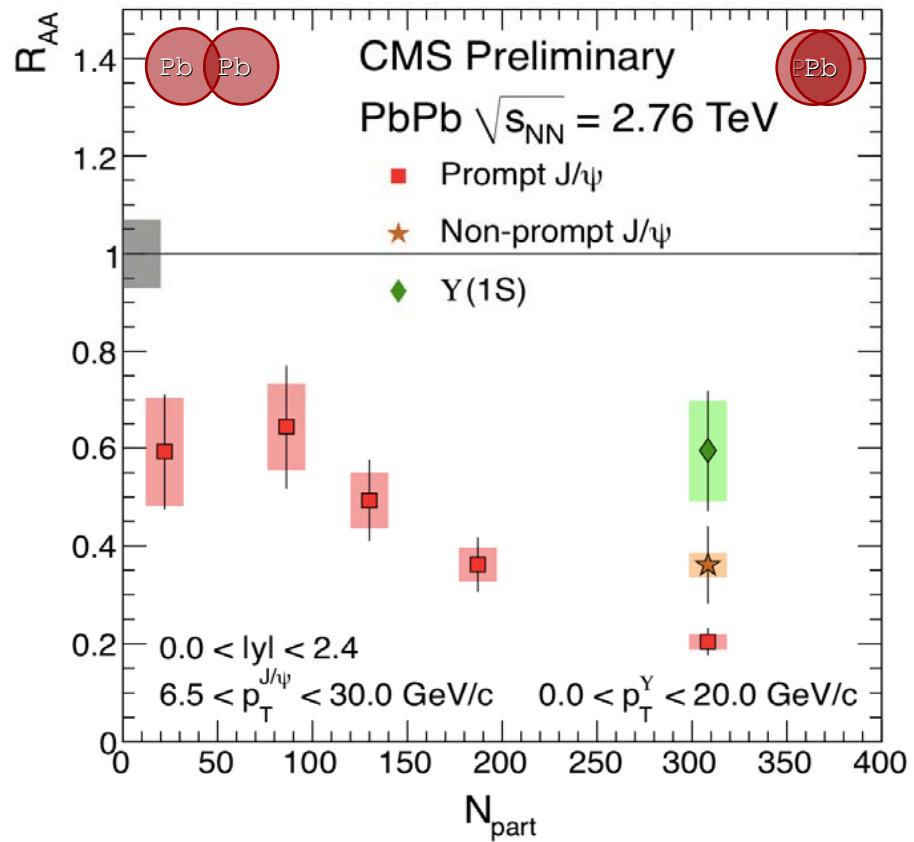
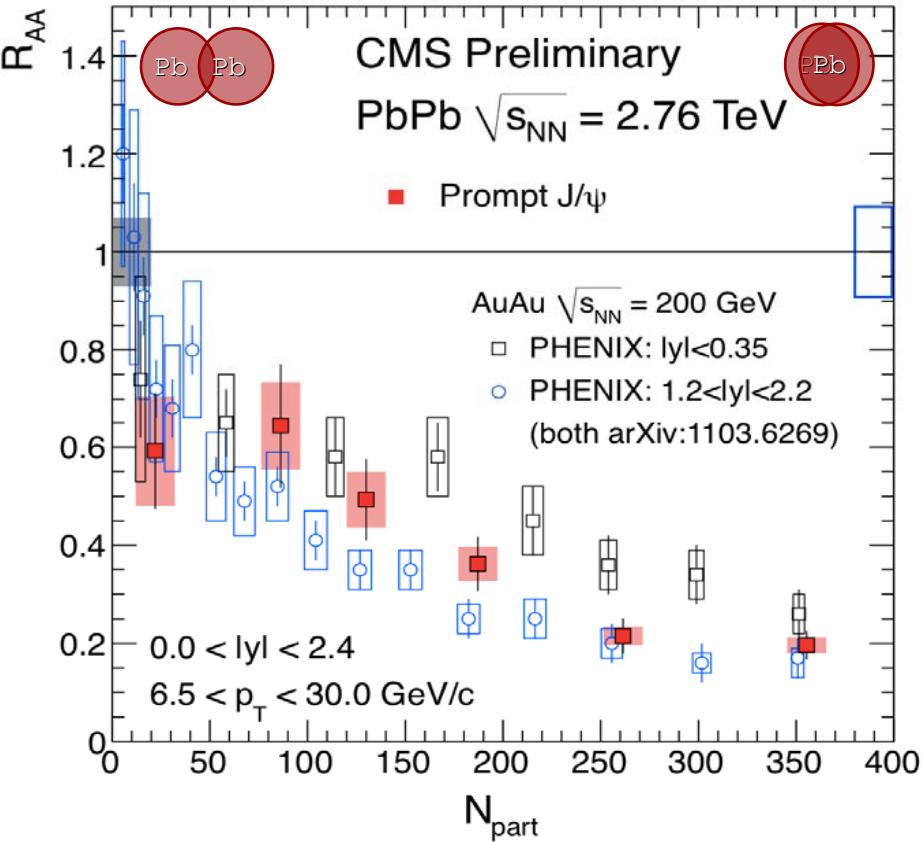


ALICE observes that J/ψ suppression factor R_{AA} for most central PbPb collisions at LHC is larger than one for AuAu collisions at RHIC (PHENIX experiment). Less J/ψ suppression at LHC than at RHIC looks surprisingly (recombination?)

ATLAS and CMS also measure J/ψ suppression but at much higher p_T ($> 6.5 \text{ GeV}/c$), where the suppression seems stronger than at low p_T



J/ ψ and Y suppression vs. centrality



Prompt J/ ψ 's are suppressed in central (peripheral) PbPb by a factor 5 (1.6) with respect to pp
(centrality dependence is similar to the one measured at RHIC, but in a different kinematic range)

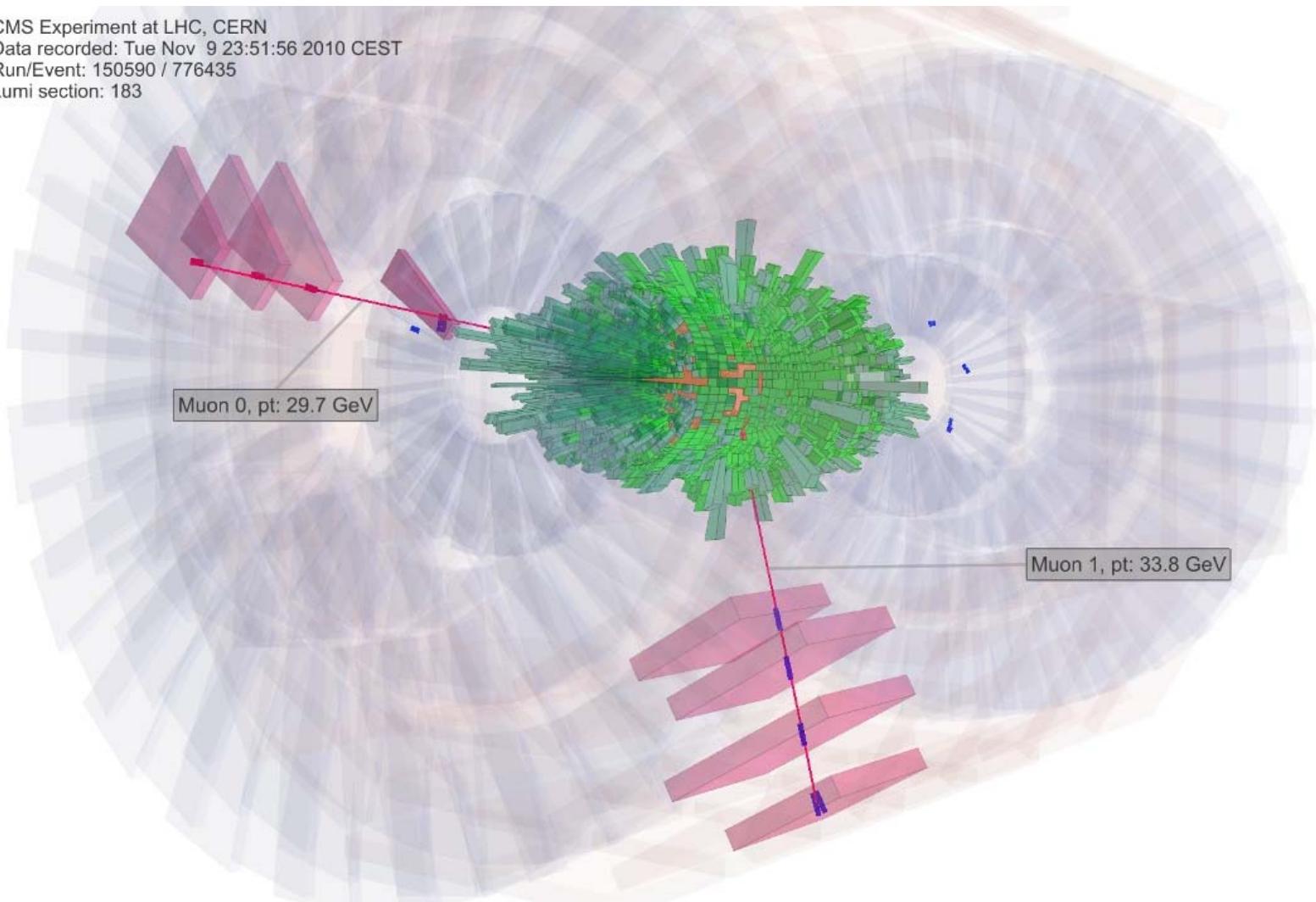
Secondary J/ ψ 's are suppressed in minimum bias PbPb by a factor of 2.8 with respect to pp
(first indication on medium-induced energy loss of b-quarks?)

Y's (1S) are suppressed in central PbPb by a factor 1.5 with respect to pp
(sequential melting?)

$Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ in PbPb collisions at CMS

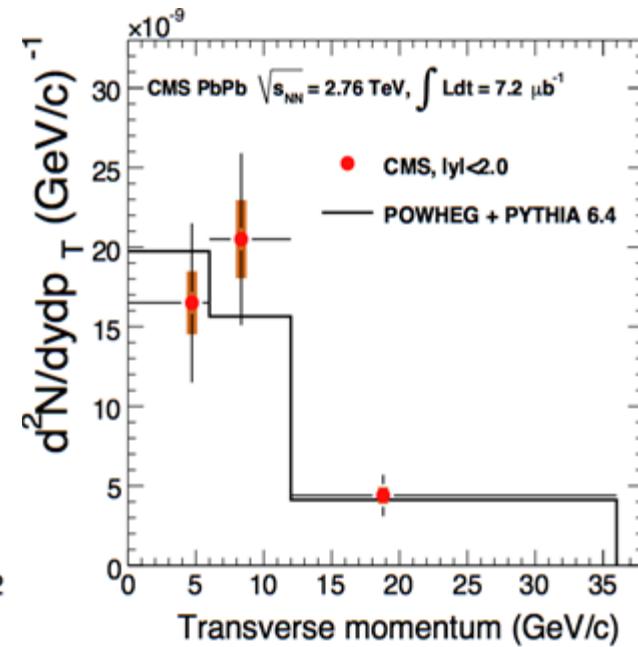
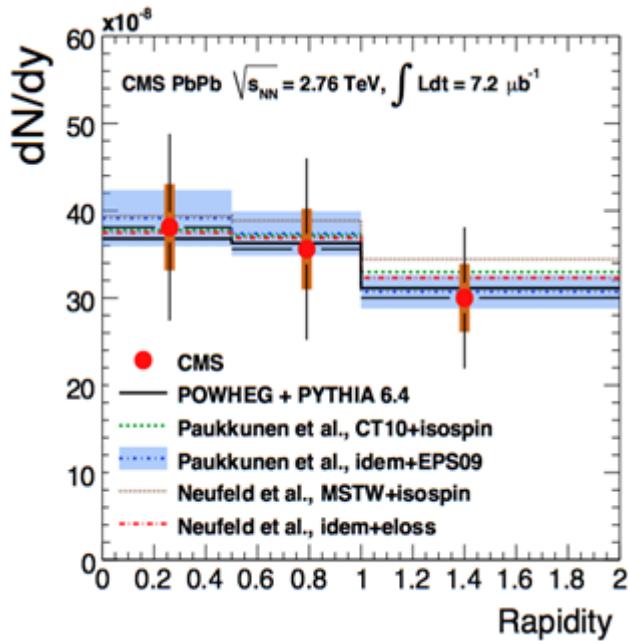
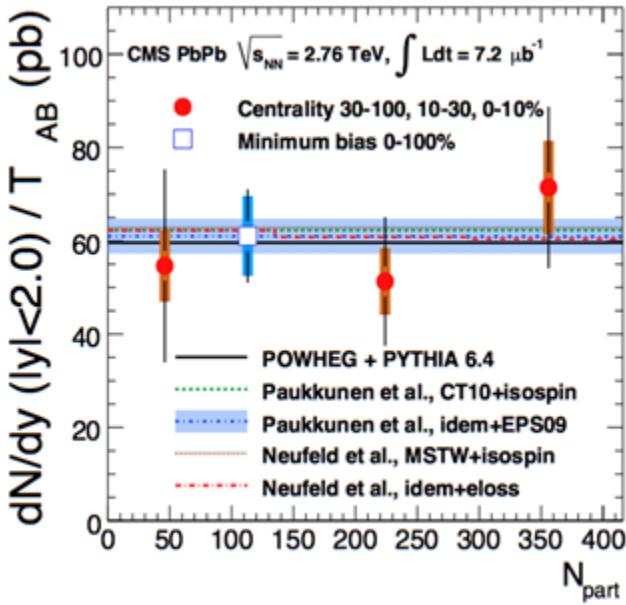


CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Tue Nov 9 23:51:56 2010 CEST
Run/Event: 150590 / 776435
Lumi section: 183



Z-boson is not affected by the medium, and so probes initial state (PDF, nuclear shadowing) 43

Z^0 vs. centrality, y and p_T



Kinematic distributions are consistent with pQCD calculations

Within uncertainties, no violation of binary NN collision scaling is observed

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведение ускорительных экспериментов с пучками тяжелых ионов на коллайдерах нового поколения RHIC (BNL) и LHC (CERN) дает уникальную возможность воссоздания в лабораторных условиях материи, которая существовала на самых ранних стадиях развития Вселенной - кварк-глюонной плазмы (КГП), образование которой при достаточно высоких температурах и/или плотностях барионного заряда является одним из основных предсказаний теории ядерных взаимодействий (квантовой хромодинамики). Поиск критической точки в пространстве (температура – барохимический потенциал), в которой тип кварк-адронного фазового перехода меняется с первого рода на плавный «кроссовер», стимулировал экспериментальные исследования при более низких энергиях на RHIC и SPS (CERN), а также на коллайдере RHIC. ~~Полученные на коллайдерах RHIC и SPS экспериментальные данные по различным каналам рождения частиц указывают на то, что сильновзаимодействующая КГП (“кварк-глюонная жидкость”) вероятнее всего формируется в наиболее центральных соударениях тяжелых ионов, хотя возможность альтернативных интерпретаций по прежнему обсуждается в научной литературе.~~ На коллайдере LHC текущая энергия столкновений в 14 раз больше чем на RHIC, что открывает новый режим физики взаимодействий тяжелых ионов с важной ролью жестких процессов рождения. На основе анализа первых данных LHC по соударениям ионов свинца при энергии 2.76 А ТэВ уже наблюден ряд новых эффектов (прямое наблюдения эффекта гашения струй, подавление выхода возбужденных состояний Y -мезонов, подавление выхода J/ψ -резонансов от распада B -мезонов). Будущие измерения с повышенной светимостью и энергией) позволят провести более дифференциальный анализ новых эффектов и получить фундаментальные знания о свойствах кварк-глюонной материи.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СЛАЙДЫ

Восстановление “голых” масс

- Пленевые кварки в адронах динамически приобретают дополнительную массу (~ 350 МэВ) за счет эффекта удержания сильными взаимодействиями
- Ожидается, что деконфайнмент сопровождается восстановлением (реконструкцией) масс до их “голых” значений, которые они имеют в Лагранжиане
- Как только кварки становятся свободными, их массы становятся равными голым значениям:
 - $m(u,d)$: ~ 350 МэВ \rightarrow уменьшается до несколько МэВ
 - $m(s)$: ~ 500 МэВ \rightarrow уменьшается до ~ 150 МэВ
- (Этот эффект обычно называют частичным восстановлением киральной симметрии “Partial Restoration of Chiral Symmetry”. Киральная симметрия: фермионы и антифермионы имеют противоположные спиральности. Точная симметрия возможна только для безмассовых частиц, поэтому здесь восстановление – только частично)⁴⁷

КГП как идеальный газ

- В простейшей модели КГП представляет собой идеальный газ из невзаимодействующих безмассовых кварков (нулевой химический потенциал) и глюонов
- Уравнение состояния:

$$\varepsilon = k \frac{\pi^2}{30} \frac{T^4}{(\hbar c)^3} + B \rightarrow \text{energy} \quad \text{density}$$

$$p = k \frac{\pi^2}{90} \frac{T^4}{(\hbar c)^3} - B \rightarrow \text{pressure}$$

$$s = \frac{\varepsilon + p}{T} = \frac{4}{3} k \frac{\pi^2}{30} T^3 \rightarrow \text{entropy}$$

Т – температура газа

B – давление в мешке (обычно $B \sim 0.4$ ГэВ/фм³)

к – число степеней свободы

КГП как идеальный газ

$$k = (2 \bullet 8 + \frac{7}{8} \bullet 2 \bullet 3 \bullet 2 \bullet N_f)$$

2 – число проекций спина

8 – число глюонов

3 – число цветов

2 – вырожденность по состоянию q anti_q

N_f – число ароматов (обычно берут N_f = 3)

$$T_\varepsilon = \left(\frac{\varepsilon - B}{1953} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Температура через плотность

$$T_s = \left(\frac{s}{2605} \right)^{\frac{1}{3}}$$

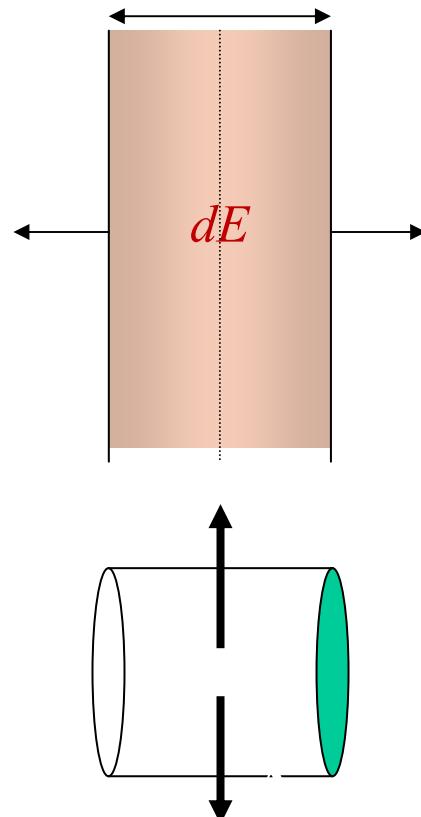
Температура через энтропию

Формула Бьёркена

Для оценки плотности энергии, достигаемой в начальной стадии столкновения, можно вычислить энергию, уносимую продуктами столкновения. Используются цилиндрические координаты (одномерная скейлинговая гидродинамика Бьёркена, описывающая лоренц-инвариантное движение материи, 1983):

$$\tau = (t^2 - z^2)^{1/2} \quad \eta = \frac{1}{2} \ln \frac{t+z}{t-z} \quad \vec{r} \equiv \{x, y\} = \{r \cos \phi, r \sin \phi\} \quad x^\mu = \{r \cos \eta, \vec{r}, r \sin \eta\}$$

Рассмотрим тонкий цилиндрический блок из продольно расширяющейся материи с площадью S и длиной dz за собственное время τ центра масс в центре блока скорость продуктов равна $v=0$



$$dv = c d\beta = c dy \text{ (non rel.: } y = \beta)$$

$$dz = \tau dv = c \tau dy$$

$$dV = S dz = S c \tau dy$$

$$dE = \varepsilon dV$$

$$\varepsilon = \frac{1}{S c \tau} \frac{dE}{dy} \Big|_{y=0}$$

Bjorken's formula

Зная спектр по \mathbf{p}_T для отдельных частиц и их античастиц, можно вычислить поперечную массу \mathbf{m}_T и оценить плотность энергии по формуле Бьёркена

$$\varepsilon = \frac{1}{\pi R^2 \tau} \frac{d \langle E_T \rangle}{dy}$$

где $d\langle E_T \rangle = \langle m_T \rangle dN$. Т.к. мы хотим вычислить плотность энергии на начальной стадии процесса, то в качестве R мы возьмем радиус перекрывания дисков ядер, пренебрегая поперечным расширением. Время формирования часто берут равным $\tau \sim 1$ fm/c, исходя из соотношения неопределенности и типичной энергетической шкалой 200 МэВ. В этом случае для центральных соударений Au+Au при 200 А ГэВ:

$$\varepsilon \approx 5 \text{ ГэВ/фм}^3$$

Что должно рассматриваться как нижний предел. Это значение превышает плотность энергии ядер **в 30 раз**, а плотность бариона **в 10 раз**.

Выше плотности энергии, предсказываемой КХД для образования КГП, **в 5 раз. LHC?**

Множественность частиц, наблюдаемая на *RHIC*, указывает на возможность достижения плотности энергии (связанной с формированием «горячей» КХД-среды на начальной стадии столкновения), значительно превышающей плотность энергии «холодной» ядерной материи.

Уравнения релятивистской гидродинамики для идеальной жидкости

$$\partial_\mu T^{\mu\nu} = 0,$$

$$\partial_\mu N^\mu = 0.$$

$T^{\mu\nu}$ – тензор энергии-импульса,

N^μ – поток числа частиц через элемент жидкости μ ,

u^μ – локальная 4-х скорость элемента жидкости μ ,

ϵ – плотность энергии, n – плотность числа

$$T^{\mu\nu} = \epsilon u^\mu u^\nu - p g^{\mu\nu},$$

$$P^{\mu\nu} = g^{\mu\nu} - u^\mu u^\nu$$

$$N^\mu = n u^\mu.$$

5 уравнений для 5 независимых величин

Если заданы уравнение состояния $p=p(\epsilon)$ и начальные условия, в принципе, задача решается (численно или аналитически в некоторых приближениях).

$$\epsilon, n, u^\mu$$

Пример (1+1)-мерный скейлинг Бьёркена $n(\tau) \sim 1/\tau$

Уравнения релятивистской гидродинамики для вязкой жидкости

$$\partial_\mu T^{\mu\nu} = 0,$$

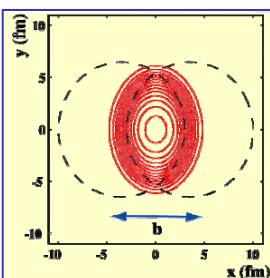
$$\partial_\mu N^\mu = 0.$$

$$T^{\mu\nu} = \varepsilon u^\mu u^\nu - P^{\mu\nu} (p + \Pi) - P^{\mu\nu\alpha\beta} \pi_{\alpha\beta},$$

$$N^\mu = n u^\mu - P^{\mu\nu} v_\nu.$$

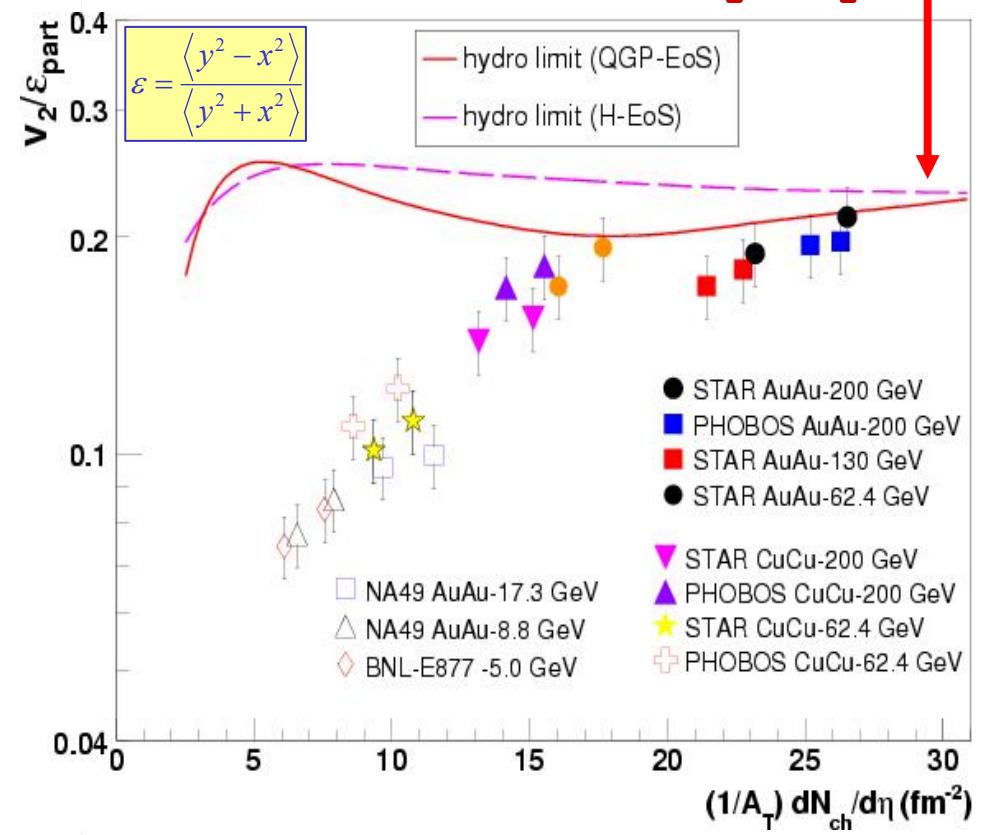
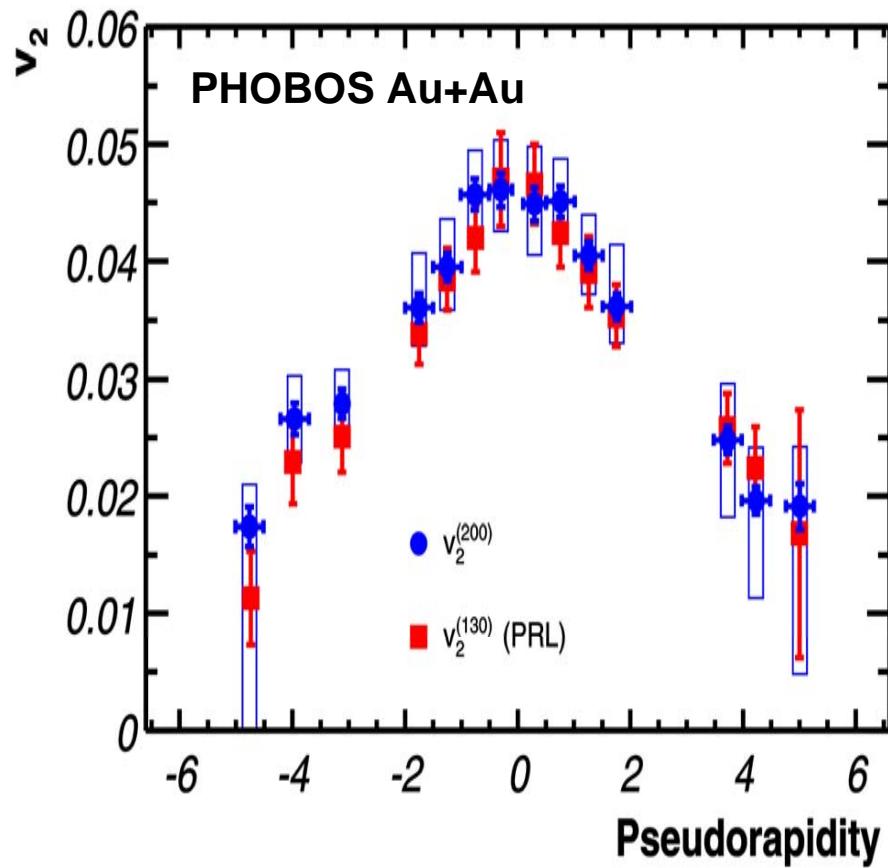
9 новых переменных – задача значительно усложняется !

$$\varepsilon, n, u^\mu, \Pi, \pi^{\mu\nu}, v^\mu$$



v_2 как функция η и \sqrt{s} (усредненное по центральности)

LHC – гидро-предел



Оценка максимальной вязкости, «позволяемой» измеренным на RHIC v_2 , дает в безразмерного отношения коэф. вязкости / энтропия, близкую к нижнему квантовому пределу $\eta/s = 1/(4\pi)$ (из AdS CFT) в центральной области $\eta \rightarrow$ почти идеальная жидкость. Большие значения v_2 – сигнал быстрой (< 1 фм/с) локальной термализации систем.

Перерассеяние и потери Энергии партонов в среде («jet quenching»)

Столкновительные потери

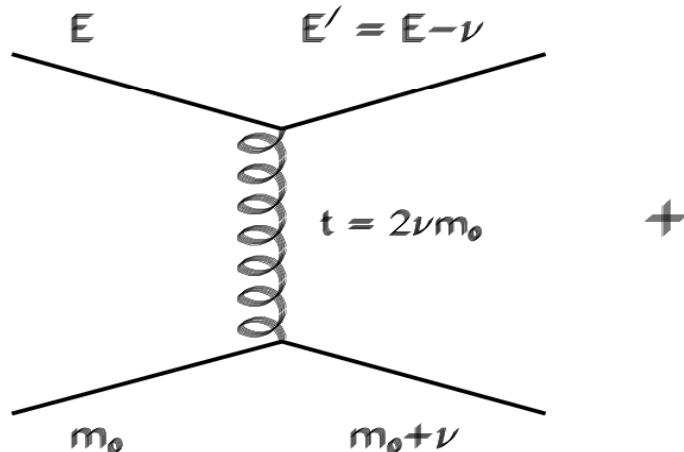
(некогерентная сумма)

Bjorken; Mrowzinski; Thoma;
Markov; Mustafa et al...

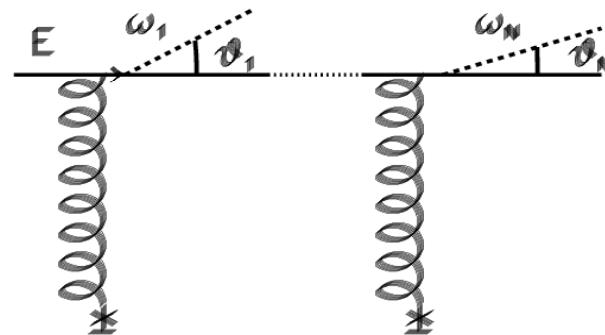
Радиационные потери

(когерентная интерференция)

Gylassy-Wang; BDMPS; GLV;
Zakharov; Wiedemann...



+

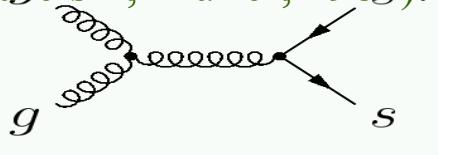


Усиление выхода странных частиц на RHIC

RHIC

В КГП ожидается обильное рождение пар $s\bar{s}$ за счет глюон-глюонного слияния

(Rafelski, Muller, 1982): $T \approx m_s \approx 150$ МэВ

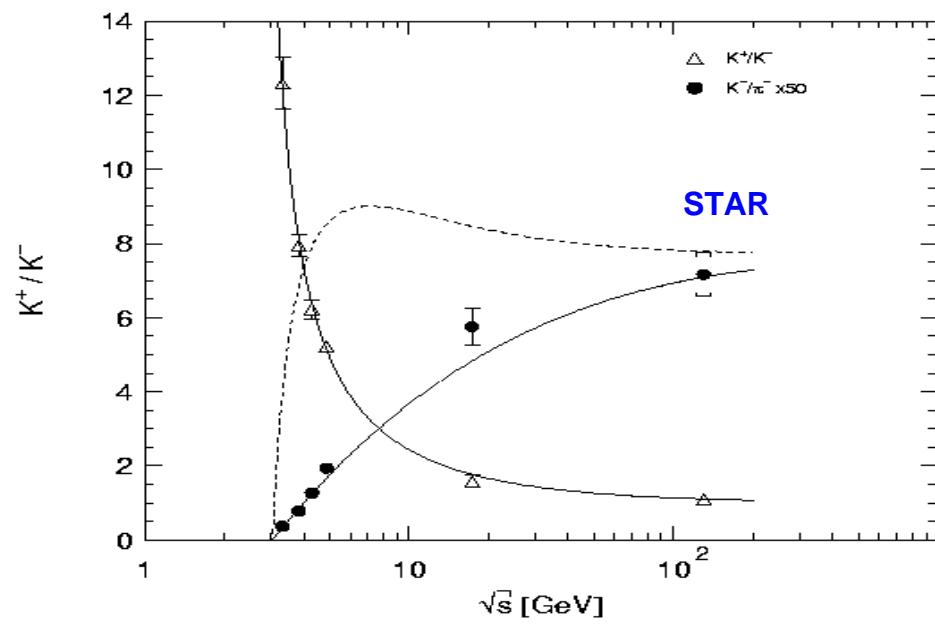
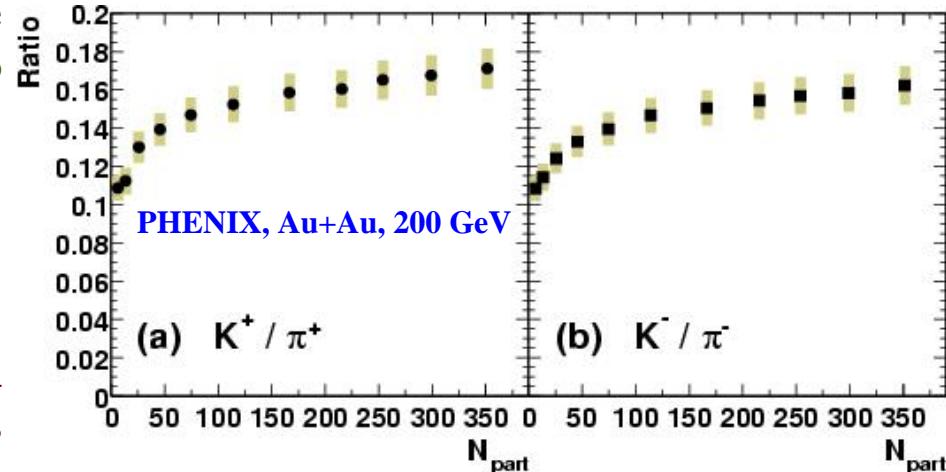


$$N(s) \propto \exp\left(-\frac{m_s}{T}\right)$$

При этом, если система обогащена барионами, т.е. число квarkов превышает число антиквакров, то образование странных квакров может быть усилено благодаря принципу Паули (ограничение на число занятых состояний) и образование пар ss может быть предпочтительнее, чем uu или dd .

Усиление выхода (N) должно быть больше для адронов с большей странностью (что и наблюдается в SPS и RHIC),

$N(\Omega^-) > N(\Xi^-) > N(\Lambda)$		
(sss)	(ssd)	(sud)
$ s = 3$	$ s = 2$	$ s = 1$



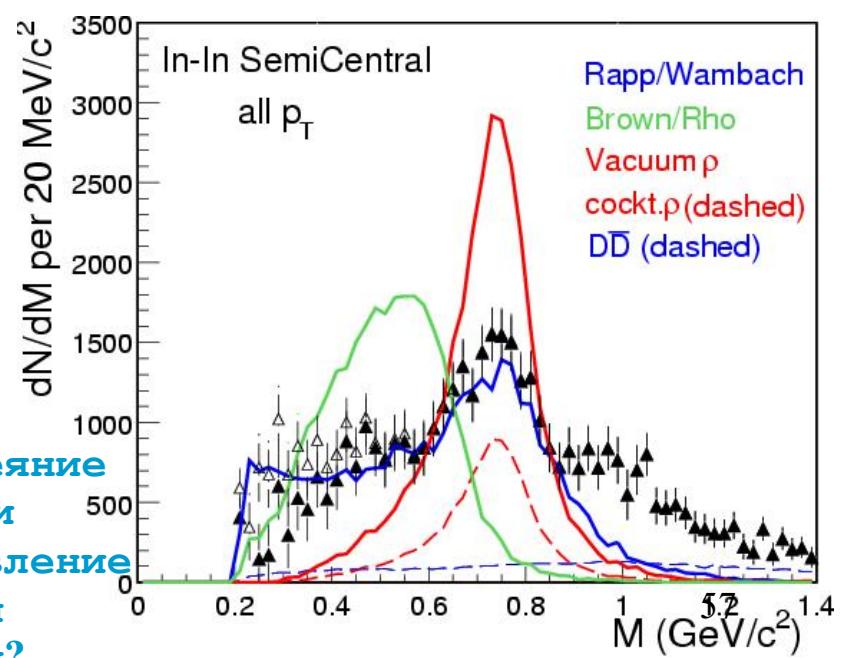
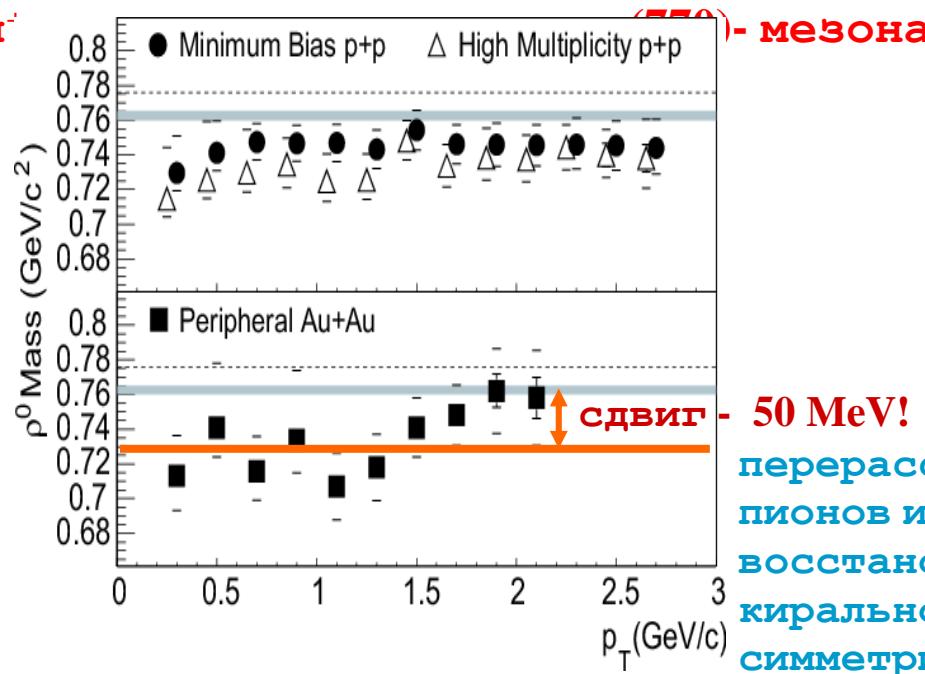
Однако усиление странности может быть описано в рамках адронных каскадных моделей без КГП.

Восстановление киральной симметрии и масса легких мезонов

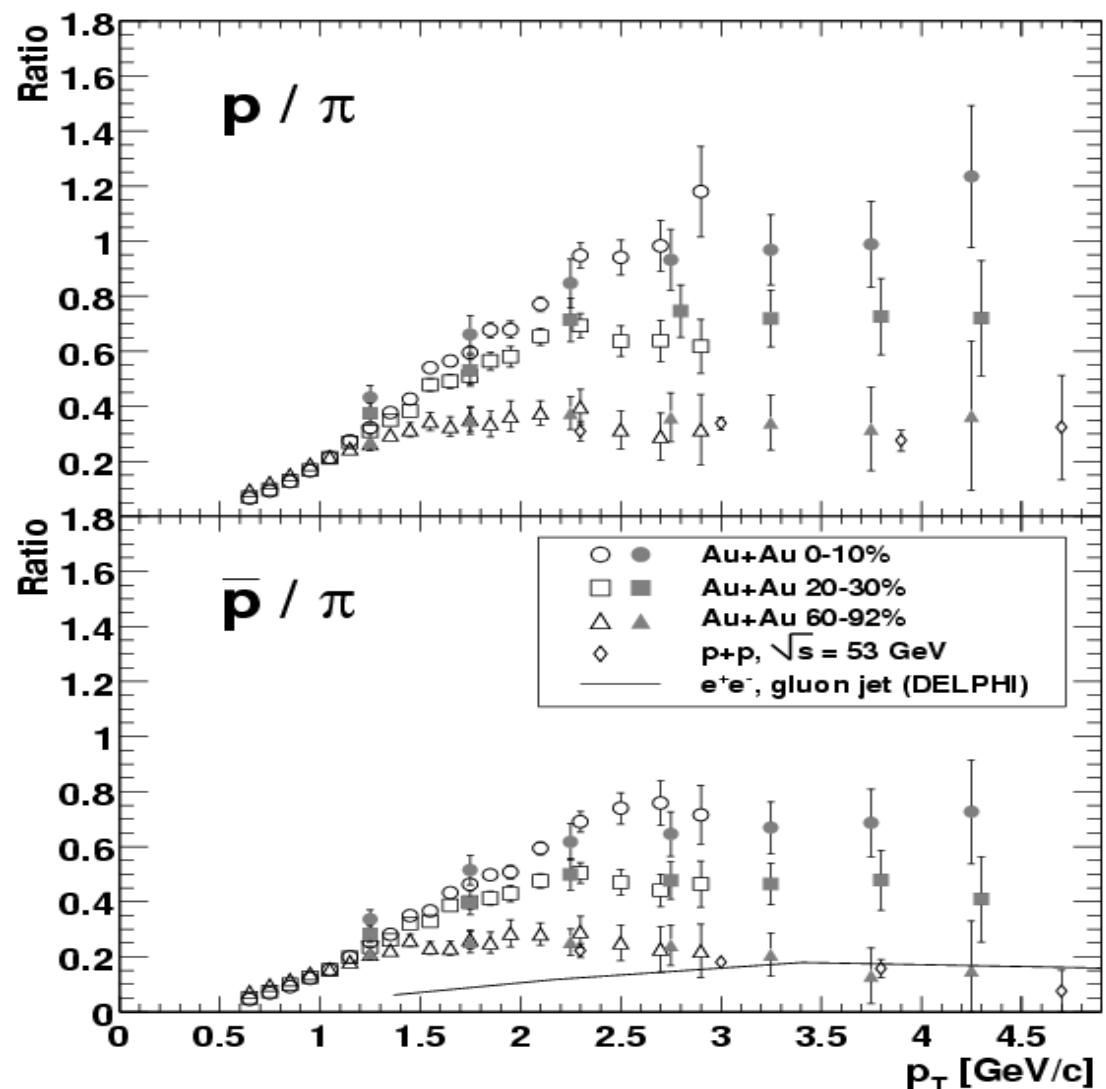
При деконфайнменте восстанавливается киральная симметрия и кварки теряют свою конституентную массу. Легкие мезоны могут раствориться (расплавиться) в КГП. По крайней мере, может исчезнуть или ослабиться связь между ними. В этом случае даже может исчезнуть расщепление по массам мезонов (в пределе киральной симметрии - вырождение по массам). Это приведет либо к изменению массы легких мезонов, либо к увеличению их резонансной ширины.

В эксперименте на SPS (NA60) при 17 ГэВ (In+In) $\rho(770)$ -мезон (в канале $\mu^+\mu^-$) меняет ширину, но не массу

Эксперимент на RHIC (STAR) с регистрацией



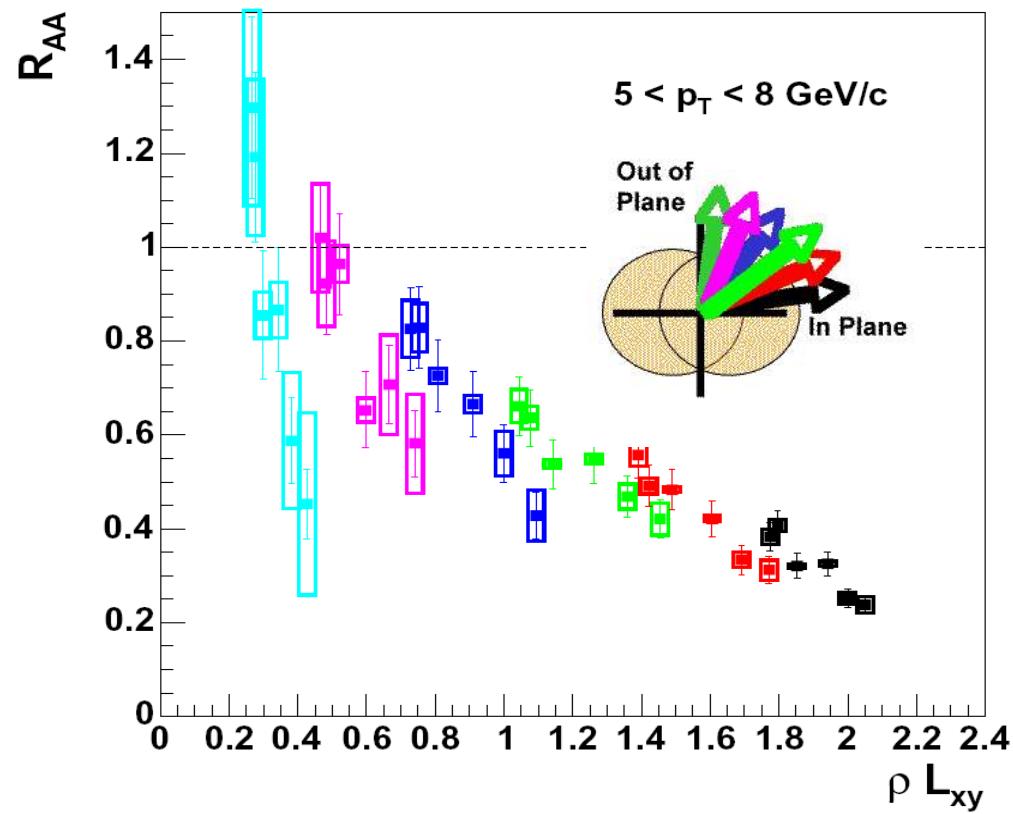
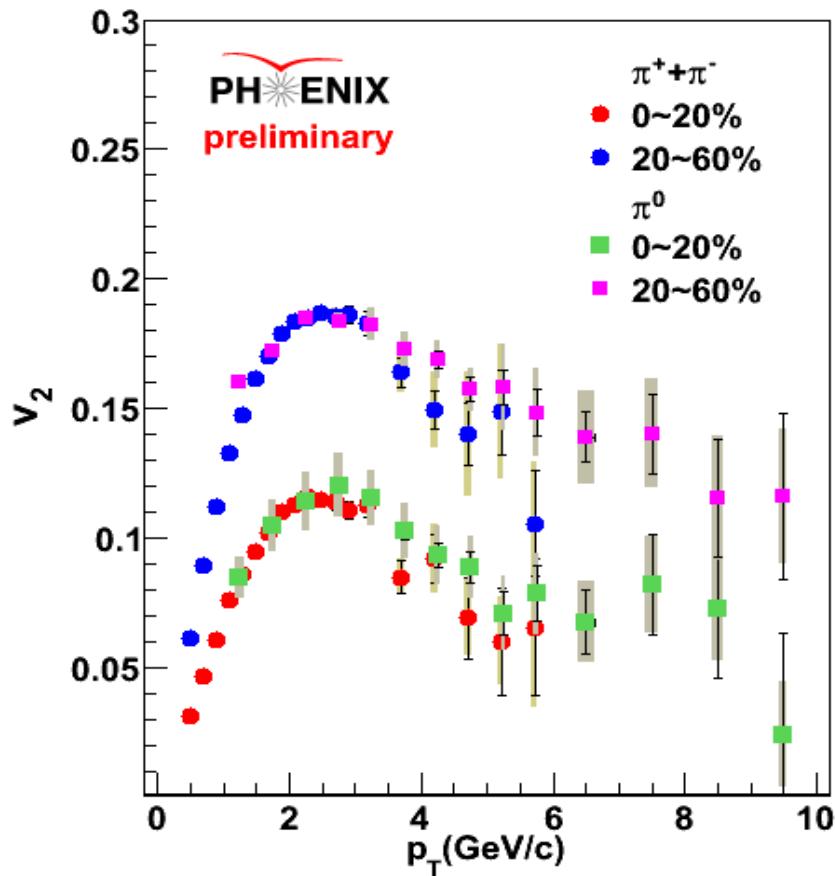
Аномальное отношение выхода барионов к мезонам при «промежуточных» p_T на RHIC



Не согласуется как с механизмом фрагментации
партонных струй,
так и с гидродинамической
моделью. Вероятна роль других
(непертурбативных) эффектов в
плотной среде, образующейся в
центральных соударениях Au+Au
(эффект в меньшей степени
наблюдается также на SPS, Pb+Pb)
кварковая рекомбинация?

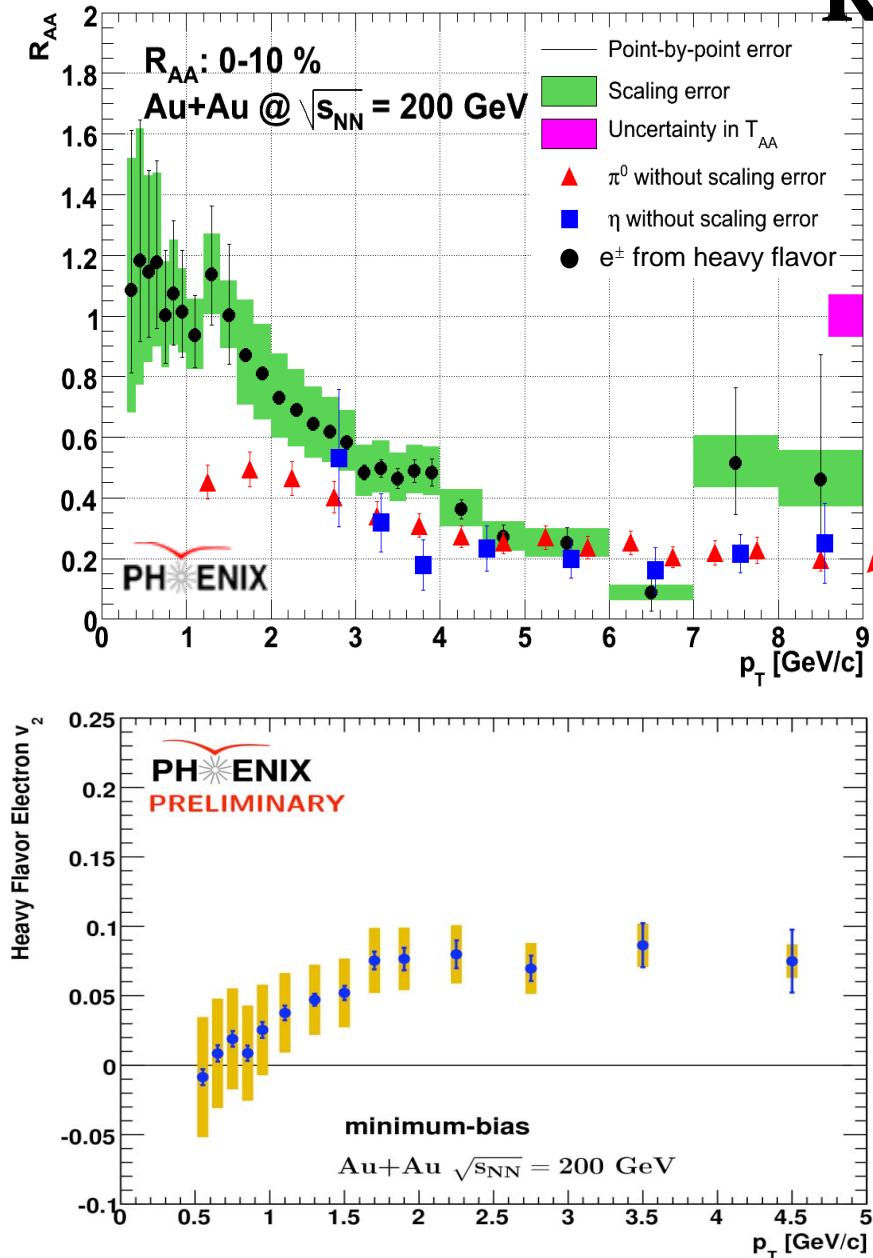
Азимутальная анизотропия «гашения струй» на RHIC (нечентральные соударения)

Au+ Au Collision $\sqrt{s}=200\text{GeV}$



Большое значение v_2 для жестких адронов и большая степень подавления в направлении, перпендикулярном плоскости реакции ($\phi \sim \pi/2$), чем в направлении плоскости реакции ($\phi \sim 0$) (PHENIX, STAR) согласуя со сценарием перерассеяния и потерь энергии жестких партонов в кип.

Подавление тяжелых кварков на RHIC



Фактор подавления для тяжелых D и B мезонов, измеренный по их лептонному распаду на e^\pm

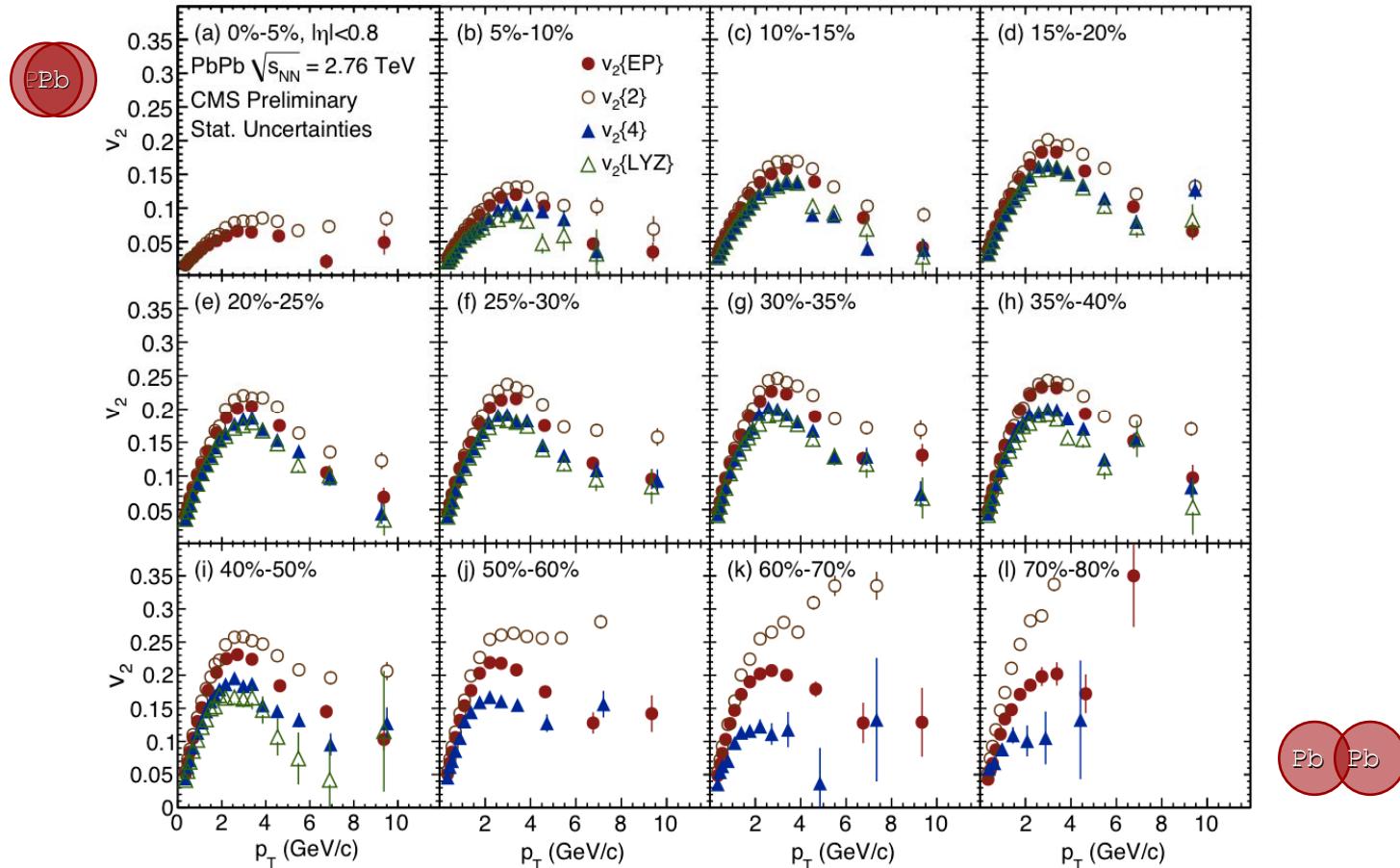
LHC (b-кварки) ?

Подавление мезонов с **тяжелыми кварками (b,c)**, такое же как с легкими (PHENIX, STAR)! Так как радиационные потери энергии легких кварков и глюонов должны быть больше чем массивных (эффект «мертвого конуса», Докшитцер-Харзееев, 2001), данный экспериментальный факт может указывать на важность механизма столкновительных потерь энергии тяжелых кварков или **диссоциации D и B мезонов в плотной среде**.
 $v_2(e) > 0$ – термализация с-кварков?

60

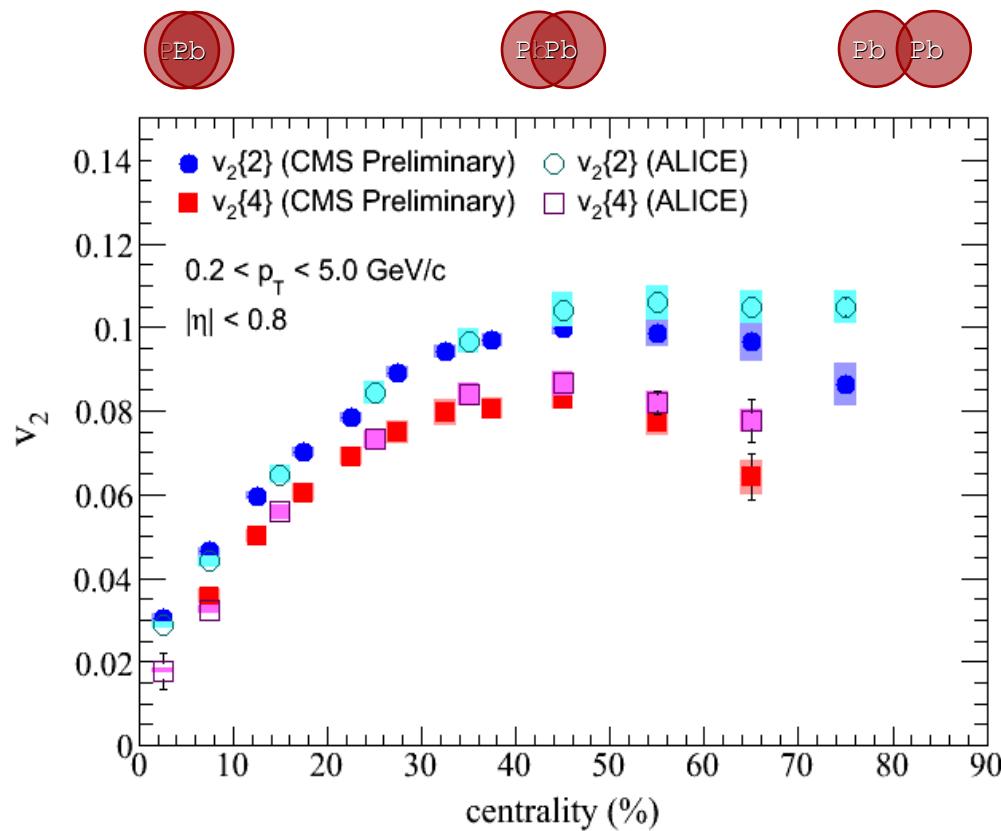
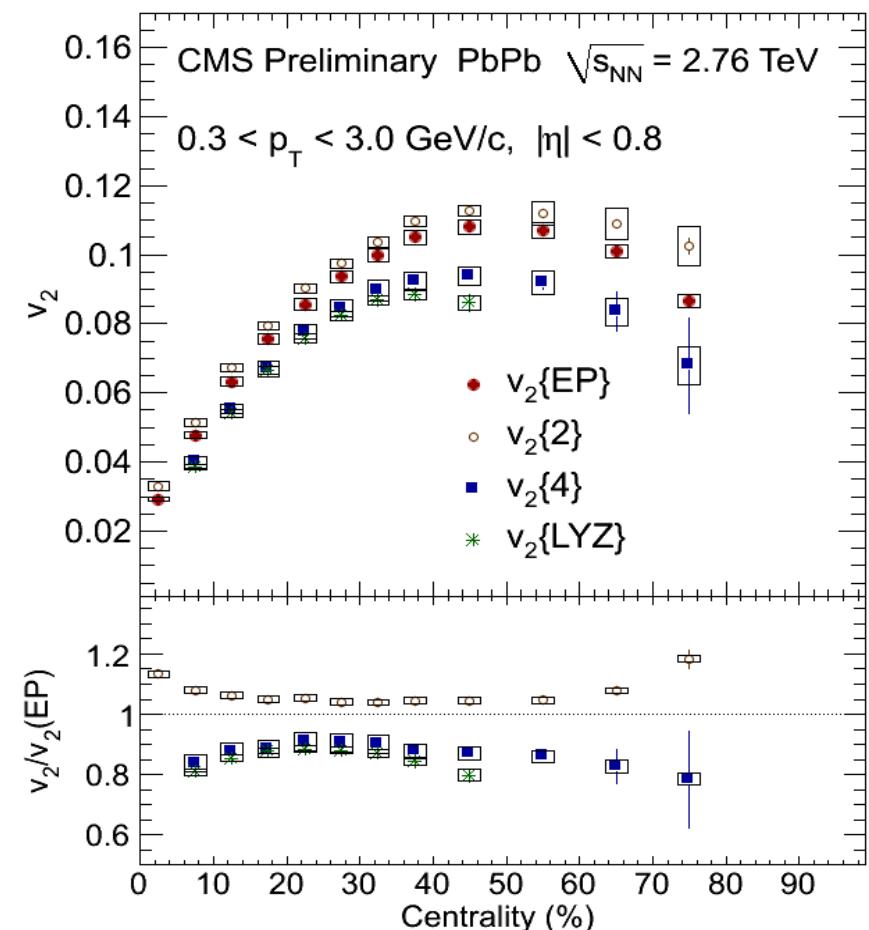
Elliptic flow v_2 vs. p_T and centrality

$$\frac{dN}{d^2 p_t dy} = \frac{dN}{2\pi p_t dp_t dy} (1 + v_2 \cos 2\varphi + 2v_4 \cos 4\varphi + \dots)$$



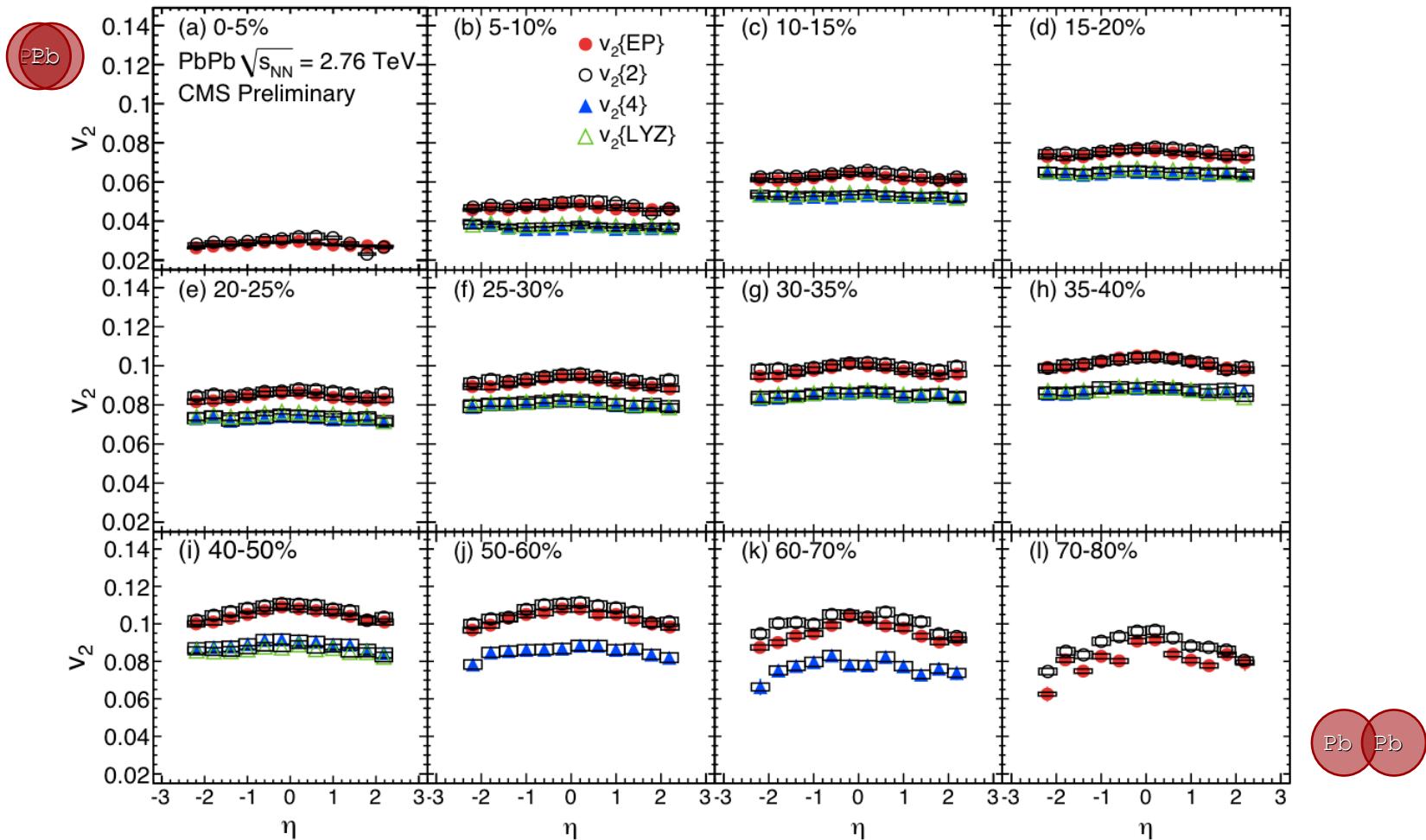
$v_2(p_T)$ peaks at ~ 3 GeV/c, finite at ~ 10 GeV/c, strongest for 40-50% centrality
 The different methods show differences consistent with the expected sensitivity to non-flow

Integral v_2 vs. centrality



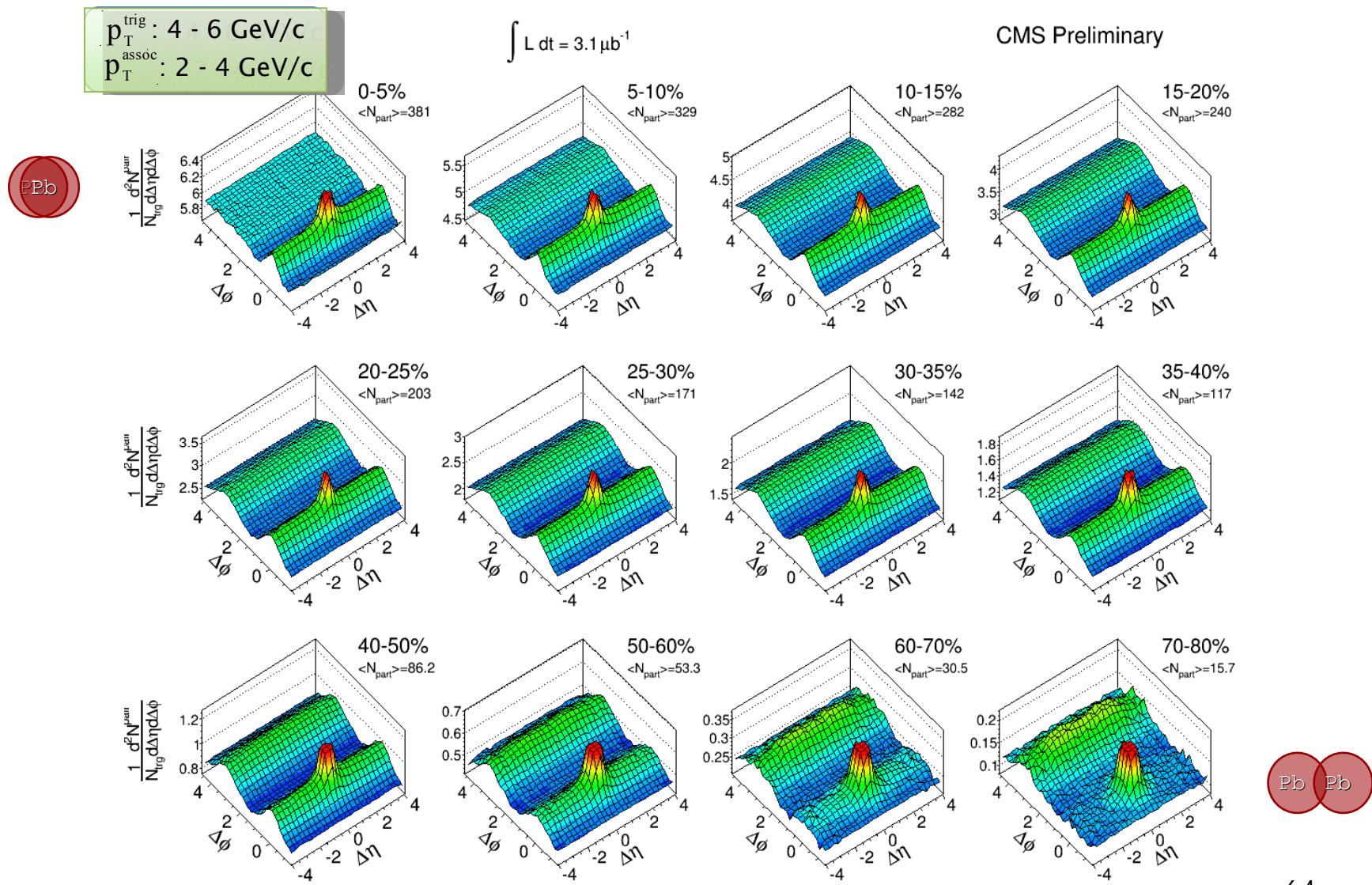
Integral v_2 increases with centrality reaching a maximum at the 40-50% centrality
 CMS and ALICE data are in the agreement (except in most peripheral events)

v_2 vs. η and centrality



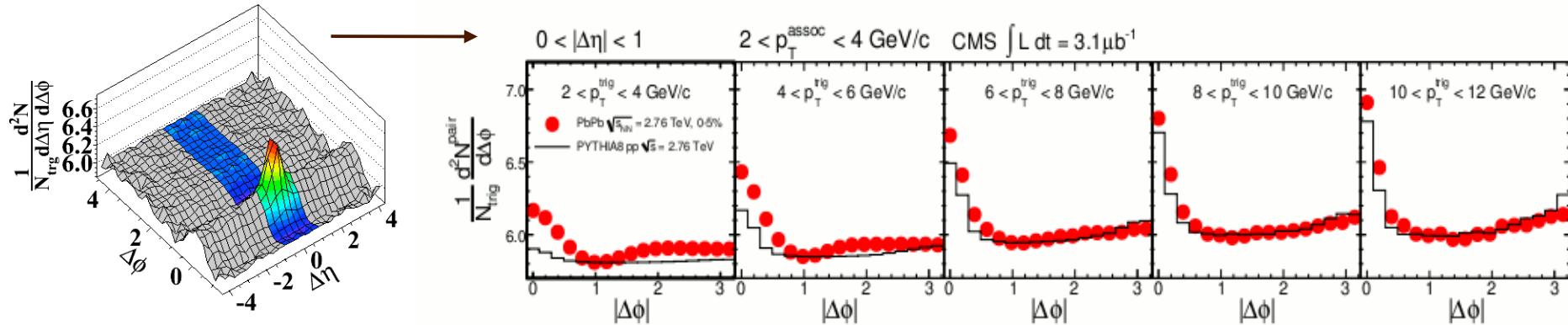
v_2 slowly decreases from mid-rapidity to forward rapidity
Stronger rapidity dependence is observed for the most peripheral collisions

Two-particle correlations vs. centrality

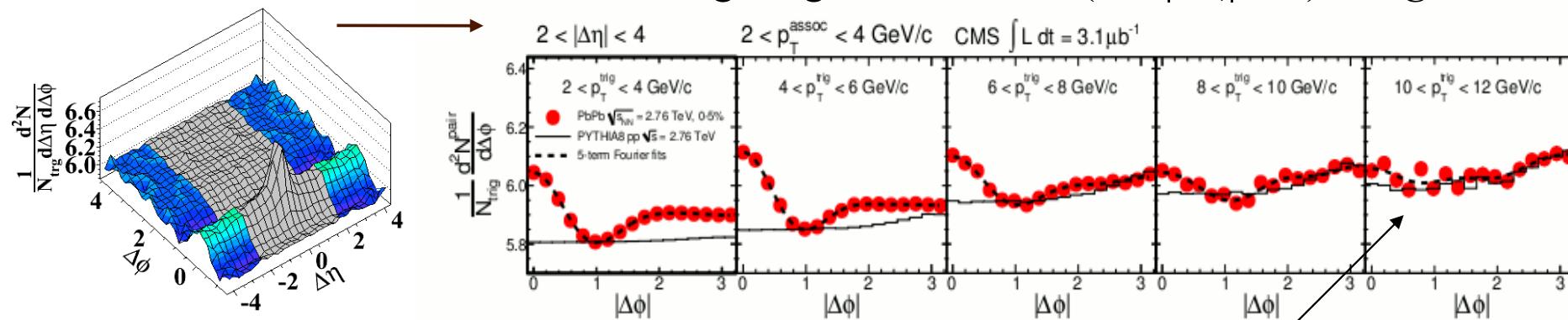


Two-particle correlations

Short range correlations ($0 < |\Delta\eta| < 1$): *Jet + Ridge*

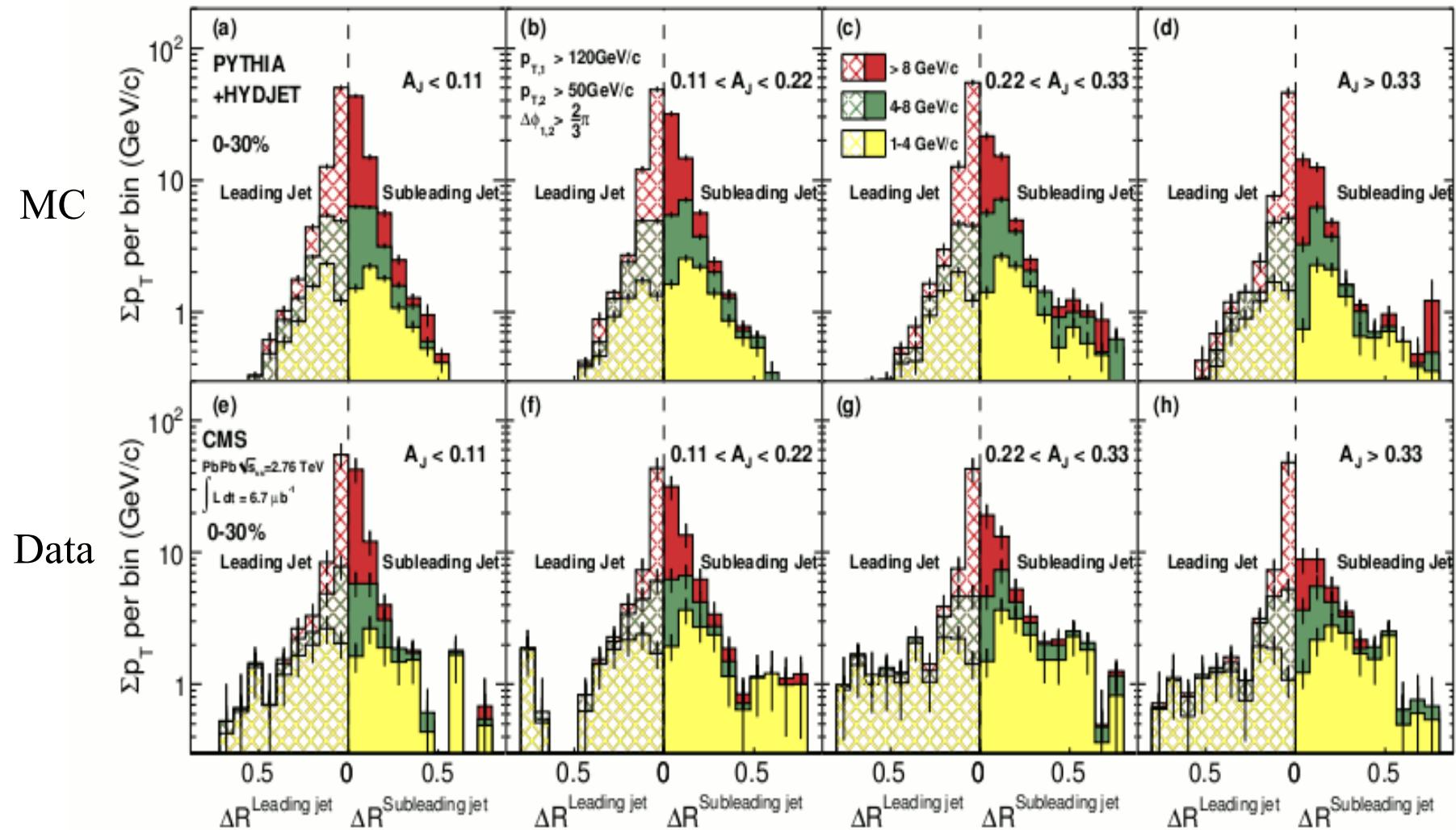


Long range correlations ($2 < |\Delta\eta| < 4$): *Ridge*



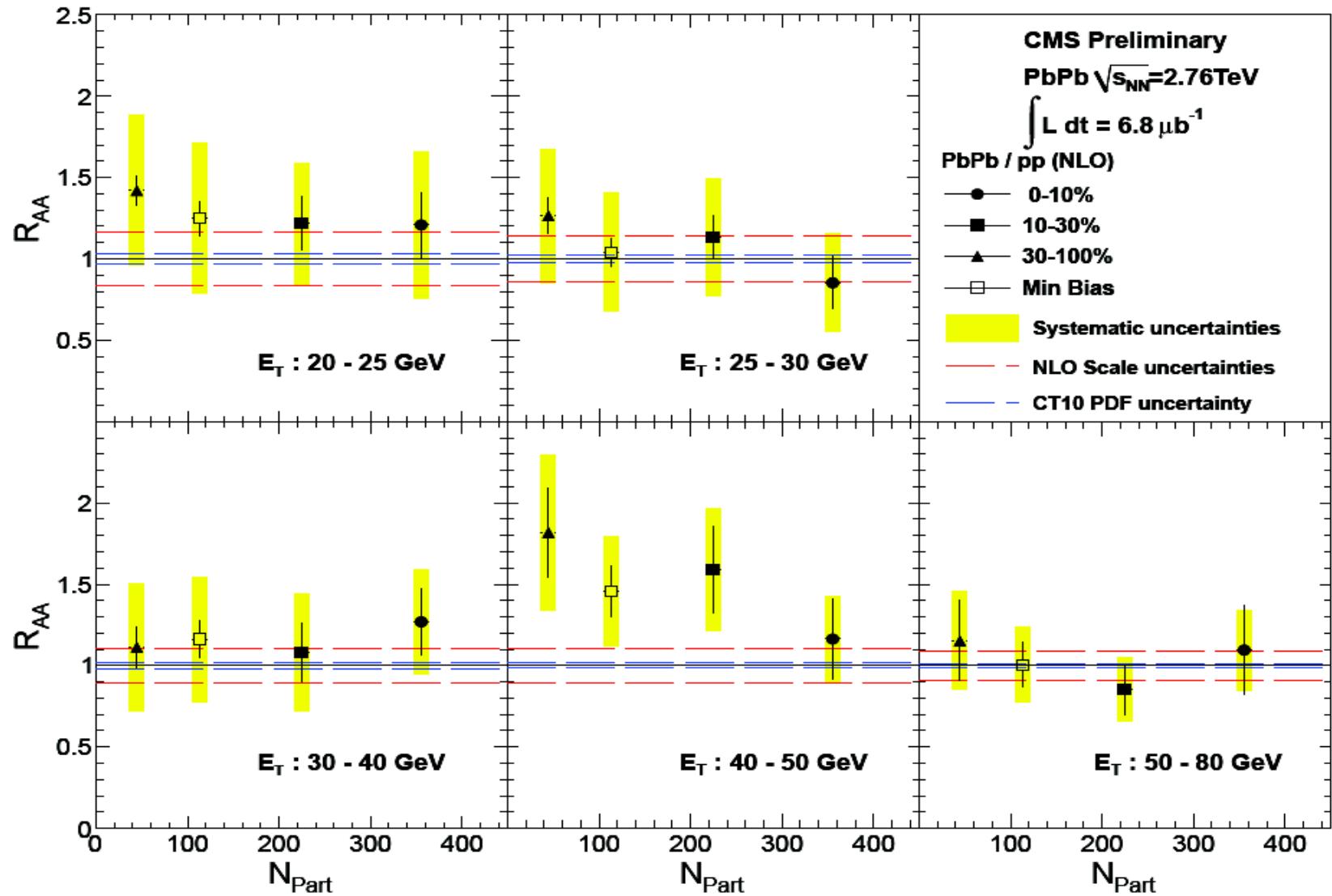
Ridge disappears at high p_T

Jet-track correlation



Relative contribution of low- p_T tracks grows with A_J & spreads at large distances to the jet axis

Prompt photons R_{AA} vs. centrality

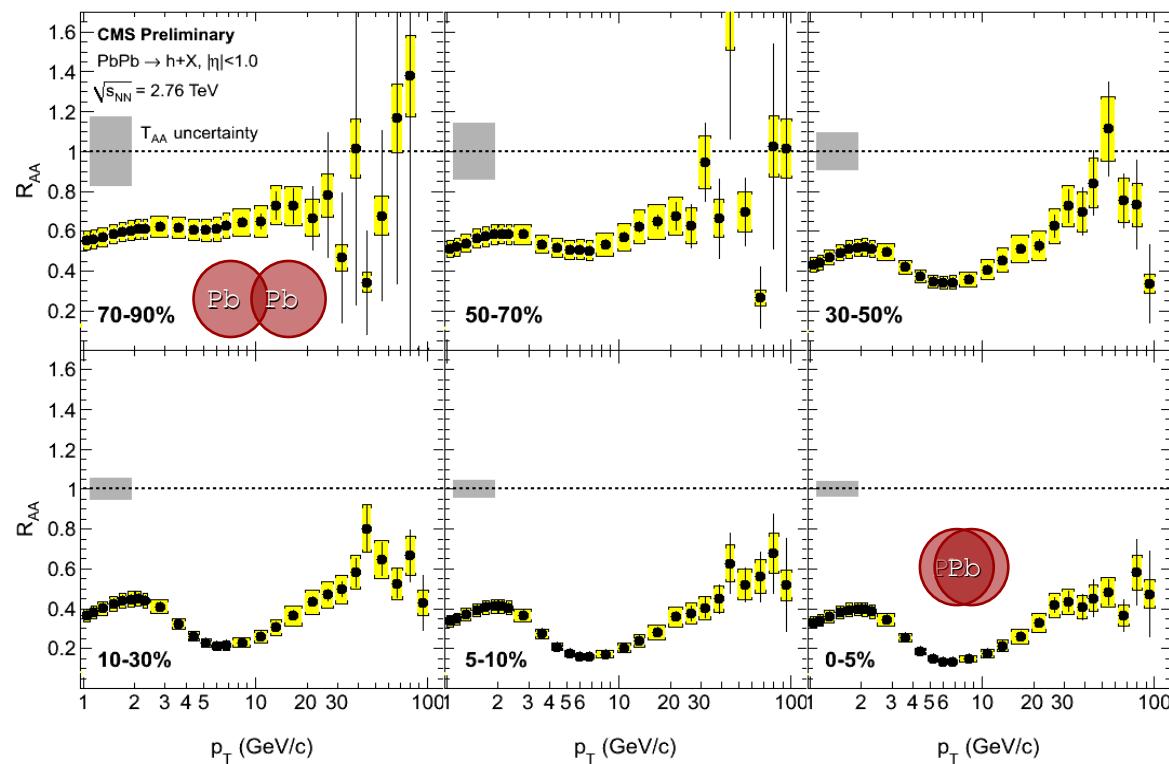
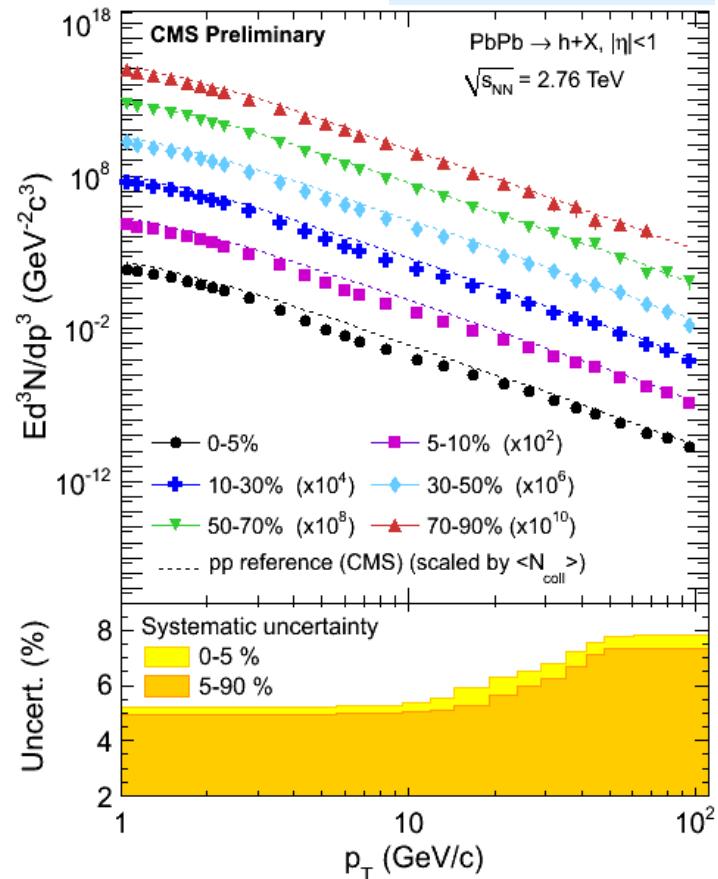


Charged hadron p_T -spectra and R_{AA}

$$R_{AA} = \frac{\sigma_{pp}^{inel}}{\langle N_{coll} \rangle} \frac{d^2 N_{AA} / dp_T d\eta}{d^2 \sigma_{pp} / dp_T d\eta}$$

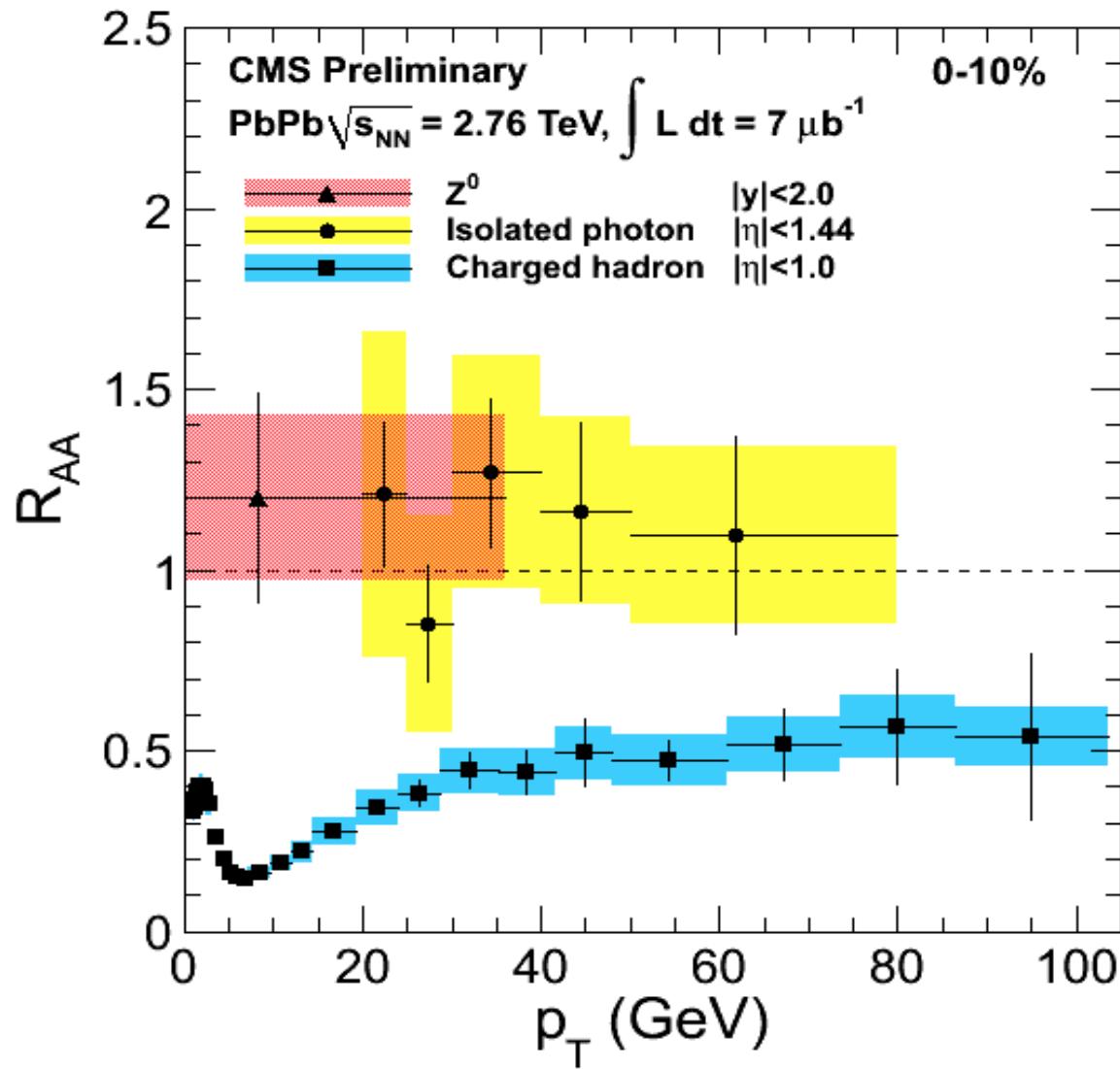
~ “QCD Medium” “QCD Vacuum”

$R_{AA} > 1$: enhancement
 $R_{AA} = 1$: no medium effect
 $R_{AA} < 1$: suppression



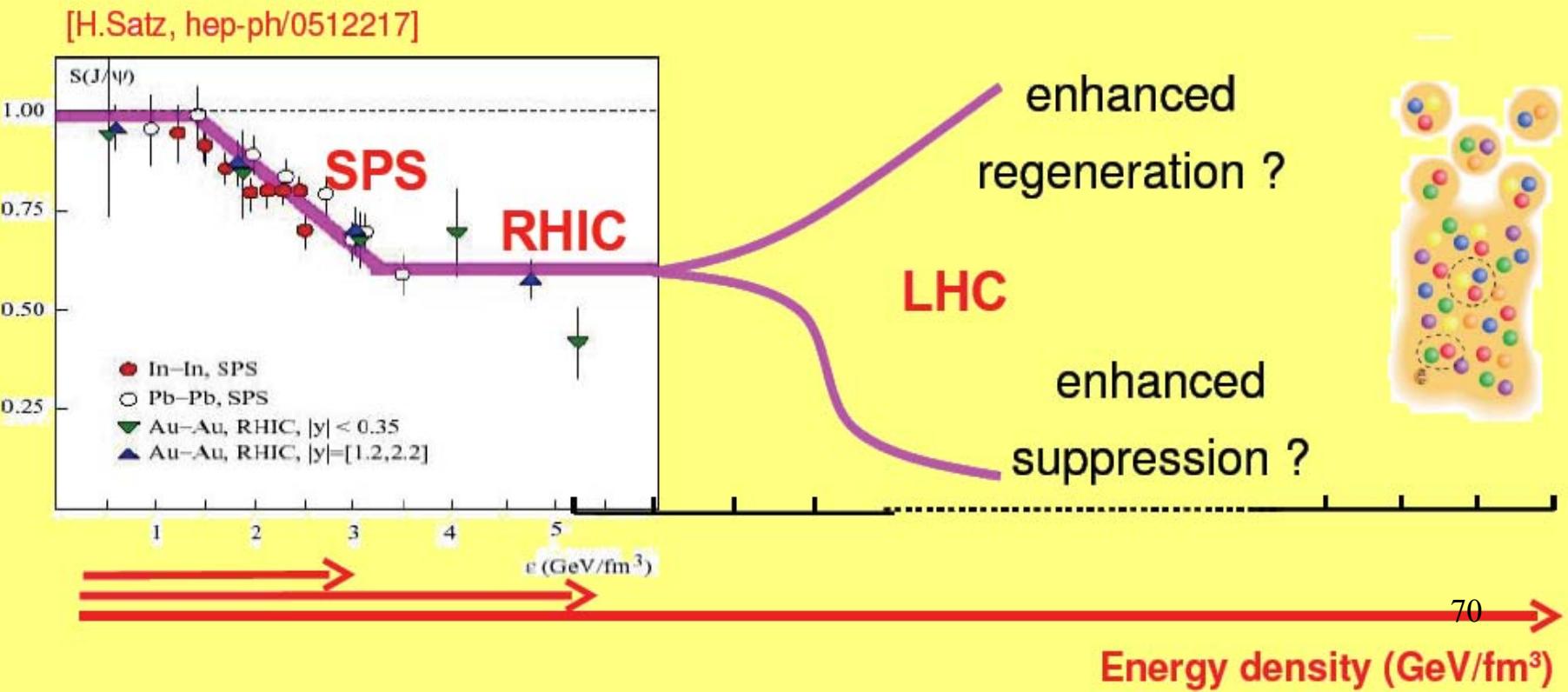
Strong momentum dependence of suppression factor is observed

Summary of R_{AA}

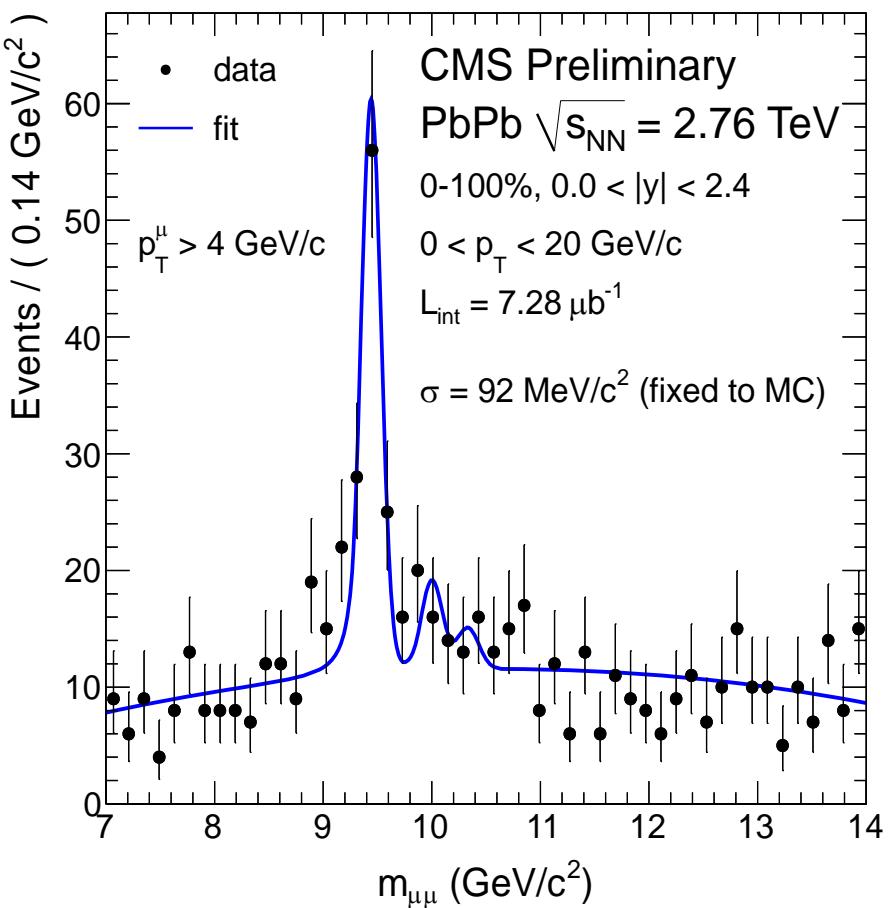
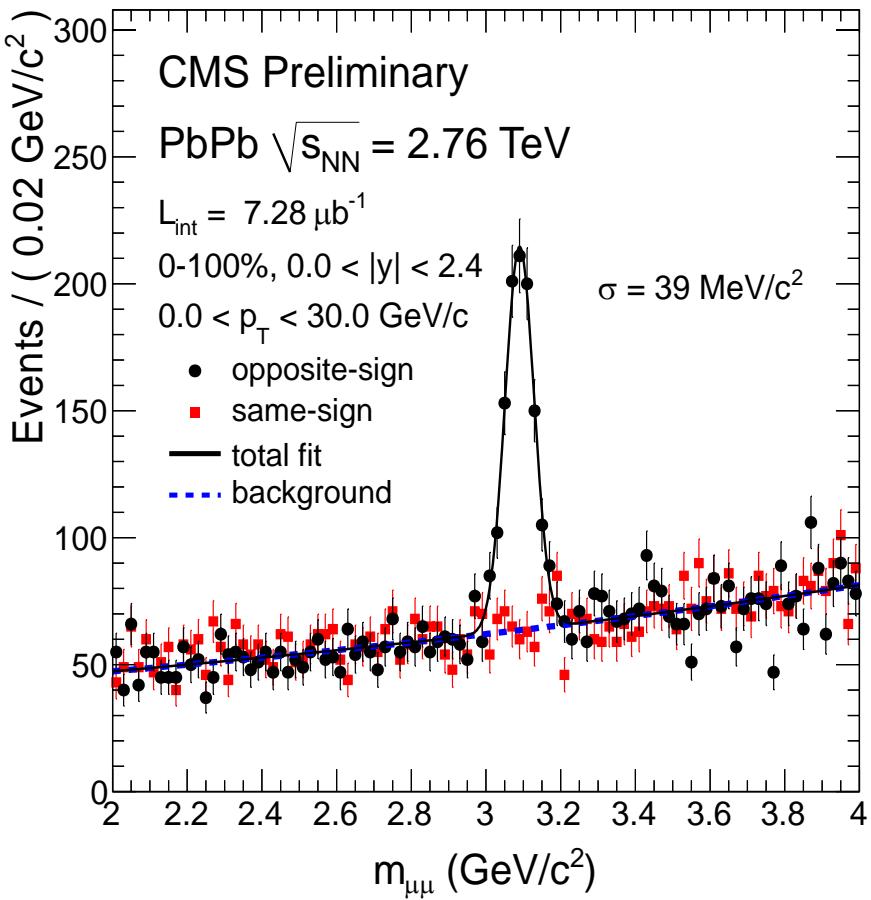


J/ ψ production in AA at the LHC

- J/ ψ at LHC will clarify SPS/RHIC suppression:
 - Onset of direct J/ ψ suppression ($T_D \sim 1.5 - 2.$, T_c) ?
 - Large(r) regeneration by ccbar recombination ?

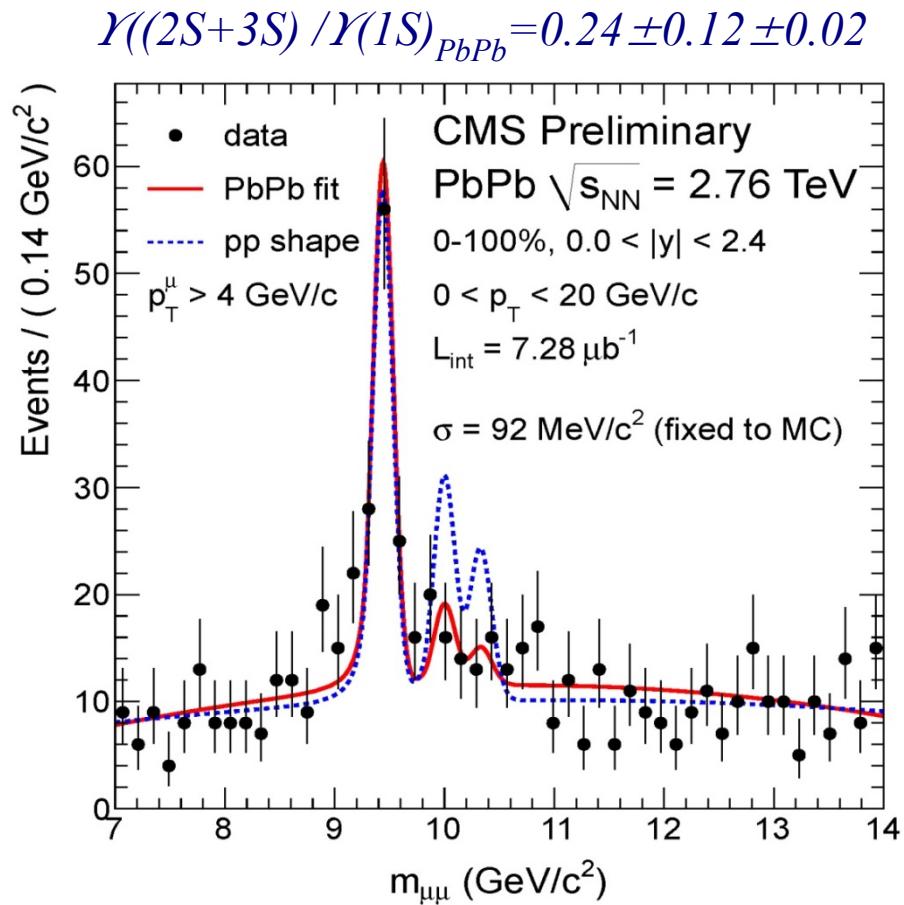
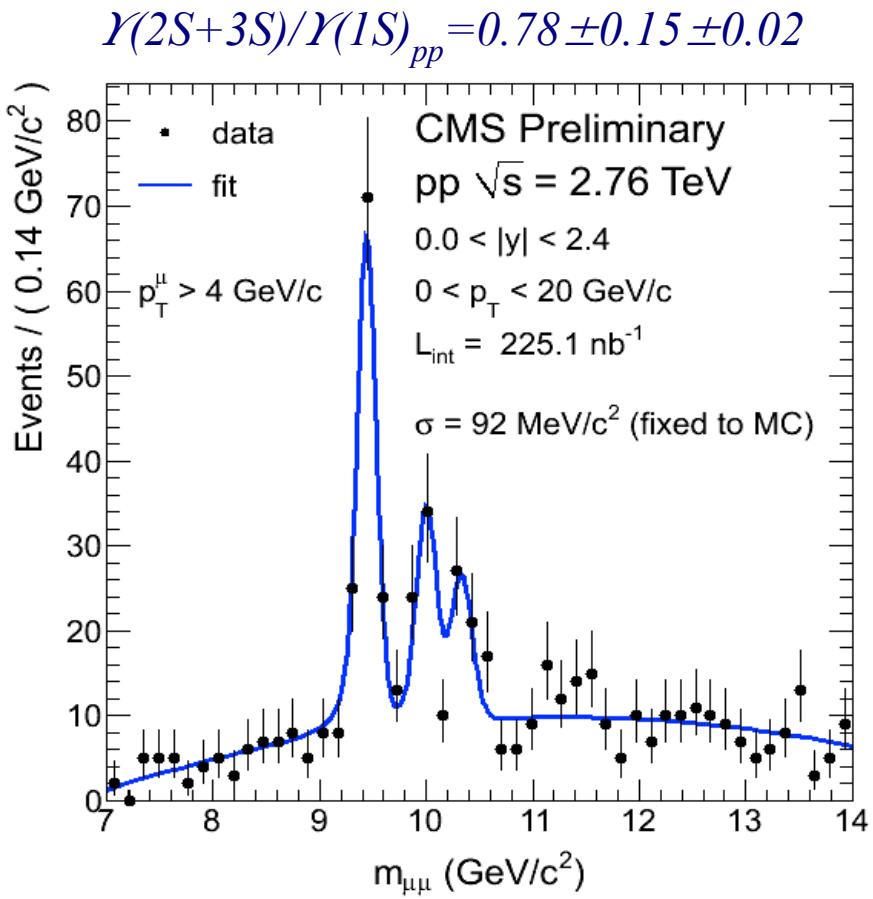


J/ ψ and Y mass distributions

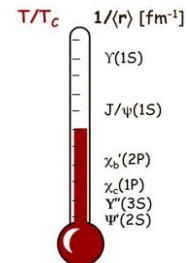


734 ± 54 J/ ψ 's and 86 ± 12 Y's (1S), mass resolutions are close to pp ones
 CMS pp data at $\sqrt{s}=2.76 \text{ TeV}$ are used as reference for PbPb

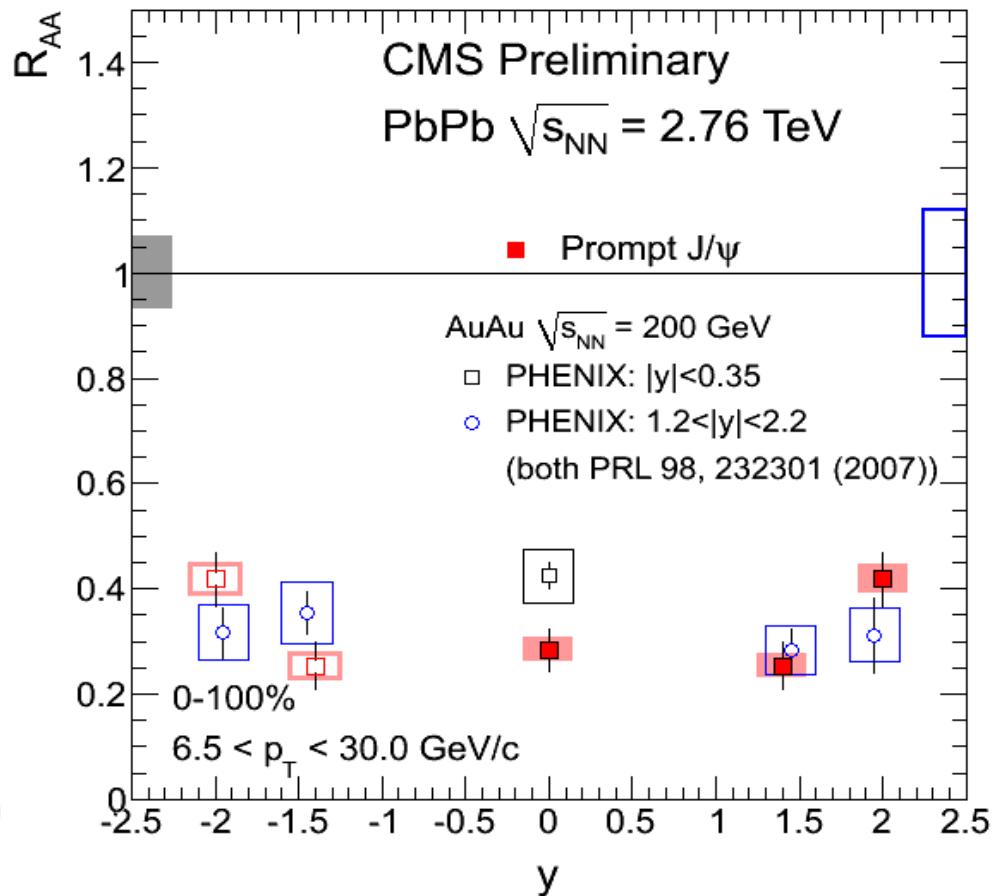
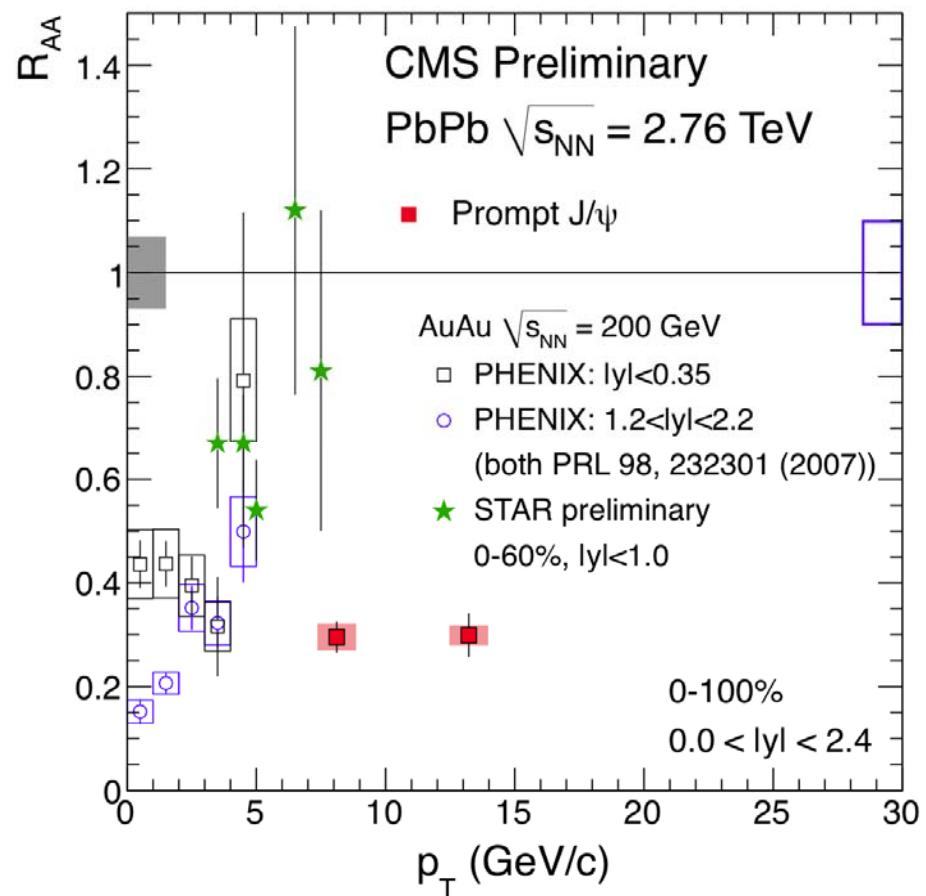
$\Upsilon(2S+3S)/\Upsilon(1S)$ suppression



Suppression of $\Upsilon(2S+3S)$ relatively to $\Upsilon(1S)$ by a factor ~ 3 is seen
 $[\Upsilon(2S+3S)/\Upsilon(1S)]_{PbPb} / [\Upsilon(2S+3S)/\Upsilon(1S)]_{pp} = 0.31 \pm 0.17 \pm 0.03$

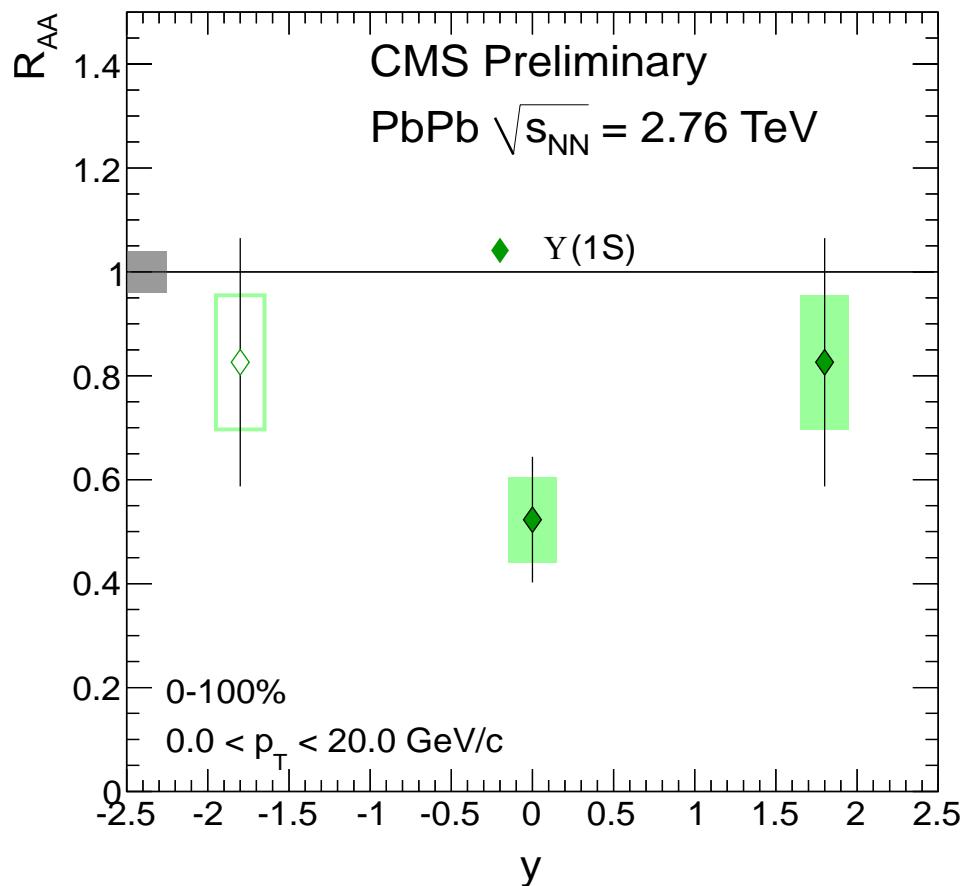
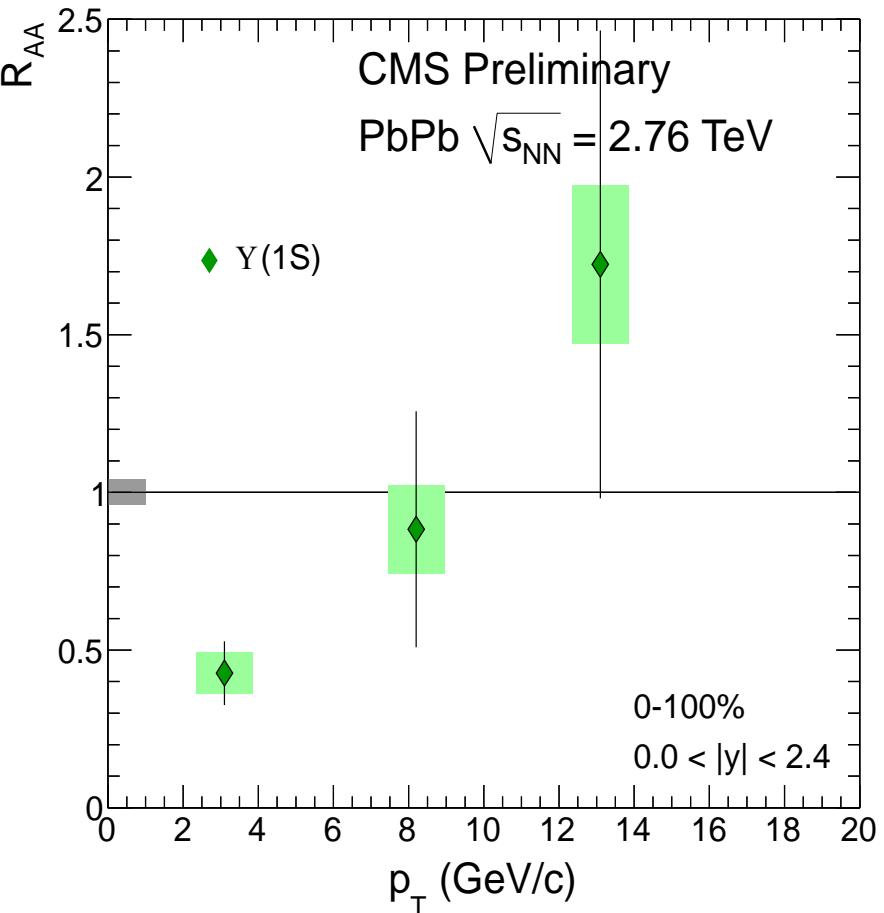


J/ψ suppression vs. p_{T} and y



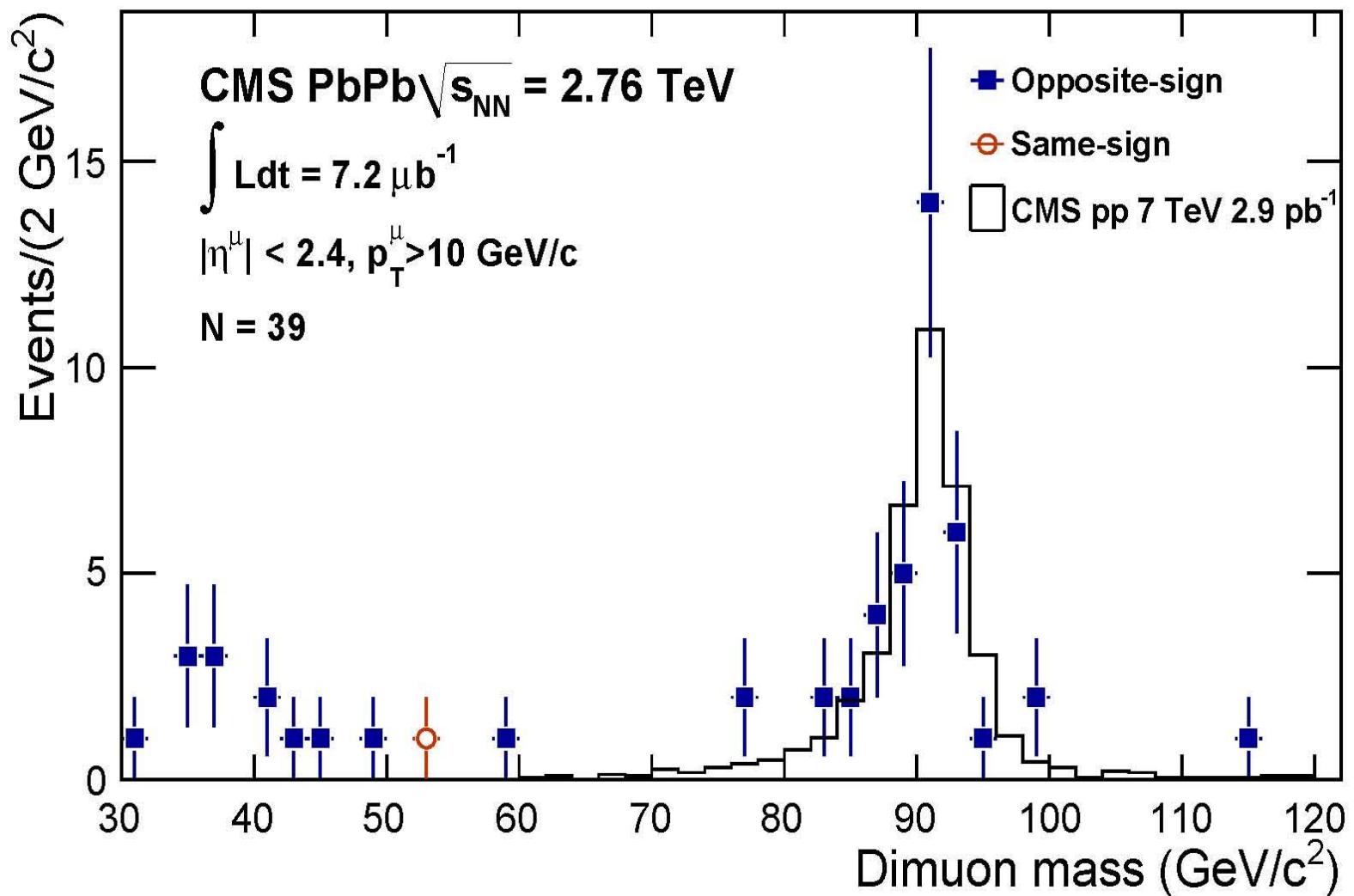
No dependence of suppression factor ($\sim 1/3$) on p_{T} is seen
 Less suppression at forward rapidity?

$\Upsilon(1S)$ suppression vs. p_T and y



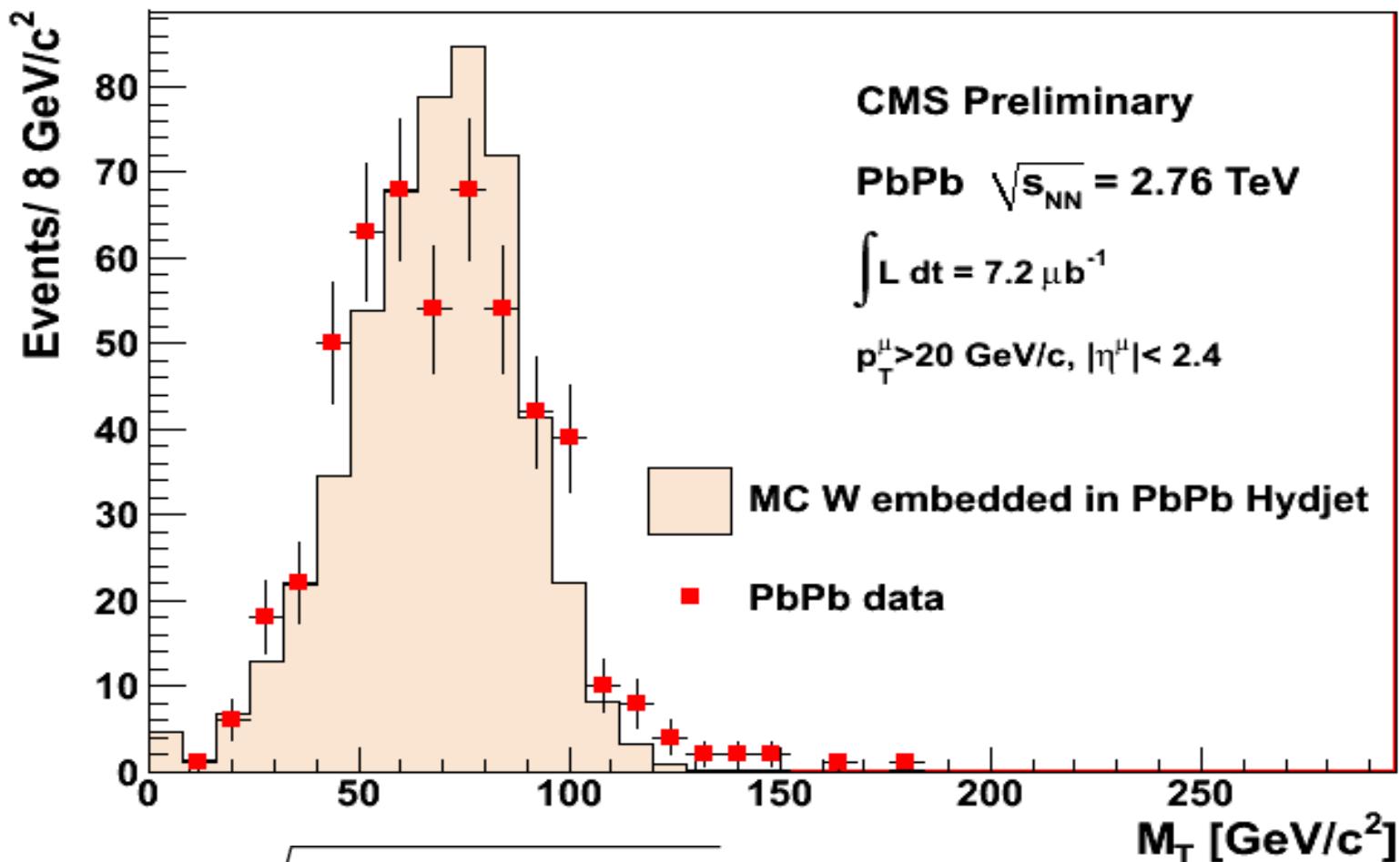
No suppression at high p_T ?
 Less suppression at forward rapidity?

Z^0 mass distribution



39 reconstructed Z^0 's, mass resolution is close to pp one

$$W^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu$$



$$M_T = \sqrt{2 p_{T\mu} p_{T\nu} (1 - \cos(\phi_{\mu\nu}))}$$

LHC HI: outlook

- Future studies with higher statistics (expected from LHC PbPb run 2011)

- ◆ more differential study of jets

(fragmentation functions, jet shapes, multi-jets, ...)

- ◆ Z/γ -jet correlations

- ◆ more differential study of high-mass dimuon resonances

(J/ψ , Y , Y' , Y'' yields vs. centrality, p_T y , φ , ...)

- ◆ B-physics

($B \rightarrow J/\psi$, high mass dimuon continuum, tagged B-jets)

- ◆ forward physics and ultraperipheral collisions

- ◆ ...