

Физика столкновений релятивистских ядер

«Погашение» струй

Лекции 6

В.Л. Коротких

2012 год

Наблюдаемые

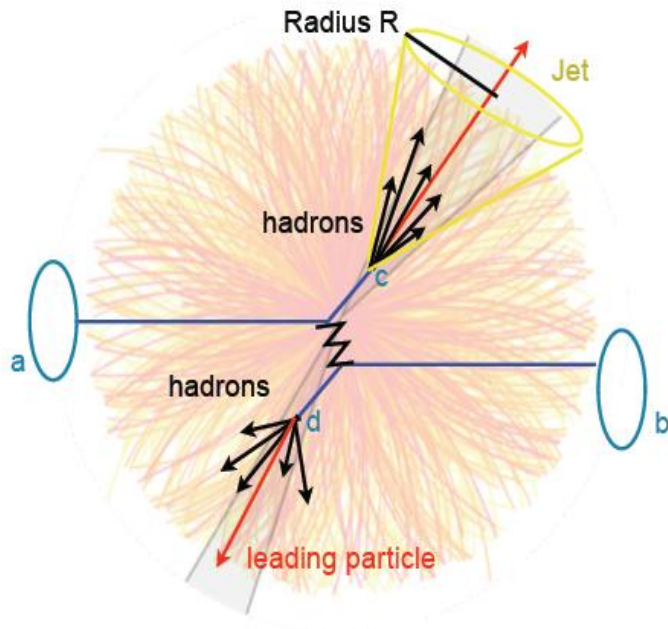
Характеристики в ядро-ядерных столкновениях, используемые для исследования новой материи, образованной в ядро-ядерных столкновениях:

- Зависимость множественности от энергии \sqrt{s} и поперечного импульса p_T
- Энергия, оставляемая на образование новой материи
- Зависимость от центральности ядро-ядерного столкновения
- Зависимость от «быстроты» рожденных частиц
- **Подавление выхода частиц при больших p_T и погашение струй**
- Эллиптический поток
- Подавление рождения чармониев
- Усиление выхода странных частиц
- Размеры системы адронов после вымораживания
- «Плавление» резонансов
- Подавление корреляций назад в событиях “back to back”

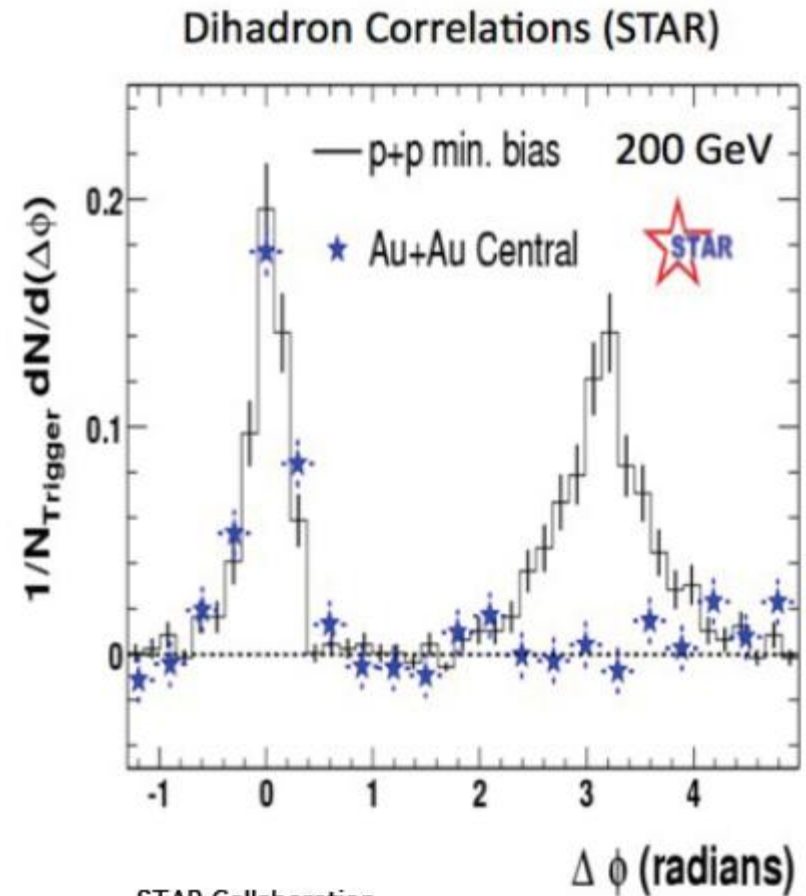
А-А столкновения

**Относительное подавление выхода
частиц
при больших R_T**

Предыстория: подавление обратного пика



В эксперименте на RHIC наблюдалось подавление пика при $\Delta\phi=180^\circ$ в распределении частиц по азимутальному углу – первый экспериментальный «сигнал» о подавлении струй



STAR Collaboration
Phys. Rev. Lett. 91 (2003) 072304

Ядерный модифицированный фактор

Отношение числа частиц в AA и pp столкновениях

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

- зависит от сечения p+p столкновения, но не нужны измерения в периферической области столкновения

- Для жестких процессов сечение пропорционально некогерентной сумме p+p неупругих бинарных столкновений в A+A, $\langle N_{\text{coll}} \rangle$, и $R_{AA} = 1$

- Для мягких взаимодействий $R_{AA} < 1$

Отношение числа частиц в центральных к периферическим AA столкновениям

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

- не зависит от сечения p+p столкновения, но нужны измерения в периферической области столкновения

Подавление выхода частиц при больших p_T

Чтобы отказаться от чисто адронного сценария образования частиц, необходимо наблюдать эффект, который зависит напрямую от партонной природы образованной зоны высокой плотности.

Такой эффект был открыт на RHIC, и он связан с **подавлением импульсного адронного спектра** в центральных Au+Au столкновениях в сравнении с импульсным спектром в $p+p$ столкновениях. Эффект основан на гипотезе (Bjorken, Gyulassy et al. 1982-1995) о **большой потере энергии партонов, рассеянных с высоким p_T в начальной стадии столкновения в среде с высокой плотностью свободных цветовых зарядов (quenching)**.

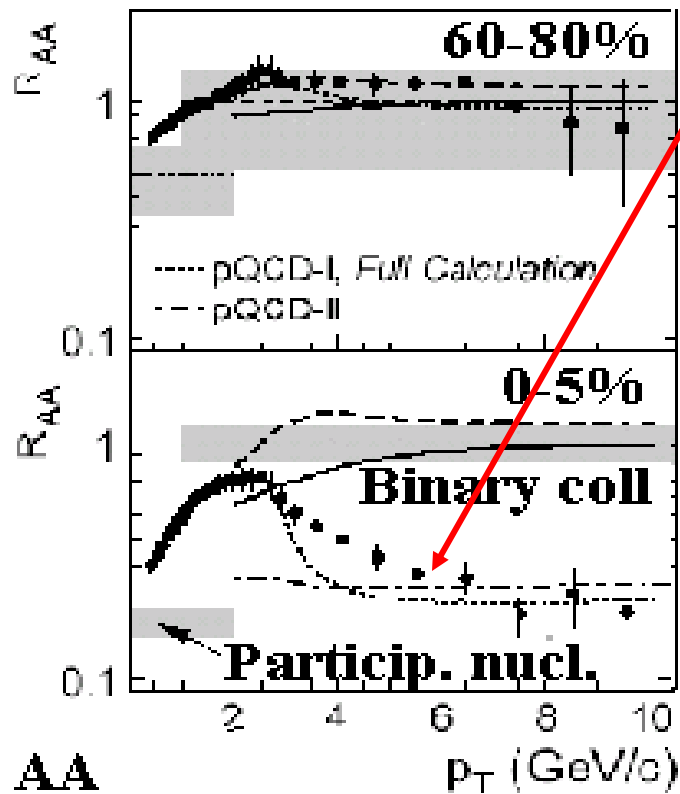
Согласно КХД цветовой объект (партон) теряет энергию за счет радиации глюонов аналогично тормозному излучению в электродинамике. Из-за цветового заряда глюонов потеря энергии пропорциональна квадрату длины прохождения в цветовой среде и в конечном итоге уменьшению числа частиц от струи при больших p_T .

Выход частиц в $A+A$ столкновениях по отношению к $p + p$ столкновениям

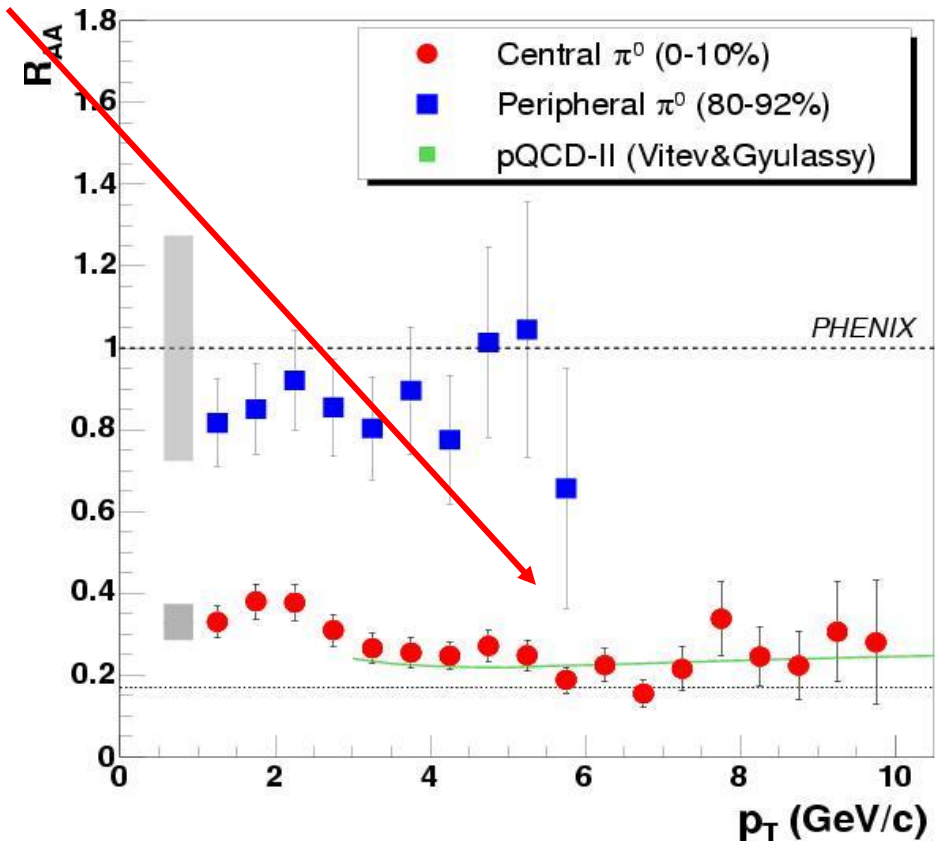
СТОЛКНОВЕНИЯМ

R_{AA} - отношение выхода частиц в $A+A$ и в $p+p$ столкновениях, отнесенное к числу пар взаимодействующих нуклонов

Подавление



STAR, Au+Au \rightarrow charge particles

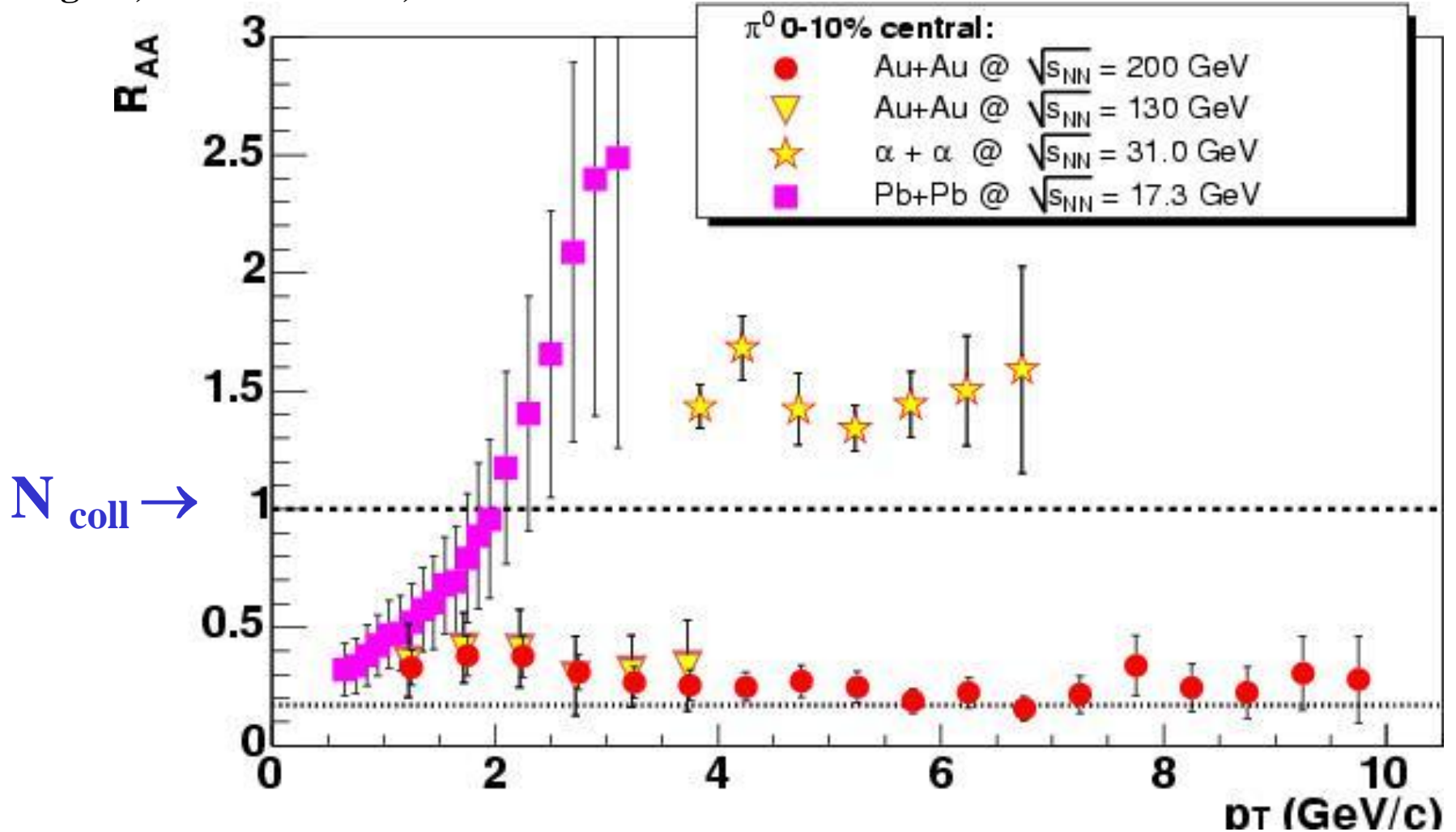


PHENIX, Au+Au $\rightarrow \pi^0$

Подавление выхода частиц с ростом энергии при больших p_T для центральных А-А столкновений

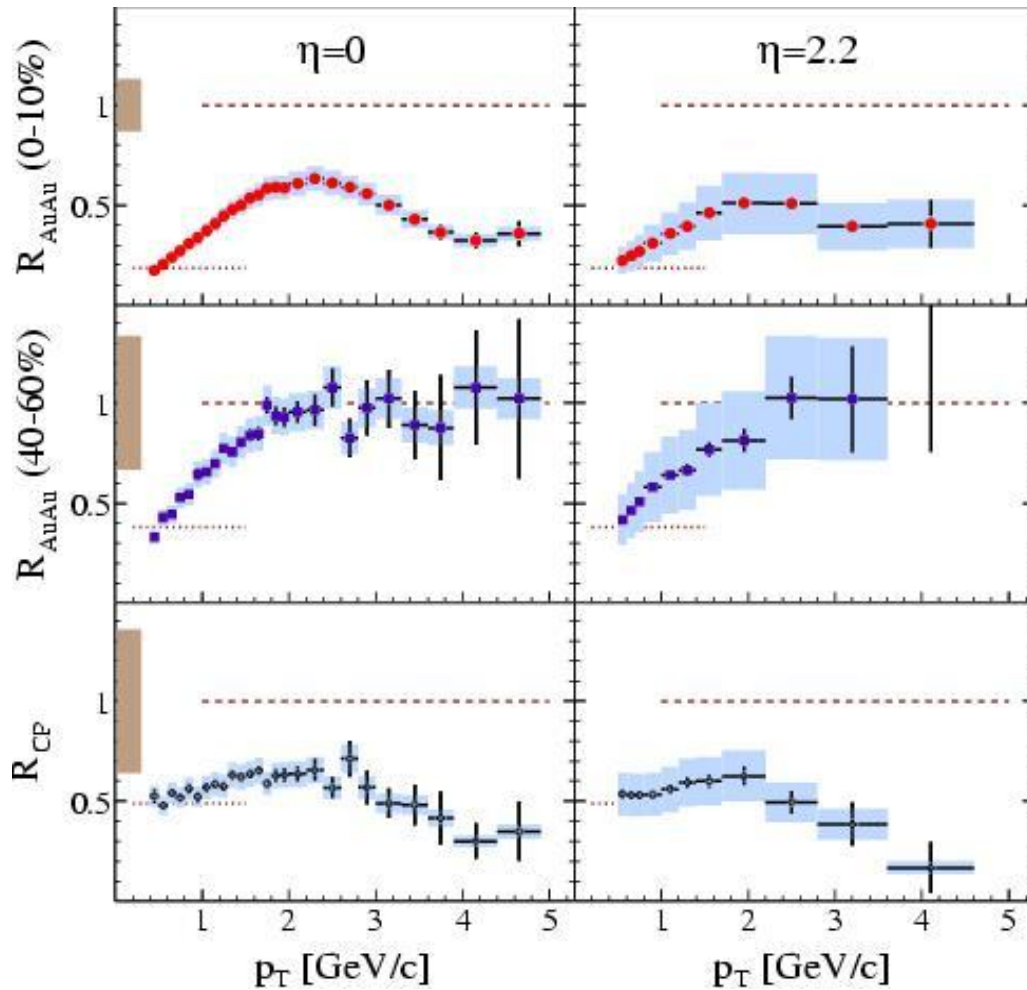
S.Margets ,CMS-DELPHY, 2003

PHENIX Au+Au



Самый впечатляющий результат – выход на scaling по N_{part} !!!

Au-Au, 200 GeV, BRAHMS



← $R_{\text{AuAu}} < 1$ при больших p_T для центральных столкновений при **обоих** значениях псевдобыстроты.

← Для периферических столкновений подавление отсутствует- $R_{\text{AA}} \approx 1$. :

← Подавление наблюдается также и в сравнении с периферическими столкновениями (R_{CP}) .

d+Au и Au+Au

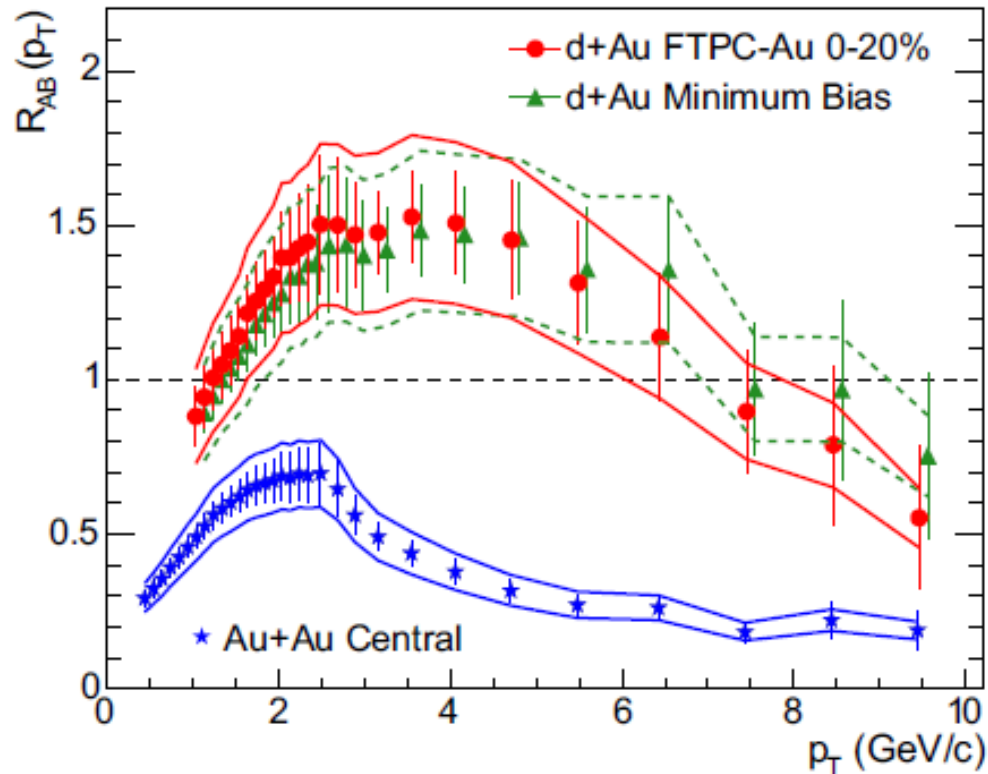


Рис. 3: Отношение R_{AB} , полученное на установке STAR RHIC для d+Au и Au+Au столкновений.

В d+Au не наблюдается погашения струй при малых $|\eta| < 1$, но при больших $|\eta| > 1$ погашение есть (см. запасные слайды)

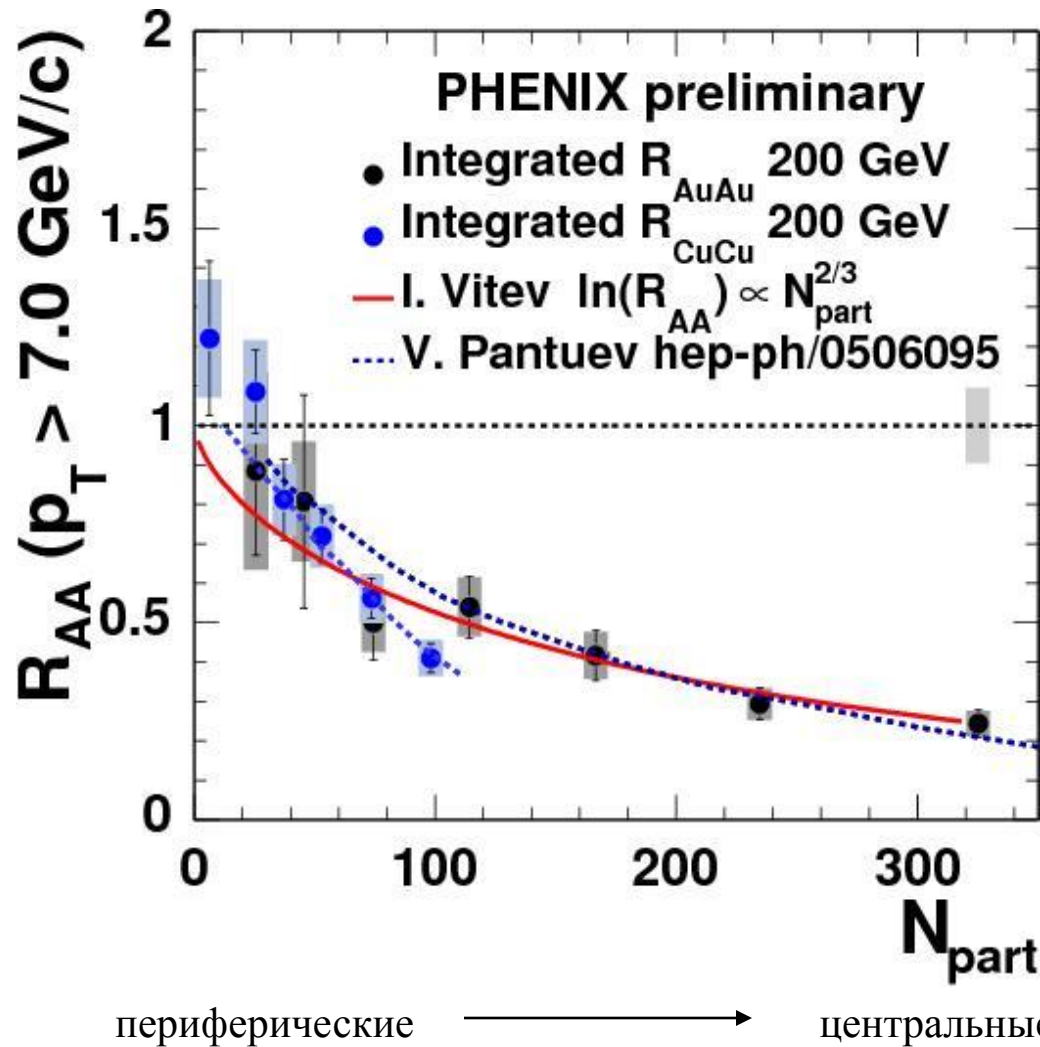
Эффект подавления рождения частиц в центральных $A+A$ столкновениях при больших $p_T > 2$ ГэВ/с и – важный сигнал, свидетельствующий о взаимодействии частиц, рожденных в партонной среде с высокой энергетической плотностью – сильно взаимодействующая КГП ($sQGP$).

В адронной среде сечение взаимодействия адронов слишком малы, чтобы привести к такому подавлению.

Эффект отсутствует в $d+A$ при средних быстротах.

Зависимость от центральности.
Различные типы частиц.

Зависимость от центральности столкновения (от N_{part}) при больших p_T



Сравнение AuAu и CuCu

Данные PHENIX (RHIC)
для ядерного
модифицированного
фактора при $p_T > 7.0 \text{ ГэВ}/c$
в области $|\eta| < 0.35$.

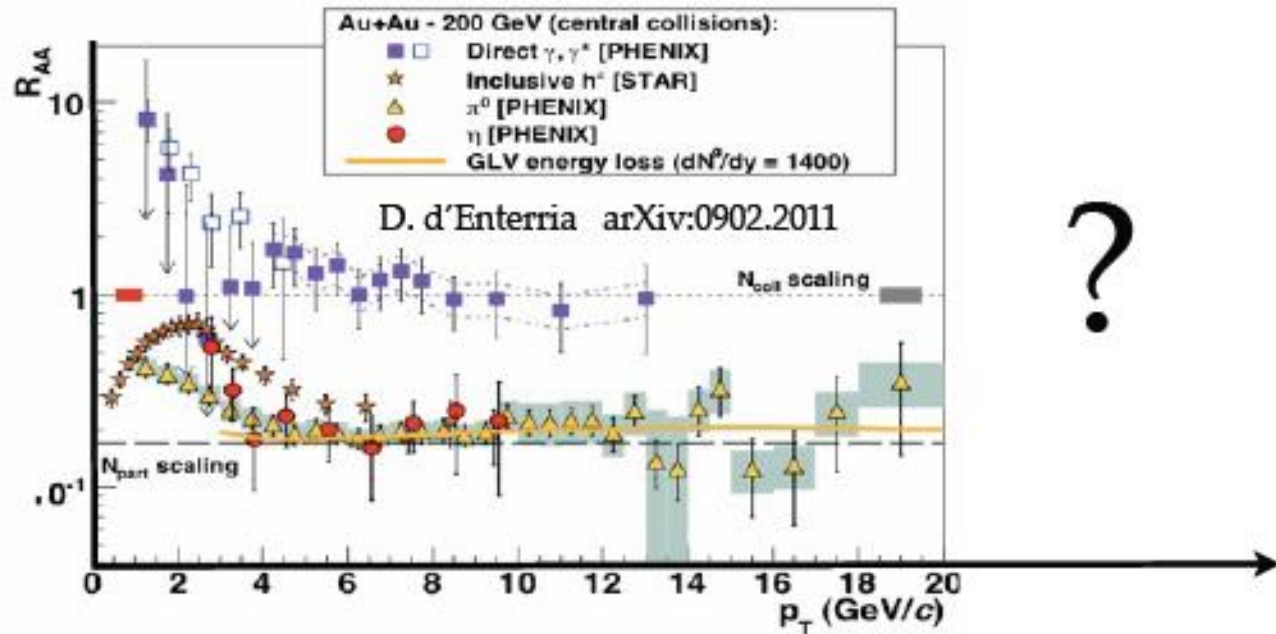
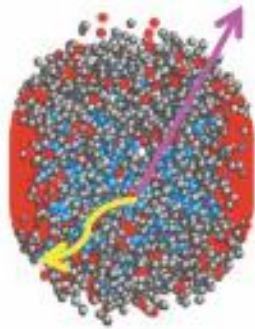
**Т. о., с ростом
центральности
столкновения
эффект подавления
усиливается**

R_{AA} на коллайдере RHIC

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

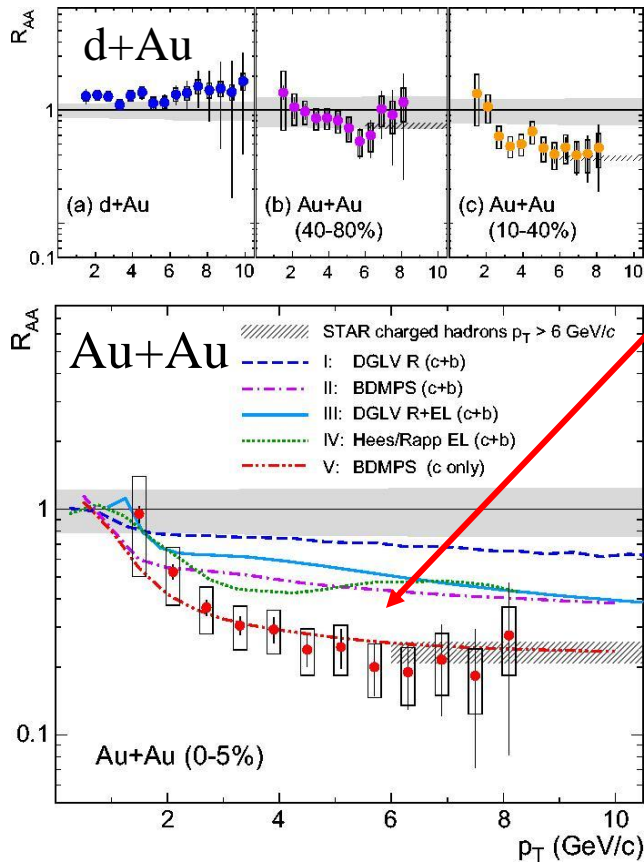
~ $\frac{\text{"QCD Medium"}}{\text{"QCD Vacuum"}}$

- $R_{AA} > 1$ (enhancement)
- $R_{AA} = 1$ (no medium effect)
- $R_{AA} < 1$ (suppression)



What is going to happen to the final state charged particles with high transverse momenta in the (hotter, denser, and longer lived) medium created in PbPb collisions at LHC?

Подавление выхода «тяжелых» частиц - D и B мезонов, измеренных по распаду на e



Подавление мезонов с **тяжелыми** кварками, такое же как с легкими. Это находится в противоречии с **теорией погашения струй**, т.к. легкие кварки излучают сильнее глюоны в среде, чем тяжелые. Чтобы описать подавление тяжелых кварков в pQCD, нужно задать начальную плотность глюонов, равную

$$dN_g/dy \approx 3000, \quad \text{RHIC}$$

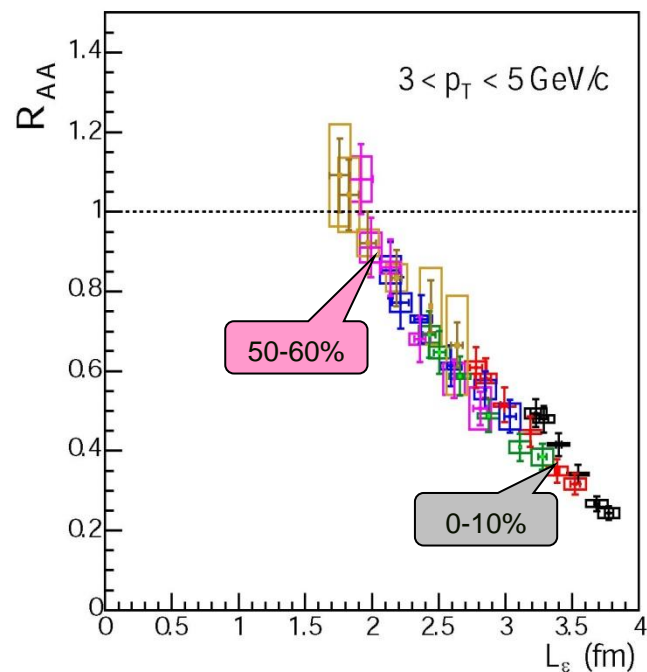
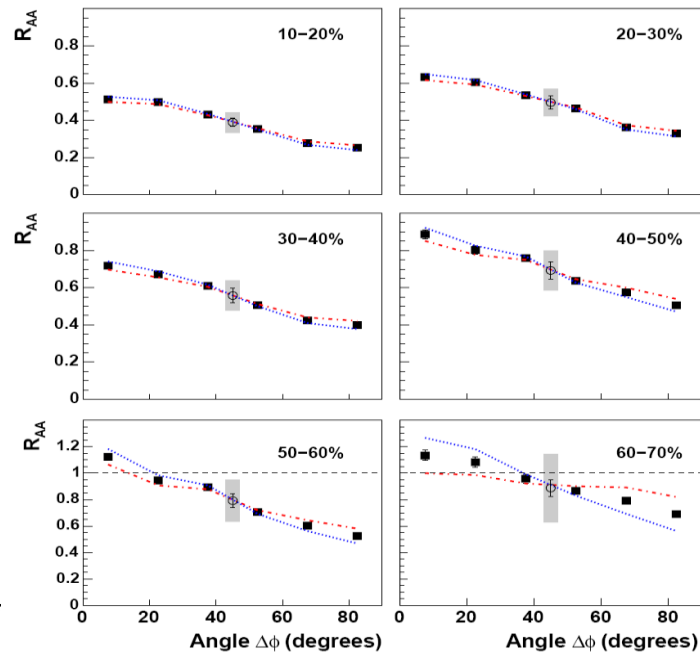
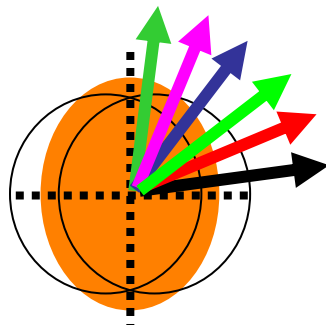
что противоречит наблюдаемой полной адронной множественности в Au+Au при 200 ГэВ $dN_{ch}/dy \approx 600$, т.к.

$$dN_{ch}/dy \approx 600 \rightarrow dN_g/dy = 1680$$

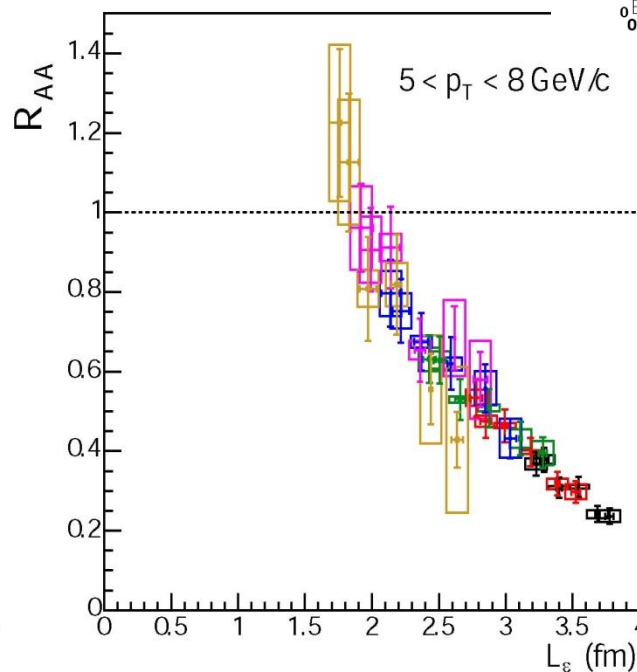
Фактор подавления для тяжелых D и B мезонов, измеренный по их лептонному распаду на e

Принципиально новые измерения R_{AA} для π^0 относительно угла в плоскости реакции, PHENIX

Меняем толщину вещества изменением центральности и ориентацией относительно плоскости реакции



Толщина слоя



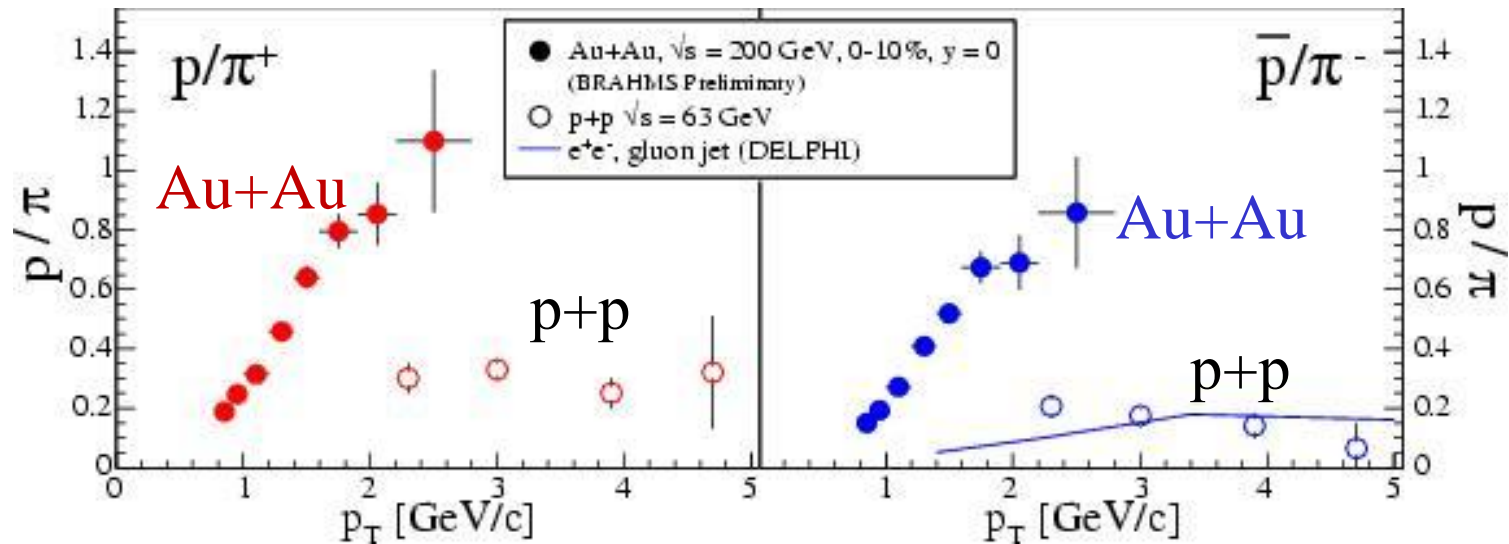
Поглощение отсутствует в слое толщиной менее 2 Фм.

Совершенно не согласуется с моделями.

Пока не учтено время формирования sQGP?

Превышение барионов над мезонами

С превосходной идентификацией частиц на BRAHMS можно исследовать подавление в зависимости от типа частиц. **Рис.** показывает, что мезоны подавляются, а барионы не подавляются.



Отношение выхода барионов к мезонам для Au+Au при 200 ГэВ/с и p+p при 63 ГэВ/с. Сплошная линия справа на рисунке – величина $(p + \bar{p})/(\pi^+ + \pi^-)$, измеренная для глюонных струй в $e^+ + e^-$ столкновениях.

Возможно, что это отражает отличие механизмов фрагментации на системы с 2 или 3 валентными кварками или с рекомбинацией 3-х и 2-х кварков в плотной среде в барионы и мезоны.

Превышение барионов над мезонами

Выход барионов по отношению к мезонам на пару сталкивающихся нуклонов в области промежуточных p_T составляет 0.8-1.0, что в 4 раза больше, чем в $p+p$ и $e+e$ столкновениях

Чёрный цвет
Центральные
столкновения →
Красный цвет
Периферические
столкновения →

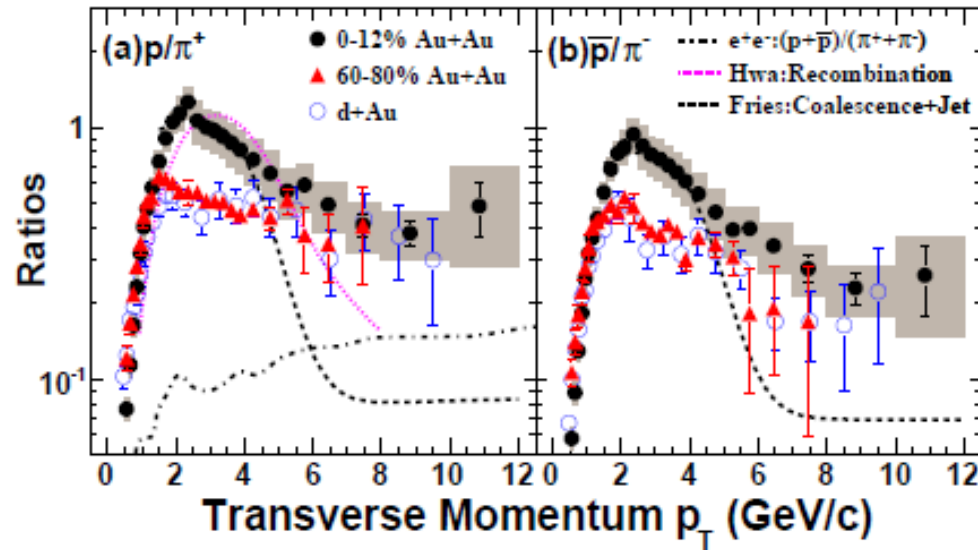


Рис. 5: Отношение $R_{AA}^{\text{barion}}/R_{AA}^{\text{meson}}$.

Эти расхождения между барионами и мезонами можно объяснить, если ввести дополнительный механизм коалесценции (слипания) кварков в плотной партонной среде.

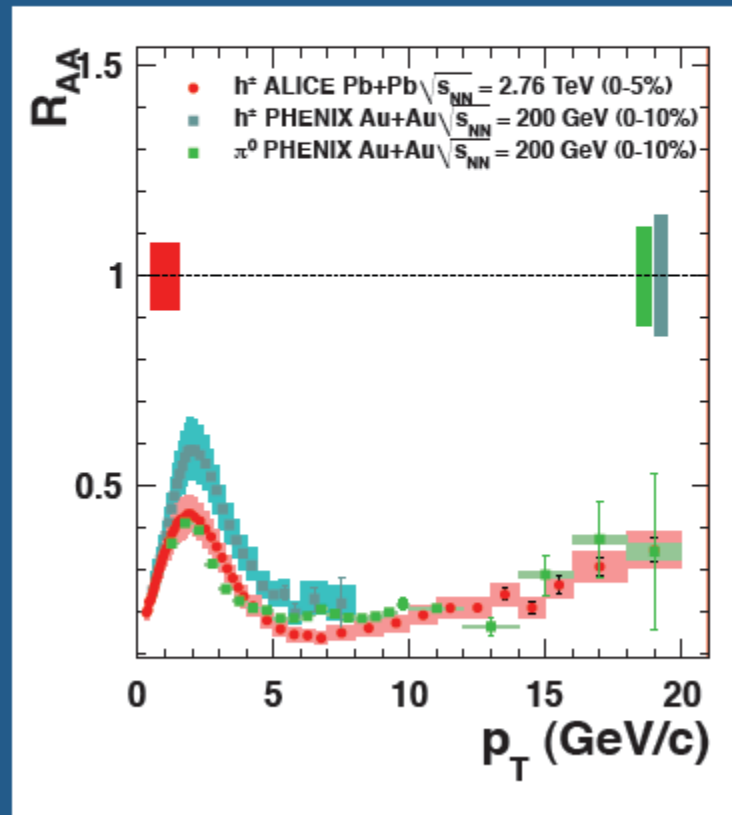
Новые результаты на LHC и сравнение с RHIC



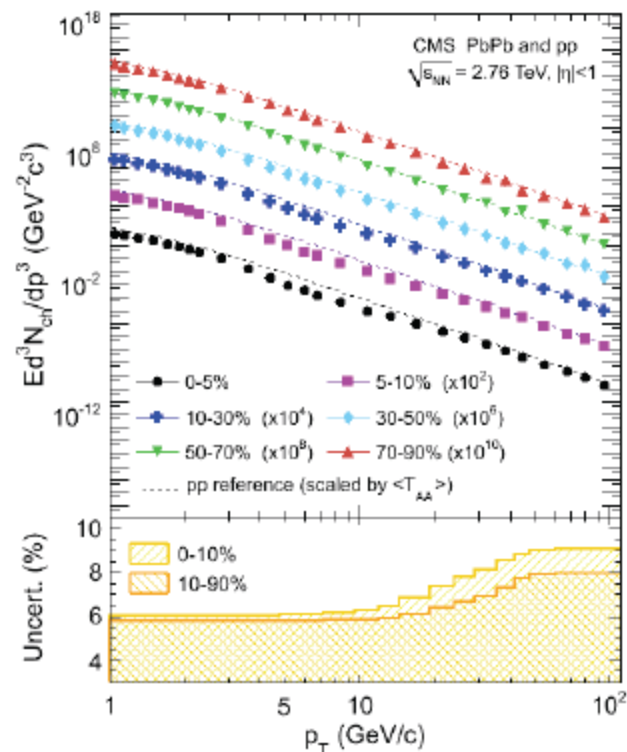
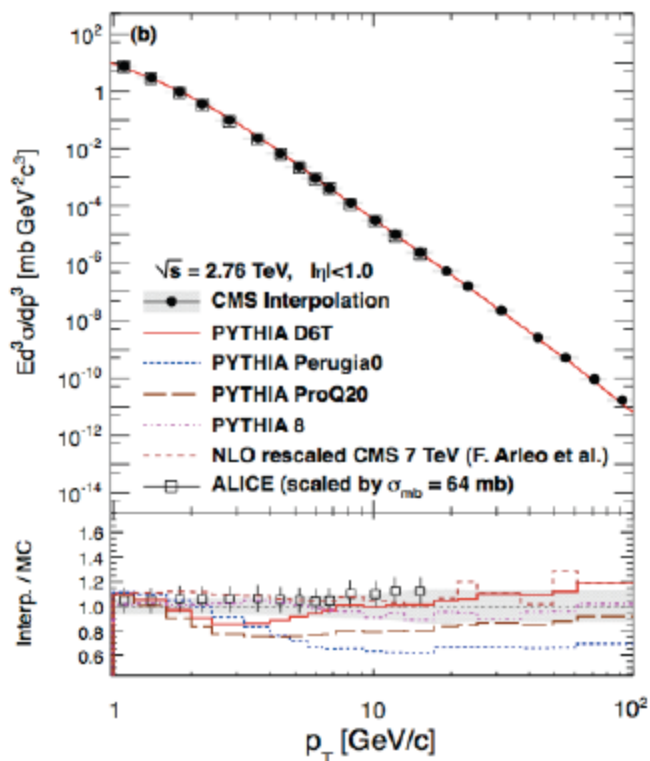
R_{AA} LHC vs. RHIC (II)

- Similar structures for $p_T < 5$ GeV/c
 - RHIC: Different p/π ratio in central Au+Au
- Intermediate p_T
 - LHC: ~20% stronger suppression despite less steeply falling spectra, but consider also reduced contribution from valence q , stronger coupling of g ...
- High p_T
 - No direct comparison data
 - Highest p_T only π^0 (PHENIX PRL 101 (2008) 232301)

Surprising coincidence of π @ RHIC and charged particles @ LHC.

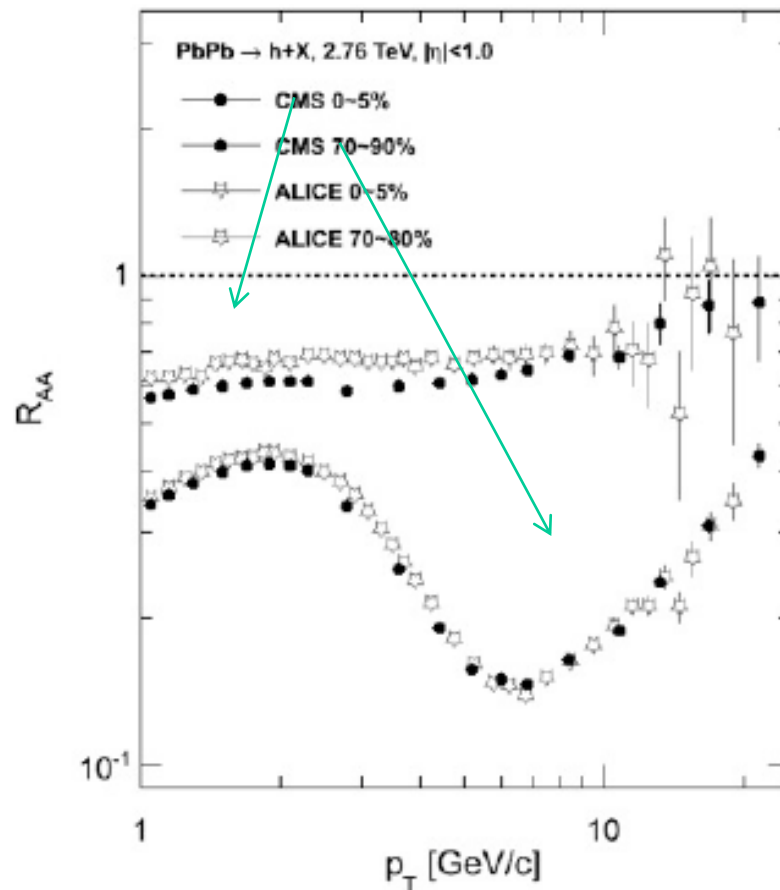
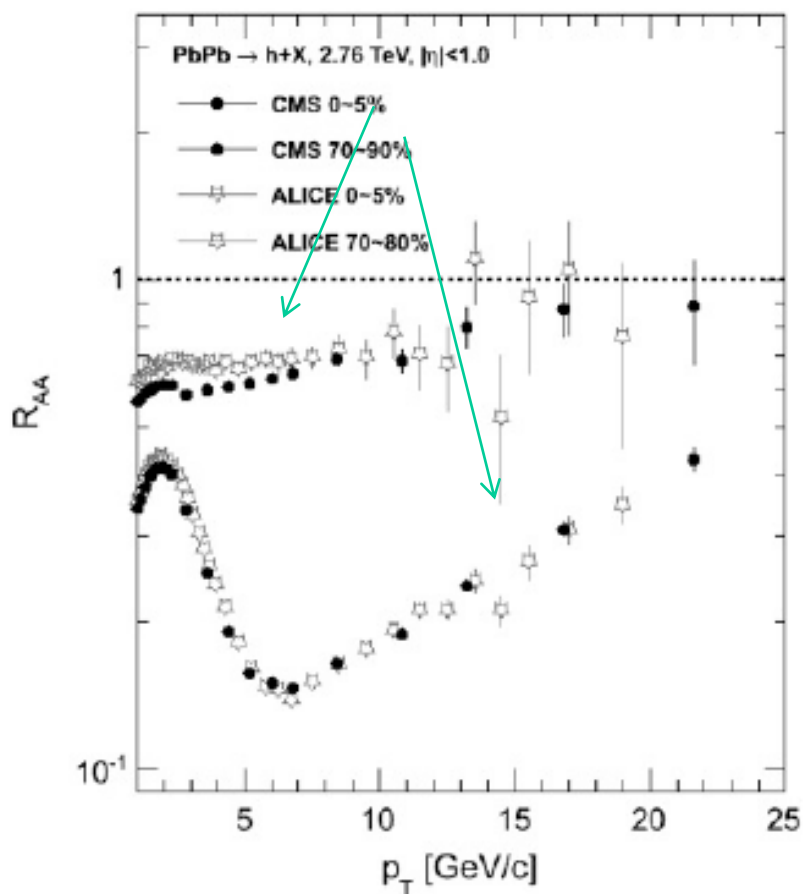


Charged particle spectra in pp and PbPb



Spectra measured to 100 GeV/c in PbPb

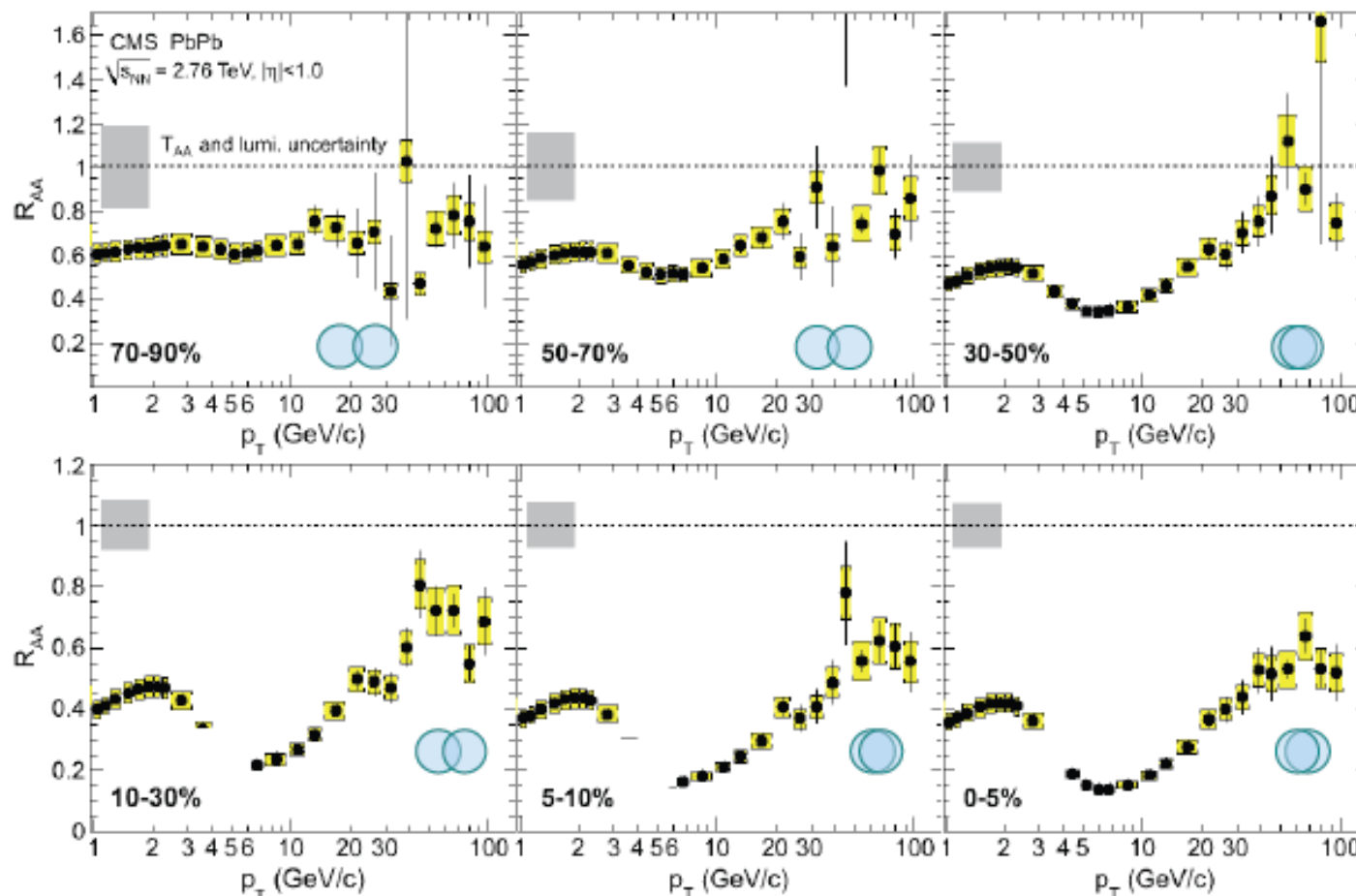
Сравнение R_{AA} при разных центральностях и для двух экспериментов LHC, CMS и ALICE



- N_{coll} : 10.8 (70~90%) and 15.8 (70~80%) - CMS
- N_{coll} : 15.7 (70~80%) - ALICE

Сравнение $R_{AA}(p_T)$ при разных центральностях

Charged particle R_{AA} vs centrality

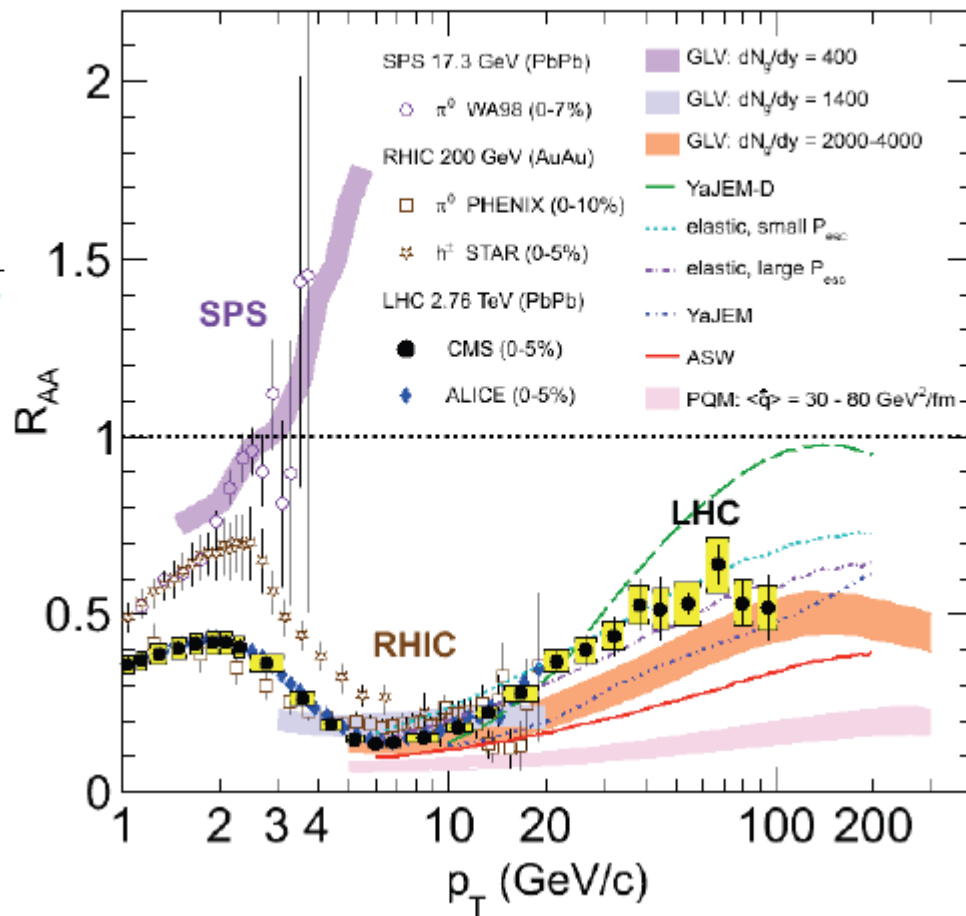


- Dip structure developing as a function of centrality
- R_{AA} increases as a function of p_T in the $p_T > 10$ GeV/c region

Изменение $R_{AA}(p_T)$ с энергией и сравнение с разными моделями

Charged particle R_{AA} compared to models

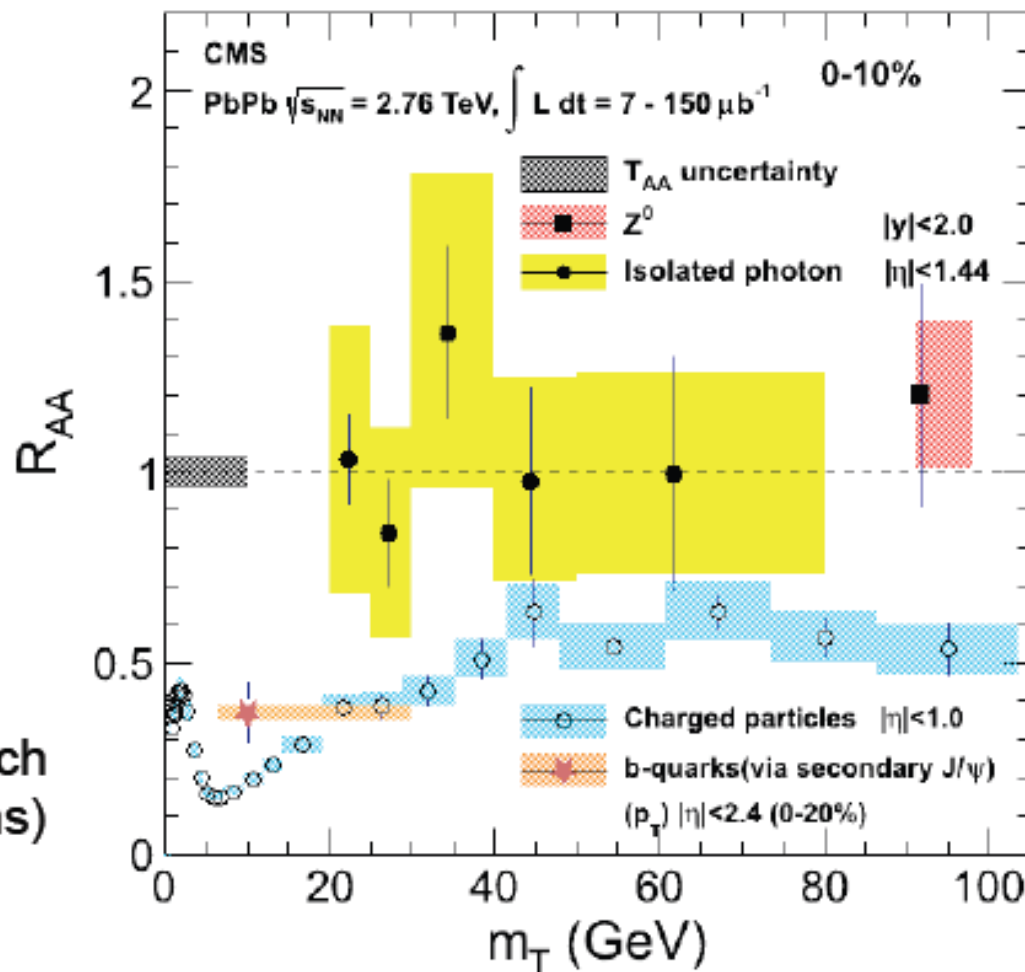
$$R_{AA}(p_T) = \frac{d^2 N_{ch}^{AA} / dp_T d\eta}{\langle T_{AA} \rangle d^2 \sigma_{ch}^{NN} / dp_T d\eta}$$



Удивительным оказался рост R_{AA} при $p_T > 20 \text{ GeV}/c$
(ослабление подавления)

Результаты CMS в PbPb при 2.76 TeV

Summary of CMS R_{AA} results



Color-less probes
are unsuppressed

Strong quenching
for light hadrons

b-quarks are
quenched
(but not as much
as light hadrons)

Основные экспериментальные закономерности

1. Зависимость от центральности столкновения.

Для периферических Au+Au и для d+Au столкновений для средних и для центральных быстрой эффект среды не проявляется, так как фактор $R_{AA} \cong 1$. Для Au+Au ростом центральности R_{AA} монотонно уменьшается – увеличивается в среднем толщина слоя среды. Новые данные свидетельствуют о том, что R_{AA} зависит от азимута по отношению к плоскости реакции

2. Неожиданная зависимость от p_T на LHC

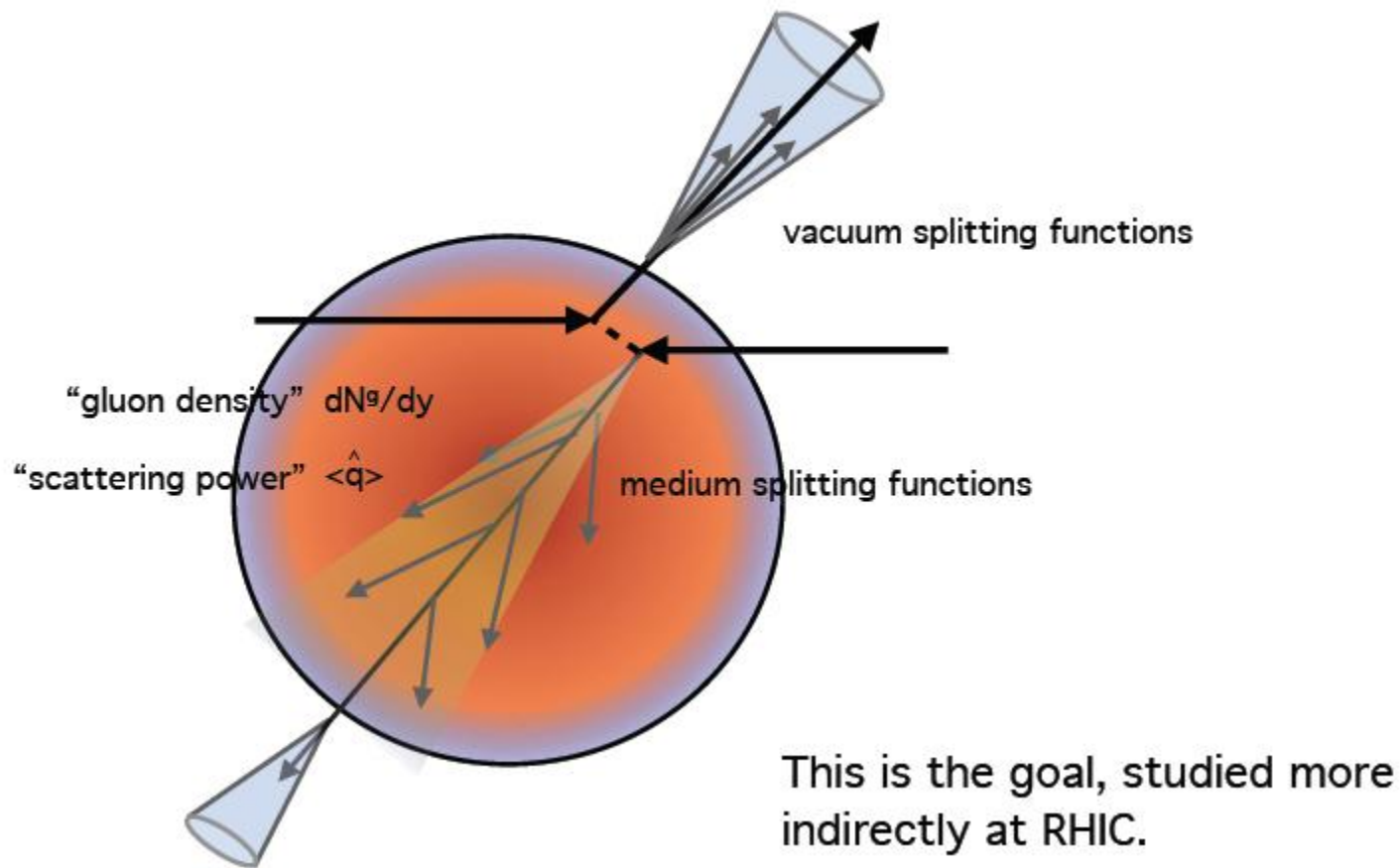
3. Независимость от сорта частиц с «легким» и «тяжелым» ароматом.

4. Отсутствие подавления фотонов.

5. Превышение выхода протонов в сравнении с пионами

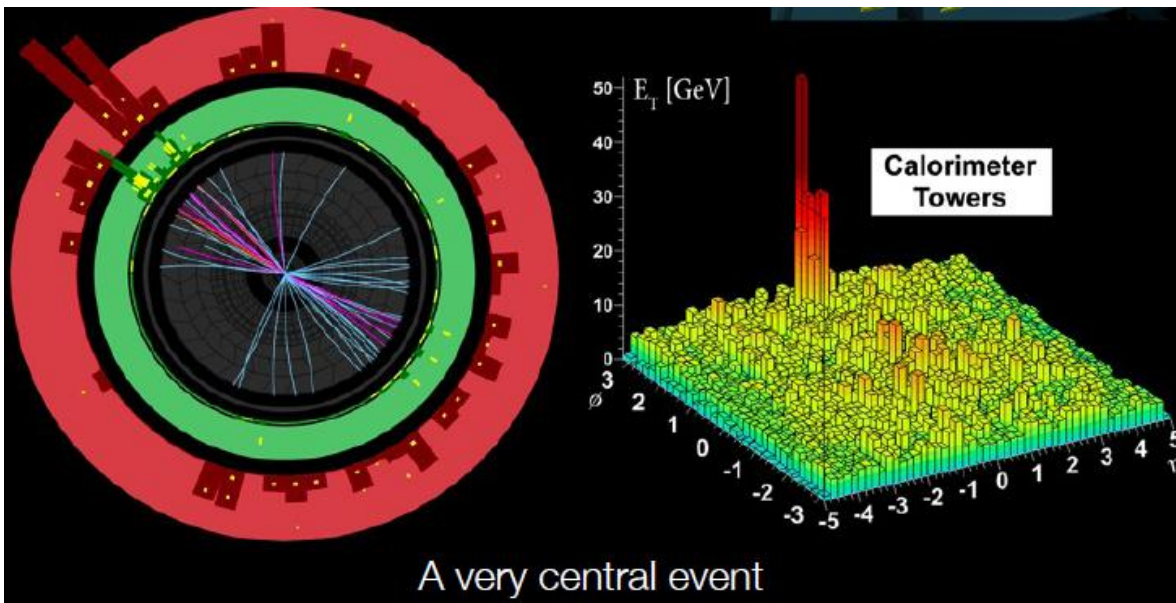
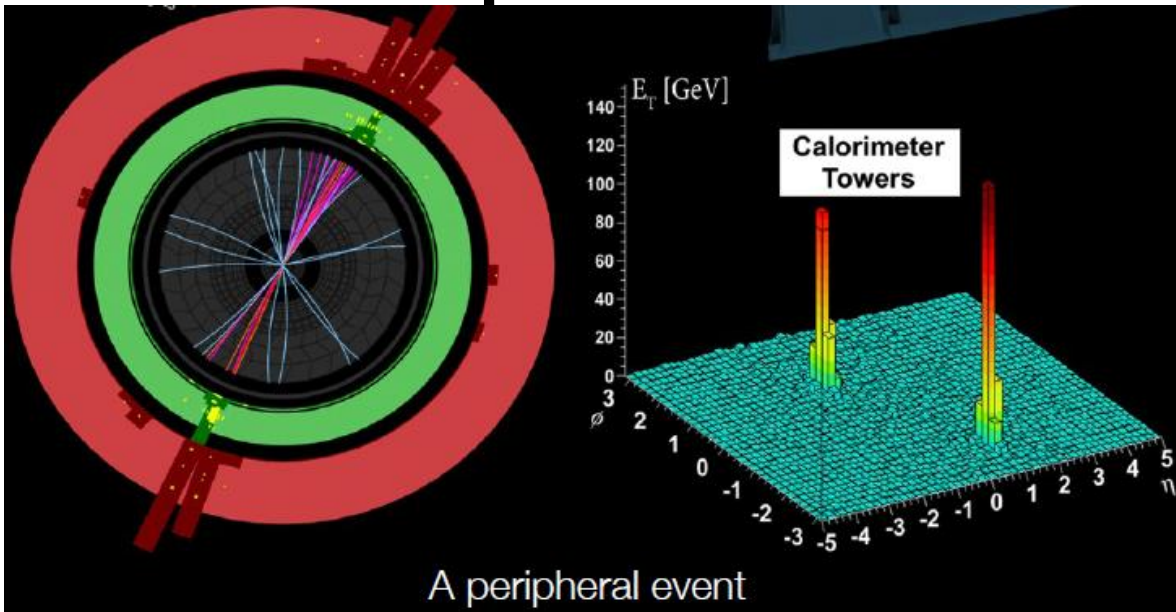
Прямое наблюдение погашения струй.

Прямое наблюдение погашения струй

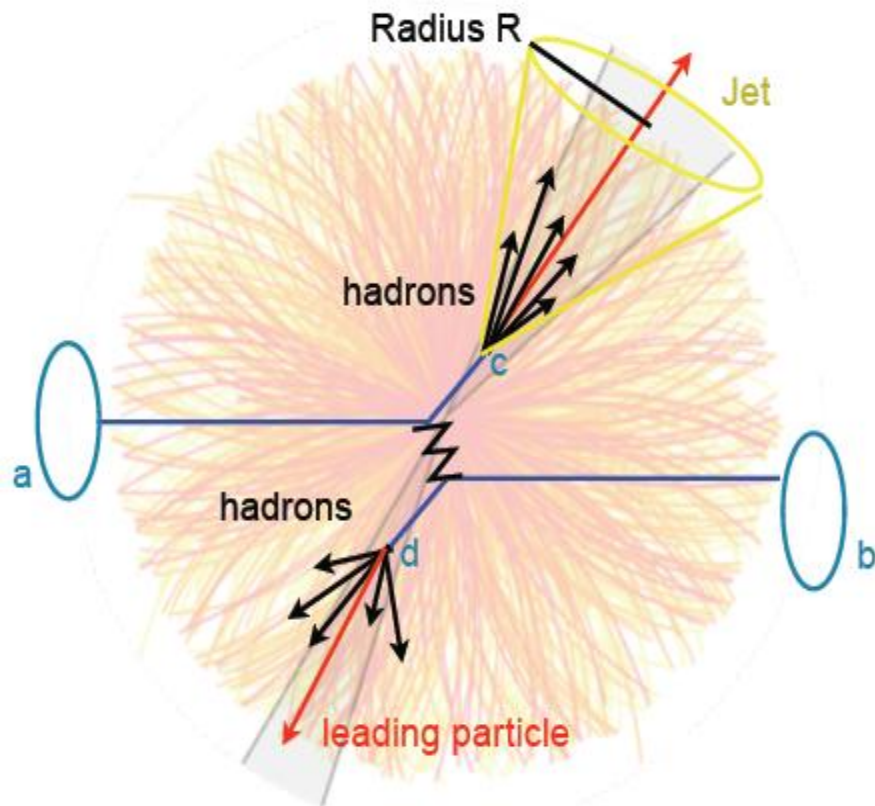


Новая эра в изучении «погашения» струй

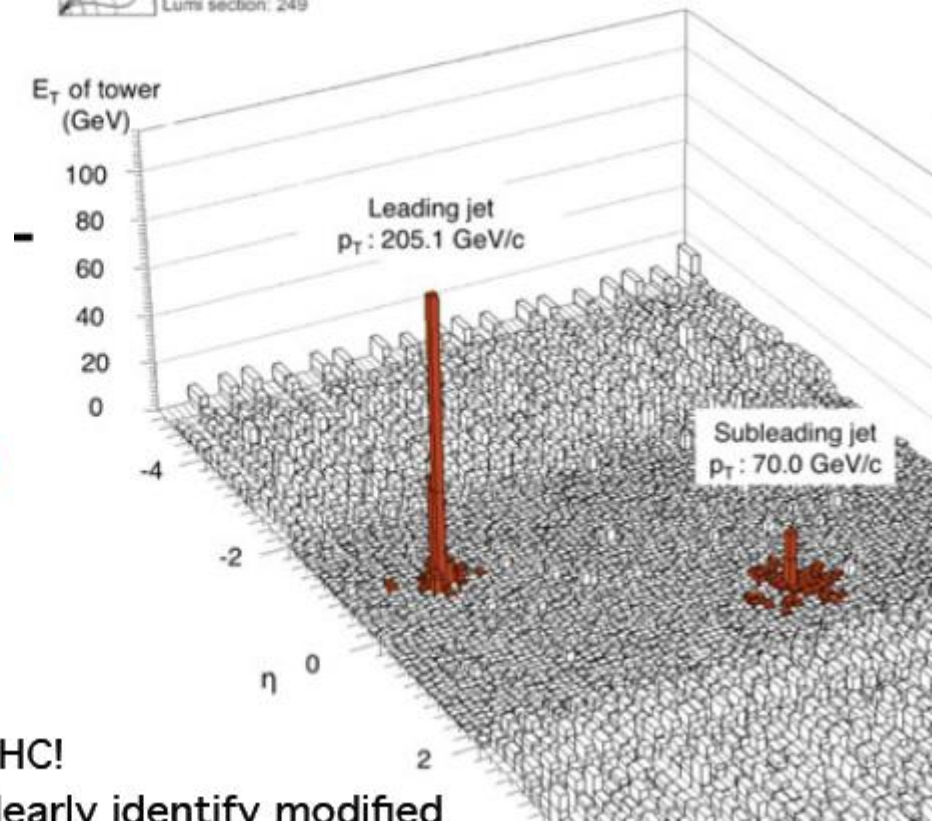
Эксперимент ATLAS



Новая эра в изучении погашения струй Эксперимент CMS



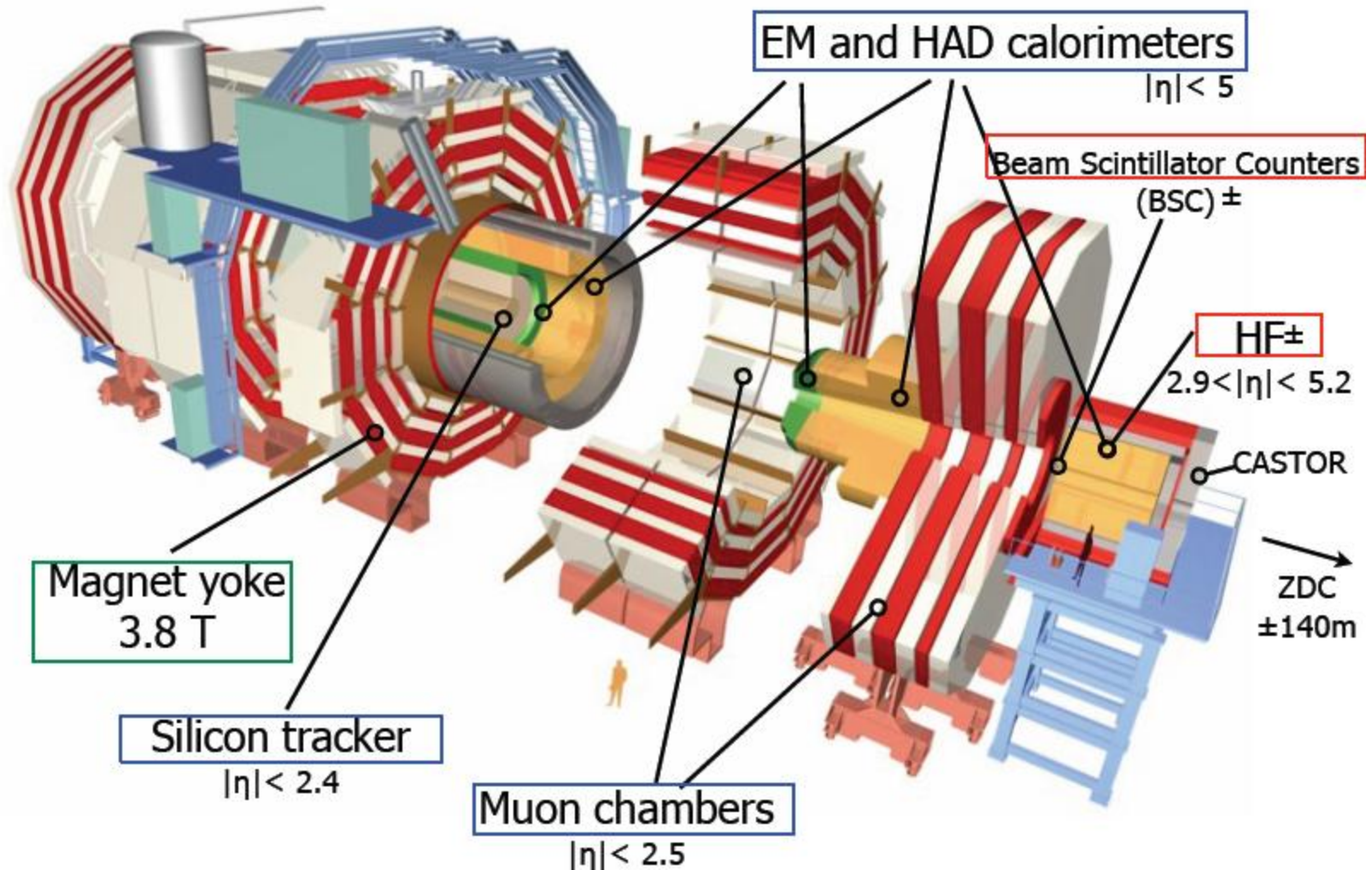
 CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Sun Nov 14 19:31:39 2010 CEST
Run/Event: 151076 / 1328520
Lumi section: 249



Beginning of a new era at LHC!

For the first time, we can clearly identify modified dijet partners.

Compact Muon Solenoid (CMS)



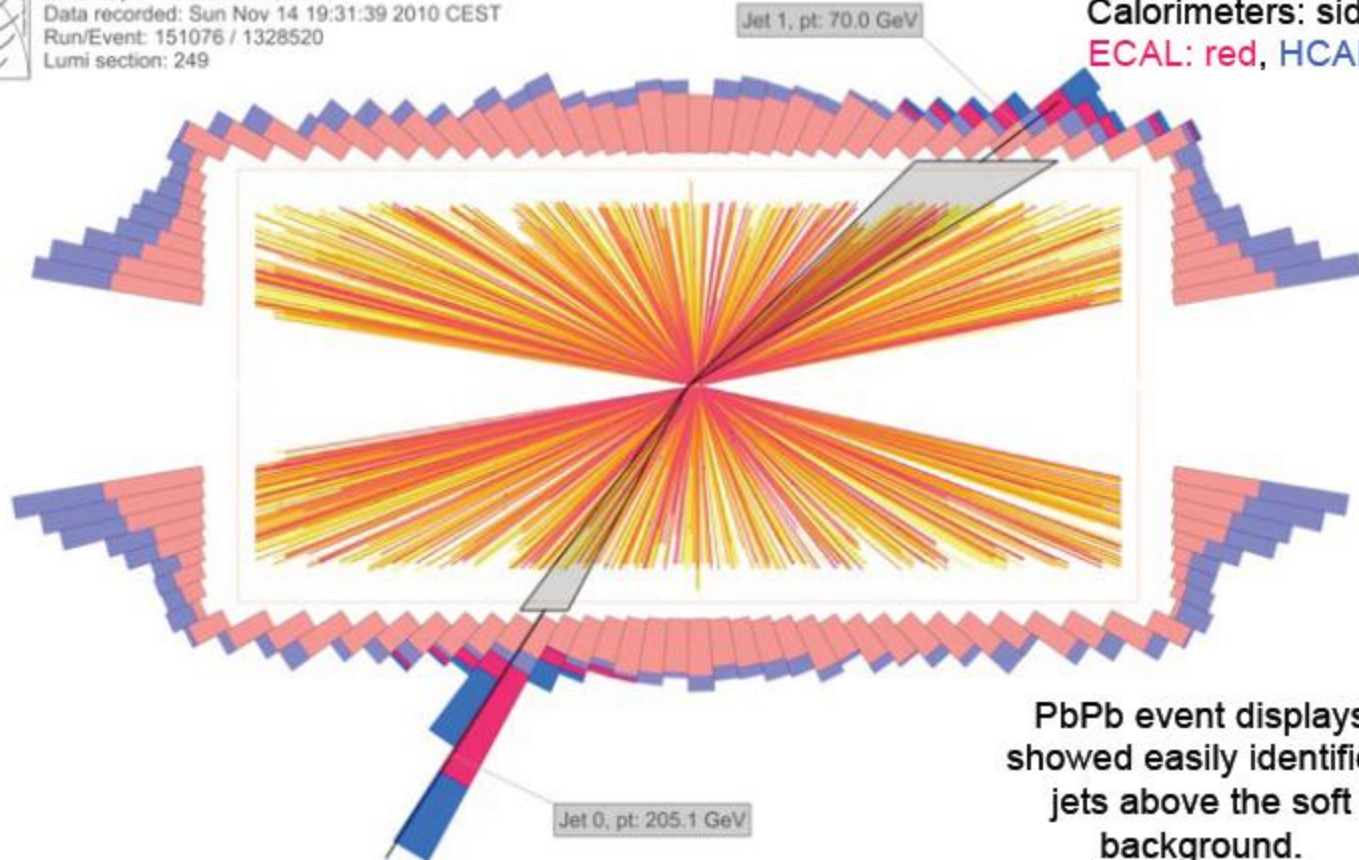
PbPb Collision with CMS



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

PbPb $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV

CMS tracker &
Calorimeters: side view
ECAL: red, HCAL: blue

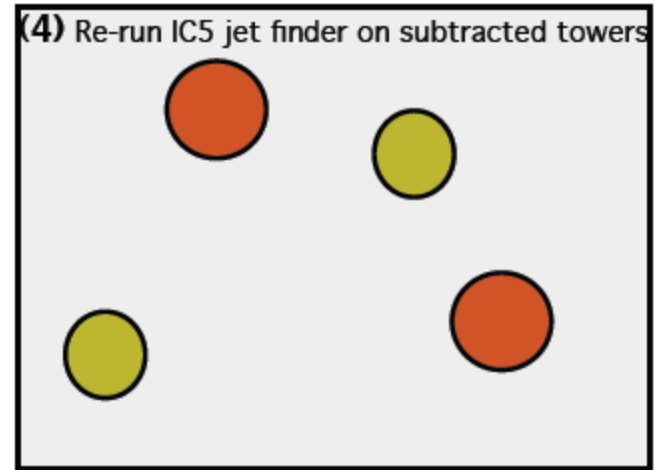
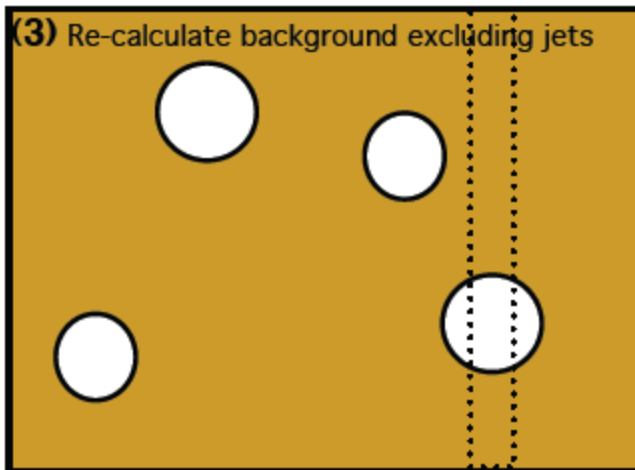
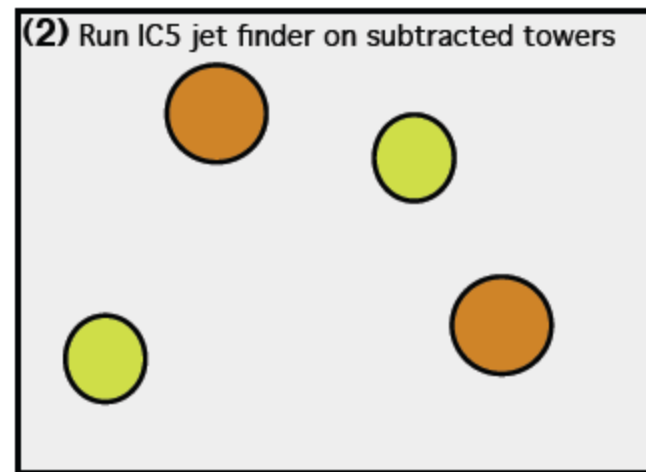
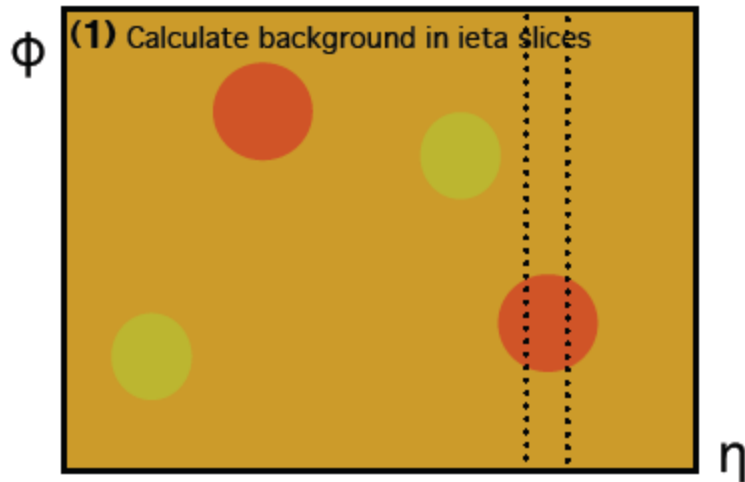


PbPb event displays
showed easily identified
jets above the soft
background.

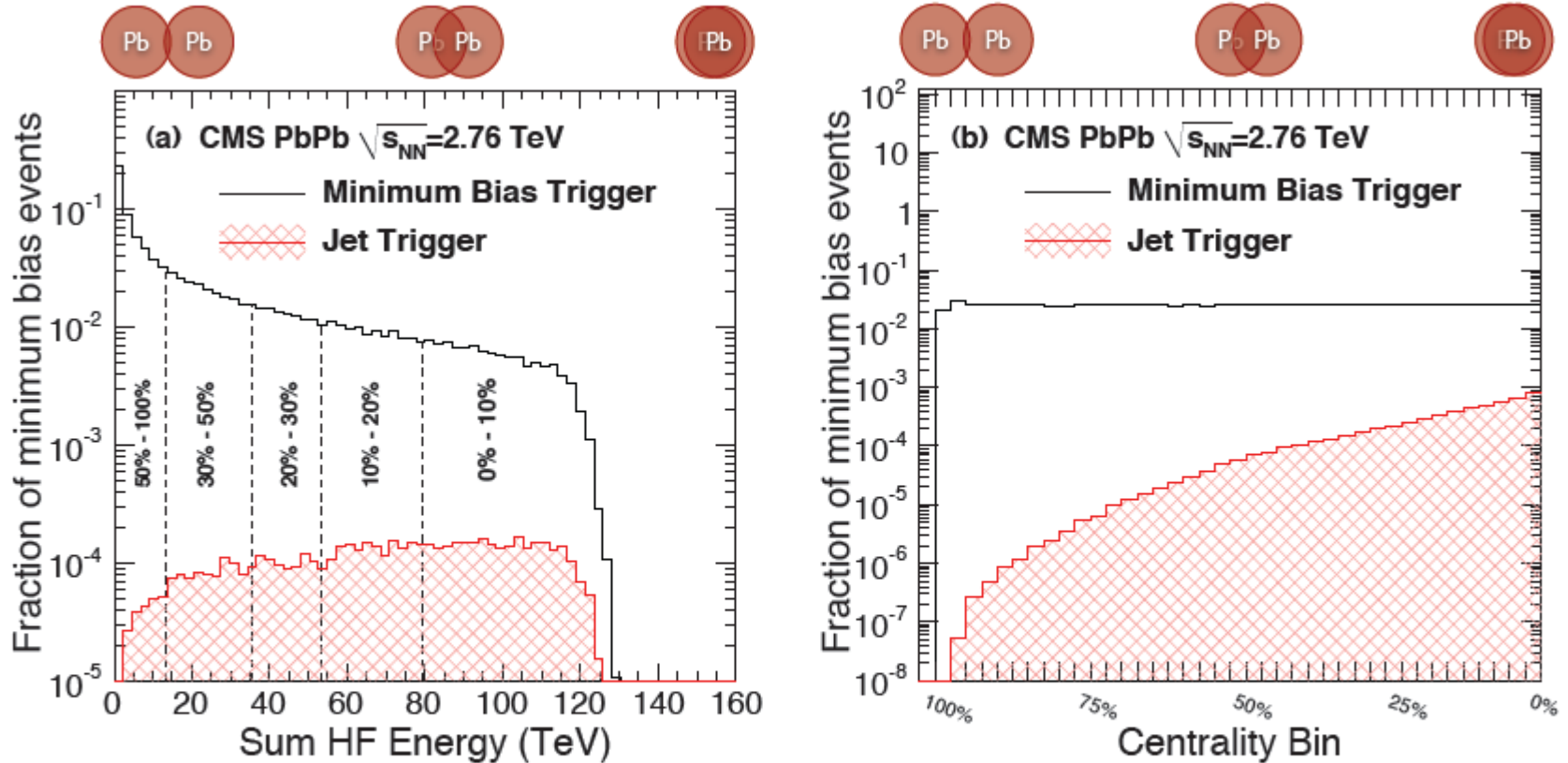
Calorimeter towers = ECAL+HCAL
 $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.087 \times 0.087$

<http://cdsweb.cern.ch/record/1309898?ln=en>

Алгоритм выделения струй



Анализ событий по центральности столкновения



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

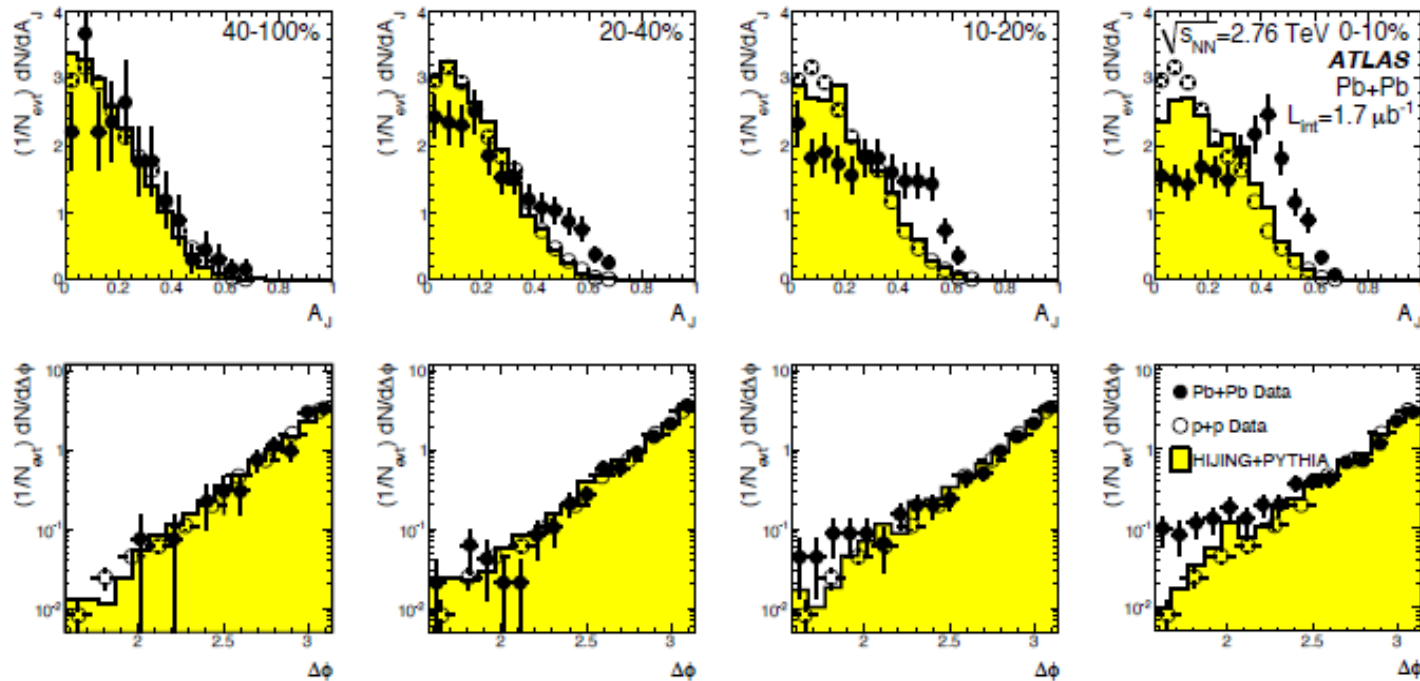
Распределение числа событий по энергии в адронном калориметре и по центральности столкновения

Дисбаланс струй, ATLAS

$$A_J = \frac{E_{T1} - E_{T2}}{E_{T1} + E_{T2}} - \text{переменная дисбаланса}$$



Final results (Phys. Rev. Lett. 105, 252303)

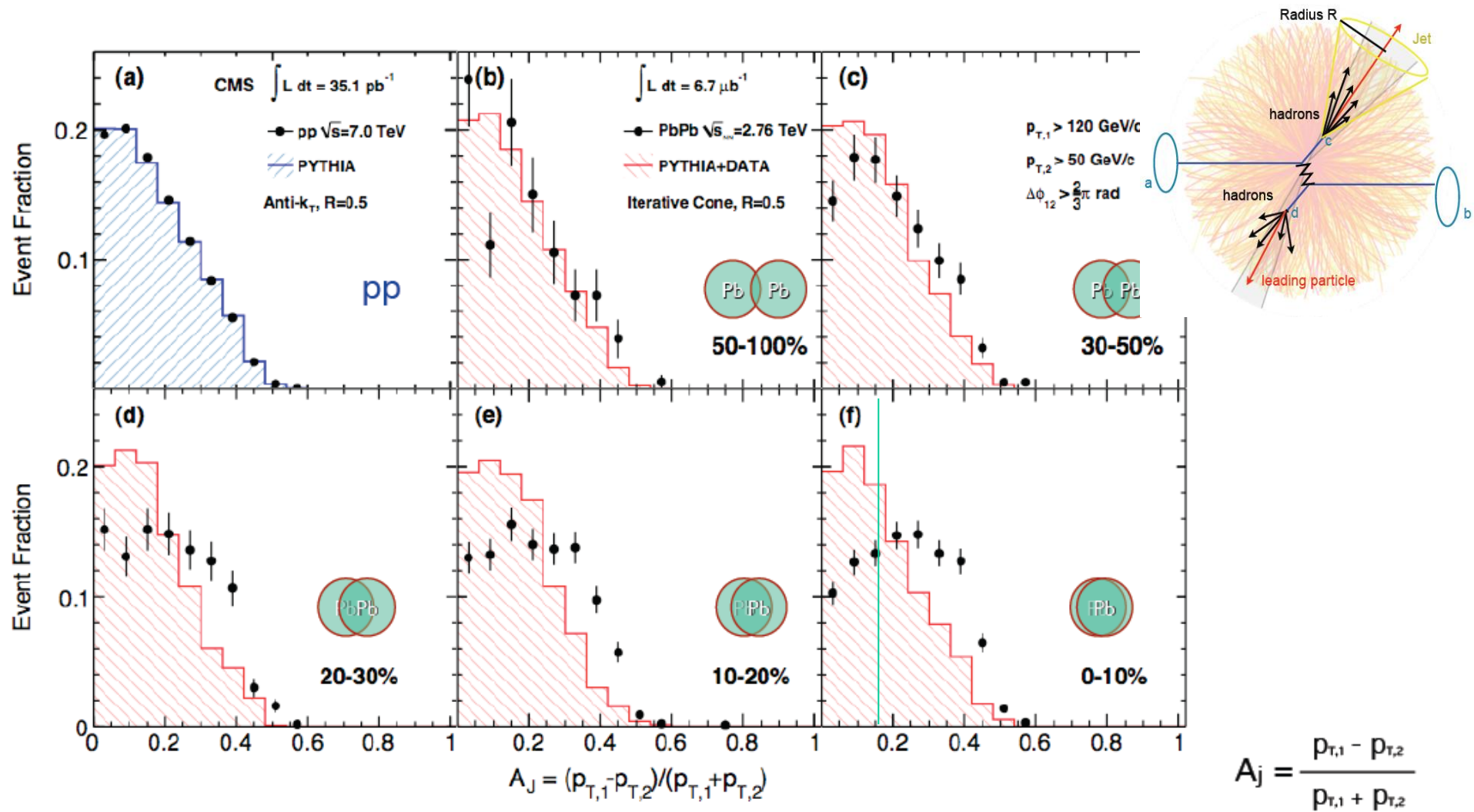


A_J

$\Delta\phi$

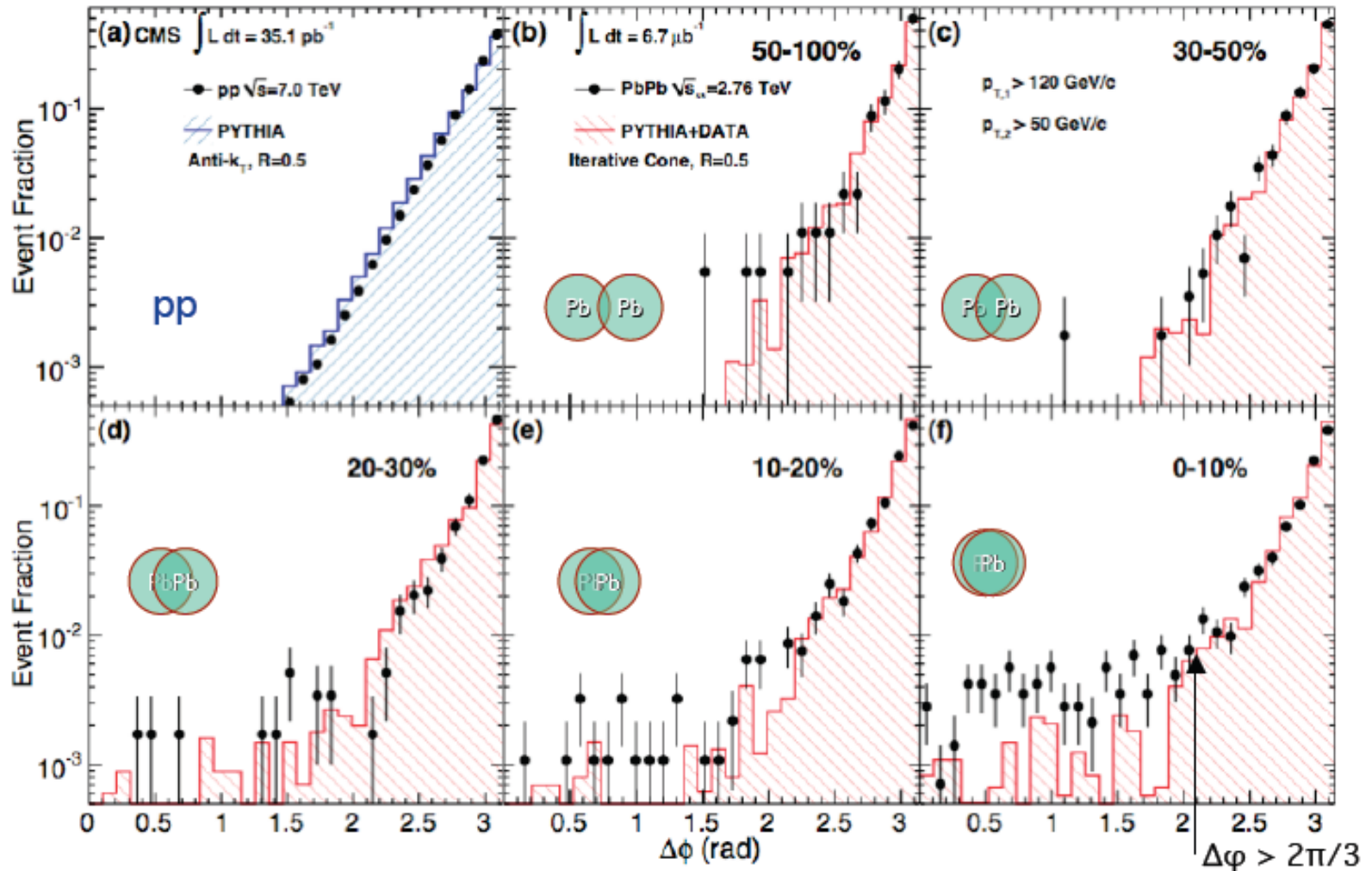
Strong variation of A_J with centrality.
 Similar distributions in $\Delta\phi$ (even in log scale!)

Дисбаланс струй, CMS



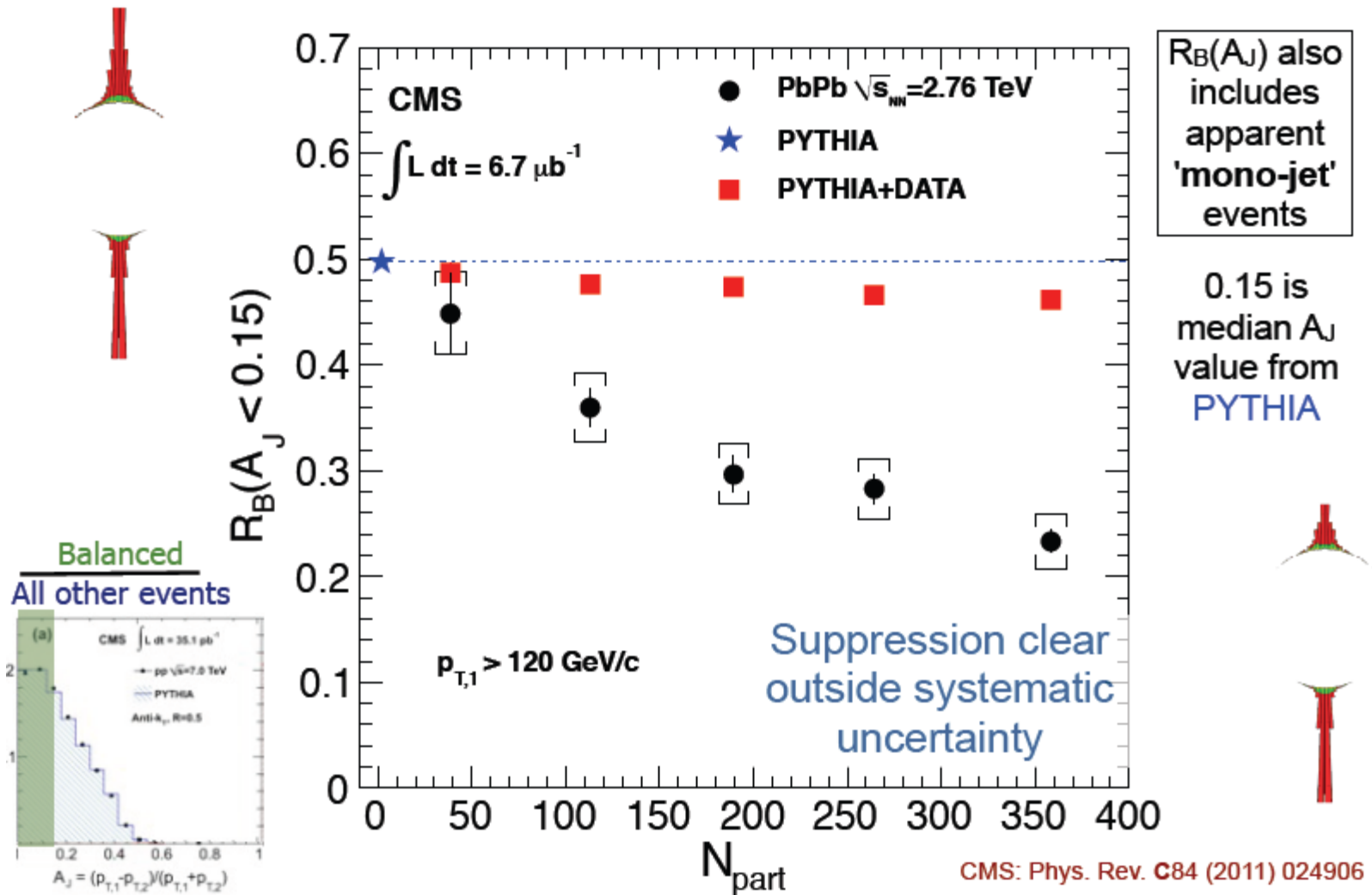
Потеря партонном энергии наблюдается как явный дисбаланс энергии (импульсов) между прямой и обратной струями

Относительный угол между направлениями back-to-back струй



Прохождение партонов в плотной партонной среде не приводит к изменению угла между направлениями back-to-back струй

Отношение числа двух-струйных событий в зависимости от центральности Рb-Рb столкновения при $A_J < 0.15$



Число событий с максимальным подавлением обратной струи уменьшается с ростом N_{part} и не меняется в модели РУТНЦА для пр

Куда «уходит» энергия обратной струи

$$p_T^{\parallel} = \sum_{\text{Tracks}} -p_T^{\text{Track}} \cos(\phi_{\text{Track}} - \phi_{\text{Leading Jet}})$$

Вычисляется разность поперечных импульсов частиц в проекции на направление лидирующей частицы от p_T и от угла по отношению к направлению оси 2-х струйного события.

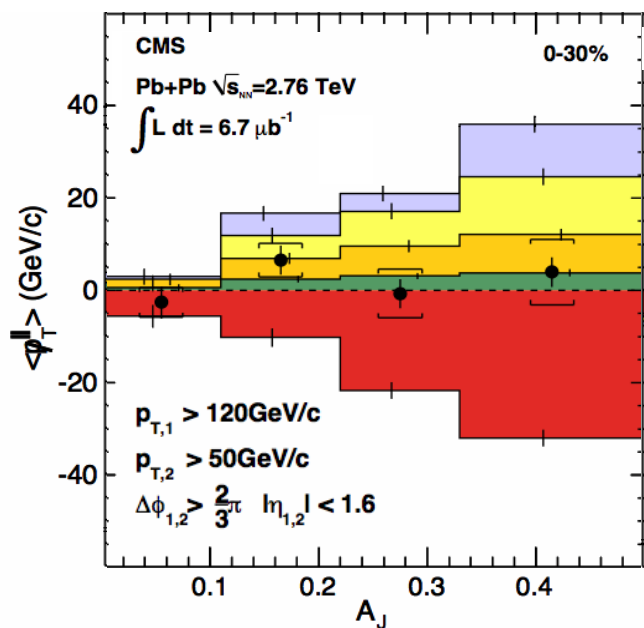
Если эта величина отрицательна, то сумма импульсов лидирующей струи больше (знак минус), чем обратной струи, и наоборот. При балансе она равна нулю.

This was calculated for all tracks with $p_T > 0.5 \text{ GeV}/c$ and $|\eta| < 2.4$ and also for tracks in various p_T ranges.

This allows us to see which p_T range carries the balance of the jet momentum.

Распределение потери энергии внутри и вне конуса струй

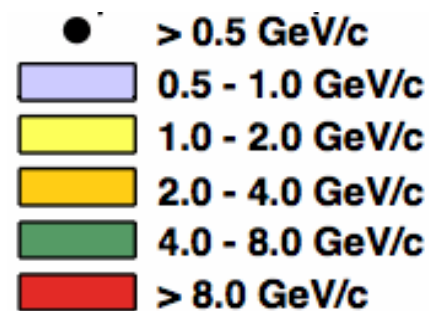
$$p_T^{\parallel} = \sum_{\text{Tracks}} -p_T^{\text{Track}} \cos(\phi_{\text{Track}} - \phi_{\text{Leading Jet}})$$



Low p_T excess away from leading jet

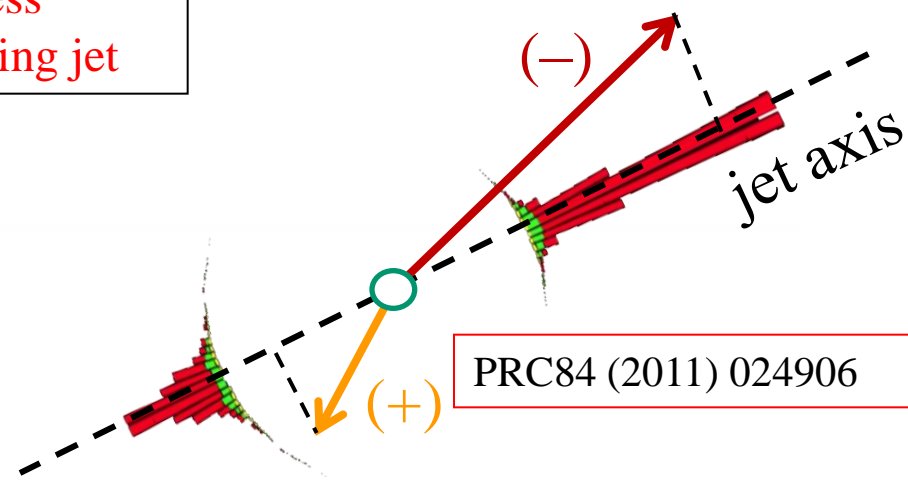
Overall balance!

High p_T excess towards leading jet



balanced dijets

unbalanced dijets

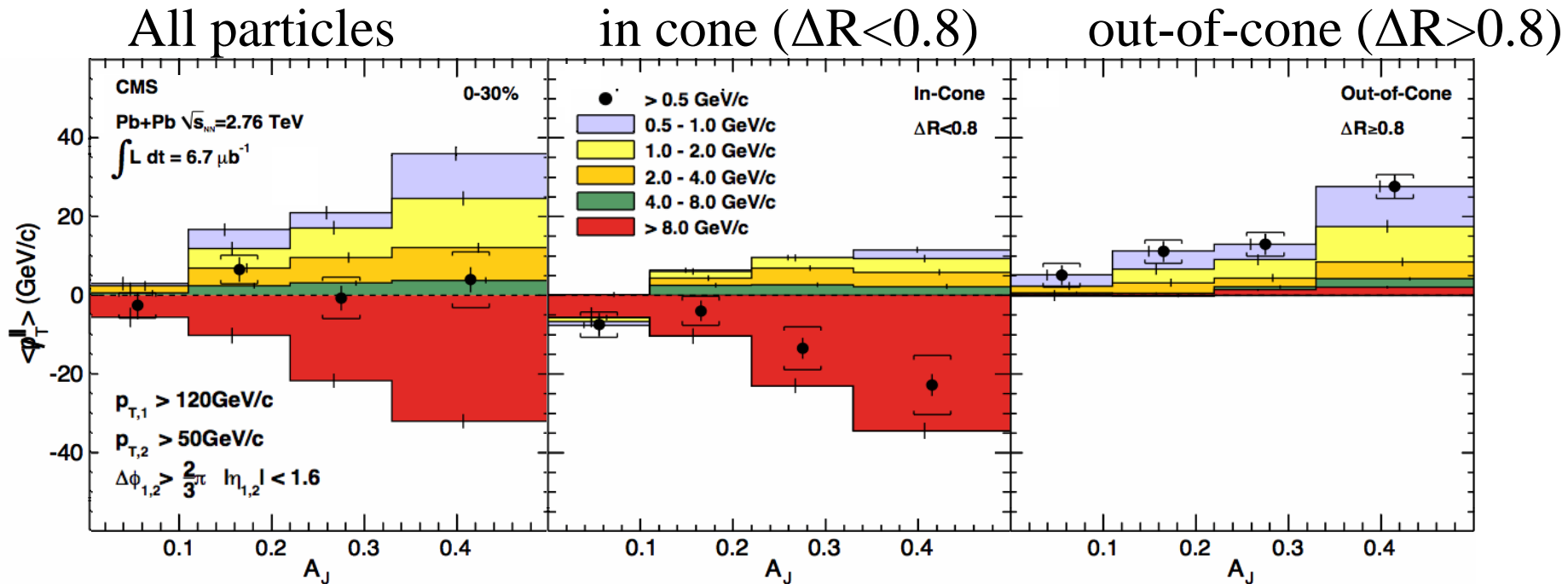


PRC84 (2011) 024906

Распределение потери энергии внутри и вне конуса струй

Потерянная энергия обратной струи уравнивается частицами малой энергии вне конуса двух-струйного события

PRC84 (2011) 024906



При высоких p_T частицы летят в конусе лидирующей струи, частицы с малыми p_T в конусе обратной струи и вне конусов обеих струй, что в целом приводит к равновесию суммы энергий частиц.

Результаты исследования дисбаланса струй в ядро- ядерном столкновении

- 1. Наблюдается большой (до 40%) дисбаланс в энергии двух струй, увеличивающийся с ростом центральности столкновения ядер.*
- 2. Дисбаланс существует до самых высоких энергий лидирующей струи ($p_T > 200 \text{ GeV}/c$).*
- 3. Потерянная доля энергии уходит с частицами малых импульсов ($p_T < 2 \text{ GeV}/c$) в области вне конуса вдоль оси струй.*

Вопросы (л. 6)

Какие экспериментальные данные свидетельствуют о высокой плотности партонов в начальной стадии столкновения ядер?

Меняется ли угол между струями в двухструйных событиях при явном дисбалансе энергии этих струй?

При каких условиях измерений увеличивается дисбаланс струй? Какова величина дисбаланса струй?

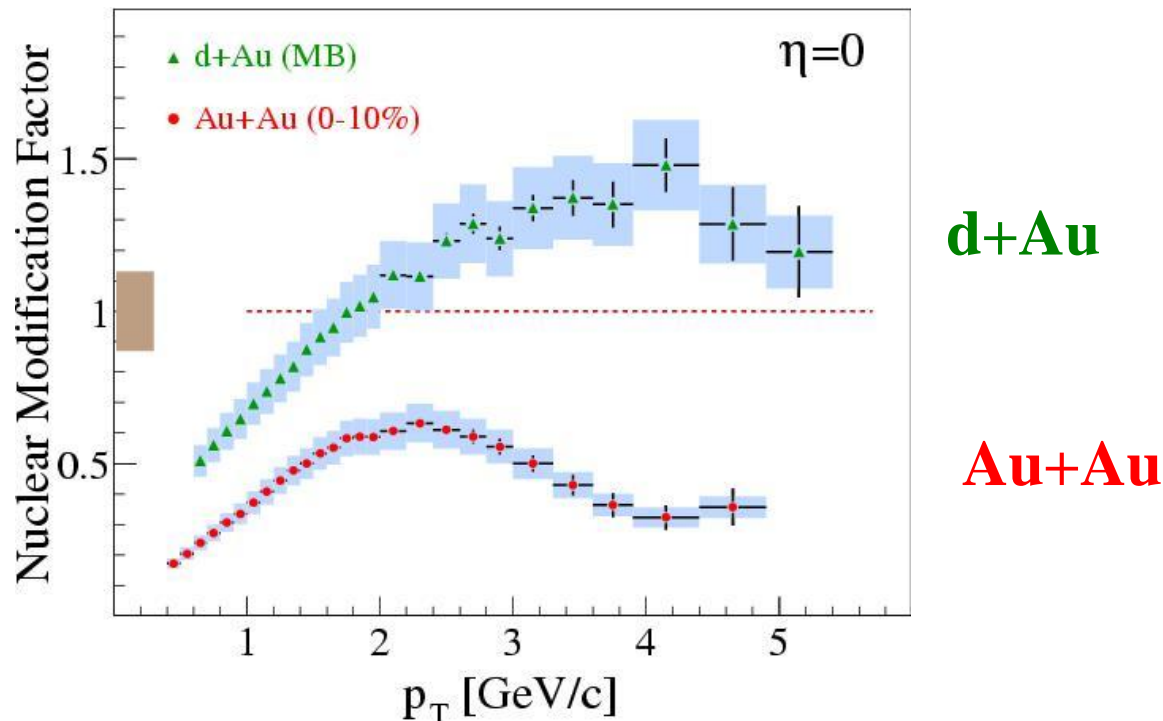
Куда «уходит» энергия, потерянная в дисбалансе струй, и как это было установлено

Запасные слайды

Неожиданные результаты подавления
выхода частиц при больших быстротах в
d-Au столкновениях.

Подавление выхода частиц для средних быстрот в $d + A$ столкновениях

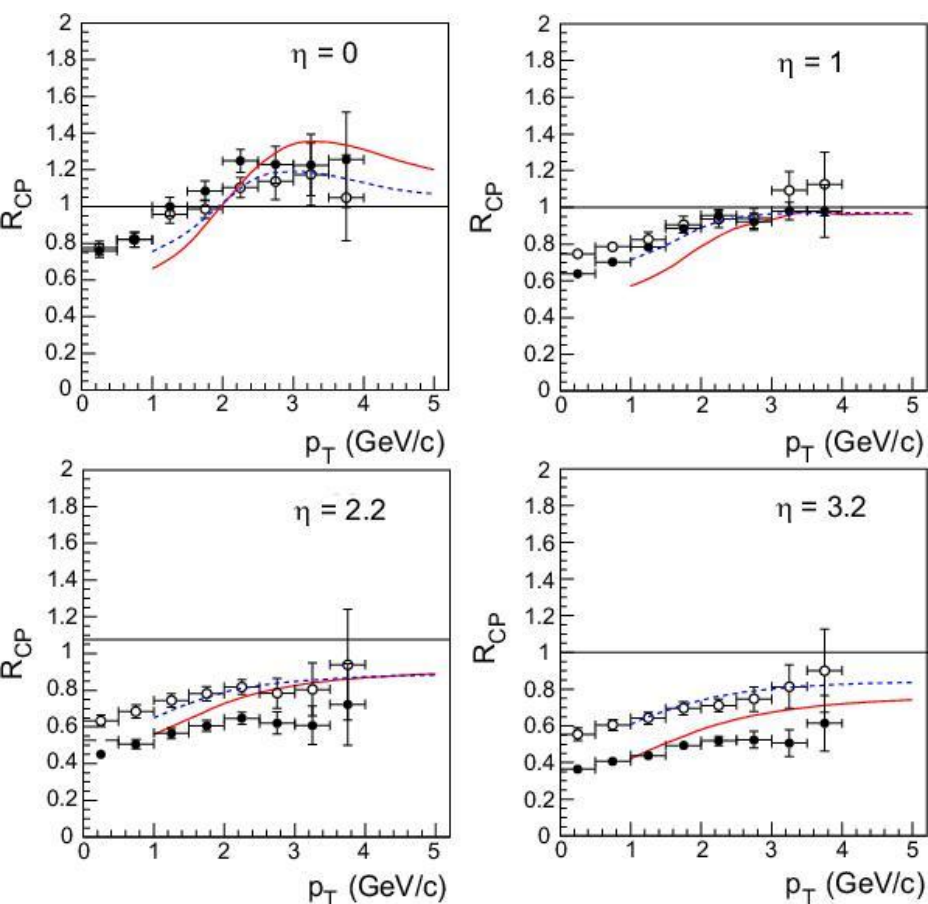
Чтобы проверить связано ли подавление с образованием плотной партонной системы, был измерен фактор R_{AA} для $d+Au$ столкновений, где нельзя достигнуть высокой плотности энергии. Для средних быстрот подавления частиц в $d+Au$ столкновениях не обнаружено, в то время как в $Au+Au$ столкновениях оно есть.



Фактор R_{AA} для $d+Au$ и $Au+Au$ столкновений

Зависимость выхода адронов для больших быстрых в $d+Au$ столкновениях

Еще до появления результатов $d+Au$ столкновения модель с учетом глюонного насыщения предсказывала подавление адронов при $p_T = 5-10$ ГэВ/с в средней области быстрых η в $Au+Au$ столкновениях. Т.к. это свойство связано с начальными условиями в налетающем ядре, то решено было проверить это свойство в $d+Au$ столкновениях. Однако при малых быстрых не было обнаружено подавления в $d+Au$ столкновениях.



Новые измерения на RHIC показали, что при больших быстрых η в направлении полета дейтрона такое подавление наблюдается (Рис.32) и не наблюдается в направлении Au. Партоны в d видят в ядре Au большую плотность глюонов при малых Бьеркиновских $x=0.03-0.05$ для $\eta=3.2$ и $p_T = 1.5$ ГэВ/с. Именно при таких значениях x в тяжелых ядрах имеется глюонное насыщение. Это первая модель, предсказания которой, оправдались.

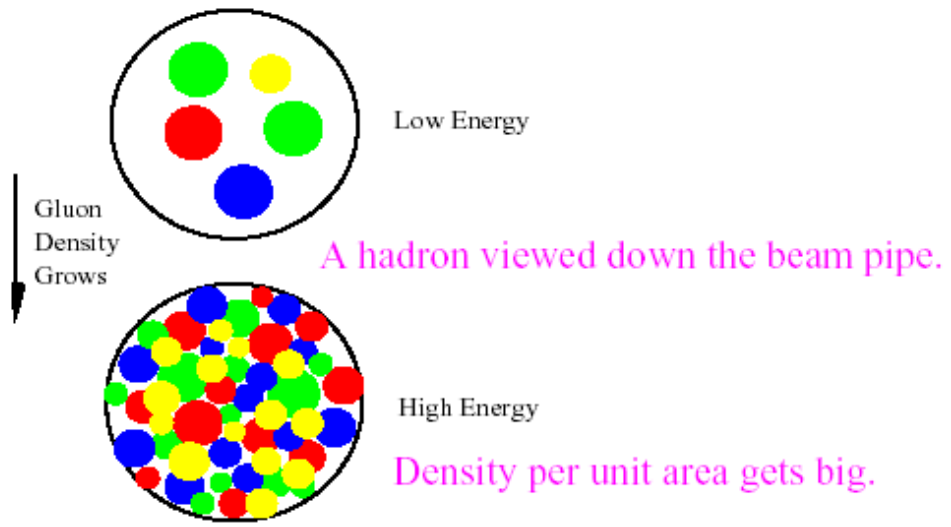
Рис.32. Отношение $R_{CP}(p_T)$ для заряженных частиц в $d+Au$ столкновениях при 200 ГэВ (BRAHMS). Сплошные точки (0-20%)/(60-80%), полые - (30-50%)/(60-80%). Кривые – фит в модели с глюонным насыщением.

В области передних (больших) быстрот в $d + Au$ столкновениях обнаружено подавление при больших p_T , начиная с $\eta = 1$ и сглаживание зависимости с ростом быстроты до $\eta = 3.2$. Этот эффект объясняется особенностями начальных условий в ядрах, в частности существованием цветового стеклянного конденсата (CGC), описывающего высокую плотность паронов при малых x .

CGC – описание основного состояния быстро движущихся ядер до столкновения. Из-за Абелевской природы КХД глюоны сильно взаимодействуют между собой, что приводит в ядрах к большому числу глюонов с малыми x (x – доля продольного импульса, уносимого глюоном) с резким ростом этого числа при уменьшении x (см. след. слайд).

Плотность глюонов $dN/(d(\ln(1/x))) \sim 1/\alpha_s$ -

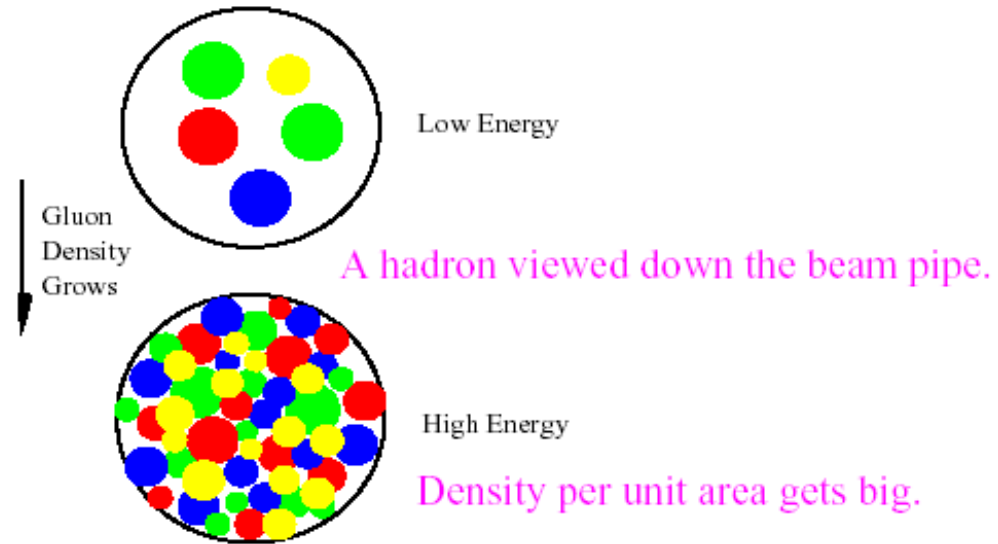
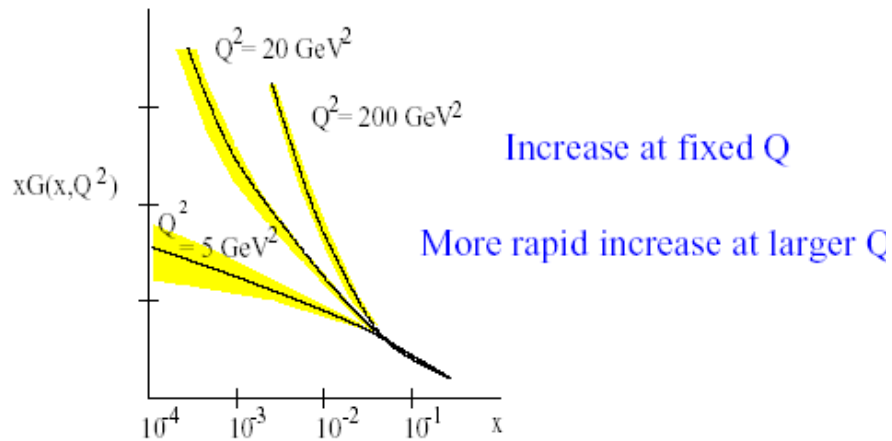
в таких насыщенных системах высока, т.к. бегущая константа α_s уменьшается с ростом энергии. Система может быть описана квази-классическим полем и соответствующая техника позволяет найти партонное распределение в начальном состоянии.



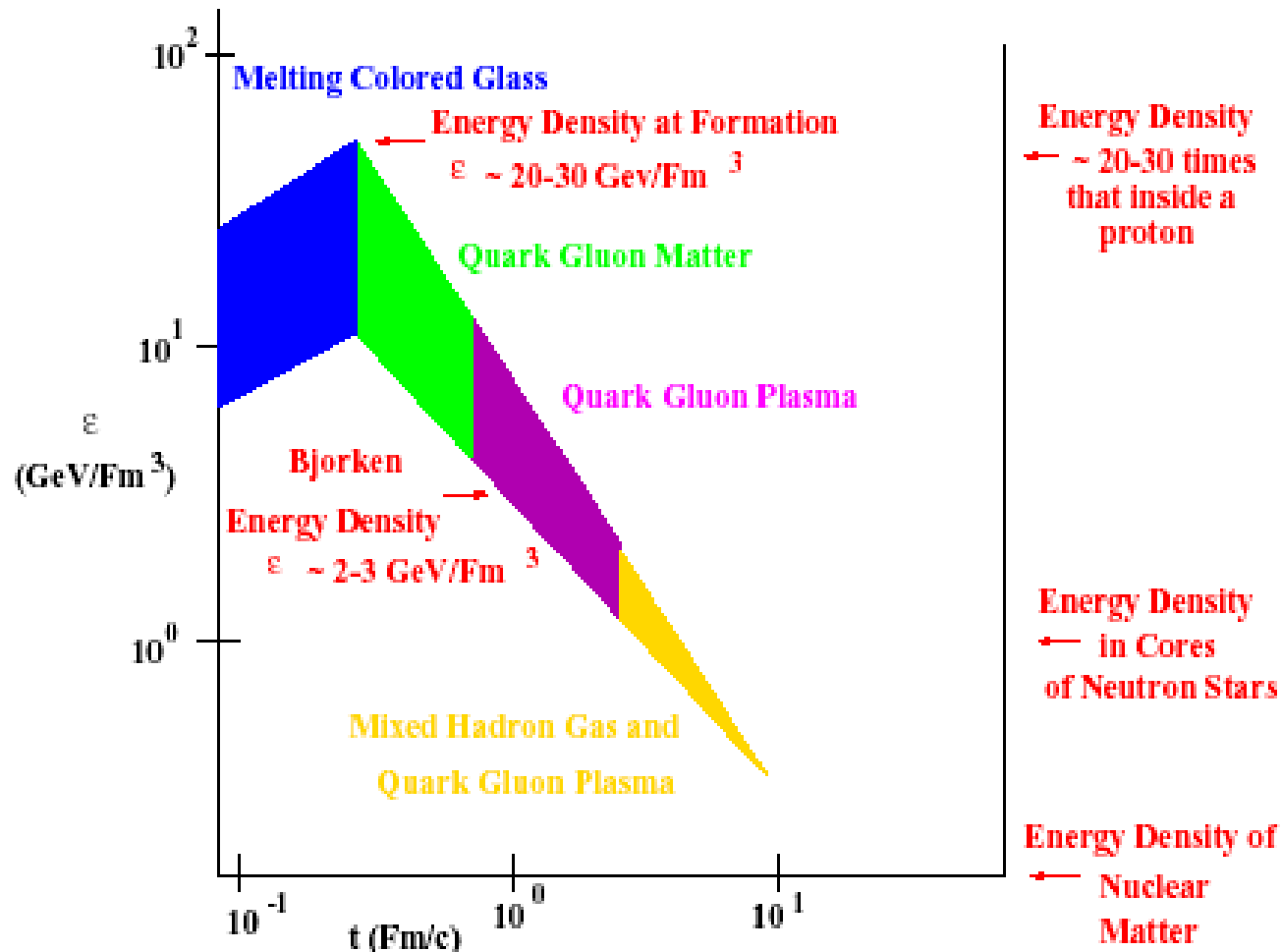
L. McLerran et al.
 PR D49(1994)2233,
 PRD59(1999)-94002,
 N.Phys.A692(2001)583

В эксперименте $e^+ e^-$ было обнаружено, что при малых $x=10^{-4}$ - 10^{-2} плотность глюонов резко растёт.
 Это послужило толчком к развитию модели глюонного насыщения

The Gluon Density Grows at Small x



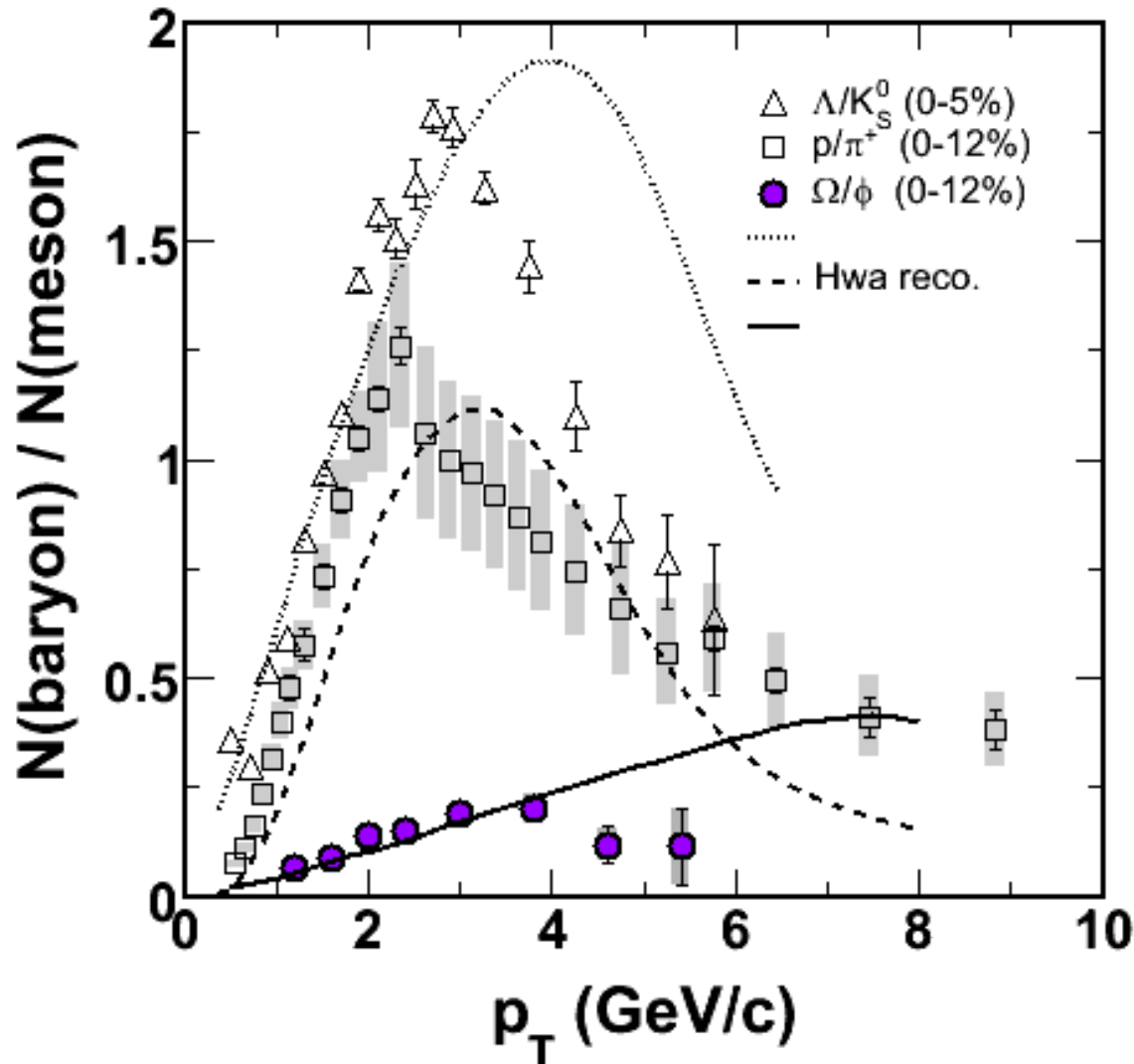
Предполагаема схема эволюции во времени новой плотной партонной материи в ядро-ядерном столкновении



Подавление рождения частиц при больших p_T для быстрот вперед в $d + Au$ столкновениях – новый и неожиданный эффект, который может быть связан с новым коллективным партонным состоянием, описывающим ядра при малых x и, следовательно, задающим начальные условия в релятивистских ядерных столкновениях .

Light & strange baryon to meson ratios

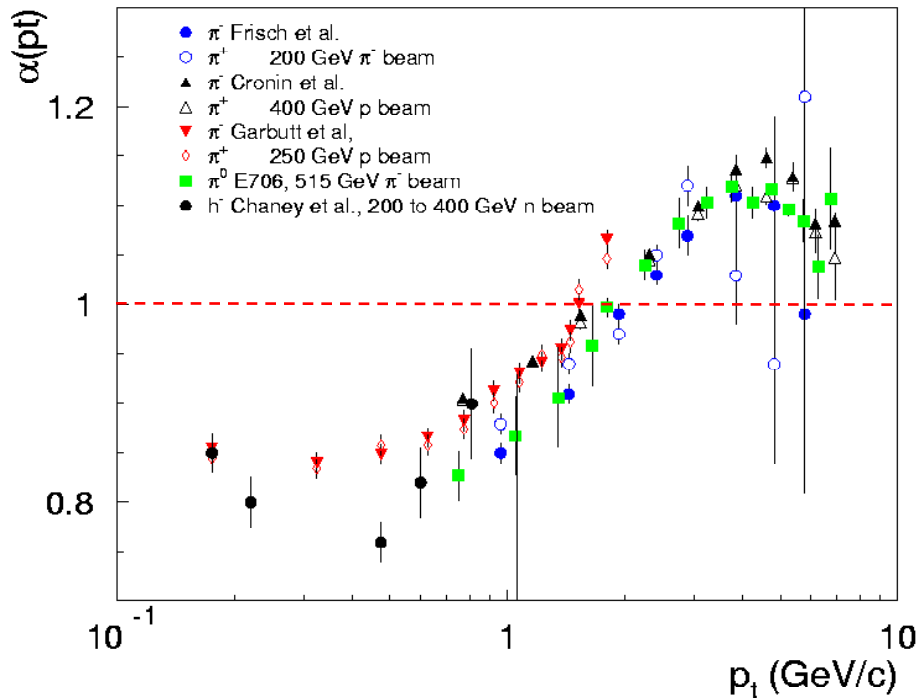
STAR preliminary



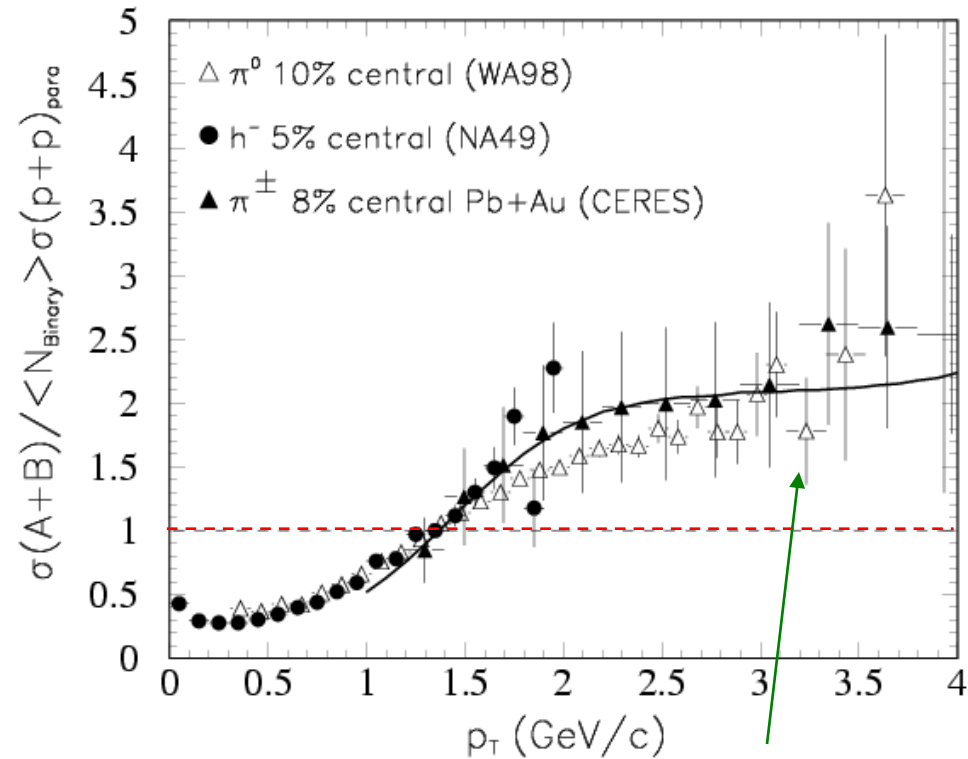
Do the p_T dependencies in the recombination results hint at a more 'massive' strange quark ?

Leading Hadrons in Fixed Target Experiments

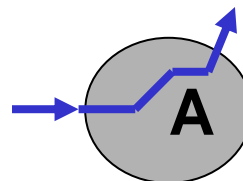
p+A collisions: $\sigma_{pA} = A^{\alpha P_t} \sigma_{pp}$



Central Pb+Pb collisions at SPS (17 $\Gamma_{\text{эВ}}$)



Многократное
рассеяние (“Cronin effect”)



S.Margets (STAR), CMS-DELPHY, 2003

Отсутствие подавления при более низких энергиях

Измерения на RHIC при энергии **62.4 ГэВ** и при угле 45 градусов ($\eta = 0.9$) показывают, что подавление меньше, чем в случае с энергией 200 ГэВ/с.

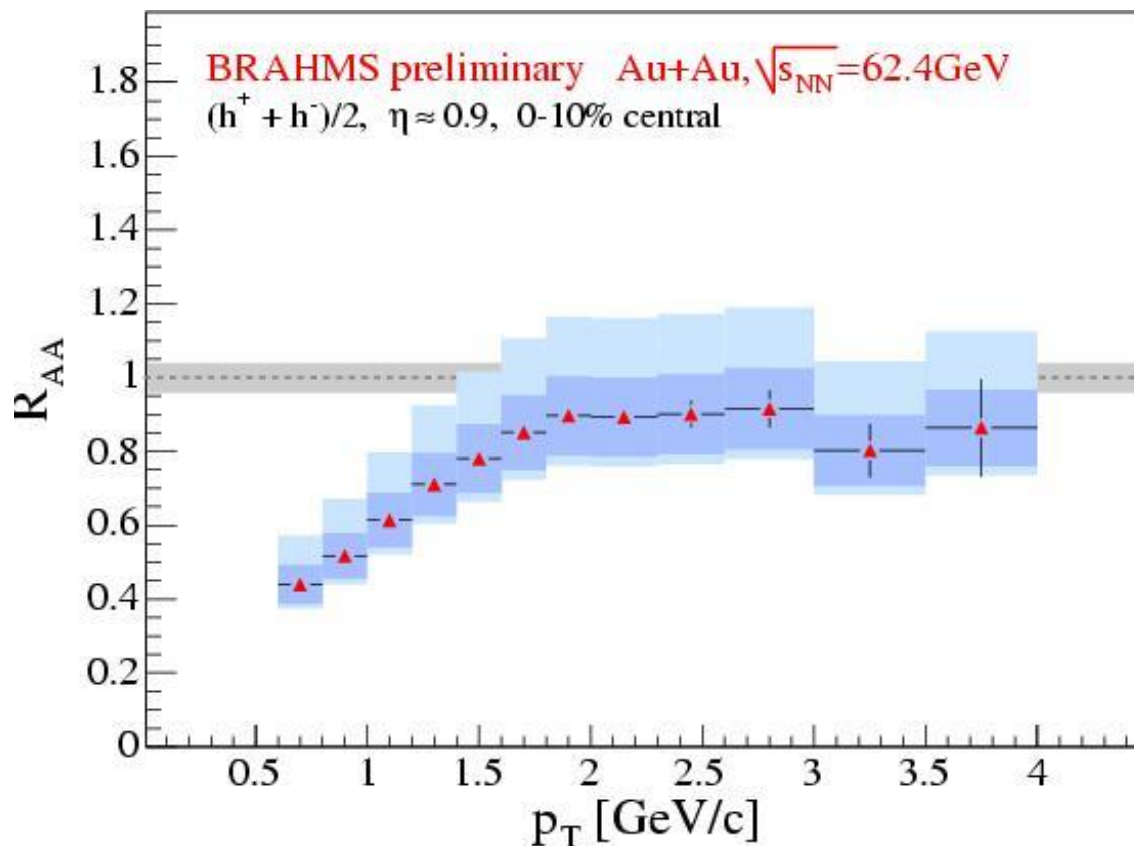


Рис.16. Фактор подавления R_{AuAu} при 62.4 ГэВ/с

Согласно КХД цветовой объект теряет энергию за счет радиации глюонов аналогично тормозному излучению в электродинамике. Из-за цветового заряда глюонов потеря энергии пропорциональна квадрату длины прохождения в цветовой среде и в конечном итоге уменьшению числа частиц от струи при больших p_T .

Ниже следующие рисунки показывают отношение выхода частиц в $A+A$ и $p+p$ столкновениях - **ядерный модифицированный фактор**

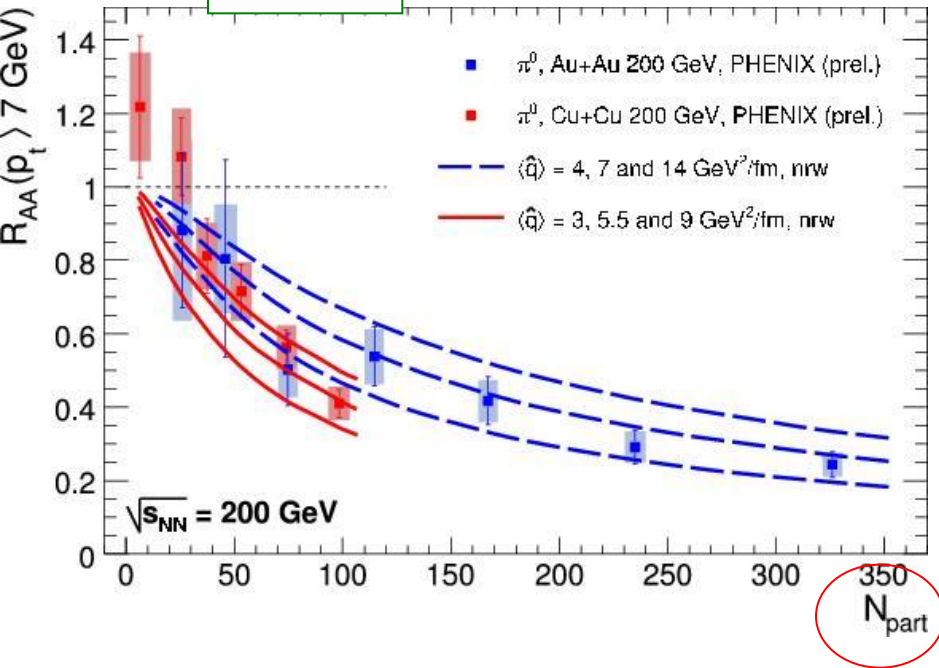
$$R_{AA} = \frac{d^2 N^{AA} / dp_T d\eta}{\langle N_{coll} \rangle d^2 N^{NN} / dp_T d\eta}$$

N_{coll} - число ожидаемых некогерентных бинарных столкновений. При отсутствии эффектов среды $R_{AA} = 1$ при высоких p_T . При низких $p_T < 2$ ГэВ/с, где рождение частиц пропорционально числу нуклонов-участников, величина $R_{AA} < 1$.

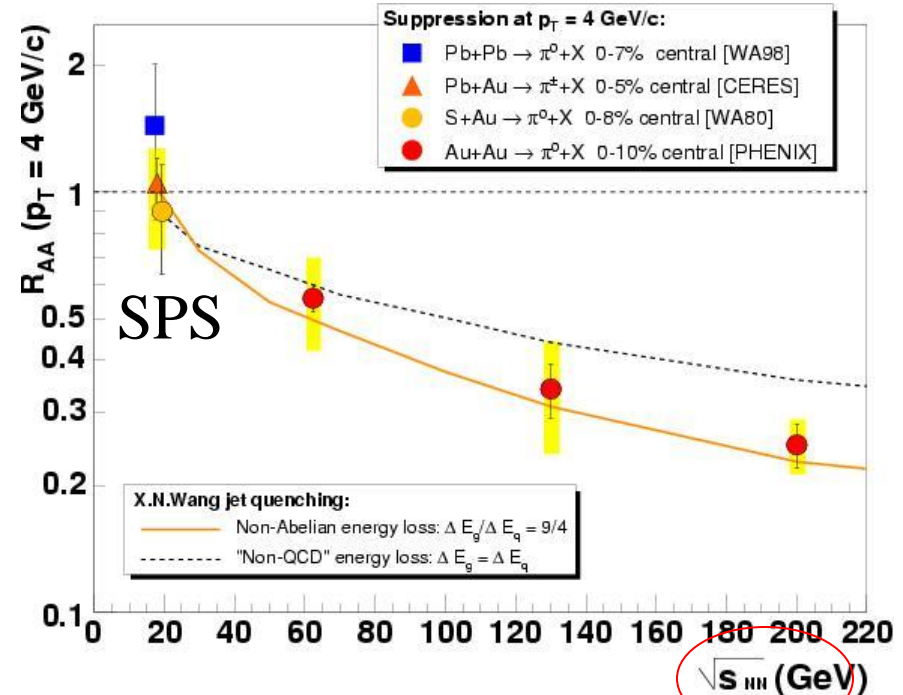
Было обнаружено, что $R_{AA} > 1$ при $p_T > 2$ ГэВ/с для реакций при низких энергиях. Это – усиление за счет многократных перерассеяний партонов (эффект Кронины).

Подавление выхода частиц с высокими p_T в зависимости от центральности и энергии столкновения

Рис.12



Отношение R_{AA} как функция числа N_{part} участвующих нуклонов и сравнение с моделями с потерей энергии партонами (GLV модель)



Отношение R_{AA} в зависимости от энергии при $p_T=4$ ГэВ и сравнение с моделями, учитывающими погашение струй. Для энергий SPS (17 GeV) подавление не наблюдается.

Эмпирические свойства для адронов с легкими кварками:
 величина подавления, зависимость от p_T -, от центральности и от энергии →

- находятся в количественном согласии с моделями.

Прямое наблюдение погашения струй

