Модификация характеристик адронных струй в соударениях ионов свинца на Большом адронном коллайдере

Алкин А. А.,
студент кафедры физики космоса физического факультета
МГУ имени М. В. Ломоносова

Научный руководитель: д.ф.-м.н., в.н.с. И. П. Лохтин

Конференция «Ломоносов»
2016

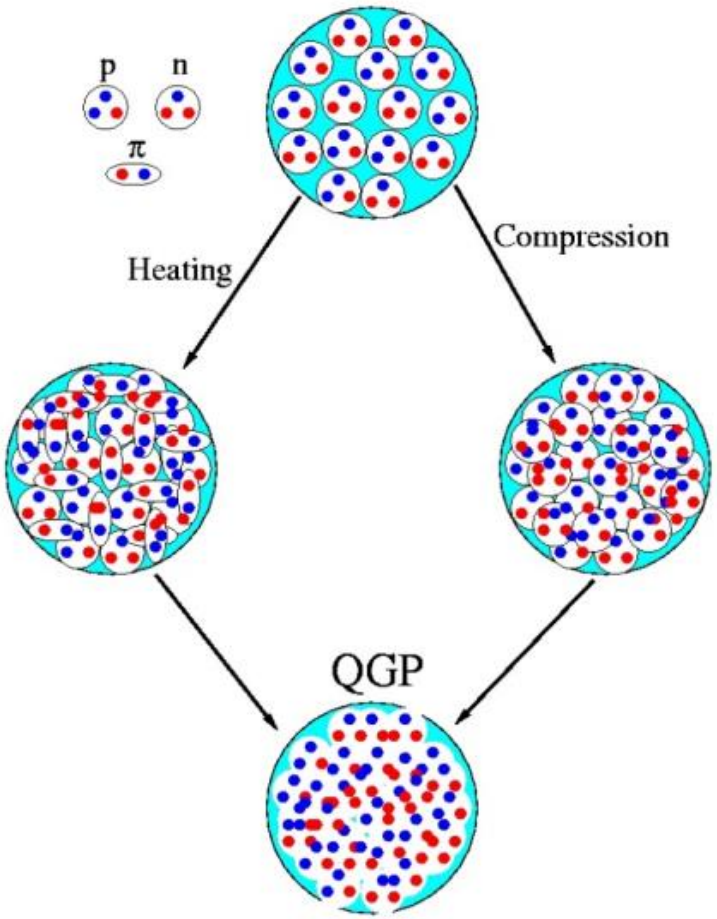
Краткое содержание

В работе был проведен анализ модификации адронных струй, рождающихся в столкновениях ионов свинца на LHC при энергии 2.76 ТэВ на пару нуклонов в системе центра масс.

Для различных центральностей соударений с помощью генератора событий PYQUEN были получены импульсная зависимость факторов ядерной модификации инклюзивных струй и струй от b-кварков, функции фрагментации, а также была исследована форма струй.

Моделирование имело два сценария: с широкоугловыми и узкоугловыми радиационными потерями. Анализ результатов в сравнении с данными CMS и ATLAS позволил сделать выводы о механизмах потерь энергии высокоэнергитичными партонами в КГП и проверить заложенные в модель предположения.

Кварк-глюонная плазма и деконфайнмент ядерной материи



Критическая плотность энергии

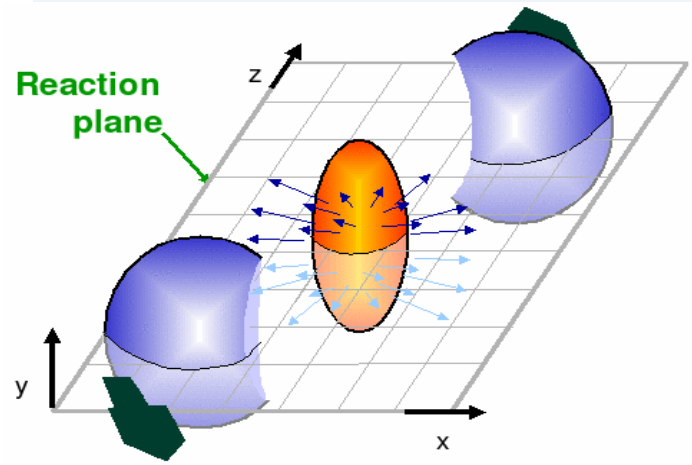
$$\sim 1\,\mathrm{GeV}/\,\mathrm{fm}^3.$$

Одно из основных предсказаний квантовой хромодинамики - достижение деконфайнмента ядерной материи и образование нового состояния вещества: кварк-глюонной плазмы

10^{-10}–10^{-6} сек. после Большого взрыва - кварк-адронный фазовый переход

В первые доли секунды благодаря экстремальной температуре и высокой плотности энергии, кварки и глюоны не удерживались внутри индивидуальных адронов, свободно передвигаясь в большом объеме, достигая таким образом состояния деконфайнмента ядерной материи с образованием нового вещества – кварк-глюонной плазмы (КГП).

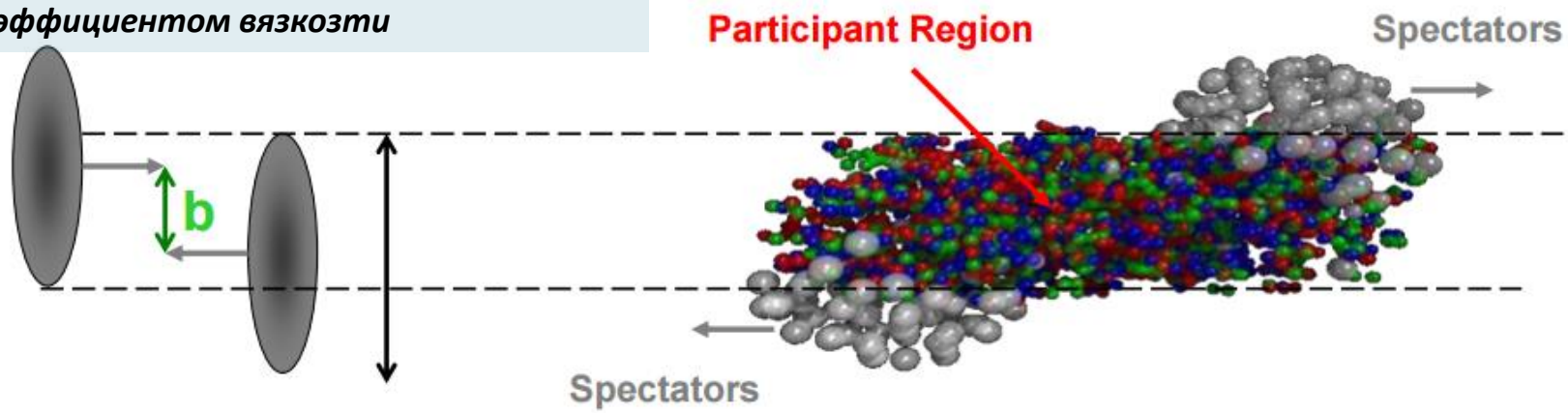
Поиск КГП



В релятивистских соударениях тяжелых ионов достигается необходимая энергия для формирования сверхплотного состояния КХД-материи в квазимакроскопических объемах

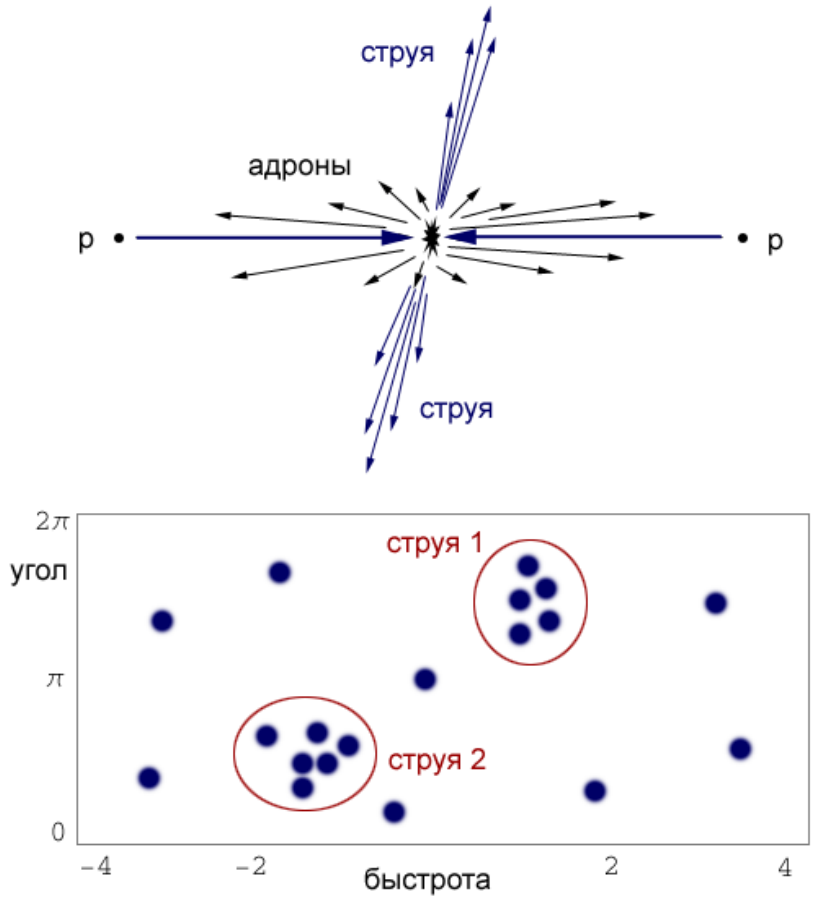
Образуется «сгусток» со свойствами сильновзаимодействующей идеальной партонной жидкости с малым коэффициентом вязкозти

Давление в среде превышает атмосферное в 10^{25}–10^{30} раз, температура достигает 10^{9}–10^{10} К

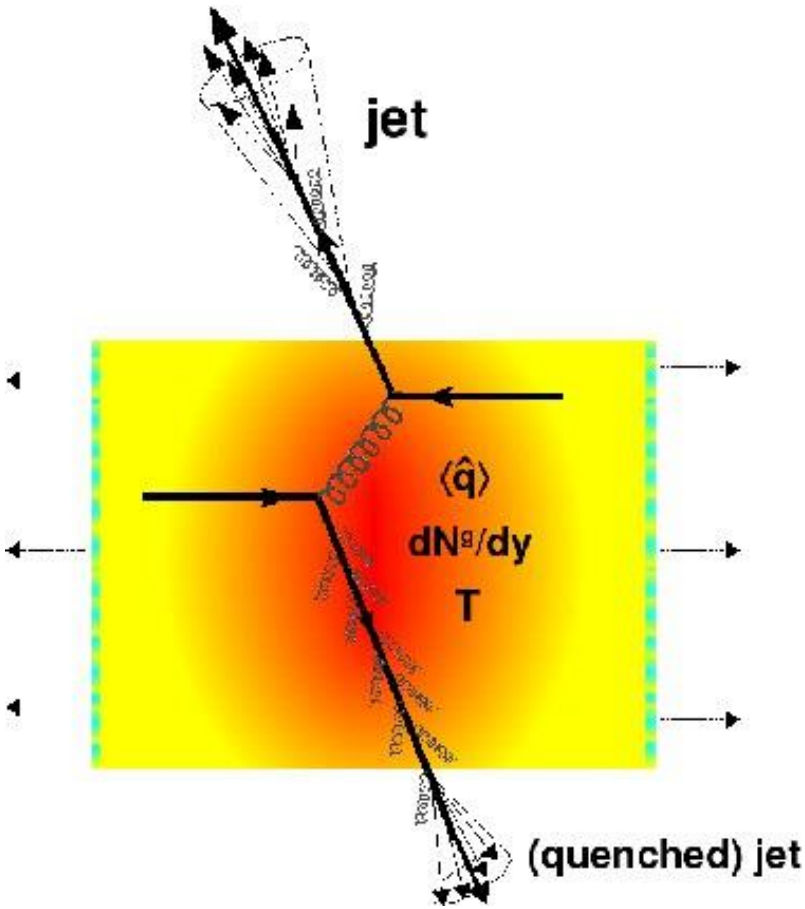


Схематическое изображение области взаимодействия, образующейся в первые мгновения после нецентрального ядро-ядерного столкновения.столкновение тяжелых ионов с образованием «фаербола». Сталкивающиеся ядра движутся вдоль оси Z . b – параметр удара, характеризующий центральность

Эффект гашения струй



Схематическое изображение двух родившихся струй на диаграмме «быстрота–угол».



Схематическое изображение эффекта гашения струй. Один из кварков испытывает значительные потери энергии из-за упругих столкновений и тормозного излучения глюонов

Исследование эффекта гашения струй на LHC

В экспериментах CMS и ATLAS наблюдалась модификация различных характеристик адронных струй в столкновениях PbPb по сравнению с pp соударениями: асимметрия поперечной энергии в каналах с рождением пар струй и фотон+струя, подавление выхода инклюзивных струй и струй от фрагментации b-кварков, модификация формы струй и функции фрагментации струи.

CMS Collaboration, "Modification of jet shapes in PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}}$=2.76 TeV" // Phys. Lett. B 730, 243

CMS Collaboration, “Measurement of jet fragmentation in PbPb and pp collisions collisions at $\sqrt{s_{NN}}$=2.76 TeV” // Phys. Rev. C 90, 024908

ATLAS Collaboration, "Measurements of the Nuclear Modification Factor for Jets in Pb+Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}}$=2.76 TeV with the ATLAS Detector" // Phys. Rev. Lett. 114, 072302

CMS Collaboration, "Evidence of b-Jet Quenching in PbPb Collisions at $\sqrt{s_{NN}}$=2.76 TeV" // Phys. Rev. Lett. 113, 132301

…

Измерения свидетельствуют об образовании в соударениях ионов свинца очень плотной среды (кварк-глюонной материи), поглощающей высокоэнергичные кварки и глюоны. При этом в столкновениях pPb эффект гашения струй не наблюдается.

PYQUEN (PYthia QUENched)

I.P. Lokhtin, A.M. Snigirev. "A model of jet quenching in ultrarelativistic heavy ion collisions and high-p_T hadron spectra at RHIC". Eur. Phys. J. C 45 (2006) 211

- Модель, модифицирующая полученные с помощью генератора адрон-адронных взаимодействий PYTHIA партонные события путем учета радиационных и столкновительных потерь энергии жестких кварков и глюонов в расширяющейся горячей материи (с учетом реалистичной ядерной геометрии).

$$\Delta E(L, E) = \int_0^L \mathrm{d}l \frac{\mathrm{d}P(l)}{\mathrm{d}l} \lambda(l) \frac{\mathrm{d}E(l, E)}{\mathrm{d}l},$$

$$\frac{\mathrm{d}P(l)}{\mathrm{d}l} = \frac{1}{\lambda(l)} \exp\left(-l/\lambda(l)\right),$$

Кинетическое уравнение потерь энергии партонами

PYQUEN (PYthia QUENched)

Модель была применена для симуляции модифицированных средой инклюзивных струй на энергии 2.76 ТэВ на разных центральностях. Радиационные и столкновительные потери учтены.

Были рассмотрены два варианта углового спектра глюонной разиации:

«SCENARIO W»

-

Широкоугловые глюонные потери

-

позволяет оценить эффекты радиации вне типичного конуса струи

«SCENARIO S»

-

Узкоугловые глюонные потери

-

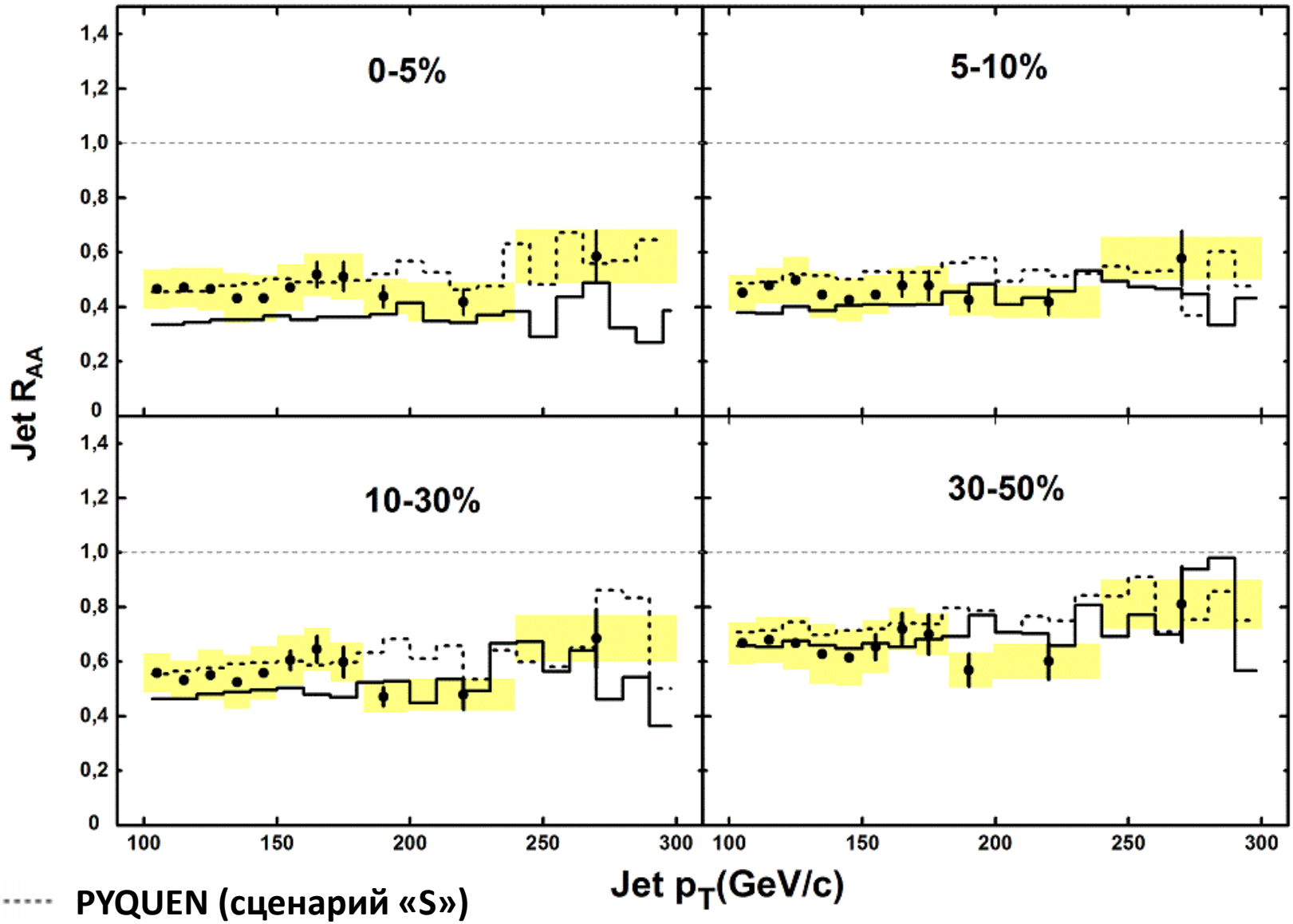
соответствует предположению о том, что глюоны испускаются коллинеарно

Были рассмотрены струи с поперечной энергией **>100 ГэВ,** *размером конуса* $R^{\mathrm{jet}} = \sqrt{\Delta\varphi^2 + \Delta\eta^2} = 0.3$

псевдобыстротой $0.3 < |\eta^{\mathrm{jet}}| < 2$

$T_0^{\max} = 1\ \mathrm{GeV}$

Фактор ядерной модификации инклюзивных струй

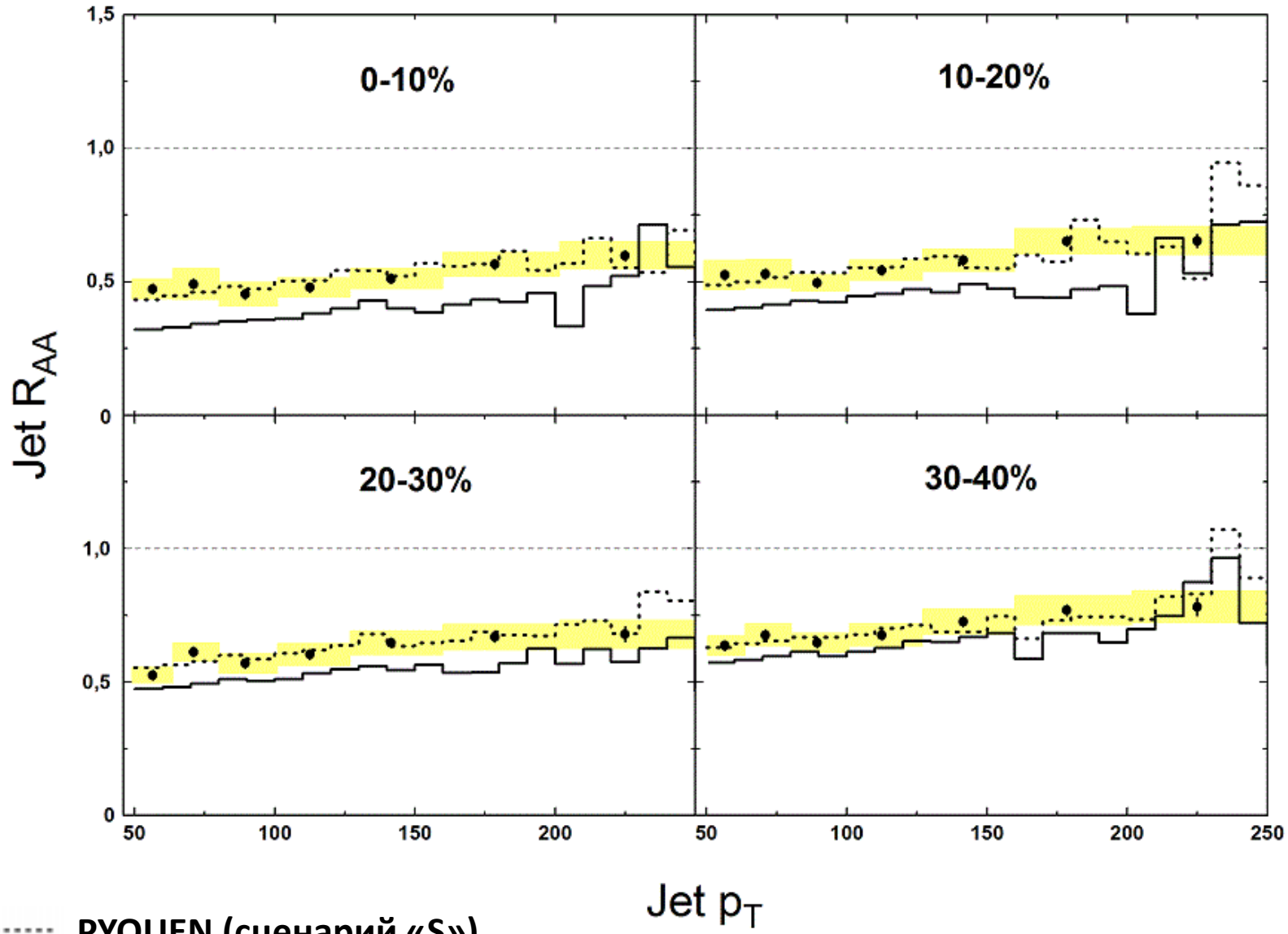


PYQUEN (сценарий «S»)

PYQUEN (сценарий «W»)

CMS, (PAS HIN-12-004)

Фактор ядерной модификации инклюзивных струй

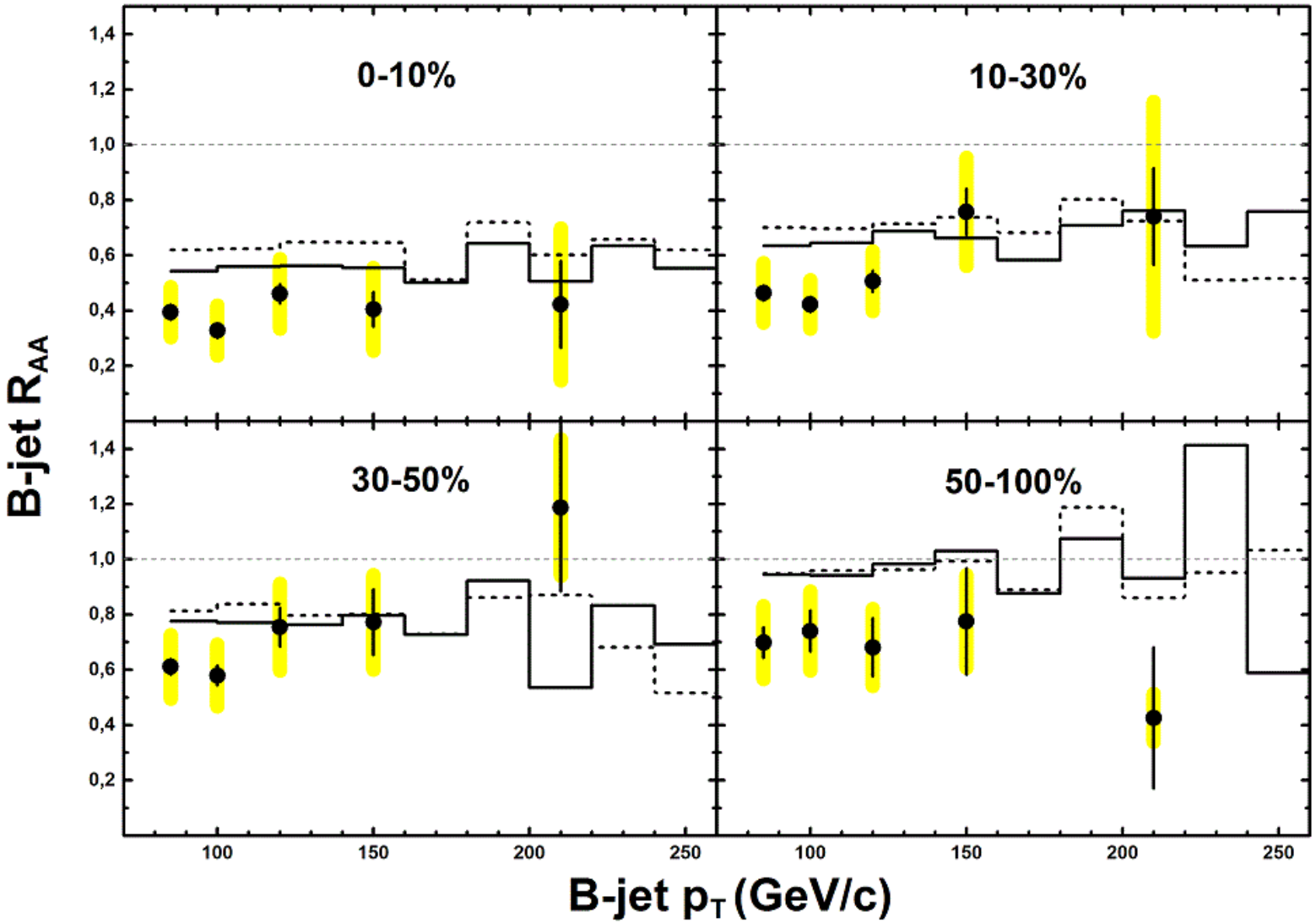


PYQUEN (сценарий «S»)

PYQUEN (сценарий «W»)

ATLAS, (PRL 114 (2015), 072302)

Фактор ядерной модификации b-струй



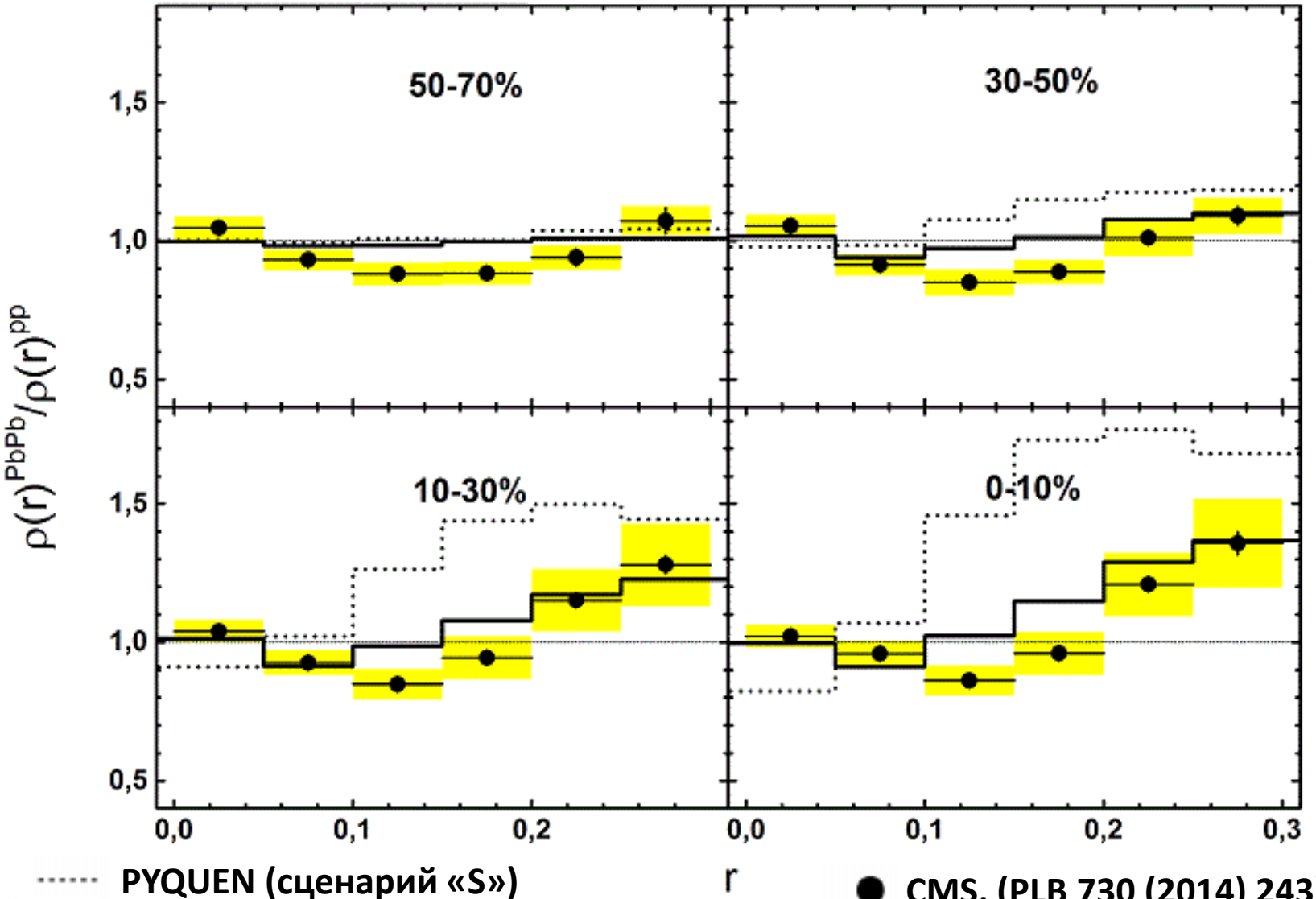
PYQUEN (сценарий «S»)

PYQUEN (сценарий «W»)

CMS, (PLB 730 (2014) 293)

Форма струй:

$$\rho(r) = \frac{1}{\delta r}\frac{1}{N_{\text{jet}}}\sum_{\text{jets}}\frac{p_{\text{T}}(r-\delta r/2, r+\delta r/2)}{E_{\text{T}}^{\text{jet}}}$$



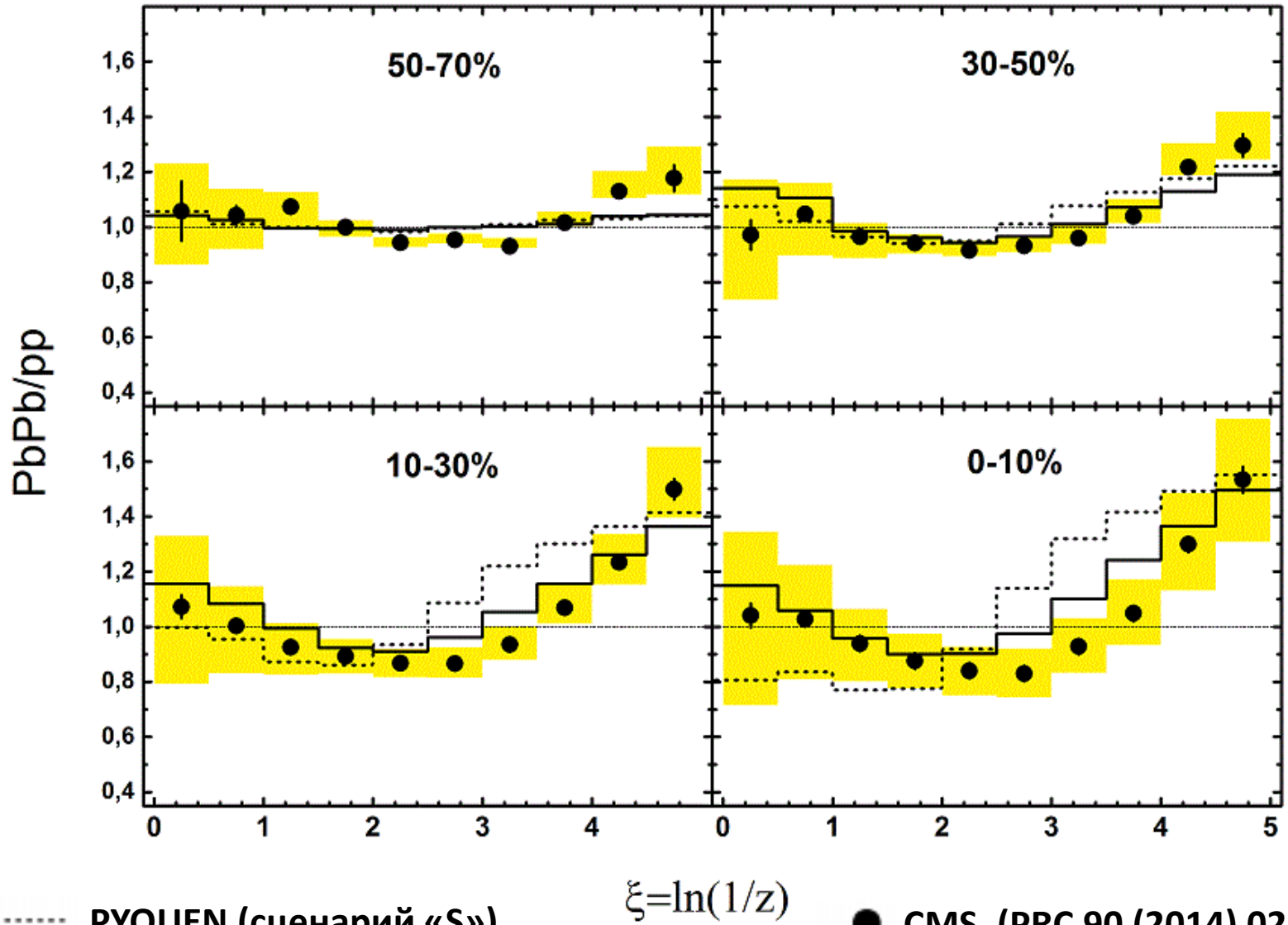
PYQUEN (сценарий «S»)

PYQUEN (сценарий «W»)

CMS, (PLB 730 (2014) 243)

$E_{T\ jet}$>100 GeV, R=0.3

Функция фрагментации: $\xi = \ln(1/z) = \ln(E_T^{jet}/p_T)$



PYQUEN (сценарий «S»)

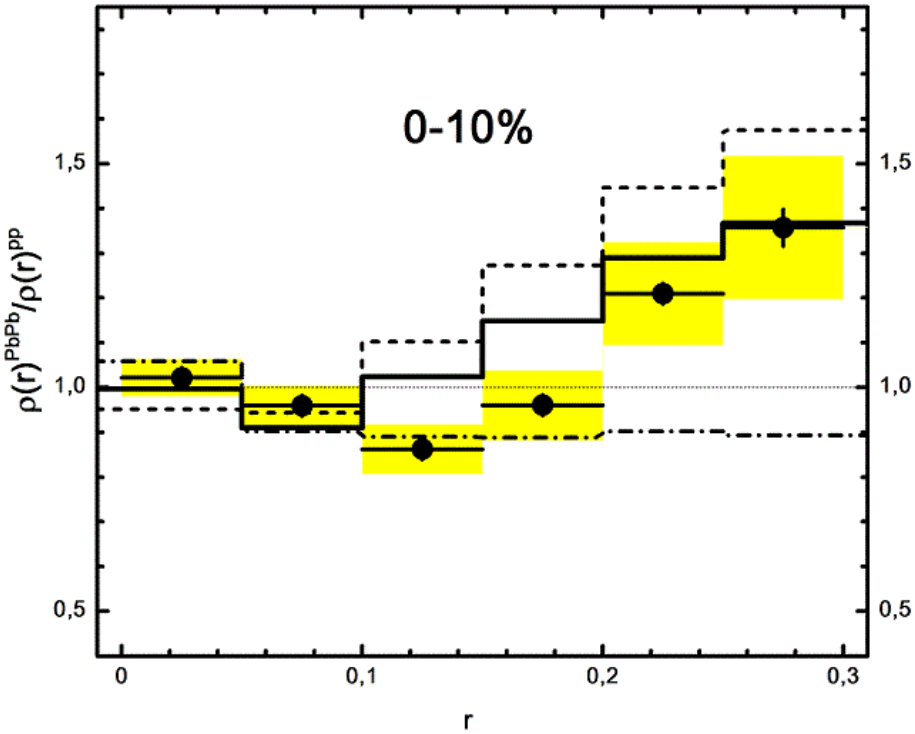
PYQUEN (сценарий «W»)

CMS, (PRC 90 (2014) 024908)

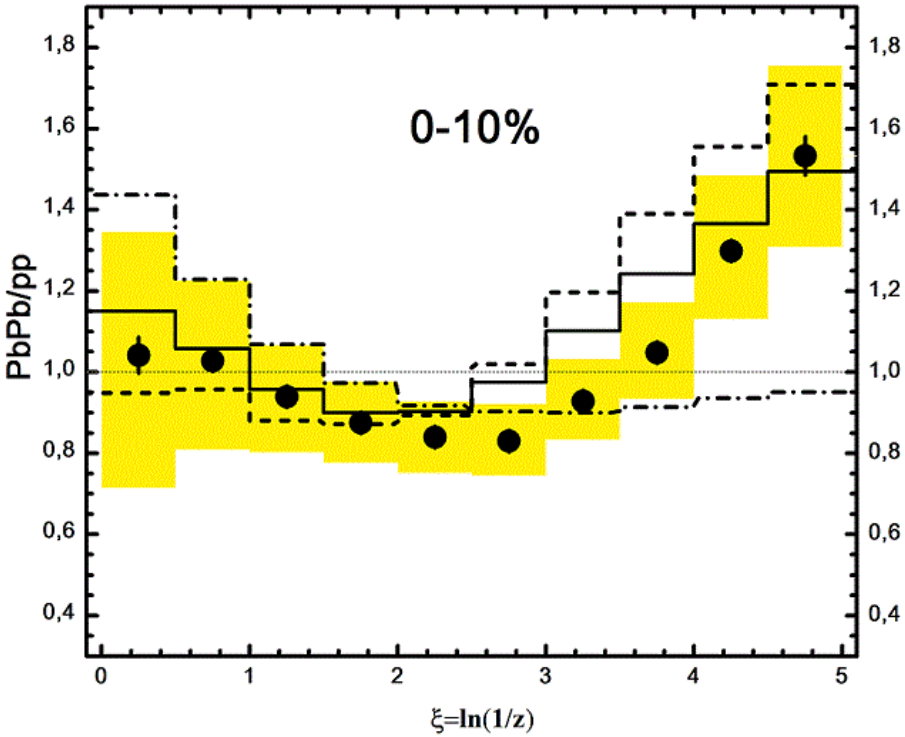
$E_{T\ jet}$>100 GeV, R=0.3

Вклад радиационных и столкновительных потерь в модификацию формы струй

Форма струй:



Функция фрагментации:



PYQUEN (сценарий «W»)

PYQUEN (только столкновительные потери)

PYQUEN (только радиационные потери)

Данные CMS

Характерные особенности представленных зависимостей:

усиление на периферии струи, подавление на средних радиусах, отсутствие модификации в центре струи

усиление при малых поперечных импульсах, подавление при промежуточных поперечных импульсах, отсутствие модификации (или небольшое усиление) при высоких поперечных импульсах

Усиленный выход адронов струй при малых поперечных импульсах и на периферии струй обусловлен излучением глюонов в среде (более мягкими, чем начальные партоны, и летящими под определенными углами по отношению к направлению "родительского" партона).

Подавление выхода адронов струй при промежуточных поперечных импульсах и на средних радиусах струй обусловлено потерями энергий жестких партонов в среде.

Отсутствие модификации выхода адронов в центре струй и отсутствие модификации (или небольшое усиление) при высоких поперечных импульсах может быть объяснено значительными потерями энергии струй за пределы их конуса.

Выявлен доминирующий вклад широкоугловых радиационных потерь энергии партонов в модификацию внутренней структуры струи. При этом столкновительные потери энергии партонов также необходимо учитывать.

ВЫВОДЫ

Данные экспериментов на Большом адронном коллайдере свидетельствуют об образовании в соударениях ионов очень горячей и плотной среды (кварк-глюонной плазмы), поглощающей высокоэнергичные кварки и глюоны.

Проведен феноменологический анализ модификации свойств адронных струй в столкновениях ионов свинца на LHC при энергии в системе центра масс 2.76 ТэВ на пару нуклонов. Для различных центральностей соударений с помощью генератора событий PYQUEN было проведено моделирование таких характеристик струй, как импульсная зависимость факторов ядерной модификации инклюзивных струй и струй от b-кварков, функции фрагментации и формы струй.

Моделирование, учитывающее широкоугловые радиационные и столкновительные энергии партонов в среде, достаточно хорошо воспроизводит наблюдаемые особенности модификации продольных и поперечных профилей адронных струй в наиболее центральных соударениях ионов свинца. Таким образом, выявлены основные механизмы энергетических потерь партонов в кварк-глюонной плазме.

Продолжающиеся эксперименты на Большом адронном коллайдере позволят продолжить анализ эффектов, связанных с модификацией свойств адронных струй в соударениях тяжелых ионов, и уточнить наши знания о свойствах кварк-глюонной плазмы.

Eur. Phys. J. C (2015) 75:452
DOI 10.1140/epjc/s10052-015-3594-3

THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL C

CrossMark

Regular Article - Theoretical Physics

On jet structure in heavy ion collisions

I. P. Lokhtin[a], A. A. Alkin, A. M. Snigirev

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Received: 6 October 2014 / Accepted: 30 July 2015

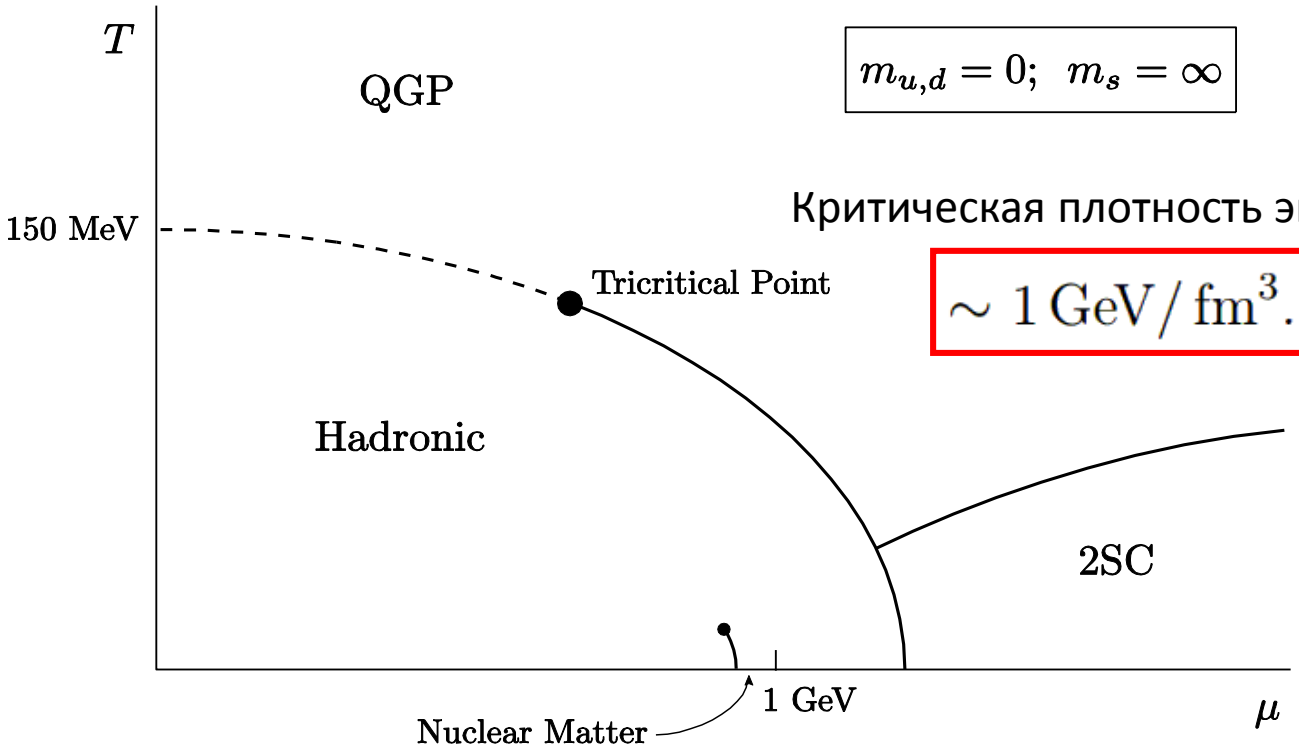
I.P. Lokhtin, A.A. Alkin, A.M. Snigirev On jet structure in heavy ion collisions // European Physical Journal C. -2015. -Vol. 75, no.9. -P. 452

«Mechanisms of jet quenching in PbPb collisions at the LHC»
The XXVth International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions "Quark Matter 2015", Кобе, Япония, 27 сентября - 3 октября 2015

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ N 14.12-000110

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СЛАЙДЫ

Кварк-глюонная плазма и деконфайнмент ядерной материи



$$m_{u,d} = 0; \quad m_s = \infty$$

Критическая плотность энергии:

$$\sim 1\,\mathrm{GeV}/\,\mathrm{fm}^3.$$

Фазовая диаграмма ядерной материи как функция температуры T и барионного химического потенциала μ. Линиями отмечены три фазы: адронный газ, кварк-глюонная плазма и цветная сверхпроводимость.

Поиск КГП

Мягкие тесты

• Спектры частиц с малыми поперечными импульсами и их импульсные корреляции

• Рождение тепловых фотонов и лептонов

• Изучение выхода странных частиц

• Потоковые эффекты

...

Жесткие тесты

(Рождение частиц описывается КХД)

• Прохождение через КГП жёстких струй партонов

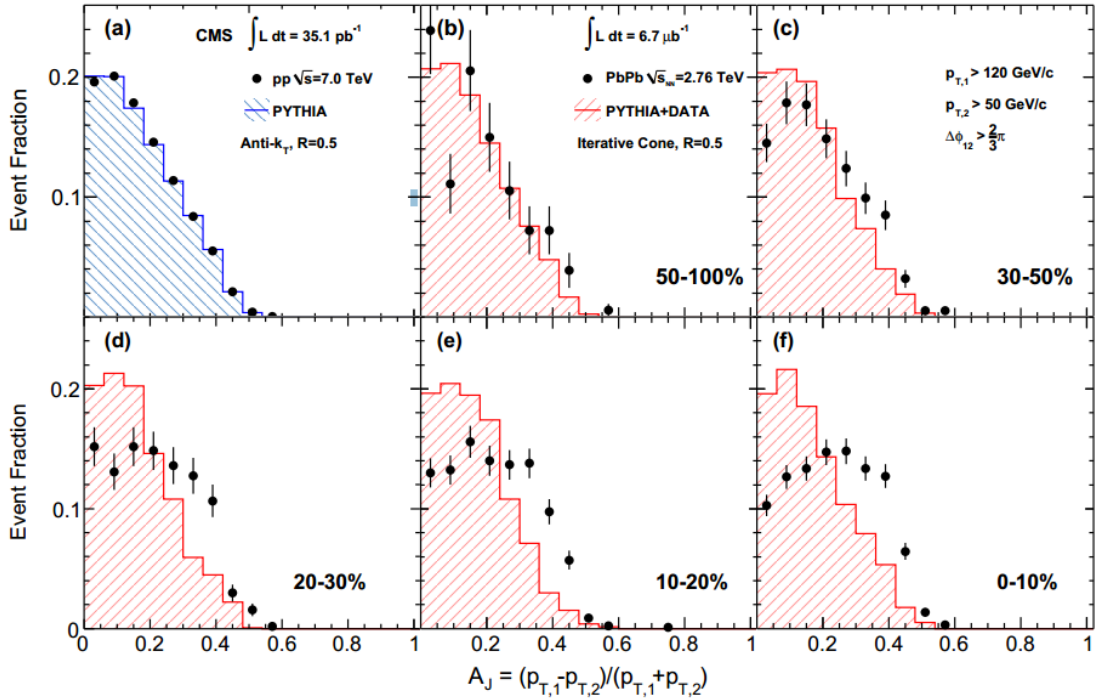
• Модификация спектров, формы и функции фрагментации струй

• Подавление выхода адронов с большими поперечными импульсами

•Кварконии

...

Жесткие тесты представляют больший интерес. Струи от соударений с большими импульсами несут информацию о свойствах адронной материи на экстремальных температуре и плотности



CMS Collaboration, "Observation and studies of jet quenching in PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}}$=2.76 TeV", Phys. Rev. C 84 (2011) 024906

$$A_J = \frac{E_{T1} - E_{T2}}{E_{T1} + E_{T2}},$$

ATLAS Collaboration, «Observation of a Centrality-Dependent Dijet Asymmetry in Lead-Lead Collisions at $\sqrt{s_{NN}}$=2.76 TeV with the ATLAS Detector at the LHC», Phys. Rev. Lett. **105**, 252303 – Published 13 December 2010

PRL **105**, 252303 (2010) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 17 DECEMBER 2010

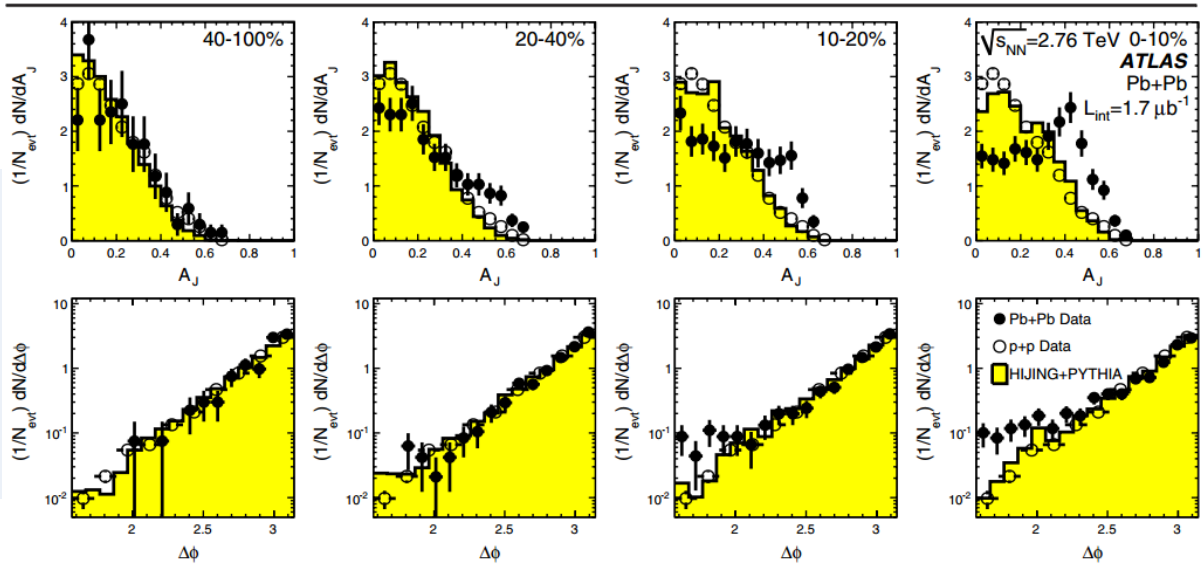
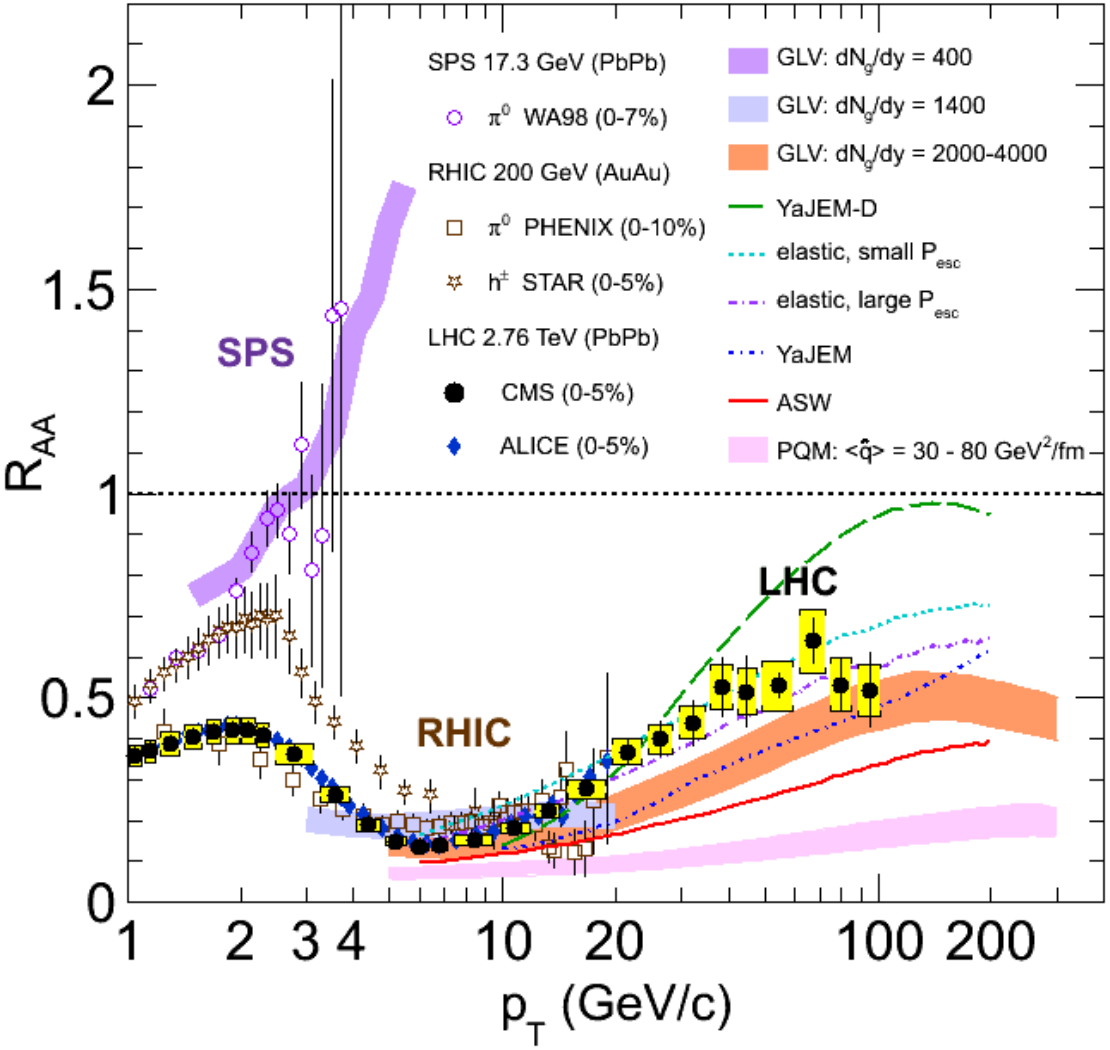


FIG. 3 (color online). (Top) Dijet asymmetry distributions for data (points) and unquenched HIJING with superimposed PYTHIA dijets (solid yellow histograms), as a function of collision centrality (left to right from peripheral to central events). Proton-proton data from $\sqrt{s} = 7$ TeV, analyzed with the same jet selection, are shown as open circles. (Bottom) Distribution of $\Delta\phi$, the azimuthal angle between the two jets, for data and HIJING + PYTHIA, also as a function of centrality.



Значения фактора ядерной модификации для поперечных импульсов образованных частиц Pт, измеренные в экспериментах на SPS, RHIC и LHC

Сильное подавление жестких адронов в центральных соударениях

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

отношение выхода частиц данного типа в ядро-ядерных взаимодействиях к их числу в протон-протонных столкновениях при такой же энергии на пару нуклонов, нормированному на число нуклон-нуклонных соударений

CMS Collaboration, "Study of high-p_T charged particle suppression in PbPb compared to pp collisions at $\sqrt{s_{NN}}$=2.76 TeV", Eur. Phys. J. C 72 (2012) 1945.

Определение струи

Алгоритм PYCELL включает в моделирование реконструкцию струй на калориметрическом уровне. Определяет струю, как энергию всех разлетающихся в достаточно узком угловом конусе частиц. Результат моделирования может зависеть от спектра глюонного излучения – угловой ширины этого конуса.

Основные параметы модели:

$$T_0^{\max} = 1 \text{ GeV},$$

$$\tau_0 = 0.1 \text{ fm}/c$$

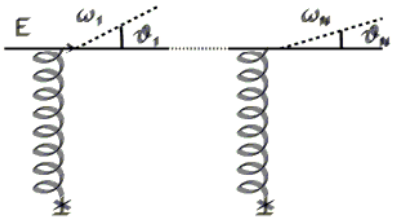
Как и в эксперименте CMS, конус струи был поделён на шесть секторов с радиальной шириной в 0.05, затем производилось суммирование поперечного импульса всех заряженных частиц с импульсом больше 1 ГэВ в каждом кольце. Результаты были усреднены по общему числу найденных струй.

PYQUEN (PYthia QUENched)

I.P. Lokhtin, A.M. Snigirev. "A model of jet quenching in ultrarelativistic heavy ion collisions and high-p_T hadron spectra at RHIC". Eur. Phys. J. C 45 (2006) 211

1). Радиационные потери: BDMPS model

(formulated by Baier, Dokshitzer, Mueller, Peigne and Schiff)



$$\frac{\mathrm{d}E^{\mathrm{rad}}}{\mathrm{d}l} = \frac{2\alpha_s(\mu_{\mathrm{D}}^2)C_{\mathrm{R}}}{\pi L} \int\limits_{\mu_{\mathrm{D}}^2\lambda_g}^{E} \mathrm{d}\omega \left[1 - y + \frac{y^2}{2}\right] \ln|\cos(\omega_1\tau_1)|\,,$$

$$\omega_1 = \sqrt{i\left(1 - y + \frac{C_{\mathrm{R}}}{3}y^2\right)\bar{\kappa}\ln\frac{16}{\bar{\kappa}}}, \quad \bar{\kappa} = \frac{\mu_{\mathrm{D}}^2\lambda_g}{\omega(1-y)},$$

$\tau_1 = L/(2\lambda_g),\ y = \omega/E$ - доля энергии жесткого партона, уносимая глюоном

α_s - константа КХД ароматов кварков (бегущая)

$C_{\mathrm{R}} = 4/3$ - фактор цветового заряда кварка

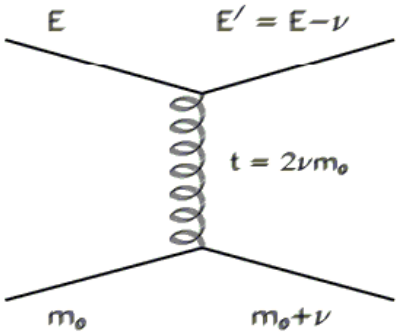
μ_{D} - Дебаевская масса экранирования

PYQUEN (PYthia QUENched)

I.P. Lokhtin, A.M. Snigirev. "A model of jet quenching in ultrarelativistic heavy ion collisions and high-p_T hadron spectra at RHIC". Eur. Phys. J. C 45 (2006) 211

2). Столкновительные потери:

$$\frac{\mathrm{d}E^{\mathrm{col}}}{\mathrm{d}l} = \frac{1}{4T\lambda\sigma}\int_{\mu_{\mathrm{D}}^2}^{t_{\max}} \mathrm{d}t\,\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}t}\,t,$$

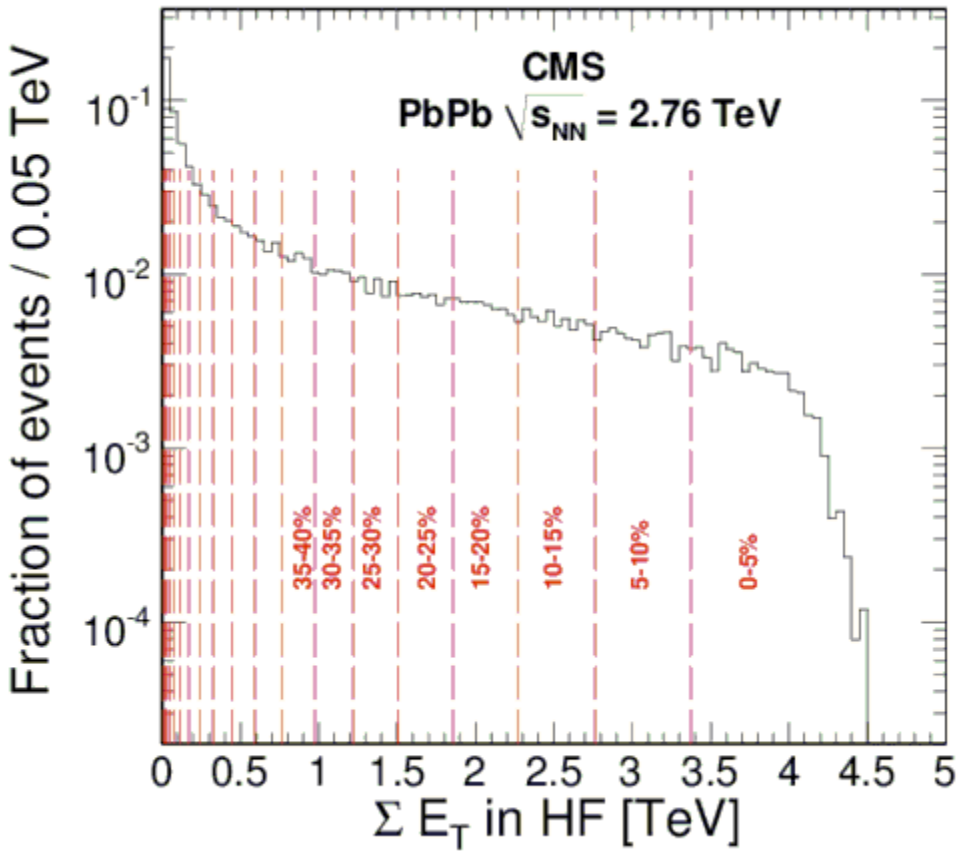


(упругое рассеяние)

$$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}t} \cong C\,\frac{2\pi\alpha_s^2(t)}{t^2}\,\frac{E^2}{E^2 - m_p^2}$$

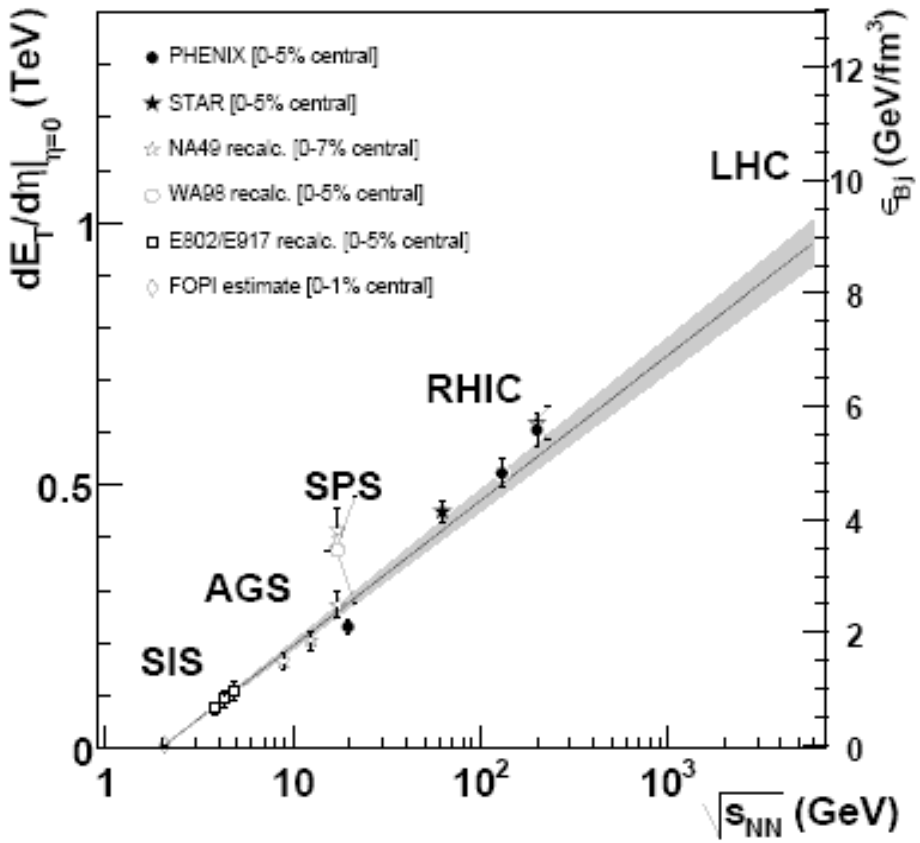
C = 9/4 для gg
C = 1 для gq
C = 4/9 для qq рассеяния

Центральность

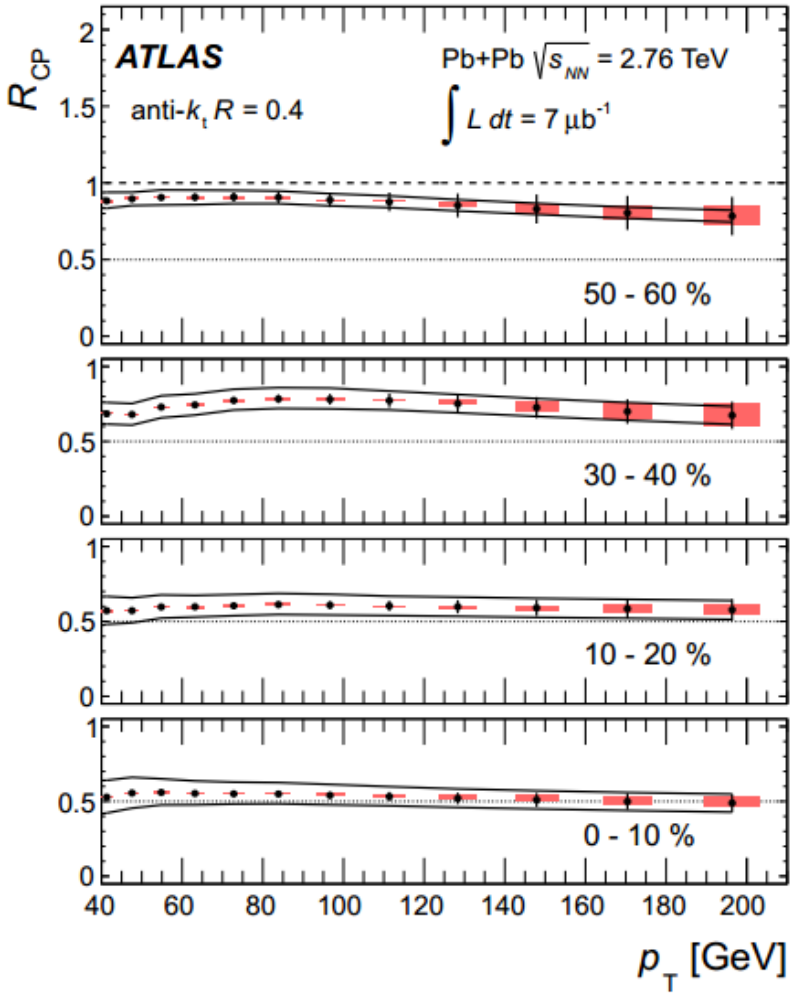


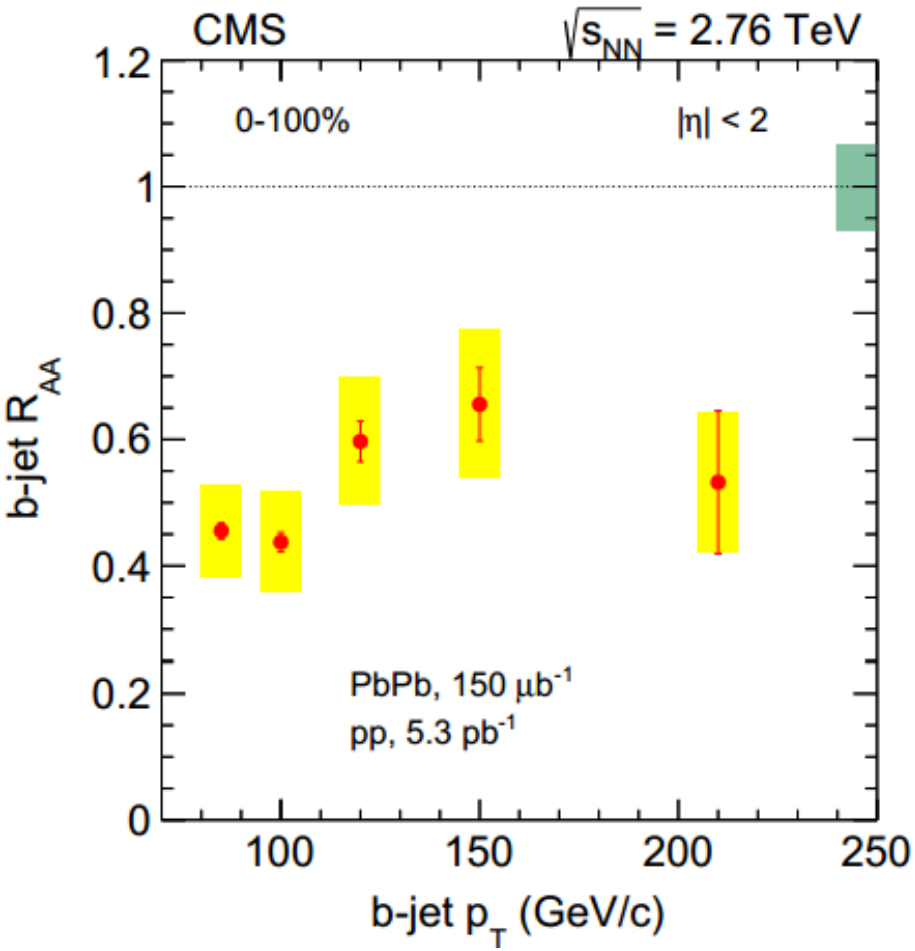
Распределение по энерговыделению в переднем калориметре CMS в столкновениях PbPb при $\sqrt{s_{NN}}$ = 2.76 ТэВ. 0-5% обозначает 5% наиболее центральных соударений и т.д.

Эффект гашения струй



Измеренная поперечная энергия на единицу быстроты при η = 0 и критическая плотность энергии

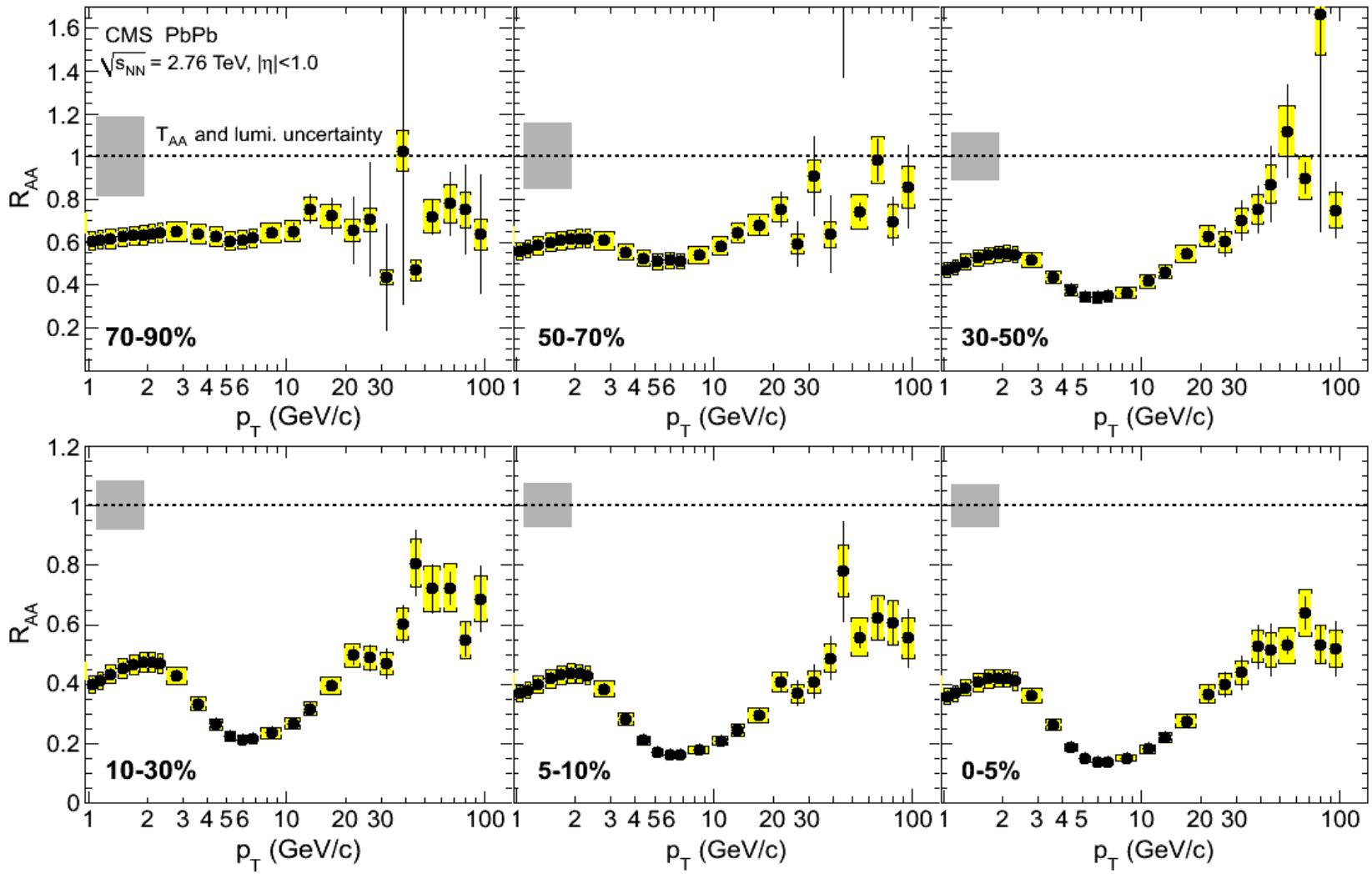




Фактор ядернои модификации адронных струй (слева) и фактор ядерной модификации b-струй без ограничения на центральность взаимодействия (справа)

ATLAS Collaboration «Measurement of the Azimuthal Angle Dependence ofInclusive Jet Yields in Pb+Pb Collisions at $\sqrt{S_{NN}}$ = 2.76 TeV with theATLAS detector», Phys.Rev.Lett. 111 (2013) 152301

CMS Collaboration, «Evidence of b-jet quenching in PbPb collisions at $\sqrt{S_{NN}}$ =2.76 TeV» arXiv:1312.4198



Зависимость фактора ядерной модификации от поперечного импульса в столкновениях PbPb при $\sqrt{s_{NN}}$ = 2.76 ТэВ для различных центральностей взаимодействий

CMS Collaboration, "Study of high-p_T charged particle suppression in PbPb compared to pp collisions at $\sqrt{s_{NN}}$=2.76 TeV", Eur. Phys. J. C 72 (2012) 1945.