

Модификация характеристик адронных струй в соударениях ионов свинца при энергиях Большого адронного коллайдера

Бакалаврская работа Алкина А. А.,
студента кафедры физики космоса физического факультета
МГУ имени М. В. Ломоносова

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

26.05.2016

Цель работы:

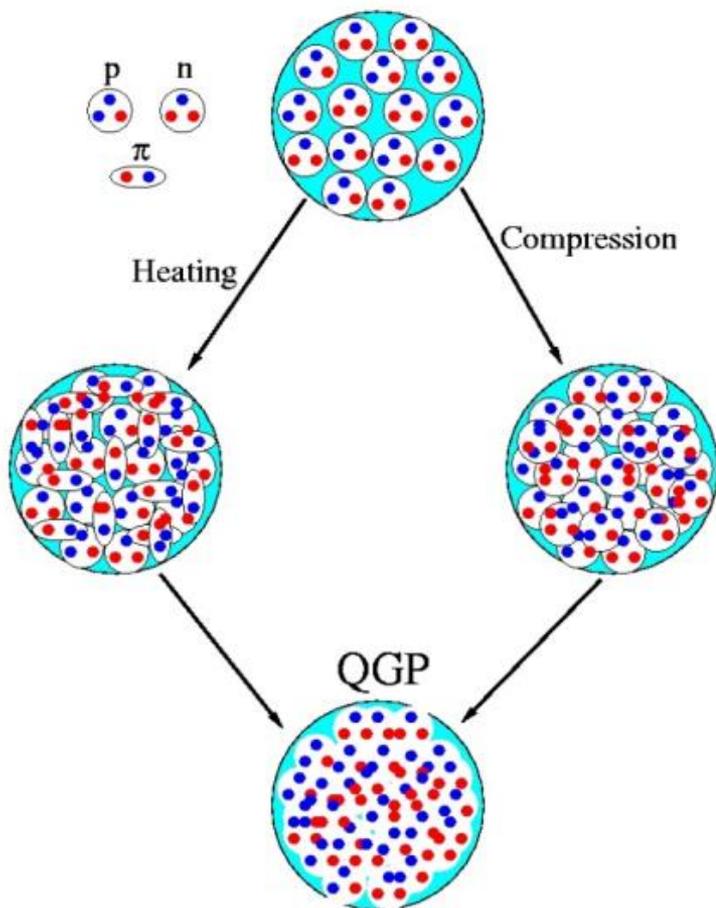
Проведение модельного анализа модификации различных характеристик адронных струй, рождающихся в столкновениях ионов свинца на LHC при энергии 2.76 ТэВ на пару нуклонов в системе центра масс.

Краткое содержание:

Для различных центральностей соударений с помощью генератора событий PYQUEN были получены импульсная зависимость факторов ядерной модификации инклюзивных струй и струй от b -кварков и исследованы функция фрагментации и форма струй.

Моделирование имело две различных параметризации: с широкоугловыми и узкоугловыми радиационными потерями. Анализ результатов в сравнении с данными экспериментов CMS и ATLAS позволил сделать выводы о механизмах и угловой структуре потерь энергии высокоэнергичными партонами в КГП и проверить заложенные в модель предположения.

Кварк-глюонная плазма и деконфайнмент ядерной материи



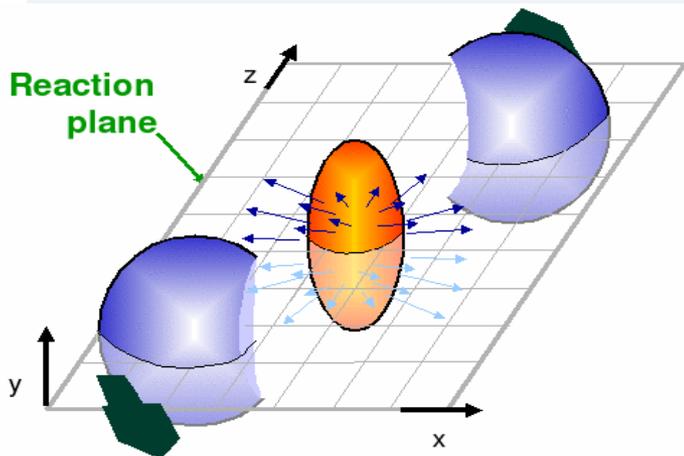
Критическая плотность энергии
 $\sim 1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$.

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).

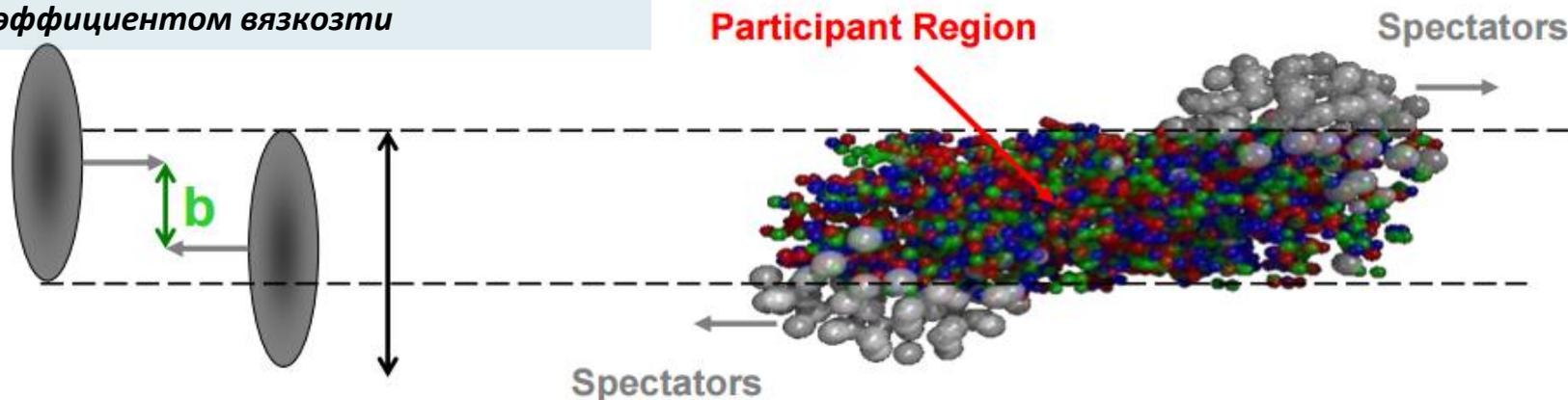
Поиск КГП



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

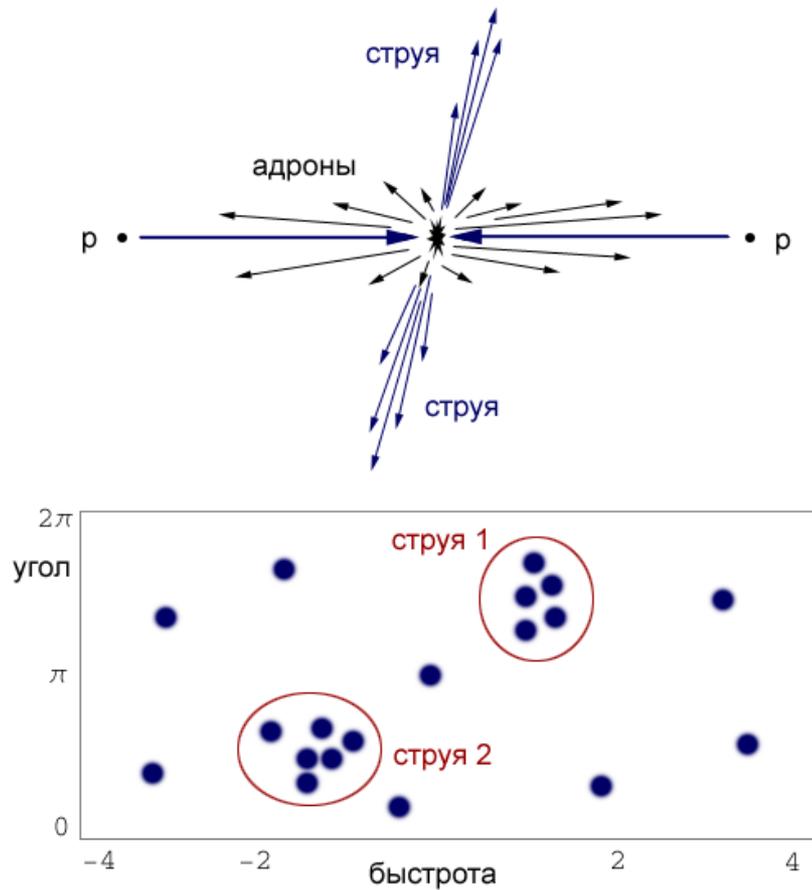
Образуется «сгусток» со свойствами сильновзаимодействующей идеальной партонной жидкости с малым коэффициентом вязкости

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

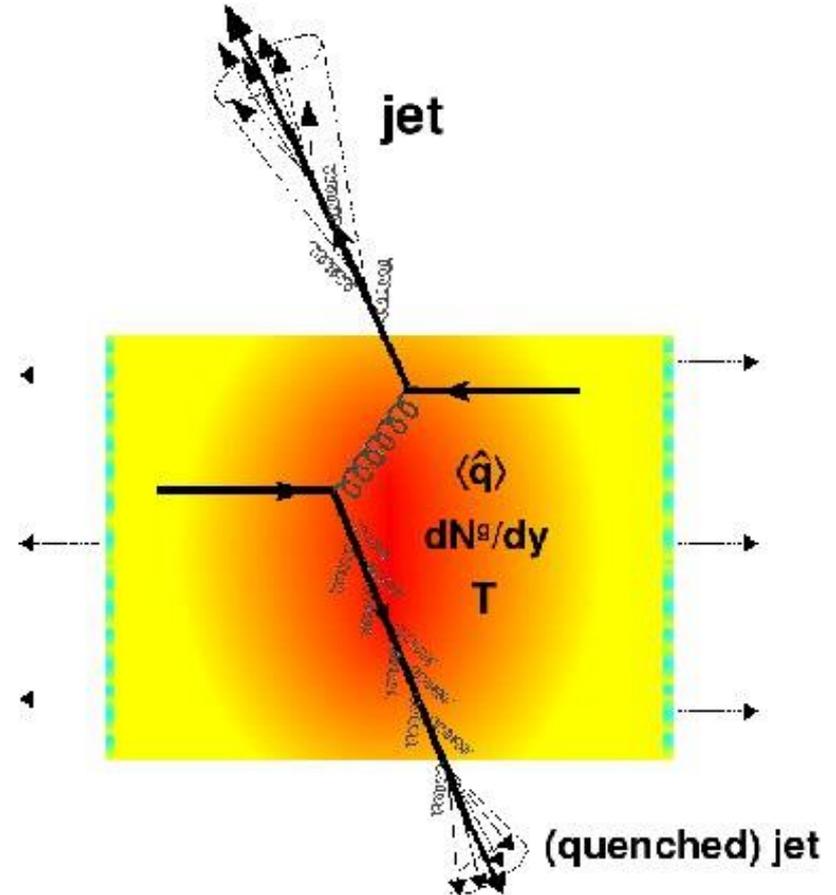


Схематическое изображение области взаимодействия, образующейся в первые мгновения после нецентрального ядро-ядерного столкновения. столкновение тяжелых ионов с образованием «фаербола». Сталкивающиеся ядра движутся вдоль оси Z. b – параметр удара, характеризующий центральность

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, ATLAS и ALICE 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

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

CMS Collaboration, "Studies of jet quenching using isolated-photon + jet correlations in PbPb and pp collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV" Phys. Lett. B 718 (2013) 773

•••

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).

$$\Delta E(L, E) = \int_0^L dl \frac{dP(l)}{dl} \lambda(l) \frac{dE(l, E)}{dl},$$
$$\frac{dP(l)}{dl} = \frac{1}{\lambda(l)} \exp(-l/\lambda(l)),$$

Кинетическое уравнение потерь энергии партонами

PYQUEN (PYthia QUENched)

Генератор событий был применен для моделирования модифицированных средой инклюзивных струй на энергии 2.76 ТэВ на разных центральностях. Радиационные и столкновительные потери учтены.

Были рассмотрены две параметризации углового спектра глюонной радиации:

«ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ W»

- Широкоугловые рад. потери

- позволяет оценить эффекты радиации вне типичного конуса струи

$$\frac{dN^g}{d\theta} \propto 1/\theta$$

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

$$R^{\text{jet}} = \sqrt{\Delta\varphi^2 + \Delta\eta^2} = 0.3 \text{ и } 0.4$$

(CMS и ATLAS)

«ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ S»

- Узкоугловые рад. потери

- соответствует предположению о том, что глюоны испускаются коллинеарно

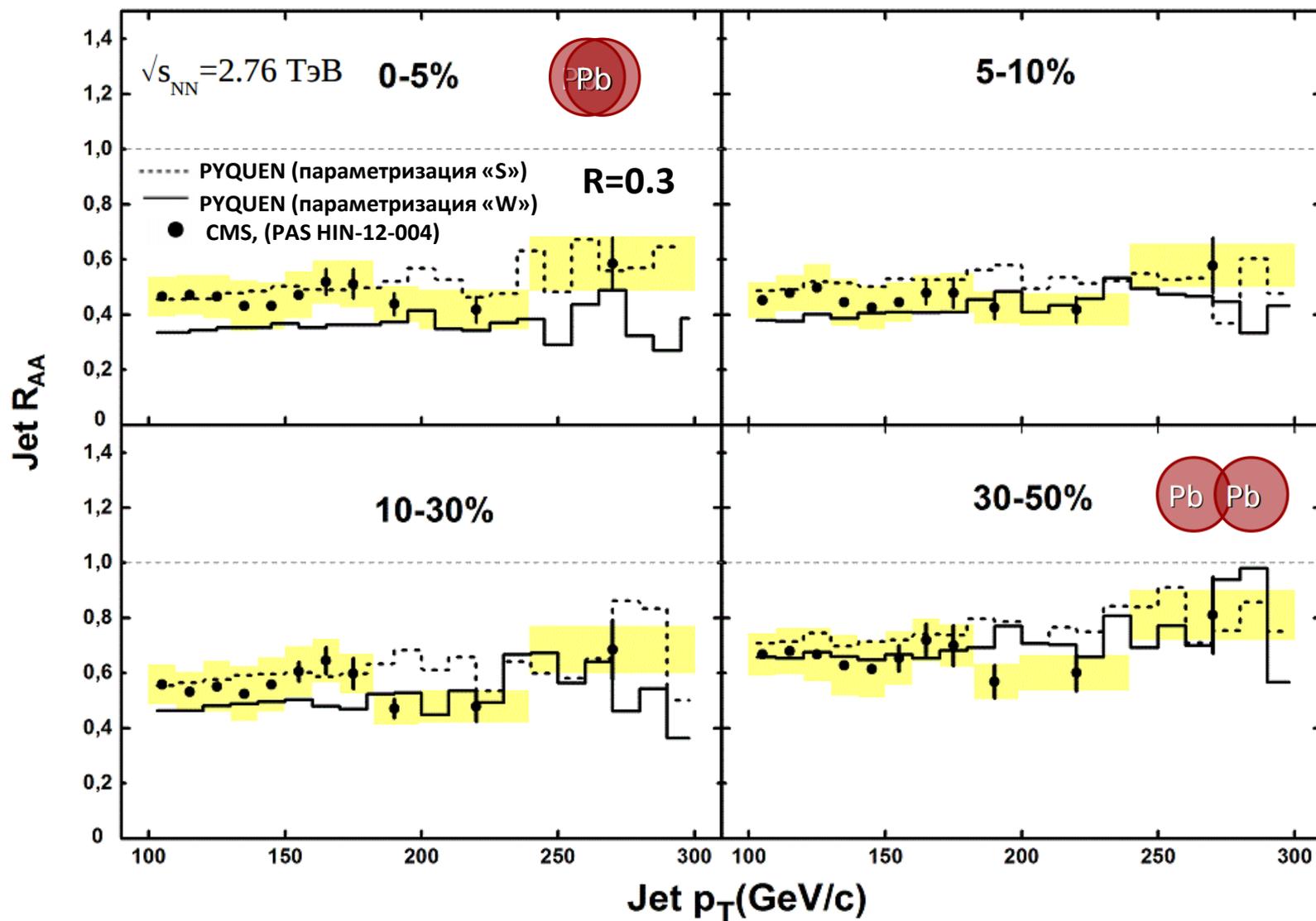
$$\frac{dN^g}{d\theta} \propto \sin\theta \exp\left(-\frac{(\theta - \theta_0)^2}{2\theta_0^2}\right)$$

$$\theta_0 \sim 5^\circ$$

$$\eta = -\ln\left[\text{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right)\right] - \text{псевдобыстрота}$$

Фактор ядерной модификации инклюзивных струй

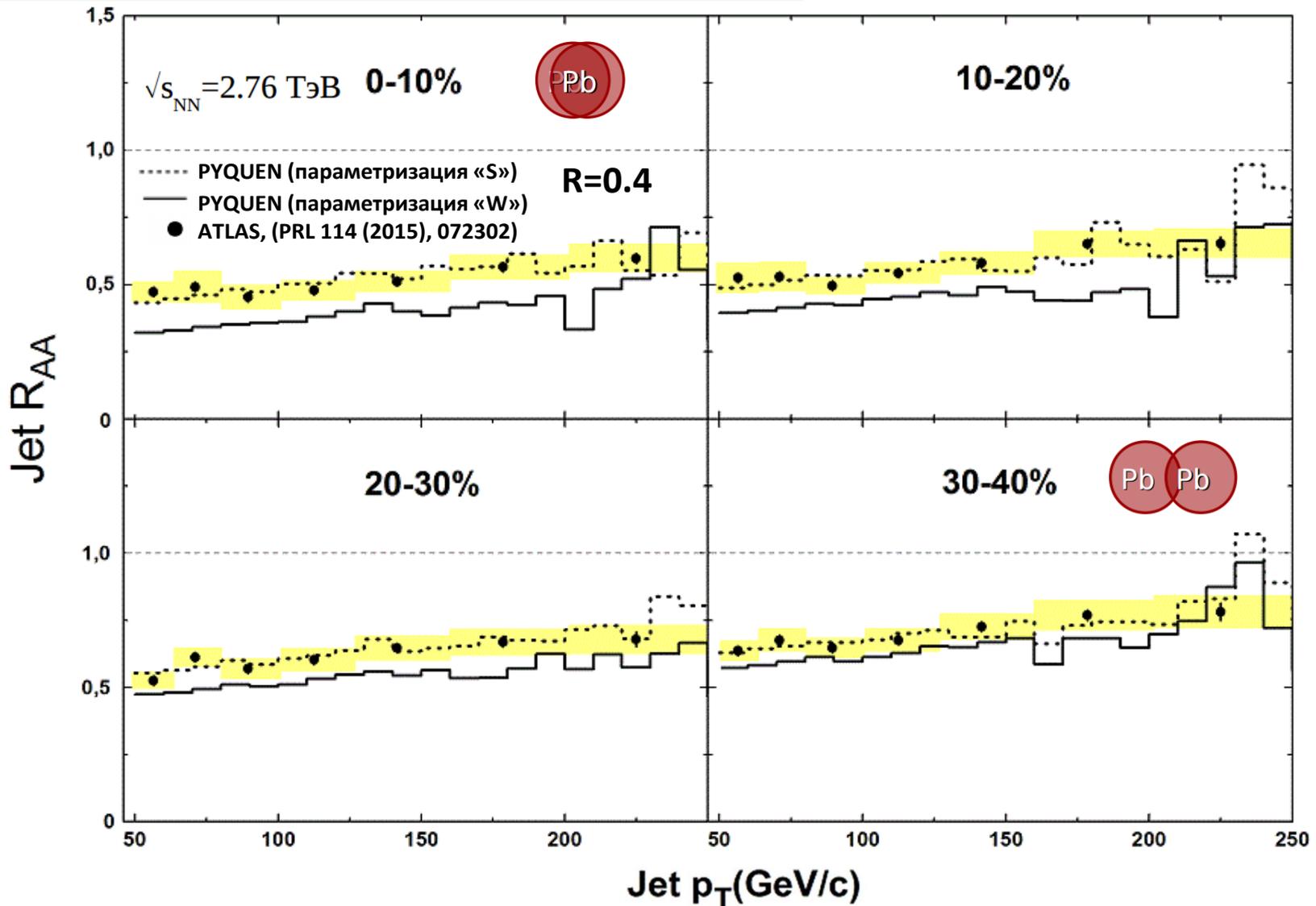
$$R_{AA} = \frac{\sigma_{pp}^{\text{inel}}}{\langle N_{\text{coll}} \rangle} \frac{d^2 N_{AA} / dp_T d\eta}{d^2 \sigma_{pp} / dp_T d\eta}$$



Модель PYQUEN удовлетворительно описывает экспериментальные данные
 Результаты для параметризаций "S" и "W" близки.

Фактор ядерной модификации инклюзивных струй

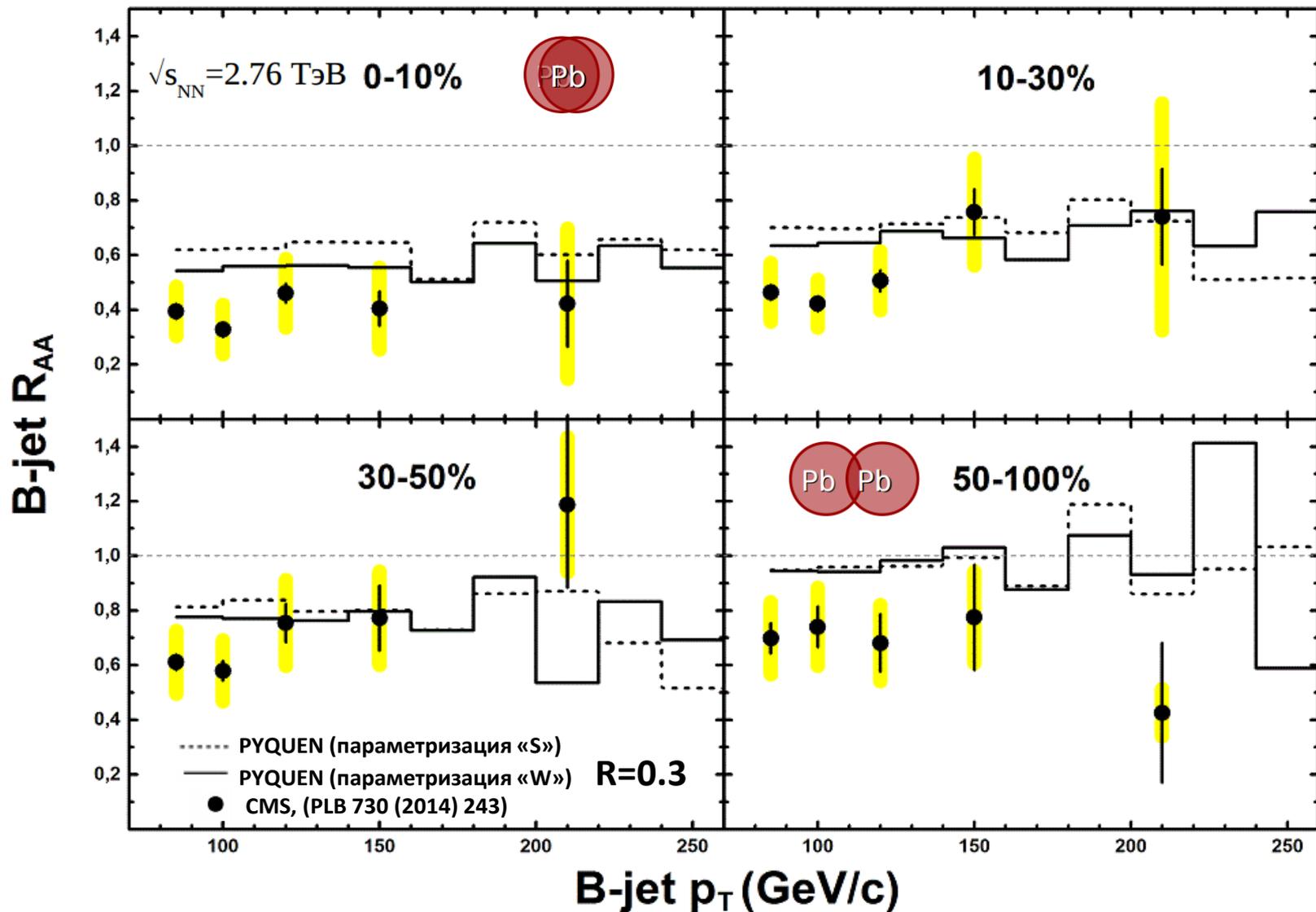
$$R_{AA} = \frac{\sigma_{pp}^{\text{inel}}}{\langle N_{\text{coll}} \rangle} \frac{d^2 N_{AA}/dp_T d\eta}{d^2 \sigma_{pp}/dp_T d\eta}$$



Модель PYQUEN удовлетворительно описывает экспериментальные данные
 Результаты для параметризаций "S" и "W" близки.

Фактор ядерной модификации b-струй

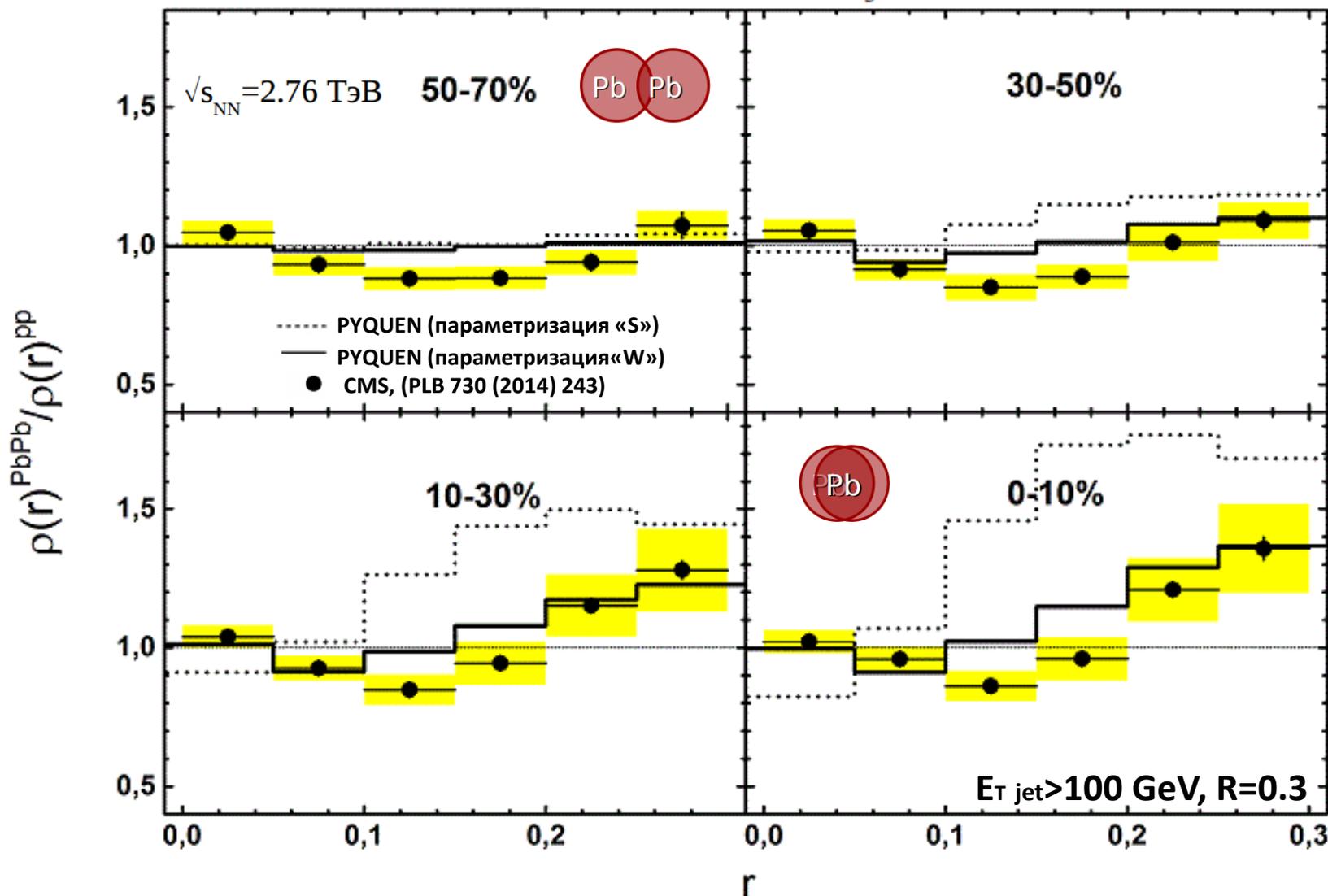
$$R_{AA} = \frac{\sigma_{pp}^{\text{inel}}}{\langle N_{\text{coll}} \rangle} \frac{d^2 N_{AA} / dp_T d\eta}{d^2 \sigma_{pp} / dp_T d\eta}$$




 Модель PYQUEN удовлетворительно описывает экспериментальные данные
 Результаты для параметризаций "S" и "W" близки.

Форма струй:

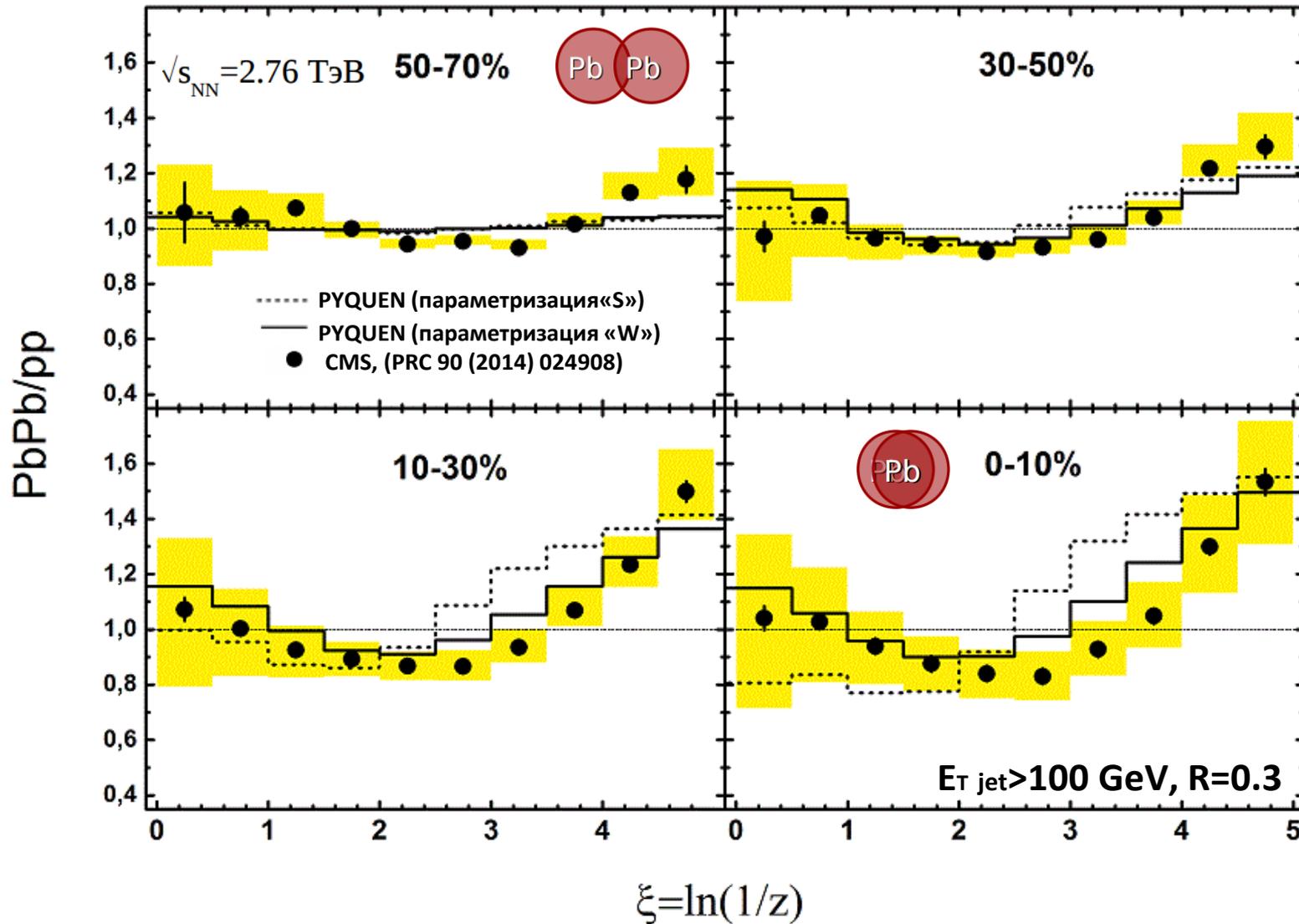
$$\rho(r) = \frac{1}{\delta r} \frac{1}{N_{\text{jet}}} \sum_{\text{jets}} \frac{p_T(r - \delta r/2, r + \delta r/2)}{E_T^{\text{jet}}}$$



➔
 Усиление на периферии струи, подавление на средних радиусах, отсутствие модификации в центре струи - воспроизводится параметризацией «W» **12**

Функция фрагментации:

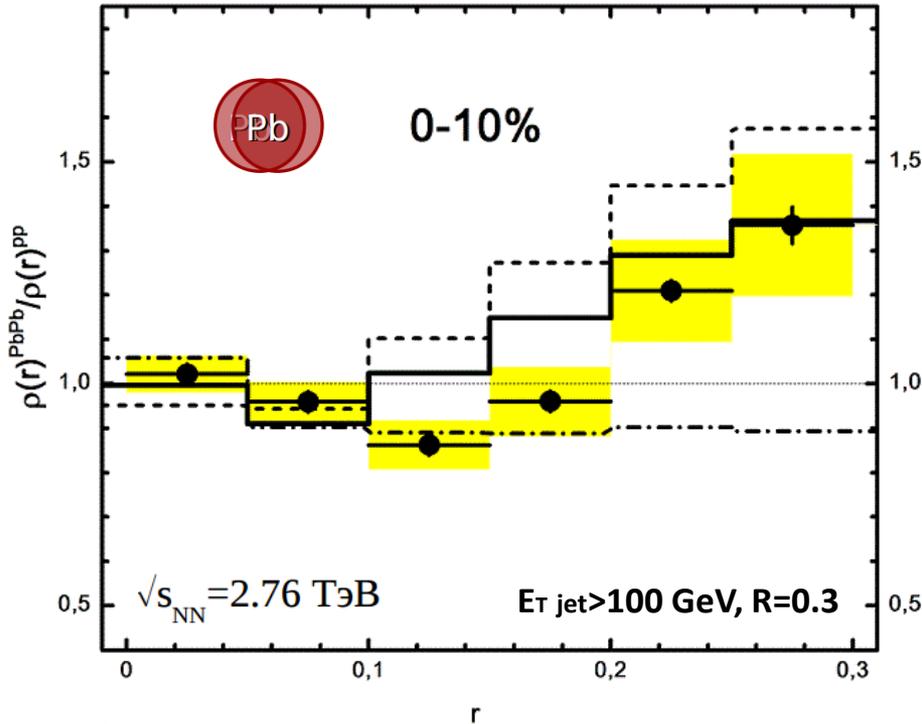
$$\xi = \ln(1/z) = \ln(E_T^{\text{jet}} / p_T)$$



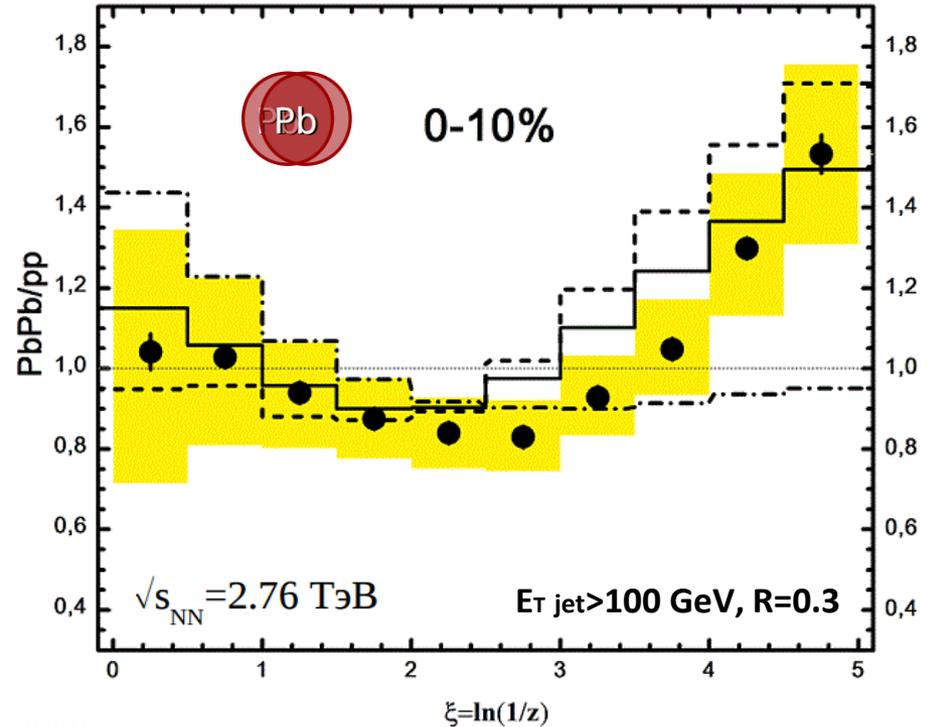
Усиление при малых поперечных импульсах, подавление при промежуточных поперечных импульсах, отсутствие модификации (или небольшое усиление) при высоких поперечных импульсах - воспроизводится параметризацией «W»

Вклад радиационных и столкновительных потерь в модификацию формы струй

Форма струй:



Функция фрагментации:



— PYQUEN (параметризация «W»)

- - - - PYQUEN (только столкновительные потери)

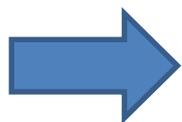
● Данные CMS

- · - · - PYQUEN (только широкоугловые радиационные потери)

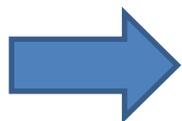
Широкоугловые радиационные потери энергии партонов имеют доминирующий вклад в модификацию внутренней структуры струи.

Столкновительные потери энергии партонов также необходимо учитывать.

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 были получены такие характеристики струй, как импульсная зависимость факторов ядерной модификации инклюзивных струй и струй от b-кварков, функции фрагментации и формы струй.

Полученные в модели факторы ядерной модификации инклюзивных струй и струй от b-кварков для двух параметризаций углового спектра глюонной радиации удовлетворительно описывают экспериментальные данные. Но поскольку результаты для R_{AA} с двумя параметризациями довольно близки, по ним нельзя сделать выводов об угловой структуре партонных потерь энергии в среде.

ВЫВОДЫ

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.

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

© The Author(s) 2015. This article is published with open access at Springerlink.com

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

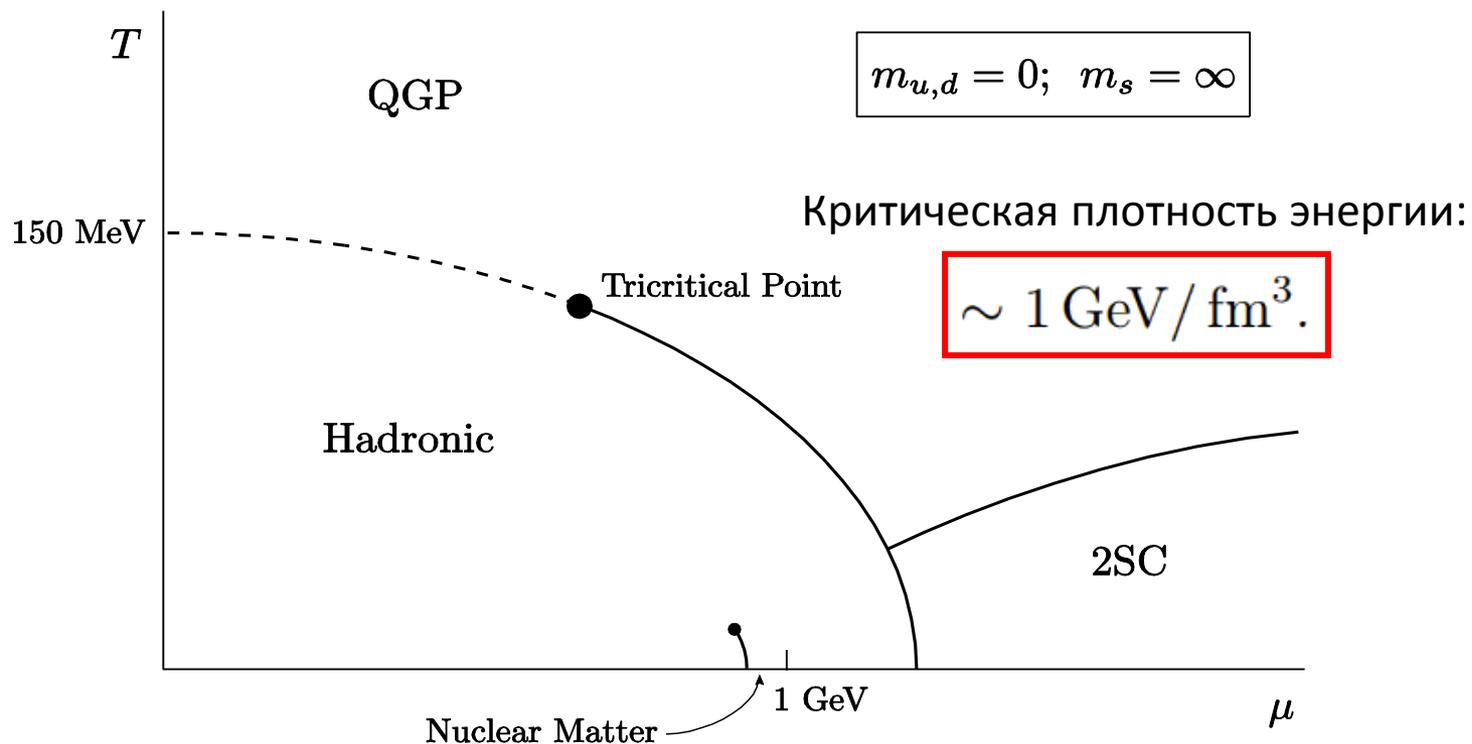
«Mechanisms of jet quenching in PbPb collisions at the LHC»

[The XXVth International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions "Quark Matter 2015"](#), Кобе, Япония, 27 сентября - 3 октября 2015

**Работа выполнена при поддержке гранта РФФ
N 14.12-000110**

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СЛАЙДЫ

Кварк-глюонная плазма и деконфайнмент ядерной материи



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
- Поточковые эффекты

...

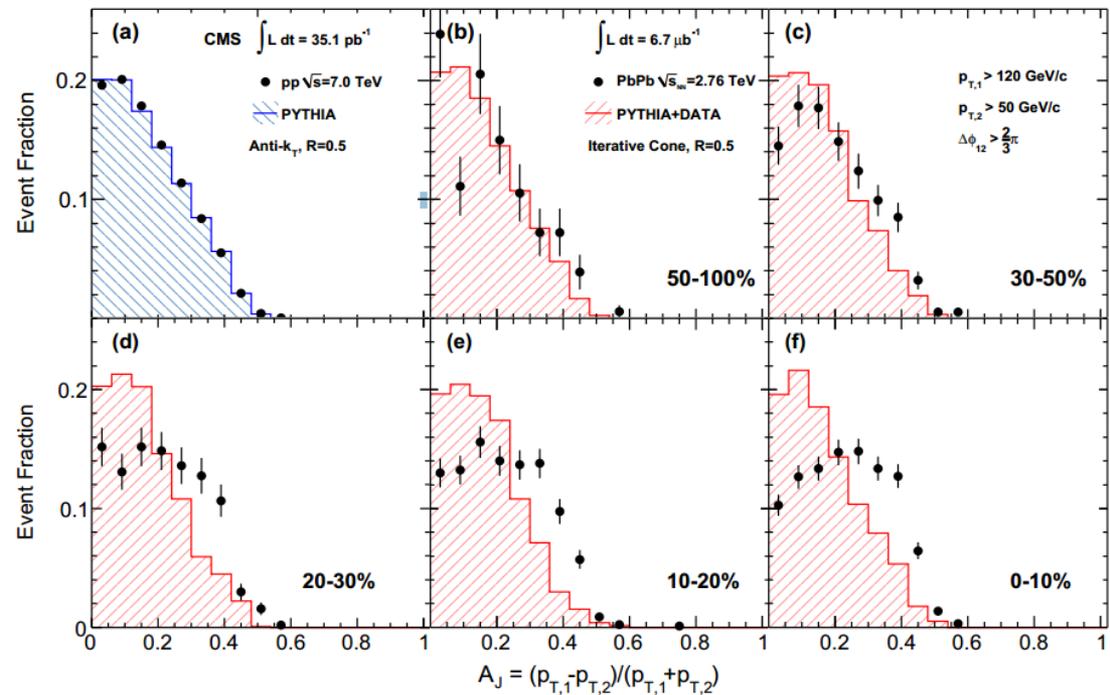
Жесткие тесты

(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 большой 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

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

PRL 105, 252303 (2010)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
17 DECEMBER 2010

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

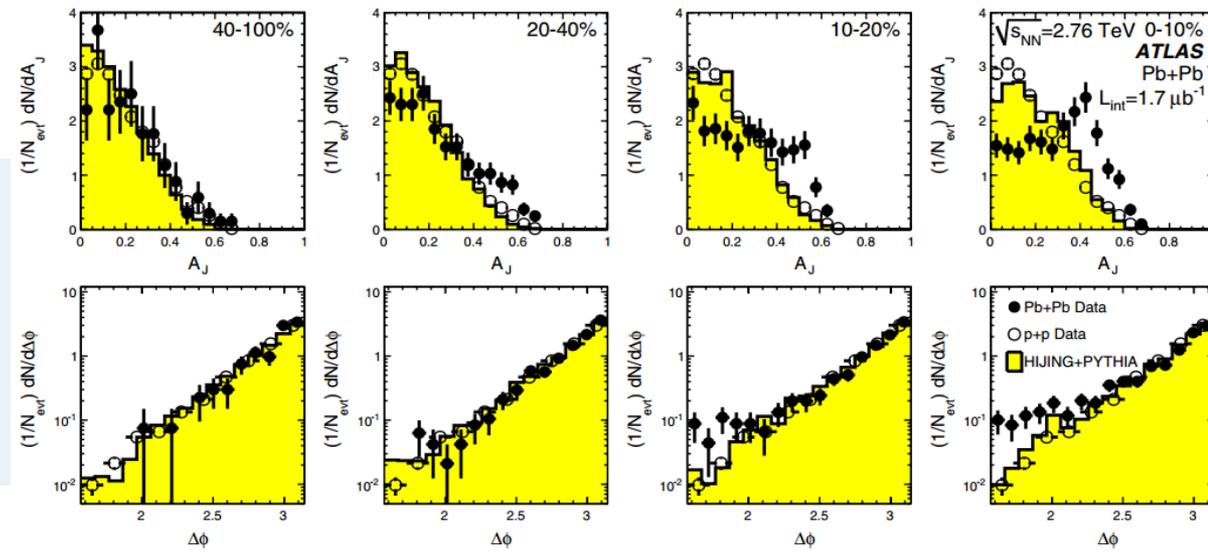
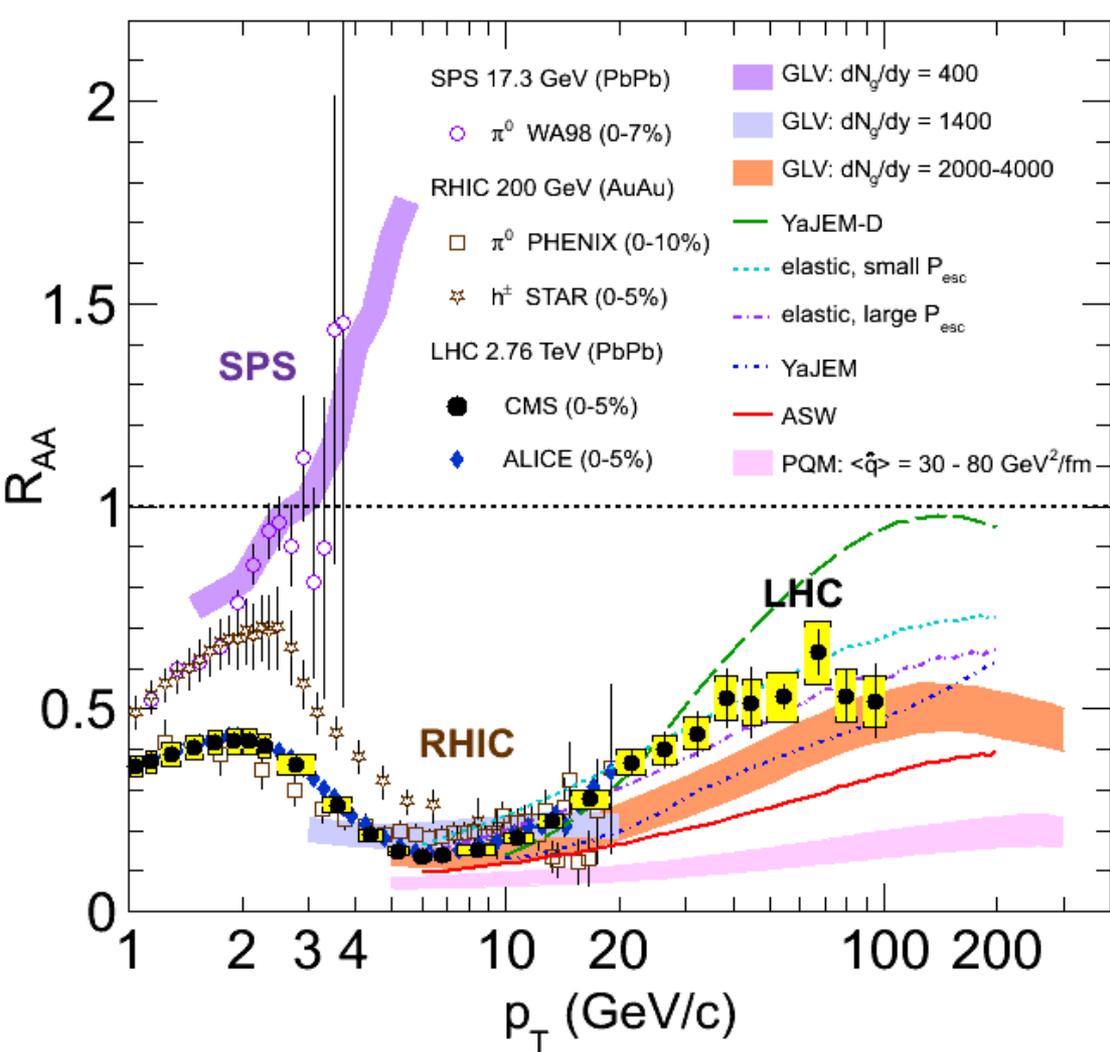


FIG. 3 (color online). (Top) Dijet asymmetry distributions for data (points) and unquenched HIJING with superimposed PYTHIA dijets (solid yellow histograms), as a function of collision centrality (left to right from peripheral to central events). Proton-proton data from $\sqrt{s} = 7$ TeV, analyzed with 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 p_T , измеренные в экспериментах на SPS, RHIC и LHC

Сильное подавление жестких адронов в центральных соударениях

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

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 $\sqrt{s_{NN}}=2.76 \text{ TeV}$ ", *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 параметры модели:

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

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

*Были рассмотрены струи с поперечной энергией **>100 ГэВ**,
размером конуса $R^{\text{jet}} = \sqrt{\Delta\phi^2 + \Delta\eta^2} = 0.3$
псевдобыстротой $0.3 < |\eta^{\text{jet}}| < 2$*

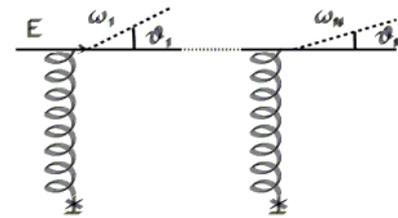
PYQUEN (PYthia QUENched)

1). Радиационные потери: BDMPS model

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

$$\frac{dE^{\text{rad}}}{dl} = \frac{2\alpha_s(\mu_D^2)C_R}{\pi L} \int_{\mu_D^2 \lambda_g}^E d\omega \left[1 - y + \frac{y^2}{2} \right] \ln |\cos(\omega_1 \tau_1)|,$$

$$\omega_1 = \sqrt{i \left(1 - y + \frac{C_R}{3} y^2 \right) \bar{k} \ln \frac{16}{\bar{k}}}, \quad \bar{k} = \frac{\mu_D^2 \lambda_g}{\omega(1-y)},$$



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

α_s - бегущая константа связи КХД

$C_R = 4/3$ - фактор цветового заряда кварка

μ_D - масса дебаевского экранирования

R.Baier, Yu.L.Dokshitzer, A.H.Mueller, S.Peigné, D.Schiff. «Angular dependence of the radiative gluon spectrum», Phys. Rev. C 64, 057902, 2001

R.Baier, Yu.L.Dokshitzer, A.H.Mueller, S.Peigné, D.Schiff. «Angular dependence of the radiative gluon spectrum and the energy loss of hard jets in QCD media», Phys. Rev. C 60, 064902, 1999

R.Baier, Yu.L.Dokshitzer, A.H.Mueller, S.Peigné, D.Schiff. «Radiative energy loss of high energy quarks and gluons in a finite volume quark-gluon plasma», Nucl.Phys.B483:291-320,1997

PYQUEN (PYthia QUENched)

1). Радиационные потери

Для тяжелых кварков (в частности, для расчета радиационных потерь b -кварков), используется обобщенный вид формулы :

$$\frac{dE^{\text{rad}}}{dl} \Big|_{m_q \neq 0} = \frac{1}{(1 + (\beta\omega)^{3/2})^2} \frac{dE^{\text{rad}}}{dl} \Big|_{m_q = 0}$$
$$\beta = \left(\frac{\lambda}{\mu_D^2} \right)^{1/3} \left(\frac{m_q}{E} \right)^{4/3} .$$

Yu.L Dokshitzer, D.E Kharzeev, «Heavy-quark colorimetry of QCD matter», Phys. Lett. B 519 (2001) 199.

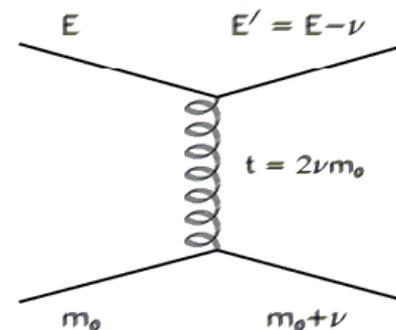
PYQUEN (PYthia QUENched)

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:

$$\frac{dE^{\text{col}}}{dl} = \frac{1}{4T\lambda\sigma} \int_{\mu_D^2}^{t_{\text{max}}} dt \frac{d\sigma}{dt} t,$$

(упругое рассеяние)



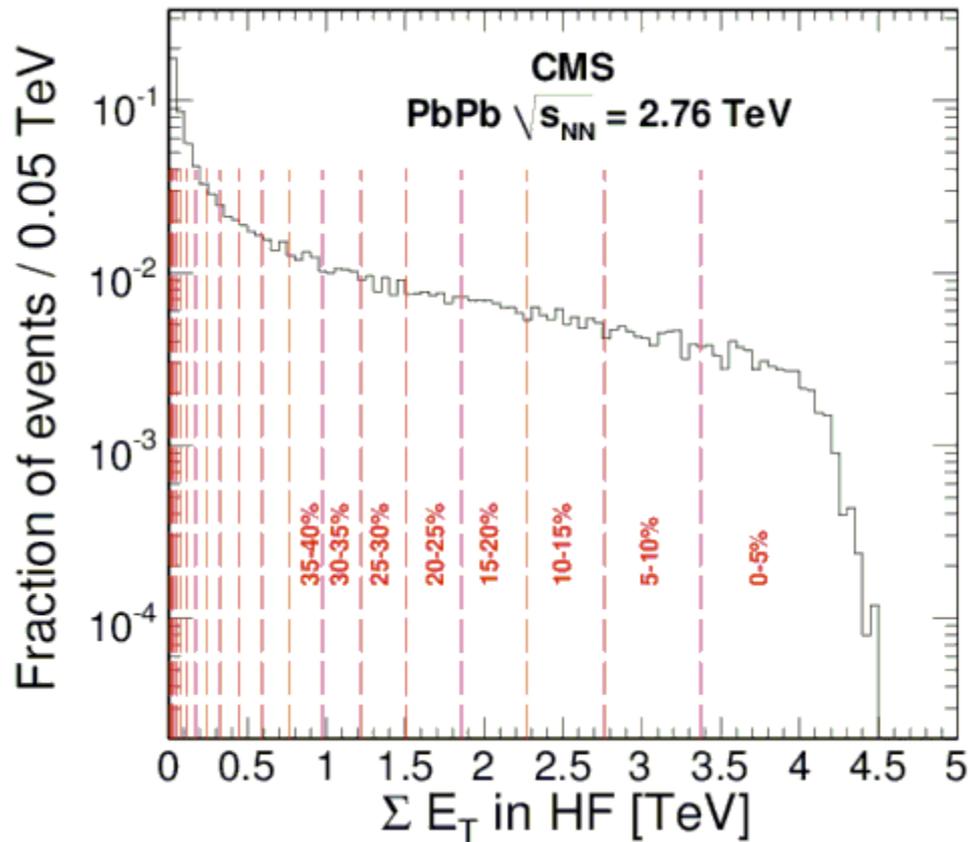
$$\frac{d\sigma}{dt} \cong C \frac{2\pi\alpha_s^2(t)}{t^2} \frac{E^2}{E^2 - m_p^2}$$

$C = 9/4$ для gg

$C = 1$ для gq

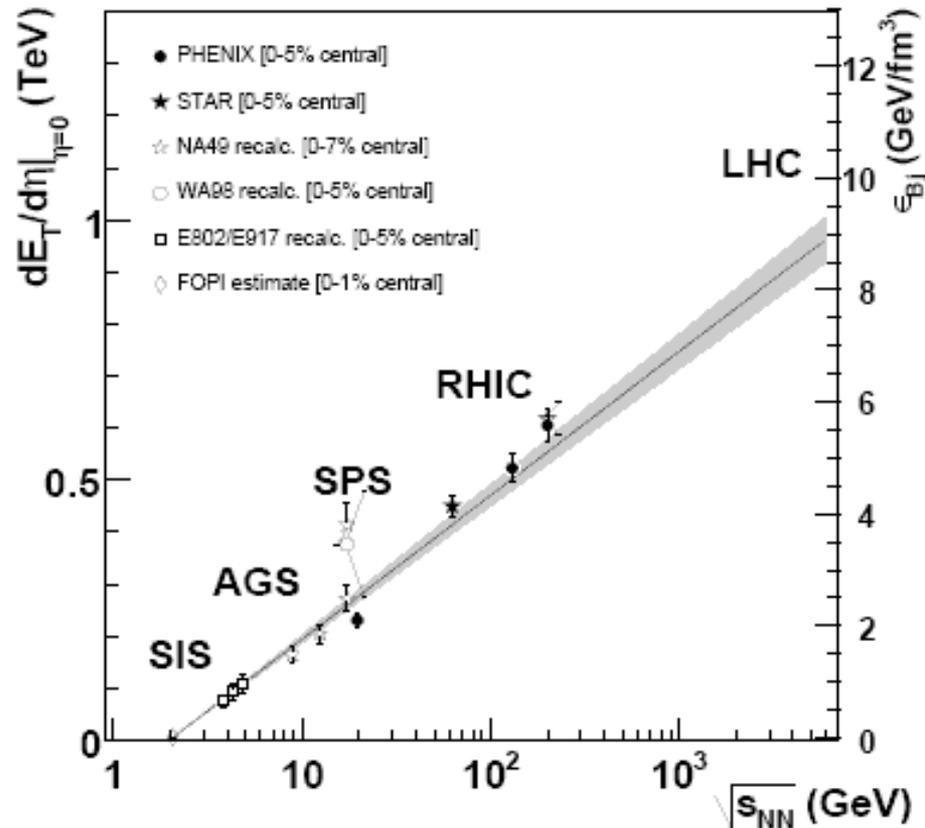
$C = 4/9$ для qq рассеяния

Центральность

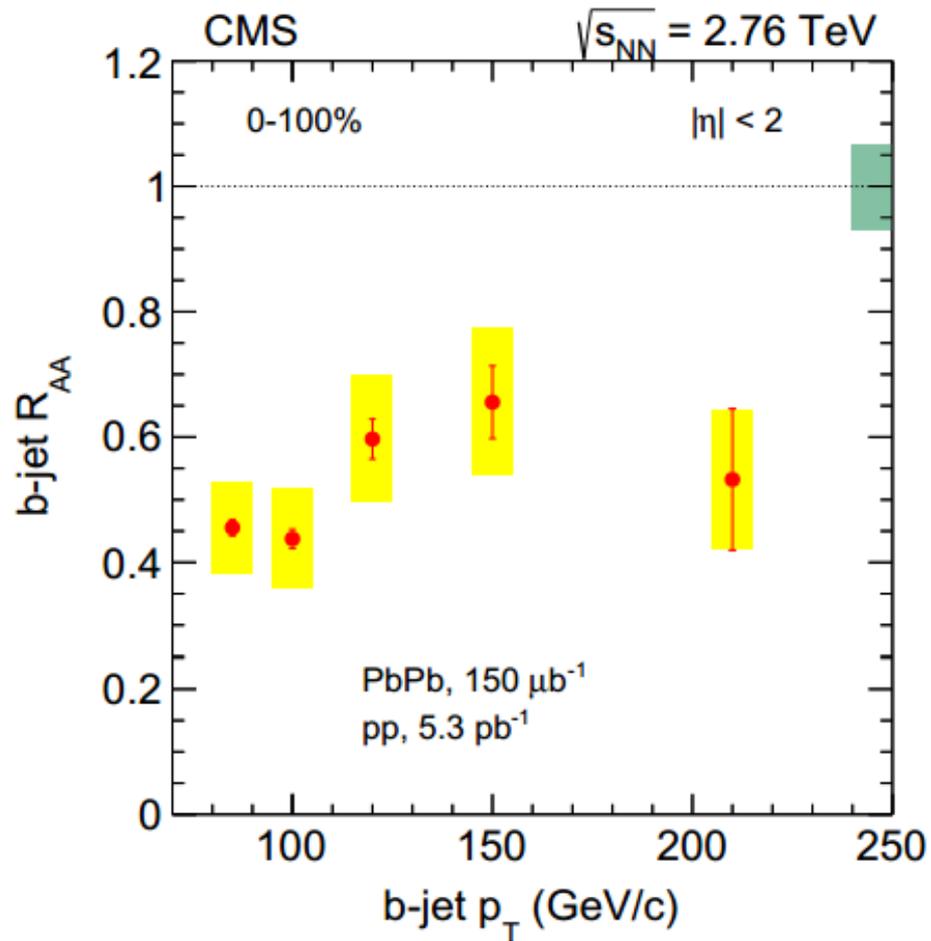
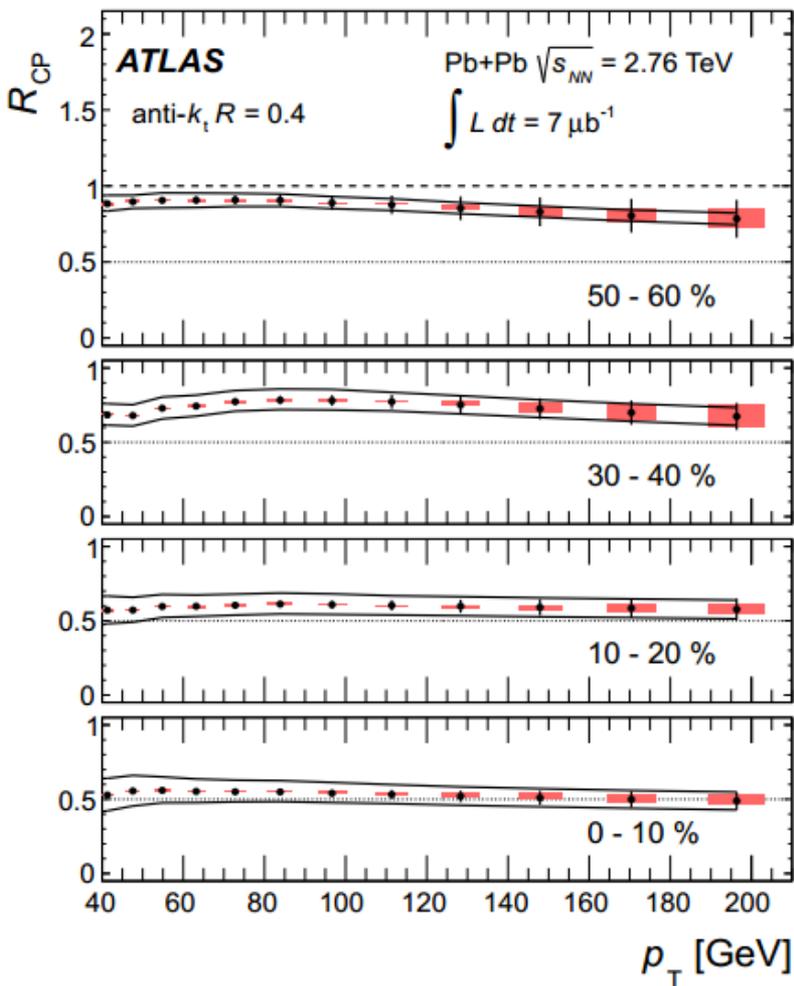


Распределение по энерговыделению в переднем калориметре CMS в столкновениях PbPb при $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ. 0-5% обозначает 5% наиболее центральных соударений и т.д.

Начальная плотность энергии в соударениях тяжелых ионов



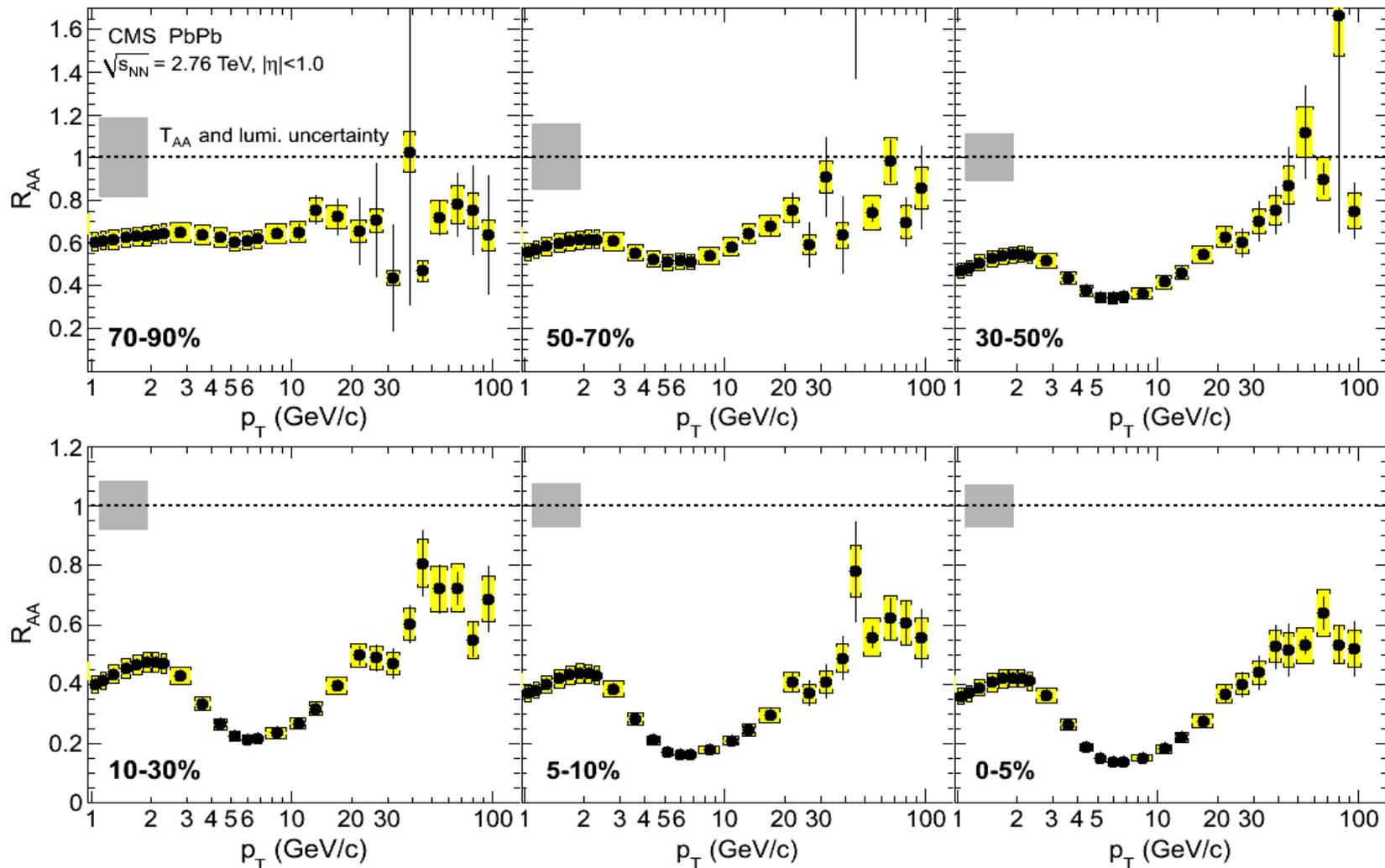
Измеренная поперечная энергия на единицу быстроты при $\eta = 0$ и критическая плотность энергии



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

ATLAS Collaboration, "Measurement of Azimuthal Angle Dependence of Inclusive Jet Yields in PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV with the ATLAS detector" // Phys. Rev. Lett. 111 (2013) 152301

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



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.