

Предзащита диссертации:  
**Спектры заряженных частиц и факторы  
ядерной модификации в протон-ядерных  
( $p+^{208}\text{Pb}$ ) взаимодействиях**

**Евгений Александрович Шульга**

**Специальность:**

**01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц»**

Научный руководитель:  
к.ф.-м.н., профессор А. С. Романюк



# Введение

Измерения на RHIC позволяют заключить, что при ультрарелятивистских ядро-ядерных взаимодействиях:

- образуется "горячая и плотная КХД-материя";
- это партонная материя в состоянии деконфайнмента, схожая по своим свойствам с идеальной (с исключительно малой вязкостью) жидкостью. Эта система находится в режиме сильной связи.

Выводы сделаны на основании подавления адронов и направленных потоков частиц, например [EPJC 2005 43 303](#) и [PRL 2006 96 032302](#).

В 2010 году, коллаборация CMS представила результаты, свидетельствующие о существовании угловых корреляций частиц в pp столкновениях ([JHEP 09 \(2010\) 091](#)). Такие коллективные эффекты, ранее описывались только для систем, в которых образуется КХД-материя. В dAu взаимодействиях на RHIC обнаружены не были.

Возможность разделения степени влияния эффектов начального и конечного состояний на свойства рождающихся частиц является принципиально важной для подобного рода исследований.

# Введение

Ядро-ядерные столкновения:

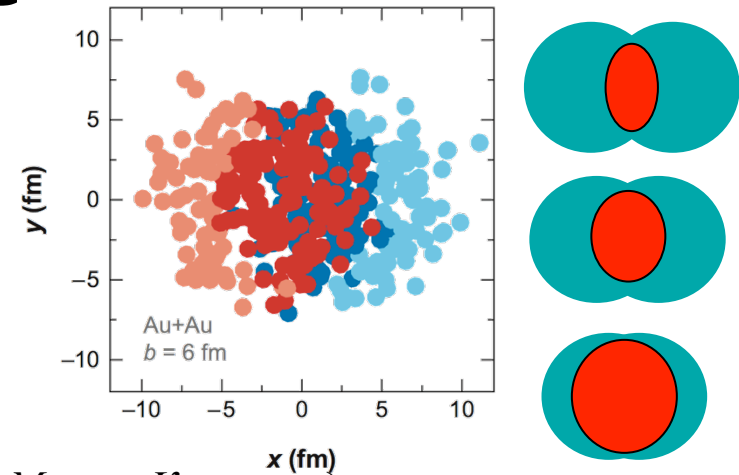
- ✓ эффекты начального состояния, т.е. изменение свойств нуклона находящегося в ядре ;
- ✓ эффекты конечного состояния, т.е. горячей КХД-материи.

Протон-ядерные столкновения:

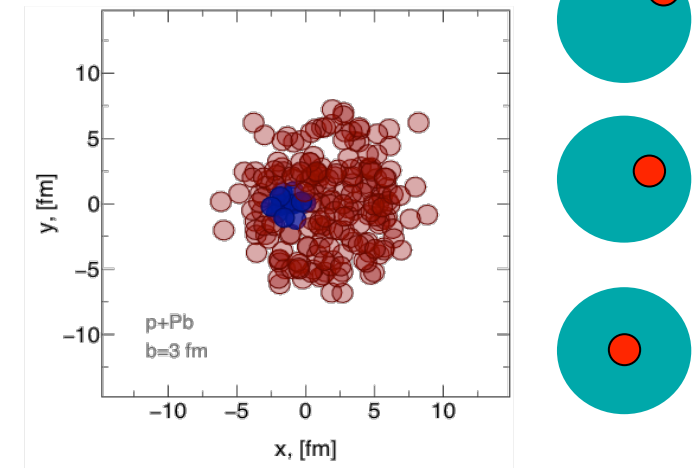
- ✓ эффекты начального состояния;

Ядерная структурная функция партона будет зависеть и от его положения относительно центра ядра.

Эффекты начального состояния изучаются в работе через измерение факторов ядерной модификации для заряженных адронов в p+Pb взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$  ТэВ, в которых не ожидается образования плотной и горячей ядерной среды.



Монте-Карло моделирование  
AA и pA взаимодействий



# Факторы ядерной модификации

Фактор ядерной модификации показывает как рождение адронов в ядерных столкновениях изменяется по сравнению с протон-протонными столкновениями.

При отсутствии эффектов среды фактор равен единице.

спектр из pPb

$$R_{pPb}(p_T, y^*) = \frac{1}{\langle T_{Pb} \rangle} \frac{1/N_{evt} d^2 N_{pPb}/dy^* dp_T}{d^2 \sigma_{pp}/dy^* dp_T},$$

локальная ядерная толщина, бн<sup>-1</sup>
сечение из pp

$$R_{CP}(p_T, \eta) = \frac{\langle T_{Pb,P} \rangle}{\langle T_{Pb,C} \rangle} \frac{(1/N_{evt,C}) d^2 N_{pPb,C}/d\eta dp_T}{(1/N_{evt,P}) d^2 N_{pPb,P}/d\eta dp_T}.$$

$$\langle T_{Pb} \rangle = \langle N_{столкн.} \rangle / \sigma_{неупр.}^{NN}$$

$\langle T_{Pb} \rangle$  - функция локальной ядерной толщины, характеризующая число неупругих нуклон-нуклонных столкновений.

$\langle T_{Pb} \rangle$  зависит от центральности взаимодействия, т.к. чем ближе к центру ядра, тем больше нуклонов взаимодействует.

# Цель и Задачи

**Цель работы** состоит в экспериментальном изучение эффектов ядерной материи при помощи измерения спектров заряженных адронов и факторов ядерной модификации как функции поперечного импульса, псевдобыстроты и быстроты для различных интервалов центральности в  $p+Pb$  взаимодействиях при  $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$  ТэВ.

## **Задачи:**

- получить спектры заряженных адронов как функцию поперечного импульса, псевдобыстроты и быстроты в  $p+Pb$  взаимодействиях при  $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$  ТэВ
- рассчитать сечения заряженных адронов как функцию поперечного импульса и быстроты в  $pp$  взаимодействиях при  $\sqrt{s} = 5,02$  ТэВ
- вычислить факторы ядерной модификации как функцию поперечного импульса, псевдобыстроты и быстроты
- применить результаты модели Глаубера и Глаубера-Грибова при расчёте факторов ядерной модификации и провести сравнение

# Результаты при энергиях ниже БАК

Изучение эффектов начального состояния вещества проводились ранее:

- первое свидетельство о модификации в ядерных столкновениях при высоких энергиях наблюдалось в  $p+A$ (Be, Ti, W) столкновениях при энергиях 200, 300, и 400 ГэВ:

1. J. W. Cronin, H. J. Frisch, M. J. Shochet et al. // Phys. Rev. D. - 1975. - Jun. - Vol. 11. - Pp. 3105-3123.

- на Релятивистском Коллайдере Тяжёлых Ионов (RHIC) в системе  $d+Au$  с меньшей энергией сталкивающихся пучков, где протоны в дейтроне находятся в связанном состоянии, не обнаружено подавления как в AuAu взаимодействиях:

1. BRAHMS Collaboration // Phys. Rev. Lett. - 2003. - Vol. 91. - P. 072305.

2. PHENIX Collaboration // Phys. Rev. Lett. - 2003. - Vol. 91. - P. 072303.

3. PHOBOS Collaboration // Phys. Rev. Lett. - 2003. - Vol. 91. - P. 072302.

4. STAR Collaboration // Phys. Rev. Lett. - 2003. - Vol. 91. - P. 072304.

# Результаты при энергиях БАК

Изучение эффектов начального состояния на БАК параллельно проводятся в коллаборациях ALICE, ATLAS, CMS и LHCb :

- экспериментами на БАК представлены результаты в ограниченном интервале быстроты  $|\eta| < 0,5$  для ALICE и  $|\eta| < 1$  для CMS и в терминах псевдобыстроты:

1. ALICE Collaboration // Phys.Rev.Lett. - 2013. - Vol. 110. - P. 082302.
2. ALICE Collaboration // Eur. Phys. J. C. - 2014. - Vol. 74, no. 9. - P. 3054.
3. ALICE Collaboration // Phys. Rev. C. - 2015. - Vol. 91, no. 6. - P. 064905.
4. CMS Collaboration. // Eur. Phys. J. C. - 2015. - Vol. 75, no. 5. - P. 237.

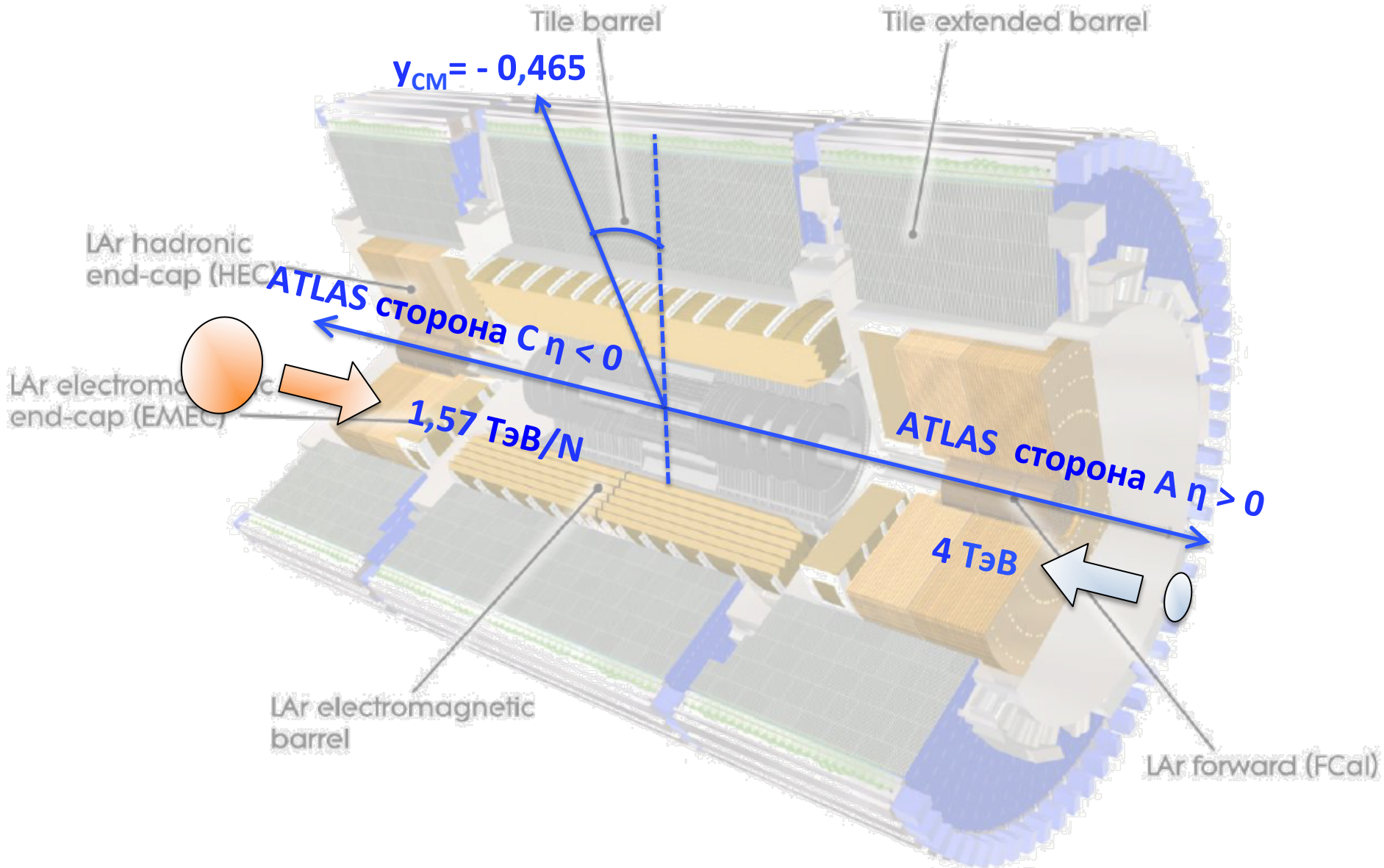
**Результаты, представленные в диссертации,** получены в зависимости от поперечного импульса, псевдо быстроты и быстроты для различных интервалов центральности, для более широких кинематических диапазонов:

$$|\eta| < 2,3 \text{ и } 0,1 < p_T < 22 \text{ ГэВ};$$

$$|\eta| < 2 \text{ и } 30 < p_T < 189 \text{ ГэВ}.$$

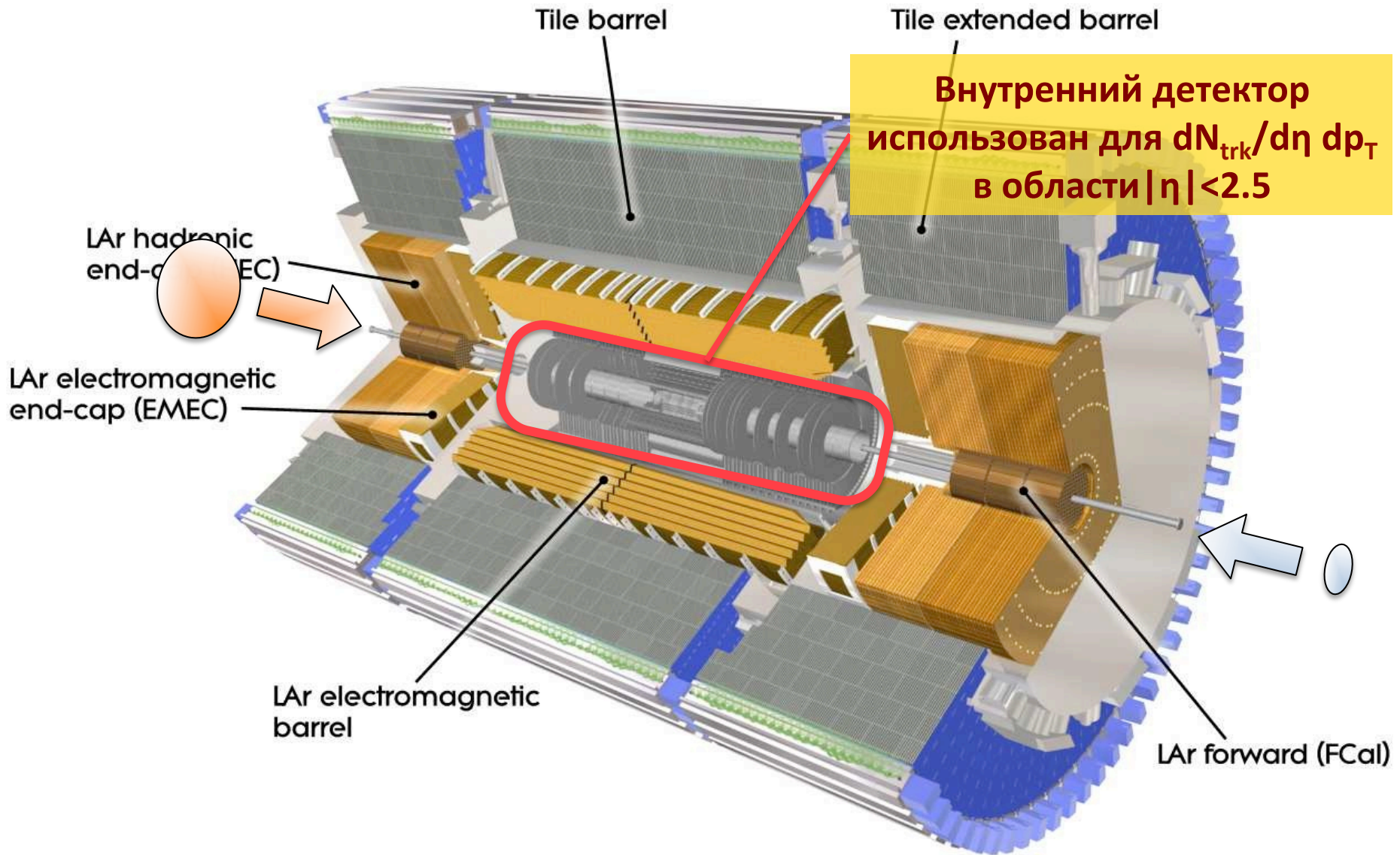
Эти результаты позволяют существенно продвинуться в понимании эволюции системы при переходе от p к Pb.

# p+Pb @ БАК и ATLAS

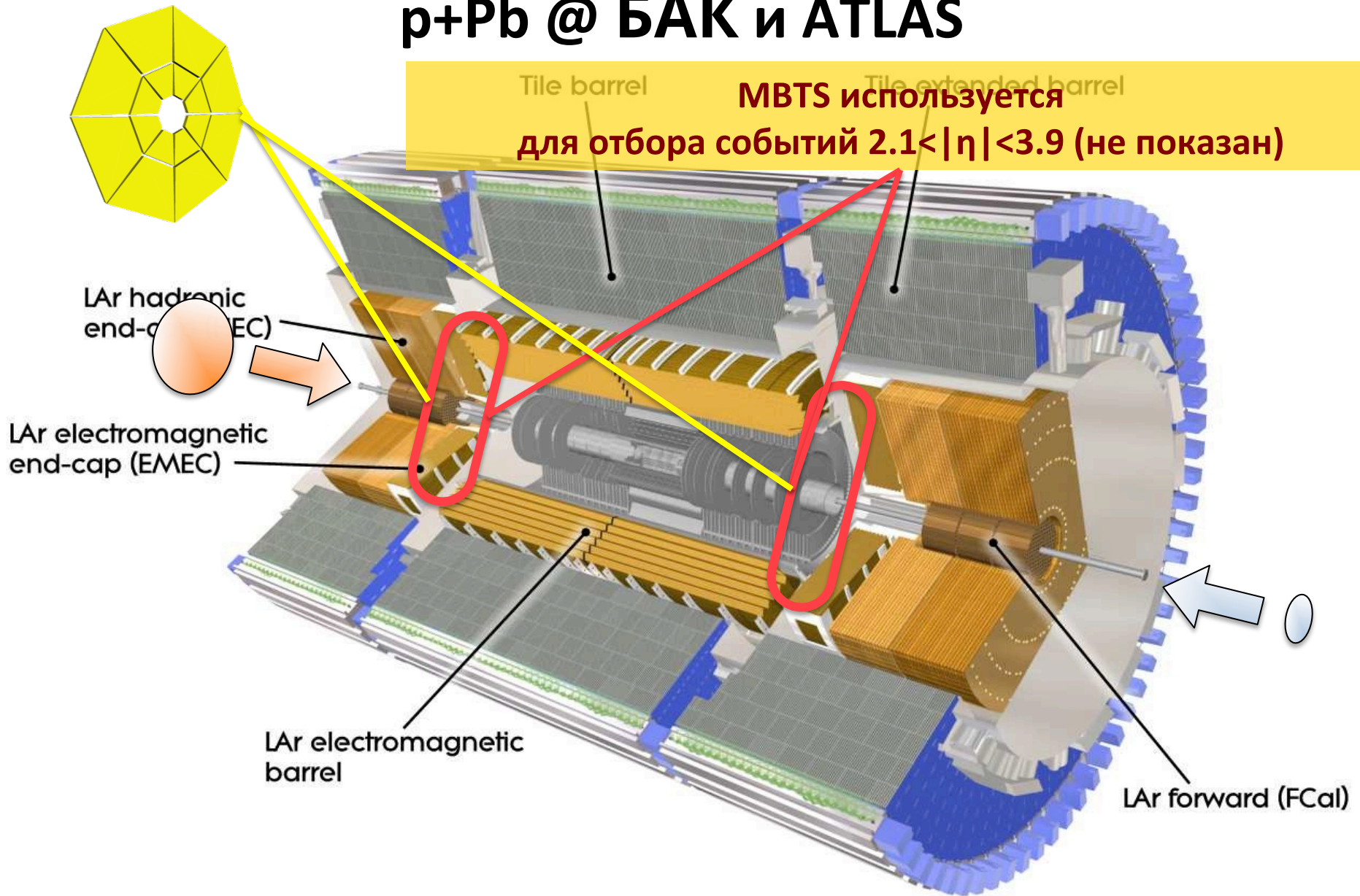




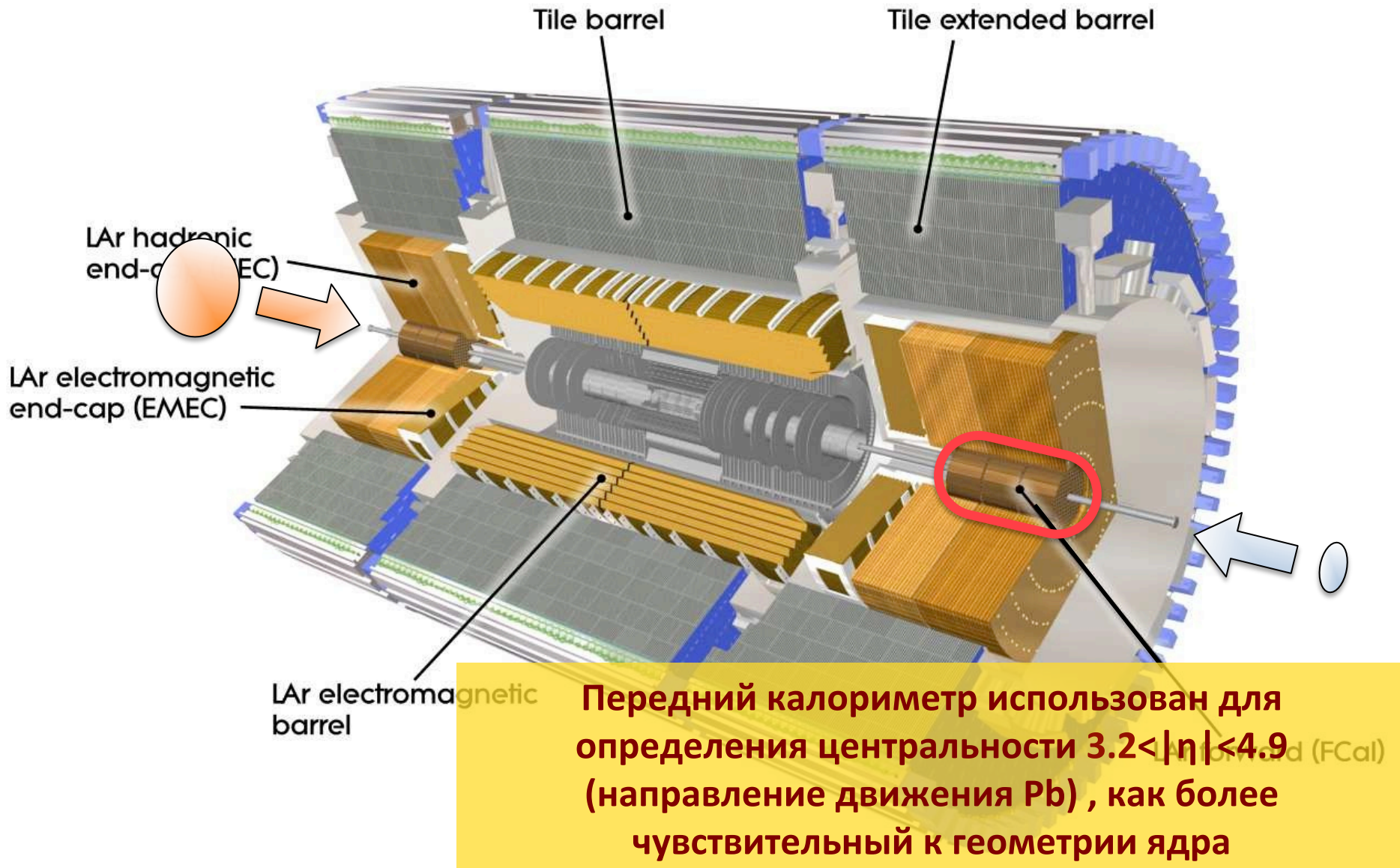
# p+Pb @ БАК и ATLAS



# p+Pb @ БАК и ATLAS

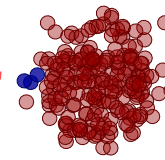


# p+Pb @ БАК и ATLAS

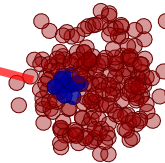


# Определение центральности

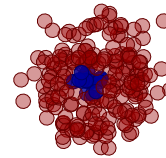
Классы центральности:



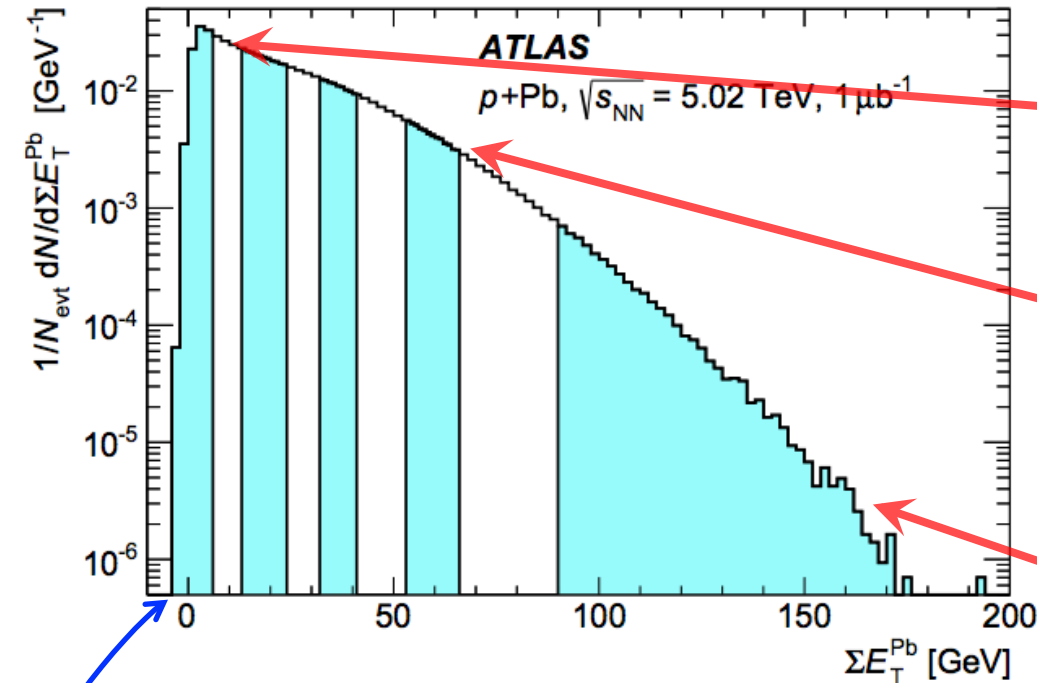
периферические 60-90%



«средние» 10-60%



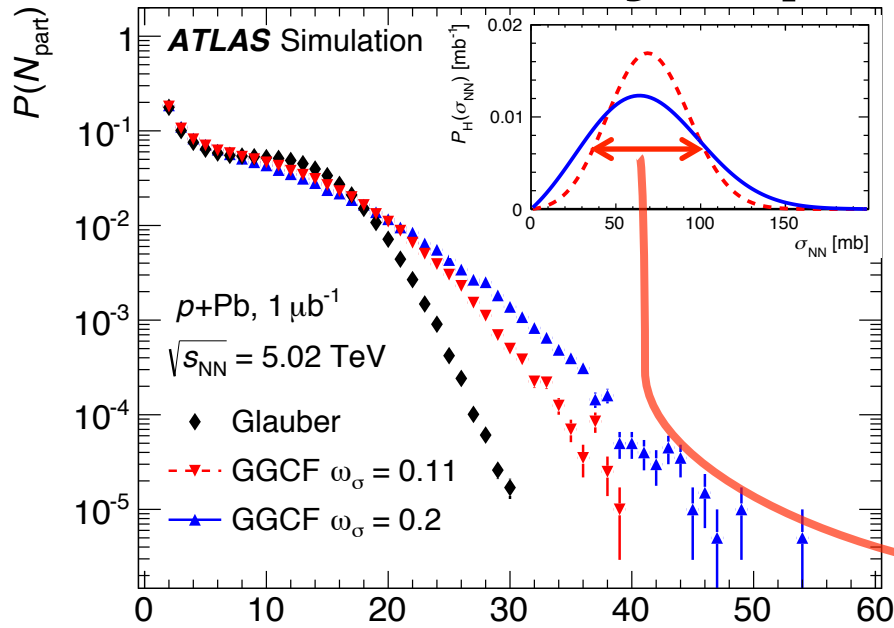
центральные 0-10%



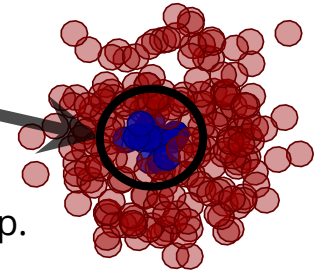
*Энерговыделение в калориметре*

- Не возможно определить  $N_{\text{part}}$  непосредственно из данных, поэтому используется энерговыделение в калориметре –  $\Sigma E_T^{\text{Pb}}$
- Классы центральности: 0-1%, 1-5%, 5-10%, 10-20%, 20-30%, 30-40%, 40-60%, 60-90%
- 90-100% исключён из рассмотрения из-за больших систематических неточностей от состава событий и эффективности восстановления

# Модели Глаубера и Глаубера-Грибова



$$\langle T_{\text{Pb}} \rangle = \langle N_{\text{столкн.}} \rangle / \sigma_{\text{неупр.}}^{\text{NN}}$$



$$P_H(\sigma_{\text{tot}}) = \rho \frac{\sigma_{\text{tot}}}{\sigma_{\text{tot}} + \sigma_0} \exp \left\{ -\frac{(\sigma_{\text{tot}}/\sigma_0 - 1)^2}{\Omega^2} \right\}.$$

$$\int_0^\infty d\sigma \sigma^2 P(\sigma, s) = \langle \sigma^2 \rangle(s) = \sigma_{\text{tot}}^2(s) (1 + \omega_\sigma(s)).$$

$$P_H(\sigma_{\text{NN}}) = \frac{1}{\lambda} P(\sigma_{\text{NN}}/\lambda)$$

Полная вероятность  $N$  столкновений  $N_{\text{part}}$

Для моделирования  $N_{\text{part}}$  распределений используются:

- модель Глаубера при  $\sigma_{\text{NN}} = 70 \pm 5$  мб ( $\delta$ -функция)
- модель цветовой неустойчивости Глаубера-Грибова,  $\sigma_{\text{NN}}$  – задано вероятностным распределением

В модели Глаубера-Грибова:

- $\sigma_{\text{tot}}$  считается фиксированным в одном событии
- параметр  $\omega_\sigma$  определяет размер флуктуаций
- $\omega_\sigma$  получена из экспериментальных данных в работах: 0.11 [PLB633 (2006) 245–252] и 0.2 [PLB 722 (2013) 347–354] (8 ТэВ TOTEM)

# Используемые данные

Для получения спектров от pPb взаимодействий при  $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$  ТэВ:

- для  $|\eta| < 2,3$  и  $0,1 < p_T < 22$  ГэВ используется набор данных 2012 года с интегральной светимостью:  $1 \text{ мкб}^{-1}$  ;
- для  $|\eta| < 2$  и  $30 < p_T < 189$  ГэВ используется набор данных 2013 года с интегральной светимостью:  $30 \text{ нб}^{-1}$

$$R_{p\text{Pb}}(p_T, y^*) = \frac{1}{\langle T_{\text{Pb}} \rangle} \frac{1/N_{\text{evt}} d^2 N_{p\text{Pb}}/dy^* dp_T}{d^2 \sigma_{pp}/dy^* dp_T},$$

локальная ядерная толщина, бн<sup>-1</sup>
спектр из pPb
сечение из pp

Для сравнения необходимо получить сечения в pp взаимодействиях для этого используются:

- Для сечений pp при  $0,1 < p_T < 22$  ГэВ:  
набор данных pp при  $\sqrt{s} = 2,76$  ТэВ с интегральной светимостью:  $200 \text{ мкб}^{-1}$ ,  
набор данных pp при  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ с интегральной светимостью:  $130 \text{ нб}^{-1}$ ;
- Для сечений pp при  $4 < p_T < 189$  ГэВ:  
набор данных pp при  $\sqrt{s} = 5,02$  ТэВ с интегральной светимостью:  $25 \text{ пб}^{-1}$

# Сечения $pp$ для $0,1 < p_T < 22$ ГэВ

Так как сечения в  $pp$  при той же энергии в системе центра масс при достаточно низких  $p_T$  частиц получить не возможно используется интерполяция до  $\sqrt{s}=5.02$  ТэВ при помощи  $\ln(\sqrt{s})$  зависимости

$pp$  данные:

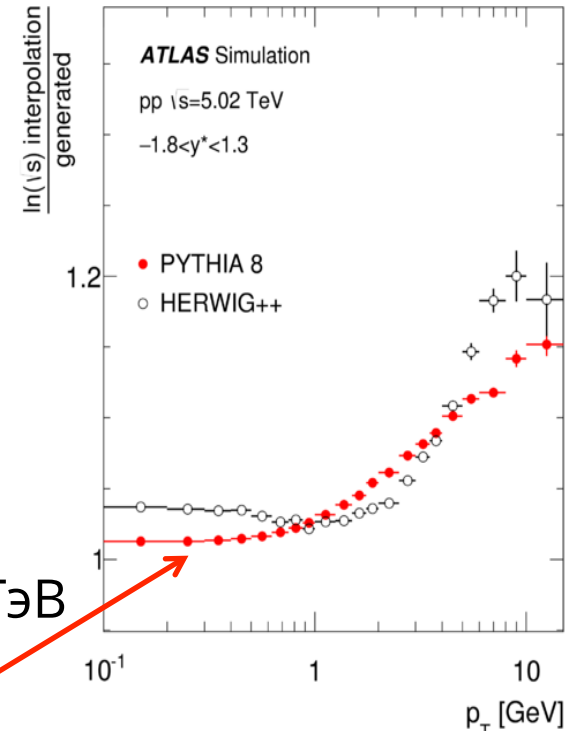
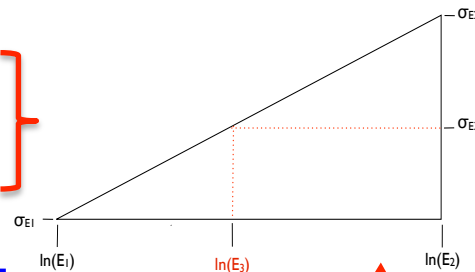
$200 \mu\text{b}^{-1}$ ,  $\sqrt{s}=2,76$  ТэВ

$130 \text{nb}^{-1}$ ,  $\sqrt{s}=7$  ТэВ

опубликованы в:

<http://arxiv.org/abs/15>

<http://arxiv.org/abs/1012.5104>



*Поправка процедуры интерполяции*

1. Интерполяция из двух сечений в  $\sqrt{s}=5,02$  ТэВ

2. Процедура повторяется для результатов PYTHIA разница между интерполяцией и моделированием используется в качестве поправки

# Отбор треков

Для анализа отбираются треки частиц рождённых в вершине взаимодействия

Отбор треков (основан на pp анализах):

- SCT hits:
- for  $100 \text{ MeV} < p_T < 200 \text{ MeV}$  - 2 SCT hits;
- for  $200 \text{ MeV} < p_T < 300 \text{ MeV}$  - 4 SCT hits;
- $p_T > 300 \text{ MeV}$  - 6 SCT hits
- $n_{\text{PixHits}} > 0$ ;
- $n_{\text{BLHits}} > 0$  if expected
- $N_{\text{TRTHits}} > 8$  ограничивает анализ до  $|\eta| < 2.0$ ;

Вершинные ограничения (для отбора вторичных частиц):

- $d_0/e_{d_0}, z_0/e_{z_0} < 3$
- $d_0, z_0 < 1.5$

**Только  
для  
высоких  
 $p_T$**



Сопоставление треков струям (для триггеров струй при высоких  $p_T$ ):

- Трек соответствует струе при  $\Delta R < 0.4$
- Энергетический баланс треком-струя  $(0.8 * p_{\text{Track}T} - 10) < E_{\text{jet}T}^{\text{jet}}$



# Используемые коррекции

Для решения задачи необходимо ввести коррекции на приборные погрешности и нэffективность отбора:

- Поправка на количество вторичных и ложных треков;
- Коррекция на разрешение восстановления поперечного импульса;
- Эффективность восстановления треков

pp взаимодействия симметричны, а pPb не симметричны, поэтому для сравнения систем необходимо перейти в термины быстроты  $y^*$ :

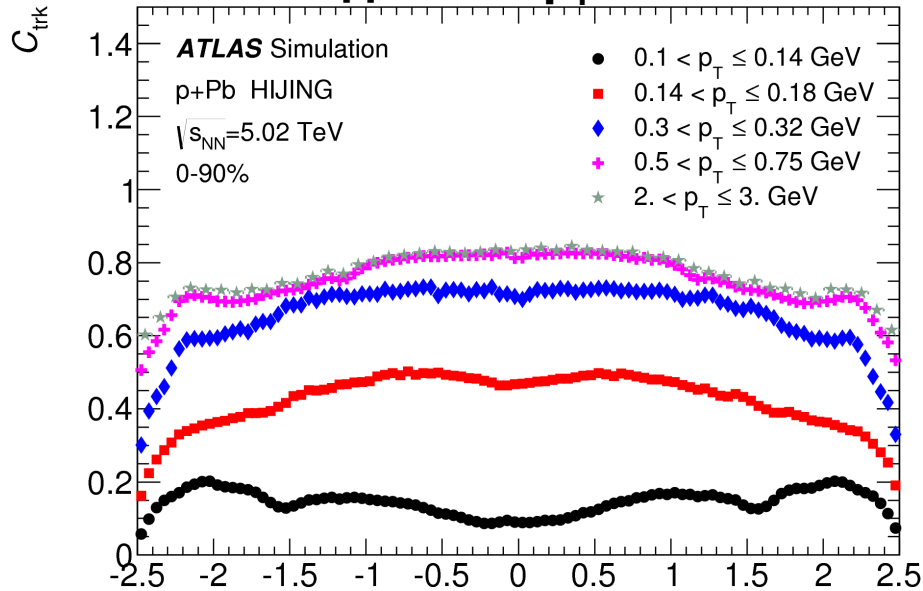
- $y^* = y - y_{CM}$ ;  $y_{CM} = -0.465$ ;
- для вычисления  $y^*$  предполагается, что все треки принадлежат  $\pi^\pm$ , для низких  $p_T$  применяются коррекции, основанные на моделировании в HIJING

$$\frac{1}{N_{evt}} \frac{1}{2\pi p_T} \frac{d^2 N_{ch}}{dp_T d\eta} = \frac{1}{N_{evt}} \frac{1}{2\pi p_T} \frac{N_{ch}(p_T, \eta)}{\Delta p_T \Delta \eta} \frac{\mathcal{P}(p_T, \eta)}{\mathcal{C}_{trk}(p_T, \eta)} ,$$

$$\frac{1}{N_{evt}} \frac{1}{2\pi p_T} \frac{d^2 N_{ch}}{dp_T dy^*} = \frac{1}{N_{evt}} \frac{1}{2\pi p_T} \frac{N_{ch}(p_T, y^*)}{\Delta p_T \Delta y^*} \frac{\mathcal{P}(p_T, \eta) \mathcal{A}(p_T, y^*)}{\mathcal{C}_{trk}(p_T, \eta)} .$$

# Эффективность восстановления треков заряженных частиц

для  $0,1 < p_T < 22$  ГэВ

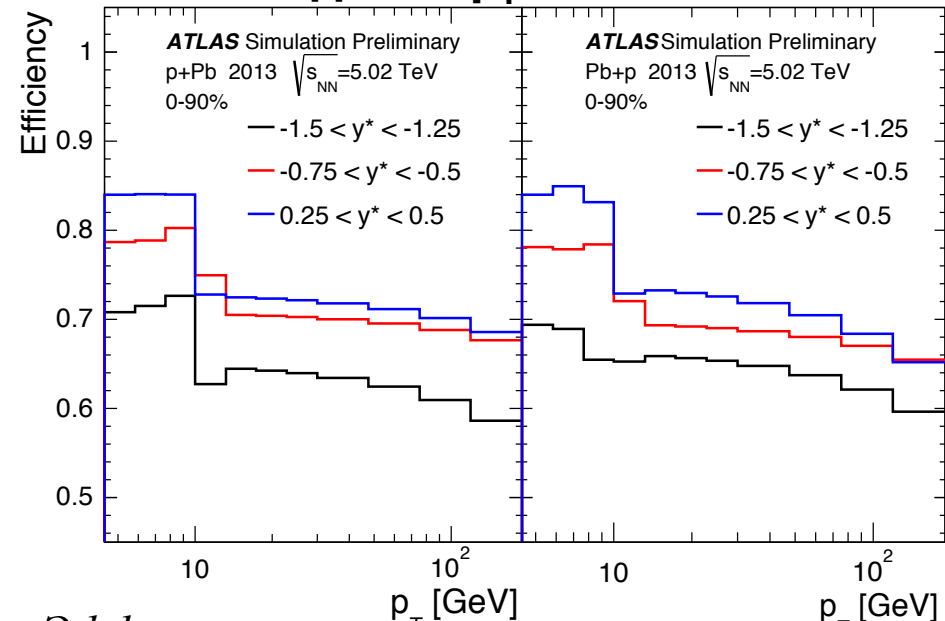


Эффективность восстановления треков  
в зависимости от псевдобыстроты

$$C_{\text{trk}}(p_T, \eta) = \frac{N_{\text{Primary}}^{\text{Rec}}(p_T, \eta)}{N_{\text{Primary}}^{\text{Gen}}(p_T^{\text{Gen}}, \eta^{\text{Gen}})}$$

- Поправочный коэффициент, используемый для коррекции неэффективности восстановления треков

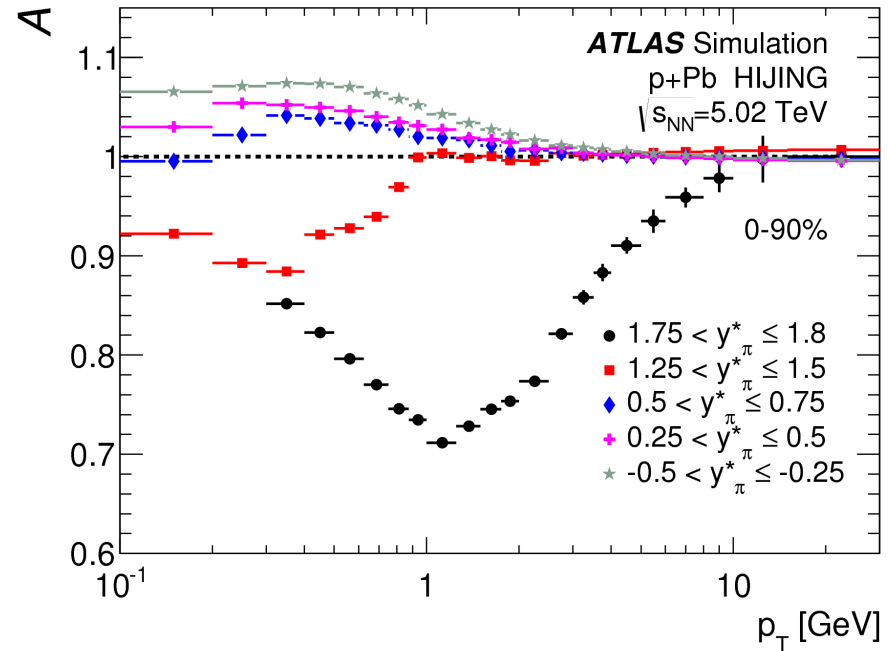
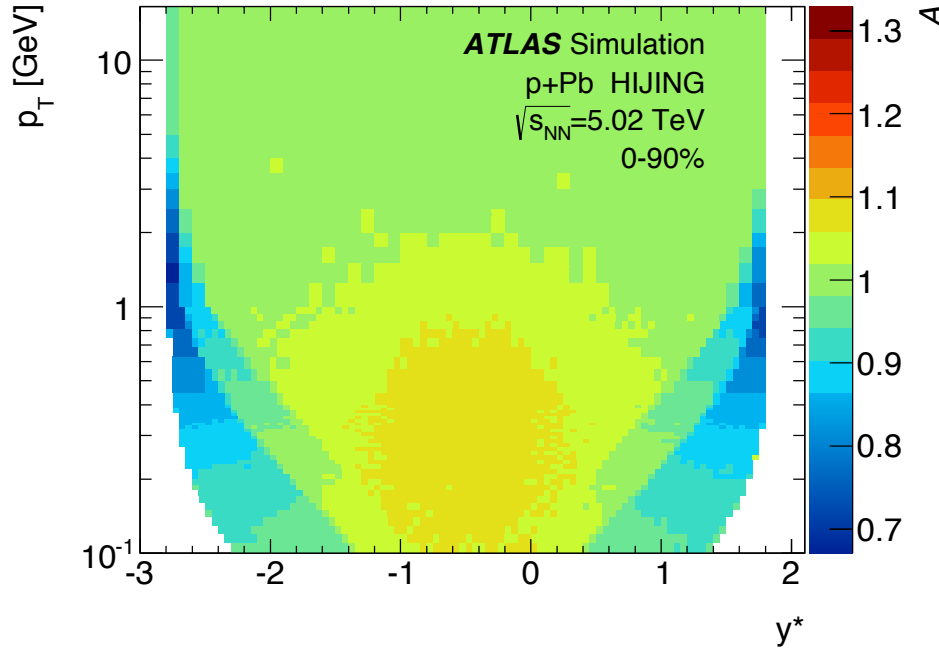
для  $4 < p_T < 189$  ГэВ



Эффективность восстановления треков  
в зависимости от  $p_T$

$$\epsilon_{\text{trk}}(p_T, y_\pi^\star) = \frac{N_{\text{Primary}}^{\text{Rec}}(p_T^{\text{Rec}}, y_\pi^\star)}{N_{\text{Primary}}^{\text{Gen}}(p_T^{\text{Gen}}, y_\pi^\star)}$$

# Коррекция на состав частиц



$$\mathcal{A}(p_T, y^*) = \frac{N_{\text{Primary}}^{\text{Gen}}(m, p_T, y^*)}{N_{\text{Primary}}^{\text{Gen}}(m_\pi, p_T, y^*)}$$

| интервал $p_T$ [ГэВ] | $p+Pb$ интервал $y^*$ | $pp$ интервал $y^*$  | Комбинированный $y^*$ интервал |
|----------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------------|
| $0,1 < p_T < 0,4$    | $-2,3 < y^* < 1,3$    | $-1,8 < y^* < 1,8$   | $-1,8 < y^* < 1,3$             |
| $0,4 < p_T < 1$      | $-2,5 < y^* < 1,5$    | $-2,0 < y^* < 2,0$   | $-2,0 < y^* < 1,5$             |
| $1 < p_T < 2$        | $-2,7 < y^* < 1,7$    | $-2,2 < y^* < 2,2$   | $-2,2 < y^* < 1,7$             |
| $2 < p_T < 3$        | $-2,75 < y^* < 1,75$  | $-2,25 < y^* < 2,25$ | $-2,25 < y^* < 1,75$           |
| $p_T > 3$            | $-2,8 < y^* < 1,8$    | $-2,3 < y^* < 2,3$   | $-2,3 < y^* < 1,8$             |

Таблица 3.3: Доверительные ограничения для акцептанса для  $p+Pb$  и  $pp$ .

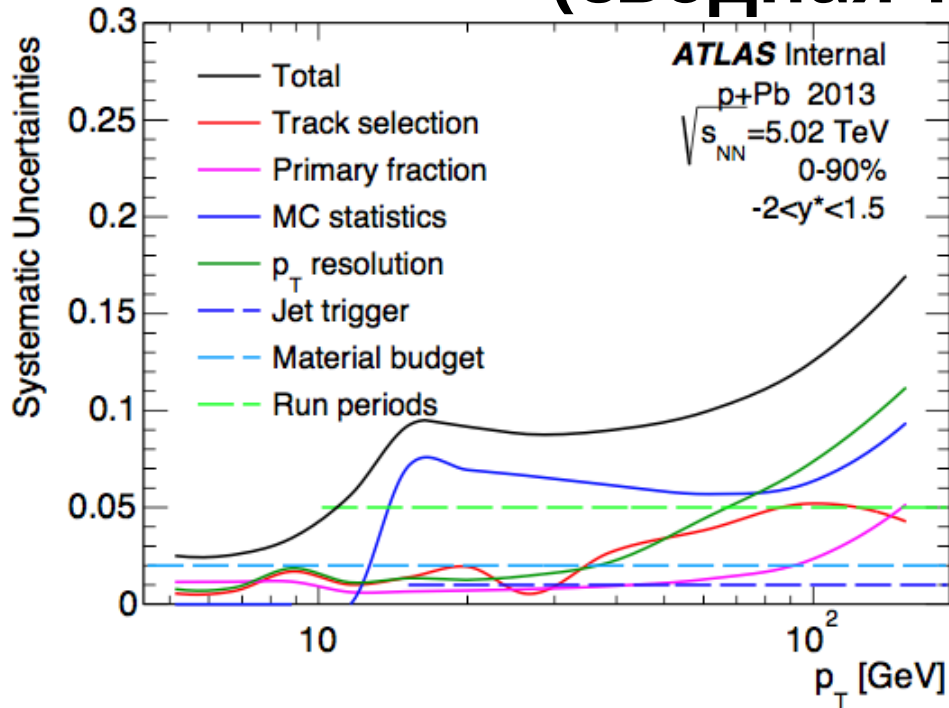
- Для частиц которые не являются пионами требуются поправки, так как величина  $y^*$  вычислена при помощи массы пиона
- Доверительные области с  $\mathcal{A} \leq 0,9$  исключены из рассмотрения при расчёте  $R_{pPb}$  (Таблица 3.3)

# Систематические ошибки низкие $p_T$ (сводная таблица)

| $p+Pb$                              |                              |  |
|-------------------------------------|------------------------------|--|
| Систематическая погрешность         | Размер                       | Область  |
| Критерии отбора треков              | до 2%                        | снижается с $p_T$ , не зависит от $ \eta $   |
| Состав частиц                       | до 5%                        | снижается с $p_T$ , снижается с $ \eta $   |
| Неточность описания материала       | 0,5 – 4%                     | снижается с $p_T$ , возрастает с $ \eta $  |
| Перевзвешивание                     | до 1%                        | не зависит от $p_T$ и $\eta$   |
| Определение центральности           | 1 – 8%                       | возрастает с $p_T$ и асимметрична по $\eta$ ,<br>возрастает с шириной интервалов центральности |
| $pp$                                |                              |  |
| Критерии отбора треков              | 3%                           | возрастает с $p_T$ и $\eta$  |
| Состав частиц                       | до 2%                        | не зависит от $p_T$ и $\eta$   |
| Перевзвешивание                     | до 2%                        | снижается с $p_T$ и не зависит от $\eta$   |
| pp интерполяция                     | до 5%                        | возрастает с $p_T$ и не зависит от $\eta$  |
| pp SD события                       | 3%                           | используется та же величина  |
| Эффективность триггера              | 0,5%                         | используется та же величина  |
| Эффективность восстановления вершин | 1%                           | используется та же величина  |
| Светимость                          | 2,7% (2,76 ТэВ) и 2% (7 ТэВ) | используется та же величина  |

- Основной вклад в размер систематических погрешностей вносит неточность определения состава частиц в Монте-Карло, интервалов центральности и светимости
- Все финальные распределения представлены вместе с соответствующими им погрешностями

# Систематические ошибки высокие $p_T$ (сводная таблица)



| источник           | максимальная величина |
|--------------------|-----------------------|
| критерии отбора    | 5%                    |
| сопоставление      | 7%                    |
| состав частиц      | 1%                    |
| триггер            | 1%                    |
| фон                | 2%                    |
| анфолдинг          | 7%                    |
| описание детектора | 4%                    |
| светимость         | 5%                    |

## Парциальные систематические погрешности

- Основной вклад приходится на неточности связанные с Монте-Карло моделированием (анфолдинг, критерии отбора) и светимость.
- Для погрешностей измерения  $R_{pPb}$  предполагается что неточности измерения числителя и знаменателя нескоррелированы и поэтому полная систематическая погрешность равна сумме парциальных погрешностей  $pp$  и  $p+Pb$  спектров.



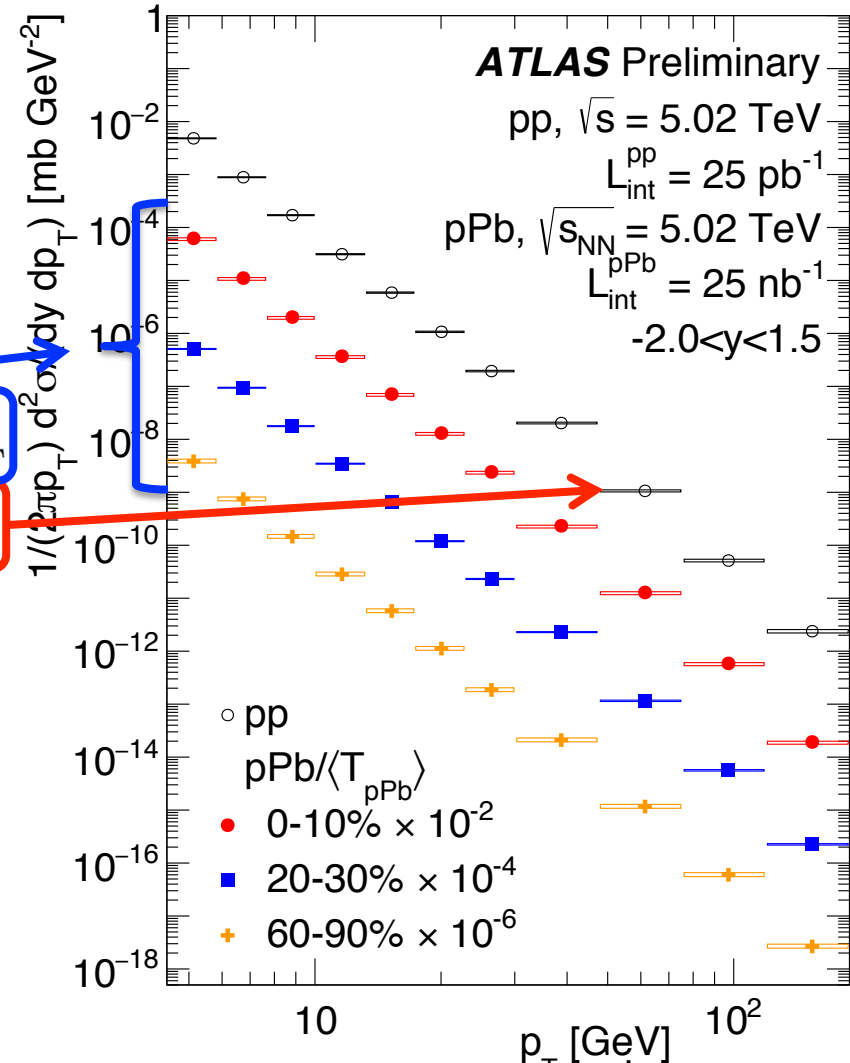
# Спектры заряженных адронов высокие $p_T$

Спектры заряженных адронов как функция  $p_T$  для  $4 < p_T < 189$  ГэВ и 3-х классов центральности

$$R_{pPb}(p_T, y^*) = \frac{1}{\langle T_{Pb} \rangle} \frac{1/N_{evt} d^2 N_{pPb}/dy^* dp_T}{d^2 \sigma_{pp}/dy^* dp_T}$$

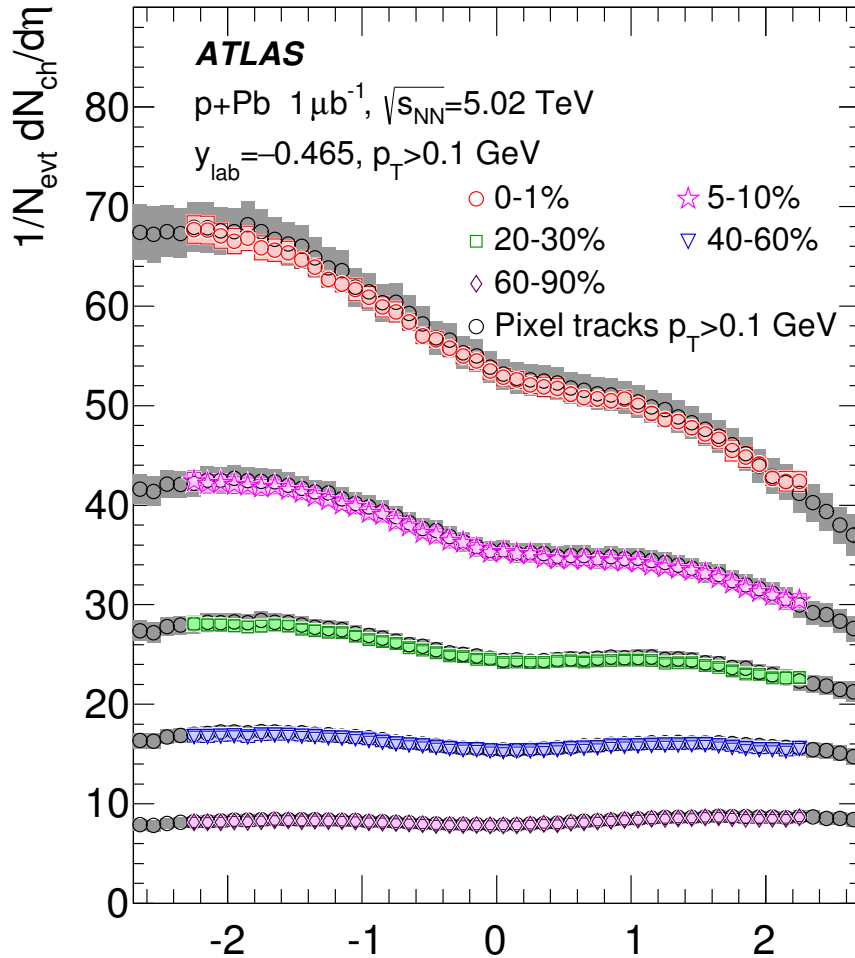
спектр из pPb

сечение из pp

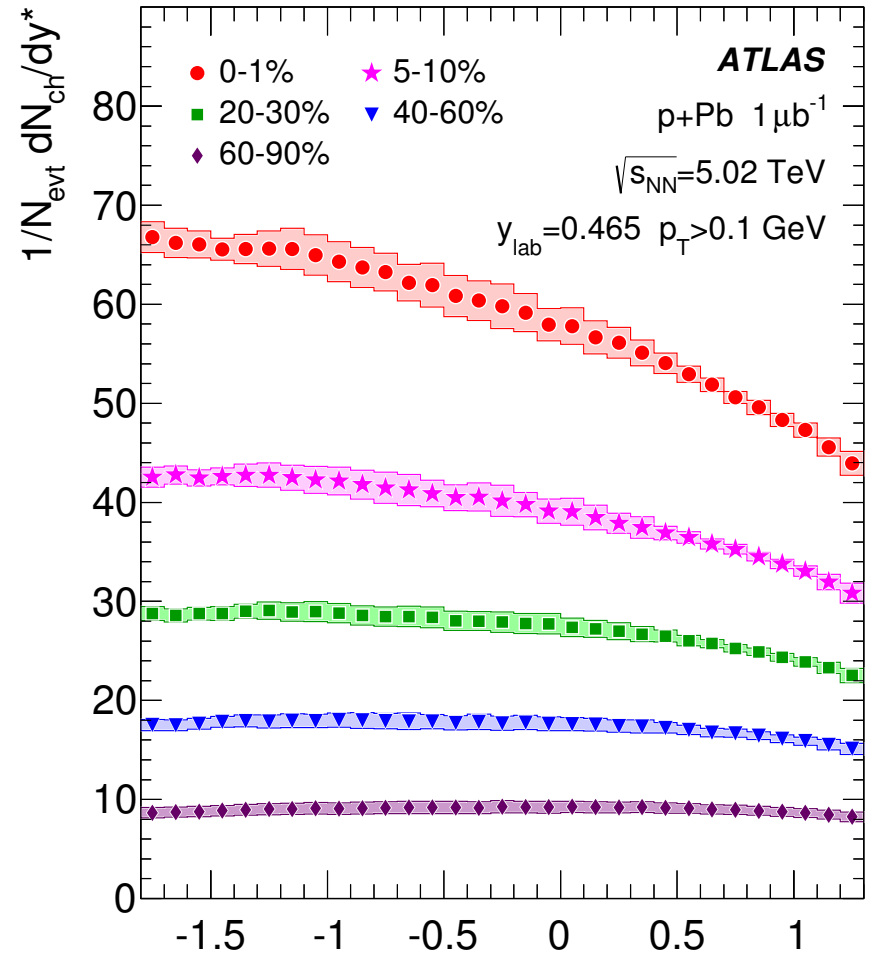


- Впервые получены спектры заряженных адронов как функция поперечного импульса для 5-и классов центральности, для диапазонов:  $|\eta| < 2$  и  $30 < p_T < 189$  ГэВ

# Множественность заряженных адронов



Число заряженных адронов в зависимости от псевдобыстроты  $\eta$

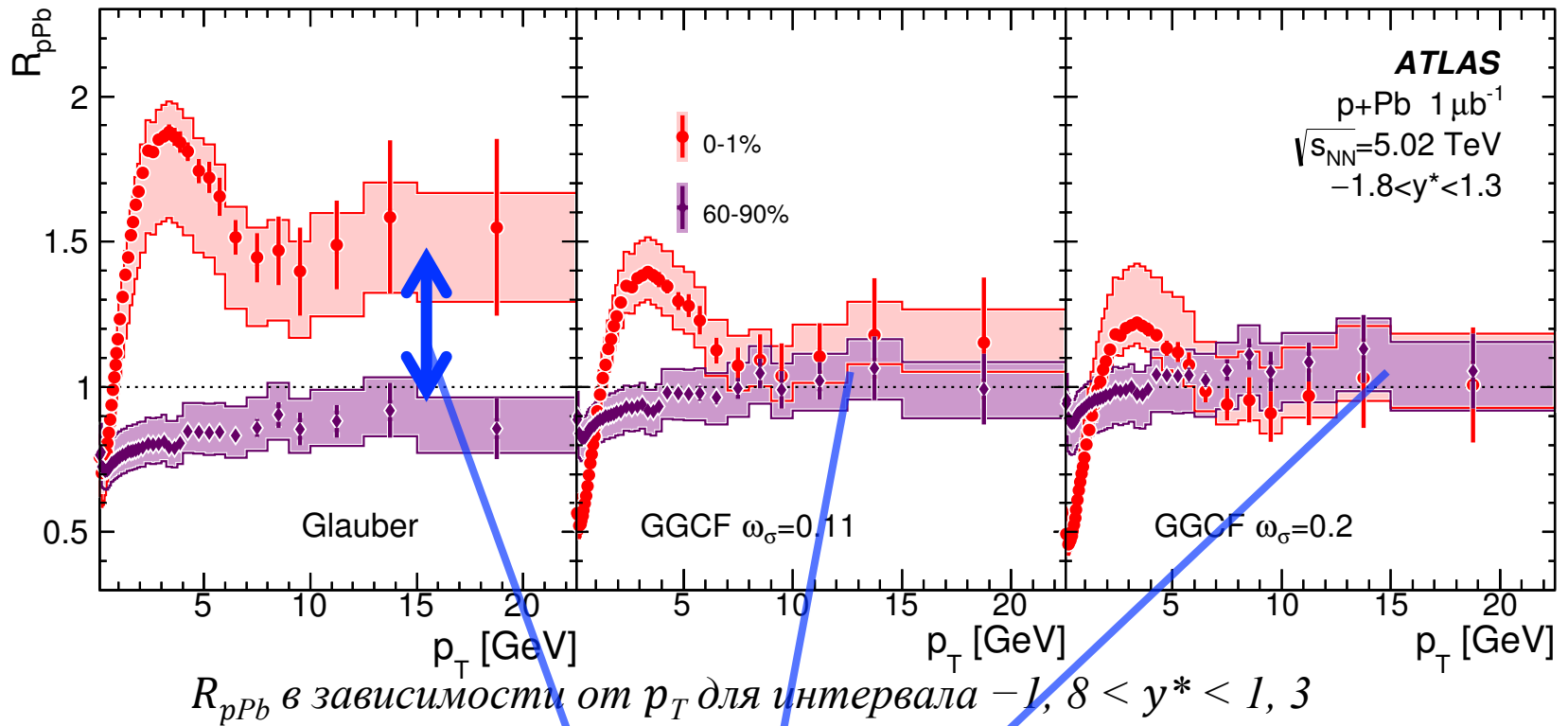


Число заряженных адронов в зависимости от быстроты  $y^*$

- Результаты множественности совпадают с опубликованными ранее
- Для быстроты исчезает провал в центральной области псевдобыстроты

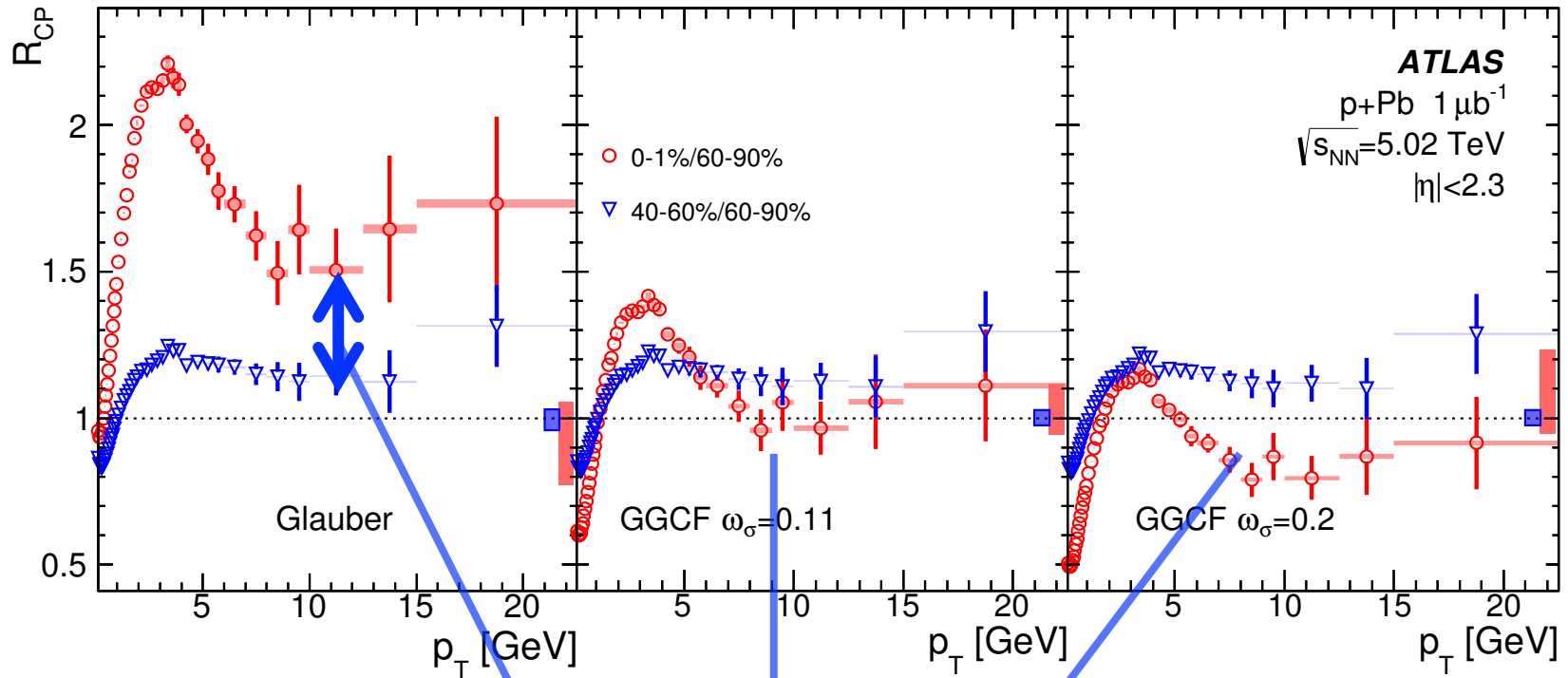


# Факторы ядерной модификации $R_{pPb}$



- Наблюдается значительное изменение распределений при смене модели, используемой для определения центральности

# Факторы ядерной модификации $R_{CP}$

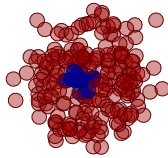


$R_{CP}$  в зависимости от  $p_T$  для интервала  $-1, 8 < y^* < 1, 3$

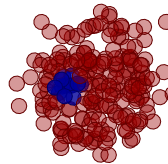
- Наблюдается значительное изменение распределений при смене модели, используемой для определения центральности

# Факторы ядерной модификации в зависимости от поперечного импульса

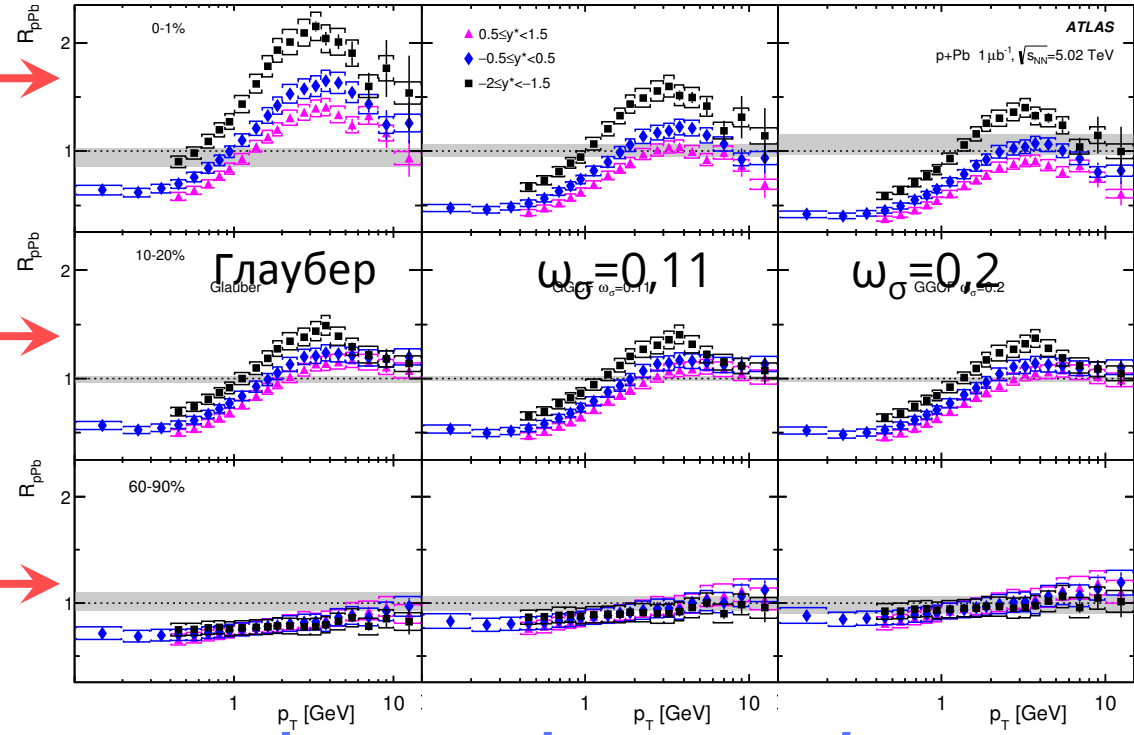
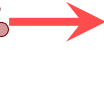
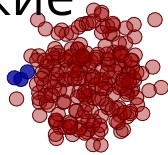
центральные



«средние»



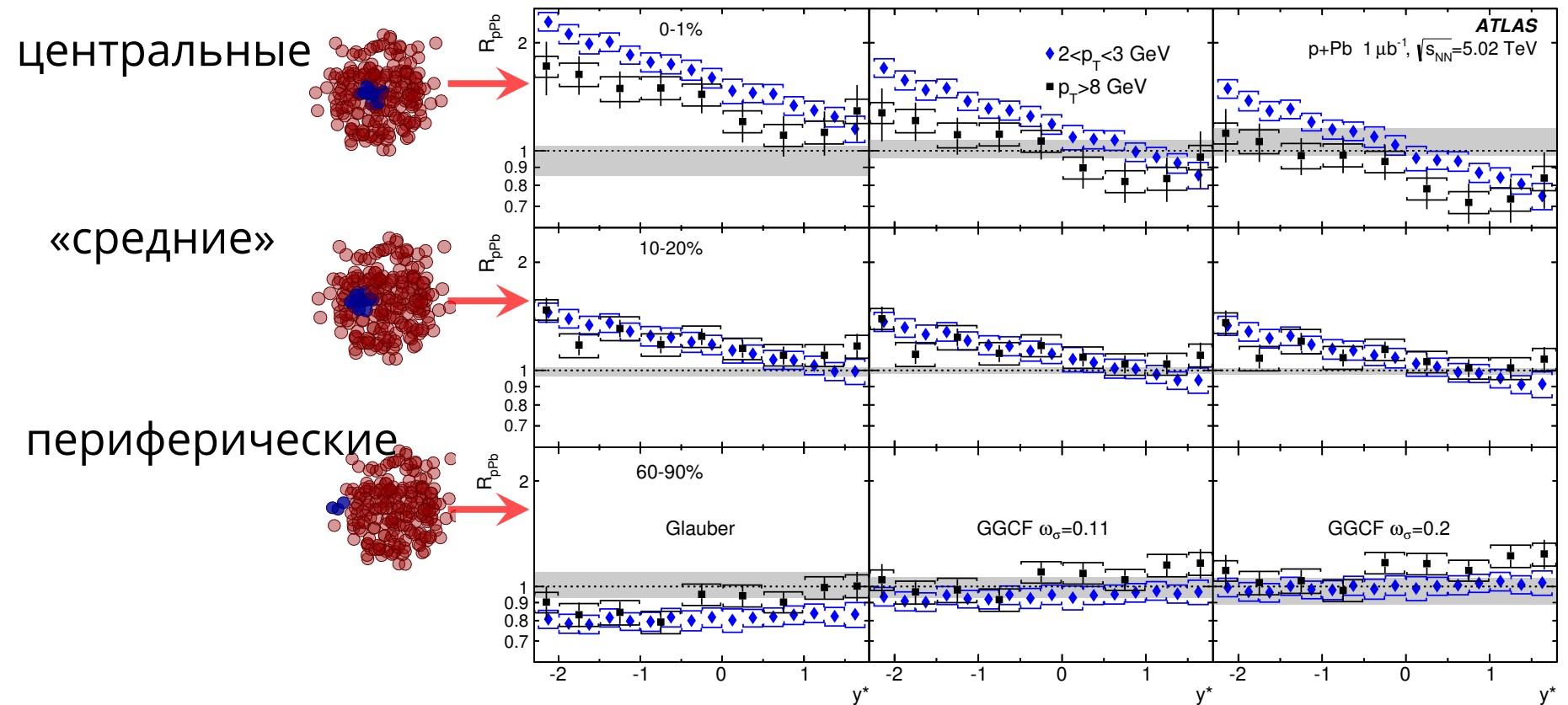
периферические



*$R_{pPb}$  в зависимости от  $p_T$  для 3-х интервалов  $y^*$  3-х классов центральности и 3-х моделей*

- Заметно смещение в область положительных  $y^*$  с ростом центральности
- Наблюдается значительное изменение распределений при смене модели, используемой для определения центральности

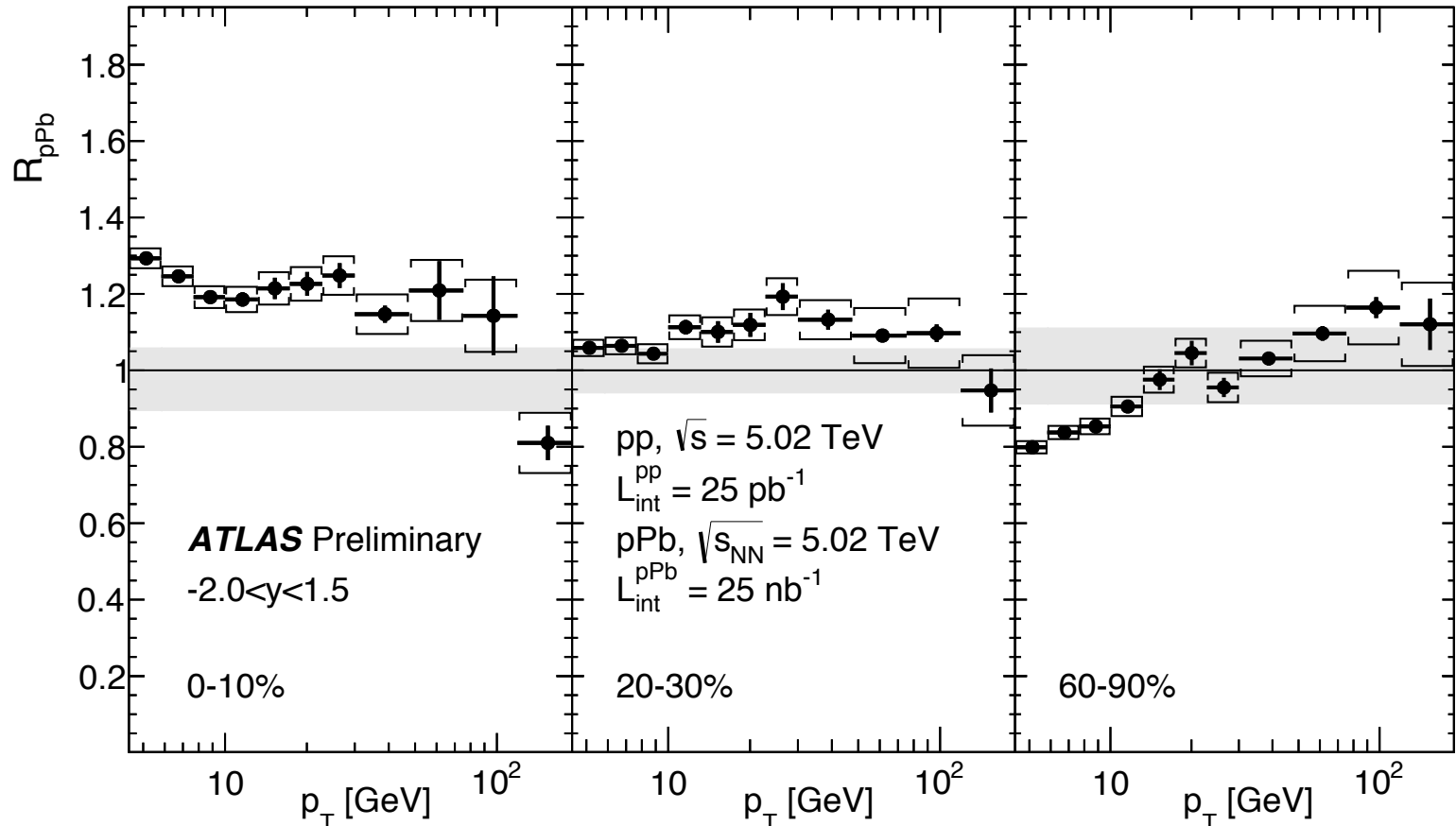
# Факторы ядерной модификации в зависимости от быстроты ( $y^*$ )



$R_{pPb}$  в зависимости от  $y^*$  для 2-х интервалов  $p_T$  3-х классов центральности и 3-х моделей

- Впервые рассчитаны ядерные модификационные факторы как функция поперечного импульса, псевдобыстроты и быстроты, для диапазонов:  $|\eta| < 2,3$  и  $0,1 < p_T < 22 \text{ ГэВ}$ ;

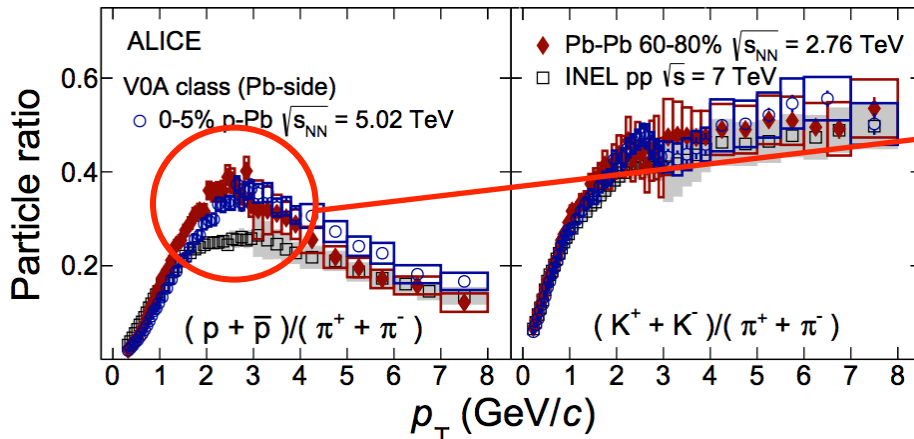
# Факторы ядерной модификации при высоких $p_T$



$R_{pPb}$  в зависимости от  $p_T$  для  $-2 < y^* < 1,5$  и 3-х классов центральности

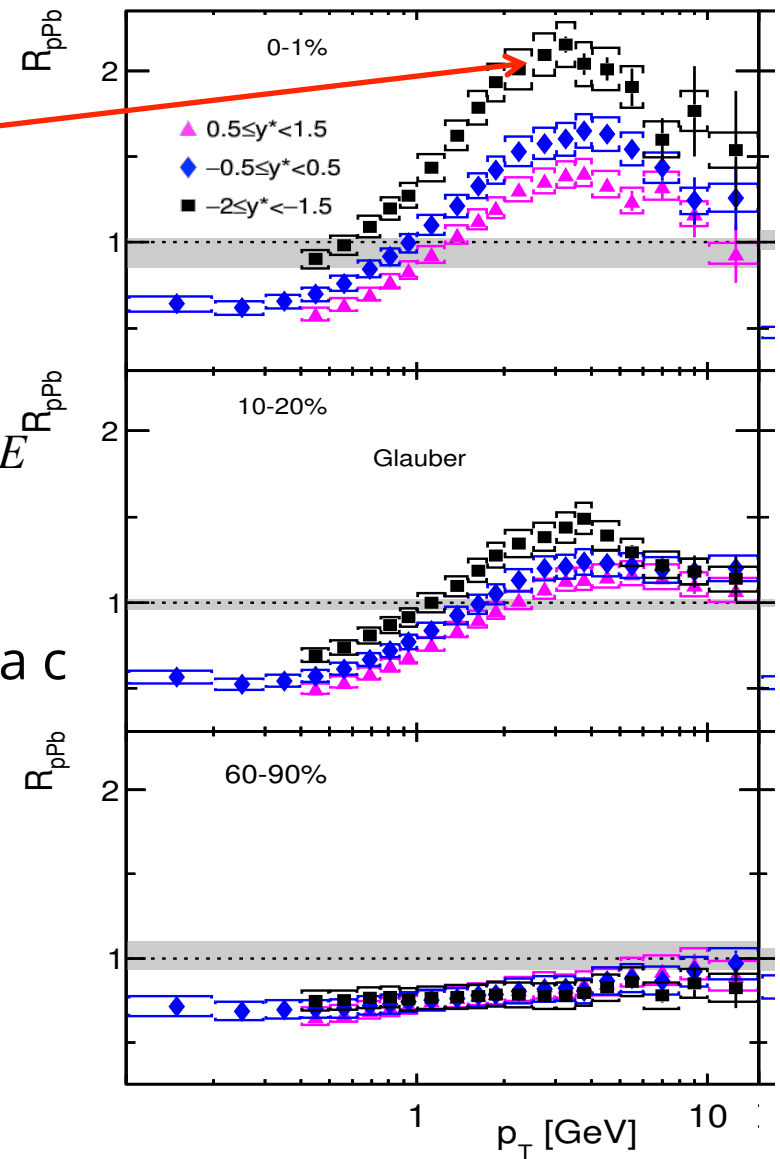
- При низких  $p_T$  значения  $R_{pPb}$  сильно зависят от центральности
- При более высоких  $p_T$  не наблюдается рост
- Впервые получены  $R_{pPb}$  в зависимости от центральности для  $30 < p_T < 189$  ГэВ

# Практическая значимость интерпретации $R_{pPb}$



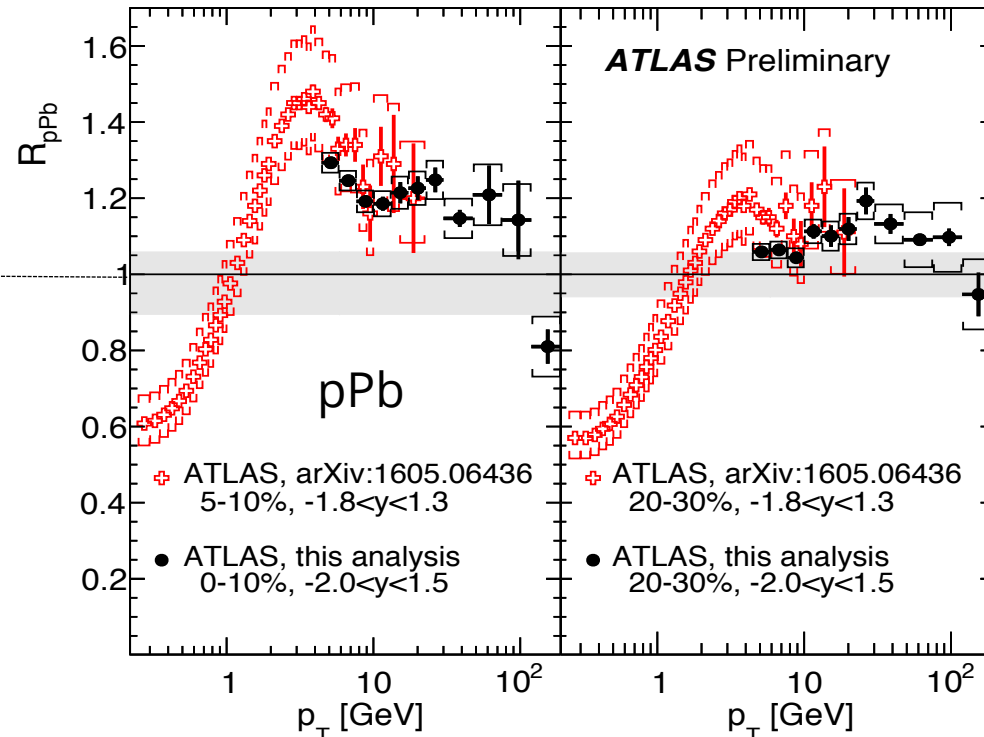
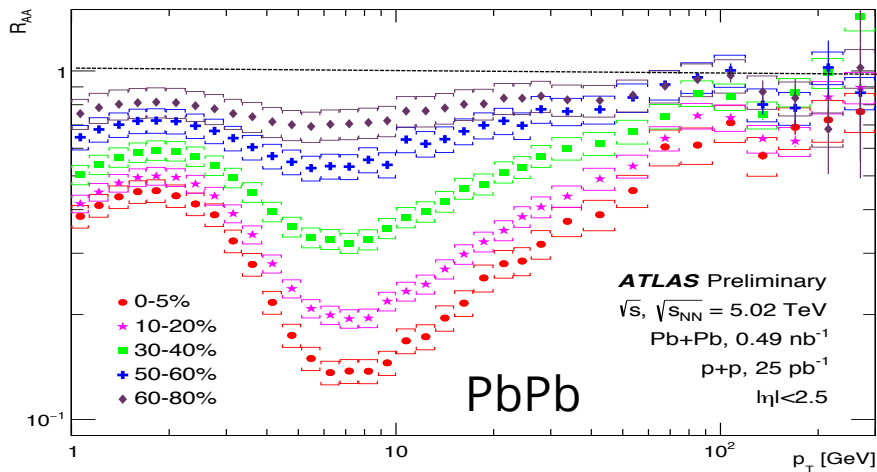
Отношение идентифицированных спектров ALICE  $R_{pPb}$

- Динамика  $R_{pPb}$  в области пика связана с изменением доли рождённых во взаимодействии протонов
- Результаты дополняя картину позволяют улучшить теоретические модели



# Практическая значимость интерпретации $R_{pPb}$

Факторы ядерной модификации для Pb+Pb взаимодействий  $< 1$



$R_{PbPb}$  в зависимости от  $p_T$  для  $|\eta| < 2,5$  и 5- и классов центральности

Комбинированные  $R_{pPb}$  в зависимости от  $p_T$  для  $-2 < y^* < 1,5$  и 2-х классов центральности

- В pPb взаимодействиях наблюдаются коллективные эффекты
- Подавления адронов такого как в PbPb при высоких поперечных импульсах в pPb взаимодействиях не наблюдается

# Новизна

1. Впервые в одном эксперименте получены спектры заряженных адронов как функция поперечного импульса, псевдо быстроты и быстроты в  $p+Pb$  взаимодействиях при  $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$  ТэВ, для диапазонов:
  - $|\eta| < 2,3$  и  $0,1 < p_T < 22$  ГэВ;
  - $|\eta| < 2$  и  $30 < p_T < 189$  ГэВ.
2. Впервые в одном эксперименте получены факторы ядерной модификации как функция поперечного импульса, псевдобыстроты и быстроты в  $p+Pb$  взаимодействиях при  $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$  ТэВ, для диапазонов:
  - $|\eta| < 2,3$  и  $0,1 < p_T < 22$  ГэВ;
  - $|\eta| < 2$  и  $30 < p_T < 189$  ГэВ.
3. Впервые получены результаты измерения факторов ядерной модификации с использованием геометрической модели Глаубера-Грибова с  $\omega_\sigma = 0.11$  и  $\omega_\sigma = 0.2$ .



# Результаты, выносимые на защиту

1. Спектры заряженных адронов как функция поперечного импульса, псевдо быстроты и быстроты в  $p+Pb$  взаимодействиях при  $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$  ТэВ, для диапазонов:
  - $|\eta| < 2,3$  и  $0,1 < p_T < 22$  ГэВ;
  - $|\eta| < 2$  и  $30 < p_T < 189$  ГэВ.
2. Факторы ядерной модификации как функция поперечного импульса, псевдобыстроты и быстроты в  $p+Pb$  взаимодействиях при  $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$  ТэВ, для диапазонов:
  - $|\eta| < 2,3$  и  $0,1 < p_T < 22$  ГэВ;
  - $|\eta| < 2$  и  $30 < p_T < 189$  ГэВ.
3. Результаты расчётов факторов ядерной модификации представленные с использованием двух геометрических моделей Глаубера и Глаубера-Грибова с  $\omega_\sigma = 0.11$  и  $\omega_\sigma = 0.2$ .

# Публикации

1. Shulga Evgeny. Centrality dependence of charged particle production in proton-lead collisions measured by ATLAS // Nuclear Physics A. - 2014. - Vol. 926. - Pp. 64 - 72.
2. Shulga Evgeny. Charged particle production in Pb+Pb and  $p$ +Pb collisions measured by the ATLAS detector // Journal of Physics: Conference Series. - 2016. - Vol. 668, no. 1. - P. 012078.
3. Shulga Evgeny. Centrality dependence of low- $p_T$  and high- $p_T$  particle production in proton-lead collisions with ATLAS // Nuclear Physics A. - 2016. - Vol. 956. - Pp. 565 - 568.
4. Aad Georges,..., Shulga Evgeny, et al. Transverse momentum, rapidity, and centrality dependence of inclusive charged-particle production in  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV  $p$ +Pb collisions measured by the ATLAS experiment // Phys. Lett. B - 2016. - Vol. 763. - Pp. 313-336.
5. Shulga Evgeny. Charged particle production in  $p$ +Pb collisions measured by the ATLAS detector // Journal of Physics: Conference Series. - 2017. - Vol. 798 - Pp. ??

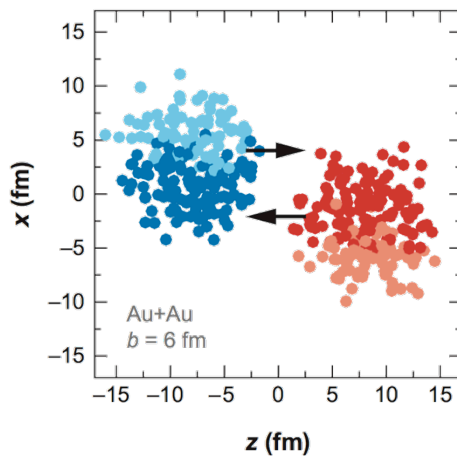
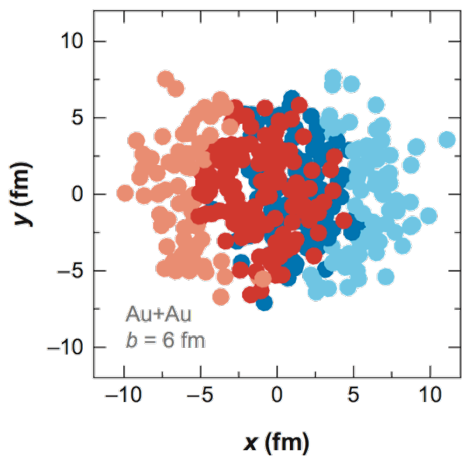
Результаты работы доступны на <https://hepdata.net/record/ins1463284>

**Спасибо за внимание**

# Доп. слайды

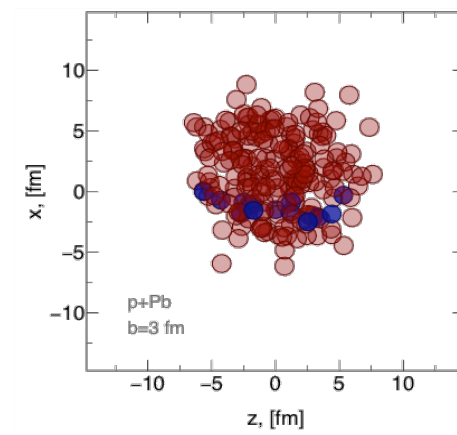
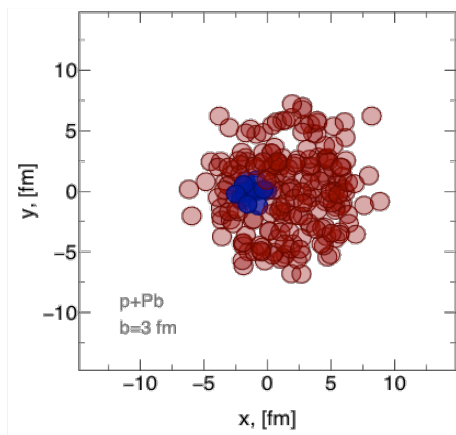
# Введение

Изучение столкновений тяжелых ядер — один из существенных пунктов научной программы Большого адронного коллайдера.



Ядро-ядерные столкновения:

- ✓ эффекты начального состояния;
- ✓ эффекты конечного состояния, т.е. КГП (например коллективные эффекты).



Протон-ядерные столкновения:

- ✓ эффекты начального состояния;

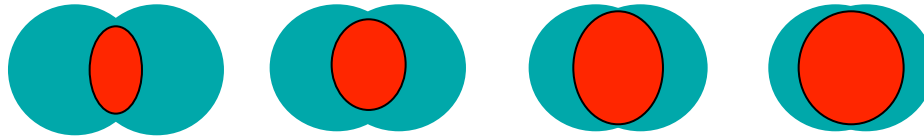
Так же чувствительны к партонной структуре вещества при малых партонных импульсах (малых  $x$ ).

Необходимо понять что из эффектов наблюдаемых в AA относится к КГП, а что нет

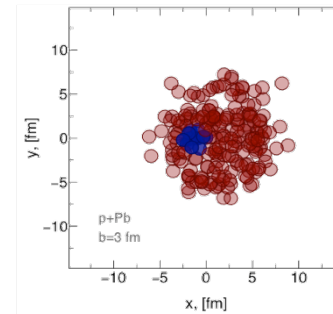
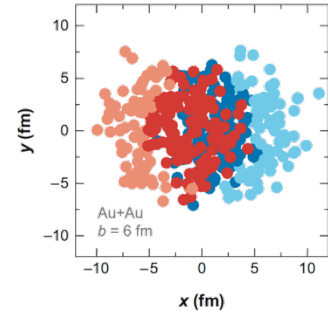
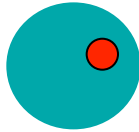
# Введение

Протон-ядерные столкновения играют решающее значение для изучения эффектов холодной ядерной материи (без КГП) и служат инструментом для изучения КХД в области низких  $x$  и при высокой плотности глюонов, достигнутой при энергиях LHC.

Эффекты КГП:



Проверка:



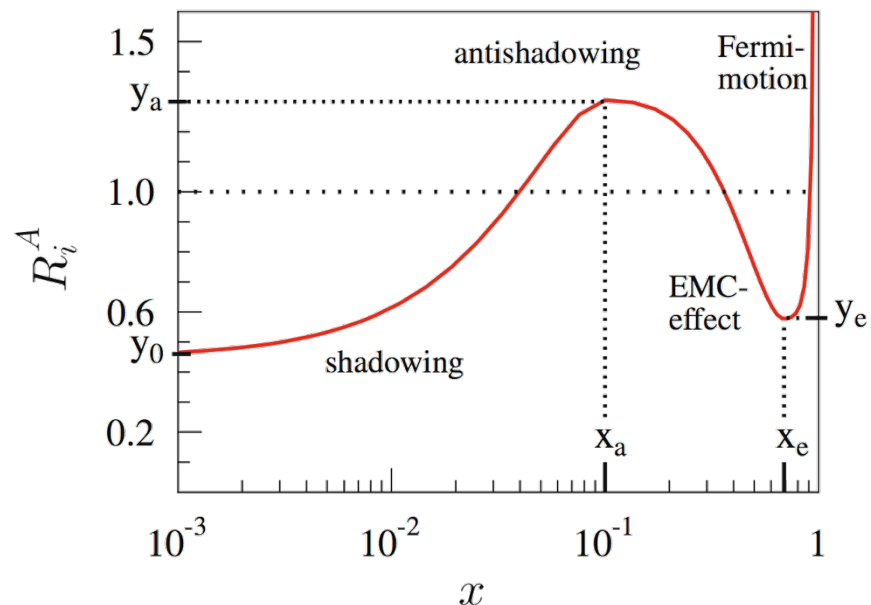
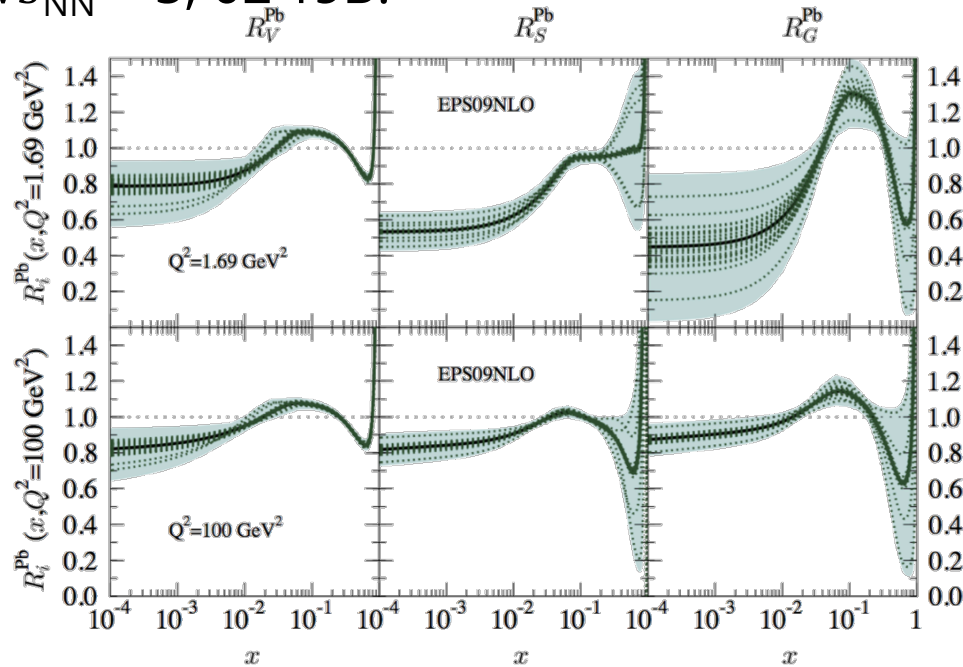
Ядро-ядерные столкновения:  
✓ эффекты холодной ядерной материи;

✓ эффекты конечного состояния, т.е. КГП (например коллективные эффекты).

~~Протон-ядерные столкновения:~~  
✓ эффекты холодной ядерной материи;

# Цель и Задачи

**Цель работы** состоит в экспериментальном изучение эффектов ядерной материи при помощи измерения спектров заряженных адронов и ядерных модификационных факторов как функции поперечного импульса, псевдо быстроты и быстроты для различных интервалов центральности в  $p+Pb$  взаимодействиях при  $\sqrt{s_{NN}} = 5, 02$  ТэВ.

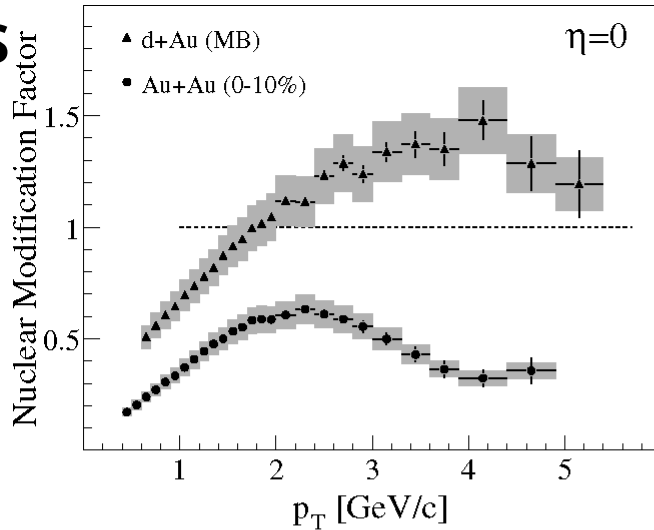


Eskola K.J. et al. JHEP. 2009. 0904. 065.

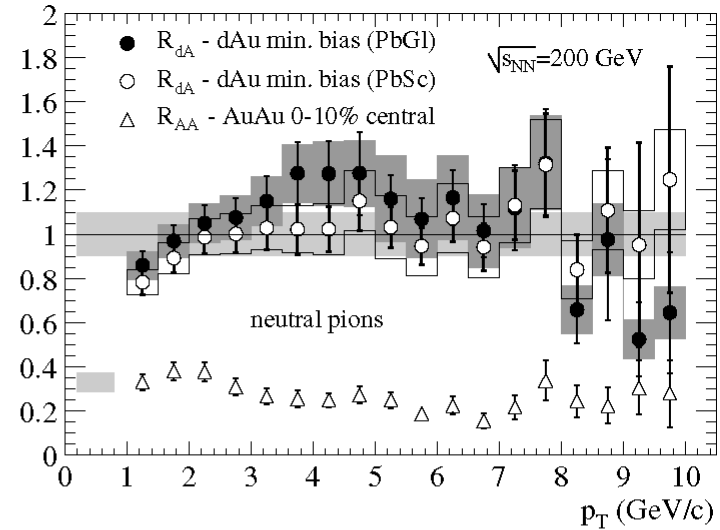
# Результаты при энергиях RHIC

STAR [Nuclear Physics A Volume 757, Issues 1-2, 8 August 2005, Pages 102-183](#)

**BRAHMS**



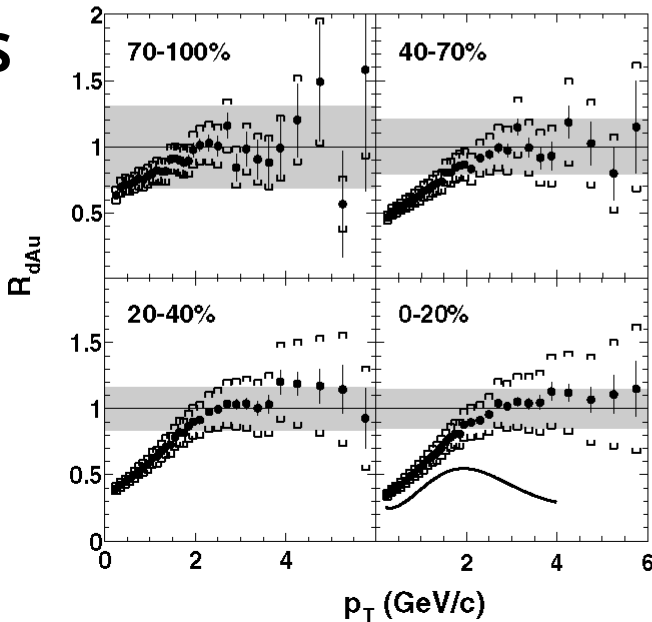
**R**



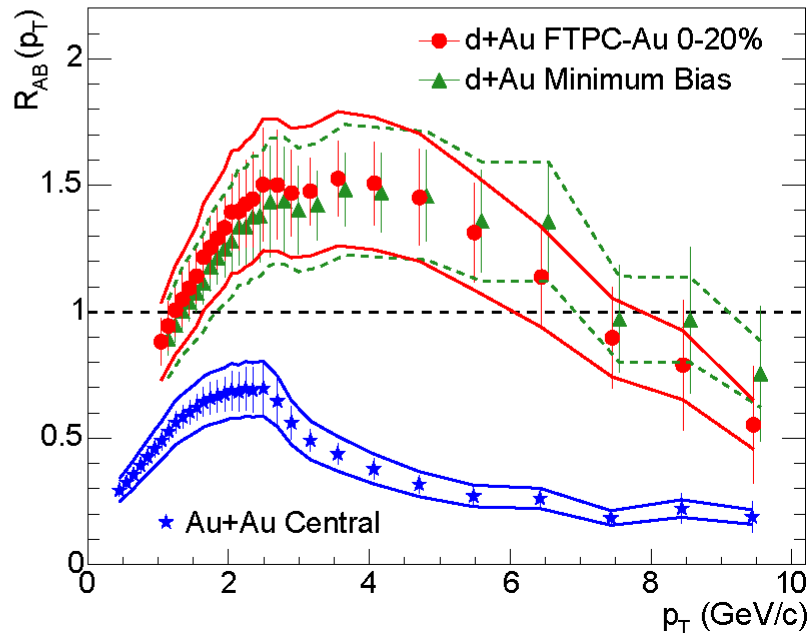
**PHENIX**

**PHOBOS**

d+Au



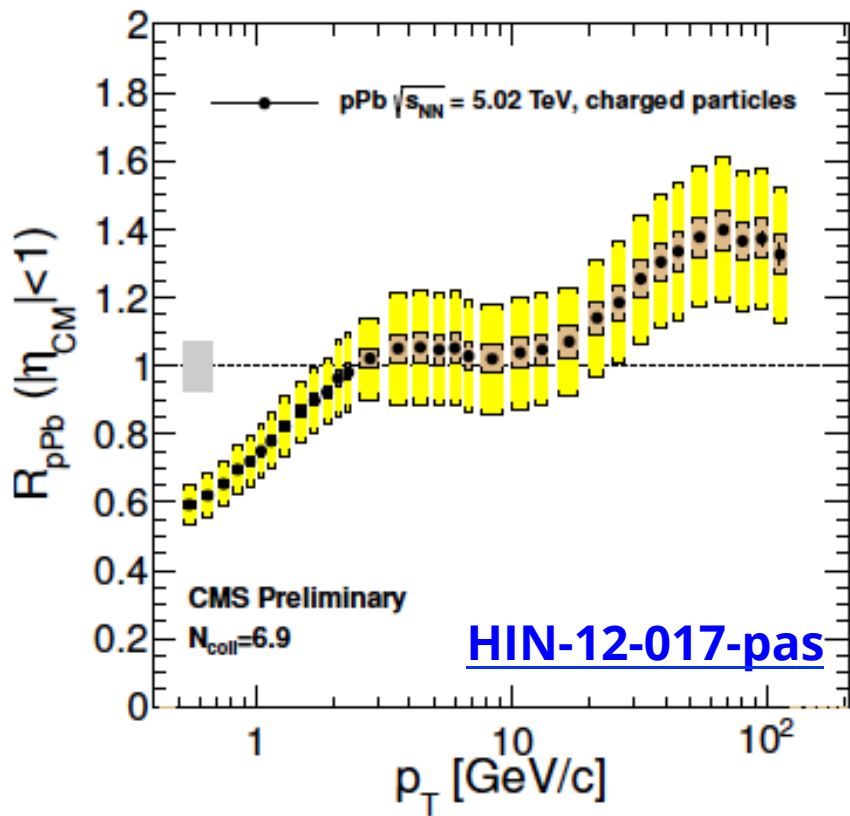
$R_{AB}(p_T)$



**STAR**

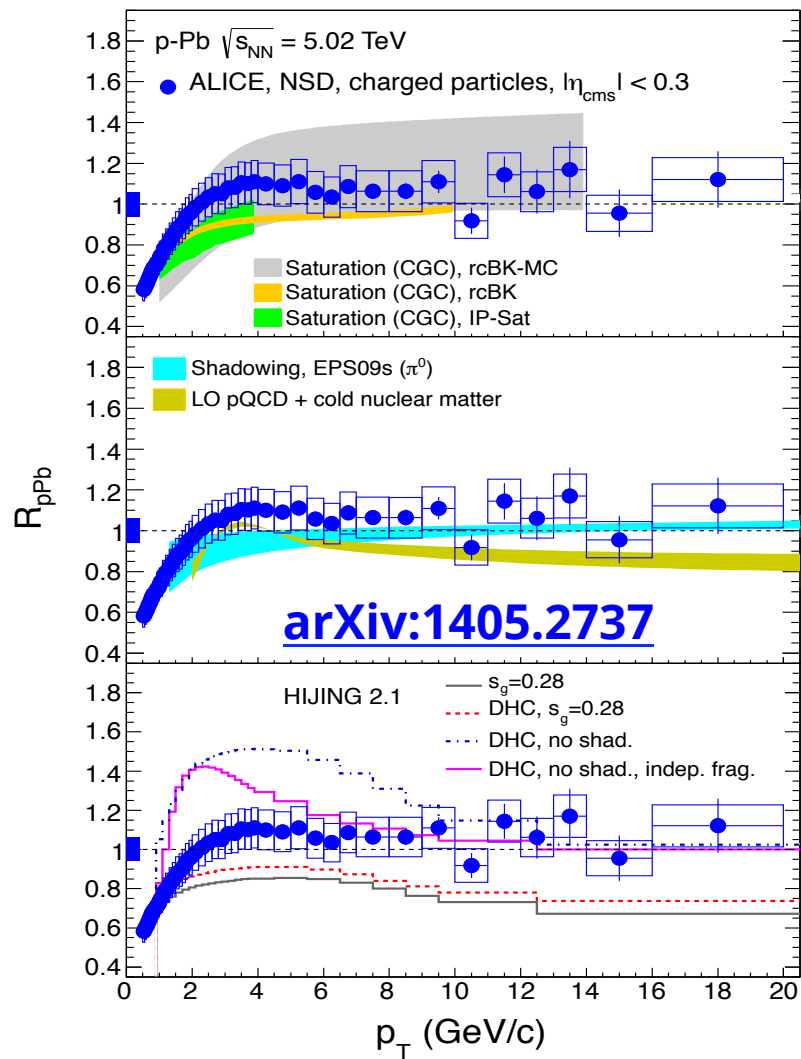


# Результаты при энергиях ЛHC



- Точное описание динамической природы пика отсутствует

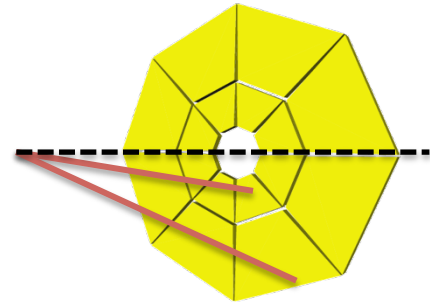
- Результаты исследований инклюзивных спектров адронов в зависимости от центральности показаны другими экспериментами только для узкого интервала быстрот



# Отбор событий

2012 и 2013 p+Pb набор данных используется для  
Интегральная светимость:  $1\mu\text{b}^{-1}$  и  $30\text{nb}^{-1}$

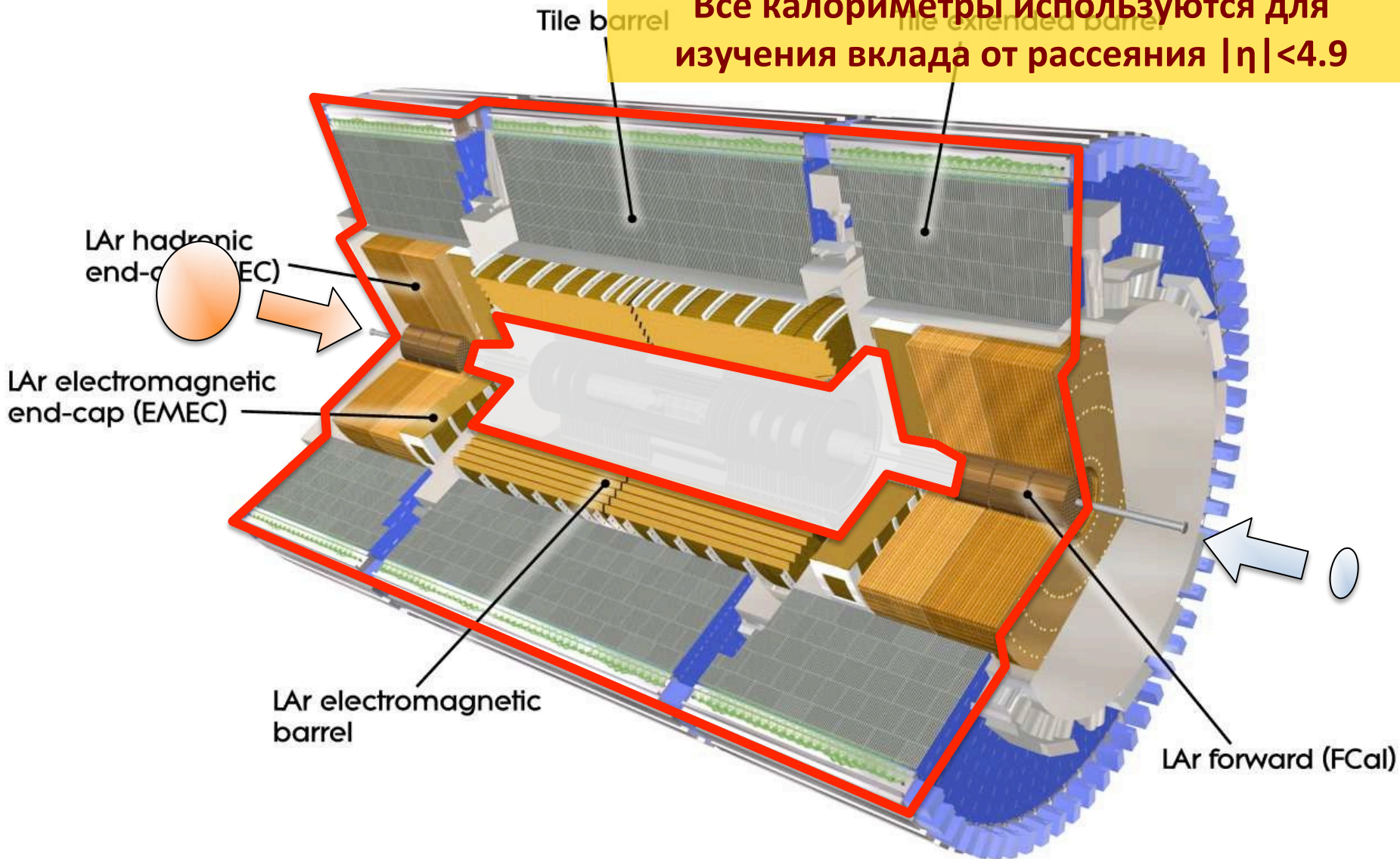
1. Два сцинтилляционных сигнала в MBTS:  $2.1 < |\eta| < 3.9$
2. Временное совпадение  $|\Delta t| < 10\text{ns}$
3. Восстановленная вершина содержащая как минимум два трека с  $p_T > 100$  МэВ.
4. Фоновые события от столкновений с осколками предыдущих (pileup)  $10^{-3}$
5. События с двумя хорошими вершинами были исключены, оставшийся pile-up  $10^{-4}$
6. Пустые области псевдобыстрот в направлении движения с ограничением  $\Delta\eta^{\text{Pb}} \leq 2.0$



Число событий использованных в анализе:  $2 \times 10^6$  и  $5 \times 10^{10}$  событий.  
Что соответствует  $98 \pm 2\%$  событий неупругих процессов.

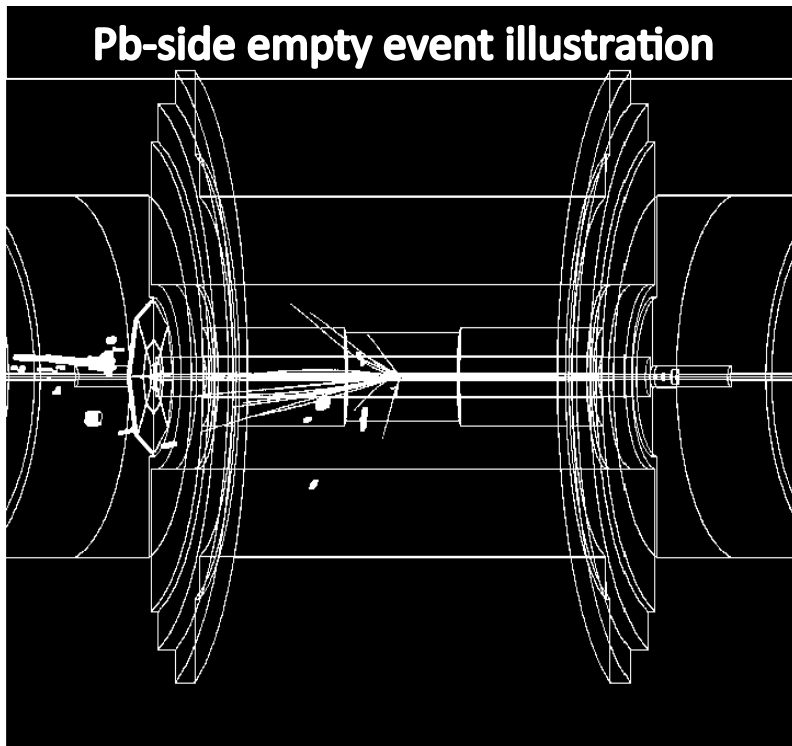
# p+Pb @ LHC и ATLAS

Все калориметры используются для изучения вклада от рассеяния  $|\eta| < 4.9$



# Исключение событий с большими пустыми $\eta$ -областями

- В pPb взаимодействиях присутствуют дополнительные компоненты от когерентных и фото-ядерных событий соответствующих возбуждению протона

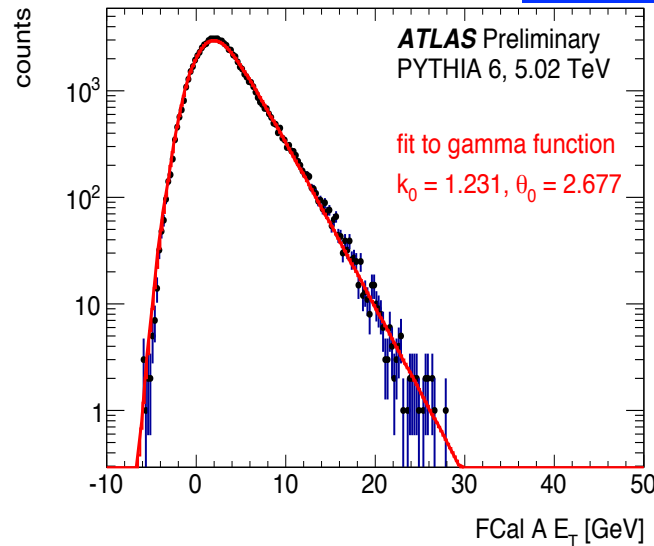
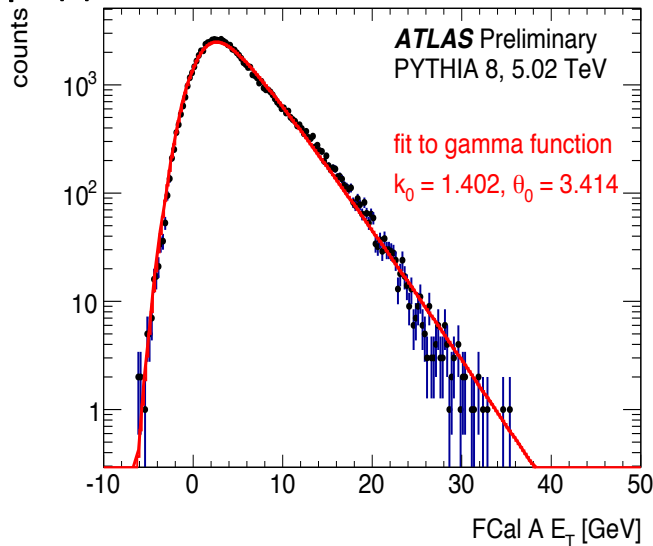


- Полное покрытие  $|\eta| < 4.9$  разбито на интервалы  $\Delta\eta = 0.2$
- Заполненный интервал, содержит восстановленные треки или калориметрические кластеры с  $p_T > 200$  МэВ
- $\Delta\eta^{\text{Pb}}_{\text{gap}} = \sum \Delta\eta^{\text{Pb}}_{\text{Empty interval}}$
- Электромагнитное или возбуждение через рассеяние протона приводит к  $\Delta\eta^{\text{Pb}}_{\text{gap}} > 2$  ( $f_{\text{gap}} = 6\%$ )

# Получение FCal $\Sigma E_T^{Pb}$ отклика

$E_T$  распределения получены при помощи PYTHIA принимающих во внимание отклик FCal в p+Pb конфигурации и аппроксимированы Gamma( $k, \theta$ ) распределениями

[ATLAS-CONF-2013-096](#)



Конволюция Gamma( $k, \theta$ ) для  $N_{part}$  используется как Gamma( $k(N_{part}), \theta(N_{part})$ )

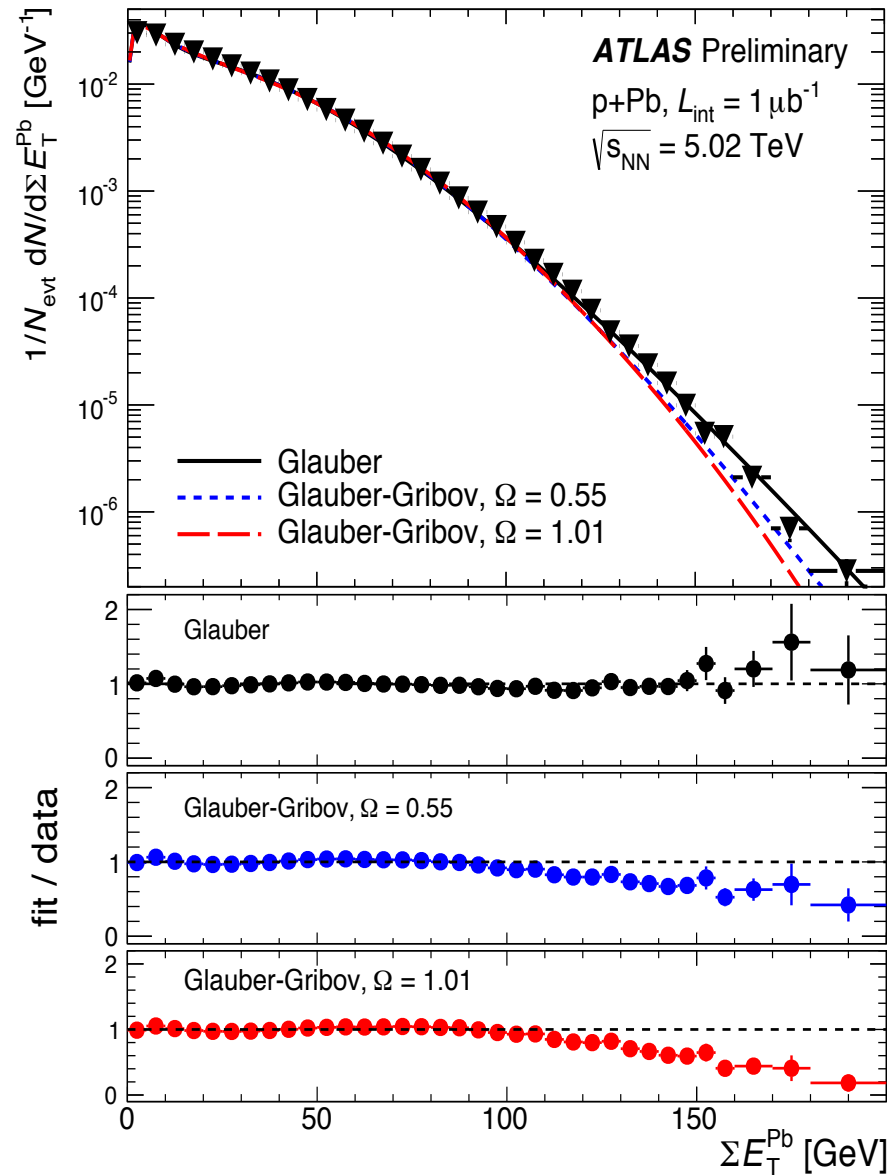
Наша параметризация:  $k(N_{part}) = k_0 + k_1 * (N_{part} - 2)$ ;  $\theta(N_{part}) = \theta_0 + \theta_1 * (\log(N_{part} - 1))$ ;

В модели WN :  $k(N_{part}) = k * N_{part}$ ;  $\theta(N_{part}) = \theta$ ;

$E_T$  распределения для  $N_{part}$  были перевзвешаны в соответствии с Глаубер и Глаубер-Грибов моделями и затем соотнесены с данными

# FCal $E_T$ фиты распределений

[ATLAS-CONF-2013-096](#)



- $dN_{evt}/dE_T$  получено суммированием гамма распределений по различным значениям  $N_{part}$  с весом  $P(N_{part})$

Фитирование значений  $E_T^{Pb}$  распределений по казывает хорошее соответствие, на уровне 3-х порядков величины в  $E_T$  распределении.

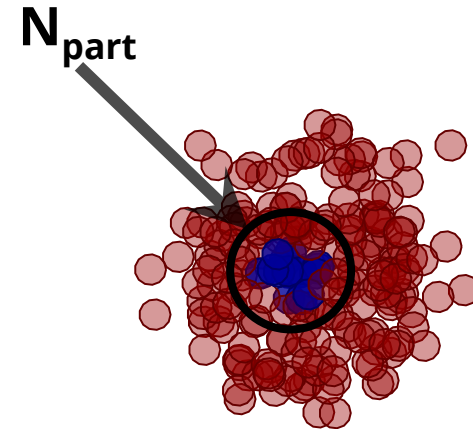
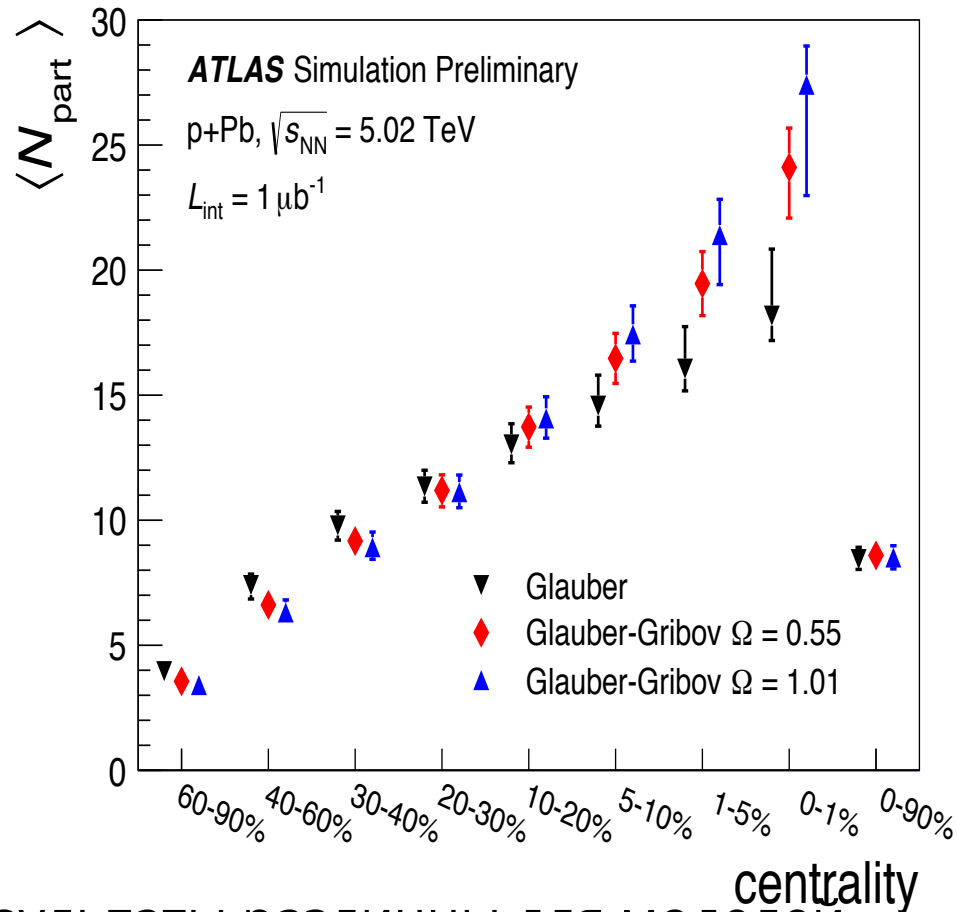
# Центральность

Если партон входит в состав нуклона ядра, то его структурная функция будет зависеть не только от переменных  $x$  и  $Q^2$ , но и от переменной  $r$ , характеризующей положение партона относительно центра ядра.

Действительно, свойства нуклонов в ядре изменяются по сравнению со свойствами свободных нуклонов, причем эти изменения тем больше, чем ближе нуклон расположен к центру ядра.

# $N_{part}$ для нескольких Глаубер-моделей

[ATLAS-CONF-2013-096](#)



- Результаты различны для моделей
- Глаубер имеет максимальные флуктуации в воспроизводимом  $E_T / N$
- Глаубер-Грибов  $\Omega=1.01$  имеет меньшие флуктуации  $E_T$  и по этому даёт большие значения  $N_{part}$



# Сечения $pp$ для $4 < p_T < 189$ ГэВ

Для  $4 < p_T < 189$  ГэВ используются данные 2015 года от  $pp$  взаимодействий при  $\sqrt{s} = 5.02$  ТэВ с полной светимостью  $25 \text{ пб}^{-1}$

Используется триггер на струи с параметром радиуса  $R = 0.4$  и переменными кинематическими пределами

Треки в событиях записанных триггерами на струи должны соответствовать струе в пределах  $\Delta R^2 = \Delta \eta^2 + \Delta \phi^2 < 0.16$  и  $p_T \leq 1.3 \times p_T^{\text{jet}}$

Триггер на струи становится эффективным  $p_T^{\text{jet}} = 26 \text{ GeV}$

# Отбор треков

Качественный отбор треков (основан на pp анализах):

- SCT hits:
- for  $100 \text{ MeV} < p_T < 200 \text{ MeV}$  - 2 SCT hits;
- for  $200 \text{ MeV} < p_T < 300 \text{ MeV}$  - 4 SCT hits;
- $p_T > 300 \text{ MeV}$  - 6 SCT hits
- $n\text{PixHits} > 0$ ;
- $n\text{BLHits} > 0$  if expected
- $N\text{TRTHits} > 8$  ограничивает анализ до  $|\eta| < 2.0$ ;

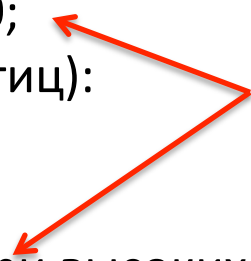
Вершинные ограничения (для отбора вторичных частиц):

- $d_0/e d_0, z_0/e z_0 < 3$
- $d_0, z_0 < 1.5$

Сопоставление треков струям (для триггеров струй при высоких  $p_T$ ):

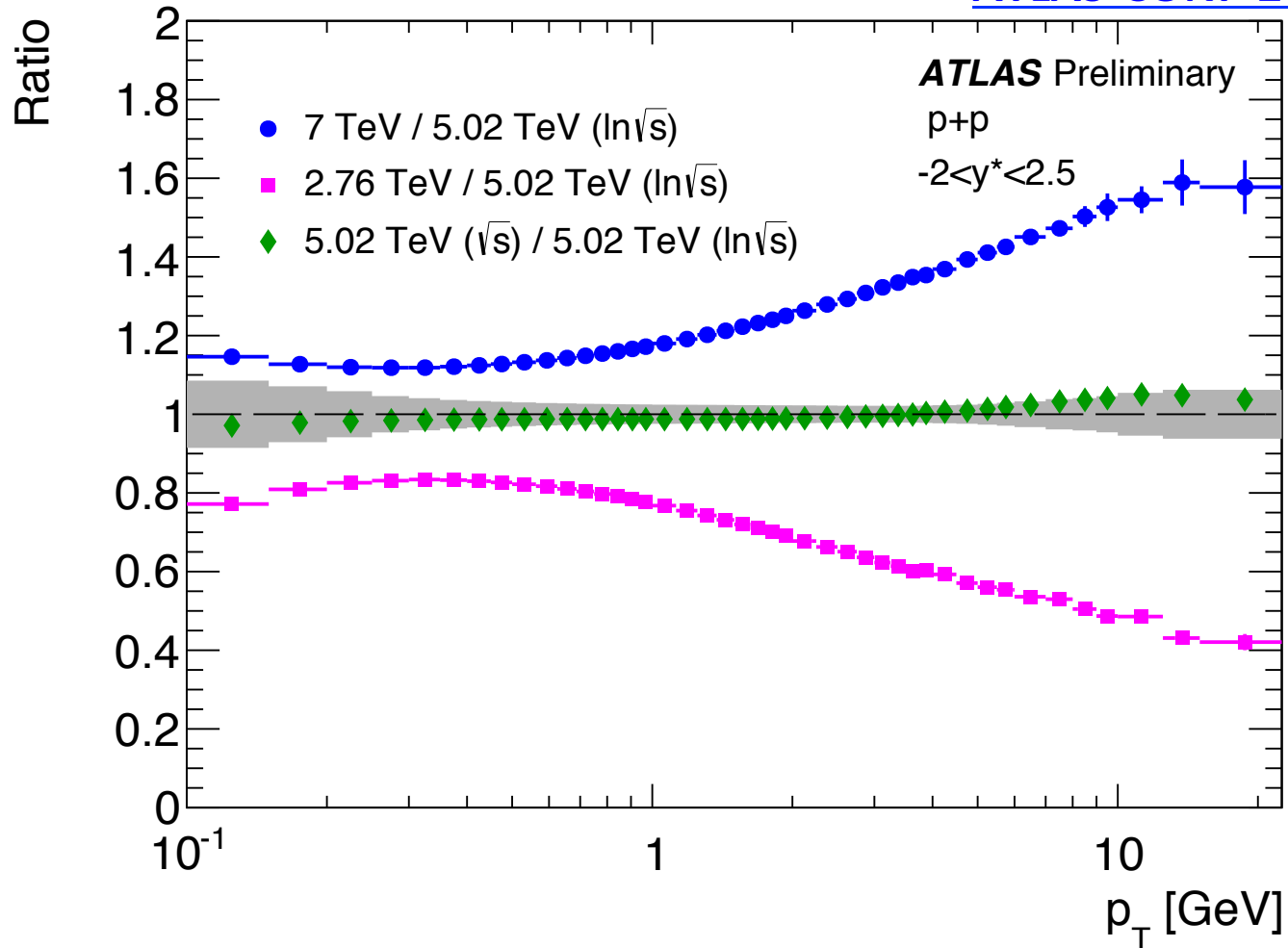
- Трек соответствует струе при  $\Delta R < 0.4$
- Энергетический баланс треком-струя  $(0.8 * p_{\text{Track}T} - 10) < E_{\text{T}}^{\text{Jet}}$

**Только  
для 2013**



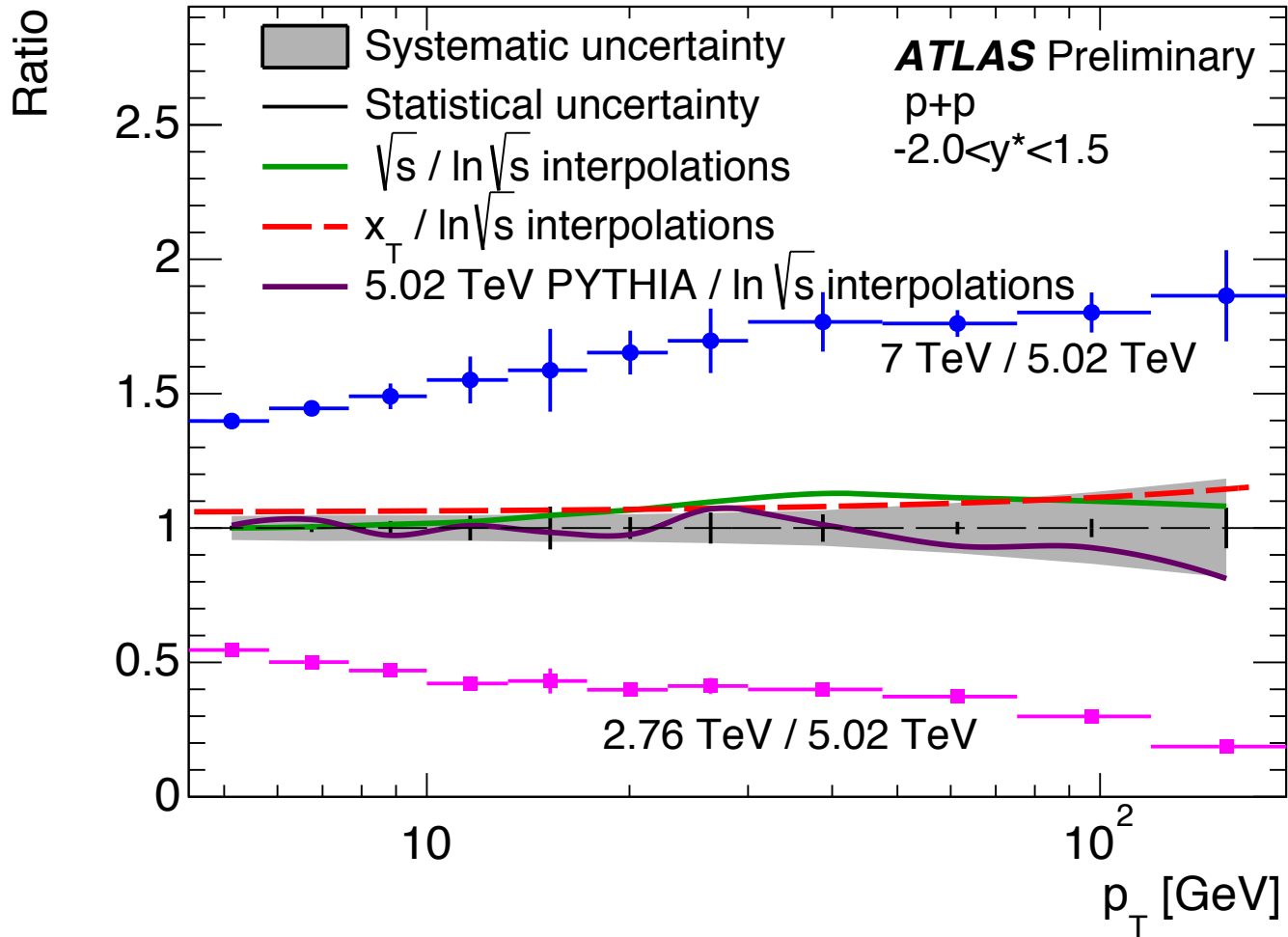
# Систематики 2012

[ATLAS-CONF-2013-107](#)

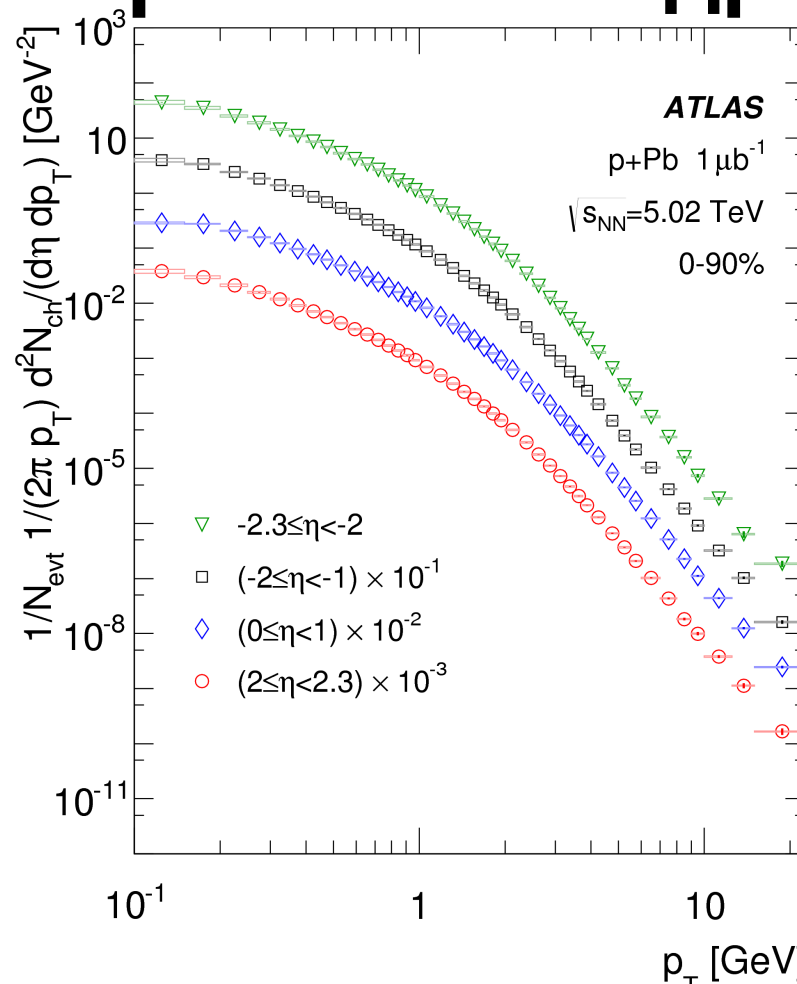


# Систематики 2013

[ATLAS-COM-CONF-2014-031](#)



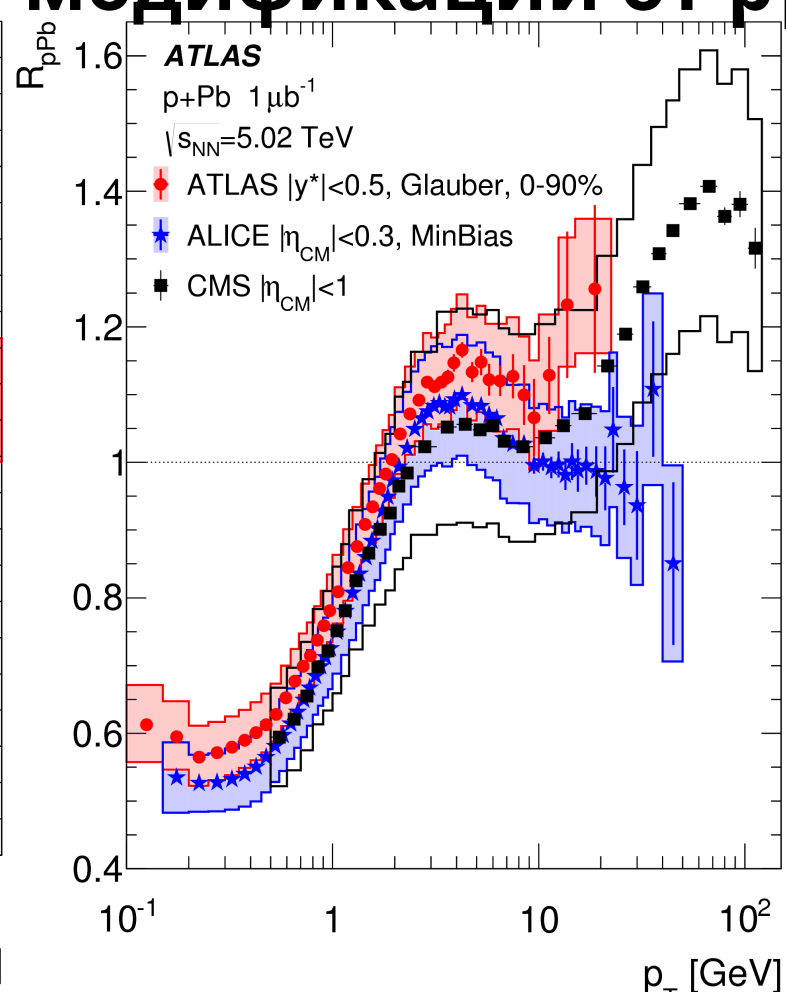
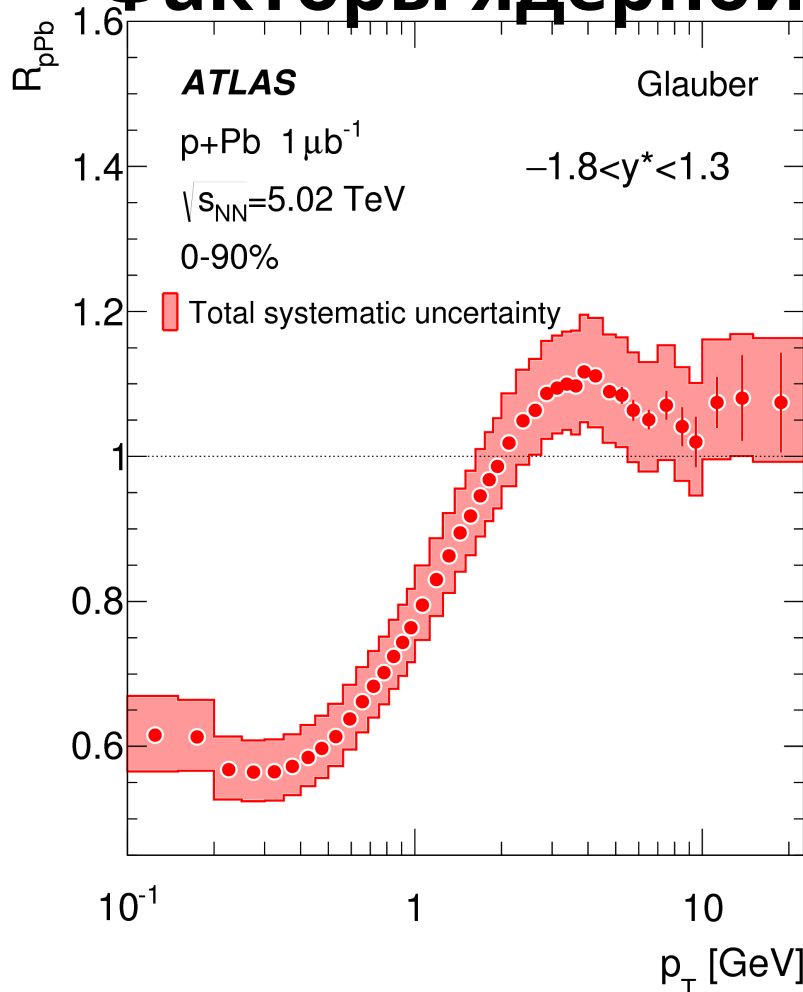
# Спектры заряженных адронов pPb



*Спектры заряженных адронов как функция  $p_T$  для  $0,1 < p_T < 22 \text{ ГэВ}$  и 4-х интервалов быстроты.*

- Впервые получены спектры заряженных адронов как функция поперечного импульса и быстроты для 8-ми классов центральности, для диапазонов:  $|\eta| < 2,3$  и  $0,1 < p_T < 22 \text{ ГэВ}$

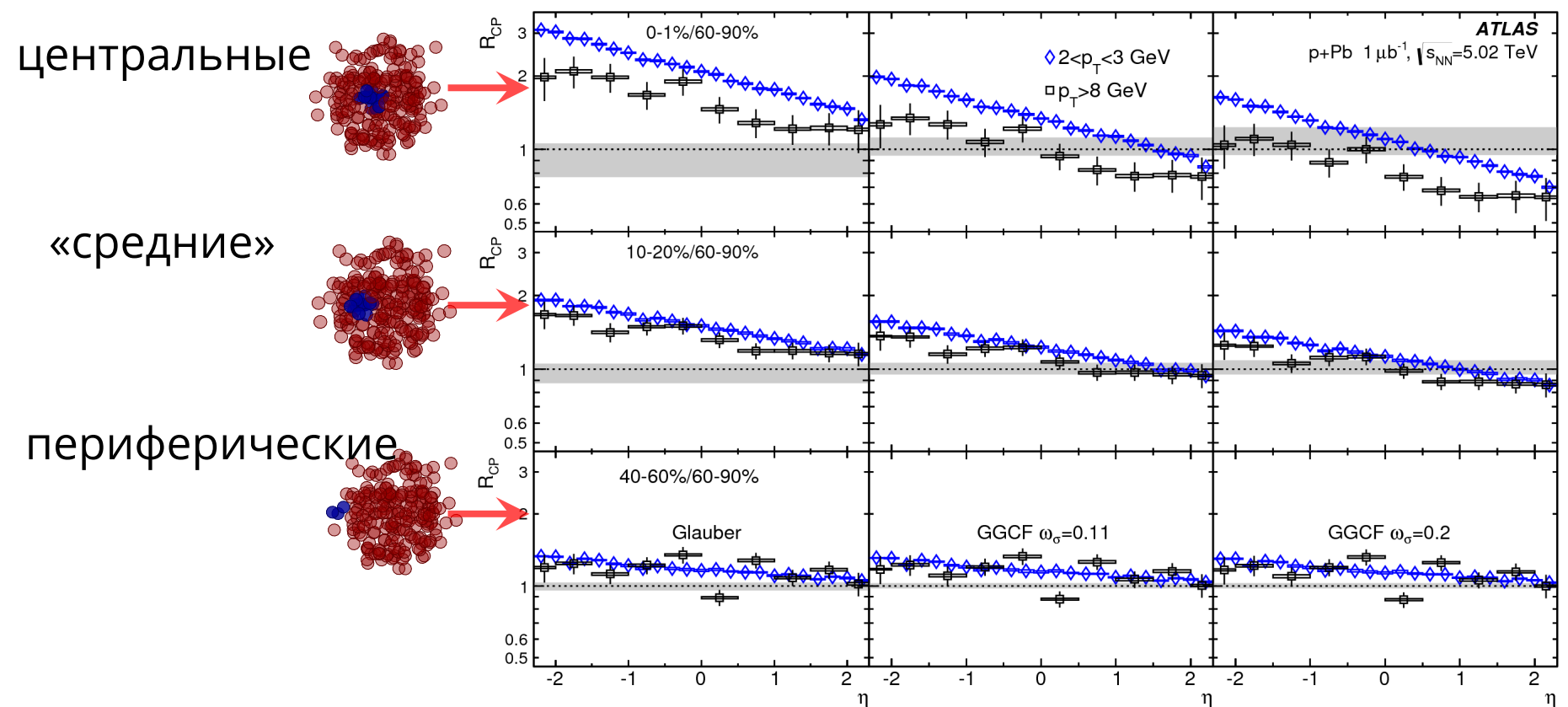
# Факторы ядерной модификации от $p_T$



$R_{pPb}$  в зависимости от  $p_T$  для общего класса центральности

- Впервые рассчитаны ядерные модификационные факторы как функция поперечного импульса, псевдобыстроты и быстроты, для диапазонов:  $|\eta| < 2,3$  и  $0,1 < p_T < 22$  ГэВ;

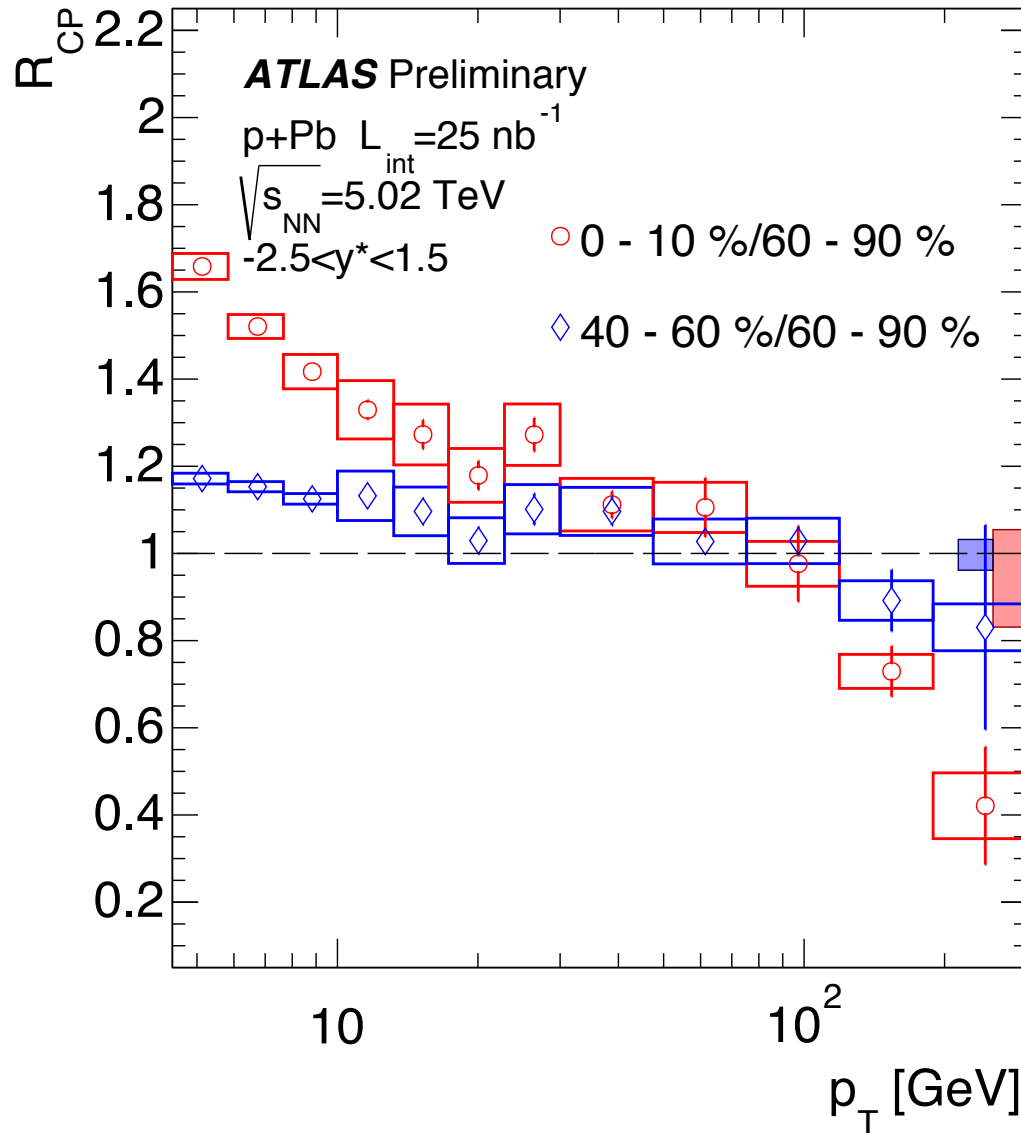
# Факторы ядерной модификации в зависимости от псевдобыстроты ( $\eta$ )



$R_{pPb}$  в зависимости от  $y^*$  для 2-х интервалов  $p_T$  3-х классов центральности и 3-х моделей

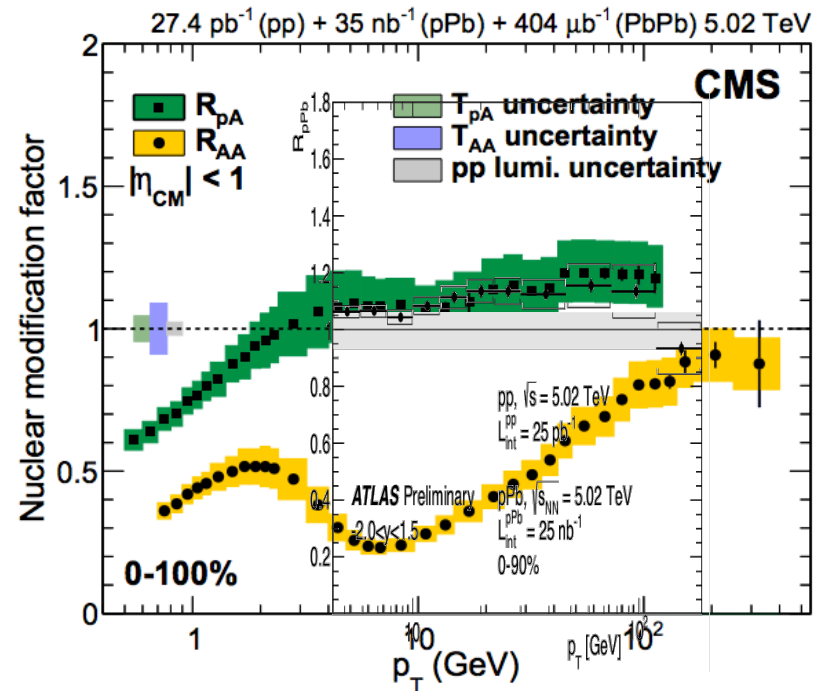
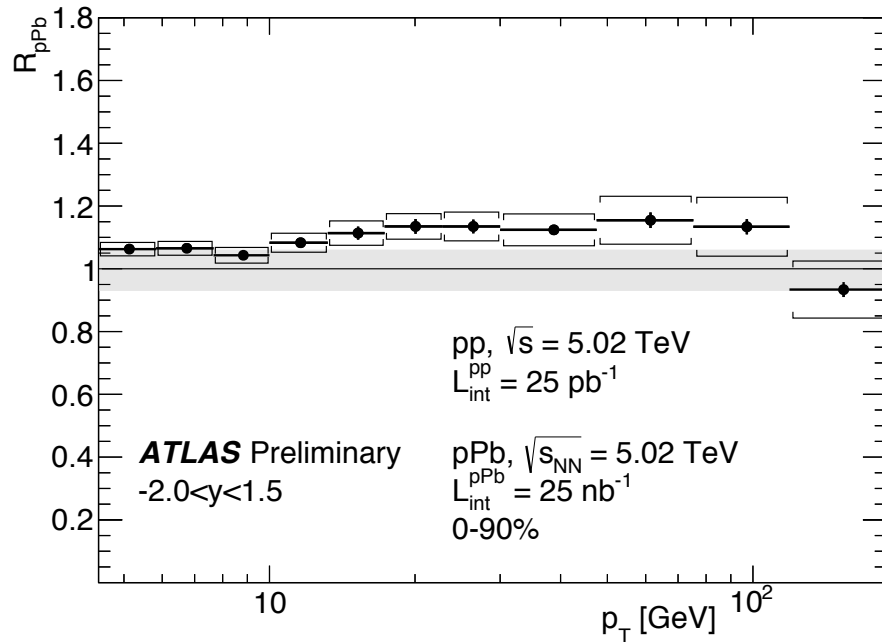
- Впервые рассчитаны ядерные модификационные факторы как функция поперечного импульса, псевдобыстроты и быстроты, для диапазонов:  $|\eta| < 2,3$  и  $0,1 < p_T < 22 \text{ ГэВ}$ ;

# Факторы ядерной модификации $R_{CP}$





# Фактор ядерной модификации



- ATLAS показал схожий с CMS результат