

# Дифракционное фоторождение струй в ультрапериферических столкновениях на БАК



**В. Гузей**



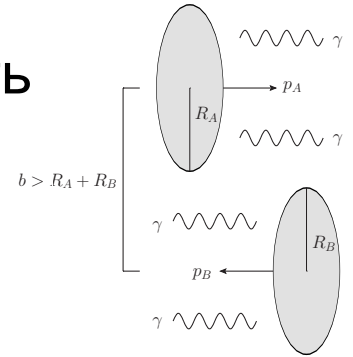
Петербургский Институт Ядерной Физики (ПИЯФ),  
НИЦ “Курчатовский Институт”, Гатчина

## План семинара:

- Ультрапериферические столкновения (УПС) ионов на БАК в Run 1
- Дифракционное фоторождение струй в лептон-протонном рассеянии
- Предсказания КХД для сечений дифракционного фоторождения двух струй в  $pp$ ,  $pA$ ,  $AA$  УПС на БАК: [Guzey, Klasen, JHEP 2016 \(2016\) 290](#)
- Заключение

# Ультрапериферические столкновения на БАК

- В  $pp$ ,  $pA$  и  $AA$  столкновениях ядра могут взаимодействовать на больших прицельных параметрах  $b > R_A + R_B = 10-20$  фм → ультрапериферические столкновения (УПС).

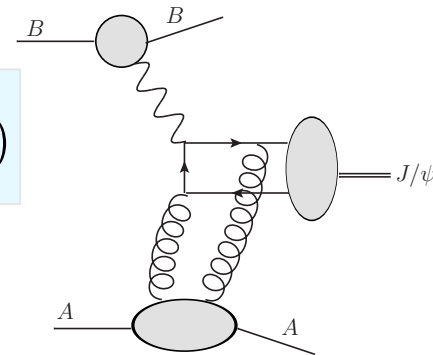


- До сих пор в УПС изучалось фоторождение легких и тяжелых векторных мезонов. Такие события отвечают:
  - пустому детектору с двумя лептонными (пионными) треками
  - когерентность ядра контролируется измерением нейтронов в калориметрах нулевого угла и  $pt < 200$  MeV/c мезона
- В УПС сильное взаимодействие подавлено → ионы взаимодействуют посредством квази-реальных фотонов, Fermi (1924), von Weizsäcker; Williams (1934)

$$\frac{d\sigma_{AA \rightarrow AA J/\psi}(y)}{dy} = N_{\gamma/A}(y) \sigma_{\gamma A \rightarrow A J/\psi}(y) + N_{\gamma/A}(-y) \sigma_{\gamma A \rightarrow A J/\psi}(-y)$$

↓  
поток фотонов

↘  
сечение фоторождения



$$y = \ln(2\omega/M_{J/\psi}) = \ln(W_{\gamma p}^2 / (2\gamma_L m_N M_{J/\psi})) \text{ быстрота } J/\psi$$

# УПС на БАК (2)

- Поток фотонов из КЭД: 
$$N_{\gamma/Z}(k) = \frac{2Z^2\alpha_{em}}{\pi} [\zeta K_0(\zeta)K_1(\zeta) - \frac{\zeta^2}{2}(K_1^2(\zeta) - K_0^2(\zeta))]$$
- большая интенсивность:  $Z^2 \approx 7000$  для Pb
- большая энергия фотонов k:  $\zeta = k(2R_A/\gamma_L)$

• **УПС** = возможность изучать фотон-протонные и фотон-ядерные взаимодействия при беспрецедентно высоких энергиях (в 10 раз больше, чем на HERA)

A. Baltz *et al.*, The Physics of Ultraperipheral Collisions at the LHC, Phys. Rept. 480 (2008) 1

- Оценка  $W_{\gamma p}$  (ГэВ) и  $x=(M_V/W)^2$  при быстроте  $y=0$  для АА УПС:

	Run 1	Run 2	RHIC
$\rho$	46	62	12
$J/\psi$	92, $x=0.001$	125, $x=0.0006$	
$Y$	161, $x=0.003$	218, $x=0.002$	

# Основные результаты по УПС на БАК, Run 1

## • Фоторождение $J/\psi$ и $\psi(2S)$ в pp УПС при $\sqrt{s_{NN}}=7$ ТэВ,

LHCb, J. Phys. G 40 (2013) 04500; J. Phys. G 41 (2014) 055002

- согласуется с вычислениями в рамках пертурбативной КХД и дипольных моделей с насыщением глюонной плотности, измерениями HERA
- ограничения на глюонную плотность в протоне  $g_p(x, \mu^2)$  при малых  $x$  до  $x=6 \times 10^{-6}$ , Guzey, Zhalov, JHEP 1310 (2013) 207; arXiv:1405.7529

## • Фоторождение $J/\psi$ и $\psi(2S)$ в Pb-Pb УПС при $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ ТэВ,

ALICE, Eur. Phys. J. C 73 (2013) 2617; Phys. Lett. B 718 (2013) 1273; Phys. Lett. B 751 (2015) 358

- согласуется с моделями, учитывающими умеренные глюонные ядерные экранировки в случае когерентного  $J/\psi$  и меньшие экранировки для неког.  $J/\psi$
- указывает на существенно меньшее подавление для  $\psi(2S)$
- первое прямое и модельно-независимое доказательство большой глюонной ядерной экранировки:  $R_g = g_A(x, \mu^2) / [A g_p(x, \mu^2)] = 0.6$  при  $x=0.001$ , согласующееся с предсказаниями модели экранировок лидирующего твиста, Guzey, Kryshen, Strikman, Zhalov, Phys. Lett. B 726 (2013) 290; Guzey, Strikman, Zhalov, Eur. Phys. J. C (2014) 74:2942
- предсказание подобного ядерного подавления за счет глюонной ядерной экранировки в случаях  $J/\psi$  и  $\psi(2S)$ , Guzey, Zhalov, arXiv:1404.6101; Guzey, Kryshen, Zhalov, arXiv:1602.01456 (принято в PRC); В. Гузей, семинары ОФВЭ 2013 и 2014 г.; Первая премия конкурса лучших работ ПИЯФ (2014)

# Основные результаты по УПС на БАК, Run 1

- **Фоторождение  $J/\psi$  в Pb-Pb УПС с излучением форвардных нейтронов при  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  ТэВ**, CMS, CMS Note PAS HIN-12-99

- измерения в канале  $(Xn, 0n)$  хорошо согласуются с нашими предсказаниями большой глюонной экранировки

- **Фоторождение  $J/\psi$  в p-Pb УПС при  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  ТэВ**, ALICE, PRL 113 (2014) 232504

- ограничения на глюонную плотность в протоне  $g_p(x, \mu^2)$  вплоть до  $x=2 \times 10^{-5}$ , согласуется с пертурбативной КХД и данными HERA
- имеет преимущества для определения  $g_p(x, \mu^2)$  по сравнению с pp УПС; может быть использовано для определения  $g_A(x, \mu^2)$ , Guzey, Zhalov, JHEP 02 (2014) 046

- **Фоторождение  $\rho$  в Pb-Pb УПС при  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  ТэВ**, ALICE, JHEP 1509 (2015) 095

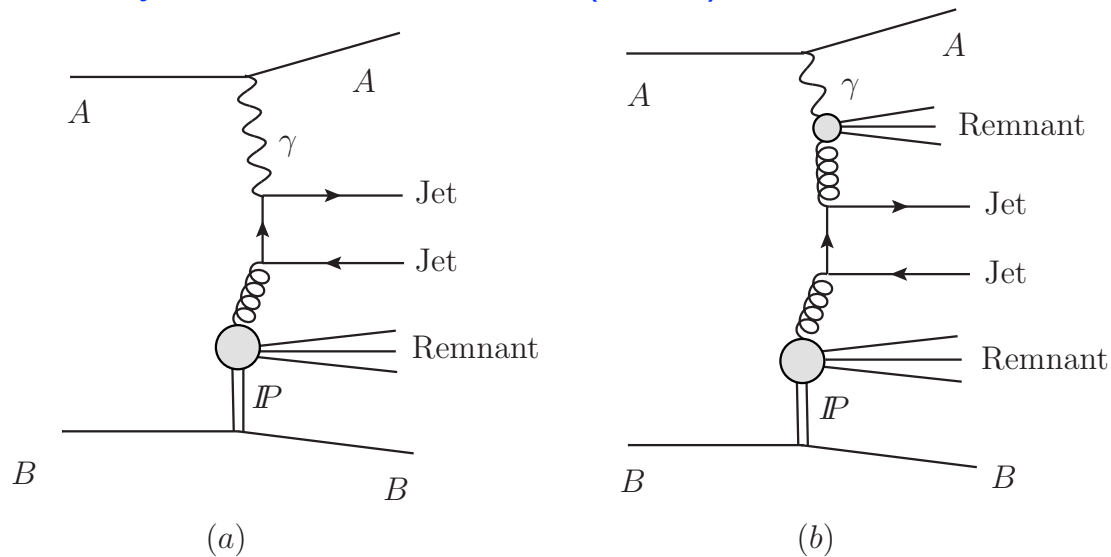
- указывает на важность флуктуаций цвета в фотоне и неупругой ядерной экранировки с ростом  $W_{\gamma p}$ , Frankfurt, Guzey, Strikman, Zhalov, PLB 752 (2016) 51; М.Б.Жалов, семинар ОФВЭ (2016)

- **Фоторождение  $\Upsilon$  в pp УПС при  $\sqrt{s_{NN}}=7$  и 8 ТэВ**, LHCb, JHEP 1509 (2015) 084

- ограничения на глюонную плотность в протоне  $g_p(x, \mu^2)$  при малых  $x$  до  $x \approx 10^{-4}$

# УПС на БАК, Run 2

- Планируется, что программа измерения фоторождения легких ( $\rho$ ,  $\phi$ ) и тяжелых ( $J/\psi$ ,  $\psi(2S)$ ,  $\Upsilon$ ) векторных мезонов будет продолжена в Run 2, Kryshen, Guzey, Zhalov, arXiv:1602.01456 (принято в PRC); М.Б. Жалов, семинар ОФВЭ (2016)
- Есть ли другие процессы, позволяющие заполнить пробелы, оставшиеся после HERA? Мы предлагаем: **дифракционное фоторождение двух струй**, Guzey, Klasen, JHEP 2016 (2013) 290



прямой фотон (direct)

разрешенный фотон (resolved)

Такие события характеризуются:

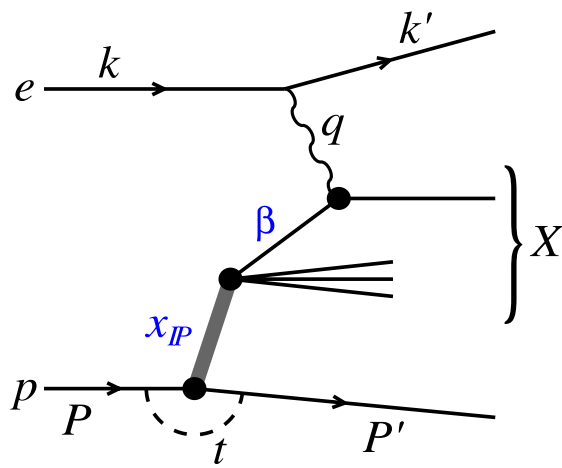
- отсутствием адронной активности вдоль направления пучков (rapidity gaps)
- 2 струи с большим  $p_T$
- поток энергии от Померона и  $\gamma$

- Изучение этого процесса в УПС на БАК может позволить:

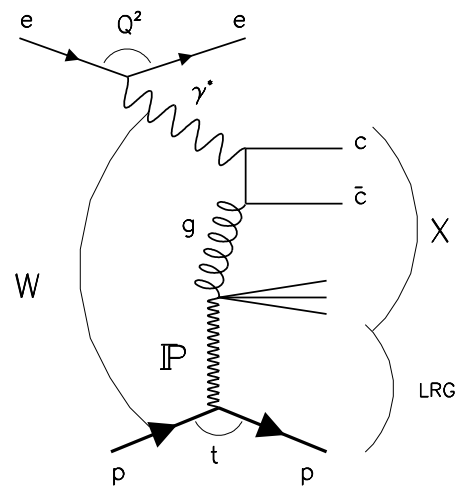
- улучшить понимание механизма нарушения факторизации в дифракции
- впервые определить ядерные дифракционные партонные распределения
- улучшить определение дифракционных партонных распредел. в протоне

# Дифракционное фоторождение струй на HERA

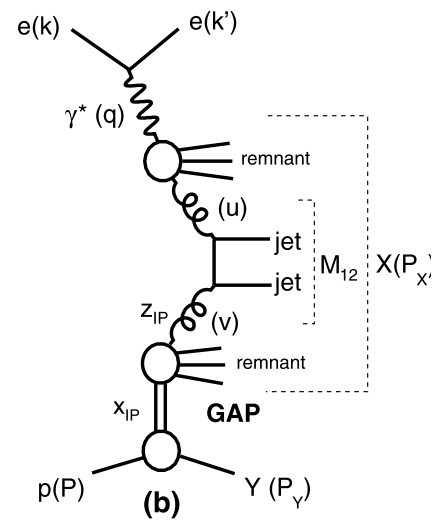
- Было изучено в  $ep$  и  $\gamma p$  рассеянии на HERA (Hadron-Electron Ring Accel) в рамках измерения жестких дифракционных процессов, ZEUS, H1 1996-2015



инклюзивная дифракция



дифракционное электро- и фотор. открытого чарма



дифракционное электро- и фоторождение двух струй

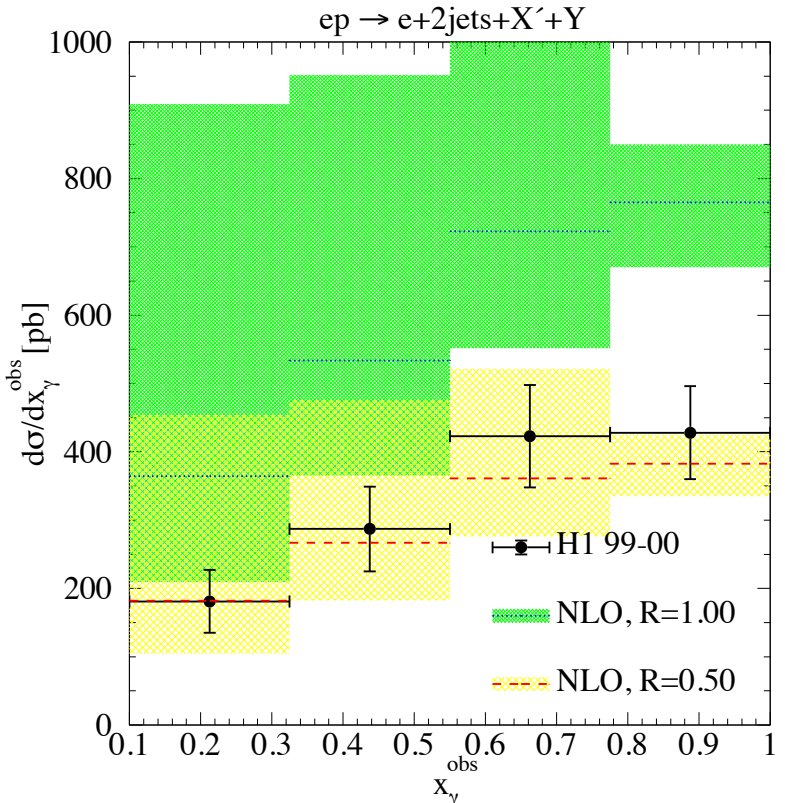
## • Основные результаты:

- инклюзивная дифракция составляет 10-15% от полного сечения  $\gamma^*p$  (много!) и не убывает с ростом  $Q^2$
- факторизация выполняется для электророждения и фоторождения откр. чарма и электророждения струй, т.е. дифракционные партонные распределения из инклюзива позволяют описать сечения этих процессов.
- факторизация сильно нарушается для дифр. фоторождения струй, механизм не установлен

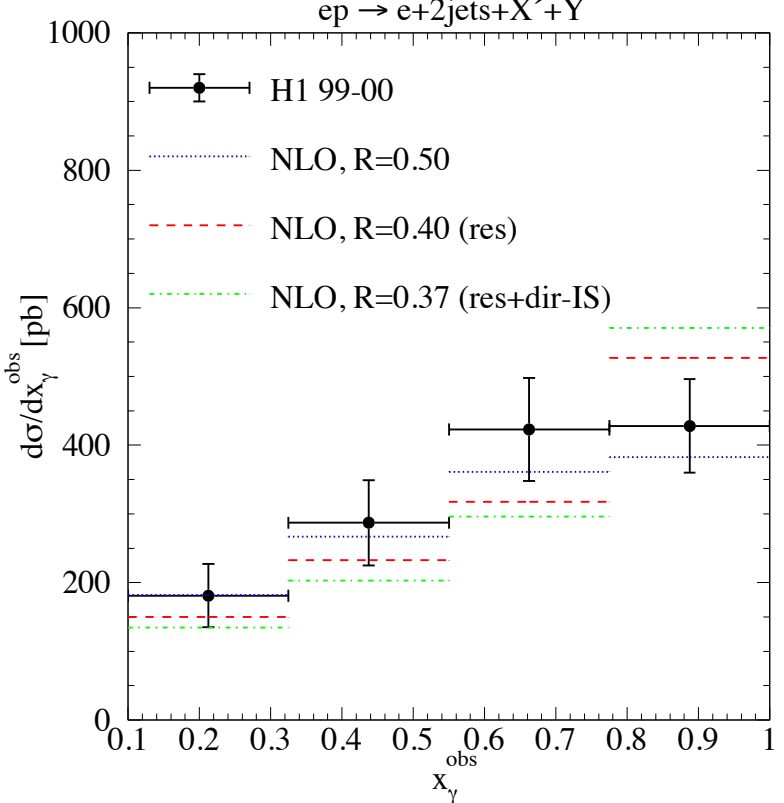
# Дифракционное фоторождение струй на HERA

- Теория данного процесса в КХД надежно установлена:
  - сечение в порядке следующим-за-лидирующим (NLO) теории возмущений КХД
  - партонные распределения в фотоне из e+e- данных
  - дифракционные партонные распределения в протоне из инклюзивной дифракции
- NLO вычисление переоценивает данные в ~2 раза и предлагает 2 сценария нарушения факторизации, [Klasen, Kramer, EPJ C70 \(2010\) 91](#)

Глобальное подавление R=0.5



Подавление только разрешенного γ R(res.)=0.4



$x_\gamma$  = доля импульса фотона, участвующая в жестком взаимодействии



# Дифракционное фоторождение струй в УПС

- По прямой аналогии с вычислениями в случае лептон-протонного расс. :
  - фотонный поток от лептона → фотонный поток от протона/ядра
  - подавление сильных неупругих взаимодействий при малых  $b$
  - дифракционные партонные распределения в протоне → в ядре
  - модель для нарушения факторизации для разрешенного фотона
- 2 вклада, отвечающие фотонам от левого/правого иона:

$$d\sigma(AA \rightarrow A + 2\text{jets} + X' + A) = d\sigma(AA \rightarrow A + 2\text{jets} + X' + A)^{(+)} + d\sigma(AA \rightarrow A + 2\text{jets} + X' + A)^{(-)}$$

- Сечение дифракционного фоторождения 2х струй в УПС:

$$d\sigma(AA \rightarrow A + 2\text{jets} + X' + A)^{(+)} = \sum_{a,b} \int_{t_{\text{cut}}}^{t_{\text{min}}} dt \int_{x_P^{\text{min}}}^{x_P^{\text{max}}} dx_P \int_0^1 dz_P \int_{y_{\text{min}}}^{y_{\text{max}}} dy \int_0^1 dx_\gamma$$

$$\times f_{\gamma/A}(y) f_{a/\gamma}(x_\gamma, \mu^2) f_{b/A}^{D(4)}(x_P, z_P, t, \mu^2) d\hat{\sigma}_{ab \rightarrow \text{jets}}^{(n)}$$

поток фотонов (включает подавление сильного взаимодействия при малых  $b$ )

партонное распределение в фотоне (включает прямую компоненту и эффект нарушения факторизации)

дифракционное партонное распределение в ядре (включает ядерные экранировки)

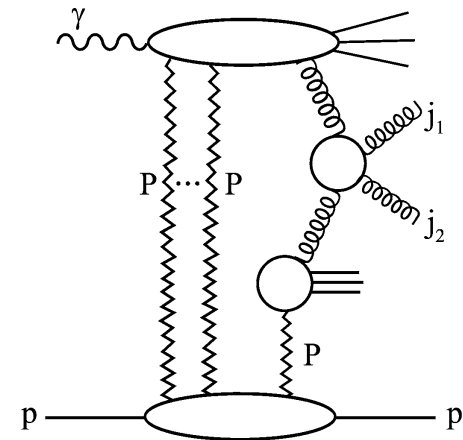
элементарное партонное сечение

# Нарушение факторизации

- 2 оригинальных элемента нашего анализа:
  - модель для нарушения факторизации для разрешенного фотона для ядерной мишени
  - дифракционные партонные распредел. в ядре из модели экранировок лидирующего твиста
- **Нарушение факторизации** в дифракционных процессах происходит из-за мягких неупругих взаимодействий, которые сильно подавляют вероятность иметь щель по быстрой в конечном сост. (**rapidity gap survival  $S \approx 0.1$** ):
  - хорошо известно в жестком  $p$ -анти  $p$  рассеянии на Теватроне, [CDF, PRL 84 \(2000\) 5043](#)
  - нужно учитывать в мягкой дифракции на Теватроне и БАК, [Khoze, Martin, Ryskin, EPJ C 18 \(2000\) 167](#)
  - учитывается в анализе  $pp$  УПС на БАК, [Jones, Martin, Ryskin, Teubner, JHEP 11 \(2013\) 085](#)
- В нашем случае опираемся на то, что фотон взаимодействует в конфигурациях, имеющих разный поперечный размер (сечения) :

- **прямой фотон** = маленькие конфигурации  $\rightarrow$  не подавлен  
- **разрешенный (resolve) фотон** = большие конфигурации  $\rightarrow$  подавление за счет многократных обменов с сечением  $\sim \sigma_{pN}$

- предложено для объяснения данных HERA, [Kaidalov, Khoze, Martin, Ryskin, PLB 567 \(2003\) 61](#)



# Нарушение факторизации

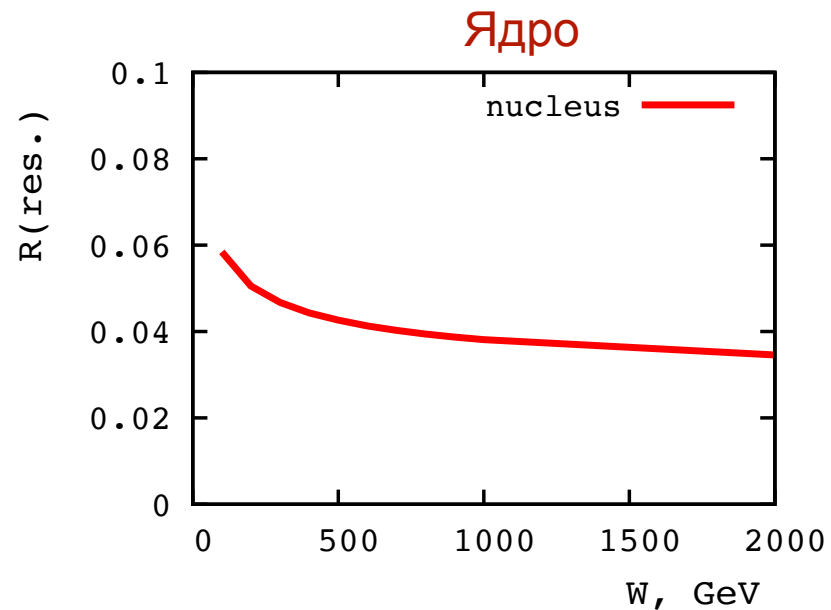
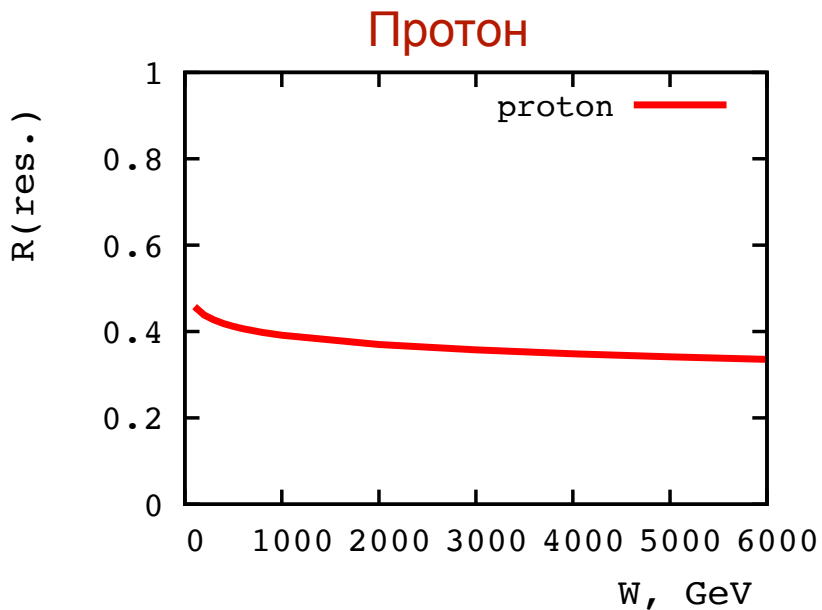
- Фактор подавления для разрешенной компоненты:

$$R(\text{res.}) = \frac{\int d^2b |1 - e^{-\sigma_{\rho N}/2T_A(b)}|^2 e^{-\sigma_{\rho N} T_A(b)}}{\int d^2b |1 - e^{-\sigma_{\rho N}/2T_A(b)}|^2}$$

оптическая  
плотность  
ядра

вероятность когентного фоторождения  $\rho$

вероятность не иметь неупругих  
взаимодействий



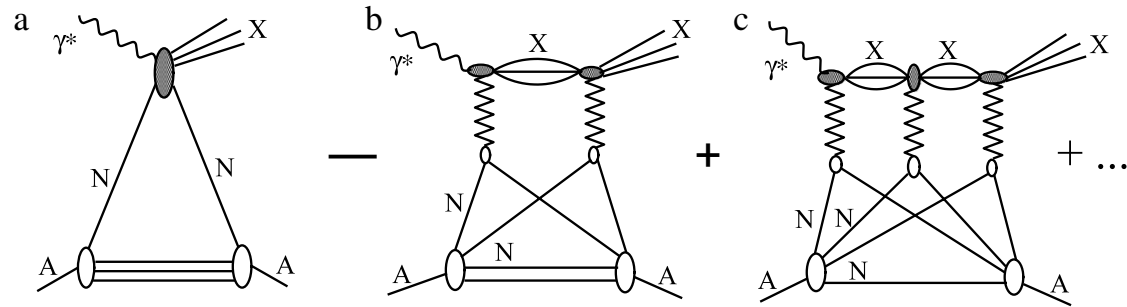
$R(\text{res.}) \approx 0.4$  согласуется с анализом HERA, Klasen, Kramer (2010)

$R_A(\text{res.}) \approx 0.1 R_p(\text{res.})$ , т.к. гораздо легче развалить ядро

# Ядерные дифракционные партонные распределения

- Предсказываются в рамках модели ядерных экранировок лидирующего твиста, Frankfurt, Guzey, Strikman, Phys. Rept. 512 (2012) 255

- Получаются путем суммирования диаграмм, отвечающим взаимодействию с 1, 2, ..., A нуклонами ядра:

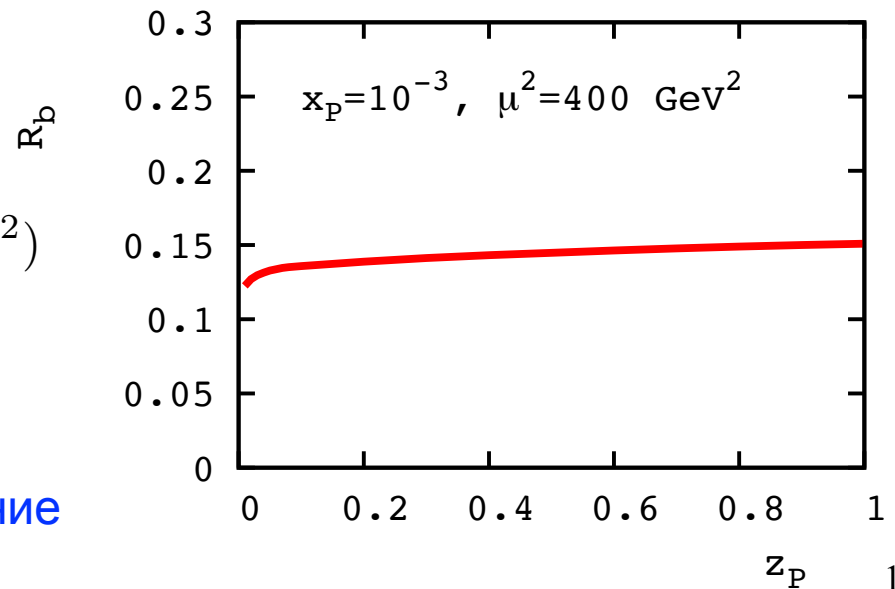


- Как и в случае  $g_A(x, \mu^2)$ , предсказывается большое подавление дифракционных партонных распределений в ядрах за счет экранировок:

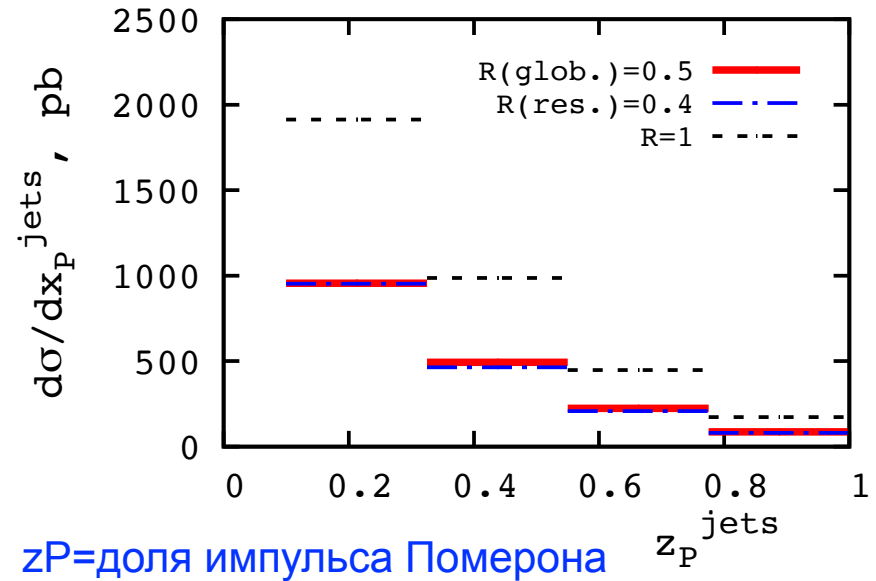
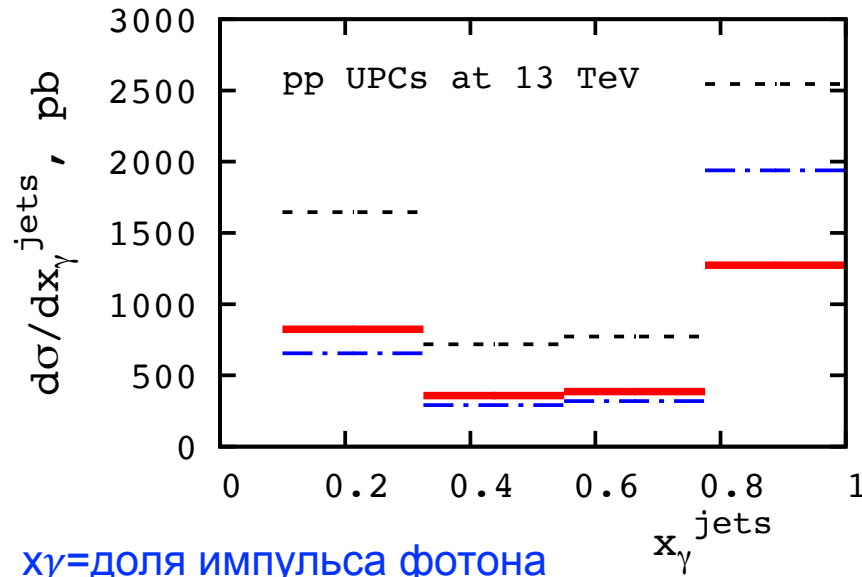
$$f_{b/A}^{D(4)}(x_P, z_P, t, \mu^2) = R_b A^2 F_A^2(t) f_{b/p}^{D(4)}(x_P, z_P, t_{\min}, \mu^2)$$

экранировка

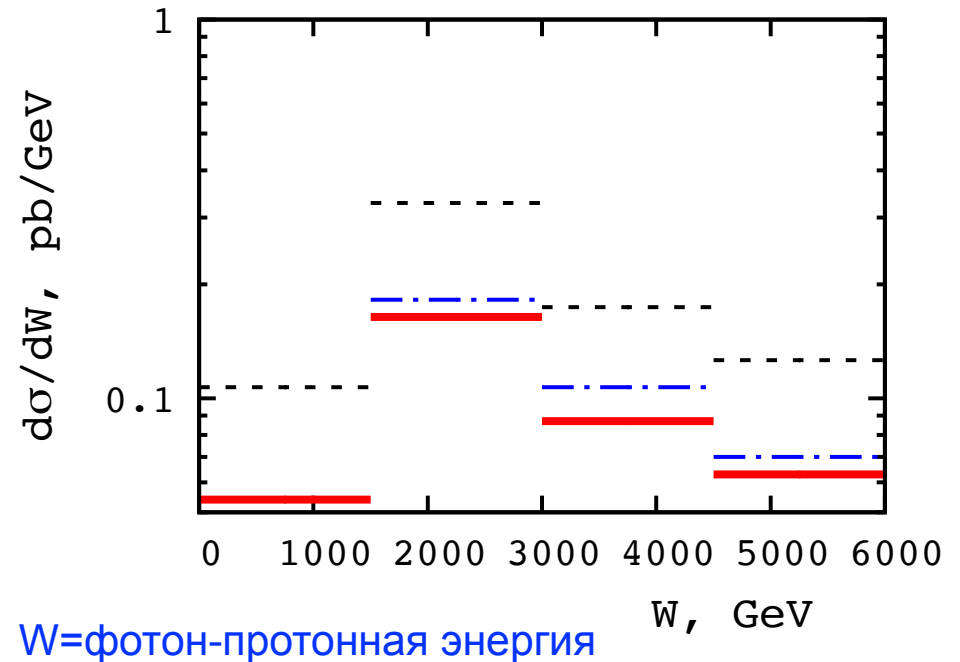
импульсное приближение



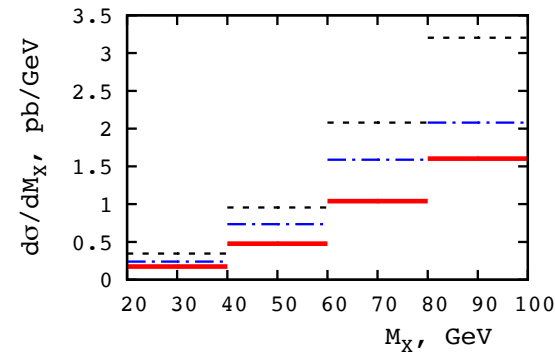
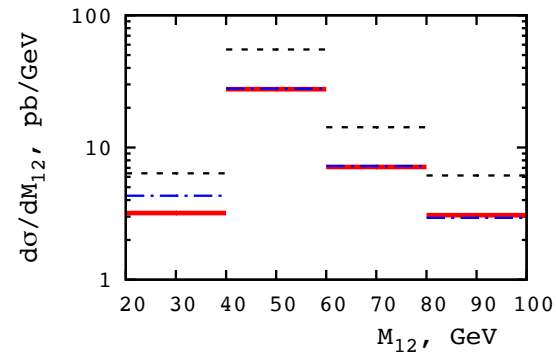
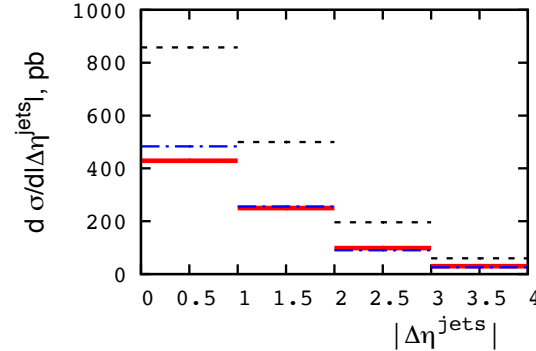
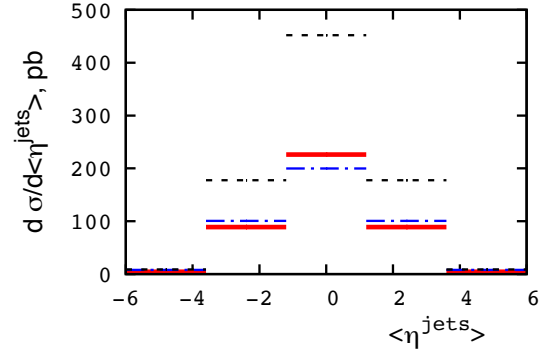
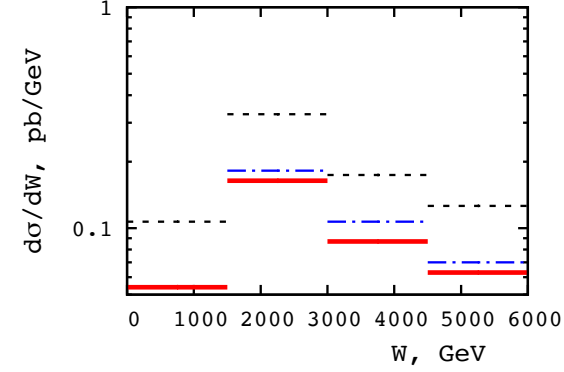
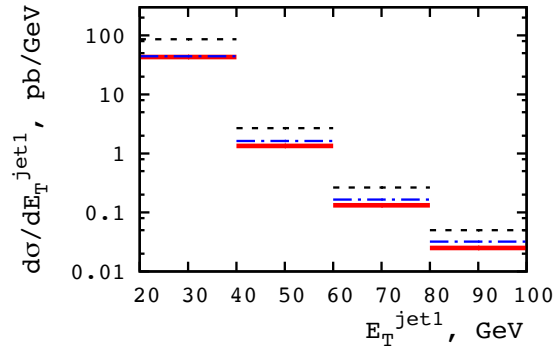
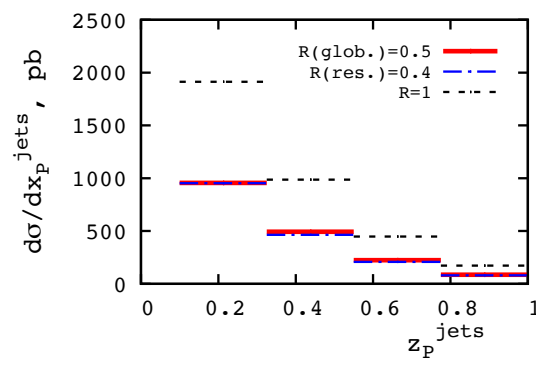
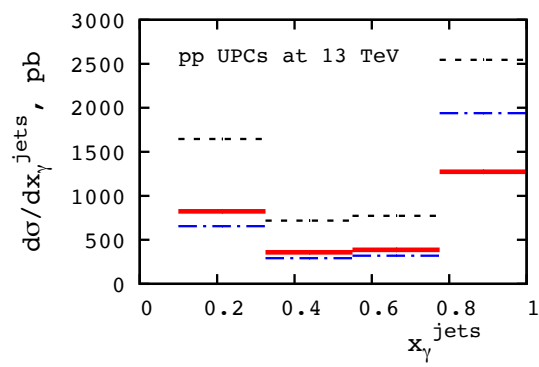
# Предсказания для pp УПС



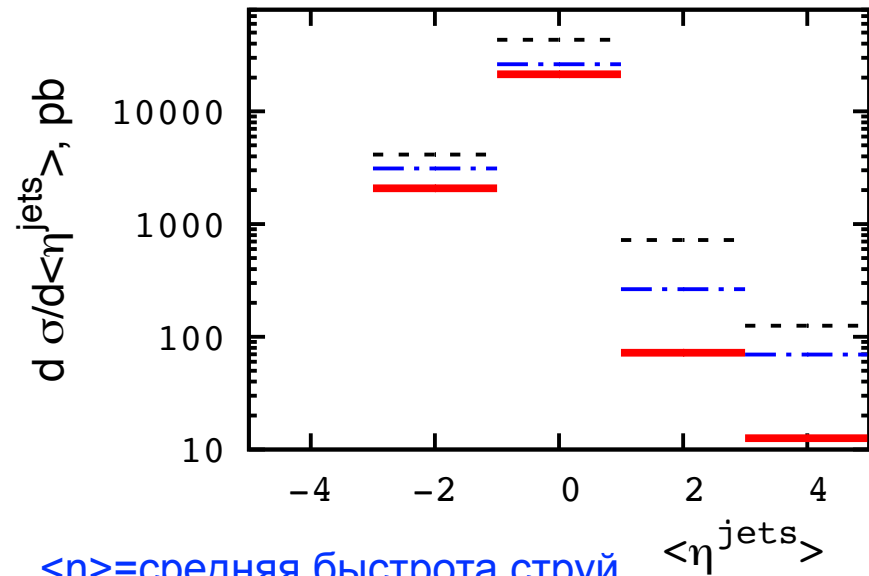
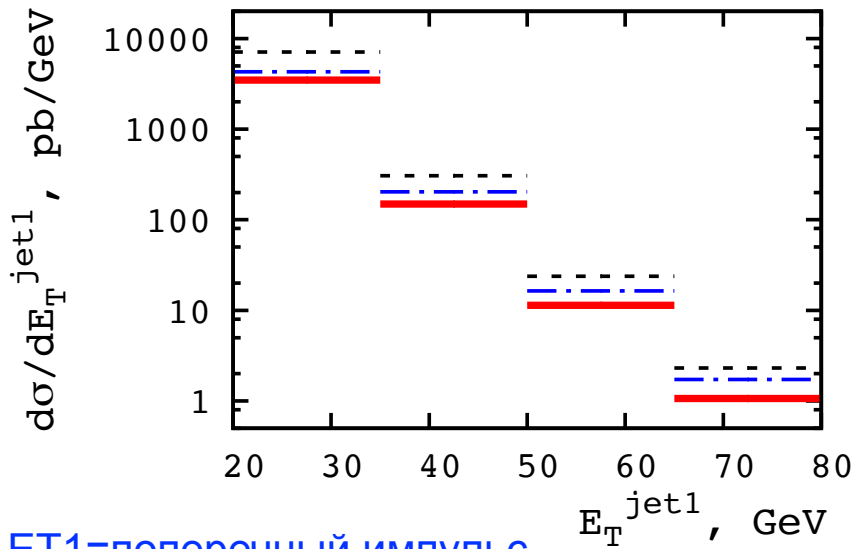
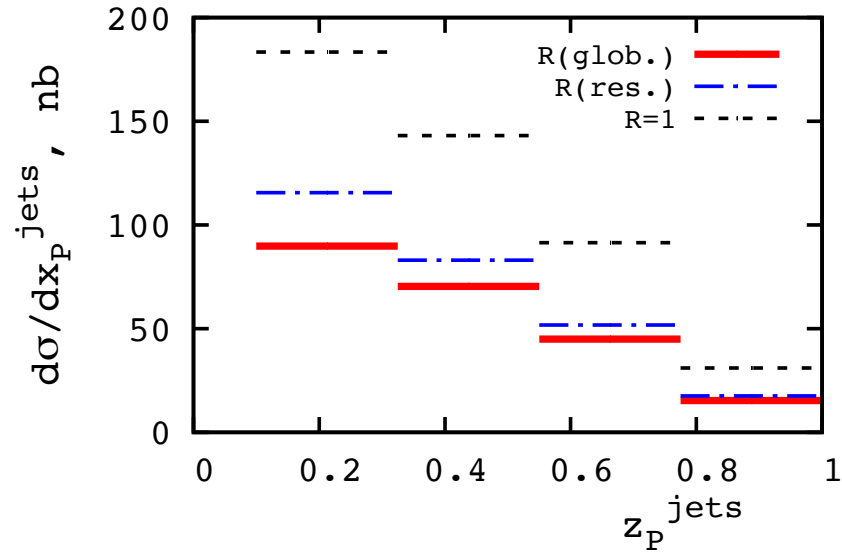
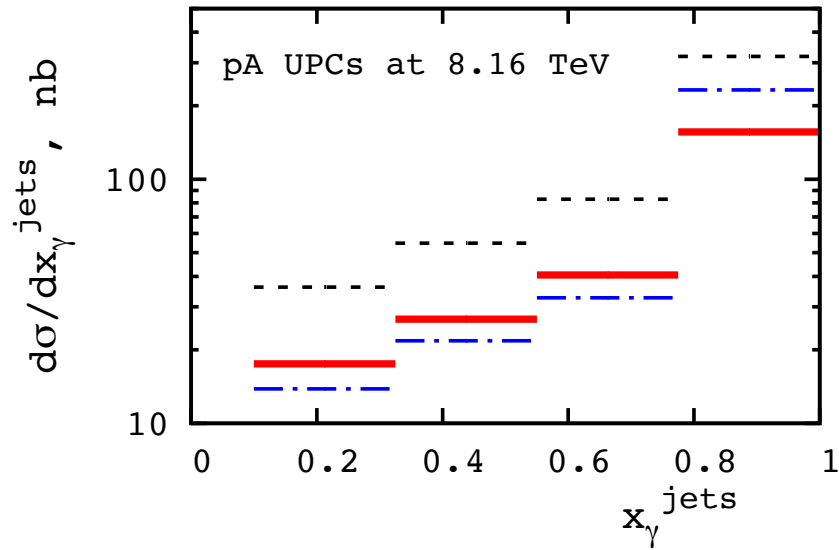
- Сечения большие: O(нб)
- Чувствительность к малым  $z_P$  больше, чем на HERA → **новые ограничения на  $g_p^D$  протона**
- Энергия  $W$  в 10 раз больше, чем на HERA  $x_\gamma$
- Чувствительность к модели нарушения факторизации мала



# Предсказания для pp УПС



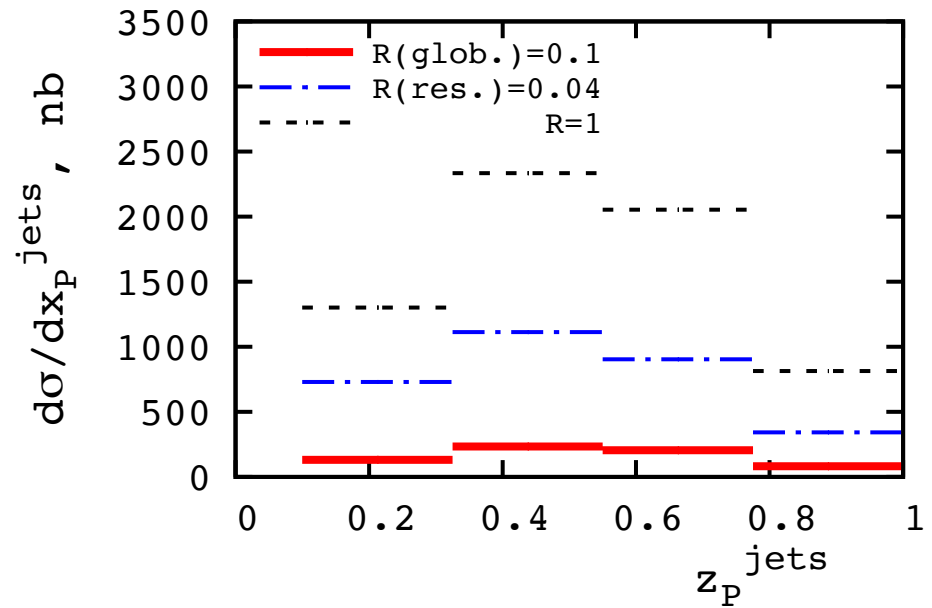
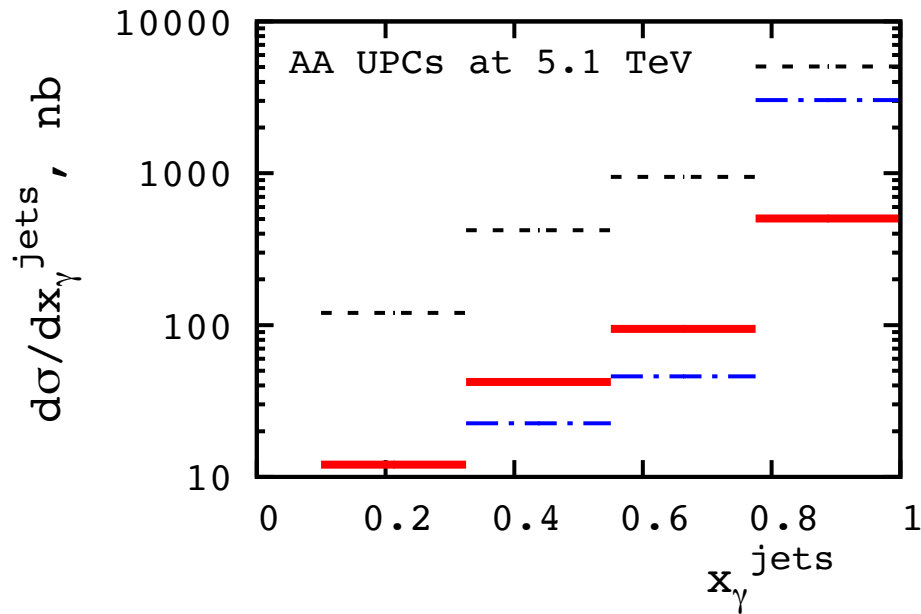
# Предсказания для pA УПС



ET1=поперечный импульс

$\langle\eta\rangle$ =средняя быстрота струй

# Предсказания для АА УПС

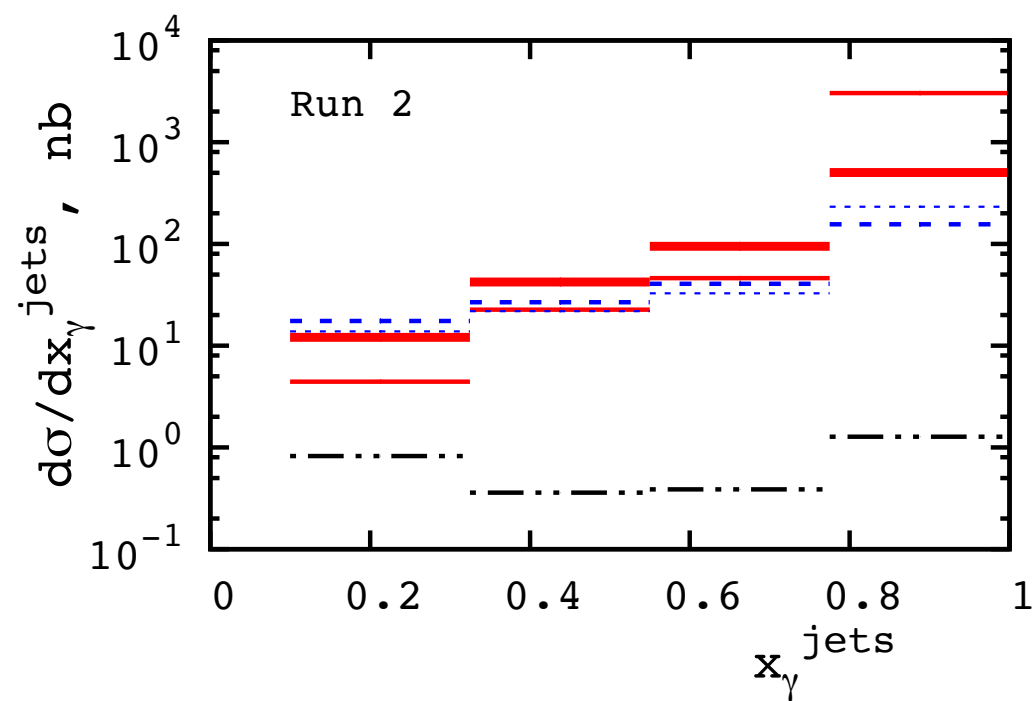
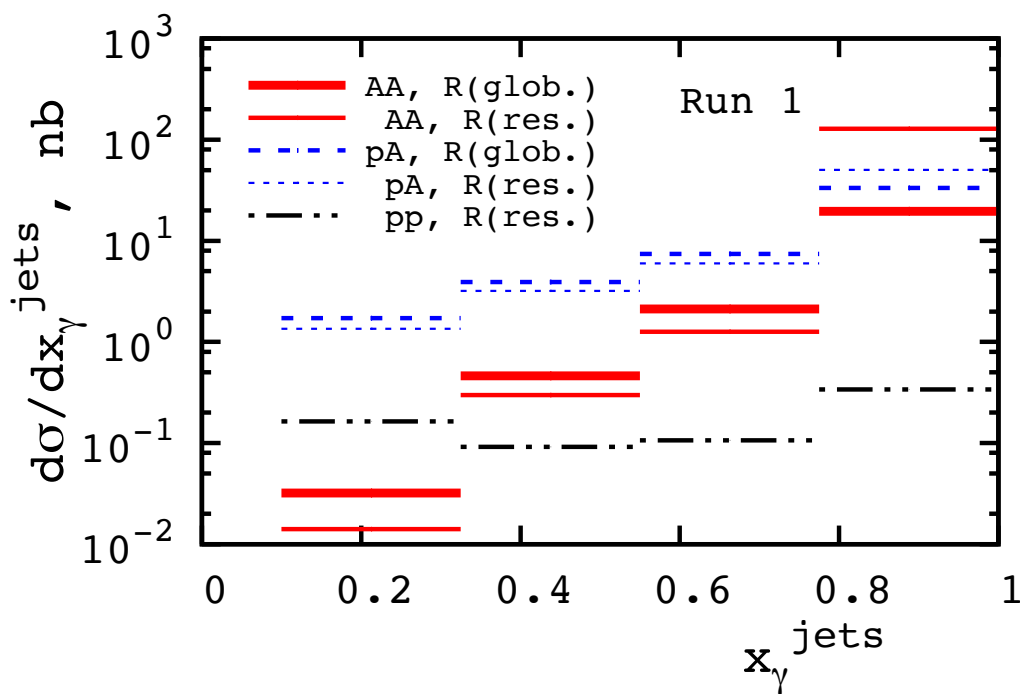


- Сечения усилены  $Z^2 \approx 7000$  от фотонного потока и  $A^{4/3} \approx 1200$  от ядерных дифракционных плотностей → большие: O(микробарны)
- Если “выключить экранировку” → сечение увеличится в 7 раз
- Чувствительность к модели нарушения факторизации качественная для  $x_\gamma$ : красная и синяя кривые пересекаются!



# $x_\gamma$ -зависимость нарушения факторизации

- $x_\gamma$ =(самая) чувствительной наблюдаемая к модели нарушения факторизации
- УПС на ядрах дает принципиальную возможность отличить сценарий с глобальным фактором подавления от подавления только разрешенного фотона.



# Заключение

- Основу программы изучения УПС на БАК составляет фоторождение легких и тяжелых векторных мезонов.
- Мы предлагаем новый процесс: дифракционное фоторождение 2х струй, который может разрешить проблему механизма нарушения факторизации и впервые измерить ядерные дифракционные партонные плотности.
- Предсказанные сечения большие и имеют большую чувствительность к малым  $z_P$  и большим  $W$ , чем измерения HERA.
- Pb-Pb УПС позволяют как определить  $g_A^D$ , так и попытаться установить механизм нарушения факторизации в дифракционных процессах в КХД.
- Предлагаемый процесс дополняет измерение дифракционного рождения 2х струй в pp рассеянии на БАК, [ATLAS, PLB 754 \(2016\) 214](#).