

# Вклад ультра-периферических столкновений в дифракционное протон-ядерное рассеяние на БАК

**В. А. Гузей**



Петербургский Институт Ядерной Физики, НИЦ “Курчатовский  
Институт”



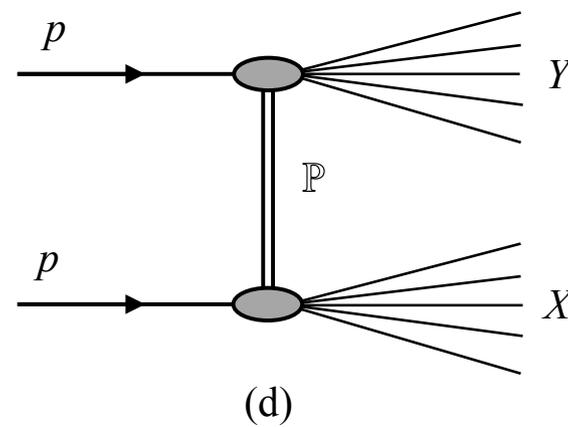
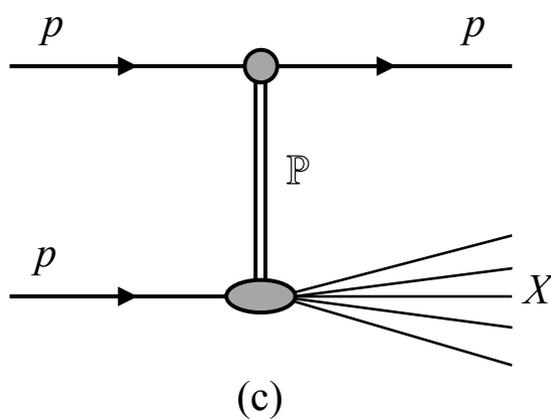
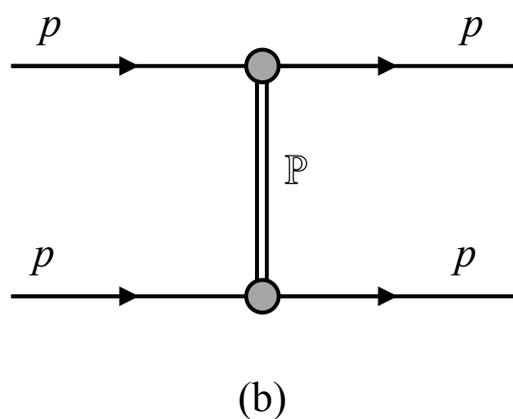
- По результатам препринта V. Guzey, M. Strikman, M. Zhalov, [UPC contribution to forward rapidity gap distribution in pPb collisions at the LHC](#), [arXiv:2205.03861](#) [hep-ph], май 2022, послано в Phys. Rev. C.
- Как реакция на недавний семинар ОФВЭ, Д. Соснова, [Монте-Карло генераторы событий для дифракционных адронных и ядерных соударений при высоких энергиях: Pythia, EPOS-LHC и QGSJET-II](#), 25.01.2022

# План семинара

- Дифракция адронов при высоких энергиях
- Дифракционное протон-ядерное рассеяние на БАК: проблема с описанием данных CMS
- Вклад сильного взаимодействия и ультра-периферический вклад в протон-ядерную дифракционную диссоциацию: общее рассмотрение
- Обобщение на распределение по щели в быстрой во впередовой области  $\Delta\eta^F$  (forward rapidity gap) в кинематике CMS.

# Дифракция адронов при высоких энергиях

- В рассеянии адронов ( $pp$ ,  $pA$ ,  $AA$ ) при высоких энергиях существует важный класс событий, характеризующимися **отсутствием адронной активности в широкой области быстрот** = Large Rapidity Gap (LRG). Быстрота  $\eta = 1/2 \ln[(E+p_z)/(E-p_z)]$ .
- Такие процессы называются **дифракционными** по аналогии с дифракцией света на мишени, т.к. имеют характерную зависимость от переданного импульса ( $t$ ) с минимумами и максимумами.
- Примеры дифракционных процессов: (b) упругое рассеяние, (c) однократная диссоциация, (d) двукратная диссоциация.

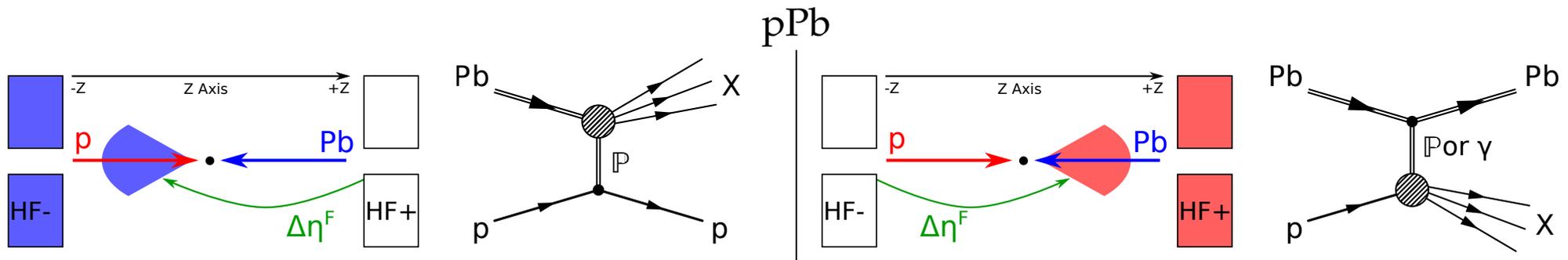


# Зачем изучать дифракцию?

- **Практический аспект:** дифракционные события составляют **25-30%** полного **неупругого pp** сечения при энергиях БАК → необходимо для хорошего описания дополнительных неупругих pp столкновений (pile-up) и мониторинга светимости.
- **Теоретический аспект:** дифракция является богатой тестовой площадкой динамики **мягких** (теория Грибова-Редже, модель Гуда-Волкера) и **жестких** (природа Померона в КХД, насыщение глюооной плотности при малых  $x$ , кварк-глюооная структура протонов и ядер в КХД) взаимодействий.
- **Феноменологический аспект:** проверка Монте-Карло генераторов, использующие эти модели → ядра играют роль фильтра, представляющим доп. возможность дифференцировать между разл. механизмами дифракции по сравнению с протоном.
- **Синергетический аспект:** дифракция на ядрах играет роль в **физике космических лучей** (моделирование атмосферных ливней).

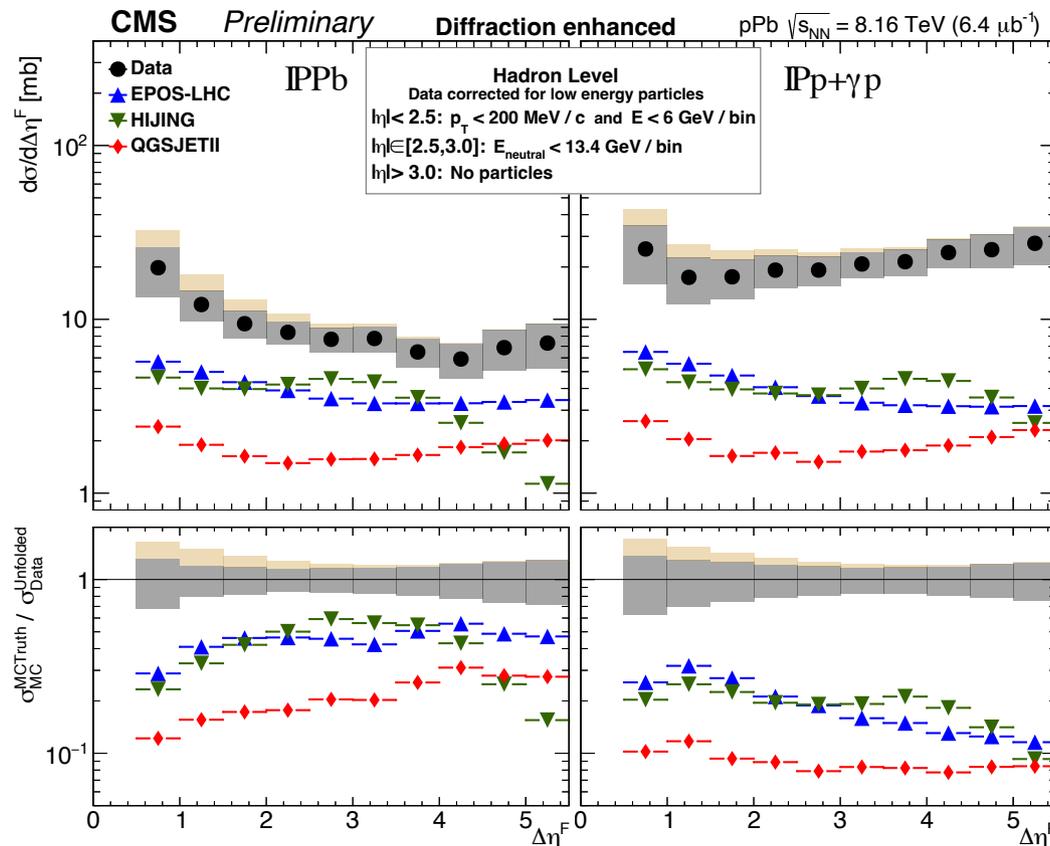
# Дифракционное протон-ядерное рассеяние на БАК: проблема с описанием данных CMS

- Первое измерение дифракции в протон-ядерном (pPb) рассеянии на БАК при 8.16 ТэВ, [CMS Coll.](#), [CMS-PAS-HIN-18-019](#).
- Результаты в виде распределения по щели в быстрой впередовой области  $\Delta\eta^F$ . CMS определяет ее как расстояние от края области, перекрываемой центральным детектором  $|\eta| < 3$ , до первого непустого бина в адронном форвардном калориметре (HF).
- В зависимости от того, какой калориметр срабатывает, различают 2 топологии: Померон-ядерная (слева) и Померон-протонная (справа).



# Дифракционное протон-ядерное рассеяние на БАК: проблема с описанием данных CMS

- Монте-Карло генераторы (EPOS-LHC, HIJING, QGSJET II) недооценивают данные в **2 раза в PPb** топологии и в **5 раз в Pp** топологии → расхождение может быть объяснено ультра-периферическим вкладом, имитирующим дифракционный → мы это отметили еще в 2006 г., [Guzey, Strikman, PLB 633 \(2006\) 245; PLB 663 \(2008\) 456](#)



- В случае протонной мишени описание распределения по  $\Delta\eta^F$  достаточно хорошее, [Aad et al. \[ATLAS\], EPJC 72 \(2012\) 1926; Khachatryan et al. \[CMS\], PRD 92, no.1 \(2015\) 012003](#)

# Вклад сильных взаимодействий в протон-ядерную дифракционную диссоциацию

- Явление дифракционной диссоциации (ДД) в протон-ядерном рассеянии при высоких энергиях  $p+A \rightarrow X+A$  является классическим примером составной природы адронов.

- Комбинируя метод Грибова-Глаубера для адрон-ядерного рассеяния с моделью Гуда-Волкера для собственных состояний матрицы рассеяния  $\rightarrow$  сечение когерентной ДД на ядрах, [Good, Walker, PR 120 \(1960\) 1857](#); [Frankfurt, Miller, Strikman, PRL 71 \(1993\) 2859](#); [Blattel, Baym, Frankfurt, Heiselberg, Strikman, PRD 47 \(1993\) 2761](#)

$$\sigma_{pA}^{\text{diff}}(s) = \int d^2\vec{b} \left[ \int d\sigma P_p(\sigma) |\Gamma_A(\vec{b})|^2 - \left| \int d\sigma P_p(\sigma) \Gamma_A(\vec{b}) \right|^2 \right]$$

- $\Gamma_A(b)$  = амплитуда рассеяния на ядре в представлении прицельного параметра  $b \rightarrow$  учитывает сильный эффект ядерных экранировок (упругих и неупругих)

$$\Gamma_A(\vec{b}) = 1 - e^{-\frac{\sigma}{2} T_A(\vec{b})}$$

- $T_A(b)$  = ядерная оптическая плотность

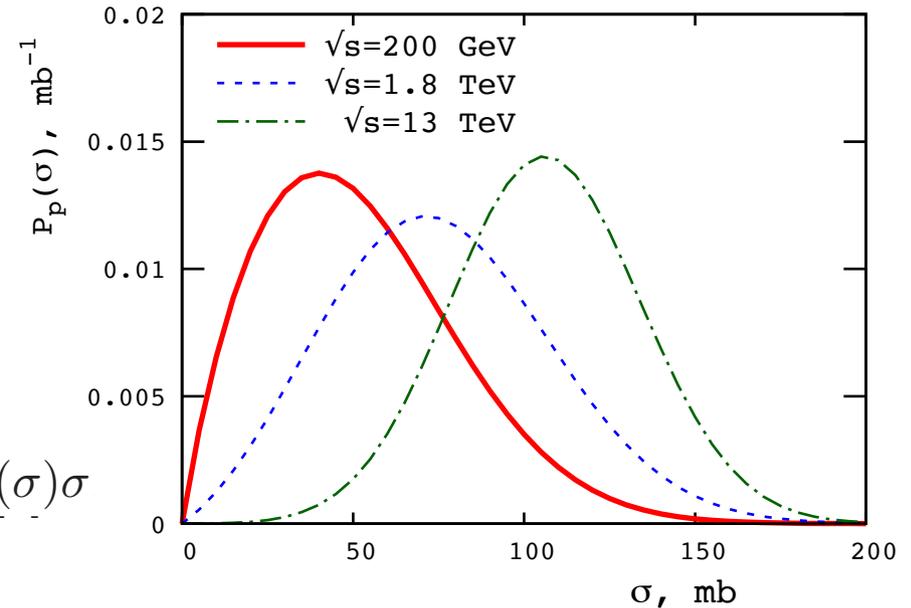
$$T_A(\vec{b}) = \int dz \rho_A(\vec{r})$$

# Вклад сильных взаимодействий в протон-ядерную дифракционную диссоциацию (2)

- $P_p(\sigma)$  = вероятность протону находиться в конфигурации, взаимодействующей с нуклонами ядра с сечением  $\sigma$ .

- Непертурбативное распределение  $\rightarrow$  требует моделирования, Frankfurt, Guzey, Stasto, Strikman, arXiv:2203.12289 (review submitted to ROPP)

- Однако в случае ДД на ядрах форма  $P_p(\sigma)$  не важна, т.к. можно разложить в ряд Тэйлора вблизи  $\sigma_{pp}^{\text{tot}}(s) = \langle \sigma \rangle \equiv \int d\sigma P_p(\sigma) \sigma$



$$\sigma_{pA}^{\text{diff}}(s) = \frac{\omega_\sigma(s) \langle \sigma \rangle^2}{4} \int d^2\vec{b} (T_A(b))^2 e^{-\langle \sigma \rangle T_A(b)}$$

- $\omega_\sigma(s)$  = характеризует дисперсию  $P_p(\sigma) \rightarrow$  определяется из данных по ДД на протоне  $p+p \rightarrow X+p$ :

$$\omega_\sigma(s) = 0.092 \pm 0.015$$

# Ультра-периферический вклад в протон-ядерную дифракционную диссоциацию

- Конкурирующим механизмом данной реакции с тем же самым конечным состоянием является ультра-периферический вклад  $p+A \rightarrow p+\gamma+A \rightarrow X+A$
- В приближении эквивалентных фотонов тяжелые ионы служат источником квази-реальных фотонов  $\rightarrow$

$$\sigma_{pA}^{\text{e.m.}}(s) = \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \frac{d\omega}{\omega} N_{\gamma/A}(\omega) \sigma_{\gamma p}^{\text{tot}}(s_{\gamma p})$$

- $N_{\gamma/A}(\omega)$  = поток фотонов энергии  $\omega$   $N_{\gamma/A}(\omega) = \frac{2Z^2\alpha_{\text{e.m.}}}{\pi} \left( \xi K_0(\xi) K_1(\xi) - \frac{\xi^2}{2} (K_1^2(\xi) - K_0^2(\xi)) \right)$
- $\sigma_{\gamma p}(s)$  = полное фотон-протонное сечение  $\gamma + p \rightarrow X$   

$$\sigma_{\gamma p}^{\text{tot}}(s)/\text{mb} = 0.0677 s_{\gamma p}^{0.0808} + 0.129 s_{\gamma p}^{-0.4525}$$
- Минимальная и максимальная энергии фотонов:

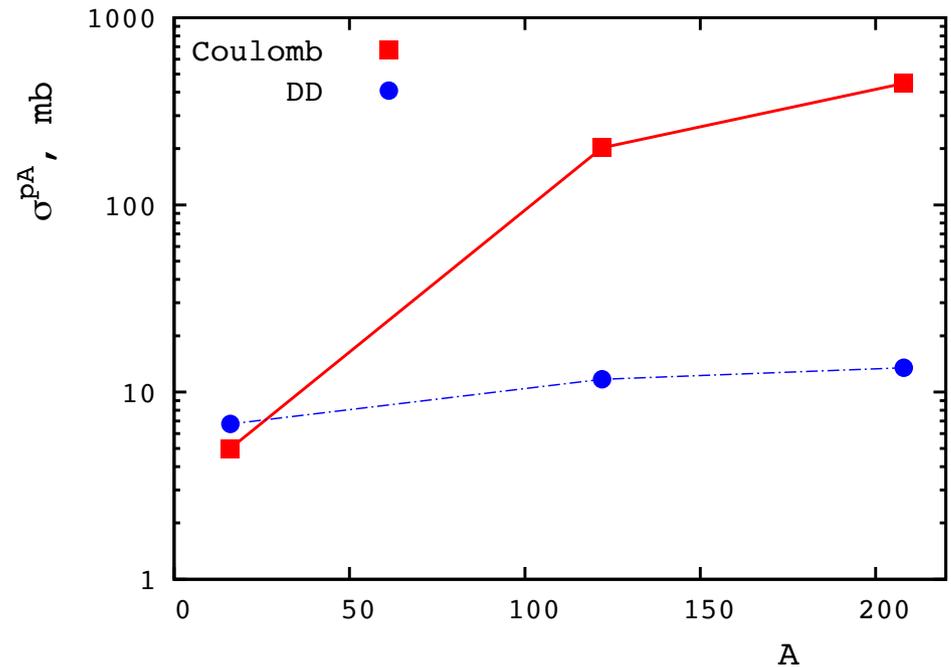
$$\omega_{\min} = (M_{\Delta}^2 - m_p^2)/(4m_p \gamma_L(p))$$

$$\omega_{\max} = \gamma_L(A)/R_A$$

# Сравнение сильного и ультра-периф. вкладов

- В кинематике БАК, ультра-периферический вклад доминирует в сечении когерентной дифракционной диссоциации в протон-ядерном рассеянии для тяжелых ядер.

$$\sigma_{pA}^{\text{diff}}(s) = 7.4 \pm 1.2 \text{ mb},$$
$$\sigma_{pA}^{\text{e.m.}}(s) = 450 \text{ mb}.$$



- Это обуславливается усилением э.м. вклада за счет большого потока фотонов  $\sim Z^2$  с одновременным подавлением сильного вклада за счет большой ядерной экранировки и малой ДД на протоне  $\sim \omega_\sigma(s)$ .

- Для легких ядер оба вклада сравнимы:  
 $\sigma_{pO}^{\text{diff}}(s) = 3.1 \pm 0.52 \text{ mb},$   
 $\sigma_{pO}^{\text{e.m.}}(s) = 5.0 \text{ mb}.$

# Обобщение на случай распределения по $\Delta\eta^F$ : вклад сильных взаимодействий

- Связь между дисперсией  $P_p(\sigma)$  и сечением ДД на протоне  $p+p \rightarrow X+p$ :

$$\frac{d\sigma_{pp}^{\text{diff}}(t=0)}{dt} = \frac{1}{16\pi} (\langle\sigma^2\rangle - \langle\sigma\rangle^2) = \frac{\omega_\sigma(s)\langle\sigma\rangle^2}{16\pi}$$

- Сечение ДД на ядре: 
$$\sigma_{pA}^{\text{diff}}(s) = \frac{d\sigma_{pp}^{\text{diff}}(t=0)}{dt} 4\pi \int d^2\vec{b} (T_A(b))^2 e^{-\langle\sigma\rangle T_A(b)}$$

- Экспоненциальная зависимость от  $t$ :  $d\sigma_{pp}^{\text{diff}}/dt = d\sigma_{pp}^{\text{diff}}/dt(t=0)e^{-B(s)|t|}$

- Сечение ДД на ядре: 
$$\begin{aligned} \sigma_{pA}^{\text{diff}}(s) &= \sigma_{pp}^{\text{diff}}(s) 4\pi B(s) \int d^2\vec{b} (T_A(b))^2 e^{-\langle\sigma\rangle T_A(b)} \\ &= 2.4 \sigma_{pp}^{\text{diff}}(s). \end{aligned} \quad (1)$$

- В дифференциальной форме: 
$$\frac{d\sigma_{pA}^{\text{diff}}}{d\Delta\eta^F} = 2.4 \frac{d\sigma_{pp}^{\text{diff}}}{d\Delta\eta^F}$$

- Используя данные ATLAS, Aad et al. [ATLAS], EPJC 72 (2012) 1926:

$$\frac{d\sigma_{pA}^{\text{diff}}}{d\Delta\eta^F} \approx 2.4 \text{ mb}$$

# Определение $\Delta\eta^F$

- Масса  $M_X$  связана с щелью по быстроте между системой X и упруго-рассеянным ядром:

$$\Delta\eta = -\ln \xi_X$$

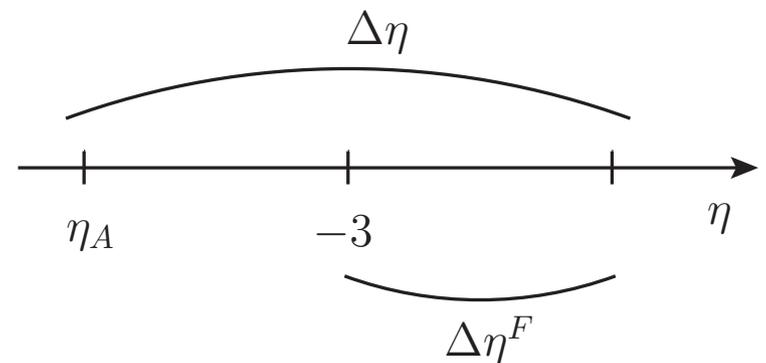
$$\xi_X = M_X^2/s$$

- В Померон-протонной топологии  $\Delta\eta^F$  определено как расстояние между  $\eta=-3$  и последним непустым бином. Так как упруго-рассеянное ядро отвечает

$$\eta_A = -(1/2) \ln(4E_A^2/m_p^2) = \ln(2E_A/m_p) = -8.6$$

- Щель в быстроте во впередовой области  $\Delta\eta^F$  в кинематике CMS:

$$\Delta\eta^F = \Delta\eta - (8.6 - 3) = \Delta\eta - 5.6$$



# Обобщение на случай распределения по $\Delta\eta^F$ : ультра-периферический вклад

• Энергия фотонов однозначно связана с массой рожденного дифракционного состояния:  $\omega = (M_X^2 - m_p^2)/(4m_p\gamma_L(p)) \approx M_X^2/(4m_p\gamma_L(p))$

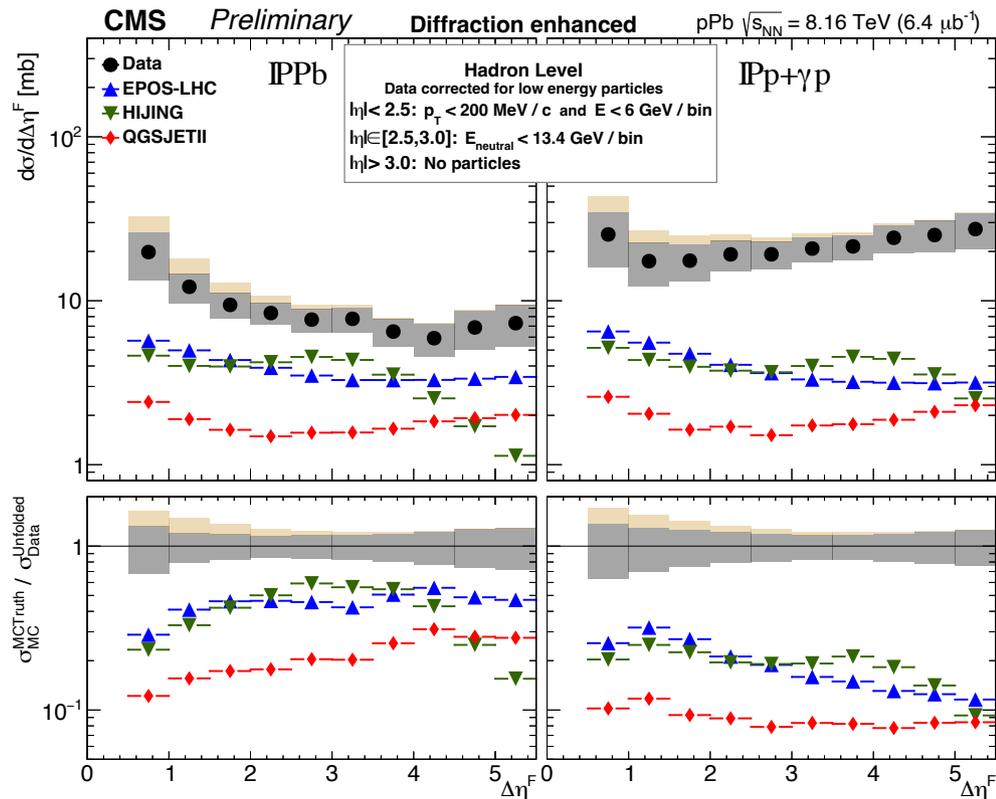
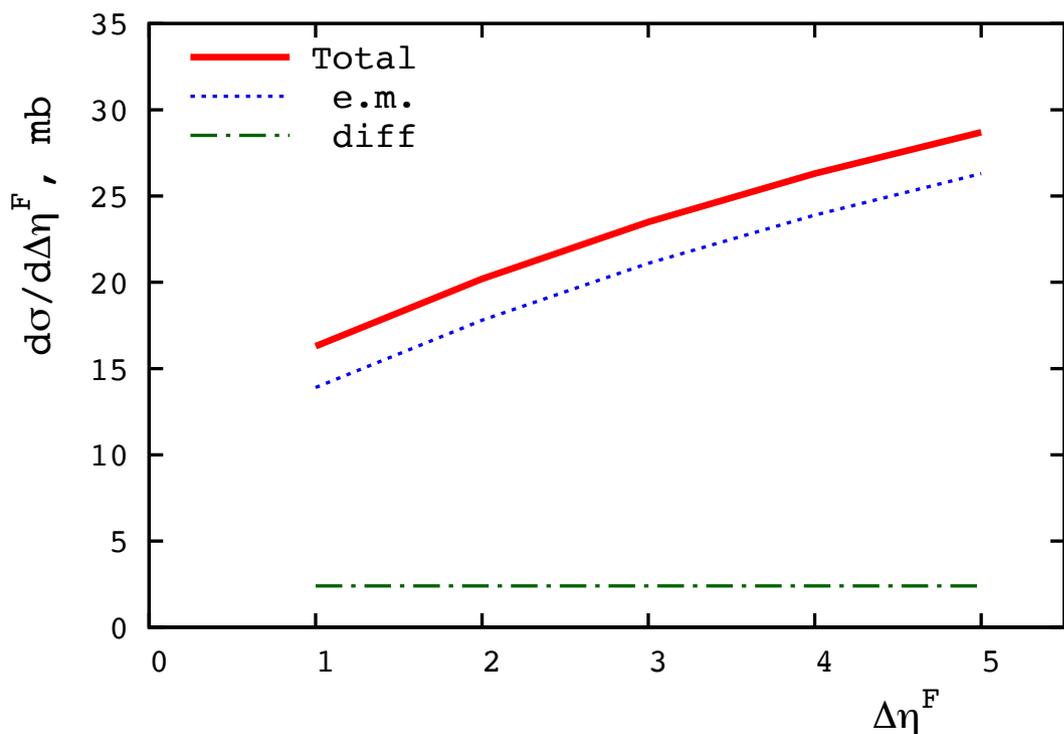
• Вспоминая связь  $M_X$  с  $\Delta\eta^F$ :  $\frac{d\omega}{\omega} = d \ln M_X^2 = d\Delta\eta^F$

• Ультра-периферический вклад как функция  $\Delta\eta^F$ :

$$\frac{d\sigma_{pA}^{\text{e.m.}}}{d\Delta\eta^F} = N_{\gamma/A}(\omega(\Delta\eta^F))\sigma_{\gamma p}^{\text{tot}}(s_{\gamma p})$$

$\Delta\eta^F$	$d\sigma_{pA}^{\text{e.m.}}/d\Delta\eta^F$ , mb
1	13.9
2	17.8
3	21.1
4	23.9
5	26.3

# Результат для распределения по $\Delta\eta^F$



- Наша полу-количественная оценка объясняет величину и поведение данных CMS.
- В частности, ультра-периферический вклад доминирует и слабо растет с  $\Delta\eta^F$  за счет роста фотонного потока.
- Вклад сильных взаимодействий мал и не зависит от  $\Delta\eta^F$

# Заключение

- Ультра-периферический вклад доминирует в сечении когерентной дифракционной диссоциации протонов на тяжелых ядрах в кинематике БАК.
- Учет этого механизма позволяет полу-количественно объяснить данные CMS по распределению по щели в быстрой во впередовой области  $\Delta\eta^F$  в Померон-протонной кинематике.
- Это указывает на необходимость учета ультра-периферического вклада в Монте-Карло генераторах.
- Сильный и ультра-периферические вклады сравнимы в случае легких ядер (кислород, O). Т.к. ультра-периферический вклад под теор. контролем  $\rightarrow$  возможность измерить дифракцию на ядрах.