QCD challenges in pp, pA and AA collisions at high energies

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons



Diego Spiering

IF - USP - Brazil



Based on PLB 752 (2016) 76, PRD 93 (2016) 054025 and PRD 94 (2016) 014009. In collaboration with V. P. Gonçalves, F. S. Navarra, B. D. Moreira and F. Carvalho.

diego.spiering@gmail.com

- * ロ * * 4 日 * * 4 日 * * 4 日 * * * 9 0 0



• In 2014 the HERA released data about the leading neutron production in *ep* processes.

・ロト ・ 日 ト ・ ヨ ト ・ ヨ ト ・ ヨ

ECT* (2017)

1 / 31



- In 2014 the HERA released data about the leading neutron production in *ep* processes.
- These data shown a Feynman scaling, i. e. the longitudinal momentum distribution of the neutron is independent of the energy W (γp interaction). This characteristic does not have a satisfactory explanation.

(日) (同) (三) (三) (三)

ECT* (2017)

1/31



- In 2014 the HERA released data about the leading neutron production in *ep* processes.
- These data shown a Feynman scaling, i. e. the longitudinal momentum distribution of the neutron is independent of the energy W (γp interaction). This characteristic does not have a satisfactory explanation.
- The high energy leading neutron production can prove the low-*x* regime, where non-linear effects are expected on the QCD dynamics.

(日) (同) (三) (三) (三)

ECT* (2017)

1/31



• Describe the HERA data of inclusive and exclusive processes with leading neutron production on *ep* colliders.

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

・ロト ・聞ト ・ヨト ・ヨト

- 3

2 / 31

ECT* (2017)



- Describe the HERA data of inclusive and exclusive processes with leading neutron production on *ep* colliders.
- Estimate the impact of non-linear effects.

Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

・ロト ・聞ト ・ヨト ・ヨト

3

2 / 31

ECT* (2017)



- Describe the HERA data of inclusive and exclusive processes with leading neutron production on *ep* colliders.
- Estimate the impact of non-linear effects.
- Extend the study of leading neutron production to γh interactions at RHIC and LHC.

イロト イポト イヨト イヨト

ep collisions

Results for *ep*

hh collisions

Results for

(日) (同) (三) (三) (三)

- 3

3 / 31

ECT* (2017)

Summary

Electron-proton collisions

Diego Spiering (IFUSP)

Results for *hl*

Summary

Leading neutron production at HERA

inclusive $e + p \rightarrow e + n + X$



Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons



exclusive $e + p \rightarrow e + n + \pi + E$





< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 4 / 31

э





$$\frac{d^2\sigma(\hat{W}^2,Q^2,x_L,t)}{dx_Ldt} = f_{\pi/p}(x_L,t)\sigma_{\gamma^*\pi}(\hat{W}^2,Q^2)$$

Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

■ > < ■ > = つへの ECT* (2017) 4 / 31

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >



exclusive $e + p \rightarrow e + n + \pi + E$

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >



$$\frac{d^2\sigma(\hat{W}^2,Q^2,x_L,t)}{dx_L dt} = f_{\pi/p}(x_L,t)\sigma_{\gamma^*\pi}(\hat{W}^2,Q^2)$$

Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 4 / 31

э



exclusive $e + p \rightarrow e + n + \pi + E$



$$\frac{d^2\sigma(\hat{W}^2, Q^2, x_L, t)}{dx_L dt} = f_{\pi/p}(x_L, t)\sigma_{\gamma^*\pi}(\hat{W}^2, Q^2)$$

Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 4 / 31

3

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >





$$\frac{d^2\sigma(\hat{W}^2, Q^2, x_L, t)}{dx_L dt} = f_{\pi/p}(x_L, t)\sigma_{\gamma^*\pi}(\hat{W}^2, Q^2)$$

Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 4 / 31

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回

・ロト ・ 日 ト ・ ヨ ト ・ ヨ ト ・ ヨ

ECT* (2017)

5 / 31

Flux of pions / Pion splitting function

$$f_{\pi/p}(x_L,t) = \frac{1}{4\pi} \frac{2g_{p\pi p}^2}{4\pi} \frac{-t}{(t-m_{\pi}^2)^2} (1-x_L)^{1-2\alpha(t)} \left[F(x_L,t)\right]^2$$

Diego Spiering (IFUSP)

Flux of pions / Pion splitting function

$$f_{\pi/p}(x_L,t) = \frac{1}{4\pi} \frac{2g_{p\pi p}^2}{4\pi} \frac{-t}{(t-m_{\pi}^2)^2} (1-x_L)^{1-2\alpha(t)} \left[F(x_L,t) \right]^2$$

$$F_1(x_L, t) = \exp\left[R^2 \frac{t - m_\pi^2}{1 - x_L}\right], \quad \alpha(t) = 0$$
$$F_2(x_L, t) = 1, \quad \alpha(t) = t$$

$$F_3(x_L, t) = \exp\left[b(t - m_\pi^2)\right], \quad \alpha(t) = t$$

$$F_4(x_L, t) = \frac{\Lambda_m^2 - m_\pi^2}{\Lambda_m^2 - t}, \quad \alpha(t) = 0$$

$$F_5(x_L,t) = \left[\frac{\Lambda_d^2 - m_\pi^2}{\Lambda_d^2 - t}\right]^2, \quad \alpha(t) = 0$$

Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 5 / 31

・ロト ・ 日 ト ・ ヨ ト ・ ヨ ト ・ ヨ

э

6 / 31

ECT* (2017)

Summary

Leading neutron production in inclusive processes (dipole formalism)



Diego Spiering (IFUSP)

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

ECT* (2017)

6 / 31

Summary

Leading neutron production in inclusive processes (dipole formalism)



Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in inclusive processes (dipole formalism)



Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 6 / 31

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回

Leading neutron production in inclusive processes (dipole formalism)



Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 6 / 31

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回

Leading neutron production in inclusive processes (dipole formalism)



Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

< 注 ト イ 注 ト 注 少 Q (? ECT* (2017) 6 / 31

Image: A math a math

Leading neutron production in inclusive processes (dipole formalism)



Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

Image: A math a math

Leading neutron production in inclusive processes (dipole formalism)



Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 6 / 31

- 4 同 ト 4 ヨ ト 4 ヨ ト

Leading neutron production in inclusive processes (dipole formalism)



Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 6 / 31

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

$$\sigma_{\gamma^*\pi}^{inc}(\hat{x}, Q^2) = \int dz \int d^2 \vec{r} \sum_{L,T} |\psi_{L,T}(z, \vec{r}, Q^2)|^2 \sigma_{d\pi}(\hat{x}, \vec{r})$$

$$\hat{X} = rac{Q^2 + m_f^2}{\hat{W}^2 + Q^2} = rac{Q^2 + m_f^2}{(1 - x_L)W^2 + Q^2}$$

イロト イポト イヨト イヨト

- 34

7 / 31

ECT* (2017)



Diego Spiering (IFUSP)

$$\sigma_{\gamma^*\pi}^{inc}(\hat{x}, Q^2) = \int dz \int d^2 \vec{r} \sum_{L,T} |\psi_{L,T}(z, \vec{r}, Q^2)|^2 \sigma_{d\pi}(\hat{x}, \vec{r})$$

$$\hat{x} = rac{Q^2 + m_f^2}{\hat{W}^2 + Q^2} = rac{Q^2 + m_f^2}{(1 - x_L)W^2 + Q^2}$$

(日) (圖) (E) (E) (E)

ECT* (2017)

7 / 31

Photon wave function:

$$\begin{aligned} \left|\psi_{L}(\vec{r},Q^{2})\right|^{2} &= \frac{3\alpha_{em}}{2\pi^{2}} \sum_{f} e_{f}^{2} 4Q^{2} z^{2} (1-z)^{2} K_{0}^{2}(\epsilon r) \\ \left|\psi_{T}(\vec{r},Q^{2})\right|^{2} &= \frac{3\alpha_{em}}{2\pi^{2}} \sum_{f} e_{f}^{2} \left\{ \left[z^{2} + (1-z)^{2}\right] \epsilon^{2} K_{1}^{2}(\epsilon r) + m_{f}^{2} K_{0}^{2}(\epsilon r) \right\} \end{aligned}$$

Diego Spiering (IFUSP)

$$\sigma_{\gamma^*\pi}^{inc}(\hat{x}, Q^2) = \int dz \int d^2 \vec{r} \sum_{L,T} |\psi_{L,T}(z, \vec{r}, Q^2)|^2 \sigma_{d\pi}(\hat{x}, \vec{r})$$

$$\hat{x} = rac{Q^2 + m_f^2}{\hat{W}^2 + Q^2} = rac{Q^2 + m_f^2}{(1 - x_L)W^2 + Q^2}$$

イロト イポト イヨト イヨト

- 2

7 / 31

ECT* (2017)

Photon wave function:

$$\begin{aligned} \left|\psi_{L}(\vec{r},Q^{2})\right|^{2} &= \frac{3\alpha_{em}}{2\pi^{2}} \sum_{f} e_{f}^{2} 4Q^{2} z^{2} (1-z)^{2} \mathcal{K}_{0}^{2}(\epsilon r) \\ \left|\psi_{T}(\vec{r},Q^{2})\right|^{2} &= \frac{3\alpha_{em}}{2\pi^{2}} \sum_{f} e_{f}^{2} \Big\{ \big[z^{2} + (1-z)^{2}\big] \epsilon^{2} \mathcal{K}_{1}^{2}(\epsilon r) + m_{f}^{2} \mathcal{K}_{0}^{2}(\epsilon r) \Big\} \end{aligned}$$

Dipole-pion cross section:

$$\sigma_{d\pi}(\hat{x},\vec{r})=2\int d^2\vec{b}\,\mathcal{N}^{\pi}(\hat{x},\vec{r},\vec{b})$$

Diego Spiering (IFUSP)

$$\sigma_{\gamma^*\pi}^{inc}(\hat{x}, Q^2) = \int dz \int d^2 \vec{r} \sum_{L,T} \left| \psi_{L,T}(z, \vec{r}, Q^2) \right|^2 \sigma_{d\pi}(\hat{x}, \vec{r})$$

$$\hat{x} = \frac{Q^2 + m_f^2}{\hat{W}^2 + Q^2} = \frac{Q^2 + m_f^2}{(1 - x_L)W^2 + Q^2}$$

イロト イポト イヨト イヨト

- 2

7 / 31

ECT* (2017)

Photon wave function:

$$\begin{aligned} \left|\psi_{L}(\vec{r},Q^{2})\right|^{2} &= \frac{3\alpha_{em}}{2\pi^{2}} \sum_{f} e_{f}^{2} 4Q^{2} z^{2} (1-z)^{2} \mathcal{K}_{0}^{2}(\epsilon r) \\ \left|\psi_{T}(\vec{r},Q^{2})\right|^{2} &= \frac{3\alpha_{em}}{2\pi^{2}} \sum_{f} e_{f}^{2} \Big\{ \big[z^{2} + (1-z)^{2}\big] \epsilon^{2} \mathcal{K}_{1}^{2}(\epsilon r) + m_{f}^{2} \mathcal{K}_{0}^{2}(\epsilon r) \Big\} \end{aligned}$$

Dipole-pion cross section:

$$\sigma_{d\pi}(\hat{x},\vec{r})=2\int d^2\vec{b}\,\mathcal{N}^{\pi}(\hat{x},\vec{r},\vec{b})$$

Diego Spiering (IFUSP)

Image: A matrix

Summary

Leading neutron production in exclusive processes (dipole formalism)



Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

モン・モン・モン・シーン (2017) 8 / 31

Leading neutron production in exclusive processes (dipole formalism)



Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

-ECT* (2017) 8 / 31

▲ ▲

ECT* (2017)

8 / 31

Leading neutron production in exclusive processes (dipole formalism)



Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in exclusive processes (dipole formalism)



Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 8 / 31

ECT* (2017)

9 / 31

Photon-pion exclusive cross section

$$\sigma_{\gamma^*\pi}^{\text{exc}}(\hat{x}, Q^2) = \sum_{i=L,T} \int_{-\infty}^0 \frac{d\sigma_i}{d\hat{t}} d\hat{t} = \sum_{i=L,T} \int_{-\infty}^0 \left| \mathcal{A}_i^{\gamma^*\pi \to E\pi}(\hat{x}, Q^2, \Delta) \right|^2 d\hat{t}$$



Diego Spiering (IFUSP)

Photon-pion exclusive cross section

$$\sigma_{\gamma^*\pi}^{\text{exc}}(\hat{x}, Q^2) = \sum_{i=L,T} \int_{-\infty}^{0} \frac{d\sigma_i}{d\hat{t}} d\hat{t} = \sum_{i=L,T} \int_{-\infty}^{0} \left| \mathcal{A}_i^{\gamma^*\pi \to E\pi}(\hat{x}, Q^2, \Delta) \right|^2 d\hat{t}$$

Scattering amplitude: $\hat{t} = -\Delta^2$ $\hat{x} = \frac{Q^2 + m_1^2}{\hat{W}^2 + Q}$

$$= \frac{Q^2 + m_f^2}{\hat{W}^2 + Q^2} = \frac{Q^2 + m_f^2}{(1 - x_L)W^2 + Q^2}$$

イロト イポト イヨト イヨト

- 3

9 / 31

ECT* (2017)

$$\mathcal{A}_{L,T}^{\gamma^*\pi\to E\pi} = i \int dz \, d^2 \vec{r} \, d^2 \vec{b} \, e^{-i\left[\vec{b}-(1-z)\vec{r}\right]\cdot\vec{\Delta}} \left[\Psi_E^*\Psi(z,\vec{r},Q^2)\right]_{L,T} 2\,\mathcal{N}^{\pi}(\hat{x},\vec{r},\vec{b})$$

Diego Spiering (IFUSP)

ECT* (2017)

9 / 31

Photon-pion exclusive cross section

$$\sigma_{\gamma^*\pi}^{\text{exc}}(\hat{x}, Q^2) = \sum_{i=L,T} \int_{-\infty}^{0} \frac{d\sigma_i}{d\hat{t}} d\hat{t} = \sum_{i=L,T} \int_{-\infty}^{0} \left| \mathcal{A}_i^{\gamma^*\pi \to E\pi}(\hat{x}, Q^2, \Delta) \right|^2 d\hat{t}$$

Scattering amplitude: $\hat{t} = -\Delta^2 \qquad \qquad \hat{x} = \frac{Q^2 + m_f^2}{\hat{W}^2 + Q^2} = \frac{Q^2 + m_f^2}{(1 - x_L)W^2 + Q^2}$

$$\mathcal{A}_{L,T}^{\gamma^* \pi \to E\pi} = i \int dz \, d^2 \vec{r} \, d^2 \vec{b} \, e^{-i \left[\vec{b} - (1-z)\vec{r}\right] \cdot \vec{\Delta}} \left[\Psi_E^* \Psi(z, \vec{r}, Q^2)\right]_{L,T} 2 \mathcal{N}^{\pi}(\hat{x}, \vec{r}, \vec{b})$$

Overlap functions for Vector Mesons
$$(V = \rho, \phi, J/\psi)$$
: $\phi_{L,T} \equiv \phi_{L,T}(z,r)$
 $(\Psi_V^*\Psi)_L = \frac{\hat{e}_f e}{4\pi} \frac{N_c}{\pi} 2Qz(1-z)K_0(\epsilon r) \left[M_V \phi_L + \delta \frac{m_f^2 - \nabla_r^2}{M_V z(1-z)} \phi_L \right]$
 $(\Psi_V^*\Psi)_T = \frac{\hat{e}_f e}{4\pi} \frac{N_c}{\pi z(1-z)} \left\{ m_f^2 K_0(\epsilon r) \phi_T - \left[z^2 + (1-z)^2 \right] \epsilon K_1(\epsilon r) \partial_r \phi_T \right\}$

Diego Spiering (IFUSP)

Photon-pion exclusive cross section

$$\sigma_{\gamma^*\pi}^{\text{exc}}(\hat{x}, Q^2) = \sum_{i=L,T} \int_{-\infty}^{0} \frac{d\sigma_i}{d\hat{t}} d\hat{t} = \sum_{i=L,T} \int_{-\infty}^{0} \left| \mathcal{A}_i^{\gamma^*\pi \to E\pi}(\hat{x}, Q^2, \Delta) \right|^2 d\hat{t}$$

Scattering amplitude: $\hat{t} = -\Delta^2 \qquad \qquad \hat{x} = \frac{Q^2 + m_f^2}{\hat{W}^2 + Q^2} = \frac{Q^2 + m_f^2}{(1 - x_L)W^2 + Q^2}$

$$\mathcal{A}_{L,T}^{\gamma^*\pi\to E\pi} = i \int dz \, d^2\vec{r} \, d^2\vec{b} \, e^{-i\left[\vec{b}-(1-z)\vec{r}\right]\cdot\vec{\Delta}} \left[\Psi_E^*\Psi(z,\vec{r},Q^2)\right]_{L,T} 2\,\mathcal{N}^{\pi}(\hat{x},\vec{r},\vec{b})$$

Overlap functions for <u>DVCS</u> (real photon):

$$\left(\Psi_{\gamma}^{*}\Psi\right)_{T}^{f} = \frac{N_{c}\alpha_{em}e_{f}^{2}}{2\pi^{2}}\left\{\left[z^{2} + (1-z)^{2}\right]\epsilon_{1}K_{1}(\epsilon_{1}r)\epsilon_{2}K_{1}(\epsilon_{2}r) + m_{f}^{2}K_{0}(\epsilon_{1}r)K_{0}(\epsilon_{2}r)\right\}$$

$$\epsilon_i^2 = z(1-z)Q_i^2 + m_f^2$$

(日)

Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 9 / 31
Introduction

Photon-pion exclusive cross section

$$\sigma_{\gamma^*\pi}^{\text{exc}}(\hat{x}, Q^2) = \sum_{i=L,T} \int_{-\infty}^{0} \frac{d\sigma_i}{d\hat{t}} d\hat{t} = \sum_{i=L,T} \int_{-\infty}^{0} \left| \mathcal{A}_i^{\gamma^*\pi \to E\pi}(\hat{x}, Q^2, \Delta) \right|^2 d\hat{t}$$

Scattering amplitude: $\hat{t} = -\Delta^2$ $\hat{x} =$

$$\hat{x} = rac{Q^2 + m_f^2}{\hat{W}^2 + Q^2} = rac{Q^2 + m_f^2}{(1 - x_L)W^2 + Q^2}$$

$$\mathcal{A}_{L,T}^{\gamma^*\pi\to E\pi} = i \int dz \, d^2 \vec{r} \, d^2 \vec{b} \, e^{-i\left[\vec{b}-(1-z)\vec{r}\right]\cdot\vec{\Delta}} \left[\Psi_E^*\Psi(z,\vec{r},Q^2)\right]_{L,T} 2\mathcal{N}^{\pi}(\hat{x},\vec{r},\vec{b})$$

Overlap functions for <u>DVCS</u> (real photon):

$$\left(\Psi_{\gamma}^{*}\Psi\right)_{T}^{f} = \frac{N_{c}\alpha_{em}e_{f}^{2}}{2\pi^{2}}\left\{\left[z^{2} + (1-z)^{2}\right]\epsilon_{1}K_{1}(\epsilon_{1}r)\epsilon_{2}K_{1}(\epsilon_{2}r) + m_{f}^{2}K_{0}(\epsilon_{1}r)K_{0}(\epsilon_{2}r)\right\}$$

$$\epsilon_i^2 = z(1-z)Q_i^2 + m_f^2$$

イロト イポト イヨト イヨト

Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 9 / 31

 \Rightarrow

◆□▶ ◆□▶ ◆臣▶ ◆臣▶ 三臣 - のへ⊙

ECT* (2017)

10 / 31

Dipole-pion scattering amplitude

Main assumption

$$\underbrace{\mathcal{N}^{\pi}(\hat{x},\vec{r},\vec{b})}_{\text{pion}} = R_q \cdot \underbrace{\mathcal{N}^{p}(\hat{x},\vec{r},\vec{b})}_{\text{proton}}$$

Diego Spiering (IFUSP)

 \Rightarrow

◆□▶ ◆□▶ ◆臣▶ ◆臣▶ 三臣 - のへ⊙

ECT* (2017)

10 / 31

Dipole-pion scattering amplitude

Main assumption

$$\underbrace{\mathcal{N}^{\pi}(\hat{x}, \vec{r}, \vec{b})}_{\text{pion}} = R_{q} \cdot \underbrace{\mathcal{N}^{p}(\hat{x}, \vec{r}, \vec{b})}_{\text{proton}}$$

 $R_q = 2/3$

Diego Spiering (IFUSP)

◆□▶ ◆□▶ ◆臣▶ ◆臣▶ 臣 のへぐ ECT* (2017)

10 / 31

Dipole-pion scattering amplitude

$$\begin{array}{ll} \text{Main assumption} & \implies & \mathcal{N}^{\pi}(\hat{x},\vec{r},\vec{b}) = \textit{R}_{q} \cdot \mathcal{N}^{p}(\hat{x},\vec{r},\vec{b}) \\ & R_{q} = \text{cte} \quad \rightsquigarrow \quad 1/3 \leq \textit{R}_{q} \leq 2/3 \end{array}$$

Diego Spiering (IFUSP)

▲□▶ ▲□▶ ▲□▶ ▲□▶ ▲□ ● ● ●

ECT* (2017)

10 / 31

Dipole-pion scattering amplitude

$$\begin{array}{ll} \text{Main assumption} & \Longrightarrow & \mathcal{N}^{\pi}(\hat{x},\vec{r},\vec{b}) = R_q \cdot \mathcal{N}^p(\hat{x},\vec{r},\vec{b}) \\ & R_q = \text{cte} \end{array}$$

 $\mathcal{N}^p(\hat{x},ec{r},ec{b}) \Rightarrow$ contains all the information about the hadron wave function

Diego Spiering (IFUSP)

◆□▶ ◆□▶ ◆臣▶ ◆臣▶ 三臣 - のへ⊙

ECT* (2017)

10 / 31

Dipole-pion scattering amplitude

Main assumption
$$\implies \mathcal{N}^{\pi}(\hat{x}, \vec{r}, \vec{b}) = R_q \cdot \mathcal{N}^p(\hat{x}, \vec{r}, \vec{b})$$

 $R_q = \text{cte}$

 $\mathcal{N}^p(\hat{x}, ec{r}, ec{b}) \Rightarrow$ constrained by HERA data for inclusive and exclusive processes

Diego Spiering (IFUSP)

ECT* (2017)

10 / 31

Dipole-pion scattering amplitude

$$\begin{array}{ll} \text{Main assumption} & \Longrightarrow & \mathcal{N}^{\pi}(\hat{x},\vec{r},\vec{b}) = R_q \cdot \mathcal{N}^p(\hat{x},\vec{r},\vec{b}) \\ & R_q = \text{cte} \end{array}$$

 $\mathcal{N}^p(\hat{x}, ec{r}, ec{b}) \Rightarrow$ constrained by HERA data for inclusive and exclusive processes

Dipole-proton scattering amplitude

$$\mathcal{N}^{p}(\hat{x}, \vec{r}, \vec{b}) = \begin{cases} \mathcal{N}_{0} \left(\frac{r Q_{s}(b)}{2}\right)^{2 \left(\gamma_{s} + \frac{\ln(2/r Q_{s}(b))}{\kappa \lambda Y}\right)} & rQ_{s}(b) \leq 2\\ 1 - e^{-A \ln^{2}(B r Q_{s}(b))} & rQ_{s}(b) > 2 \end{cases}$$

Diego Spiering (IFUSP)

Dipole-pion scattering amplitude

$$\begin{array}{ll} \text{Main assumption} & \Longrightarrow & \mathcal{N}^{\pi}(\hat{x},\vec{r},\vec{b}) = R_q \cdot \mathcal{N}^p(\hat{x},\vec{r},\vec{b}) \\ & R_q = \text{cte} \end{array}$$

 $\mathcal{N}^p(\hat{x}, ec{r}, ec{b}) \Rightarrow$ constrained by HERA data for inclusive and exclusive processes

$$\mathcal{N}^{p}(\hat{x}, \vec{r}, \vec{b}) = \begin{cases} \mathcal{N}_{0} \left(\frac{r Q_{s}(b)}{2}\right)^{2 \left(\gamma_{s} + \frac{\ln(2/r Q_{s}(b))}{\kappa \lambda Y}\right)} & rQ_{s}(b) \leq 2\\ 1 - e^{-A \ln^{2}(B r Q_{s}(b))} & rQ_{s}(b) > 2 \end{cases}$$

BFKL close to the saturation regime

(日)

ECT* (2017)

10 / 31

Diego Spiering (IFUSP)

Dipole-pion scattering amplitude

$$\begin{array}{ll} \text{Main assumption} & \Longrightarrow & \mathcal{N}^{\pi}(\hat{x},\vec{r},\vec{b}) = R_q \cdot \mathcal{N}^p(\hat{x},\vec{r},\vec{b}) \\ & R_q = \mathsf{cte} \end{array}$$

 $\mathcal{N}^{p}(\hat{x}, ec{r}, ec{b}) \Rightarrow$ constrained by HERA data for inclusive and exclusive processes

$\mathcal{N}^{p}(\hat{x}, \vec{r}, \vec{b}) = \begin{cases} \mathcal{N}_{0} \left(\frac{r Q_{s}(b)}{2}\right)^{2 \left(\gamma_{s} + \frac{\ln(2/r Q_{s}(b))}{\kappa \lambda Y}\right)} & rQ_{s}(b) \leq 2\\ 1 - e^{-A \ln^{2}(B r Q_{s}(b))} & rQ_{s}(b) > 2 \end{cases}$

 $\mathsf{B}\mathsf{K}$ deeply in the saturation regime

・ロト ・ 同ト ・ ヨト ・ ヨト ・ ヨ

ECT* (2017)

10 / 31

Diego Spiering (IFUSP)

▲□▶ ▲□▶ ▲ □▶ ▲ □▶ ▲ □ ● ● ● ●

ECT* (2017)

10 / 31

Dipole-pion scattering amplitude

$$\begin{array}{ll} \text{Main assumption} & \Longrightarrow & \mathcal{N}^{\pi}(\hat{x},\vec{r},\vec{b}) = R_q \cdot \mathcal{N}^p(\hat{x},\vec{r},\vec{b}) \\ & R_q = \text{cte} \end{array}$$

 $\mathcal{N}^p(\hat{x}, ec{r}, ec{b}) \Rightarrow$ constrained by HERA data for inclusive and exclusive processes

Dipole-proton scattering amplitude

$$\mathcal{N}^{p}(\hat{x}, \vec{r}, \vec{b}) = \begin{cases} \mathcal{N}_{0} \left(\frac{r \, Q_{s}(b)}{2}\right)^{2} \left(\gamma_{s} + \frac{\ln(2/r \, Q_{s}(b))}{\kappa \, \lambda \, Y}\right) & rQ_{s}(b) \leq 2\\ 1 - e^{-A \, \ln^{2}(B \, r \, Q_{s}(b))} & rQ_{s}(b) > 2 \end{cases}$$

Saturation scale

$$Q_{s}(b) \equiv Q_{s}(\hat{x}, b) = \left(\frac{x_{0}}{\hat{x}}\right)^{\frac{\lambda}{2}} \left[\exp\left(-\frac{b^{2}}{2B_{CGC}}\right)\right]^{\frac{1}{2\gamma_{s}}}$$

Diego Spiering (IFUSP)

▲□▶ ▲□▶ ▲ □▶ ▲ □▶ ▲ □ ● ● ● ●

ECT* (2017)

10 / 31

Dipole-pion scattering amplitude

$$\begin{array}{ll} \text{Main assumption} & \Longrightarrow & \mathcal{N}^{\pi}(\hat{x},\vec{r},\vec{b}) = R_q \cdot \mathcal{N}^p(\hat{x},\vec{r},\vec{b}) \\ & R_q = \text{cte} \end{array}$$

 $\mathcal{N}^{p}(\hat{x}, \vec{r}, \vec{b}) \Rightarrow$ constrained by HERA data for inclusive and exclusive processes

- GBW ⇔ Golec-Biernat−Wüsthoff
- bCGC ⇔ Kowalski−Motyka−Watt
- DGLAP ⇔ Dokshitzer-Gribov-Lipatov-Altarelli-Parisi equation (CTEQ)

Diego Spiering (IFUSP)

Introduction

(日)(周)(日)(日)(日)(日)

ECT* (2017)

11 / 31

Absorptive corrections

$$\sigma(\gamma^*\pi \to X) = \mathcal{K}_{inc} \cdot \int dz \int d^2 \vec{r} \sum_{L,T} \left| \psi_{L,T}(z,\vec{r},Q^2) \right|^2 \sigma_{d\pi}(\hat{x},\vec{r})$$
$$\sigma(\gamma^*\pi \to E\pi) = \mathcal{K}_{exc} \cdot \frac{1}{16\pi} \sum_{L,T} \int_{-\infty}^0 \left| \mathcal{A}_{L,T}^{\gamma^*\pi \to E\pi}(\hat{x},\Delta) \right|^2 d\hat{t}$$

Diego Spiering (IFUSP)

ECT* (2017)

11 / 31

Absorptive corrections

$$\sigma(\gamma^*\pi \to X) = \mathcal{K}_{inc} \cdot \int dz \int d^2 \vec{r} \sum_{L,T} \left| \psi_{L,T}(z,\vec{r},Q^2) \right|^2 \sigma_{d\pi}(\hat{x},\vec{r})$$
$$\sigma(\gamma^*\pi \to E\pi) = \mathcal{K}_{exc} \cdot \frac{1}{16\pi} \sum_{L,T} \int_{-\infty}^0 \left| \mathcal{A}_{L,T}^{\gamma^*\pi \to E\pi}(\hat{x},\Delta) \right|^2 d\hat{t}$$

Open questions

Diego Spiering (IFUSP)

◆□▶ ◆□▶ ◆臣▶ ◆臣▶ 臣 の�?

ECT* (2017)

11 / 31

Absorptive corrections

$$\sigma(\gamma^*\pi \to X) = \mathcal{K}_{inc} \cdot \int dz \int d^2 \vec{r} \sum_{L,T} \left| \psi_{L,T}(z,\vec{r},Q^2) \right|^2 \sigma_{d\pi}(\hat{x},\vec{r})$$
$$\sigma(\gamma^*\pi \to E\pi) = \mathcal{K}_{exc} \cdot \frac{1}{16\pi} \sum_{L,T} \int_{-\infty}^0 \left| \mathcal{A}_{L,T}^{\gamma^*\pi \to E\pi}(\hat{x},\Delta) \right|^2 d\hat{t}$$

$$\begin{array}{c} \mathsf{Open} \\ \mathsf{questions} \end{array} \Rightarrow \begin{cases} \mathcal{K}_{\mathsf{inc}} \stackrel{?}{=} \mathcal{K}_{\mathsf{exc}} \end{cases} \end{cases}$$

Diego Spiering (IFUSP)

◆□> ◆圖> ◆国> ◆国> □ 国

ECT* (2017)

11 / 31

Absorptive corrections

$$\sigma(\gamma^*\pi \to X) = \mathcal{K}_{inc} \cdot \int dz \int d^2 \vec{r} \sum_{L,T} \left| \psi_{L,T}(z,\vec{r},Q^2) \right|^2 \sigma_{d\pi}(\hat{x},\vec{r})$$
$$\sigma(\gamma^*\pi \to E\pi) = \mathcal{K}_{exc} \cdot \frac{1}{16\pi} \sum_{L,T} \int_{-\infty}^0 \left| \mathcal{A}_{L,T}^{\gamma^*\pi \to E\pi}(\hat{x},\Delta) \right|^2 d\hat{t}$$

$$\begin{array}{c} \mathsf{Open} \\ \mathsf{questions} \end{array} \Rightarrow \begin{cases} \mathcal{K}_{\mathit{inc}} \stackrel{?}{=} \mathcal{K}_{\mathit{exc}} \Leftrightarrow \exists \mathcal{K}? \end{cases} \end{cases}$$

Diego Spiering (IFUSP)

(日)(周)(日)(日)(日)(日)

ECT* (2017)

11 / 31

Absorptive corrections

$$\sigma(\gamma^*\pi \to X) = \mathcal{K}_{inc} \cdot \int dz \int d^2 \vec{r} \sum_{L,T} \left| \psi_{L,T}(z,\vec{r},Q^2) \right|^2 \sigma_{d\pi}(\hat{x},\vec{r})$$
$$\sigma(\gamma^*\pi \to E\pi) = \mathcal{K}_{exc} \cdot \frac{1}{16\pi} \sum_{L,T} \int_{-\infty}^0 \left| \mathcal{A}_{L,T}^{\gamma^*\pi \to E\pi}(\hat{x},\Delta) \right|^2 d\hat{t}$$

$$\begin{array}{l} \text{Open} \\ \text{questions} \end{array} \Rightarrow \begin{cases} \mathcal{K}_{inc} \stackrel{?}{=} \mathcal{K}_{exc} \Leftrightarrow \exists \mathcal{K}? \\ \mathcal{K}_{inc} = \mathcal{K}_{inc}(\hat{W}, x_L, Q^2) \\ \mathcal{K}_{exc} = \mathcal{K}_{exc}(\hat{W}, x_L, Q^2) \end{cases}$$

Diego Spiering (IFUSP)

Absorptive corrections

$$\sigma(\gamma^*\pi \to X) = \mathcal{K}_{inc} \cdot \int dz \int d^2 \vec{r} \sum_{L,T} |\psi_{L,T}(z,\vec{r},Q^2)|^2 \sigma_{d\pi}(\hat{x},\vec{r})$$
$$\sigma(\gamma^*\pi \to E\pi) = \mathcal{K}_{exc} \cdot \frac{1}{16\pi} \sum_{L,T} \int_{-\infty}^0 |\mathcal{A}_{L,T}^{\gamma^*\pi \to E\pi}(\hat{x},\Delta)|^2 d\hat{t}$$

$$\begin{array}{l} \text{Open} \\ \text{questions} \end{array} \Rightarrow \begin{cases} \mathcal{K}_{inc} \stackrel{?}{=} \mathcal{K}_{exc} \Leftrightarrow \exists \mathcal{K}? & \text{Our assumption:} \\ \mathcal{K}_{inc} = \mathcal{K}_{inc}(\hat{W}, x_L, Q^2) & \mathcal{K} = \text{cte} \\ \mathcal{K}_{exc} = \mathcal{K}_{exc}(\hat{W}, x_L, Q^2) & (0.5 \leq \mathcal{K} \leq 1.0) \end{cases}$$

Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

◆□ > ◆□ > ◆臣 > ◆臣 > ─ 臣 ─ のへ⊙ ECT* (2017)

11 / 31

hh collisions

Results for a

Summary

Results for electron-proton collisions



Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

< □ > < A > >

ECT* (2017) 12 / 31

Results for **inclusive** processes: flux of pions



Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 13 / 31

Summai

Results for **inclusive** processes: $\gamma^*\pi$ interaction



Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 14 / 31

Results for **inclusive** processes: \mathcal{K} and R_q dependence





Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 15 / 31

Results for **inclusive** processes: \mathcal{K} and R_a dependence





Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 15 / 31

Results for **inclusive** processes: \mathcal{K} and R_a dependence



Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 15 / 31

イロト 不得下 イヨト イヨト 二日

ECT* (2017)

16 / 31

Results for **exclusive** processes: constraining the \mathcal{K} -factor

Initially, we have assumed that: $R_q = 2/3$ (upper limit)

Diego Spiering (IFUSP)

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

ECT* (2017)

16 / 31

Summary

Results for **exclusive** processes: constraining the \mathcal{K} -factor

Initially, we have assumed that: $R_q = 2/3$ (upper limit)

Our strategy to constrain the \mathcal{K} -factor: For a given model of the pion flux, R_q and dipole scattering amplitude, we estimate the total cross section. The value of \mathcal{K} will be the value necessary to make our predictions consistent with the HERA data.

Diego Spiering (IFUSP)

イロト イポト イヨト イヨト 二日

ECT* (2017)

16 / 31

Results for **exclusive** processes: constraining the \mathcal{K} -factor

Initially, we have assumed that: $R_q = 2/3$ (upper limit)

Our strategy to constrain the \mathcal{K} -factor: For a given model of the pion flux, R_q and dipole scattering amplitude, we estimate the total cross section. The value of \mathcal{K} will be the value necessary to make our predictions consistent with the HERA data.

Important to remember that:

$$\sigma(\gamma^*\pi o E\pi) \propto \mathcal{K} \cdot R_q^2$$

So, if for example $R_q = 1/3$, then:

$$\mathcal{K}(R_q=1/3) = 4 \cdot \mathcal{K}(R_q=2/3)$$

Diego Spiering (IFUSP)

Results for **exclusive** processes: flux of pions



Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 17 / 31

Summary

Results for **exclusive** processes: $\gamma^*\pi$ interaction



$$W = 60 \text{ GeV}$$
 and $Q^2 = 0.04 \text{ GeV}^2$.

Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 18 / 31

- ∃ →

ECT* (2017)

19 / 31

Results for **exclusive** processes: upper and lower bounds

Bounds associated with the experimental uncertainty present in the H1 data.



$$W = 60 \text{ GeV}$$
 and $Q^2 = 0.04 \text{ GeV}^2$.

Diego Spiering (IFUSP)

ECT* (2017)

20 / 31

Results for **exclusive** processes: testing \mathcal{K} -factor

A cross-check: the same range of \mathcal{K} to describe different H1 data.



$$W = 60 \text{ GeV}$$
 and $Q^2 = 0.04 \text{ GeV}^2$.

Diego Spiering (IFUSP)

Results for **exclusive** processes: predictions for HERA



W = 60 GeV and $p_T < 0.2$ GeV:

$$\begin{aligned} \sigma(\gamma p \to \phi \pi n) &= 25.47 \pm 3.70 \text{ nb} & (Q^2 = 0.04 \text{ GeV}^2) \\ \sigma(\gamma p \to J/\psi \pi n) &= 0.22 \pm 0.03 \text{ nb} & (Q^2 = 0.04 \text{ GeV}^2) \\ \sigma(\gamma p \to \gamma \pi n) &= 0.008 \pm 0.001 \text{ nb} & (Q^2 = 10.0 \text{ GeV}^2) \end{aligned}$$

Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 21 / 31

Summary

22 / 31



Summary

Predictions for future *ep* colliders: Feynman scaling in inclusive processes Linear 0.5 $Q^2 = 2 \text{ GeV}^2$ $Q^2 = 2 \text{ GeV}^2$ $Q^2 = 2 \text{ GeV}^2$



22 / 31

Predictions for future *ep* colliders: Feynman scaling in inclusive processes Linear



Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 22 / 31

Predictions for future *ep* colliders: Feynman scaling in inclusive processes Linear



Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 22 / 31

Summary



Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 22 / 31


Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 22 / 31



Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 22 / 31



Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 22 / 31

Introduction

イロト イポト イヨト イヨト

ECT* (2017)

23 / 31

Hadron-hadron collisions at large impact parameters

Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

Introduction

Summary

Photon-induced interactions in hadron-hadron collisions (exclusive production)



 $\sigma(\gamma h_2 \to V + \pi + n)$

Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 24 / 31

Photon-induced interactions in hadron-hadron collisions (exclusive production)



$$\frac{d\sigma(h_1+h_2\to h_3+V+\pi+n)}{dY} = \left[\omega \frac{dN}{d\omega}\Big|_{h_1}\sigma(\gamma h_2\to V+\pi+n)\right]_{\omega_L}$$

Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 24 / 31

Image: A math a math

Photon-induced interactions in hadron-hadron collisions (exclusive production)



 $\frac{d\sigma(h_1 + h_2 \rightarrow h_3 + V + \pi + n)}{dY} = \left[\overbrace{\omega \frac{dN}{d\omega}}^{\text{photon flux}} \sigma(\gamma h_2 \rightarrow V + \pi + n) \right]_{\omega_L}$

Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 24 / 31

Photon-induced interactions in hadron-hadron collisions (exclusive production)



Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 24 / 31

Results for exclusive VM production associated with a leading neutron at *pp* collisions



Results for exclusive VM production associated with a leading neutron at pA collisions

There is a Z^2 enhancement on the photon flux of the nucleus.



Results for exclusive VM production associated with a leading neutron at pp and pA collisions

$p + p \rightarrow n + p + V + \pi$

σ [nb]	$\sqrt{s} = 0.2 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 0.5 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$
ρ	14.34	25.98	106.12	130.14
ϕ	2.15	4.21	19.63	24.42
J/ψ	0.0049	0.022	0.30	0.42

$p + A \rightarrow n + A + V + \pi$

σ [nb]	$\sqrt{s} = 0.2 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 0.5 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 5.0 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 8.8 \text{ TeV}$
ρ	10807.00	24518.30	121043.00	163821.00
ϕ	1278.41	3386.65	20403.80	28445.60
J/ψ	0.23	4.65	159.61	276.16

Where we have used the central value $\mathcal{K}_{med}.$

Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 27 / 31

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Results for exclusive VM production associated with a leading neutron at pp and pA collisions

$p + p \rightarrow n + p + V + \pi$

σ [nb]	$\sqrt{s} = 0.2 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 0.5 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 13 { m TeV}$
ρ	14.34	25.98	106.12	130.14
ϕ	2.15	4.21	19.63	24.42
J/ψ	0.0049	0.022	0.30	0.42

 $p + A \rightarrow n + A + V + \pi$

σ [nb]	$\sqrt{s} = 0.2 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 0.5 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 5.0 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 8.8 \text{ TeV}$
ρ	10807.00	24518.30	121043.00	163821.00
ϕ	1278.41	3386.65	20403.80	28445.60
J/ψ	0.23	4.65	159.61	276.16

 ρ production on LHC (run 2): $\sim 10^5$ nb.

Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 27

▲□▶ ▲□▶ ▲三▶ ▲三▶ 三三 ろの⊙

27 / 31

Results for exclusive VM production associated with a leading neutron at pp and pA collisions

$p + p \rightarrow n + p + V + \pi$

σ [nb]	$\sqrt{s} = 0.2 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 0.5 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 13 { m TeV}$
ρ	14.34	25.98	106.12	130.14
ϕ	2.15	4.21	19.63	24.42
J/ψ	0.0049	0.022	0.30	0.42

$p + A \rightarrow n + A + V + \pi$

σ [nb]	$\sqrt{s} = 0.2 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 0.5 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 5.0 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 8.8 \text{ TeV}$
ρ	10807.00	24518.30	121043.00	163821.00
ϕ	1278.41	3386.65	20403.80	28445.60
J/ψ	0.23	4.65	159.61	276.16

The case with a leading neutron is smaller by $\sim 10^2$ of magnitude (*pp/pA*).

Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 27 / 31



• The color dipole formalism can be used to describe the inclusive and exclusive processes with a leading neutron at HERA.

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

・ロト ・ 理 ト ・ ヨ ト ・ ヨ ト

- 3

28 / 31

ECT* (2017)



- The color dipole formalism can be used to describe the inclusive and exclusive processes with a leading neutron at HERA.
- The nonlinear effects in the QCD dynamics imply Feynman scaling at large energies.

イロト イポト イヨト イヨト

- 3

28 / 31

ECT* (2017)



- The color dipole formalism can be used to describe the inclusive and exclusive processes with a leading neutron at HERA.
- The nonlinear effects in the QCD dynamics imply Feynman scaling at large energies.
- The analysis of vector meson production associated with leading neutron in γp interactions at pp and pA collisions is an anternative way to study leading neutrons process (the experimental analysis of this process is, in principle, feasible).

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

(日) (同) (日) (日) (日)

- 3

28 / 31

ECT* (2017)



- The color dipole formalism can be used to describe the inclusive and exclusive processes with a leading neutron at HERA.
- The nonlinear effects in the QCD dynamics imply Feynman scaling at large energies.
- The analysis of vector meson production associated with leading neutron in γp interactions at pp and pA collisions is an anternative way to study leading neutrons process (the experimental analysis of this process is, in principle, feasible).

Thank you for your attention!

- 3

28 / 31

ECT* (2017)

イロト イポト イヨト イヨト

Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

Introduction	ep collisions	Results for <i>ep</i>	hh collisions	Results for <i>hh</i>	Summary

Leading neutron production in *ep*, *pp* and *pA* collisons ECT* (2017) 28 / 31

・ロト・(型)・(型)・(型)・(ロ)・

Flux of pions / Pion splitting function



Results for **inclusive** processes: Q^2 dependence



Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 29 / 31

Predictions for future ep colliders: Typical values of Bjorken-x



Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 29 / 31

 J/ψ

Predictions for future *ep* colliders

Dependence on the energy for exclusive processes:



 $[bCGC and f_3(y)]$



$$Q^2=5\,\,{
m GeV}^2$$
, and $p_{\mathcal{T}}<0.2\,\,{
m GeV}^2$

 $\sigma(\gamma p
ightarrow
ho \pi n) = 6.55 \pm 0.95 \text{ nb}$ $\sigma(\gamma p
ightarrow \phi \pi n) = 1.71 \pm 0.25 \text{ nb}$ $\sigma(\gamma p
ightarrow J/\psi \pi n) = 1.20 \pm 0.17 \text{ nb}$ $\sigma(\gamma p
ightarrow \gamma \pi n) = 0.16 \pm 0.002 \text{ nb}$

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 30 / 31

0

Diego Spiering (IFUSP)

Results for **exclusive** processes: wave function dependence



Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 31 / 31

Introduction

ep collisions

Results for *ep*

hh collision

Resu

Summ

QCD (regimes)



Diego Spiering (IFUSP)

Leading neutron production in ep, pp and pA collisons

ECT* (2017) 31 / 31