

Генератор событий HARDPING: процессы образования частиц в жестких взаимодействиях лептонов и адронов с ядрами при высоких энергиях

**А.Е. Иванов**

семинар ОФВЭ ПИЯФ  
18 марта 2014

# План

- Введение: Монте-Карло генератор событий HARDPING
- HARDPING: взаимодействие адронов образованных после жесткого взаимодействия в лептон-ядерном рассеянии и длина формирования адронов. Сравнение с данными эксперимента HERMES и EMC
- HARDPING: мягкие перерассеяния и эффекты торможения налетающих протонов до жесткого соударения с образованием лептонных пар в протон-ядерном взаимодействии (процесс Дрелла-Яна на ядрах). Сравнение с данными эксперимента E866
- Влияние ядерных эффектов при прецизионном измерении кваркового моря в ядрах в процессах Дрелла-Яна в условиях эксперимента E906.

# Монте-Карло генератор событий HARDPING

**HARDPING 1.0:** протон - ядерные взаимодействия с образованием лептонных пар (процесс Дрелла-Яна). Сравнение с экспериментом E866 позволило зафиксировать параметры мягких взаимодействий налетающих кварков с ядерной средой, такие как сечение составляющего кварк-нуклонного взаимодействия, средний поперечный импульс составляющего кварка в нуклоне и средний поперечный импульс партона в нуклоне. Были учтены эффекты энергетических потерь налетающих кварков.

*(М.Е. Завацкий, М.М. Рыжинский и др.)*

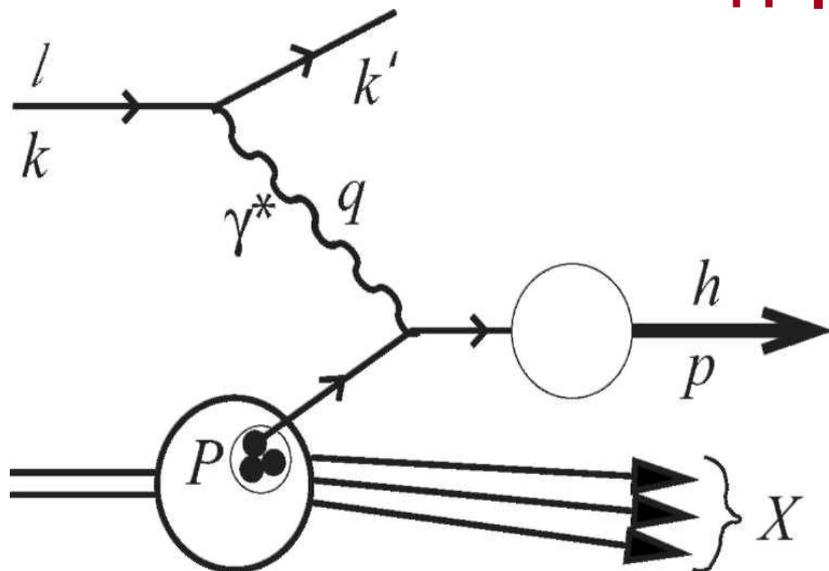
**HARDPING 2.0:** лептон - ядерные взаимодействия. Сравнение с данными HERMES и EMC позволило уточнить параметры HARDPING 1.0

*(А.Е. Иванов, В.А. Мурзин и др.)*

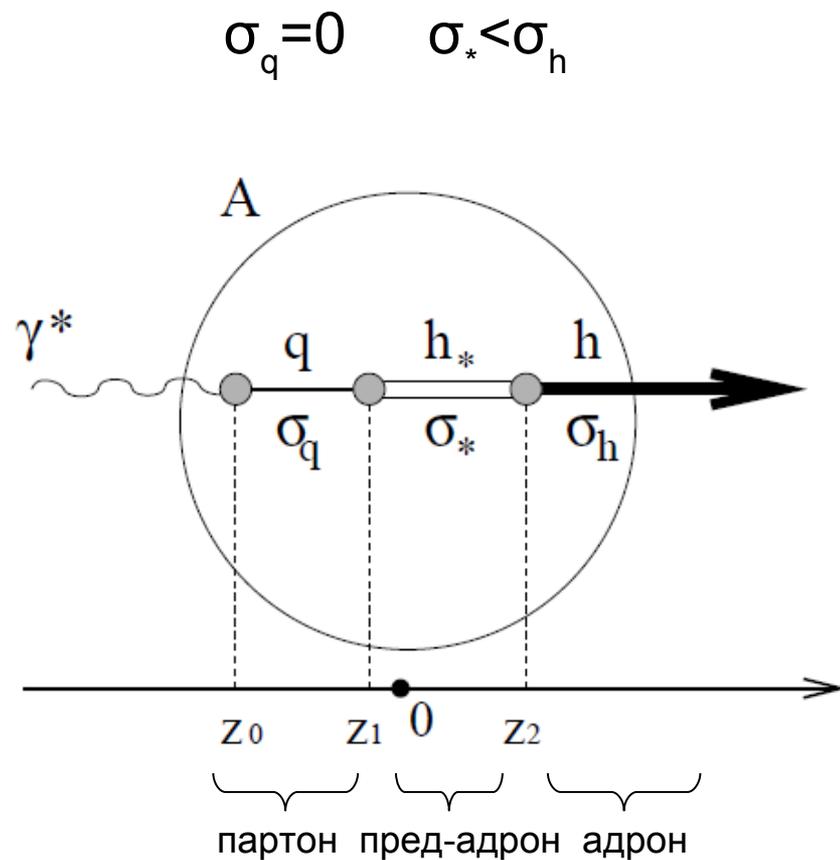
**HARDPING 3.0:** протон-ядерные соударения с образованием адронов при значениях параметров, зафиксированных в HARDPING 2.0

*(А.Е. Иванов, Д.П. Суетин и др.)*

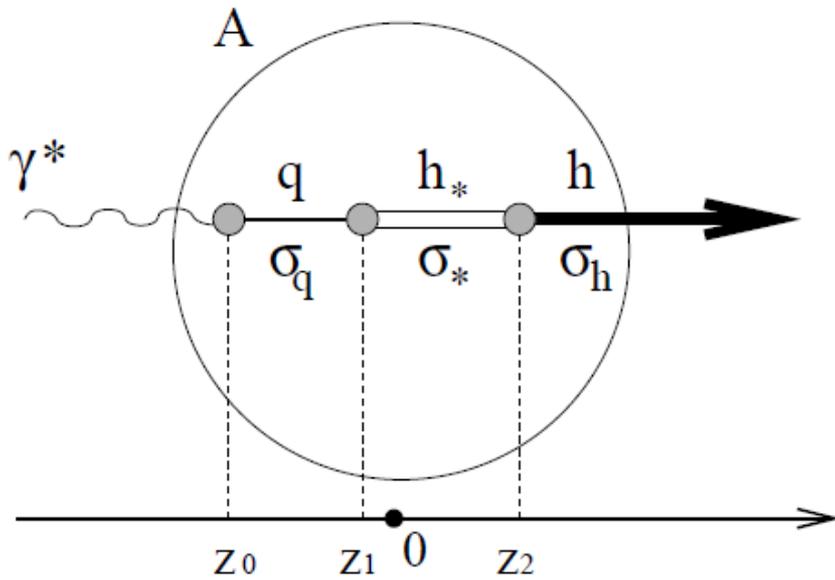
# Взаимодействия образованных адронов после жесткого соударения: лептон - ядерное рассеяние



- Две стадии образования адрона из выбитого партона:
- Формирование пред-адронного состояния (формирование составляющего кварка)
  - Формирование конечного адрона из пред-адронного состояния



# Взаимодействия образованных адронов после жесткого соударения: лептон - ядерное рассеяние



на участке  $z_0 \rightarrow z_1$  кварк теряет энергию в основном за счет пертурбативного излучения глюонов

на участке  $z_1 \rightarrow z_2$  потери энергии происходят за счет образования струн

$$\Delta E = -k_s L$$

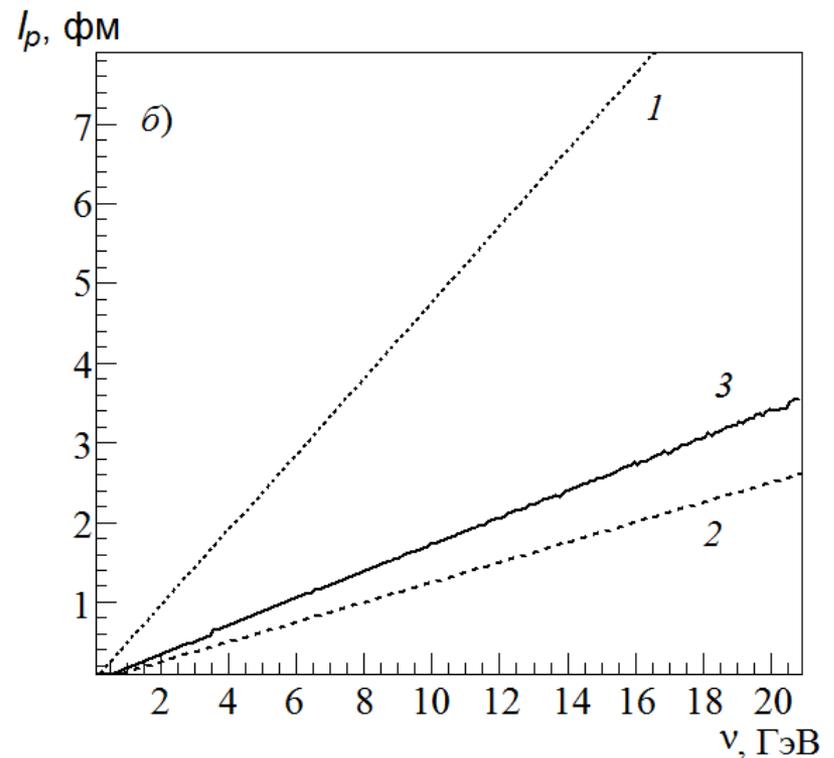
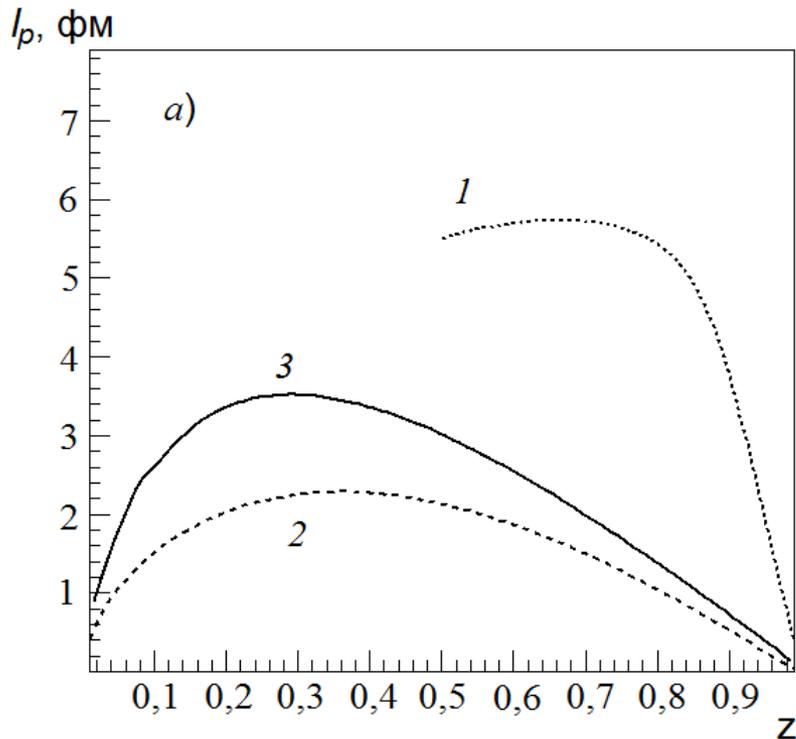
# Длина формирования

Зависимость длины формирования от доли энергии виртуального фотона и энергии виртуального фотона в жестком  $IA$  взаимодействии

1. Пертурбативный (Копелиович Б.З. и др.)
2. Непертурбативный (Пирнер Г.Дж. и др.)
3. HARDPING (Бердников Я.А. и др)

$$z = \frac{pP}{qP} = \frac{E_h}{\nu} = \frac{E_h}{E_q}$$

$$E_q = \nu = \frac{qP}{\sqrt{P^2}} = E' - E$$



# Сравнение HARDPING с экспериментом HERMES: отношения выходов заряженных адронов для мишени N<sup>14</sup>

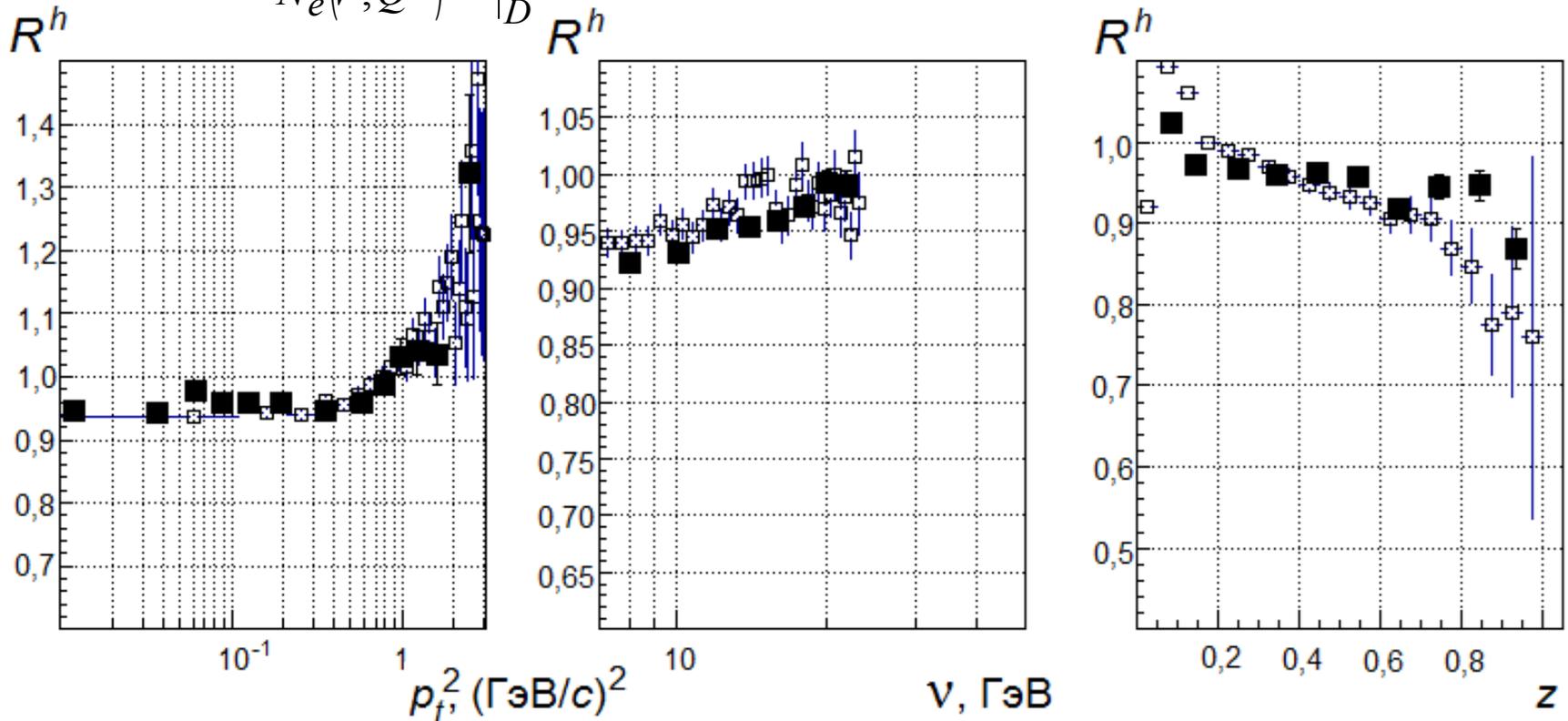
$$R^h(z, \nu, p_t^2, Q^2) = \frac{N_h(z, \nu, p_t^2, Q^2)}{N_e(\nu, Q^2)} \Big|_A \Big|_D$$

e<sup>+</sup>(27,6 ГэВ) + A --> e<sup>+</sup> + hh

$\sigma^{qN} = 7$  мбн

$k_s = 1,7$  ГэВ/фм

■ HERMES  
□ HARDPING

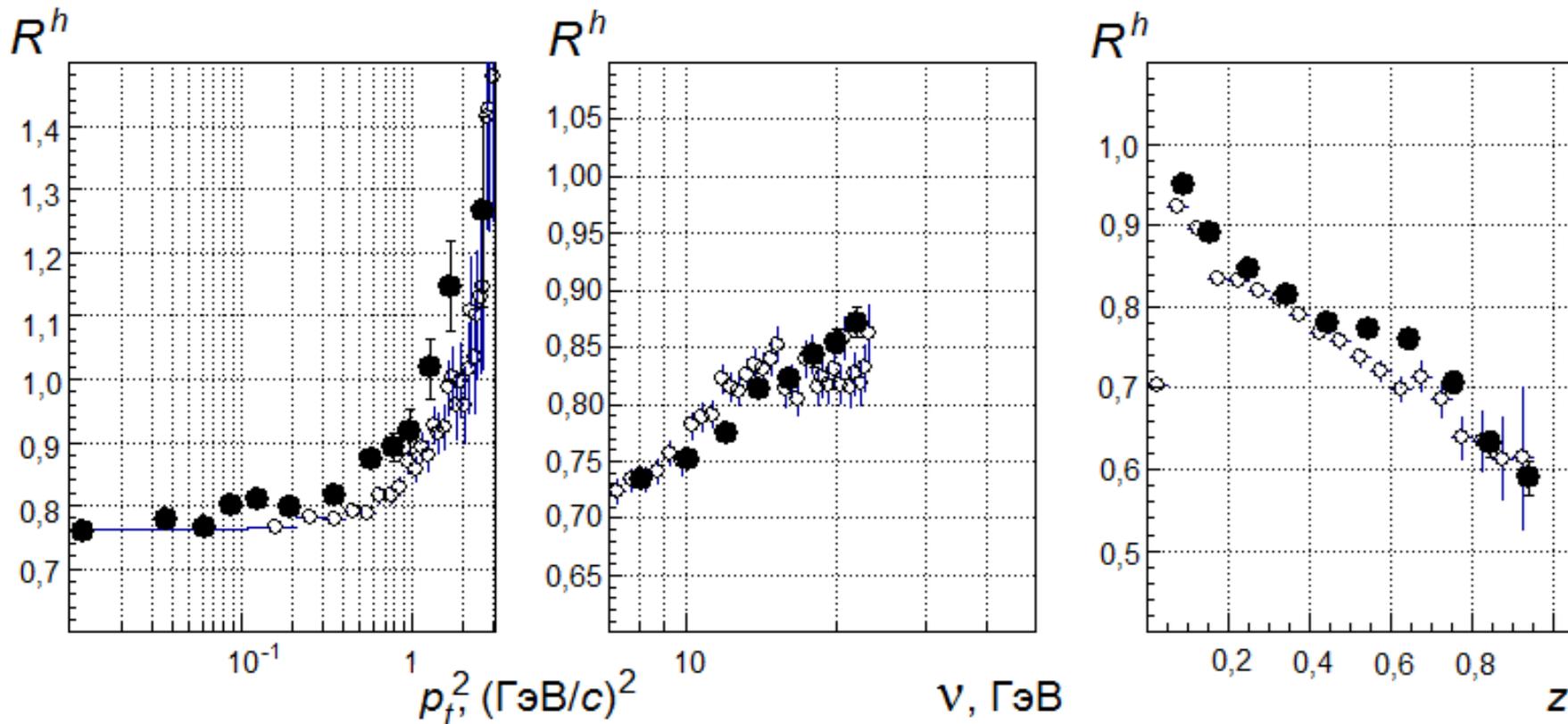


# Сравнение HARDPING с экспериментом HERMES: отношения выходов заряженных адронов для мишени $\text{Kr}^{84}$

● HERMES  
○ HARDPING

$\sigma^{qN} = 7$  мбн

$k_s = 1,7$  ГэВ/фм

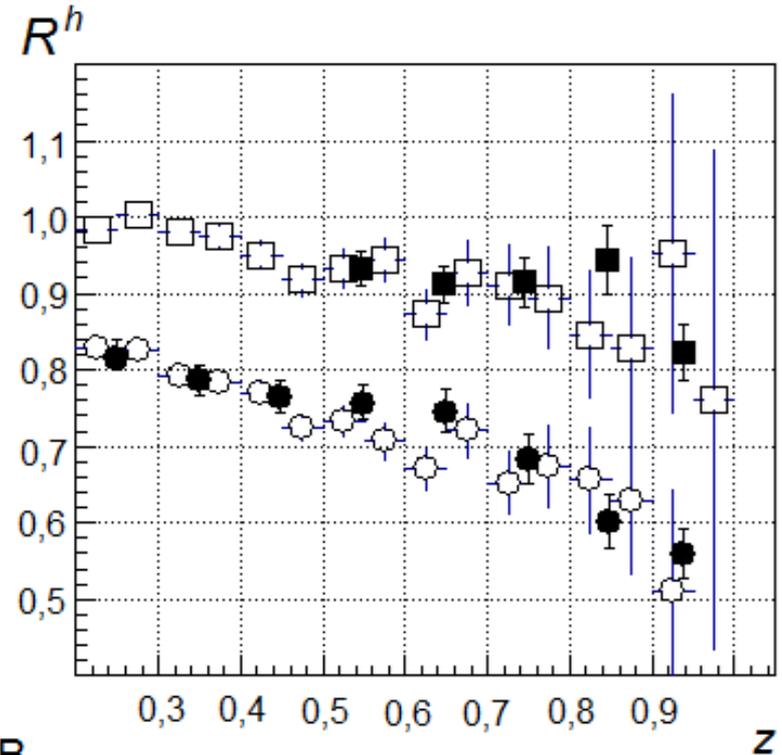
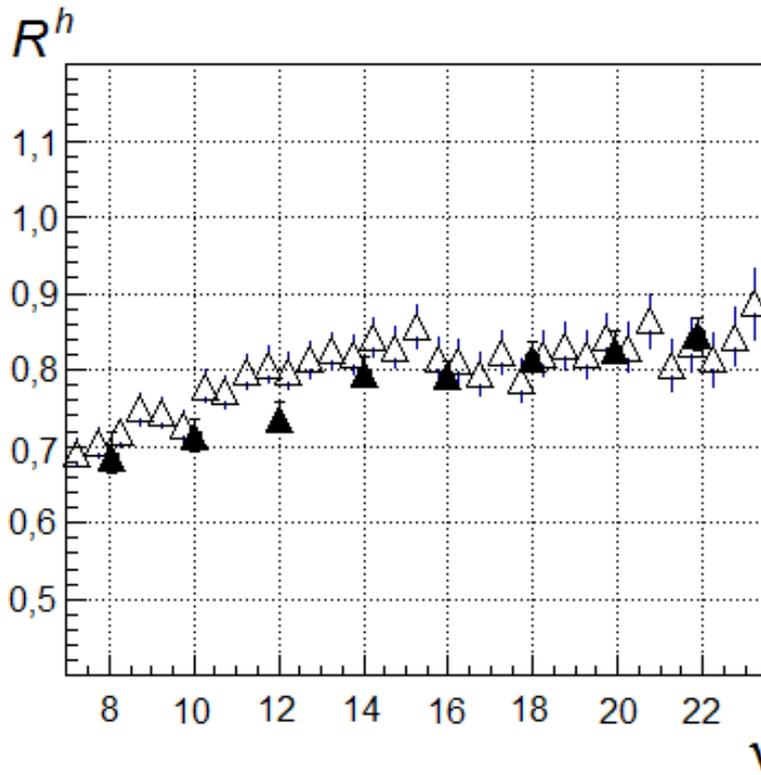


# Сравнение HARDPING с экспериментом HERMES: ОТНОШЕНИЯ ВЫХОДОВ $\pi^+$ МЕЗОНОВ

$$\sigma^{qN} = 7 \text{ мбн}$$

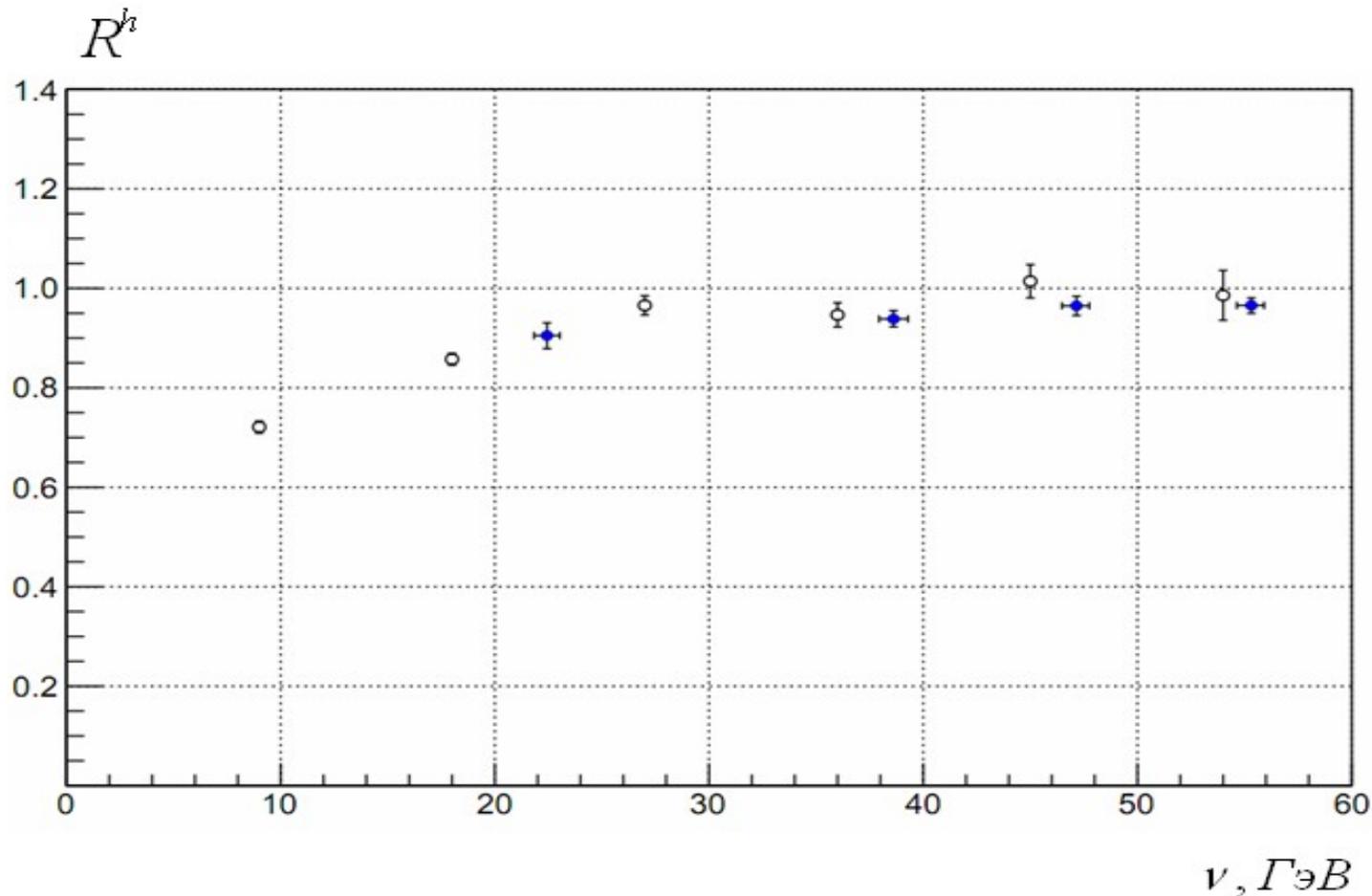
$k_s = 1,7 \text{ ГэВ}/\phi_M$ 
▲ HERMES Kr
△ HARDPING Kr

● HERMES Kr
■ HERMES N  
○ HARDPING Kr
□ HARDPING N



# Сравнение HARDPING с экспериментом EMC

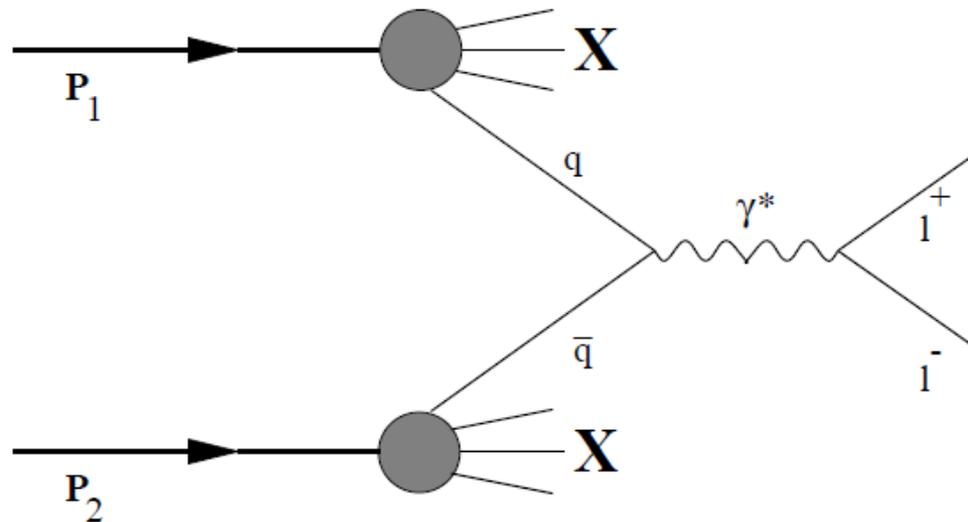
Зависимость отношения сечений образования заряженных адронов на ядре Си и D в зависимости от энергии виртуального фотона



$\mu^-(280 \text{ ГэВ}) + A \rightarrow \mu' + hh$

# HARDPING 1.0: взаимодействие адронов до жесткого соударения в рассеянии протонов на ядрах (процесс Дрелла-Яна)

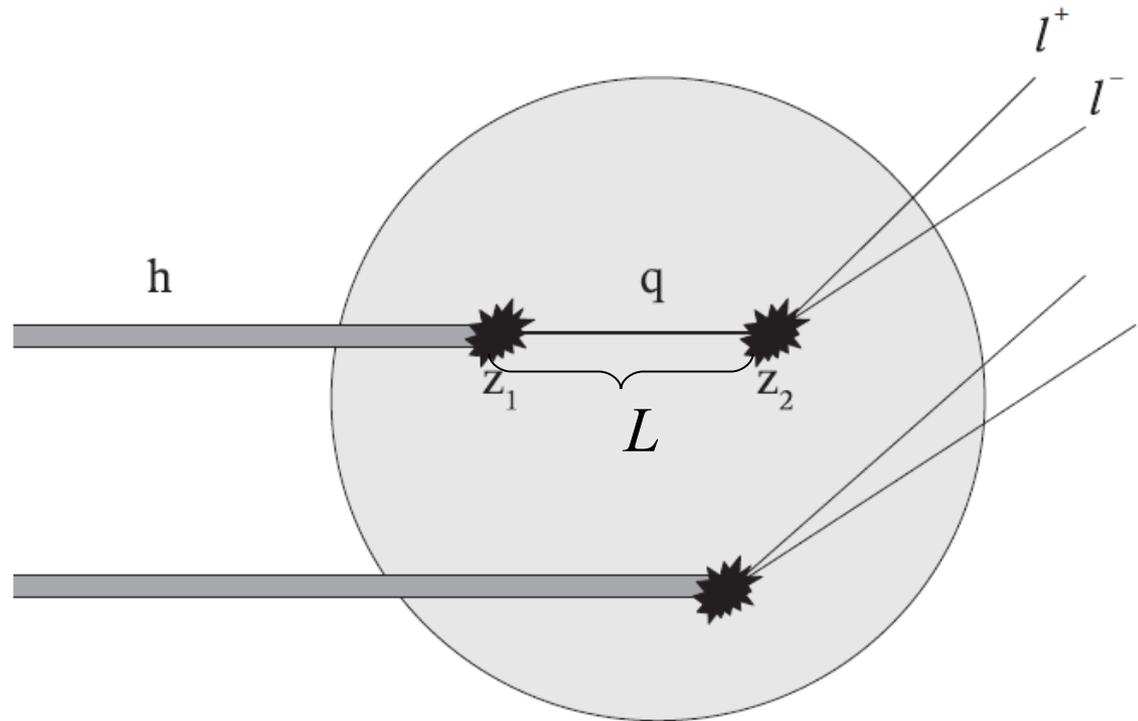
- Многократные мягкие перерассеяния кварка налетающего адрона дают основной вклад в наблюдаемую  $A$ -зависимость образовавшихся лептонов
- Ядерные эффекты: мягкие перерассеяния, потери энергии кварков в ядре, экранирование структурных функций внутриядерных нуклонов



# HARDPING 1.0:

## Энергетические потери налетающего кварка

$$\Delta E = -k_s L$$



$k_s$  [ГэВ/фм] — величина удельных потерь энергии

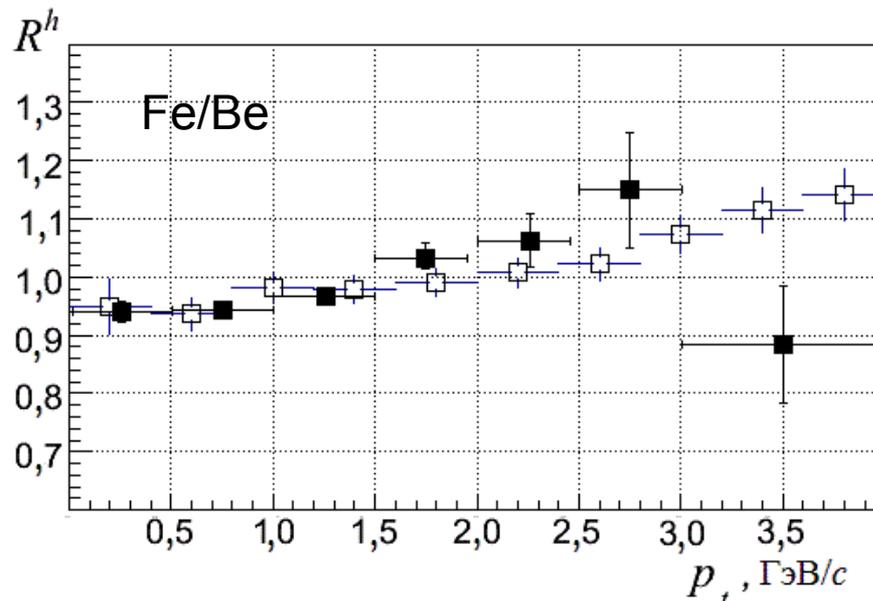
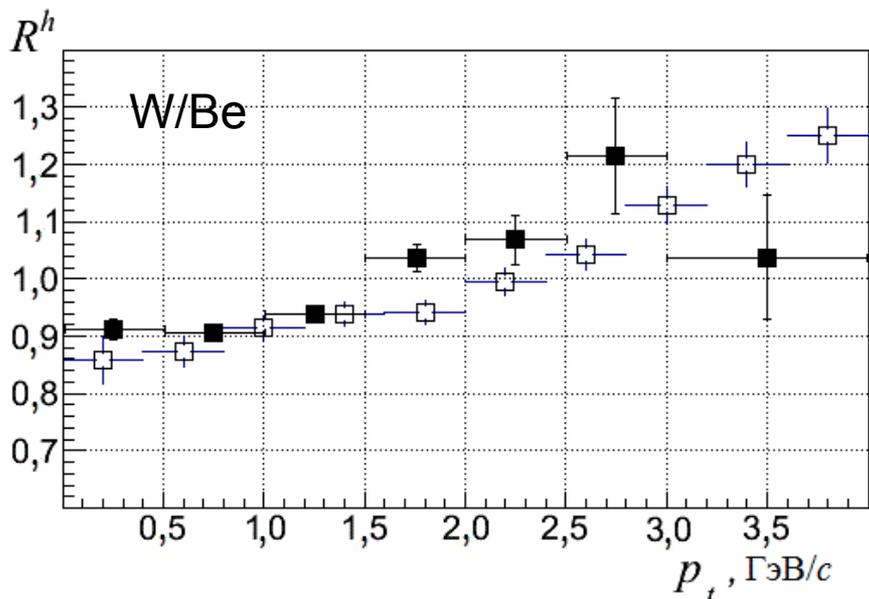
за счет натяжения струны

$L$  — длина пути, пройденного кварком

# Сравнение HARDPING с экспериментом E866: $pA \rightarrow l^+l^- X$ 800 ГэВ

Отношение сечений рождения лептонных пар, на тяжелом и легком ядрах, как функция поперечного импульса пары

■ E866  
 □ HARDPING



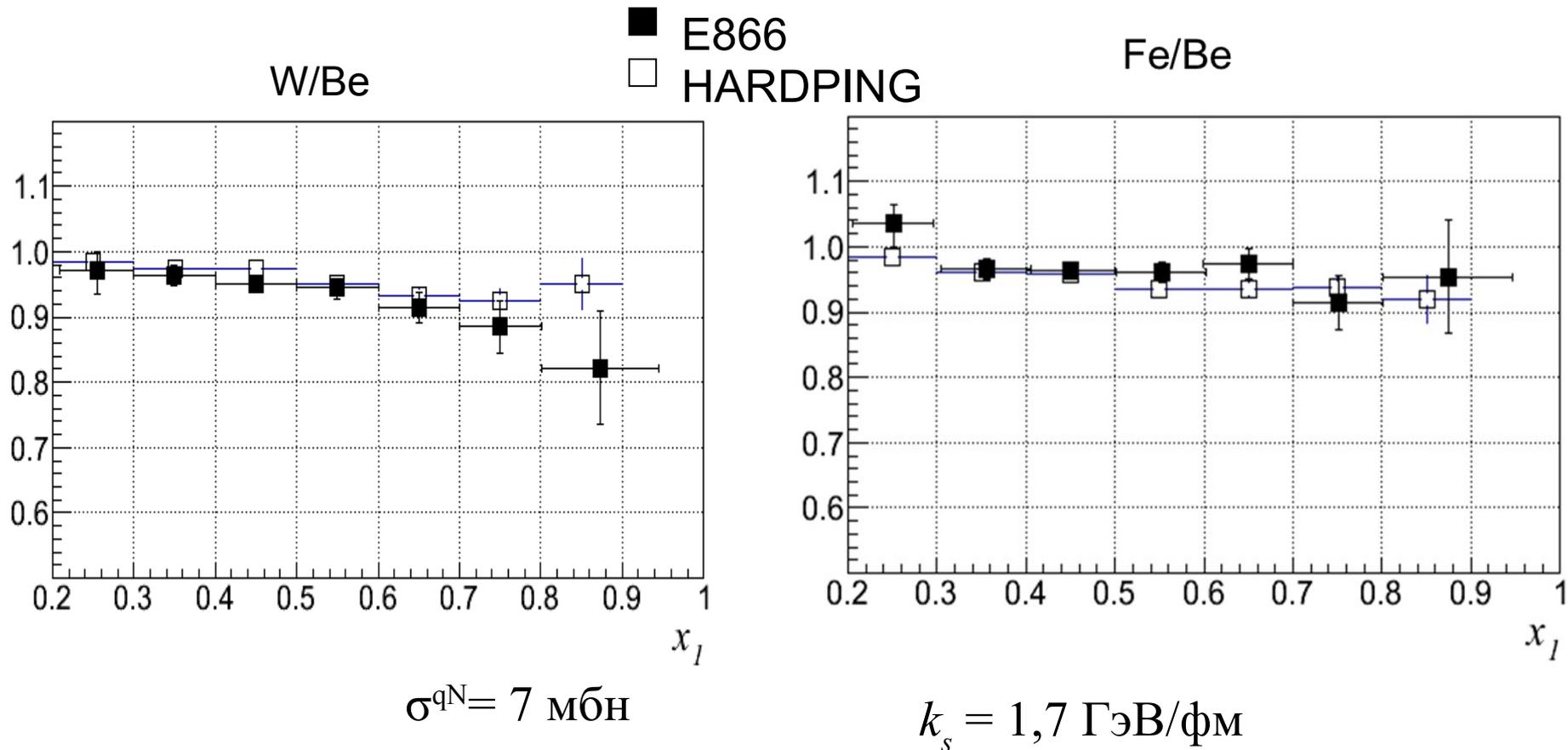
$$\sigma^{qN} = 7 \text{ мбн}$$

$$k_s = 1,7 \text{ ГэВ/фм}$$

# Сравнение HARDPING с экспериментом E866

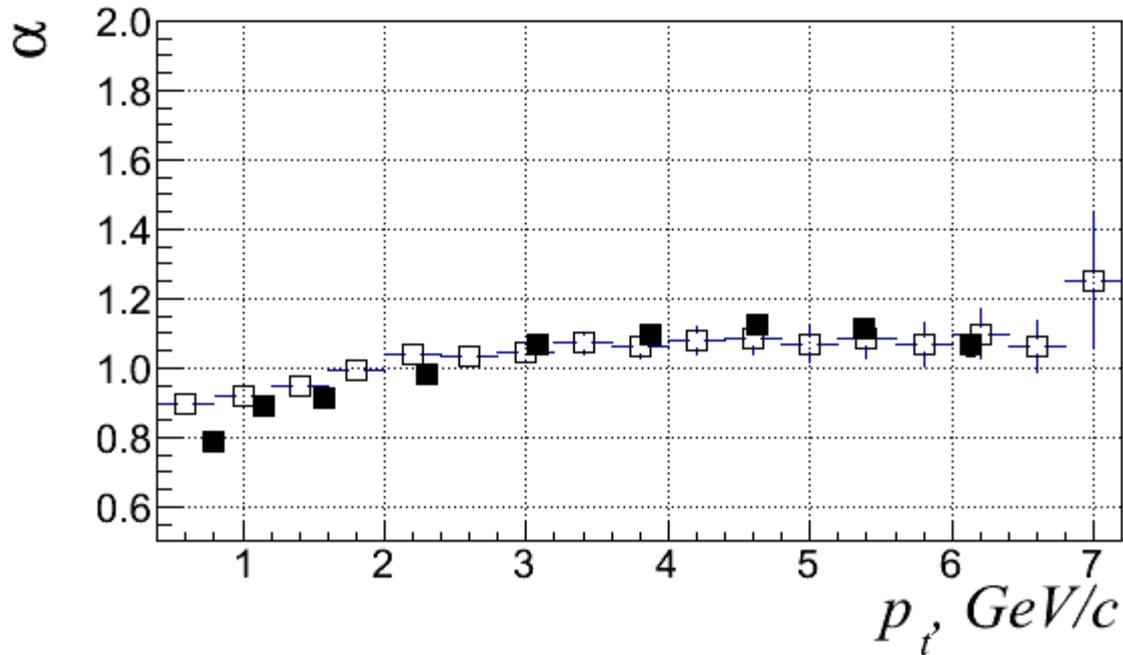
## $pA \rightarrow l^+l^- X$ 800 ГэВ

Отношение сечений рождения лептонных пар на легком и тяжелых ядрах, как функция доли импульса протона, которую несет налетающий партон



# HARDPING: образование адронов в протон-ядерных столкновениях $pA \rightarrow \pi^+ X$ 400 GeV (эффект Кронины)

$$I_i(p_T^a, A) = I_i(p_T^a, 1) \cdot A^{\alpha_i(p_T^a)}$$



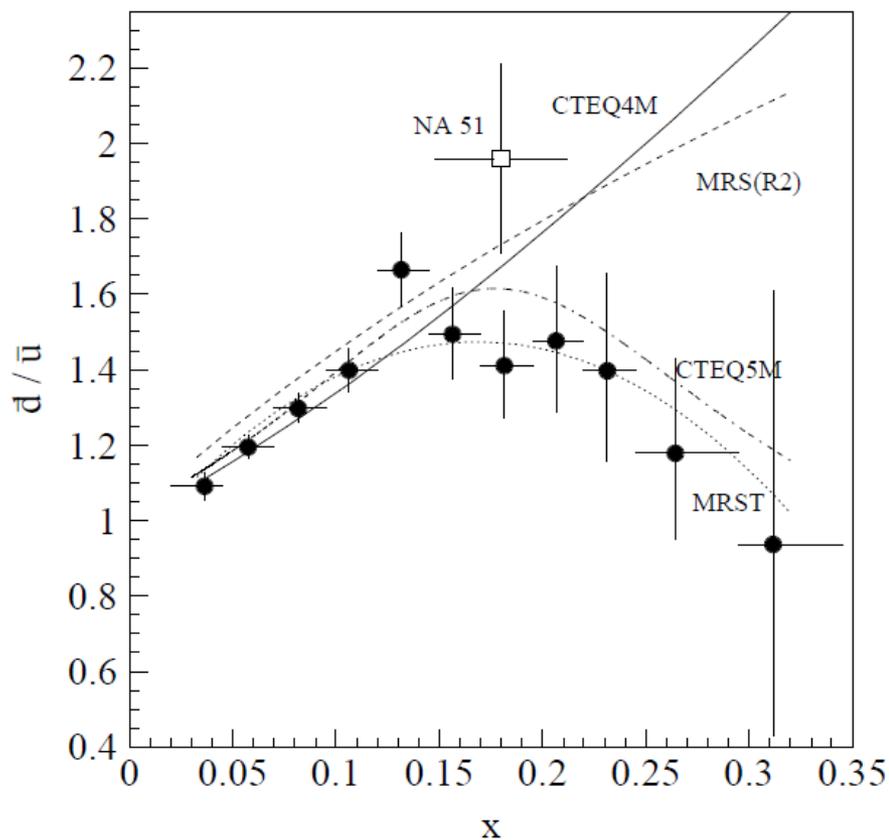
■ Cronin J. et al (79)  
□ HARDPING

$$\sigma^{qN} = 7 \text{ mb}$$

$$k_s = 1.7 \text{ GeV/Fm}$$

# Прецизионное измерение кваркового моря в ядрах в процессах Дрелла-Яна (E906 SeaQuest)

Отношение нижних антикварков к верхним, как функция доли импульса нуклона мишени



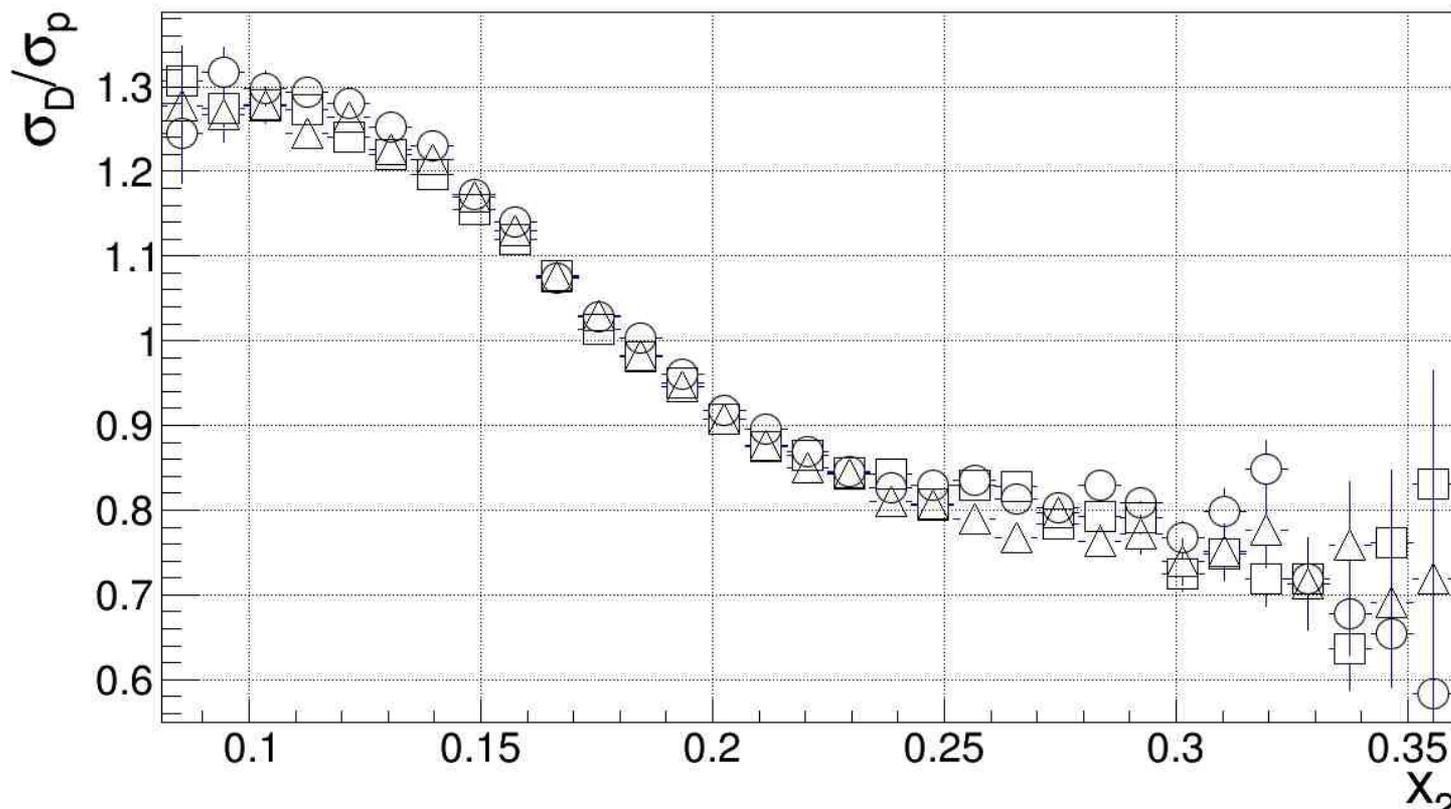
$$\left. \frac{\sigma_{pd}}{2\sigma_{pp}} \right|_{x_1 \gg x_2} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{\bar{d}(x_2)}{\bar{u}(x_2)} \right]$$

Proposal for Drell-Yan measurements of nucleon and nuclear structure with the FNAL main injector  
*The P906 Collaboration*

# Предсказание HARDPING для эксперимента NuSea (E906, Fermilab)

$pA \rightarrow l^+l^- X$     120 ГэВ     $A = p, D, Be, W$

Отношение сечений рождения лептонных пар на дейтроне и протоне, как функция доли импульса нуклона мишени



HARDPING CTEQ6L no nuclear effects



HARDPING CTEQ5L

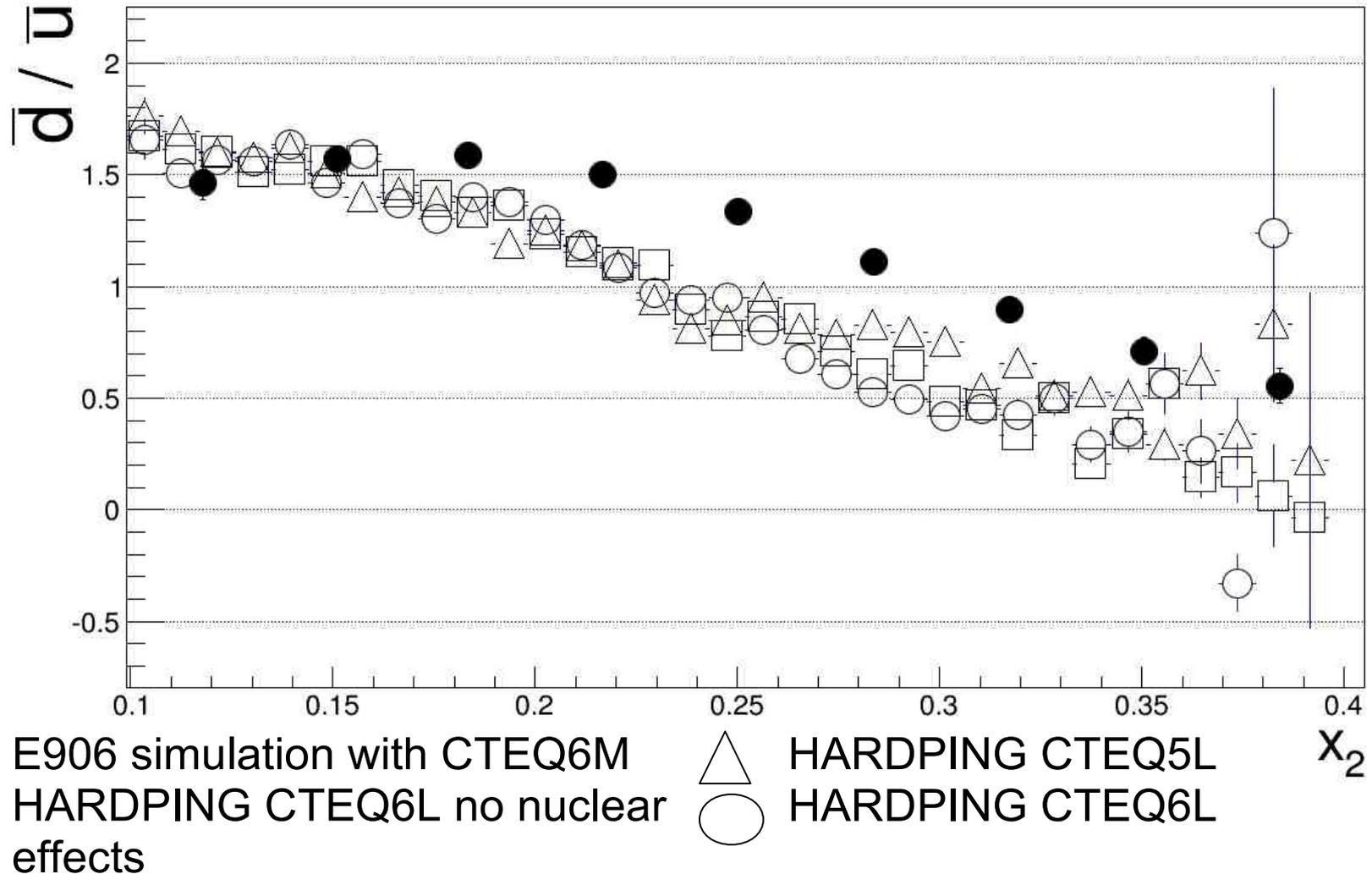


HARDPING CTEQ6L

# Предсказание HARDPING для эксперимента E906

$pD \rightarrow l^+l^- X$  120 ГэВ

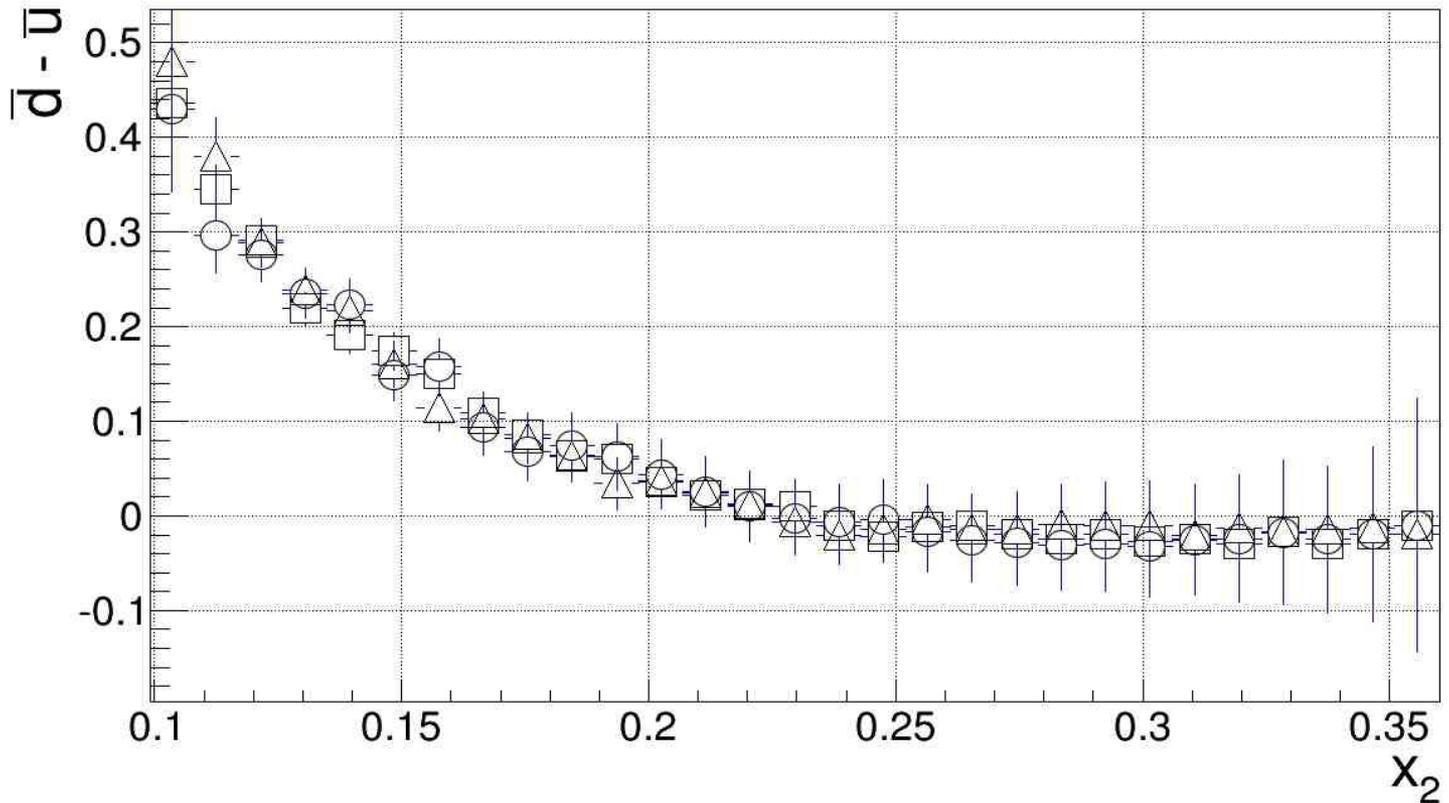
Отношение нижних антикварков к верхним,  
как функция доли импульса нуклона мишени



# Предсказание HARDPING для эксперимента E906

## $pD \rightarrow l^+l^- X$ 120 ГэВ

Разность нижних и верхних антикварков,  
как функция доли импульса нуклона мишени.



HARDPING CTEQ6L no nuclear effects



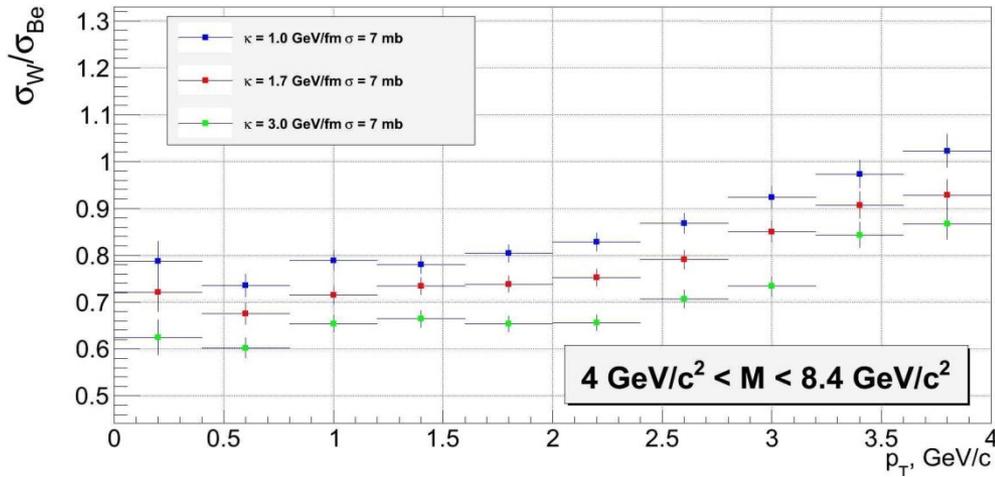
HARDPING CTEQ5L



HARDPING CTEQ6L

# HARDPING predictions for NuSea ( E906, Fermilab)

## $pA \rightarrow l^+l^- X$ at 120 GeV



$$M = \sqrt{x_1 x_2 S}$$

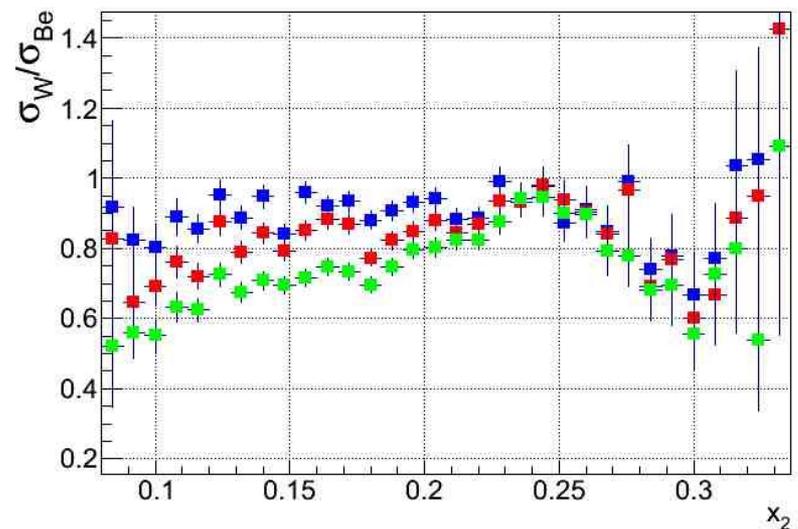
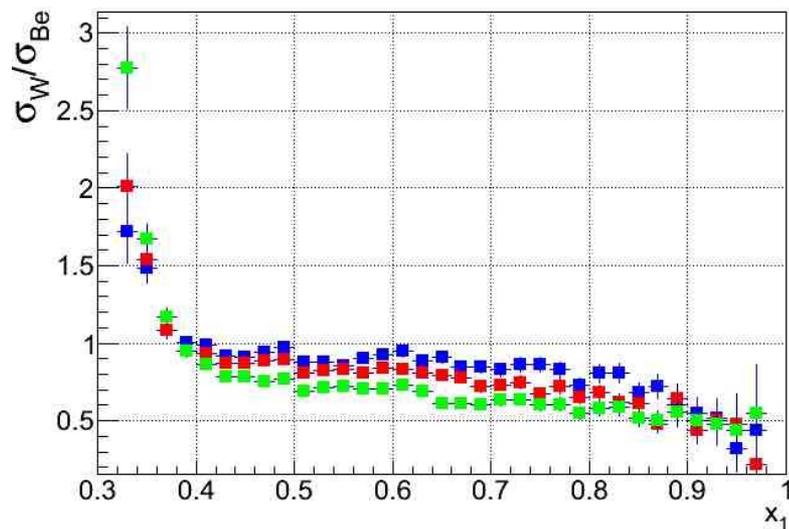
$$x_F = p_L^i / p_L^{i, max} = x_1 - x_2$$

string tension parameter:

**blue** :  $k = 1.0$  GeV/fm

**red** :  $k = 1.7$  GeV/fm (HARDPING)

**green** :  $k = 3.0$  GeV/fm



## **Заключение**

- Разработан Монте-Карло генератор HARDPING 3.0 позволяющий проводить моделирование лептон-ядерных и адрон-ядерных взаимодействий с образованием адронов с учетом длины формирования, мягких перерассеяний, продольных энергетических потерь в ядре кварков и адронов.
- С зафиксированными параметрами мягких взаимодействий для налетающих адронов с ядерной средой сделано предсказание для эксперимента E906, направленного на изучение кваркового моря в ядрах в процессах Дрелла-Яна.

При исследовании кваркового моря в дейтроне в процессах Дрелла-Яна, как и следовало ожидать, ядерные эффекты не играют существенной роли.

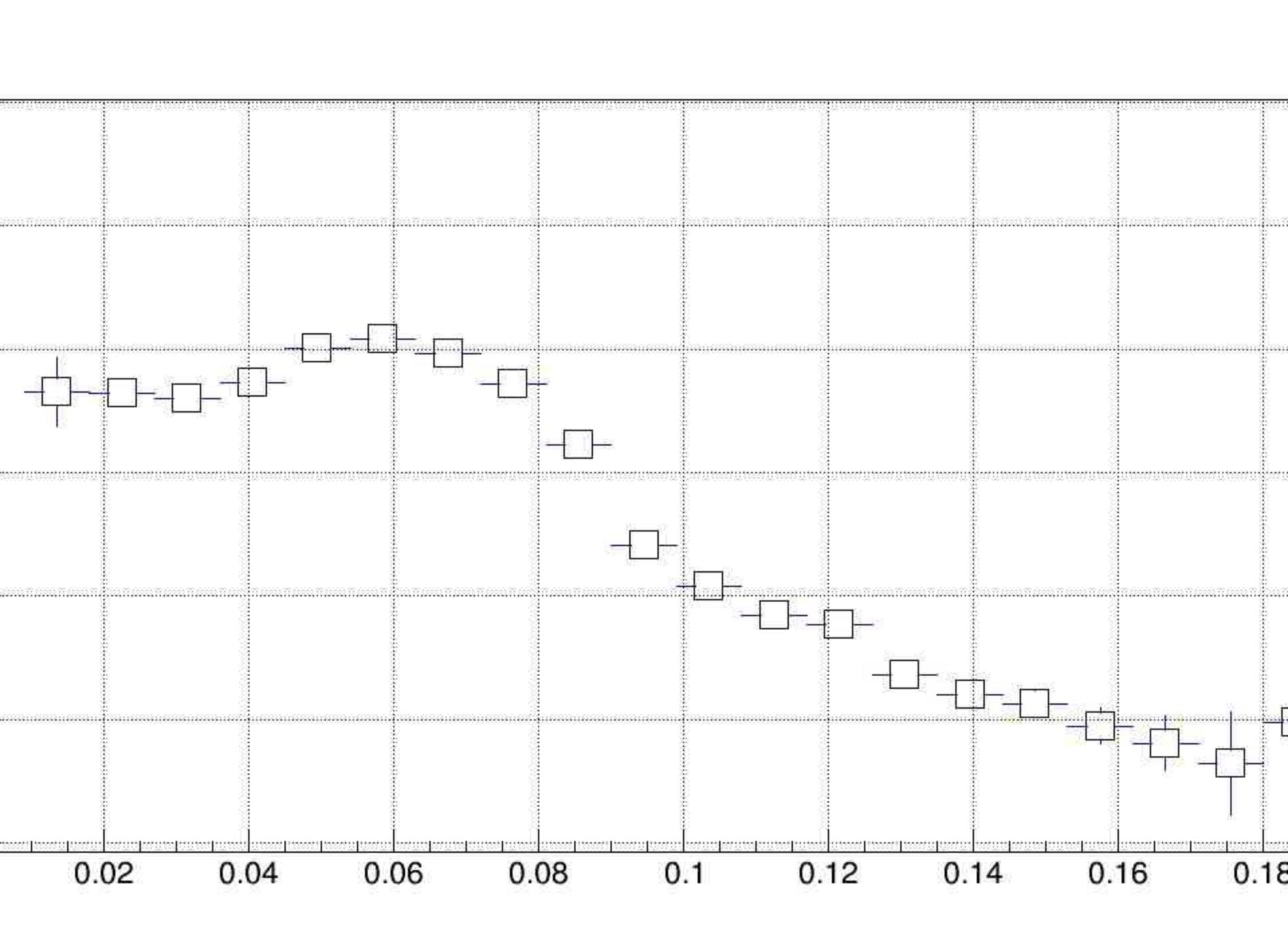
При исследовании кваркового моря в ядрах вольфрама и бериллия, ядерные эффекты становятся заметными. Их величина определяется эффектами торможения налетающих кварков.

**Дальнейшие планы:**

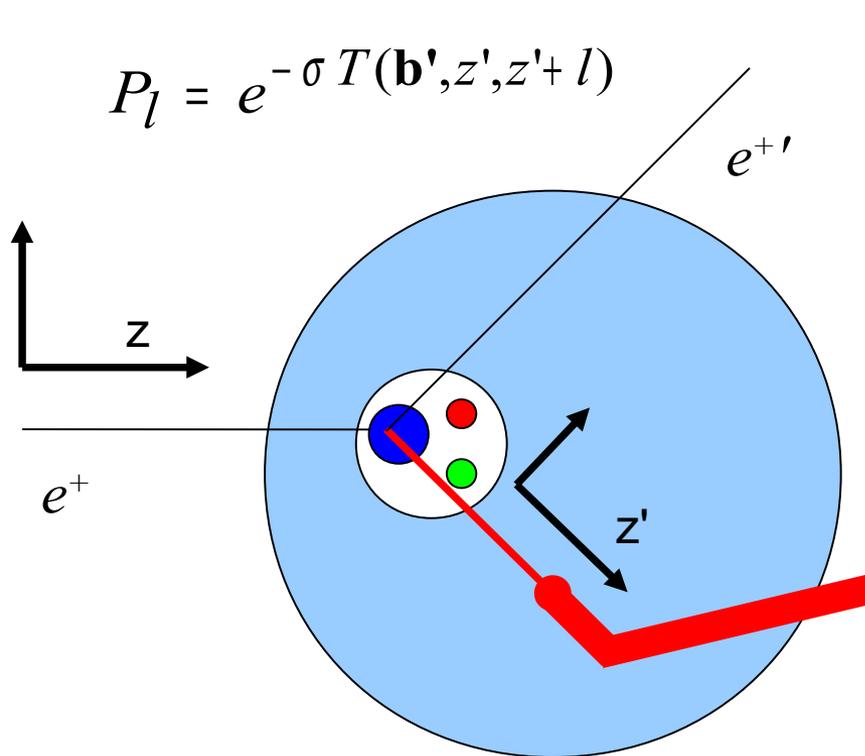
- разработка C++ версии HARDPING
- включение многокварковых конфигураций в ядрах
- создание МК модели жестких ядро - ядерных соударений

---

**back up**



# HARDPING: Многократные мягкие перерассеяния образующихся адронов в I-A рассеянии



$$P_l = e^{-\sigma T(\mathbf{b}', z', z'+l)}$$

$$T(\mathbf{b}', z', z'+l) = \int_{z'}^{z'+l} \rho(\mathbf{b}', z'') dz''$$

$$f_p(\mathbf{p}_{ti}) = \frac{B^2}{2\pi} e^{-B p_{ti}}$$

$$f_f(\mathbf{k}_{fi}) = \frac{B_f}{\pi} e^{-B_f k_{fi}^2}$$

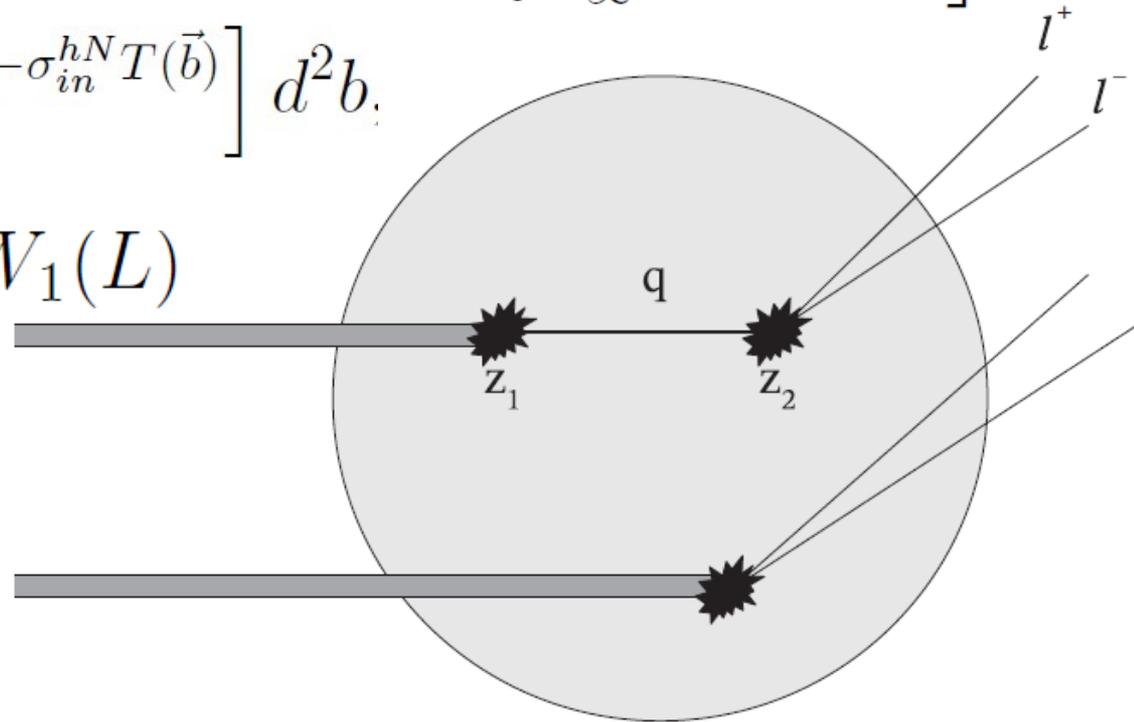
$$f_{pf}(\mathbf{k}_{ti}) = f_p \otimes f_f = \int f_p(\mathbf{p}_{ti}) f_f(\mathbf{k}_{fi}) \delta^2(\mathbf{k}_{ti} - \mathbf{p}_{ti} - \mathbf{k}_{fi}) d^2 p_{ti} d^2 k_{fi}$$

## Энергетические потери налетающего кварка

$$W_1(L) = \frac{\sigma_{in}^{hN}}{A} \int d^2b \int_{-\infty}^{\infty} dz_2 \rho_A(\vec{b}, z_2) \int_{-\infty}^{z_2} dz_1 \rho_A(\vec{b}, z_1) \times \delta(z_2 - z_1 - L) \exp \left[ -\sigma_{in}^{hN} \int_{-\infty}^{z_1} dz \rho_A(\vec{b}, z) \right]$$

$$W_0 = \frac{1}{A \sigma_{in}^{hN}} \int \left[ 1 - e^{-\sigma_{in}^{hN} T(\vec{b})} \right] d^2b,$$

$$W(L) = W_0 \delta(L) + W_1(L)$$



$$dE = -Lk$$

$$k = 1.7 \text{ ГэВ}/\phi\text{м}$$

# Множественные мягкие перераспределения кварков

$$P_n = \frac{1}{(n-1)!} \int_{-\infty}^{\infty} dz \int d^2b [\sigma T_-(b, z)]^{n-1} \rho(b, z) e^{-\sigma T_-(b, z)}$$

$$G_q^m(k_T) = \frac{B^2}{2\pi \Gamma[(3m+1)/2 + 1]} \times \\ \times \left( \frac{Bk_T}{2} \right)^{(3m+1)/2} K_{(3m+1)/2}(Bk_T)$$

$$f_q(p_{Ti}) = \frac{B^2}{2\pi} e^{-Bp_{Ti}}$$

$$B = 2/\langle k_V \rangle$$

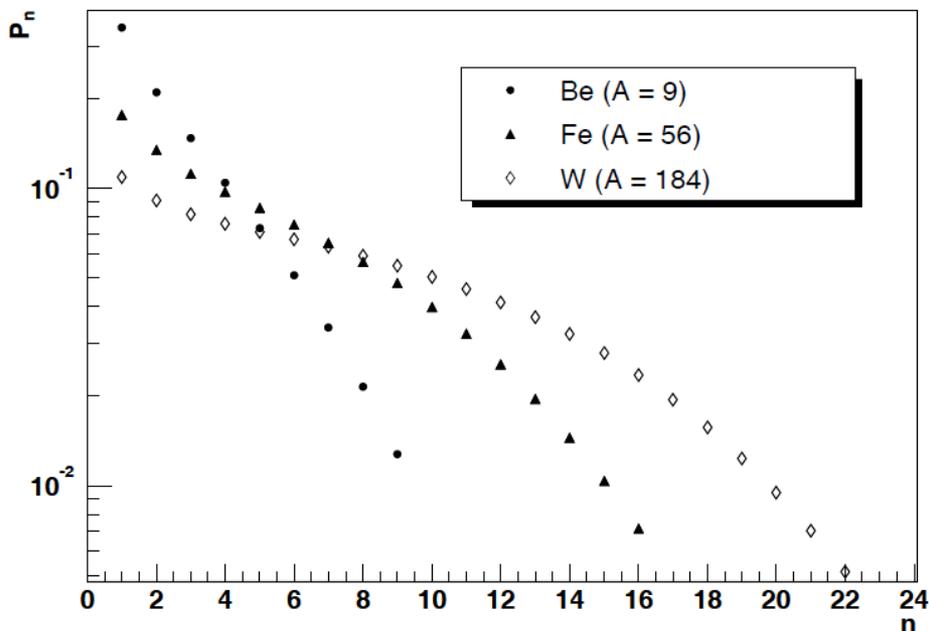
$$F_N(k_T) = G_q^{n-1} \otimes F_V(k_T) = \\ = \int d^2p_{1T} d^2p_{2T} G_q^{n-1}(p_{1T}) F_V(p_{2T}) \times \\ \times \delta^2(k_T - p_{1T} - p_{2T}).$$

$$f_q(p_{Ti}) = \frac{B^2}{2\pi} e^{-Bp_{Ti}}$$

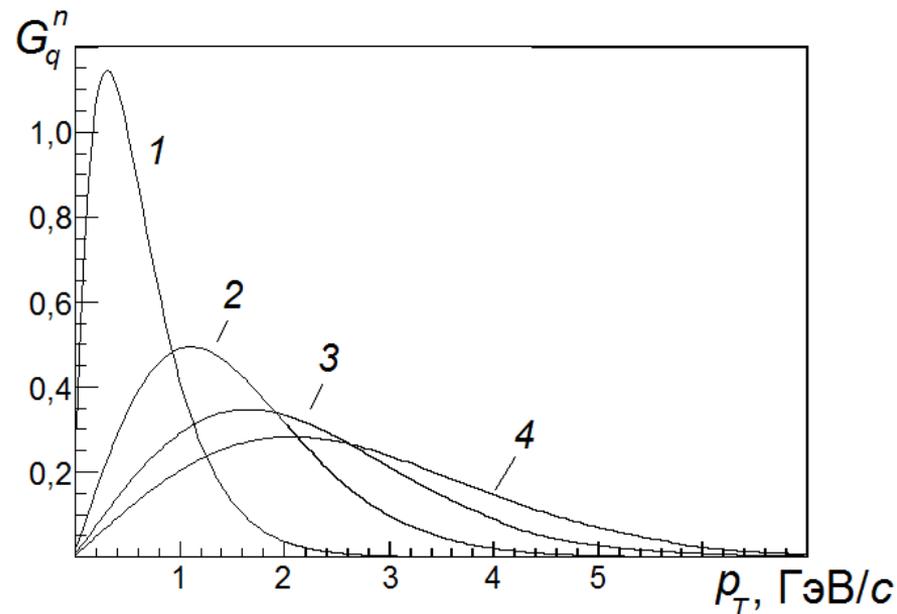
$$B = 2/\langle k_q^{\text{hard}} \rangle$$

# Множественные мягкие перерассеяния

Вероятность испытать  $n$  мягких взаимодействий для различных ядер



Распределение по поперечному импульсу после 1(1), 5(2), 10(3), 15(4) мягких взаимодействий



## Длина формирования: первый подход

$$\begin{aligned} W(t, z_h, Q^2, \nu) &= N \int_0^1 \frac{d\alpha}{\alpha} \delta \left[ z_h - \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{E_q(t)}{\nu} \right] \\ &\times \int_{\Lambda^2}^{Q^2} \frac{dk_T^2}{k_T^2} \frac{\exp(-t/t_c)}{t_c} \int dl_t^2 \delta \left[ l_T^2 - \frac{9}{16} k_T^2 \right] \\ &\times \int_0^1 d\beta \delta \left[ \beta - \frac{\alpha}{2 - \alpha} \right] |\Psi_h(\beta, l_T)|^2 S(z_h, t, Q^2, \nu) . \end{aligned}$$

$$\Psi_h(\beta, l_T^2) \propto \frac{\beta(1 - \beta)}{\beta(1 - \beta) + a_0} \exp \left[ -\frac{R_h^2 l_T^2 / 8}{\beta(1 - \beta) + a_0} \right]$$

B.Z. Kopeliovich, J. Nemchik, E. Predazzi, A. Hayashigaki “Nuclear hadronization: within or without”

# Длина формирования: первый подход

B.Z. Kopeliovich, J. Nemchik, E. Predazzi, A. Hayashigaki "Nuclear hadronization: within or without"

$$\Delta E(t) = \nu \int_{\lambda^2}^{Q^2} dk_T^2 \int_0^1 d\alpha \alpha \frac{dn_G}{dk_T^2 d\alpha} \Theta(t - t_c)$$

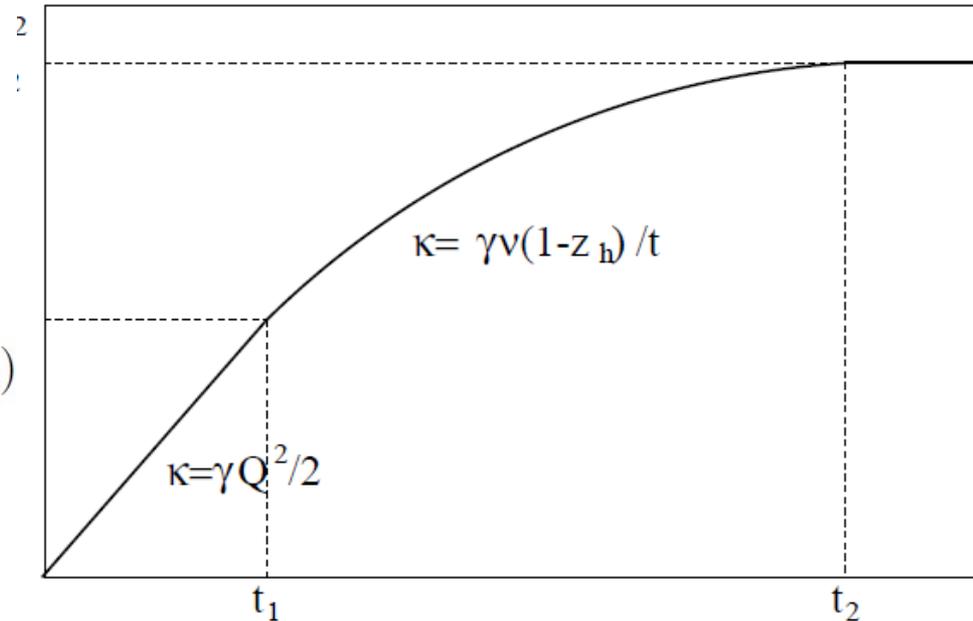


$$\Delta E(t) = \frac{\gamma}{2} t (Q^2 - \lambda^2) \Theta(t_1 - t)$$

$$+ \left\{ \nu \gamma (1 - z_h) \left[ 1 + \ln \left( \frac{t}{t_1} \right) \right] - \frac{\gamma}{2} \lambda^2 t \right\} \Theta(t - t_1) \Theta(t_2 - t)$$

$$+ \nu \gamma (1 - z_h) \ln \left( \frac{Q^2}{\lambda^2} \right) \Theta(t - t_2)$$

$\Delta E(t)$



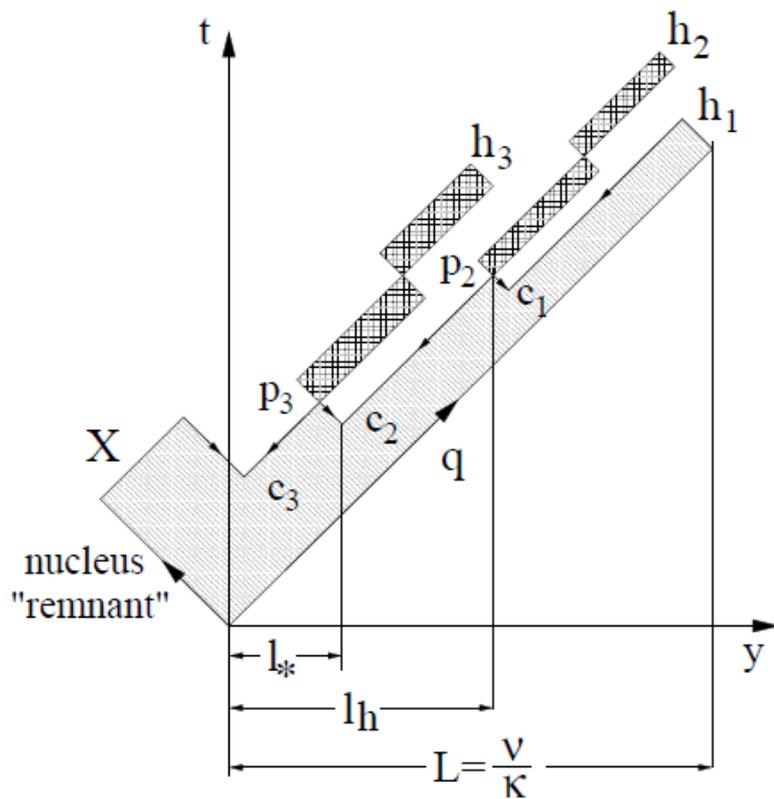
$t$

$$\alpha_s(k_T^2) = \alpha_s(k_0^2) \text{ at } k_T^2 \leq k_0^2$$

$$k_0 \approx 0.7 \text{ GeV}$$

$$t_1 = \frac{2\nu}{Q^2} (1 - z_h) \quad t_2 = \frac{Q^2}{\lambda^2} t_1$$

## Длина формирования: второй подход



$$\mathcal{P}_*(y; z, L) = \frac{zL}{y - zL} \left[ \frac{y}{(y + zL)(1 - z)} \right]^C \times \left\{ \delta[y - (1 - z)L] + \frac{1 + C}{y - zL} \theta[(1 - z)L - y] \right\} \theta[y]$$

$$\langle l_F \rangle = \left[ 1 + \frac{1 + C}{2 + C} \frac{1 - z}{z^{2+C}} {}_2F_1 \left( 2 + C, 2 + C; 3 + C; \frac{z - 1}{z} \right) \right] (1 - z) z L$$

$$\langle l_F \rangle = \left[ \frac{\ln(1/z^2) - 1 + z^2}{1 - z^2} \right] z L$$

A. Accardi, V. Muccifora, H.J. Pirner  
 "Hadron production in deep inelastic lepton-nucleus scattering"