

# Исследование функций фрагментации кварков в жестких реакциях и их применение для исследования структуры нуклона

О. Б. Самойлов

НЭОФЭЧ ЛЯП ОИЯИ, Дубна, Россия

Семинар Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ  
06 марта 2013

# Фрагментация (адронизация) кварков

		Три поколения материи (Фермионы)			
		I	II	III	
масса→		2,4 МэВ	1,27 ГэВ	171,2 ГэВ	0
заряд→		$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
спин→		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
название→		верхний	очарователный	истинный	фотон
Кварки		4,8 МэВ	104 МэВ	4,2 ГэВ	0
		$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
		нижний	странный	прекрасный	глюон
Лептоны		<2,2 эВ	<0,17 МэВ	<15,5 МэВ	91,2 ГэВ
		0	0	0	0
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	электронное нейтрино	мюонное нейтрино	тау нейтрино	Z	слабое взаимодействие
	0,511 МэВ	105,7 МэВ	1,777 ГэВ	80,4 ГэВ	
	-1	-1	-1	$\pm 1$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	электрон	мюон	тау	W	слабое взаимодействие
					БОЗОН ХИГГСА

Бозоны (переносчики взаимодействия)

## Примеры жестких реакций с участием кварков

- $e^+e^- \rightarrow \gamma/Z \rightarrow q\bar{q} \rightarrow$  адроны
- $\ell^\pm p \rightarrow (\gamma/Zq) \rightarrow \ell' +$  адроны
- $\nu N \rightarrow (W^\pm/Zq) \rightarrow \ell' +$  адроны
- $\pi C \rightarrow (gq) \rightarrow$  адроны
- $pp \rightarrow (gq) \rightarrow$  струи адронов

# Фрагментация (адронизация) кварков

		Три поколения материи (Фермионы)			
		I	II	III	
масса→		2,4 МэВ	1,27 ГэВ	171,2 ГэВ	0
заряд→		$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
спин→		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
название→		<b>u</b> верхний	<b>c</b> очарователный	<b>t</b> истинный	<b>γ</b> фотон
Кварки		4,8 МэВ	104 МэВ	4,2 ГэВ	0
		$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
		<b>d</b> нижний	<b>s</b> странный	<b>b</b> прекрасный	<b>g</b> глюон
Лептоны		<2,2 эВ	<0,17 МэВ	<15,5 МэВ	91,2 ГэВ
		0	0	0	0
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>ν<sub>e</sub></b> электронное нейтрино	<b>ν<sub>μ</sub></b> мюонное нейтрино	<b>ν<sub>τ</sub></b> тау нейтрино	<b>Z</b> слабое взаимодействие	
	0,511 МэВ	105,7 МэВ	1,777 ГэВ	80,4 ГэВ	
	-1	-1	-1	$\pm 1$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>e</b> электрон	<b>μ</b> мюон	<b>τ</b> тау	<b>W<sup>±</sup></b> слабое взаимодействие	
<b>БОЗОН ХИГГСА</b>					

Бозоны (переносчики взаимодействия)

## Примеры жестких реакций с участием кварков

- $e^+e^- \rightarrow \gamma/Z \rightarrow q\bar{q} \rightarrow h + X$
- $\ell^\pm p \rightarrow (\gamma/Zq) \rightarrow \ell' + h + X$
- $\nu N \rightarrow (W^\pm/Zq) \rightarrow \ell' + h + X$
- $\pi C \rightarrow (gq) \rightarrow h + X$
- $pp \rightarrow (gq) \rightarrow h_1 + X_1 + h_2 + X_2 + \dots$

# Фрагментация (адронизация) кварков

		Три поколения материи (Фермионы)			
		I	II	III	
масса→		2,4 МэВ	1,27 ГэВ	171,2 ГэВ	0
заряд→		$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
спин→		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
название→		верхний	очарованный	истинный	фотон
Кварки	масса→	4,8 МэВ	104 МэВ	4,2 ГэВ	0
	заряд→	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	спин→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
название→	нижний	странный	прекрасный	глюон	
Лептоны	масса→	<2,2 эВ	<0,17 МэВ	<15,5 МэВ	91,2 ГэВ
	заряд→	0	0	0	0
	спин→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
название→	электронное нейтрино	мюонное нейтрино	тау нейтрино	слабое взаимодействие	
	масса→	0,511 МэВ	105,7 МэВ	1,777 ГэВ	80,4 ГэВ
	заряд→	-1	-1	-1	$\pm 1$
	спин→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	название→	электрон	мюон	тау	слабое взаимодействие
					БОЗОН ХИГГСА

Бозоны (переносчики взаимодействия)

## Примеры жестких реакций с участием кварков

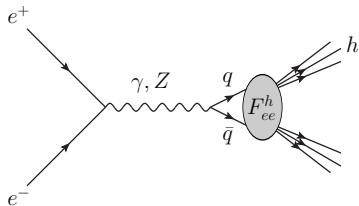
- $e^+e^- \rightarrow \gamma/Z \rightarrow q\bar{q} \rightarrow h + X$
- $\ell^\pm p \rightarrow (\gamma/Zq) \rightarrow \ell' + h + X$
- $\nu N \rightarrow (W^\pm/Zq) \rightarrow \ell' + h + X$
- $\pi C \rightarrow (gq) \rightarrow h + X$
- $pp \rightarrow (gq) \rightarrow h_1 + X_1 + h_2 + X_2 + \dots$

$D_i^h$  – вероятность рождения адрона  $h$  из взаимодействующего партона  $i$

## Прецизионные измерения ФФ необходимы для множества теоретических и экспериментальных исследований

- Расчет пучков мюонных нейтрино в реакциях распада  $pN \rightarrow \pi/K + X$ ,  $\pi/K \rightarrow \nu_\mu + \mu$ , очарованные адроны  $\rightarrow \nu_\mu X$
- Спиновая физика в полуинклюзивных процессах поляризованных ГНР
- Рождение адронов с большими  $p^T$  в  $pp$  реакциях при больших энергиях и при взаимодействии тяжелых ядер (исследование состояний КГП)
- Исследование динамики полужестких процессов КХД (адронизация)

# Определение функций фрагментации



Экспериментально измеряемые ФФ

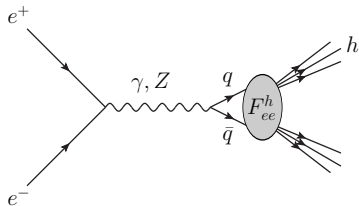
$$\frac{1}{\sigma_{\text{tot}}} \frac{d\sigma^h}{dx} = F^h(x, s)$$

- $x \equiv x_E \equiv z = 2E_h/\sqrt{s}$

$$F^h(x, s) = \sum_i \int_x^1 \frac{dz}{z} C_i(z, \alpha_s(\mu), s/\mu^2) D_i^h(x/z, \mu),$$

- $C_i(z, \alpha_s(\mu), s/\mu^2)$  – вероятность рождения партона  $i$
- $D_i^h(x/z, \mu)$  – партонные функции фрагментации

# Определение функций фрагментации



Экспериментально измеряемые ФФ

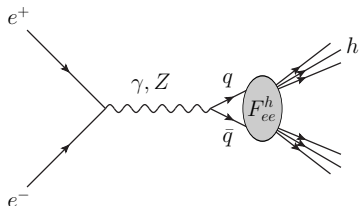
$$\frac{1}{\sigma_{\text{tot}}} \frac{d\sigma^h}{dx} = F^h(x, s)$$

- $x \equiv x_E \equiv z = 2E_h/\sqrt{s}$

$$F^h(x, s) = \sum_i \int_x^1 \frac{dz}{z} C_i(z, \alpha_s(\mu), s/\mu^2) D_i^h(x/z, \mu),$$

- $C_i(z, \alpha_s(\mu), s/\mu^2)$  – вероятность рождения партона  $i$   
Зависит от процесса
- $D_i^h(x/z, \mu)$  – партонные функции фрагментации  
Универсальны

# Определение функций фрагментации



Экспериментально измеряемые ФФ

$$\frac{1}{\sigma_{ee}} \frac{d\sigma_{ee}^h}{dx} = F_{ee}^h(x, s)$$

- $x \equiv x_E \equiv z = 2E_h/\sqrt{s}$

$$F_{ee}^h(x, s) = \sum_q C_q \left[ D_q^h(x, s) + D_{\bar{q}}^h(x, s) \right] / 2 \sum_q C_q,$$

- $C_q(z, s) = [e_q^2 + 2e_q v_e v_q \rho_1(s) + (v_e^2 + \alpha_e^2)(v_q^2 + \alpha_q^2) \rho_2(s)] \delta(1 - z)$
- $D_q^h(x, s)$  – функции фрагментации кварков



## Правило сумм для импульса (или энергии)

$$\sum_h \int_0^1 dz z D_i^h(z, \mu) = 1,$$

$$h = \pi^\pm, \pi^0, K^\pm, K^0, \bar{K}^0, p, \bar{p}, n, \bar{n}, \Lambda, \dots$$

## Предпочтительные и подавленные функции фрагментации

В кварк-партонной модели:  $\pi^+(u\bar{d})$ ,  $\pi^-(d\bar{u})$ ,  $K^+(u\bar{s})$ ,  $p(uud)$ , ...

- Предпочтительная фрагментация:  $D_u^{\pi^+}$ ,  $D_{\bar{d}}^{\pi^+}$ ,  $D_{\bar{d}}^{\pi^-}$ ,  $D_u^{K^+}$ , ...  
(из кварков, составляющих адрон в КПМ)
- Подавленная фрагментация:  $D_d^{\pi^+}$ ,  $D_{\bar{u}}^{\pi^+}$ ,  $D_s^{\pi^+}$ , ...  
(из кварков, не входящих в состав адрона)

## Исследования ведутся несколькими группами

- AESSS, C. Aidala, F. Ellinghaus, R. Sassot, J. Seele, M. Stratmann, arXiv:1009.6145.
- АКК05, S. Albino, B. A. Kniehl and G. Kramer, NPB725 (2005) 181; NPB734 (2006) 50.
- АКК08, S. Albino, B. A. Kniehl and G. Kramer, NPB803(2008) 42.
- BFG, L. Bourhis, M. Fontannaz and J.-P. Guillet, EPJC2 (1998) 529.
- BFGW, L. Bourhis, M. Fontannaz, J.-P. Guillet and M. Werlen, EPJC19 (2001) 89.
- ВКК, J. Binnewies, B. A. Kniehl and G. Kramer, Z. Phys.C65 (1995) 471.
- DSS, D. de Florian, R. Sassot and M. Stratmann, PRD75 (2007) 114010; PRD76 (2007) 074033.
- DSV, D. de Florian, M. Stratmann and W. Vogelsang, PRD57 (1998) 5811.
- НКНС07, M. Hirai, S. Kumano, T. H. Nagai and K. Sudoh, PRD75 (2007) 094009.
- ККР, B. A. Kniehl, G. Kramer and B. Poetter, NPB582 (2000) 514.
- КККС08, T. Kneesch, B. A. Kniehl, G. Kramer, and I. Schienbein, NPB799 (2008) 34.
- S. Kretzer, PRD62 (2000) 054001.

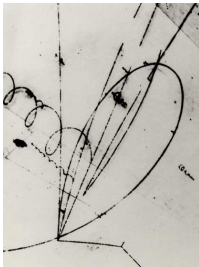
База данных ФФ: <http://www2.pv.infn.it/~radici/FFdatabase/>

# Экспериментальные данные

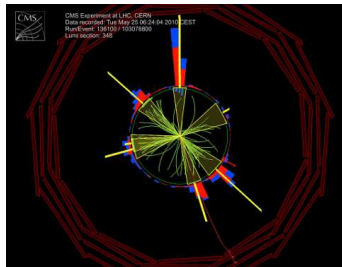
$e^+e^- \rightarrow 2 - 3$  струи



$\ell N \rightarrow \ell'$  адроны



$pp \rightarrow$  адронные струи



CERN: ALEPH, DELPHI,  
L3, OPAL

DESY: JADE, PLUTO,  
TASSO, CELLO

KEK: AMY, TOPAZ

SLAC: TPC, MARK-II, HRS,  
SLC, SLD

DESY: ZEUS, HERMES

CERN: HBC-BEBC-H7B,  
COMPASS, NOMAD

CERN: HARP, NA49, SPY, SPES  
III, SPEC, WIRE, LEPS, FODS,  
HBC-LEBC-HYB, (ATLAS),  
(CMS)

FNAL: HBC, (CDF), (D0)

SERP: SCH

TRIUMF: CNTR

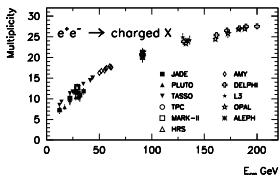
SACLAY: DIOGENE

BNL: MPS

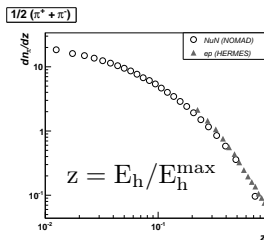
Проект Durham HepData <http://hepdata.cedar.ac.uk/>

# Экспериментальные данные

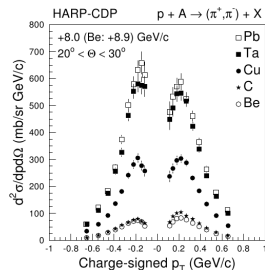
$$e^+e^- \rightarrow h^\pm X$$



$$\ell N \rightarrow \ell' \frac{\pi^+ + \pi^-}{2} X$$



$$pA \rightarrow \pi^\pm X$$



CERN: ALEPH, DELPHI,  
L3, OPAL

DESY: JADE, PLUTO,  
TASSO, CELLO

KEK: AMY, TOPAZ

SLAC: TPC, MARK-II, HRS,  
SLC, SLD

DESY: ZEUS, HERMES

CERN: HBC-BEBC-H7B,  
COMPASS, NOMAD

CERN: HARP, NA49, SPY, SPES  
III, SPEC, WIRE, LEPS, FODS,  
HBC-LEBC-HYB, (ATLAS),  
(CMS)

FNAL: HBC, (CDF), (D0)

SERP: SCH

TRIUMF: CNTR

SACLAY: DIOGENE

BNL: MPS

Проект Durham HepData <http://hepdata.cedar.ac.uk/>

## Определение $\Phi\Phi$ из экспериментальных данных

- Функциональная зависимость для  $D_i^h(z, \mu_0) \ominus$

$$D_i^h(z, \mu_0) = N_i^h z^{\alpha_i^h} (1-z)^{\beta_i^h} \left(1 + \gamma_i^h (1-z)^{\delta_i^h}\right)$$

- Уравнение эволюции ДГЛАП для  $\Phi\Phi \otimes$

$$\frac{\partial}{\partial \mu^2} D_i^h(z, \mu) = \frac{\alpha_s(\mu^2)}{2\pi} \sum_i \int_z^1 \frac{d\xi}{\xi} P_{ji} \left( \frac{z}{\xi}, \alpha_s(\mu^2) \right) D_i^h(\xi, \mu)$$

- Правило сумм  $\sum_h \int_0^1 dz z D_i^h(z, \mu_0) = 1 \otimes$

- Измерение полных  $\Phi\Phi$   $F^h(z, \mu) = \sum_i \int_z^1 \frac{d\xi}{\xi} C_i(\xi, \mu^2) D_i^h(z/\xi, \mu) \otimes$

- Применение кинематических критериев отбора  $\ominus$

- Оценка ошибок измерения, систематические неопред. и т.д.  $\otimes$

- Глобальный анализ распределения  $\chi^2$

$$\implies D_i^h(z, \mu_0) \{N_i^h, \alpha_i^h, \beta_i^h, \gamma_i^h, \delta_i^h\}$$

- 1  $e^+e^- \rightarrow \gamma/Z \rightarrow q\bar{q} \rightarrow h + X$ 
  - ⊗ прецизионные данные (LEP), нет партонных распределений (PDF), достаточно простые теоретические вычисления
  - ⊖ нет чувствительности к  $D_{q-\bar{q}}^h, D_g^h$
- 2  $\ell^\pm p \rightarrow (\gamma/Zq) \rightarrow \ell' + h + X$ 
  - ⊗ небольшая чувствительность к разделению сортов кварков и  $D_{q-\bar{q}}^h$
  - ⊖ нет чувствительности к  $D_g^h$ , зависимость от PDF, дополнительное интегрирование в теор. расчетах, область фрагментации мишени
- 3  $\nu N \rightarrow (W^\pm/Zq) \rightarrow \ell' + h + X$ 
  - ⊗ чувствительность к измерению индивидуальных сортов кварков  $D_q^h$  и  $D_{q-\bar{q}}^h$
  - ⊖ как для  $\ell^\pm p$
- 4  $pp \rightarrow (gq) \rightarrow h_1 + X_1 + h_2 + X_2 + \dots$ 
  - ⊗ чувствительность к  $D_g^h$  и  $D_{q-\bar{q}}^h$
  - ⊖ двойные минусы от  $\ell^\pm p$  для нуклонов

# Функциональная зависимость для $D_1^h(z, \mu_0)$

Глобальный анализ ФФ группой HKNS – Kawamura (2012)

- Parametrization только  $e^+e^- \rightarrow h + X$

$\pi^+$

5 independent FFs.

fixed to meet the mom. sum rule.  
(see below)

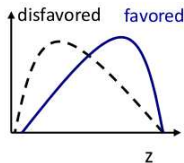
$u$  &  $\bar{d}$  favored FFs:  $D_u^{\pi^+}(z, Q_0^2) = D_{\bar{d}}^{\pi^+}(z, Q_0^2) = N_u^{\pi^+} z^{\alpha_u^{\pi^+}} (1-z)^{\beta_u^{\pi^+}}$

$\bar{u}$  &  $d$  &  $s$  &  $\bar{s}$  disfavored FFs:  $D_{\bar{u}}^{\pi^+}(z, Q_0^2) = D_d^{\pi^+}(z, Q_0^2) = D_s^{\pi^+}(z, Q_0^2) = D_{\bar{s}}^{\pi^+}(z, Q_0^2) = N_{\bar{u}}^{\pi^+} z^{\alpha_{\bar{u}}^{\pi^+}} (1-z)^{\beta_{\bar{u}}^{\pi^+}}$

gluon FF:  $D_g^{\pi^+}(z, Q_0^2) = N_g^{\pi^+} z^{\alpha_g^{\pi^+}} (1-z)^{\beta_g^{\pi^+}}$

charm FF:  $D_c^{\pi^+}(z, m_c^2) = D_{\bar{c}}^{\pi^+}(z, m_c^2) = N_c^{\pi^+} z^{\alpha_c^{\pi^+}} (1-z)^{\beta_c^{\pi^+}}$

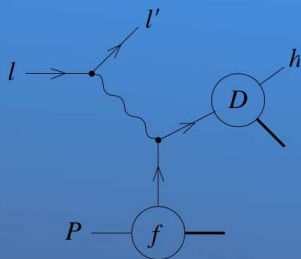
bottom FF:  $D_b^{\pi^+}(z, m_b^2) = D_{\bar{b}}^{\pi^+}(z, m_b^2) = N_b^{\pi^+} z^{\alpha_b^{\pi^+}} (1-z)^{\beta_b^{\pi^+}}$



Initial scale(s):

$$n_f = \begin{cases} 3, Q_0^2 < Q^2 < m_c^2 \\ 4, m_c^2 < Q^2 < m_b^2 \\ 5, m_b^2 < Q^2 < m_t^2 \\ 6, m_t^2 < Q^2 \end{cases}, \quad \begin{pmatrix} Q_0^2 = 1 \text{ GeV}^2 \\ m_c = 1.43 \text{ GeV} \\ m_b = 4.3 \text{ GeV} \end{pmatrix}$$

Область фрагментации кварка в ГНР

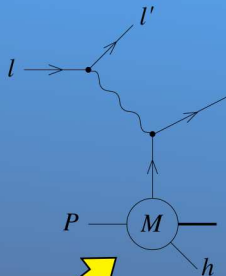
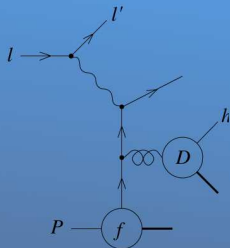


$$\sigma_C = \int \frac{dx'}{x'} \frac{dz'}{z'} F_P^i(x', Q^2) \hat{\sigma}_{ij}(x/x', z_h/z', Q^2) D_h^j(z', Q^2)$$



# Фрактурные функции – Trentadue (1994)

Область фрагментации мишени в ГНР



Fracture Function



$$\sigma_T = \int \frac{dx'}{x'} M_{Ph'}^i(x', z_h, Q^2) \hat{\sigma}_i(x/x', Q^2)$$

L.Trentadue and G.Veneziano, Phys.Lett. **B323** (1994) 201

Fracture Functions = **F**ragmentation & **s**tructure

- Выполняется правило сумм

$$\sum_h \int_0^1 dz z M_{p,i}^h(z, x, \mu^2) = (1-x)F_{p,i}(x, \mu^2)$$

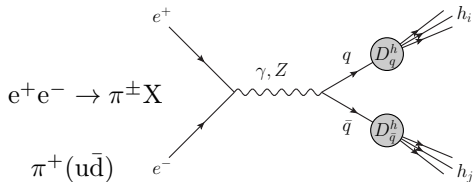
- Фактурные функции факторизуются

$$\sigma^h = \sigma_{\text{current}}^h + \sigma_{\text{target}}^h = \sum_{i,j} \int dz F_{p,i} D_j^h \hat{\sigma}_i + \sum_i \int dz M_{p,i}^h \hat{\sigma}_i$$

- Фактурные функции удовлетворяют уравнениям эволюции ДГЛАП
- Существуют предпочтительные и подавленные фактурные функции ( $M_{p,u}^\Lambda$  велико,  $M_{p,d}^{\pi^+} \simeq 2M_{p,u}^{\pi^+}$ ,  $M_{p,d}^{\pi^+} \gg 2M_{p,d}^{\pi^-}$ )

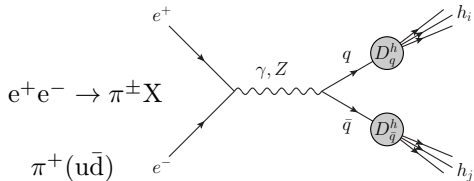
# Общая схема измерения $D_q^{\pi^\pm}$ и $M_{qq}^{\pi^\pm}$ из $e^+e^-$ и $\ell N$ ГНР

Измеряемые

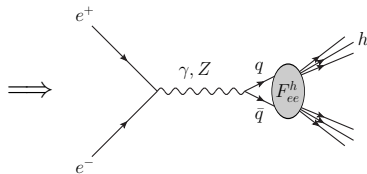


# Общая схема измерения $D_q^{\pi^\pm}$ и $M_{qq}^{\pi^\pm}$ из $e^+e^-$ и $\ell N$ ГНР

Измеряемые

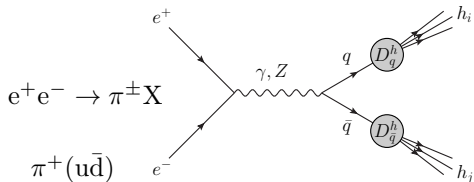


Наблюдаемые

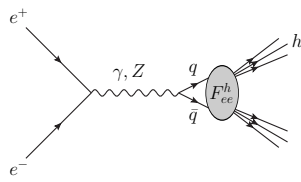


# Общая схема измерения $D_q^{\pi^\pm}$ и $M_{qq}^{\pi^\pm}$ из $e^+e^-$ и $\ell N$ ГНР

Измеряемые



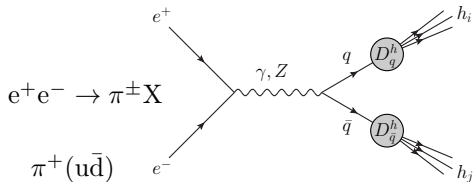
Наблюдаемые



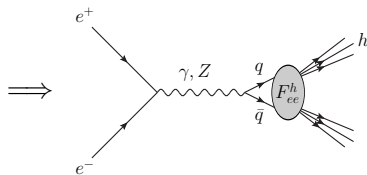
$$\underline{F_{ee}^{\pi^\pm}} = \frac{1}{\sigma_{ee}} \sum_q C_q [D_q^{\pi^\pm} + D_{\bar{q}}^{\pi^\pm}]$$

# Общая схема измерения $D_q^{\pi^\pm}$ и $M_{qq}^{\pi^\pm}$ из $e^+e^-$ и $\ell N$ ГНР

Измеряемые



Наблюдаемые

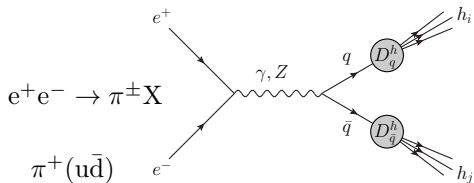


$$\underline{F_{ee}^{\pi^\pm}} = \frac{1}{\sigma_{ee}} \sum_q C_q [D_q^{\pi^\pm} + D_{\bar{q}}^{\pi^\pm}]$$

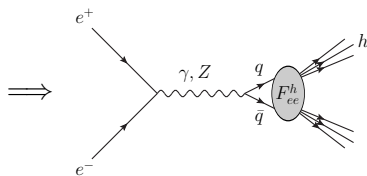
$$\begin{aligned} D_u^{\pi^+} &= D_d^{\pi^+} = D_d^{\pi^-} = D_u^{\pi^-} & D_d^{\pi^+} &= D_u^{\pi^+} = D_u^{\pi^-} = D_d^{\pi^-} \\ D_s^{\pi^+} &= D_{\bar{s}}^{\pi^+} = D_s^{\pi^-} = D_{\bar{s}}^{\pi^-} & D_c^{\pi^+} &= D_{\bar{c}}^{\pi^+} = D_c^{\pi^-} = D_{\bar{c}}^{\pi^-} \end{aligned}$$

# Общая схема измерения $D_q^{\pi^\pm}$ и $M_{qq}^{\pi^\pm}$ из $e^+e^-$ и $\ell N$ ГНР

Измеряемые



Наблюдаемые

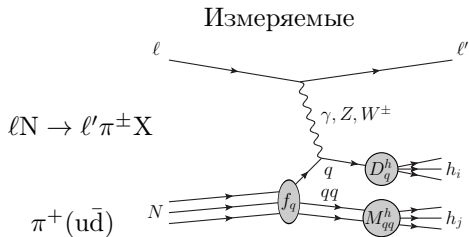


$$\underline{F_{ee}^{\pi^\pm}} = \frac{1}{\sigma_{ee}} \sum_q C_q [D_q^{\pi^\pm} + D_{\bar{q}}^{\pi^\pm}] = \frac{1}{\sigma_{ee}} [(C_d + C_u)(\underline{D_u^{\pi^+}} + D_d^{\pi^+}) + 2C_s D_s^{\pi^+} + 2C_c D_c^{\pi^+}]$$

$$D_u^{\pi^+} = D_d^{\pi^+} = D_d^{\pi^-} = D_u^{\pi^-} \quad D_d^{\pi^+} = D_u^{\pi^+} = D_u^{\pi^-} = D_d^{\pi^-}$$

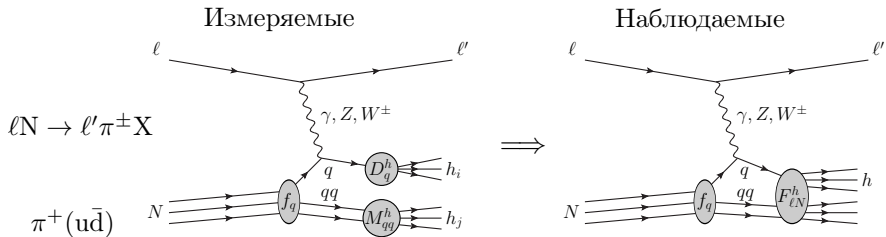
$$D_s^{\pi^+} = D_s^{\pi^-} = D_s^{\pi^-} = D_s^{\pi^+} \quad D_c^{\pi^+} = D_c^{\pi^+} = D_c^{\pi^-} = D_c^{\pi^-}$$

# Общая схема измерения $D_q^{\pi^\pm}$ и $M_{qq}^{\pi^\pm}$ из $e^+e^-$ и $\ell N$ ГНР

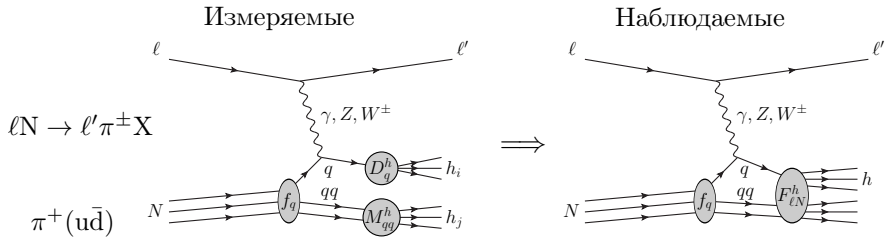




# Общая схема измерения $D_q^{\pi^\pm}$ и $M_{qq}^{\pi^\pm}$ из $e^+e^-$ и $\ell N$ ГНР

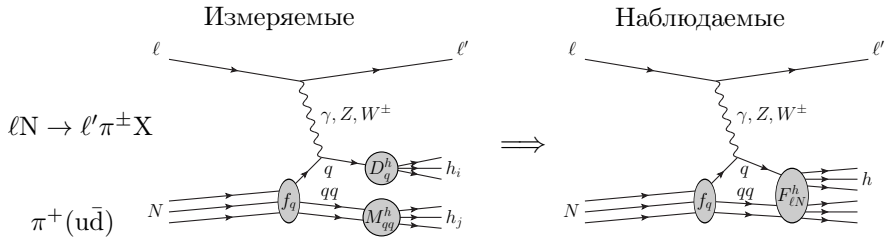


# Общая схема измерения $D_q^{\pi^\pm}$ и $M_{qq}^{\pi^\pm}$ из $e^+e^-$ и $\ell N$ ГНР



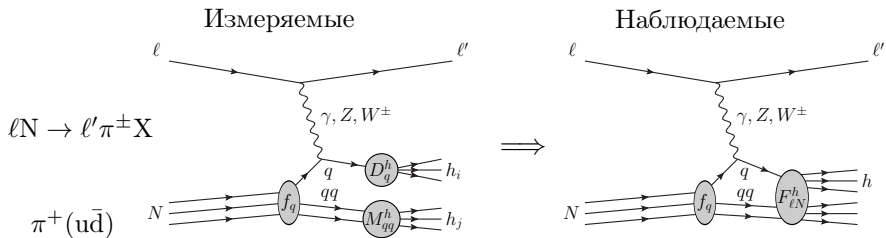
$$\underline{F_{\ell N}^{\pi^\pm}} = \frac{1}{\sigma_{\ell N}} \sum_q e_q^2 \left[ x \left( f_q^N D_q^{\pi^\pm} + f_{\bar{q}}^N D_{\bar{q}}^{\pi^\pm} \right) \right]$$

# Общая схема измерения $D_q^{\pi^\pm}$ и $M_{qq}^{\pi^\pm}$ из $e^+e^-$ и $\ell N$ ГНР



$$F_{\ell N}^{\pi^\pm} = \frac{1}{\sigma_{\ell N}} \sum_q e_q^2 \left[ x \left( f_q^N D_q^{\pi^\pm} + f_{\bar{q}}^N D_{\bar{q}}^{\pi^\pm} \right) + (1-x) \left( M_{q,N}^{\pi^\pm} + M_{\bar{q},N}^{\pi^\pm} \right) \right]$$

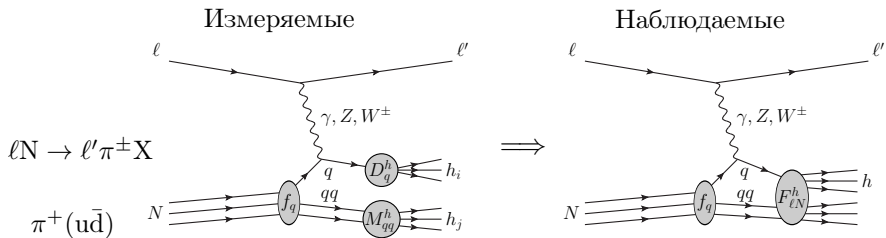
# Общая схема измерения $D_q^{\pi^\pm}$ и $M_{qq}^{\pi^\pm}$ из $e^+e^-$ и $\ell N$ ГНР



$$\underline{F}_{\ell N}^{\pi^\pm} = \frac{1}{\sigma_{\ell N}} \sum_q e_q^2 \left[ x \left( f_q^N D_q^{\pi^\pm} + f_{\bar{q}}^N D_{\bar{q}}^{\pi^\pm} \right) + (1-x) \left( M_{q,N}^{\pi^\pm} + M_{\bar{q},N}^{\pi^\pm} \right) \right]$$

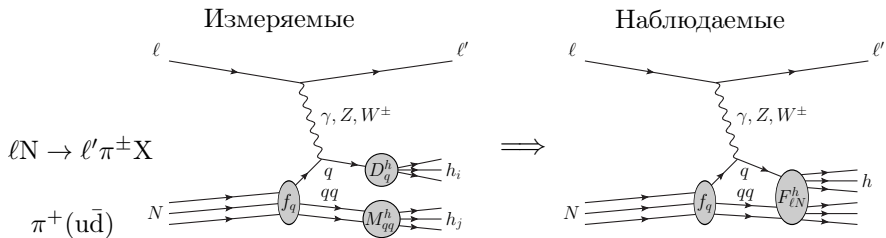
$$\sigma_{\nu N} \underline{F}_{\nu N}^{\pi^\pm} = \sum_{\substack{q=d,s \\ q'=u,c}} (|V_{q'q}|^2 x f_q^N D_{q'}^{\pi^\pm} + (1-x) M_{q,N}^{\pi^\pm}) + (1-y)^2 \sum_{\substack{\bar{q}=\bar{u} \\ q'=\bar{d},\bar{s}}} (|V_{qq'}|^2 x f_{\bar{q}}^N D_{q'}^{\pi^\pm} + (1-x) M_{\bar{q},N}^{\pi^\pm})$$

# Общая схема измерения $D_q^{\pi^\pm}$ и $M_{qq}^{\pi^\pm}$ из $e^+e^-$ и $\ell N$ ГНР



$$\underline{F_{\ell p}^{\pi^+}} = \frac{1}{\sigma_{\ell p}} \left[ x \left( (e_d^2 d + e_u^2 \bar{u}) D_d^{\pi^+} + (e_d^2 \bar{d} + e_u^2 u) \underline{D_u^{\pi^+}} + e_s^2 (s + \bar{s}) D_s^{\pi^+} \right) + (1-x) \left( M_{d,p}^{\pi^+} + M_{\bar{d},p}^{\pi^+} + M_{u,p}^{\pi^+} + M_{\bar{u},p}^{\pi^+} + 2M_{s,p}^{\pi^+} \right) \right]$$

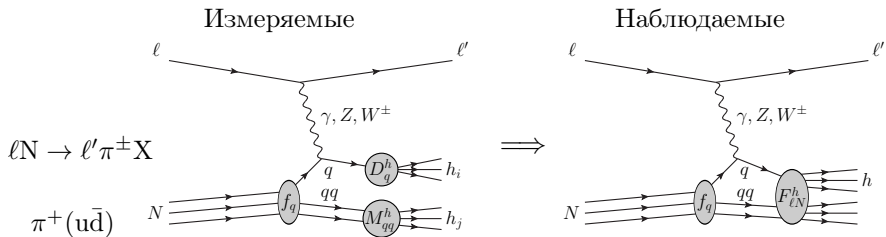
# Общая схема измерения $D_q^{\pi^\pm}$ и $M_{qq}^{\pi^\pm}$ из $e^+e^-$ и $\ell N$ ГНР



$$\underline{F_{\ell p}^{\pi^+}} = \frac{1}{\sigma_{\ell p}} \left[ x \left( (e_d^2 d + e_u^2 \bar{u}) D_d^{\pi^+} + (e_d^2 \bar{d} + e_u^2 u) \underline{D_u^{\pi^+}} + e_s^2 (s + \bar{s}) D_s^{\pi^+} \right) + (1-x) \left( M_{d,p}^{\pi^+} + M_{\bar{d},p}^{\pi^+} + M_{u,p}^{\pi^+} + M_{\bar{u},p}^{\pi^+} + 2M_{s,p}^{\pi^+} \right) \right]$$

$$M_{d,p}^{\pi^+} \simeq M_{uu}^{\pi^+}, \quad M_{\bar{u},p}^{\pi^+} \simeq M_{ud}^{\pi^+}, \quad M_{\bar{d},p}^{\pi^+} \simeq M_{uudd}^{\pi^+}, \quad M_{\bar{u},p}^{\pi^+} \simeq M_{uuud}^{\pi^+}, \quad M_{s,p}^{\pi^+} \simeq M_{uuds}^{\pi^+}$$

# Общая схема измерения $D_q^{\pi^\pm}$ и $M_{qq}^{\pi^\pm}$ из $e^+e^-$ и $\ell N$ ГНР



$$\underline{F_{\ell p}^{\pi^+}} = \frac{1}{\sigma_{\ell p}} \left[ x \left( (e_d^2 d + e_u^2 \bar{u}) D_d^{\pi^+} + (e_d^2 \bar{d} + e_u^2 u) D_u^{\pi^+} + e_s^2 (s + \bar{s}) D_s^{\pi^+} \right) + (1-x) \left( M_{d,p}^{\pi^+} + M_{\bar{d},p}^{\pi^+} + M_{u,p}^{\pi^+} + M_{\bar{u},p}^{\pi^+} + 2M_{s,p}^{\pi^+} \right) \right]$$

$$\underline{F_{\nu p}^{\pi^+}} = \frac{1}{\sigma_{\nu p}} \left[ \underline{D_u^{\pi^+}} x (d|V_{ud}|^2 + s|V_{us}|^2 + (1-y)^2 \bar{u}|V_{us}|^2) + D_s^{\pi^+} x (1-y)^2 \bar{u}|V_{ud}|^2 + D_c^{\pi^+} x (d|V_{cd}|^2 + s|V_{cs}|^2) + (1-y)^2 (1-x) \left( M_{d,p}^{\pi^+} + M_{s,p}^{\pi^+} + M_{\bar{u},p}^{\pi^+} \right) \right]$$

$$M_{d,p}^{\pi^+} \simeq M_{uu}^{\pi^+}, \quad M_{u,p}^{\pi^+} \simeq M_{ud}^{\pi^+}, \quad M_{\bar{d},p}^{\pi^+} \simeq M_{uudd}^{\pi^+}, \quad M_{\bar{u},p}^{\pi^+} \simeq M_{uuud}^{\pi^+}, \quad M_{s,p}^{\pi^+} \simeq M_{uuds}^{\pi^+}$$

$$\mathcal{F} = \mathcal{E}\mathcal{D} \quad \Longrightarrow \quad \mathcal{D} = \mathcal{E}^{-1}\mathcal{F}$$

$$\mathcal{F} = (F_{ee}^{\pi^\pm}, F_{\ell p}^{\pi^+}, F_{\ell n}^{\pi^+}, F_{\ell p}^{\pi^-}, F_{\ell n}^{\pi^-}, F_{\nu p}^{\pi^+}, F_{\nu n}^{\pi^+}, F_{\nu p}^{\pi^-}, F_{\nu n}^{\pi^-}, F_{\bar{\nu} p}^{\pi^+}, F_{\bar{\nu} n}^{\pi^+}, F_{\bar{\nu} p}^{\pi^-}, F_{\bar{\nu} n}^{\pi^-})$$

$$\mathcal{D} = (D_d^{\pi^+}, D_u^{\pi^+}, D_s^{\pi^+}, D_c^{\pi^+}, M_{d,p}^{\pi^+}, M_{d,p}^{\pi^-}, M_{u,p}^{\pi^+}, M_{u,p}^{\pi^-}, M_{d,p}^{\pi^+}, M_{d,p}^{\pi^-}, M_{\bar{u},p}^{\pi^+}, M_{\bar{u},p}^{\pi^-}, M_{s,p}^{\pi^+})$$

$$\mathcal{F}, \mathcal{E}, \mathcal{D}(z, p^T, \{s|_{XBj}, Q\})$$



## АНАЛИЗ МОДЕЛЬНО НЕЗАВИСИМ

$$\mathcal{F} = \mathcal{E}\mathcal{D} \quad \Longrightarrow \quad \mathcal{D} = \mathcal{E}^{-1}\mathcal{F}$$

$$\mathcal{F} = (F_{ee}^{\pi^\pm}, F_{\ell p}^{\pi^+}, F_{\ell n}^{\pi^+}, F_{\ell p}^{\pi^-}, F_{\ell n}^{\pi^-}, F_{\nu p}^{\pi^+}, F_{\nu n}^{\pi^+}, F_{\nu p}^{\pi^-}, F_{\nu n}^{\pi^-}, F_{\bar{\nu} p}^{\pi^+}, F_{\bar{\nu} n}^{\pi^+}, F_{\bar{\nu} p}^{\pi^-}, F_{\bar{\nu} n}^{\pi^-})$$

$$\mathcal{D} = (D_d^{\pi^+}, D_u^{\pi^+}, D_s^{\pi^+}, D_c^{\pi^+}, M_{d,p}^{\pi^+}, M_{d,p}^{\pi^-}, M_{u,p}^{\pi^+}, M_{u,p}^{\pi^-}, M_{d,p}^{\pi^+}, M_{d,p}^{\pi^-}, M_{\bar{u},p}^{\pi^+}, M_{\bar{u},p}^{\pi^-}, M_{s,p}^{\pi^+})$$

$$\mathcal{F}, \mathcal{E}, \mathcal{D}(z, p^T, \{s|_{XBj}, Q\})$$

$$\mathcal{F} = \mathcal{E}\mathcal{D} \quad \Longrightarrow \quad \mathcal{D} = \mathcal{E}^{-1}\mathcal{F}$$

$$\mathcal{F} = (F_{ee}^{\pi^\pm},$$

NOMAD

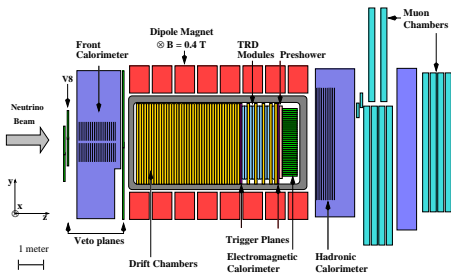
$$F_{\ell p}^{\pi^+}, F_{\ell n}^{\pi^+}, F_{\ell p}^{\pi^-}, F_{\ell n}^{\pi^-},$$

$$\underline{F_{\nu p}^{\pi^+}, F_{\nu n}^{\pi^+}, F_{\nu p}^{\pi^-}, F_{\nu n}^{\pi^-}}, F_{\bar{\nu} p}^{\pi^+}, F_{\bar{\nu} n}^{\pi^+}, F_{\bar{\nu} p}^{\pi^-}, F_{\bar{\nu} n}^{\pi^-})$$

$$\mathcal{D} = (D_d^{\pi^+}, D_u^{\pi^+}, D_s^{\pi^+}, D_c^{\pi^+},$$

$$M_{d,p}^{\pi^+}, M_{d,p}^{\pi^-}, M_{u,p}^{\pi^+}, M_{u,p}^{\pi^-}, M_{d,p}^{\pi^+}, M_{d,p}^{\pi^-}, M_{\bar{u},p}^{\pi^+}, M_{\bar{u},p}^{\pi^-}, M_{s,p}^{\pi^+})$$

$$\mathcal{F}, \mathcal{E}, \mathcal{D}(z, p^T, \{s|_{XBj}, Q\})$$

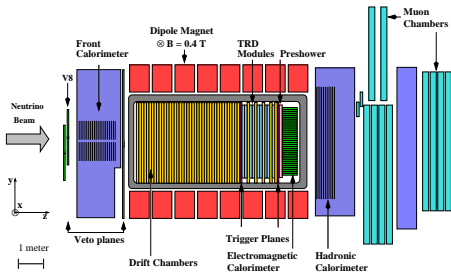


CERN-SPS: 1995-1998 гг.

$$\nu_\mu : \bar{\nu}_\mu : \nu_e : \bar{\nu}_e = 1.0 : 0.0678 : 0.0102 : 0.0027$$

- $\sim 1$  млн.  $\nu_\mu N$  ГНР событий
- $\Delta p/p \simeq 3.5\%$

# Эксп. данные NOMAD

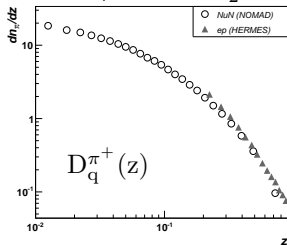


CERN-SPS: 1995-1998 гг.

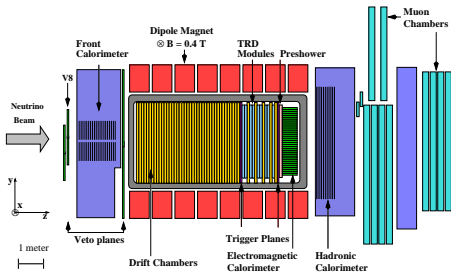
$$\nu_\mu : \bar{\nu}_\mu : \nu_e : \bar{\nu}_e = 1.0 : 0.0678 : 0.0102 : 0.0027$$

- $\sim 1$  млн.  $\nu_\mu N$  ГНР событий
- $\Delta p/p \simeq 3.5\%$

$$\left[ \frac{1}{2} (\pi^+ + \pi^-) \right] \nu_\mu N \rightarrow \mu \frac{\pi^+ + \pi^-}{2} X$$



# Эксп. данные NOMAD

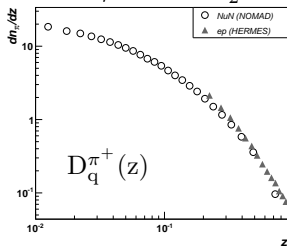


CERN-SPS: 1995-1998 гг.

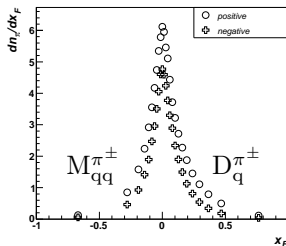
$$\nu_\mu : \bar{\nu}_\mu : \nu_e : \bar{\nu}_e = 1.0 : 0.0678 : 0.0102 : 0.0027$$

- $\sim 1$  млн.  $\nu_\mu N$  ГНР событий
- $\Delta p/p \simeq 3.5\%$

$$\frac{1}{2}(\pi^+ + \pi^-) \quad \nu_\mu N \rightarrow \mu \frac{\pi^+ + \pi^-}{2} X$$



$$\pi \text{ production} \quad \nu_\mu N \rightarrow \mu \pi^\pm X$$



- Предложена модельно независимая схема измерения функций фрагментации кварков и фактурных функций остатка нуклона для легких кварков в пионы в жестких реакциях, таких как  $e^+e^-$  столкновения и глубоко неупругие реакции взаимодействия заряженных лептонов и нейтрино с нуклонами.  
Едемская А. К., Наумов Д. В., Самойлов О. Б. Процессы фрагментации легких кварков в пионы // Письма в ЭЧАЯ. – 2011. – Т. 42, вып. 7, С.1276-1281.
- Проведено предварительное измерение полных функции фрагментации  $F_{\nu N}^{\pi^\pm}$  на основе данных по взаимодействию нейтрино с изоскалярной мишенью в эксперименте NOMAD:
  - нейтринные данные наиболее чувствительные к партонным функциям фрагментации  $D_q^h$
  - эксперимент NOMAD значительно расширяет диапазон исследуемых величин