

## ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ФУНКЦИЯМ ФРАГМЕНТАЦИИ В ЖЕСТКИХ ПРОЦЕССАХ

<sup>1</sup>О.Б. Самойлов, <sup>1,2</sup>А.К. Сокольников

## PHENOMENOLOGICAL APPROACH FOR FRAGMENTATION FUNCTIONS IN HARD PROCESSES

<sup>1</sup>O.B. Samoilov, <sup>1,2</sup>A.K. Sokol'nikova

В работе рассмотрены реакции с рождением кварков:  $e^+e^-$  – аннигиляции и глубоко неупругое рассеяние заряженных лептонов и (анти-)нейтрино с нуклонами, в терминах функции фрагментации. Проведено Монте-Карло моделирование с целью получить относительные сечения рождения (полные функции фрагментации) заряженных пионов, а также разделить партонные вклады в зависимости от взаимодействующего кварка. Построена схема извлечения партонных и фрактурных функций фрагментации из полученных моделированных событий. Проведена численная оценка вкладов в полную функцию фрагментации.

In this work we discuss quark productions:  $e^+e^-$  – annihilation and deep inelastic scattering of charged leptons and (anti-)neutrinos with nucleons in terms of fragmentation functions. We performed Monte Carlo simulations in order to obtain the relative cross sections (complete fragmentation function) of charged pions and to divide parton contributions depending on the struck quarks. We developed a scheme of extracting parton and fracture fragmentation functions from simulated events. There was held the numerical evaluation of contributions to the total fragmentation function.

### Введение

Физика элементарных частиц (ФЭЧ) перешла в эпоху (сверх) высоких энергий, созданных человеком, и прецизионных измерений, точность которых зачастую превосходит точность теоретических фундаментальных описаний природы этих процессов. Взаимодействия кварков описывают феноменологическими моделями, суть которых факторизация структуры нуклона с партонными функциями распределения (англ. parton distribution functions – PDF) и процессов адронизации (или фрагментации) этих партонов (кварков). Такой подход в целом хорошо себя зарекомендовал и широко используется в ФЭЧ. Каждое из этих распределений параметризуется функциями кинематических переменных  $x$ -Бюркена и модуля переданного 4-импульса  $Q$  для PDF и доли энергии кварка, уносимой адроном,  $z$  в процессе адронизации кварка. Однако, универсальность факторизации и вида функций, строго говоря, не проверена до конца.

Общепринятым подходом рождения адронов в жестких процессах является описание в терминах функций фрагментации кварков (англ. fragmentation functions) [Olive et al., 2014]. В этом подходе лидирующая роль отводится взаимодействующему жесткому кварку, зачастую пренебрегая остатком мишени (нуклона). В последнее время появляются работы учитывающие так называемые фрактурные функции, суть совместное описание структуры нуклона и фрагментации остатка нуклона (также в литературе дикварка) [Sessoriegi, 2009]. Функции фрагментации и фрактурные функции – это безразмерные функции, описывающие распределение энергии конечного состояния одной частицы в процессах жесткого рассеяния, таких как  $e^+e^-$  – аннигиляции или глубоко неупругое лептон-нуклонное рассеяние [Едемская, 2010]. Полная функция фрагментации (суть относительное сечение рождения адрона  $h$ ) является экспериментально измеряемой величиной, например для процесса аннигиляции:

$$F^h(z, s) = \frac{1}{\sigma_{tot}} \frac{d\sigma}{dz} (e^+e^- \rightarrow hX) \text{ или}$$

$$F_{LN}^h(z, s) = \frac{1}{\sigma_{tot}} \frac{d\sigma}{dz} (lN \rightarrow hX)$$

С другой стороны, полную функцию фрагментации  $F^h$  можно расписать на вклады от каждого кварка  $q$  мишени  $N$  (протона или нейтрон).

$$\begin{aligned} \sigma_{tot} F_{LN}^h &= \\ &= \sum_q e_q^2 \left[ x (f_q^N D_q^h + f_{\bar{q}}^N D_{\bar{q}}^h) + (1-x) (M_{q,N}^h + M_{\bar{q},N}^h) \right], \end{aligned}$$

где  $f_q^N$  – распределение кварка  $q$  в  $N$ ,  $D_q^h$  – партонная функция фрагментации,  $M_{q,N}^h$  – фрактурная функция, описывающая вероятность рождения адрона  $h$  из дикваркового остатка.

Так в работе [Наумов, 2013] мы предложили формализм извлечения партонных функций фрагментации и фрактурных функций из экспериментально получаемых полных функций фрагментации.

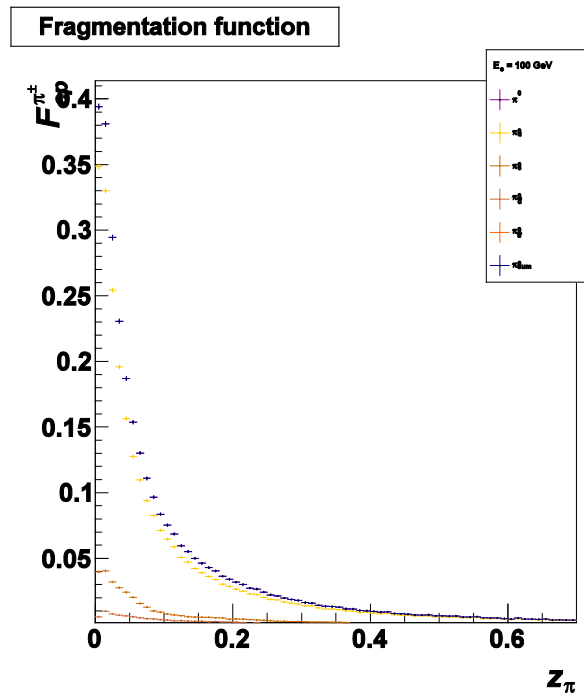
### 1. Измерение функции фрагментации в нейтринных взаимодействиях

На начальном этапе развития формализма мы выбрали нейтринные события из-за чувствительности нейтрино к флэйвору кварка и относительно небольшого числа партонных функций фрагментации в формулах. Зарядовая и изотопическая симметрии позволяют с самого начала избавиться от ряда слагаемых, что в дальнейшем сильно облегчает расчеты.

Также для нейтринных событий накоплена хорошая база экспериментальных данных эксперимента NOMAD, превосходящая другие эксперименты по диапазону измеряемых вероятностей рождения пионов по  $z$  в 30 раз [Altegoer, 1998; Astier, 2002; Steffen, 2008; Едемская, 2010].

Оценка вкладов в полную функцию фрагментации  $F_{\nu_{\mu} p}^{\pi^+}$  для реакции  $\nu_{\mu} p \Rightarrow \mu^- \pi^+ X$ .

Элем. функ. фраг.	Слагаемые	Симметрия	$\langle xq(x) \rangle$	$ V ^2$	Итоговое значение
$F_{\nu_{\mu} d}^{\pi^+}$	$xd(x)D_u^{\pi^+}  V_{ud} ^2$	$D_u^{\pi^+} = D_d^{\pi^-} = D_{\bar{d}}^{\pi^+} = D_u^{\pi^-}$	0.1369	0.95	0.130055
	$xd(x)D_c^{\pi^+}  V_{cd} ^2$	$D_{c(\bar{c})}^{\pi^-} = D_{s(\bar{s})}^{\pi^-} = D_{t(\bar{t})}^{\pi^-} = D_{b(\bar{b})}^{\pi^-}$	0.1369	0.05	0.006845
	$(1-x)M_{d,p}^{\pi^+}$	$M_{d,p}^{\pi^+} = M_{u,n}^{\pi^-}$	—	—	—
$F_{\nu_{\mu} s}^{\pi^+}$	$xs(x)D_u^{\pi^+}  V_{us} ^2$	$D_u^{\pi^+} = D_d^{\pi^-} = D_{\bar{d}}^{\pi^+} = D_u^{\pi^-}$	0.0230	0.05	0.00115
	$xs(x)D_c^{\pi^+}  V_{cs} ^2$	$D_{c(\bar{c})}^{\pi^-} = D_{s(\bar{s})}^{\pi^-} = D_{t(\bar{t})}^{\pi^-} = D_{b(\bar{b})}^{\pi^-}$	0.0230	0.95	0.02185
	$(1-x)M_{s,p}^{\pi^+}$	$M_{s(\bar{s}),p(n)}^{\pi^-} = M_{c(\bar{c}),p(n)}^{\pi^-} = M_{t(\bar{t}),p(n)}^{\pi^-} = M_{b(\bar{b}),p(n)}^{\pi^-}$	—	—	—
$F_{\nu_{\mu} b}^{\pi^+}$	$xb(x)D_c^{\pi^+}  V_{cb} ^2$	$D_{c(\bar{c})}^{\pi^-} = D_{s(\bar{s})}^{\pi^-} = D_{t(\bar{t})}^{\pi^-} = D_{b(\bar{b})}^{\pi^-}$	0.00064	0.002	$1.28 \cdot 10^{-6}$
	$xb(x)D_t^{\pi^+}  V_{tb} ^2$	$D_{c(\bar{c})}^{\pi^-} = D_{s(\bar{s})}^{\pi^-} = D_{t(\bar{t})}^{\pi^-} = D_{b(\bar{b})}^{\pi^-}$	0.00064	0.998	0.000639
	$(1-x)M_{b,p}^{\pi^+}$	$M_{s(\bar{s}),p(n)}^{\pi^-} = M_{c(\bar{c}),p(n)}^{\pi^-} = M_{t(\bar{t}),p(n)}^{\pi^-} = M_{b(\bar{b}),p(n)}^{\pi^-}$	—	—	—
$F_{\nu_{\mu} \bar{u}}^{\pi^+}$	$(1-y)^2 x\bar{u}(x)D_{\bar{d}}^{\pi^+}  V_{\bar{u}\bar{d}} ^2$	$D_{\bar{d}}^{\pi^+} = D_u^{\pi^-} = D_{\bar{u}}^{\pi^+} = D_{\bar{d}}^{\pi^-}$	0.0304	0.95	0.2888
	$(1-y)^2 x\bar{u}(x)D_{\bar{s}}^{\pi^+}  V_{\bar{u}\bar{s}} ^2$	$D_{c(\bar{c})}^{\pi^-} = D_{s(\bar{s})}^{\pi^-} = D_{t(\bar{t})}^{\pi^-} = D_{b(\bar{b})}^{\pi^-}$	0.0304	0.05	0.00152
	$(1-y)^2 (1-x)M_{\bar{u},p}^{\pi^+}$	$M_{\bar{u},p}^{\pi^+} = M_{\bar{d},n}^{\pi^-}$	—	—	—
$F_{\nu_{\mu} \bar{c}}^{\pi^+}$	$(1-y)^2 xc(x)D_{\bar{d}}^{\pi^+}  V_{\bar{c}\bar{d}} ^2$	$D_u^{\pi^+} = D_d^{\pi^-} = D_{\bar{d}}^{\pi^+} = D_u^{\pi^-}$	0.0087	0.05	$4.35 \cdot 10^{-5}$
	$(1-y)^2 x\bar{c}(x)D_{\bar{s}}^{\pi^+}  V_{\bar{c}\bar{s}} ^2$	$D_{c(\bar{c})}^{\pi^-} = D_{s(\bar{s})}^{\pi^-} = D_{t(\bar{t})}^{\pi^-} = D_{b(\bar{b})}^{\pi^-}$	0.0087	0.95	0.00827
	$(1-y)^2 (1-x)M_{\bar{c},p}^{\pi^+}$	$M_{s(\bar{s}),p(n)}^{\pi^-} = M_{c(\bar{c}),p(n)}^{\pi^-} = M_{t(\bar{t}),p(n)}^{\pi^-} = M_{b(\bar{b}),p(n)}^{\pi^-}$	—	—	—
$F_{\nu_{\mu} \bar{t}}^{\pi^+}$	$(1-y)^2 x\bar{t}(x)D_{\bar{s}}^{\pi^+}  V_{\bar{t}\bar{s}} ^2$	$D_{c(\bar{c})}^{\pi^-} = D_{s(\bar{s})}^{\pi^-} = D_{t(\bar{t})}^{\pi^-} = D_{b(\bar{b})}^{\pi^-}$	0	0	0.002
	$(1-y)^2 x\bar{t}(x)D_{\bar{b}}^{\pi^+}  V_{\bar{t}\bar{b}} ^2$	$D_{c(\bar{c})}^{\pi^-} = D_{s(\bar{s})}^{\pi^-} = D_{t(\bar{t})}^{\pi^-} = D_{b(\bar{b})}^{\pi^-}$	0	0	0.998
	$(1-y)^2 (1-x)M_{\bar{t},p}^{\pi^+}$	$M_{s(\bar{s}),p(n)}^{\pi^-} = M_{c(\bar{c}),p(n)}^{\pi^-} = M_{t(\bar{t}),p(n)}^{\pi^-} = M_{b(\bar{b}),p(n)}^{\pi^-}$	—	—	—



Полные функции фрагментации, разбитые по вероятностям рождения из конкретного кварка.

## 2. Оценка вкладов в полную функцию фрагментации

Мы провели Монте-Карло моделирование с целью выделения полной функции фрагментации или выходов пионов. Для наглядности мы разбили выходы пионов по вероятностям рождения из различных кварков в рассматриваемых реакциях (рисунок). Например, если расписать полную функцию фрагментации для процесса  $\nu_{\mu}^+ p \Rightarrow \mu^- \pi^+ X$ , то получим:

$$\sigma_{\nu_{\mu}^+ p} F_{\nu_{\mu}^+ d}^{\pi^+} = F_{\nu_{\mu}^+ d}^{\pi^+} + F_{\nu_{\mu}^+ s}^{\pi^+} + F_{\nu_{\mu}^+ b}^{\pi^+} + F_{\nu_{\mu}^+ \bar{u}}^{\pi^+} + F_{\nu_{\mu}^+ \bar{c}}^{\pi^+} + F_{\nu_{\mu}^+ \bar{t}}^{\pi^+}. \quad (1)$$

Сделав численную оценку вкладов в полную функцию фрагментации, мы так же принимали во внимание изотопические и структурные симметрии (?) функций фрагментации между собой и фрактурных функций. Из приведенной ниже таблицы видно, что наибольший вклад вносит первое слагаемое в уравнении (1).

### Заключение

Таким образом, в работе показано, что из экспериментальных данных можно извлечь партонные функции фрагментации. В дальнейшем планируется расширить формализм на весь класс лептон-нуклонных событий и измерить полные функции фрагментации на полном наборе данных эксперимента NOMAD по взаимодействию (анти) нейтрино с учетом типа мишени.

Авторы благодарят Наумова Д.В. за неоценимый вклад, а также за полезные советы и помощь в продвижении исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Едемская А.К., Наумов Д.В., Самойлов О.Б. Четырнадцатая научная конференция молодых ученых и специалистов ОИЯИ: Труды конференции. Дубна, 2010. С. 97–100
- Наумов Д.В., Самойлов О.Б., Сокольникова А.К. Семнадцатая научная конференция молодых ученых и специалистов ОИЯИ: Труды конференции. Дубна, 2013. С. 98–102
- Altegoer J. et al. [NOMAD Collaboration] // Nucl. Instrum. Meth. 1998. A 404. P. 96.
- Astier P. et al. [NOMAD Collaboration] // Phys. Lett. 2002. B 527. P. 23.
- Seccopieri F.A., Trentadue L. Fracture functions at HERA and LHC // 4<sup>th</sup> Workshop on the Implicati Conference: C08-05-26.4, 2009. P. 458–463.
- Olive K. et al. PDG 2014 [Particle Data Group Collaboration] // Chin. Phys. C38 (2014) 090001 (2014). <https://inspirehep.net/record/1315584>
- Nakamura K. et al. [Particle Data Group Collaboration] // J. Phys. 2010. G G 37, 075021.
- Steffens E. [HERMES Collaboration] // AIP Conf. Proc. 2008. V. 980. P. 48.
- Trentadue L. Nucl. // Phys. Proc. Suppl. 1998. V. 64. P. 152.

<sup>1</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия  
<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия