

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

УДК 539.123, 539.125, 539.126

САМОЙЛОВ ОЛЕГ БОРИСОВИЧ

Сечение рождения очарованного кварка и  
оценка существования пентакварка  $\Theta^+$  в  
нейтринных взаимодействиях в эксперименте  
**NOMAD**

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Дубна – 2011

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Дзелепова  
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель: кандидат физ.-мат. наук  
Наумов Дмитрий Вадимович

Научный консультант: доктор, профессор  
Петти Роберто

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук, профессор  
Сапожников Михаил Григорьевич  
кандидат физ.-мат. наук  
Алехин Сергей Иванович

Ведущая организация: Иркутский государственный университет

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета Д 720.001.03 при Объединенном институте ядерных  
исследований, расположенном по адресу: 141980, Моск. обл., г. Дубна, ул. Жо-  
лио-Кюри, д. 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института  
ядерных исследований.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печат-  
ью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря  
диссертационного совета.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физ.-мат. наук, профессор

Ю.А. Батусов

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы** Одной из актуальных тем для исследования вот уже несколько десятилетий является странность в нуклоне (протоне или нейтроне). Отсутствие “валентных” по группе  $SU(3)_F$  странных кварков в нуклонах не запрещает наличие “морских” странных кварков, которые были обнаружены уже в первых экспериментах по глубоко-неупругому рассеянию (ГНР) лептонов на нуклонах [1]. Такие ГНР процессы, характеризующиеся большой передачей 4-импульса  $Q$ , позволяют исследовать внутреннюю структуру нуклона. В настоящее время накоплен довольно большой экспериментальный материал и развиты теоретические методы извлечения партонных (кварковых и глюонных) распределений в нуклоне из анализа экспериментальных данных [2]. В то время как распределения валентных и морских  $u$ - и  $d$ -кварков в нуклонах измерены достаточно хорошо, распределения странных кварков  $s$  и антикварков  $\bar{s}$  известны с большой неопределенностью, достигающей 100% [3]. Причина такой неопределенности заключается, в основном, в том, что партонные распределения  $s$ - и  $\bar{s}$ -кварков извлекаются только из результатов измерений экспериментов с пучками нейтрино и антинейтрино. Эти эксперименты, на анализе которых основаны современные данные о кварковых распределениях, характеризуются большими статистическими и систематическими ошибками.

Экспериментальный метод измерения импульсных распределений (анти)странных кварков и рождения очарованных кварков в  $\nu N$ -взаимодействиях заключается в измерении сечения рождения димюонных событий – событий с двумя противоположно заряженными мюонами, детектируемых в процессе взаимодействия мюонного нейтрино на нуклонах с рождением очарованного адрона  $\nu_\mu N \rightarrow \mu^- h_c X$  и в последующем полуинклюзивном распаде очарованного адрона  $h_c \rightarrow \mu^+ Y$  с усредненной вероятностью  $B_\mu \simeq 8\%$  [3].

По своему построению кварковая модель [2, 4, 5] описывает статические

свойства адронов, не имея внутреннего динамического механизма для предсказания корреляций между различными степенями свободы. Это подтверждается в ряде экспериментальных фактов (спиновый кризис, сигма-член), не находящих естественного объяснения в рамках кварковой модели [2, 6]. С другой стороны, существует ряд моделей, происходящих из квантовой хромодинамики (КХД), обладающих соответствующей динамикой, которые могли бы улучшить кварковую модель добавлением в неё необходимых корреляций. Одной из таких моделей является модель киральных солитонов, которая весьма успешно описывает экспериментальные данные в пределе слабо нарушенной  $SU(3)_L \times SU(3)_R$  симметрии кирального лагранжиана КХД [7]. Кроме того, в рамках этой модели предсказывается не только существование октета и декуплета барионов, но и антидекуплета барионов с  $J^P = \frac{1}{2}^+$  с экзотическими свойствами. Эти адроны должны состоять из четырех кварков и одного антикварка в “валентном” состоянии. Самый легкий из них, пентакварк  $\Theta^+$ , имеет состав  $uudd\bar{s}$ , т.е. это барион с положительной странностью и очень малой шириной распада порядка  $15 \text{ МэВ}/c^2$ . В то время как в модели киральных солитонов упомянутая малость ширины распада  $\Theta^+$  довольно естественно объясняется динамикой и малым углом смешивания октета и антидекуплета барионов, кварковая модель вынуждена делать целый ряд предположений для объяснения такой малости. Экспериментальная “метка” распада пентакварка  $\Theta^+$  - сохраняющееся барионное число и открытая положительная странность - определяет моды распада  $\Theta^+$  на нейтрон и  $K^+$ -мезон или на протон и  $K^0$ -мезон. Небольшая предсказываемая ширина распада  $\Theta^+$  позволяет изучение его рождения на большинстве современных экспериментальных установках для различного класса реакций [8].

Анализ данных эксперимента NOMAD (Neutrino Oscillation MAgnetic Detector, WA-96) [9–11], проводимом на ускорителе SPS в CERN с 1995 по 1998 годы, по измерению рождения очарованного кварка посредством собы-

тий димюонного типа из рассеяния нейтрино на нуклоне и оценке существования пентакваркового состояния  $\Theta^+(uudd\bar{s})$  может значительно улучшить знания о странном море нуклона и лежащей в основе динамики взаимодействия кварков в существенно непertурбативной области.

**Цель диссертационной работы** Целью работы является изучение странного кварка в нуклоне в нейтринных взаимодействиях в эксперименте NOMAD. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- 1) Оценка существования пентакварка  $\Theta^+$  в распаде на протон и  $K_S^0$ -мезон, измерение интегральной и дифференциальной вероятности рождения исследуемого состояния как функции доли его продольного импульса в системе центра масс налетающего нейтрино и мишени  $x_F$ .
- 2) Измерение дифференциальных отношений сечений очарованного кварка по димюонной сигнатуре к инклюзивному сечению взаимодействия нейтрино с железом в переднем калориметре по каналу заряженного тока.

### **Научная новизна**

- В работе впервые измерен верхний предел на 90% уровне достоверности на рождение пентакварка  $\Theta^+$  как функции  $x_F$  на одно нейтринное событие в области масс 1530 МэВ/c<sup>2</sup>. Из полученного распределения установлены пределы на рождения  $\Theta^+$  в области фрагментации кварка и в области фрагментации мишени, равные  $\sim 2,5 \cdot 10^{-3}$  и  $\sim 1,0 \cdot 10^{-3}$  соответственно. Оцениваемый интегральный верхний предел на одно нейтринное событие составляет  $2,13 \cdot 10^{-3}$ .
- Идентифицирована рекордная статистика событий димюонного типа с лучшим на текущий момент порогом чувствительности к рождению очарованного кварка на реконструированную энергию нейтрино. В перед-

нем калориметре детектора NOMAD после вычета фона зарегистрировано 15 340 таких событий в интервале энергий нейтрино от 6 до 300 ГэВ.

- Впервые получены дифференциальные распределения отношений сечений очарованного кварка по димюонной сигнатуре к инклюзивному сечению взаимодействия нейтрино с железом по каналу заряженного тока  $\mathcal{R}_{\mu\mu} = \sigma_{\mu\mu}/\sigma_{cc}$  при энергиях пучка в широком интервале  $E_\nu \in [6;300]$  ГэВ для  $x \in [0;0,75]$  и  $Q^2 > 1$  ГэВ<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>. Стоит отметить, что в данный момент ни один нейтринный эксперимент не чувствителен к области  $[0,3;0,75]$  для переменной  $x$ -Бьёркена при измерении рождения димюонных событий.

### Практическая значимость

- Разработанная процедура предсказания фона на основе метода “смешивания” пар продуктов распада резонанса из разных событий в экспериментальных данных может быть использована при изучении резонансных состояний в других экспериментах, исследующих ГНР взаимодействия лептонов с нуклонами, например, COMPASS [12].
- Измеренные дифференциальные отношения сечений  $\mathcal{R}_{\mu\mu} = \sigma_{\mu\mu}/\sigma_{cc}$  позволяют уточнить кварк-партонную функцию распределения по импульсам странного кварка с точностью выше, чем в два раза [3].
- В два раза уточнен параметр фрагментации очарованного кварка в параметризации Коллинз-Спиллера (*Collins-Spiller*) [13], который составляет совместно для экспериментов E531 [14] и NOMAD:  $\epsilon = 0,165 \pm 0,025$ . Полученные результаты дают более точную информацию о рождении очарованных частиц в нейтринных взаимодействиях, например, для оценки фона при изучении  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  осцилляций в эксперименте OPERA [15].

- Измеренное отношение вероятностей рождения положительных и отрицательных мезонов  $(N_{\pi^+} + N_{K^+})/(N_{\pi^-} + N_{K^-})$  во взаимодействиях нейтрино с углеродом как функция импульсов мезонов предоставляет новую информацию для настройки модели рождения упомянутых адронов.

**На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:**

- Разработка “слепого” метода для исследования спектра инвариантной массы при резонансном анализе новых состояний в нейтринных взаимодействиях.
- Предложение и реализация процедуры оценки комбинаторного фона, основанная на методе “смешивания” пар продуктов распада резонанса из разных событий в экспериментальных данных, для ГНР взаимодействий лептонов с нуклонами. Показано, что учет энергии адронной струи, угловых и импульсных распределений предполагаемых продуктов распада от события к событию позволяет хорошо предсказывать данный источник фона.
- Построение алгоритма идентификации протонов для наибольшей чувствительности к сигналу от пентакварка  $\Theta^+$  для различных значений  $x_F$  и  $\cos \theta^*$ , где  $\theta^*$  - угол между протоном в системе покоя  $\Theta^+$  и импульсом  $\Theta^+$  в лабораторной системе отсчета.
- Результат исследования спектра инвариантной массы  $pK_S^0$  для оценки существования пентакварка  $\Theta^+$  для всех значений переменной  $x_F$  в  $\nu_\mu N$  взаимодействиях эксперимента NOMAD. Измерение верхнего предела на 90% уровне достоверности на рождение пентакварка  $\Theta^+$ , составляющего  $2,13 \cdot 10^{-3}$  на одно нейтринное событие в области масс 1530 МэВ/ $c^2$  после интегрирования по всем значениям  $x_F$ .

- Отбор событий димюонного типа в переднем калориметре детектора NOMAD с порогом чувствительности к рождению очарованного кварка на реконструированную энергию нейтрино равным 6 ГэВ. Оценка фона от распадов  $\pi^+$ ,  $K^+$  мезонов по лептонной моде распада на  $\nu_\mu\mu^+$ . После вычета фона зарегистрировано 15 340 событий димюонного типа в интервале энергий от 6 до 300 ГэВ.
- Измерение дифференциальных отношений сечений димюонного рождения с-кварка и инклюзивного взаимодействия нейтрино с нуклоном по каналу заряженного тока  $\mathcal{R}_{\mu\mu} = \sigma_{\mu\mu}/\sigma_{cc}$  как функций реконструированной энергии нейтрино, переносимого импульса взаимодействующего партона (кварка)  $x$ -Бьёркена и полной энергии в системе центра масс W-бозона и взаимодействующего партона (кварка) при энергиях пучка в широком интервале  $E_\nu \in [6;300]$  ГэВ для  $x \in [0;0,75]$  и  $Q^2 > 1$  ГэВ<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>.
- Уточнение значения параметра фрагментации очарованного кварка в параметризации Коллинз-Спиллера, полученного из совместного анализа данных экспериментов E531 и NOMAD:  $\epsilon = 0,165 \pm 0,025$ .
- Измерение отношения вероятностей рождения положительно и отрицательно заряженных мезонов  $(N_{\pi^+} + N_{K^+})/(N_{\pi^-} + N_{K^-})$  во взаимодействиях нейтрино с углеродом как функции импульсов мезонов для моделируемых событий и накопленных экспериментальных данных.

**Апробация работы** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных российских и международных конференциях: VIII, IX, XIV научные конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ (Дубна, 2004, 2005, 2010), XXXIII международная конференция по физике высоких энергий (Москва, 2006), XXVIII и XXX международные рабочие совещания по нейтринной физике на ускорителях (Дубна, 2006,



2008), XII международная конференция по спектроскопии адронов (Фраскати, Италия, 2007), рабочее совещание по поляризации странного кварка в глубоко-неупругом рассеянии лептонов с нуклонами (Тренто, Италия, 2008), XIV международная Ломоносовская конференция по физике частиц (Москва, 2009), XVIII международное рабочее совещание по физике глубоко-неупругого рассеяния (Флоренция, Италия, 2010), а также на рабочих совещаниях и научных семинарах ЛЯП и ЛФВЭ ОИЯИ, ИФВЭ, ИНФН, ИГУ, коллаборации NOMAD, на российских и международных школах: IV, V, VIII, X летние Байкальские школы ОИЯИ-ИГУ по физике элементарных частиц и астрофизике (Б.Коты, 2004, 2005, 2008, 2010), Европейская школа по физике высоких энергий ЦЕРН-ОИЯИ (Трест, Чехия, 2007), II международная школа по физике нейтрино (Йокогама и Токай, Япония, 2010), IV международная школа по физике нейтрино им. Б.М. Понтекорво (Алушта, Украина, 2010).

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 12 печатных работах, из них 3 статьи в рецензируемых журналах [A1, A2, A3], 6 статей в сборниках трудов конференций [A4, A5, A6, A7, A8, A9] и 3 тезиса докладов [A10, A11, A12].

**Личный вклад автора** Автор участвовал во всех работах, результаты которых вошли в диссертацию: изучении и настройке моделирования исследуемых процессов, обработке экспериментальных данных и интерпретации результатов, их представлении и опубликовании.

**Структура и объем диссертации** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и включает список сокращений и обозначений и приложение.

## Содержание работы

**Во Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** приводится обзор литературных источников по теме диссертации. Конспективно излагается  $SU(3)_F$  кварковая модель и систематизация адронов на её основе. Приводятся сведения о мультиплетах адронов. Рассматриваются кварковая структура протона и современные методы её теоретического и экспериментального исследования. Приводится обзор экспериментальных данных по измерению сечений димюонного рождения в нейтринных взаимодействиях. Подробно обсуждаются сегодняшние неопределенности в знании странного моря нуклона. Дается обзор теоретических и экспериментальных исследований по оценке существования и вероятности рождения экзотических пентакварковых состояний.

**Во второй главе** дается описание пучка нейтрино и всех важнейших компонентов установки NOMAD на ускорителе SPS в ЦЕРН. Определяется система координат детектора, кратко описываются система вето, передний калориметр, дрейфовые камеры, триггерные плоскости, детектор переходного излучения, детектор ливней, электромагнитный калориметр, адронный калориметр и мюонные камеры. На рис. 1 представлена схема детектора NOMAD.

В главе определяются триггеры (наборы сигналов электроники), используемые при наборе данных. Дается принципиальная схема реконструкции событий, цепочка программ моделирования пучка нейтрино и событий взаимодействия нейтрино в установке NOMAD.

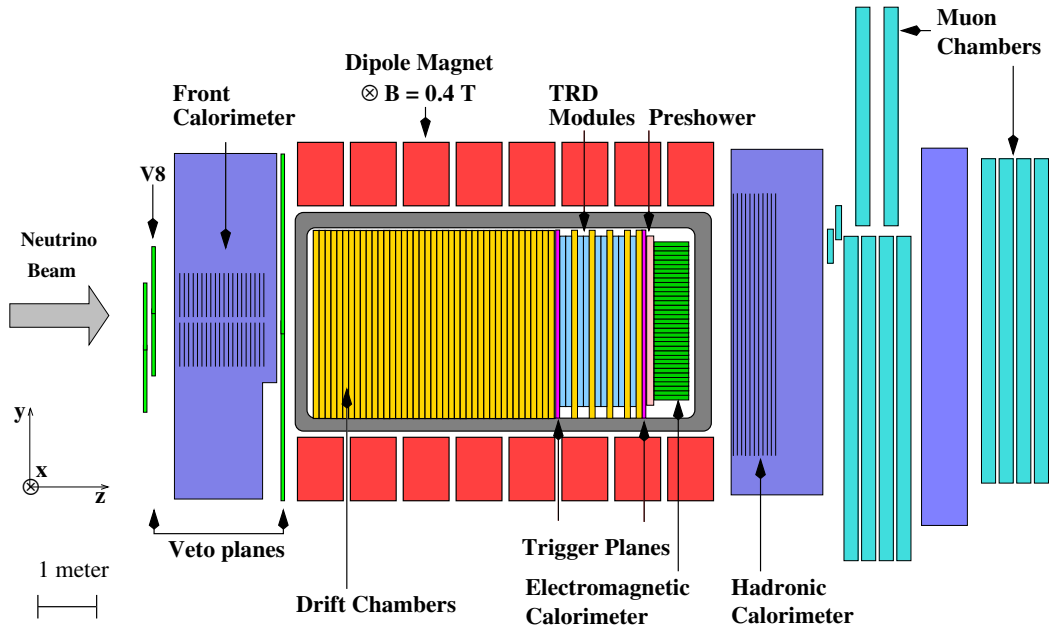


Рис. 1. Детектор NOMAD (вид сбоку).

В третьей главе изложен анализ по оценке существования пентакварка  $\Theta^+$  в распаде на протон и  $K_S^0$ -мезон в инклюзивных нейтринных взаимодействиях эксперимента NOMAD. Для анализа использовались данные, накопленные в дрейфовых камерах за четыре года работы детектора. Изложен подход “слепого” метода для оценки рождения пентакварка  $\Theta^+$  с предсказываемой массой в области  $1530 \text{ МэВ}/c^2$ , который основан на системе заранее продуманных процедур и критериев качества, применяемых к экспериментальным данным один раз, что позволяет исключить предвзятость экспериментатора к получаемому результату.

Обнаружение резонансной частицы, распадающейся на несколько частиц, определяется наличием пика в спектре инвариантной массы её продуктов распада. Это связано с тем, что число рождающихся частиц пропорционально сечению процесса, которое имеет пик вблизи массы резонанса [2, 16].

Типичный вид реконструированного ГНР события  $\nu_\mu N \rightarrow \mu^- p K_S^0 X$  в дрейфовых камерах с инвариантной массой пары  $p K_S^0$  в области предсказываемой массы  $\Theta^+$  показан на рис. 2.

$E_\nu$	=	106,9 ГэВ
$E_\mu$	=	73,1 ГэВ
$Q^2$	=	19,8 ГэВ <sup>2</sup> /c <sup>2</sup>
$W^2$	=	44,5 ГэВ <sup>2</sup> /c <sup>4</sup>
$p_P$	=	492 МэВ/c
$p_{K_S^0}$	=	764 МэВ/c
$M_{pK_S^0}$	=	1535 МэВ/c <sup>2</sup>

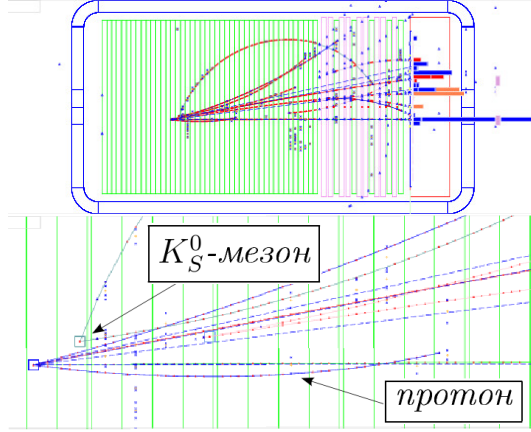


Рис. 2. Событие из экспериментальных данных с кандидатом в пентакварковое состояние  $\Theta^+$  (тип 16 737, событие 14 693). В легенде слева приведена информация о событии: реконструированные энергии налетающего нейтрино  $E_\nu$  и вылетающего мюна  $E_\mu$ , квадрат переданного 4-импульса от нейтрино к взаимодействующему кварку  $Q^2$  и квадрат инвариантной массы родившейся адронной системы  $W^2$ , импульсы протона и  $K_S^0$ -мезона, инвариантная масса пары  $pK_S^0$ .

В главе описываются процедуры отбора нейтринных событий по каналам заряженного и нейтрального токов, идентификации  $K_S^0$ -мезонов и протонов. Полная статистика отобранных событий показана в таб. 1.

Таблица 1. Количество реконструированных  $\nu_\mu N$  взаимодействий, идентифицированных  $K_S^0$ -мезонов и средняя множественность протонов на одно нейтринное событие.

	$N_{\nu_\mu N}$	$N_{K_S^0}$	$N_p/N_{\nu_\mu N}$
Заряженный ток	785 232	15 934	0,77
Нейтральный ток	393 539	7 657	0,72
Полная стат.	1 178 771	23 591	—

Проводится сравнение реконструированных кинематических переменных в моделировании Монте Карло и в накопленных экспериментальных данных. Рассматриваются глобальные переменные нейтринных взаимодействий, переменные, описывающие рождение и распад  $K_S^0$ -мезонов, и переменные, характеризующие поведение протонов в адронной струе.

Детально описывается процедура оценки фонового распределения на основе метода “смешанных” пар продуктов распада резонанса из разных событий в экспериментальных данных. Для оценки фонового спектра инвариантной массы  $pK_S^0$  для каждого протона из одного события были отобраны несколько  $K_S^0$ -мезонов из других событий в экспериментальных данных. При подборе таких пар было уделено особое внимание свойствам оригинальных событий, таких как множественность рождения протонов и  $K_S^0$ , их импульсы, угол между ними, а также энергия и направление распространения адронной системы в событиях. Спектр инвариантной массы полученных пар являлся основным методом оценки фона. Процедура была проверена на распадах  $\Lambda \rightarrow p\pi^-$ ,  $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$  и  $K^{*\pm} \rightarrow K_S^0\pi^\pm$ . Во всех случаях наблюдается хорошее согласие между экспериментальными данными, моделированием Монте Карло и предсказываемыми фоновыми распределениями. Наблюдается также хорошее согласие для спектра инвариантной массы  $pK_S^0$  во всей области рассматриваемых масс, исключая сигнальную область  $\Theta^+$ .

Алгоритм отбора протонов использует информацию трех поддетекторов при построении функций правдоподобия для отделения протонов от других положительно заряженных частиц, регистрируемых в детекторе. Критерии отбора протонов были подобраны для наибольшей чувствительности (максимальной значимости) к сигналу от пентакварка  $\Theta^+$  для различных значений  $x_F$  и  $\cos\theta^*$ . Алгоритм был проверен на распаде  $\Lambda \rightarrow p\pi^-$  вблизи первичной вершины  $\nu_\mu N$  взаимодействий как для моделируемых событий, так и для накопленных экспериментальных данных.

В спектре инвариантной массы  $pK_S^0$  мы не наблюдаем сигнал от  $\Theta^+$  для всех значений переменной  $x_F$  в  $\nu_\mu N$  взаимодействиях в рассматриваемом эксперименте. В таб. 2 представлены полученные верхние пределы на числа со-

Таблица 2. Результат аппроксимации спектра инвариантной массы  $pK_S^0$  в предположении наличия сигнала от  $\Theta^+$  в области масс 1530. Приведены: достоверность сигнала  $S_L$  на число сигнальных событий в спектре  $N_S$  (fit) и верхние пределы на 90% уровне достоверности на число  $\Theta^+$  кандидатов  $N_S^{up}$  и на относительное рождение  $R^{up}$  на  $10^3$  нейтринных взаимодействий.

$x_F$ интервал	[-1;-0,6)	[-0,6;-0,3)	[-0,3;0)	[0;0,4)	[0,4;1]	[-1;1]
$N_S$ (fit)	12	29	-26	-34	24	-33
$S_L$	1,38	1,72	1,35	1,85	1,25	0,97
$N_S^{up}$	28	68	39	36	52	67
$R^{up}$	2,80	2,60	0,84	0,79	1,00	2,13

бытий и на вероятность рождения  $\Theta^+$  на одно нейтринное взаимодействие для пяти интервалов по переменной  $x_F$ . Измеренный верхний предел на 90% уровне достоверности на рождение пентакварка  $\Theta^+$ , составляет  $2,13 \cdot 10^{-3}$  на одно нейтринное событие в области масс 1530 МэВ/с<sup>2</sup> после интегрирования по всем значениям  $x_F$ , на основании которого нельзя сделать утверждение о рождении пентакварка  $\Theta^+$ . Проведенный нами анализ не подтверждает полученный ранее факт обнаружения пентакварка  $\Theta^+$  из анализа данных пузырьковых камер BEBC (WA21, WA25, WA59) в ЦЕРН и больших 15-ти дюймовых пузырьковых камер (E180, E632) в лаборатории Ферми [17]. На рис. 3 показаны чувствительность, верхний предел рождения  $\Theta^+$  и распределение от потенциального  $\Theta^+$  сигнала как функции  $x_F$ .

Результаты третьей главы опубликованы в работах [A1, A2, A4, A5, A6, A7, A10].

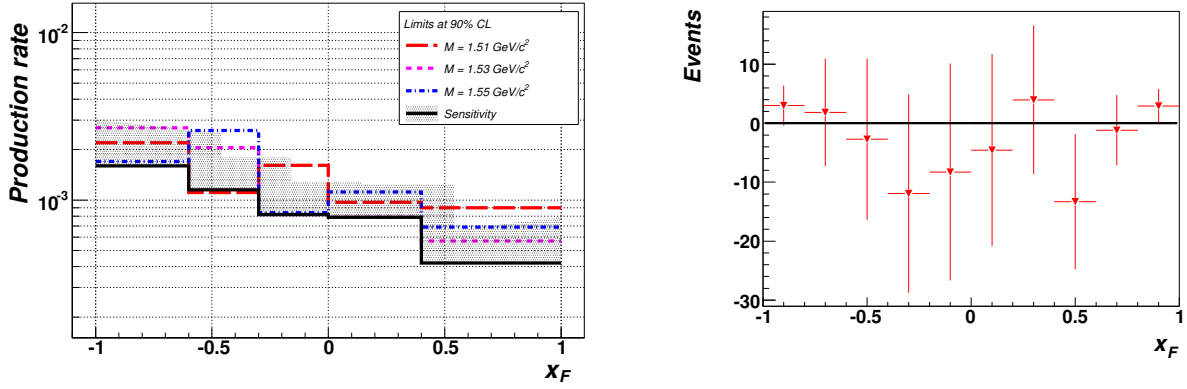


Рис. 3. Слева показаны чувствительность и верхний предел рождения на 90% уровне достоверности (CL)  $\Theta^+$  как функции  $x_F$  для различных значений масс  $\Theta^+$ : 1510, 1530, 1550 МэВ/ $c^2$ . Справа представлено распределение по переменной  $x_F$  от потенциального  $\Theta^+$  сигнала.

В четвертой главе изложен анализ рождения очарованного кварка по димюонной сигнатуре в нейтринных взаимодействиях эксперимента NOMAD. Для анализа использовались данные, накопленные в переднем калориметре за четыре года работы детектора. Типичный вид реконструированного события  $\nu_\mu N \rightarrow \mu^- \mu^+ X$  в детекторе NOMAD с первичной вершиной взаимодействия в переднем калориметре показан на рис. 4.

В главе описываются процедуры отбора нейтринных событий по каналу заряженного тока, идентификация положительно и отрицательно заряженных мюонов. Описывается система триггеров переднего калориметра, эффект насыщения сигнала регистрации электроники и её калибровка. Проводится сравнение реконструированных кинематических переменных в моделированных событиях и в накопленных экспериментальных данных. Рассматриваются глобальные переменные нейтринных взаимодействий и переменные, описывающие рождение димюонных событий в адронной струе. Для всех переменных наблюдается хорошее согласие между данными и применяемым моделированием.

$E_\nu$	=	81,4 ГэВ
$E_{\mu^-}$	=	32,6 ГэВ
$E_{\mu^+}$	=	19,0 ГэВ
$M_{\mu\mu}$	=	0,945 ГэВ/c <sup>2</sup>
$Q^2$	=	3,26 ГэВ <sup>2</sup> /c <sup>2</sup>
$W^2$	=	89,4 ГэВ <sup>2</sup> /c <sup>4</sup>

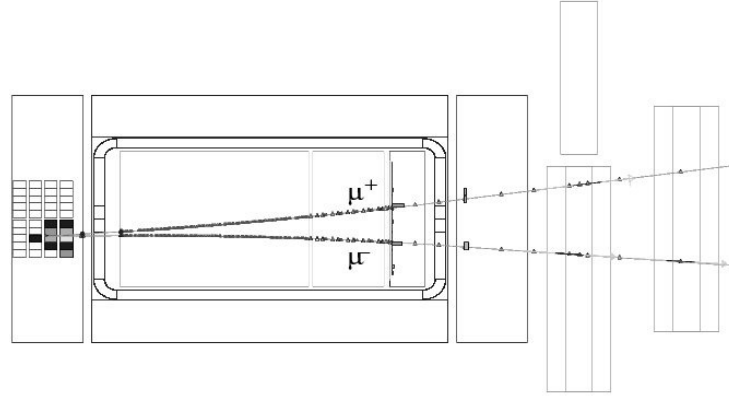


Рис. 4. Димюонное событие из экспериментальных данных (тип 8 138, событие 23 906). В легенде слева приведена информация о событии: реконструированные энергии налетающего нейтрино  $E_\nu$  и вылетающих мюонов, лидирующего  $E_{\mu^-}$  и “очарованного”  $E_{\mu^+}$ , инвариантная масса этой пары  $\mu^- \mu^+$ , квадрат переданного 4-импульса от нейтрино к взаимодействующему кварку  $Q^2$  и квадрат инвариантной массы родившейся адронной системы  $W^2$ .

Детально описывается процедура оценки фона от распадов  $\pi^+$ ,  $K^+$  мезонов по лептонной моде распада на  $\nu_\mu \mu^+$ . Для расчета числа фоновых событий были использованы димюонные события одинакового знака в переднем калориметре (FCAL), умноженные на коэффициент из моделирования Монте Карло (MC)

$$N_{\mu\mu_{bg}^+}^{\text{DATA}} = N_{\mu\mu^-}^{\text{FCAL}} \cdot \left( N_{\mu\mu_{bg}^+}^{\text{MC}} / N_{\mu\mu^-}^{\text{MC}} \right)_{\text{corr}}^{\text{DCH}}.$$

Этот коэффициент был рассчитан при измерении отношения вероятностей рождения положительно и отрицательно заряженных легких мезонов  $(N_{\pi^+} + N_{K^+}) / (N_{\pi^-} + N_{K^-})$  как функция импульсов мезонов в дрейфовых камерах (DCH).

Таким образом, после вычета фона реконструировано 15 340 димюонных событий и порядка 9 млн. событий инклюзивных взаимодействий  $\nu_\mu N$  по каналу заряженного тока на железе. Данная статистика димюонных событий является рекордной на текущий момент (см. таб. 3).



Таблица 3. Сопоставление мировых данных по статистике димюонных событий и энергии нейтринного пучка (диапазон и среднее значение).

Эксп.	Публ.	Стат. ( $N_{\mu\mu}$ )	$E_\nu$ (ГэВ)
CDHS [18]	Янв 1982	9 922	30-250 (20)
CHARM II [19]	Окт 1999	3 100	35-290 (24)
CCFR [20, 21]	Фев 2001	5 030	30-600 (150)
NuTeV [21]	Фев 2001	5 102	20-400 (157.8)
CHORUS [22]	Апр 2008	8 910	15-240 (27)
NOMAD	2011	15 340	6-300 (27)

Для анализа мы выбрали измерение отношения двух сечений, димюонного  $\sigma_{\mu\mu}$  и инклюзивного  $\sigma_{cc}$ , как функции кинематических переменных

$$\mathcal{R}_{\mu\mu}(x) \equiv \sigma_{\mu\mu}/\sigma_{cc} \simeq N_{\mu\mu}/N_{cc}(x), \text{ где } x = E_\nu, x, \sqrt{\hat{s}}$$

Здесь  $N_{\mu\mu}$ ,  $N_{cc}$  - числа регистрируемых событий по димюонной сигнатуре и нейтринных событий по каналу заряженного тока соответственно,  $E_\nu$  - энергия нейтрино,  $x$  - масштабная переменная Бьёркена и  $\sqrt{\hat{s}} = Q^2(1/x - x)$  - полная энергия в системе центра масс  $W$ -бозона и взаимодействующего партонa, позволяющая измерить значение массы  $c$ -кварка. Измерение относительной характеристики  $\mathcal{R}_{\mu\mu}$  позволяет исключить систематические ошибки, входящие в её числитель и знаменатель.

Измерены дифференциальные отношения сечений димюонного рождения  $c$ -кварка и инклюзивного взаимодействия нейтрино с нуклоном по каналу заряженного тока  $\mathcal{R}_{\mu\mu}$  с оценкой систематических погрешностей, связанных в основном с предсказанием фоновых событий, фрагментацией  $c$ -кварка в очарованные адроны и ошибкой на значение массы  $c$ -кварка (см. рис. 5).

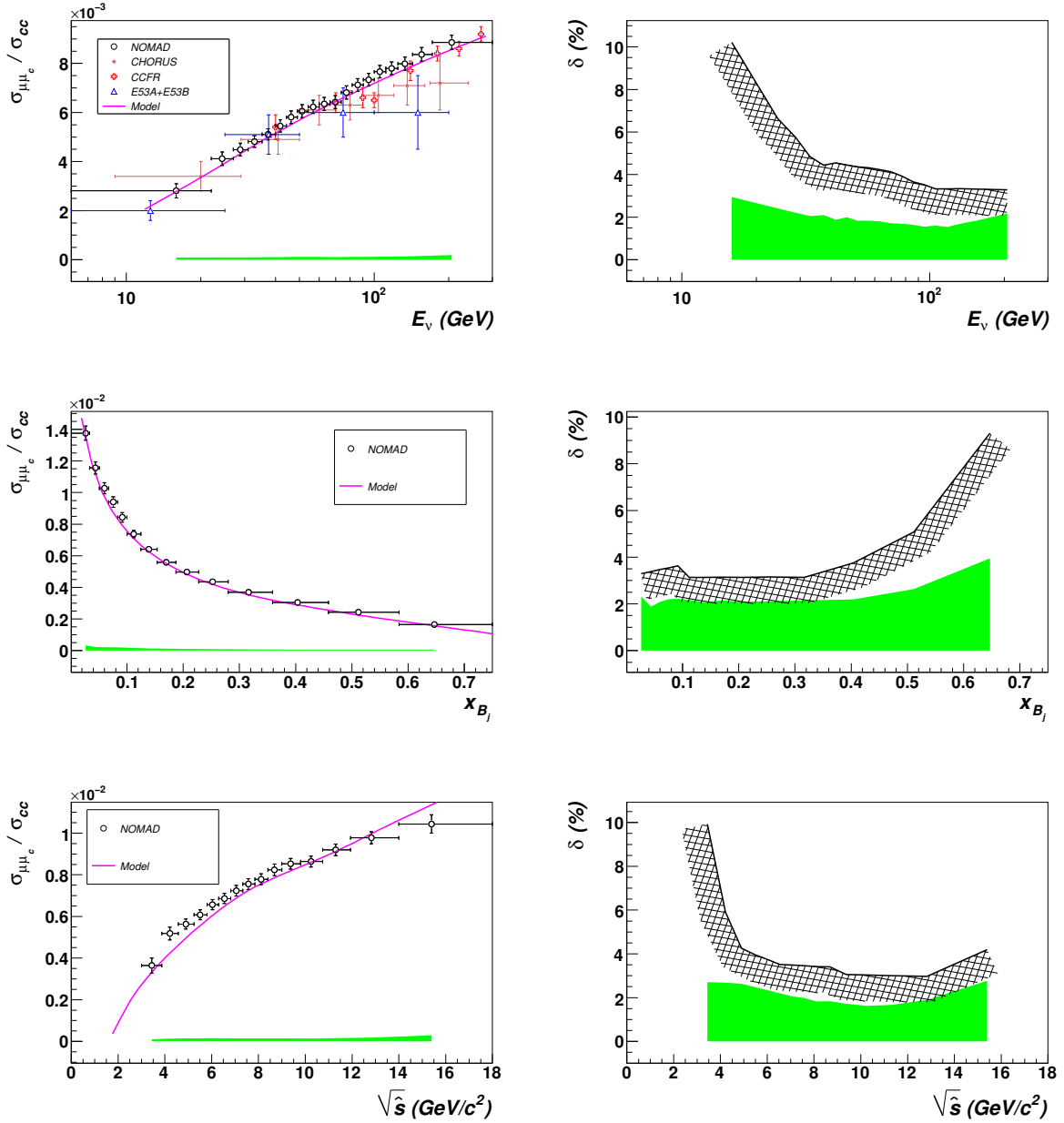


Рис. 5. Отношение  $\mathcal{R}_{\mu\mu}$  между сечениями димюнного рождения  $c$ -кварка и инклюзивного взаимодействия нейтрино с нуклоном по каналу заряженного тока: энергия нейтрино (вверху), переносимый импульс взаимодействующего партона (кварка)  $x$ -Бьёркена (середина) и полная энергия в системе центра масс  $W$ -бозона и взаимодействующего партона (кварка)  $\sqrt{\hat{s}}$  (внизу). Отдельно статистические (гистограмма) и систематические (подложка) неопределенности показаны на распределениях справа. Представленная функция (Model) построена независимо от данных эксперимента NOMAD, и основывается на глобальной аппроксимации существующих данных из анализа [3].

Результаты четвертой главы опубликованы в работах [A3, A8, A9, A11, A12].

**Приложение** завершает диссертацию более детальной информацией о сечении рождения очарованного кварка. Приводятся таблицы значений отношения сечений рождения очарованного кварка по димюонной сигнатуре и инклюзивного взаимодействия нейтрино с нуклоном по каналу заряженного тока  $\mathcal{R}_{\mu\mu} = \sigma_{\mu\mu}/\sigma_{cc}$  как функций кинематических переменных: энергии нейтрино, переносимого импульса взаимодействующего партона (кварка)  $x$ -Бьёркена и полной энергии в системе центра масс  $W$ -бозона и взаимодействующего партона (кварка)  $\sqrt{\hat{s}}$ .

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы:

- Исследован спектр инвариантной массы  $pK_S^0$  в нейтринных взаимодействиях эксперимента NOMAD для оценки существования пентакварка  $\Theta^+$  при различных значениях доли его продольного импульса в системе центра масс налетающего нейтрино и мишени  $x_F$ . В изучаемом спектре не наблюдается значимого сигнала от пентакварка  $\Theta^+$  с предсказываемой массой в области  $1530 \text{ МэВ}/c^2$  для всей области значений  $x_F$ .
- Впервые в нейтринных взаимодействиях измерен верхний предел на 90% уровне достоверности на рождение пентакварка  $\Theta^+$ , составляющий  $2,13 \cdot 10^{-3}$  на одно нейтринное событие в области масс  $1530 \text{ МэВ}/c^2$  после интегрирования по всем значениям  $x_F$ . Оценка была получена “слепым” методом, впервые разработанным и реализованным в нейтринных взаимодействиях для резонансного анализа.
- Для анализа резонансных состояний разработана процедура оценки комбинаторного фона, основанная на методе “смешивания” пар продуктов распада резонанса из разных событий в экспериментальных данных, для ГНР взаимодействий лептонов с нуклонами. Показано, что учет энергии адронной струи, угловых и импульсных распределений предполагаемых продуктов распада от события к событию позволяет предсказывать данный источник фона с точностью, равной статистическим экспериментальным ошибкам.
- Основываясь на информации трех поддетекторов NOMAD, произведен расчет функции максимального правдоподобия для протонной и фоновой гипотез с наибольшей чувствительностью к сигналу  $\Theta^+$  при различных значениях  $x_F$  и  $\cos \theta^*$ , где  $\theta^*$  - угол между протоном в системе покоя  $\Theta^+$  и импульсом  $\Theta^+$  в лабораторной системе отсчета.

- В переднем калориметре детектора NOMAD зарегистрирована наибольшая в мире статистика событий димюонного типа с рождением с-кварка, равная 15 340. Минимальная реконструированная энергия нейтрино в спектре зарегистрированных событий, составляющая 6 ГэВ, обеспечивает наилучшую чувствительность данных к массе с-кварка среди всех нейтринных экспериментов, исследовавших димюонные события.
- На основании полученных данных эксперимента NOMAD измерено отношение сечений рождения очарованного кварка по димюонной сигнатуре и инклюзивного взаимодействия нейтрино с нуклоном по каналу заряженного тока  $\mathcal{R}_{\mu\mu} = \sigma_{\mu\mu}/\sigma_{cc}$  при энергиях пучка в широком интервале  $E_\nu \in [6;300]$  ГэВ при  $x \in [0;0,75]$  и  $Q^2 > 1$  ГэВ<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>. Проведена оценка систематических погрешностей, связанных в основном с предсказанием фоновых событий, фрагментацией с-кварка в очарованные адроны и ошибкой на значение массы с-кварка. По сравнению с другими экспериментами точность измерения  $\mathcal{R}_{\mu\mu}$  для всей кинематической области увеличена в 2-3 раза. Впервые в нейтринных взаимодействиях отношение  $\mathcal{R}_{\mu\mu}$  получено в области  $[0,3;0,75]$  для переменной  $x$ -Бьёркена.
- Уточнен параметр фрагментации очарованного кварка в параметризации Коллинз-Спиллера, который совместно для экспериментов E531 и NOMAD составляет  $\epsilon = 0,165 \pm 0,025$ .
- Измерено отношение вероятностей рождения положительно и отрицательно заряженных мезонов  $(N_{\pi^+} + N_{K^+})/(N_{\pi^-} + N_{K^-})$  во взаимодействиях нейтрино с углеродом как функция их импульсов для моделируемых событий и для накопленных экспериментальных данных.

## Список публикаций

- [A1] *A. Chukanov, ... O. Samoylov, ... et al.* Production properties of  $K^*(892)^+$ -vector mesons and their spin alignment as measured in the NOMAD experiment // *Eur. Phys. J.* — 2006. — Vol. C46. — Pp. 69–79.
- [A2] *O. Samoylov et al.* Search for the exotic  $\Theta^+$  resonance in the NOMAD experiment // *Eur. Phys. J.* — 2007. — Vol. C49. — Pp. 499–510.
- [A3] *R. Petti, O. Samoylov.* Precise measurement of Charm Dimuon Production from Neutrino Interactions at NOMAD // *Письма в ЭЧАЯ.* — 2011. — Т. 42 №7 (в печати).
- [A4] *О. Б. Самойлов.* Идентификация протонов для поиска экзотического барионного резонанса  $\Theta^+$  в распаде на протон и  $K_S^0$ -мезон в эксперименте NOMAD // *Тезисы докладов VIII научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ, 2 - 6 февраля 2004.* — Дубна, 2004. — С. 172–175.
- [A5] *О. Б. Самойлов.* Поиск пентакварка  $\Theta^+$  в эксперименте NOMAD // *Тезисы докладов IX научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ, 31 января - 6 февраля 2005.* — Дубна, 2005. — С. 283–286.
- [A6] *V. Cavasinni, ... O. Samoylov, ... [on behalf of the NOMAD Collaboration].* A search of the  $\Theta^+$  pentaquark baryon in neutrino interactions in the NOMAD experiment // *Proceedings of XXXIII International Conference on High Energy Physics, July 26 - August 2, 2006.* — Moscow, 2006. — Pp. 972–975.
- [A7] *V. Cavasinni, D. Naumov, O. Samoylov.* A search for an exotic  $\Theta^+$  baryon in inclusive neutrino-nucleon interactions in the NOMAD experiment // *Proceedings of XII International Conference on Hadron Spec-*

*troscopy HADRON 07, Frascati Physics Series, October 7-13, 2007.* — 2007. — Vol. XLVI. — Pp. 1405–1416.

- [A8] *О. Б. Самойлов [для коллаборации NOMAD].* Исследование событий ди-мюонного рождения чарма из странного моря нуклона в нейтринных взаимодействиях эксперимента NOMAD // *Тезисы докладов XIV научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ, 1 - 6 февраля 2010.* — Дубна, 2010. — С. 114–117.
- [A9] *R. Petti, O. Samoylov.* Precise measurement of Charm Dimuon Production from Neutrino Interactions at Nomad // *Proceedings of XVIII International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects, April 19 - 23, 2010.* — Florence, 2010.
- [A10] *O. Samoylov.* Search for PentaQuark Theta+ at NOMAD // *XXVIII International Workshop Neutrino Physics on Accelerators, January 25-27, 2006.* — Dubna, 2006.
- [A11] *O. Samoylov.* A study of dimuon events in the NOMAD experiment // *XXX International Workshop Neutrino Physics on Accelerators, January 23-25, 2008.* — Dubna, 2008.
- [A12] *O. Samoylov.* Charm production in neutrino DIS and strangeness in the nucleon // *Trento workshop on Strangeness polarization in semi-inclusive and exclusive Lambda production, October 27-30, 2008.* — Trento, 2008.

## Цитированная литература

- [1] *Л. Б. Окунь*. Лептоны и кварки. — М.:Наука, 1981. — 304 с.
- [2] *K. Nakamura*. Review of particle physics // *J. Phys.* — 2010. — Vol. G37. — P. 075021.
- [3] *S. Alekhin, Sergey A. Kulagin, R. Petti*. Determination of Strange Sea Distributions from Neutrino- Nucleon Deep Inelastic Scattering // *Phys. Lett.* — 2009. — Vol. B675. — Pp. 433–440.
- [4] *J. D. Bjorken, Emmanuel A. Paschos*. Inelastic Electron Proton and gamma Proton Scattering, and the Structure of the Nucleon // *Phys. Rev.* — 1969. — Vol. 185. — Pp. 1975–1982.
- [5] *R. P. Feynman*. Photon-hadron interactions. — Reading 1972, 282 p.
- [6] *M. E. Sainio*. Pion nucleon sigma-term: A review // *PiN Newslett.* — 2002. — Vol. 16. — Pp. 138–143.
- [7] *Dmitri Diakonov, Victor Petrov, Maxim V. Polyakov*. Exotic anti-decuplet of baryons: Prediction from chiral solitons // *Z. Phys.* — 1997. — Vol. A359. — Pp. 305–314.
- [8] *Michael Danilov, Roman Mizuk*. Experimental Review on Pentaquarks. — 2007.
- [9] *J. Altegoer et al.* The NOMAD experiment at the CERN SPS // *Nucl. Instrum. Meth.* — 1998. — Vol. A404. — Pp. 96–128.
- [10] *P. Astier et al.* Prediction of neutrino fluxes in the NOMAD experiment // *Nucl. Instrum. Meth.* — 2003. — Vol. A515. — Pp. 800–828.
- [11] *Luigi Di Lella*. NOMAD home page at CERN. — <http://nomad-info.web.cern.ch/nomad-info/>.



- [12] *P. Abbon et al.* The COMPASS Experiment at CERN // *Nucl. Instrum. Meth.* — 2007. — Vol. A577. — Pp. 455–518.
- [13] *P. D. B. Collins, T. P. Spiller.* The Fragmentation of Heavy Quarks // *J. Phys.* — 1985. — Vol. G11. — P. 1289.
- [14] *N. Ushida et al.* Production characteristics of charmed particles in neutrino interactions // *Phys. Lett.* — 1988. — Vol. B206. — Pp. 380–384.
- [15] *R. Acquafredda et al.* The OPERA experiment in the CERN to Gran Sasso neutrino beam // *JINST.* — 2009. — Vol. 4. — P. P04018.
- [16] *М. В. Терентьев.* Введение в теорию элементарных частиц. — М.:ИТЭФ, 1998. — 236 с.
- [17] *A. E. Asratyan, A. G. Dolgolenko, M. A. Kubantsev.* Evidence for formation of a narrow pKshort resonance with mass near 1533 MeV in neutrino interactions // *Phys. Atom. Nucl.* — 2004. — Vol. 67. — Pp. 682–687.
- [18] *H. Abramowicz et al.* Experimental Study of Opposite Sign Dimuons Produced in Neutrino and anti-neutrinos Interactions // *Z. Phys.* — 1982. — Vol. C15. — P. 19.
- [19] *P. Vilain et al.* Leading-order QCD analysis of neutrino induced dimuon events // *Eur. Phys. J.* — 1999. — Vol. C11. — Pp. 19–34.
- [20] *A. O. Bazarko et al.* Determination of the strange quark content of the nucleon from a next-to-leading order QCD analysis of neutrino charm production // *Z. Phys.* — 1995. — Vol. C65. — Pp. 189–198.
- [21] *M. Goncharov et al.* Precise measurement of dimuon production cross-sections in nu/mu Fe and anti-nu/mu Fe deep inelastic scattering at the Tevatron // *Phys. Rev.* — 2001. — Vol. D64. — P. 112006.

- [22] *A. Kayis-Topaksu et al.* Leading order analysis of neutrino induced dimuon events in the CHORUS experiment // *Nucl. Phys.* — 2008. — Vol. B798. — Pp. 1–16.