

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-2001-71

На правах рукописи
УДК 539.126

К-245

КАРНАУХОВ
Владимир Михайлович

**ПОИСК И ИССЛЕДОВАНИЕ БАРИОННЫХ СОСТОЯНИЙ
С ДВОЙНОЙ И СКРЫТОЙ СТРАННОСТЬЮ
В $\pi^- p$ -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ 16 ГэВ/с**

Специальность: 01.04.16 — физика ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2001

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время мировая статистика экспериментальных данных для относительно редких в пион-нуклонных взаимодействиях процессов с образованием Ξ -гиперонов ограничена. Механизм таких реакций, как $\pi p \rightarrow \Xi K K + m \cdot \pi$ ($m \geq 0$), экспериментально недостаточно изучен. Не выяснено, как образуются в этих реакциях Ξ -гипероны, - прямым образованием, или существенная часть наблюдаемых в πp -взаимодействиях барионов с двойной странностью является продуктом распада резонансов (например, массивных N -резонансов в системах $\Xi K K m \cdot \pi$ ($m \geq 0$) с суммарной странностью нуль).

Известно несколько трёхкварковых широких барионных N -резонансов с $I = 1/2$, среди каналов распада которых есть каналы распада на странные частицы, зарегистрированные в основном при исследовании реакций $\pi N \rightarrow \Lambda K$, $\pi N \rightarrow \Sigma K$. В теоретических работах предсказывается возможность существования узких пятикварковых резонансных барионных состояний, обогащённых s , \bar{s} -кварками. Во многих физических центрах обсуждается или проводится экспериментальный поиск возможных процессов с образованием экзотических барионов.

Экспериментальное решение вопроса о существовании экзотических адронов (в частности, узких барионных состояний со скрытой странностью), выяснение их внутренней структуры, характера процессов с их образованием имеют принципиальное значение для основных представлений о природе адронной материи.

В настоящей работе в $\pi^- p$ -взаимодействиях при 16 ГэВ/с проведены поиск и исследование процессов с образованием барионов с двойной и скрытой странностью. Кроме того, предложен новый подход к поиску резонансных состояний, позволяющий в ряде случаев отличать физический эффект от статистической флуктуации в спектре эффективных масс. Развитие новых методов анализа для выяснения природы пиков в спектрах эффективных масс исследуемых систем частиц актуально для многих экспериментальных работ.

Цель работы

заключалась в поиске и исследовании барионных состояний с s , s и s , \bar{s} -кварками в $\pi^- p$ -взаимодействиях при 16 ГэВ/с, в развитии нового подхода к поиску резонансных состояний, позволяющего на ограниченной статистике отличать физический эффект от статистической флуктуации в спектре эффективных масс.

Работа выполнена в Лаборатории информационных технологий
Объединённого института ядерных исследований.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук, Мороз
старший научный сотрудник Владимир Иванович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, Ажгирей
профессор Леонид Степанович

доктор физико-математических наук, Горбунов
профессор Андрей Николаевич

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Научно-исследовательский институт ядерной физики Московского государственного университета

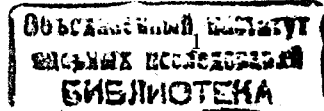
Защита диссертации состоится "_____" _____ 2001 года в "_____" часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.02 Объединённого института ядерных исследований в Лаборатории высоких энергий, 141980, г.Дубна Московской области, ЛВЭ ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан "_____" _____ 2001 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, профессор *М.Ф. Лихачёв* М.Ф. Лихачёв



Научная новизна работы

1. В π^-p -взаимодействиях при 16 ГэВ/с проведен поиск и анализ редких слабоизученных в пион-нуклонных столкновениях процессов с образованием и наблюдаемыми распадами Ξ^- -гиперонов. Сделано сравнение с результатами других работ в π^-p -взаимодействиях.

Показано, что полное сечение генерации Ξ^- -частиц возрастает с ростом энергии первичных π^- -мезонов в интервале 3 - 25 ГэВ; роль процессов с возможным барионным обменом возрастает при увеличении энергии налетающих π^- -мезонов в интервале 5,5 - 25,0 ГэВ.

2. Автором диссертации предложен новый подход к поиску резонансных состояний, позволяющий в ряде случаев отличать в рамках одного эксперимента физический эффект от статистической флуктуации в спектре эффективных масс.

3. В π^-p -взаимодействиях при 16 ГэВ/с проведен поиск резонансных барионных состояний, обогащённых s , s или s , \bar{s} -кварками.

В соответствии с развизаемым автором подходом обнаружено неизвестное ранее аномально-узкое состояние $N(3520) \rightarrow K_s^0 K^+ p \pi^- \pi^-$ с $\Gamma = 6_{-6}^{+21}$ МэВ/с² - возможный кандидат в экзотический барион со скрытой странностью ($udds\bar{s}$). Найдены особенности образования и распада $N(3520)$, отличающие события из области пика от событий из других интервалов спектра эффективных масс $K_s^0 K^+ p \pi^- \pi^-$.

Состояние $N(3520)$ отличается от известных барионных резонансов с лёгкими кварками большой массой и аномально-узкой шириной, большой множественностью продуктов распада, включающих странные мезоны, и необычными особенностями образования и распада.

4. Обнаруженная особенность образования $N(3520)$ свидетельствует о том, что это барионное состояние образуется в процессах с большими четырёхмерными переданными импульсами.

В сделанном автором обзоре барионных резонансов отмечено отсутствие данных о систематических экспериментальных исследованиях возможного образования резонансных состояний в процессах с большими четырёхмерными переданными импульсами.

5. Впервые получено экспериментальное указание на пространственную кластеризацию продуктов распада адронного состояния, их угловое разделение на две части, обнаруженное при изучении распада резонансного состояния $N(3520)$.

Возможно, угловое разделение бесцветных продуктов распада $N(3520)$ на две части является отражением динамики цветных кластеров, предсказываемой для узких экзотических состояний в теоретических работах (Hogaasen H. et al., 1977-1979).

6. В диссертации обсуждается сходство некоторых свойств $N(3520)$ и барионного состояния $\Sigma(3170)$ - кандидата в экзотическое состояние ($uuss\bar{s}$), обнаруженного ранее в независимых экспериментах CERN и ANL USA (в K^-p -взаимодействиях при 8,25 и 6,5 ГэВ/с, соответственно).

Похожие свойства состояний $N(3520)$ и $\Sigma(3170)$, отличающие их от известных барионных резонансов с лёгкими кварками, дают возможность сделать предположение о существовании новой группы барионных состояний, образующихся в адронных взаимодействиях при относительно невысоких энергиях в процессах с большими четырёхмерными переданными импульсами.

Научная и практическая значимость работы

1. Результаты диссертации могут быть использованы при планировании новых экспериментов по поиску и исследованию экзотических адронных состояний и барионных состояний с двойной и скрытой странностью. Исследования процессов с образованием этих состояний, изучение их внутренних свойств важны для развития основных представлений о природе адронной материи.

2. При сравнении полученных результатов с результатами других работ в π^-p -взаимодействиях показано, что полное сечение генерации Ξ^- -частиц возрастает с ростом энергии первичных π^- -мезонов в интервале 3-25 ГэВ; роль процессов с возможным барионным обменом в реакциях с образованием Ξ^- -гиперонов возрастает при увеличении энергии первичных π^- -мезонов в интервале 5,5-25,0 ГэВ.

3. Обнаружение резонансного состояния $N(3520)$ (отличающегося от известных барионных резонансов с лёгкими кварками большой массой и аномально-узкой шириной, большой множественностью продуктов распада, включающих странные частицы) в процессах с большими четырёхмерными переданными импульсами может иметь важное значение для развития исследований в области адронной спектроскопии.

4. Впервые полученное экспериментальное указание на пространственную кластеризацию продуктов распада адронного состояния, их угловое разделение на две части (обнаруженное при изучении распада $N(3520)$), возможно, является отражением модели цветных кластеров, предсказываемой для узких экзотических состояний, и требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

5. В связи с полученными в независимых экспериментах указаниями на существование экзотических барионных состояний $N(3520)$ и $\Sigma(3170)$, схожестью некоторых их свойств и процессов с их обра-

зованием, представляется перспективным продолжение исследований процессов с большими переданными импульсами в адронных взаимодействиях при относительно невысоких энергиях и возможного образования в них других экзотических состояний с s, \bar{s} кварками. Детальное исследование свойств подобных состояний возможно на установках с областью регистрации частиц, близкой к 4π -геометрии, или со специальной триггерной системой.

6. Развиваемый автором диссертации новый подход к поиску резонансных состояний, предложенные способы выявления особенностей их образования и распада могут оказаться полезными в других экспериментальных исследованиях при выяснении природы пиков, наблюдаемых в спектрах эффективных масс.

Апробация

Результаты исследований, составивших диссертацию, докладывались на научных семинарах ЛВЭ, ЛТФ, ЛВТА ОИЯИ, ИТЭФ, Института Атомной Физики в Бухаресте (1973-2001), на сессии Отделения ядерной физики АН СССР (1988), на конференции по адронной спектроскопии (College Park, USA, 1991), на международном семинаре по проблемам физики высоких энергий (Дубна, 2000).

Опубликованные результаты по изучению Ξ -гиперонов в π^-p -взаимодействиях при 16 ГэВ/с вошли в сборник "COMPILATION OF CROSS-SECTIONS I: π^+ AND π^- INDUCED REACTIONS" (издание CERN, 1983). Ссылки на результаты поиска барионных резонансов с двойной и скрытой странностью приведены в сборниках "A GUIDE TO EXPERIMENTAL PARTICLE PHYSICS LITERATURE" (издания Berkeley National Laboratory, 1996, 1999). Данные по обнаружению аномально-узкого барионного состояния $N(3520)$ (возможного пятикваркового состояния) были отмечены в "REVIEW OF PARTICLE PHYSICS", 1996.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 19 работ в виде статей в реферируемых журналах, а также в виде сообщений ОИЯИ и депонированных публикаций с изложением методических результатов.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Общий объём составляет 149 страниц, включая 49 рисунков, 12 таблиц и список цитируемой литературы из 111 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проблемы, формулируется основная цель работы, приводится краткое содержание диссертации.

В первой главе показаны основные этапы методики обработки экспериментальных данных со стереофотоснимков, полученных при трёх экспозициях двухметровой водородной пузырьковой камеры CERN в пучке π^- -мезонов с импульсом 16 ГэВ/с.

Приведено описание критериев отбора событий со странными частицами, измерений и геометрической реконструкции отобранных событий. Отбор и измерения событий, их обработка на ЭВМ по системе программ (разработанных в ОИЯИ) были выполнены в Объединённом Институте Ядерных Исследований и в Институте Атомной Физики (Бухарест). Настройка программы геометрической реконструкции осуществлялась константами, полученными в CERN для каждой экспозиции. Проведенный контроль результатов измерений и геометрической реконструкции показал их соответствие конструктивным особенностям камеры и условиям эксперимента.

Показана методика идентификации нейтральных странных частиц. Ширины экспериментальных распределений эффективных масс продуктов распада K_s^0 , Λ -частиц близки к ширинам подобных распределений, полученных в других экспериментах на водородных пузырьковых камерах. Средние экспериментальные значения массы и времени жизни K_s^0 и Λ в пределах ошибок согласуются с табличными.

На материале моделированных и экспериментальных четырёхлучевых событий с двумя странными частицами в π^-p -взаимодействиях при 16 ГэВ/с была отлажена методика идентификации каналов реакций. Был проведен анализ спектров эффективных масс систем $\pi^+\pi^-\pi^0$, $K^+\pi^-$, $\Lambda\pi^\pm$ для событий, идентифицированных каналом реакции $\pi^-p \rightarrow \Lambda K^+\pi^+\pi^-\pi^0$. В экспериментальных распределениях наблюдаются структуры известных резонансов $h_1(1170)$, $K^*(892)$, $\Sigma(1385)$ с параметрами, близкими к табличным.

Приведенные в первой главе результаты свидетельствуют о надёжности экспериментальных данных и методики их обработки.

Во второй главе показано вычисление сечений процессов с образованием нейтральных странных частиц в π^-p -взаимодействиях при 16 ГэВ/с. Для вычисления поправок (весов событий) при оценке сечений использовалась процедура, стандартная для камерной методики.

Полученные средние значения весов зарегистрированных K_s^0 , Λ -частиц равны 1,13, $\bar{\Lambda}$ -частиц - 1,16, что соответствует средним зна-

чениям весов, полученным в других экспериментах на двухметровой водородной пузырьковой камере *CERN* и других водородных камерах близких размеров при близких энергиях первичных частиц. Полученные значения сечений отдельных каналов реакций с образованием нейтральных странных частиц в π^-p -взаимодействиях при 16 ГэВ/с близки к значениям, полученным в других экспериментах при близких энергиях первичных π^- -мезонов.

На примере известных резонансов $\Sigma(1385)^+$, $\Sigma(1385)^-$, $K^*(892)^0$, наблюдающихся в эксперименте, рассмотрены три способа построения фоновых распределений в спектрах эффективных масс для выделения резонансных состояний частиц и оценки их сечений. Показано, что способ построения фоновых распределений перемешиванием параметров частиц из разных экспериментальных событий приводит к искажению физических результатов. Во втором способе использовалось моделирование каналов реакций с учётом экспериментальных угловых и импульсных распределений и суммированием парциальных фоновых распределений с весами, рассчитанными по статистической теории множественного рождения частиц. Третий способ использовал описание нерезонансного фона полиномом. Фоновые распределения, полученные последними двумя способами, мало отличаются друг от друга. Выбран наиболее распространённый и менее трудоёмкий полиномиальный способ описания нерезонансного фона, использовавшийся в дальнейшем при поиске новых резонансов.

Полученные параметры известных резонансов, наблюдающихся в эксперименте, в пределах ошибок согласуются с табличными. Угловые распределения барионных состояний Λ , $\Sigma(1385)^+$, $\Sigma(1385)^-$ указывают на то, что эти состояния, как и в других мезон-нуклонных экспериментах, большей частью направлены в полусферу мишени в с.ц.м. π^-p -взаимодействий.

Приведенные во второй главе результаты подтверждают надёжность экспериментального материала и его обработки.

В третьей главе представлены результаты поиска и исследования редких в пион-нуклонных взаимодействиях процессов с образованием и наблюдаемыми распадами Ξ^- -гиперонов в π^-p -взаимодействиях при 16 ГэВ/с. Приведена процедура вычисления сечений, показаны характеристики изучаемых процессов.

На экспериментальном материале ~ 125000 стереофотоснимков в π^-p -взаимодействиях при 16 ГэВ/с зарегистрировано 46 событий с различными множественностями заряженных частиц, в которых наблюдались распады $\Xi^- \rightarrow \Lambda \pi^-$. Средние экспериментальные значения

массы и времени жизни Ξ^- в пределах ошибок совпадают с табличными. Полное сечение образования Ξ^- равно $17,5 \pm 2,7$ мкбн. Параметр угловой асимметрии $A = (B - F)/(B + F)$ для Ξ^- -гиперонов в с.ц.м. π^-p -взаимодействий равен $0,56 \pm 0,12$; в большей части событий Ξ^- -гиперон направлен в полусферу мишени и образуется, по видимому, большей частью в процессах с мезонным обменом.

Сделан краткий обзор экспериментальных данных по образованию Ξ^- -гиперонов в π^-p -взаимодействиях при различных энергиях. Полученные для Ξ^- -частиц в π^-p -взаимодействиях при 16 ГэВ/с значения сечения и параметра угловой асимметрии хорошо вписываются в общий ход изменения значений этих величин с изменением энергии π^-p -взаимодействий (см. рис. 1 и таблицу 1).

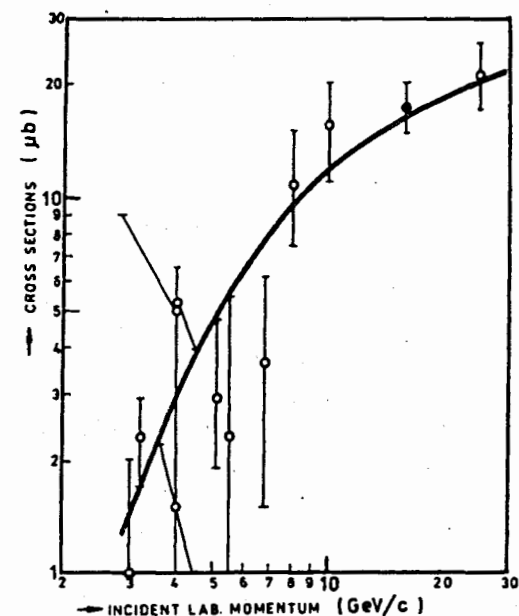


Рис. 1: Зависимость полного сечения образования Ξ^- -гиперонов в π^-p -взаимодействиях от импульсов первичных π^- -мезонов.

Получено указание на то, что сечение генерации Ξ^- в интервале импульсов первичных π^- -мезонов 3-25 ГэВ/с возрастает с ростом энергии первичных π^- -мезонов (рис. 1). В большей части событий в изучавшихся π^-p -взаимодействиях Ξ^- направлен в полусферу мишени в с.ц.м. π^-p -взаимодействий; прослеживается тенденция к снижению

значений параметра угловой асимметрии с ростом энергии первичных π^- -мезонов (таблица 1). Поведение параметра угловой асимметрии для Ξ^- указывает на возрастание роли процессов с возможным барионным обменом при увеличении энергии налетающих π^- -мезонов в интервале импульсов первичных π^- -мезонов 5,5-25,0 ГэВ/с.

Таблица 1.

Параметр асимметрии $A = (B - F)/(B + F)$ для Ξ^- -гиперонов в π^-p -взаимодействиях.

Импульс π^- (ГэВ/с)	5,5	8,0	10,0	16,0	25,0
A	$1,00 \pm 0,54$	$0,82 \pm 0,18$	$0,83 \pm 0,16$	$0,56 \pm 0,12$	$0,33 \pm 0,17$

В π^-p -взаимодействиях при 16 ГэВ/с исследовалась зависимость дифференциального сечения Ξ^- -частиц от X и P_T^2 :

$$F_1(X) = \frac{2}{\pi\sqrt{S}} \cdot \int \frac{E^* d^2\sigma}{dXdP_T^2} dP_T^2, \quad (1)$$

$$F_2(P_T^2) = \frac{2}{\pi\sqrt{S}} \cdot \int \frac{E^* d^2\sigma}{dXdP_T^2} dX. \quad (2)$$

Здесь $X = 2P_L^*/\sqrt{S}$ - переменная Фейнмана, P_T^2 - квадрат поперечного импульса Ξ^- , P_L^* и E^* - продольный импульс и энергия Ξ^- в с.ц.м. π^-p -взаимодействий, \sqrt{S} - полная энергия π^-p -взаимодействий.

Распределение $F_1(X)$ показывает, что Ξ^- -гипероны образуются преимущественно в полусфере мишени.

Распределение $F_2(P_T^2)$ указывает на обычное экспоненциальное поведение при малых P_T^2 . Параметры аппроксимации этого распределения экспонентой $A \exp(-BP_T^2)$ равны:

$$A = 12,06_{-3,52}^{+4,16} \text{ мкбн}/(\text{ГэВ}/c)^2, \quad B = 3,89_{-1,20}^{+1,50} (\text{ГэВ}/c)^{-2}.$$

Отмечено, что в этом эксперименте параметр наклона B при описании зависимости дифференциального сечения Ξ^- от P_T^2 экспонентой $A \exp(-BP_T^2)$ в пределах ошибок совпадает с параметром наклона для Λ -частиц.

Показано, что топологическое сечение образования Ξ^- в π^-p -взаимодействиях при 16 ГэВ/с имеет максимум в событиях с множественностью вторичных заряженных частиц, равной четырём.

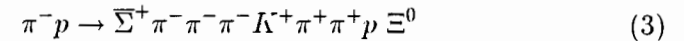
Около 40% событий с наблюдаемым распадом Ξ^- были идентифицированы эксклюзивными каналами реакций. Изучались кинематические характеристики вторичных частиц в этих реакциях, сделана оценка сечений каналов реакций. Из анализа угловых распределений вторичных частиц идентифицированных событий с Ξ^- можно сделать вывод, что в большинстве реакций Ξ^- -гиперон вместе с K^+ -мезоном в с.ц.м. π^-p -взаимодействий направлены в полусферу мишени. В спектре эффективных масс Ξ^-K^+ наблюдается небольшой широкий выброс в области 1,9-2,3 ГэВ/с² (не найдено какой-либо резонансной структуры в спектре масс $\Xi^-\pi^+$). Исследование спектров эффективных масс систем $\Xi^-K^+K^+m\cdot\pi$ ($m \geq 0$) с суммарной странностью нуль требует значительно большей статистики экспериментальных данных.

В эксперименте зарегистрированы редкие в пион-нуклонных взаимодействиях процессы с образованием и наблюдаемым распадом $\Xi^+ \rightarrow \bar{\Lambda}\pi^+$. Полное сечение образования Ξ^+ -гиперонов в π^-p -взаимодействиях при 16 ГэВ/с равно $1,2 \pm 0,7$ мкбн. В двух из трёх найденных событий Ξ^+ -гиперон направлен в полусферу мишени в с.ц.м. π^-p -взаимодействий.

В диссертации отмечено, что из-за большой радиационной длины в водороде и, следовательно - малой эффективности регистрации конверсий γ -квантов в водородной камере, в работе не ставилась целевая задача исследования образования Ξ^0 -гиперонов в π^-p -взаимодействиях (Ξ^0 -гиперон с вероятностью 99,54% распадается по каналу $\Lambda\pi^0$, π^0 -мезон с вероятностью 98,80% распадается на два γ -кванта).

При поиске каскадных распадов заряженных гиперонов с двойной странностью было найдено восьмилучевое событие с V^0 -распадом, предполагаемой электрон-позитронной парой (ассоциируемой с V^0) и изломом на одном из треков вторичных отрицательных частиц первичного π^-p -взаимодействия.

Приведены результаты анализа нескольких измерений этого события. Сделано заключение, что в реакции



зарегистрирован распад $\Xi^0 \rightarrow \Lambda\pi^0$ с редким Далитцевским распадом $\pi^0 \rightarrow e^+e^-\gamma$. Оценка нижней границы сечения образования Ξ^0 -гиперона в π^-p -взаимодействиях при 16 ГэВ/с равна 44_{-37}^{+101} мкбн; Ξ^0 почти сохраняет направление первичного протона в с.ц.м. π^-p -взаимодействий.

В четвёртой главе приведен сделанный автором обзор барионных резонансов, обогащённых s , s и s, \bar{s} -кварками; рассмотрены теоретиче-

ские и экспериментальные указания на возможное образование узких экзотических барионных состояний в различных процессах.

В обзоре отмечено отсутствие данных о систематических экспериментальных исследованиях возможного образования резонансных состояний частиц в процессах с большими четырёхмерными переданными импульсами при относительно невысоких энергиях.

В следующих разделах четвёртой главы представлены результаты поиска барионных резонансных состояний с двойной и скрытой странностью в π^-p -взаимодействиях при 16 ГэВ/с в четырёхлучевых событиях с зарегистрированными K_s^0 или Λ -частицами. При анализе спектров эффективных масс использовалось описание фона гладкой функцией, резонансов - функцией Брейта-Вигнера, проинтегрированной вместе с функцией разрешения. Параметризация проводилась с помощью метода наименьших квадратов.

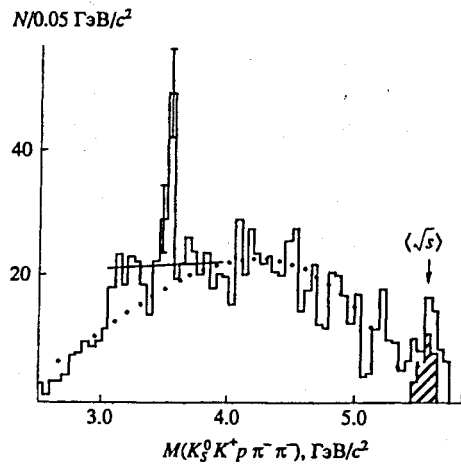


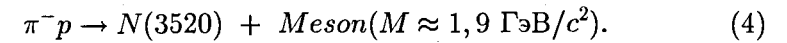
Рис. 2: Распределение взвешенных комбинаций по эффективным массам $K_s^0 K^+ p \pi^- \pi^-$ -системы. Заштрихованы события, идентифицированные как реакция $\pi^- p \rightarrow \bar{K}^0 K^+ p \pi^- \pi^-$. Точками показаны результаты аппроксимации распределения гладкой функцией с тремя параметрами на интервале 2,50-5,45 ГэВ/с². Сплошная линия - аппроксимация распределения прямой линией на интервале 3,05-3,95 ГэВ/с².

В событиях с одним зарегистрированным K_s^0 в спектре эффективных масс $K_s^0 K^+ p \pi^- \pi^-$ на интервале 3450-3550 МэВ/с² была обна-

ружена узкая резонансная структура $N(3520)$ с количеством стандартных отклонений в пике над фоном более 5,5 (рис. 2).

Комбинаторный фон (отношение числа комбинаций к числу событий) в спектре масс незначителен; в интервале наблюдаемой структуры 3450-3550 МэВ/с² он составляет 1,12. Средний вес комбинаций в этой области равен 1,10; среднее разрешение по эффективным массам - 17 МэВ/с². Структура $N(3520)$ проявляется при различных изменениях ширины интервала (≤ 50 МэВ/с²) и дробных сдвигах спектра.

В диссертации подробно показан статистический и кинематический анализ событий в спектре эффективных масс $K_s^0 K^+ p \pi^- \pi^-$. Установлено, что структура образуется в области π^-p -взаимодействий, близкой к центральной: $-0,18 \leq Y^*(q) < 0,38$, где $Y^*(q)$ - продольная быстрота структуры в с.ц.м. π^-p -взаимодействий. Бесспорных доказательств существования каскадного распада $N(3520)$ не найдено. Получено указание на то, что аномально-узкое барионное состояние $N(3520)$ образуется в квазидвухчастичной реакции в сопровождении мезонного состояния с массой $\sim 1,9$ ГэВ/с²:



Показано, что отсутствие статистически значимого узкого сигнала $N(3520)$ в спектрах эффективных масс $K_s^0 K^- p \pi^+ \pi^-$, $\Lambda K^+ \pi^+ \pi^- \pi^-$ в предположении барионного состояния со скрытой странностью, возможно, отчасти объясняется большим комбинаторным фоном в этих спектрах масс.

В отдельном разделе четвёртой главы автором сделано обоснование нового подхода к поиску резонансных состояний, позволяющего в ряде случаев отличать физический эффект от статистической флуктуации в спектре эффективных масс. Смысл этого подхода заключается в том, что, если наблюдаемый в виде пика в спектре инвариантных масс эффект - квазистабильная частица или резонанс, некоторые его свойства связаны с механизмом образования и распада. Эти свойства могут проявиться в особенностях кинематических распределений для событий из интервала пика, отличающих их от событий из других интервалов спектра масс. По аналогии с парциально-волновым анализом (затруднительным при ограниченной статистике или распадах с большой множественностью) проявление особенностей, кинематически не скоррелированных с общим количеством событий в интервале пика, может стать дополнительным тестом для отличия физического эффекта от статистического выброса, выявляющим детали образования и распада изучаемой структуры. Предложены способы выявления

особенностей образования и распада резонансных состояний.

В соответствии с развиваемым подходом для выяснения природы обнаруженной структуры был проведен поиск особенностей образования и распада предполагаемого барионного состояния $N(3520)$. В диссертации показан детальный анализ с использованием способов, предложенных автором. На уровне вероятности случайной статистической флуктуации $\sim 1 \times 10^{-8}$ в событиях из области резонансного пика обнаружены особенности кинематических распределений, отличающие группу событий из области пика от событий из других интервалов спектра эффективных масс $K_s^0 K^+ p \pi^- \pi^-$.

Обнаруженные особенности (рис. 3, 4) кинематически не скоррелированы с общим количеством событий в интервале пика. Поэтому существование пика и особенностей кинематических распределений в одном и том же интервале спектра масс указывает на то, что проявляются физические свойства группы событий из области изучаемой резонансной структуры. Наблюдаемые особенности, по-видимому, отражают свойства барионного состояния $N(3520)$, связанные с механизмом его образования и внутренней структурой.

В большей части событий из области резонансного пика, в отличие от других интервалов спектра масс, система $K_s^0 K^+ p \pi^- \pi^-$ направлена в полусферу первичного π^- -мезона в с.ц.м. $\pi^- p$ -взаимодействий. В с.ц.м. $K^+ K_s^0$ угол между системой $p \pi^- \pi^-$ (а также системой $K_s^0 K^+ p \pi^- \pi^-$) и K^+ -мезоном меньше угла между этой системой и K_s^0 .

Это означает, во-первых, что состояние $N(3520)$ образуется в квазидвухчастичной реакции (4) с большими четырёхмерными переданными импульсами от первичных частиц вторичным. Среднее значение квадрата четырёхмерного импульса, переданного состоянию $N(3520)$ от первичного протона-мишени, равно: $\langle t(p_l \rightarrow K_s^0 K^+ p \pi^- \pi^-) \rangle = 9,3 \pm 0,5$ (ГэВ/с)².

Во-вторых, получено экспериментальное указание на пространственную кластеризацию продуктов распада состояния $N(3520)$, их угловое разделение на две части: $K^+ p \pi^- \pi^-$ и K_s^0 .

В ряде теоретических работ предсказывалось образование узких экзотических состояний в процессах с большими четырёхмерными переданными импульсами ($t > M_p^2$).

Возможно, наблюдаемая пространственная кластеризация бесцветных продуктов распада состояния $N(3520)$, их угловое разделение на две части является отражением динамики цветных кластеров, предсказываемой в некоторых теоретических работах (Hoegaasen H. et al., 1977-1979) для узких экзотических состояний.

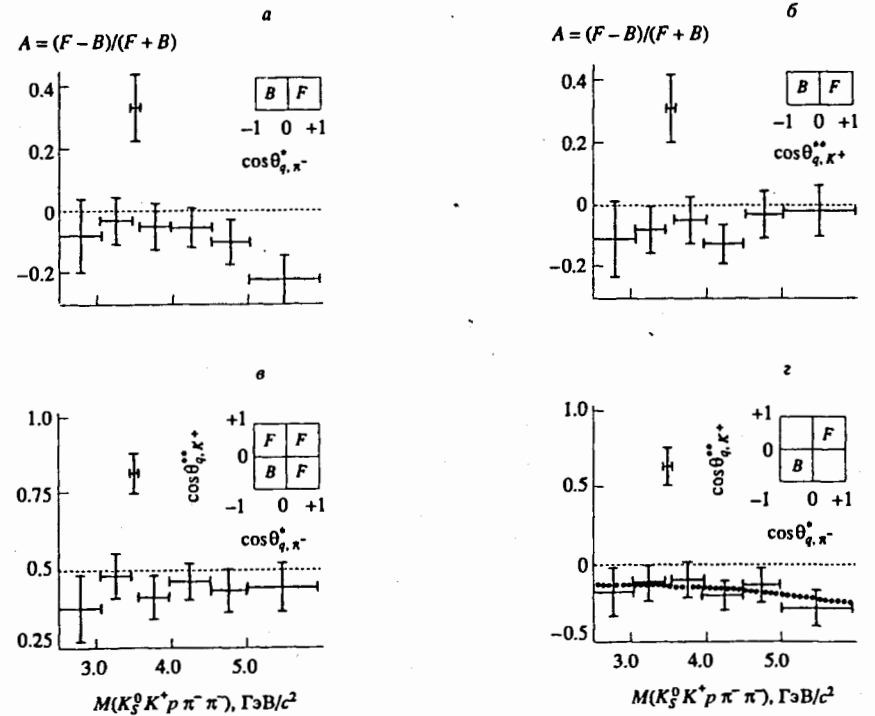


Рис. 3: Распределения параметра асимметрии $A = (F - B)/(F + B)$ по интервалам спектра масс $K_s^0 K^+ p \pi^- \pi^-$ -системы. Для каждого распределения показан способ разделения комбинаций по группам F и B в зависимости от направления системы $K_s^0 K^+ p \pi^- \pi^-$ (обозначенной как q) в с.ц.м. $\pi^- p$ -взаимодействий и в с.ц.м. $K^+ K_s^0$. Здесь Θ_{q, π^-}^* - угол между системой q и первичным π^- -мезоном в с.ц.м. $\pi^- p$ -взаимодействий, Θ_{q, K^+}^{**} - угол между системой q и K^+ -мезоном в с.ц.м. $K^+ K_s^0$. В распределении (3а): F - количество взвешенных комбинаций с изучаемой системой частиц, направленной в полусферу первичного π^- -мезона в с.ц.м. $\pi^- p$ -взаимодействий, B - в полусферу мишени. В распределении (3б): F - количество взвешенных комбинаций с изучаемой системой частиц, направленной в полусферу K^+ -мезона в с.ц.м. $K^+ K_s^0$, B - в полусферу K_s^0 . Точечная кривая на рис. 3г - аппроксимация распределения (учитывающего одновременно условия F и B в распределениях 3а и 3б) без интервала 3,45-3,55 $\text{ГэВ}/c^2$ гладкой функцией с тремя свободными параметрами.

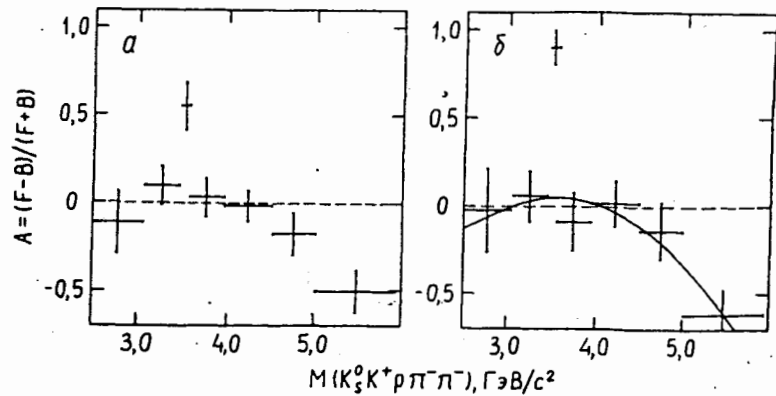


Рис. 4: Распределения параметра асимметрии $A = (F - B)/(F + B)$ по интервалам спектра масс $K_s^0 K^+ p \pi^- \pi^-$ -системы. В распределении (4а): F - количество комбинаций с $T(K_s^0) \geq T(p)$, $T(K_s^0) \geq T(K^+)$, $T(K_s^0) \geq T(\pi_1^-)$; B - количество комбинаций с $T(K_s^0) < T(p)$, $T(K_s^0) < T(K^+)$, $T(K_s^0) < T(\pi_1^-)$. Здесь T - кинетическая энергия отдельной частицы в с.д.м. $K_s^0 K^+ p \pi_1^- \pi_2^-$ -системы (в каждом событии вторичные π^- -мезоны были разделены между собой так, что кинетическая энергия π_1^- -мезона меньше кинетической энергии π_2^- -мезона). В распределении (4б): F - количество комбинаций, где изучаемая система частиц направлена в полусферу первичного π^- -мезона в с.д.м. $\pi^- p$ -взаимодействий и учитывается условие F в распределении (4а); B - количество комбинаций, где изучаемая система частиц направлена в полусферу мишени и учитывается условие B в распределении (4а). Сплошная кривая на рис. 4б - аппроксимация распределения без интервала 3,45-3,55 $\text{ГэВ}/c^2$ гладкой функцией с тремя свободными параметрами.

Найденные особенности были использованы для введения ограничений на отбор событий в спектр эффективных масс $K_s^0 K^+ p \pi^- \pi^-$ -системы (обозначенной как q) и выделения процессов с образованием состояния $N(3520)$:

$$\begin{aligned} -0,18 \leq Y^*(q) < 0,38 & \quad - \text{с.д.м. } \pi^- p, \\ \text{Cos} \Theta_{q, K^+}^{**} \geq -0,66 & \quad - \text{с.д.м. } K^+ K_s^0, \\ MM^2 \geq 0,3 (\text{ГэВ}/c^2)^2. & \end{aligned} \quad (5)$$

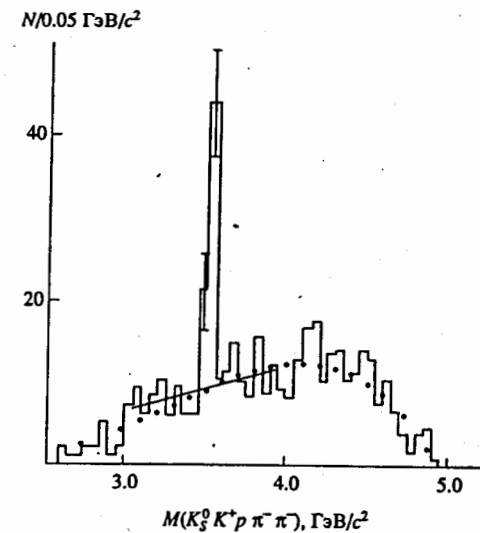


Рис. 5: Распределение взвешенных комбинаций по эффективным массам $K_s^0 K^+ p \pi^- \pi^-$ с ограничениями (5). Точками показана аппроксимация всего распределения без пика гладкой функцией с тремя параметрами. Сплошная линия - аппроксимация прямой линией участка спектра 3,05-3,95 $\text{ГэВ}/c^2$ без пика.

В спектре масс с ограничениями (5) количество стандартных отклонений в пике над фоном (рис. 5) больше 10; отношение сигнал/фон равно 2,5. Полученные значения параметров изучаемого резонансного состояния равны:

$$M = 3521 \pm 3 \text{ МэВ}/c^2, \quad \Gamma = 6_{-6}^{+21} \text{ МэВ}/c^2, \quad \sigma = 15 \pm 3 \text{ мкбн.}$$

В диссертации показан анализ спектра масс на рис. 5. Влияния кинематических отражений известных физических эффектов на статистическую значимость пика не найдено. Отдельно проверялись события из области пика. Для этих событий (с учётом оценки ионизации на треках заряженных частиц в каждом событии) были построены спектры масс для всех возможных конкурентных гипотез о пятичастичном конечном состоянии. Все спектры масс для конкурентных гипотез широкие. Анализ результатов аппроксимации этих спектров функцией Брейта-Вигнера показал, что известных широких мезонных или барионных резонансов с полученными параметрами нет.

Сделан вывод о том, что в рамках одного эксперимента получены убедительные указания на существование нового барионного состояния $N(3520) \rightarrow K_s^0 K^+ p \pi^- \pi^-$.

Возможной интерпретацией аномально-узкого состояния $N(3520)$ является его интерпретация экзотическим барионным резонансным состоянием со скрытой странностью. Возможности экспериментального материала не позволяют решить вопрос о квазистабильном ($\tau < 10^{-11}$ сек.) или резонансном характере состояния.

Кварковые модели обычных qqq -барионов с лёгкими кварками предполагают существование широких массивных барионных N -резонансов с нулевой странностью. Наиболее тяжёлый из надёжно установленных экспериментально барионных резонансов с нулевой странностью $N(2600)$ имеет ширину ~ 650 МэВ/ c^2 . В экспериментальных работах были получены указания на существование N -резонансов с массой больше 3000 МэВ/ c^2 и шириной более 1000 МэВ/ c^2 .

Аномально-узкая ширина массивного состояния $N(3520)$, большая множественность продуктов распада, включающих странные мезоны, необычные особенности образования и распада отличают его от известных широких N -резонансов и являются основанием для предположения об экзотической природе наблюдаемого барионного состояния и его интерпретации возможным кандидатом в пятикварковое состояние ($udds\bar{s}$) согласно представлениям в ряде теоретических работ.

Наблюдается сходство некоторых свойств $N(3520)$ и барионного состояния $\Sigma(3170)$, обнаруженного ранее в независимых экспериментах *CERN* и *ANL USA* (в K^-p -взаимодействиях при 8,25 и 6,5 ГэВ/с), распадающегося по каналам с более чем одной странной частицей в конечном состоянии, имеющего странность -1 в предположении экзотического резонансного состояния ($uuss\bar{s}$).

Также как и состояние $\Sigma(3170)$, $N(3520)$ не проявляется в системах частиц с множественностью меньше пяти. Оба состояния дополнительно обогащены парой кварков s, \bar{s} , характеризуются аномально-узкой шириной, сопоставимой с экспериментальным разрешением по эффективным массам и имеют массу больше 3 ГэВ/ c^2 (в настоящее время нет надёжно установленных барионных состояний с лёгкими кварками, имеющих массу больше 3 ГэВ/ c^2). Оба состояния обнаружены в мезон-протонных взаимодействиях при относительно невысоких энергиях. Также как и состояние $\Sigma(3170)$, $N(3520)$ образуется, по-видимому, в квазидвухчастичных реакциях. Оба состояния образуются в процессах с большими четырёхмерными переданными импульсами и возможным барионным обменом (анализ возможной кластери-

зации продуктов распада $\Sigma(3170)$ не проводился).

Похожие свойства резонансных состояний $N(3520)$ и $\Sigma(3170)$, отличающие их от известных барионных резонансов с лёгкими кварками, дают возможность сделать предположение о существовании новой группы барионных состояний.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации. Дополнительно в связи с полученными результатами обсуждается возможное продолжение поиска и исследований экзотических адронных состояний в других экспериментах.

Основные результаты и выводы диссертации

1. В условиях ЛВТА ОИЯИ отлажена методика обработки экспериментальных данных со стереофотоснимков двухметровой водородной пузырьковой камеры *CERN*, экспонированной в пучке π^- -мезонов с импульсом 16 ГэВ/с. Полученные результаты свидетельствуют о надёжности экспериментальных данных и методики их обработки.

2. В π^-p -взаимодействиях при 16 ГэВ/с проведен поиск редких слабоизученных в пион-нуклонных столкновениях процессов с образованием и наблюдаемыми распадами Ξ -гиперонов. Выполнен анализ инклюзивных и эксклюзивных характеристик процессов с образованием Ξ^- -частиц. В большей части событий Ξ^- -гиперон направлен в полусферу протона-мишени в с.ц.м. π^-p -взаимодействий и образуется, по-видимому, большей частью в процессах с мезонным обменом. В этом эксперименте параметр наклона B при описании зависимости дифференциального сечения Ξ^- от P_T^2 экспонентой $A \exp(-BP_T^2)$ в пределах ошибок совпадает с параметром наклона для Λ -частиц.

3. Не найдено какой-либо резонансной структуры в спектре эффективных масс системы с двойной странностью $\Xi^- \pi^+$. Показано, что в большинстве реакций Ξ^- -гиперон вместе с K^+ -мезоном в с.ц.м. π^-p -взаимодействий направлены в полусферу мишени. В спектре эффективных масс $\Xi^- K^+$ наблюдается небольшой широкий выброс в области 1,9-2,3 ГэВ/ c^2 .

4. Сравнение с результатами других экспериментальных работ показало, что полное сечение генерации Ξ^- возрастает с ростом энергии первичных π^- -мезонов в интервале 3 - 25 ГэВ; роль процессов с возможным барионным обменом возрастает при увеличении энергии налетающих π^- -мезонов в интервале 5,5 - 25,0 ГэВ.

5. В π^-p -взаимодействиях при 16 ГэВ/с зарегистрированы и анализированы редкие в пион-нуклонных взаимодействиях события с образованием и наблюдаемыми распадами Ξ^+ , Ξ^0 -частиц.

6. В π^-p -взаимодействиях при 16 ГэВ/с проведен поиск барионных резонансных состояний с двойной и скрытой странностью в четырёхлучевых событиях с зарегистрированными K_s^0 или Λ -частицами. В спектре эффективных масс $K_s^0 K^+ p \pi^- \pi^-$ обнаружена неизвестная ранее аномально-узкая резонансная структура $N(3520)$ с $\Gamma = 6_{-6}^{+21}$ МэВ/с².

7. Автором диссертации предложен новый подход к поиску резонансных состояний, позволяющий в ряде случаев отличать в рамках одного эксперимента физический эффект от статистической флуктуации в спектре эффективных масс.

8. В соответствии с развиваемым автором подходом для выяснения природы структуры $N(3520)$ проведен поиск особенностей образования и распада предполагаемого барионного состояния. Найдены особенности кинематических распределений, отличающие группу событий из области пика от событий из других интервалов спектра масс и отражающие свойства обнаруженного барионного состояния, связанные с механизмом его образования и его внутренней структурой.

Возможной интерпретацией аномально-узкого состояния $N(3520)$ является его интерпретация экзотическим барионным резонансным состоянием со скрытой странностью ($udds\bar{s}$), не противоречащая представлениям в ряде теоретических работ.

9. Обнаруженная особенность образования $N(3520)$ свидетельствует о том, что это барионное состояние образуется в процессах с большими четырёхмерными переданными импульсами.

В сделанном автором обзоре барионных резонансов отмечено отсутствие данных о систематических экспериментальных исследованиях возможного образования резонансных состояний в процессах с большими четырёхмерными переданными импульсами.

10. Обнаруженная особенность распада $N(3520)$ указывает на пространственную кластеризацию продуктов распада этого состояния, их угловое разделение на две части.

Возможно, угловое разделение бесцветных продуктов распада резонансного состояния $N(3520)$ на две части является отражением динамики цветных кластеров, предсказываемой для узких экзотических состояний в теоретических работах (Hoegaasen H. et al., 1977-1979).

11. В диссертации обсуждается сходство некоторых свойств $N(3520)$ и барионного состояния $\Sigma(3170)$ - кандидата в экзотическое состояние ($uuss\bar{s}$), обнаруженного ранее в независимых экспериментах CERN и ANL USA (в K^-p -взаимодействиях при 8,25 и 6,5 ГэВ/с, соответственно).

Похожие свойства состояний $N(3520)$ и $\Sigma(3170)$, отличающие их от

известных барионных резонансов с лёгкими кварками, дают возможность сделать предположение о существовании новой группы барионных состояний.

Диссертация основана на результатах следующих работ:

1. Баля Е.,..., Карнаухова В.М. и др. "Четырёхлучевые события с рождением странных частиц в π^-p -взаимодействиях при 16 ГэВ/с. Просмотр, измерения, геометрическая реконструкция.", Сообщения ОИЯИ, 1-7140, Дубна, 1973; Деп. публ. ОИЯИ: Б2-1-7133, 1973, Б2-1-7134, 1973, Б2-1-8136, 1974.
2. Карнаухова В.М.,..., Мороз В.И. и др. "Система программ обработки फिल्मовой информации с пузырьковых камер", Сообщения ОИЯИ, 10-6123, Дубна, 1971.
3. Баля Е.,..., Карнаухова В.М. и др. "Четырёхлучевые события с рождением странных частиц в π^-p -взаимодействиях при 16 ГэВ/с. Идентификация нейтральных странных частиц.", Сообщения ОИЯИ, 1-8138, Дубна, 1974.
4. Баля Е.,..., Карнаухова В.М. и др. "Выбор некоторых критериев идентификации каналов реакций в четырёхлучевых π^-p -взаимодействиях с рождением странных частиц при импульсе первичных π^- -мезонов 16 ГэВ/с на материале моделированных событий", Деп. публ. ОИЯИ, Б2-1-8137, Дубна, 1974.
5. Баля Е.,..., Карнаухова В.М. и др. "Четырёхлучевые события с рождением странных частиц в π^-p -взаимодействиях при 16 ГэВ/с. Идентификация каналов реакций.", Сообщения ОИЯИ, 1-8139, Дубна, 1974.
6. Карнаухова В.М., Мороз В.И., Стельмах А.П. "О выборе весов для неразделённых событий", Сообщения ОИЯИ, P1-12182, Дубна, 1979.
7. Карнаухова В.М., Кока К., Михул А., Мороз В.И. "Анализ выделения канала реакции $\pi^-p \rightarrow \Lambda K^+ \pi^+ \pi^- \pi^- \pi^0$ при импульсе первичного π^- -мезона 16 ГэВ/с", Деп. публ. ОИЯИ, B1-1-80-181, Дубна, 1980.
8. Balea E., Coca S., Karnaukhov V.M., Kellner G., Milul A., Moroz V.I. "Strange particle cross sections from four-prong π^-p interactions at 16 GeV/c", Сообщения ОИЯИ, E1-12345, Дубна, 1979.

9. Balea E., Berceanu S., Coca C., Karnaukhov V.M., Kellner G., Mihul A., Moroz V.I., Sararu A. "Neutral strange particle production in π^-p interactions at 16 GeV/c", Nucl.Phys., 1980, v.B163, p.21.
10. Balea E., Coca C., Karnaukhov V.M., Mihul A., Moroz V.I., Sararu A. "Two particle correlations involving neutral strange particles from π^-p interactions at 16 GeV/c", Revue Roumaine de Physique, 1982, v.27, p.707.
11. Coca C. and Karnaukhov V.M. "Triple Regge Analysis of the reaction $\pi^-p \rightarrow \Lambda + X$ at 16 GeV/c", Z.Phys., 1983, v.C18, p.267.
12. Карнаухов В.М. "Моделирование каналов реакций для выделения резонансов со странными частицами в π^-p -взаимодействиях при 16 ГэВ/c", Деп. публ. ОИЯИ, Б1-1-86-372, Дубна, 1986.
13. Карнаухов В.М., Кока К., Михул А., Мороз В.И. "Резонансы $\Sigma^\pm(1385)$, $K^{*0}(892)$ в π^-p -взаимодействиях при 16 ГэВ/c", Сообщения ОИЯИ, Р1-86-373, Дубна, 1986.
14. Balea E., Berceanu S., Coca C., Karnaukhov V.M., Kellner G., Mihul A., Moroz V.I., Sararu A., Volchkov V.K. " Ξ^- and Ξ^+ production in π^-p interactions at 16 GeV/c", JINR Preprint, E1-11653, Dubna, 1978; Nucl.Phys., 1979, v.B150, p.345.
15. Баля Е., Берчану Ш., Карнаухов В.М., Келлнер Г., Кока К., Михул А., Мороз В.И. " Ξ^0 -гиперон в π^-p -взаимодействиях при 16 ГэВ/c", Препринт ОИЯИ, Р1-11654, Дубна, 1978; ЯФ, 1978, т.28, с.1437.
16. Karnaukhov V.M., Moroz V.I., Coca C., Mihul A. "About a possible 3.52 GeV/c² very narrow baryon resonance", contributed paper 555, LP-HEP, 1991, Geneva; Phys.Lett., 1992, v.B281, p.148.
17. Карнаухов В.М. "Кинематические особенности барионной структуры с массой 3,52 ГэВ/c² и способ их обнаружения", Сообщение ОИЯИ, Р1-93-375, Дубна, 1993.
18. Карнаухов В.М., Мороз В.И., Кока К., Михул А. "О существовании бариона с массой 3.52 ГэВ/c²", Препринт ОИЯИ, Р1-93-121, Дубна, 1993; ЯФ, 1994, т.57, с.841.
19. Карнаухов В.М., Кока К., Мороз В.И. "Особенность барионной структуры с массой 3.52 ГэВ/c²", ЯФ, 1995, т.58, с.860.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 апреля 2001 года.