

Ա.Ի. Ալիխանյանի անվան ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

Հակոպով Ջավեն Նորայրի

Միջուկային միջավայրում տարբեր տիպի հաղորդների կլանման  
ուսումնասիրությունը ՀԵՐՄԵՍ գիտափորձի տվյալների հիման վրա

Ա.04.16-«Միջուկի, տարրական մասնիկների և տիեզերական  
ճառագայթների ֆիզիկա» մասնագիտությամբ ֆիզիկամաթեմատիկական  
գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման  
ատենախոսության

ՍԵՂՍԱԳԻՐ

Երևան-2006

---

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Им. А.И.Алиханяна

Акопов Завен Норайрович

Исследование поглощения адронов различного типа в ядерной  
среде на основе данных эксперимента HERMES

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата

физико-математических наук по специальности

01.04.16 "физика ядра, элементарных частиц и космических лучей"

Ереван-2006

Ереванский Физический  
ИНСТИТУТ  
научно-техническая  
библиотека

Ատենախոսության թեման հաստատված է Ա.Ի. Ալիխանյանի անվան Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտում

Գիտական ղեկավար՝ ֆիզմաթ. գիտ. դոկտոր Ռ.Հ. Ավագյան  
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ ֆիզմաթ. գիտ. դոկտոր Վ.Ս. Ժամկոչյան  
ֆիզմաթ. գիտ. թեկնածու Վ.Ս. Պողոսով

Առաջատար կազմակերպություն՝ Երևանի պետական համալսարան  
Պաշտոնությունը կայանալու է 2006թ-ի նոյեմբերի 14-ին, ժամը 14:00-ին  
Երեւի-ում գործող ԲՈՀ-ի 024 մասնագիտական խորհրդի նիստում  
(375036, Երևան, Ալիխանյան Եղբայրների փող. 2):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ Երեւի-ի գրադարանում:  
Սեղմագիրն առաքված է 2006թ-ի հոկտեմբերի 14-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար,  
ֆիզմաթ. գիտ. դոկտոր՝ *Է. Դարսյան* Է. Ղ. Աազազյան

Тема диссертации утверждена в Ереванском физическом институте им. А.И. Алиханяна.

**Научный руководитель:** доктор физ.-мат наук Р.О. Авакян

**Официальные оппоненты:** доктор физ.-мат. наук В.М. Жамкочян  
кандидат физ.-мат. наук В.С. Погосов

**Ведущая Организация:** Ереванский государственный университет

Защита состоится 14 ноября 2006г. в 14:00, на заседании специализированного совета ВАК 024, действующего при Ереванском Физическом Институте им. А. И. Алиханяна, (375036, ул. Братьев Алиханян 2, г. Ереван)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ереванского физического института им. А. И. Алиханяна.

Автореферат разослан 14 октября 2006г.

Ученый секретарь спец. совета, доктор физ.-мат. наук *Է. Դարսյան* Э.Д. Газазян

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Одним из основных нерешенных вопросов современной физики высоких энергий является проблема адронизации кварков. Эксперименты на элементарной мишени не позволяют исследовать пространственно-временное развитие процесса адронизации. Ядро, действуя как маленькая пузырьковая камера, дает возможность проследить за развитием процесса от начала до размеров порядка нескольких ферми (размеры ядра).

Диссертационная работа основана на экспериментальных результатах исследования образования адронов (мезонов и барионов) в полу-инклюзивной реакции лепто-рождения на различных ядерных мишенях. Полученные результаты по измерению одномерных и двумерных функций поглощения адронов безусловно помогут существенно продвинуться в понимании таких актуальных проблем, как динамика взаимодействия кварков и глюонов в непертурбативной области; проблема конфайнмента; проблема взаимодействия начальной кварк-глюонной системы (пре-адрона) с ядерной средой. Еще одним важным и актуальным аспектом проведенных исследований является полученная в работе зависимость поглощения адронов, как функция атомного номера четырех различных ядерных мишеней, использованных для набора данных в широком диапазоне изменения энергии виртуального фотона и доли этой энергии уносимой родившимся адроном определенного типа.

**Целью работы** положенной в основу диссертации, явилось исследование механизмов поглощения адронов различного типа в ядерной среде. Результаты получены в эксперименте HERMES, выполненном на ускорителе HERA (DESY) в 1999-2005 годах. Для анализа полученных данных были разработаны различные программы обработки, реализованные на мощных компьютерах. В том числе для оценки возможных коррекций, связанных с вкладом пионов от распадов дифракционных  $\rho$ -мезонов в выборку полу-инклюзивных пионов, а также для учета влияния радиационных процессов были проведены специальные Монте-Карло исследования, на основе которых удалось получить надежные оценки. Для понимания возможных механизмов адронизации кварков автором были также

проведены теоретические расчеты по усовершенствованной двух-масштабной модели струн.

**Научная новизна работы** состоит в том, что впервые в мире получены экспериментальные данные по поглощению адронов на различных ядрах в реакциях электро-рождения в наиболее чувствительной области энергий виртуального фотона 4 – 23.5 ГэВ. На основе широкого спектра ядерных мишеней со значениями атомного номера от 4 (He) до 132 (Xe) впервые получены численные оценки для степенного показателя зависимости функции поглощения адронов от атомного номера в различных кинематических условиях. На основе наиболее обеспеченной в мире статистики удалось впервые провести исследования дважды дифференциальной функции поглощения адронов по переменным  $V$  и  $Z$  (энергии виртуального фотона и доли этой энергии, уносимой рожденным кварком). Впервые удалось провести анализ зависимости функции ядерного поглощения, а также степенного показателя зависимости от атомного номера по переменной  $L_c$ , которая является оценкой средней длины формирования адронов. Впервые проведены измерения сложного отношения функций поглощения с регистрацией двух и одного адронов в конечном состоянии.

Автор выносит на защиту следующие результаты и выводы работы:

1. Одномерные функции поглощения адронов и пионов на Азоте, представленные гистограммами по переменным  $V$ ,  $Z$ .
2. Функции поглощения идентифицированных пионов, каонов, протонов и анти-протонов на Криптоне и Азоте представленные гистограммами по переменным  $V$  и  $Z$ .
3. Зависимость функции поглощения заряженных адронов от поперечного импульса  $p_t^2$  на Криптоне и Азоте.
4. Результаты по  $V$ ,  $Z$ -зависимости функции поглощения для Гелия и Неона.
5. Отношение функций поглощения с регистрацией двух и одного адрона в конечном состоянии.
6. Вывод об удовлетворительном описании полученных данных по одномерным функциям поглощения на основе усовершенствованной двух-масштабной струнной модели.

**Апробация работы и публикации.** Работы, положенные в основу диссертации широко известны в среде специалистов, многократно докладывались на международных конференциях, а также на семинарах в DESY и ЕрФИ. По теме диссертации опубликовано 5 статей в журналах и трудах конференций: 4 статьи опубликованы в ведущих мировых журналах; одна работа напечатана в сборнике материалов международной конференции.

### Содержание работы

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и Приложения ; содержит 137 страниц печатного текста, включая 73 рисунка и список литературы из 68 наименований.

**Введение** содержит описание и обоснование актуальности проблематики исследований поглощения адронов в ядерной среде от пионерских экспериментов, выполненных коллаборацией EMC до последних результатов, полученных в эксперименте HERMES по измерению одномерных и двумерных функций поглощения адронов различного типа на ядерных мишенях в широком диапазоне значений атомного номера. Также во введении даны формулировки основных достижений теории, касающихся механизмов формирования и поглощения адронов в ядерной среде.

Установка HERMES обладает возможностью детектировать адроны в конечном состоянии, так называемый случай полу-инклюзивного Глубоко-Неупругого Рассеяния (ГНР), что позволило существенно расширить физическую программу эксперимента, который был спроектирован в основном для изучения инклюзивных реакций с регистрацией только рассеянного лептона в конечном состоянии. Основные физические переменные, необходимые для описания полу-инклюзивного ГНР (в лабораторной системе отсчета) и используемые в тексте автореферата, следующие:

$Q^2 = -q^2 = (k - k')^2 = 4EE' \sin^2 \theta / 2$  - квадрат передачи 4-импульса лептоном виртуальному фотону;  $\nu = E - E'$  - энергия виртуального фотона;  $y = \nu / E$ ;  $x = Q^2 / 2M\nu$  - скейлинговая переменная Бьеркена (доля импульса нуклона, переданная конститuentному кварку);  $W^2 = M^2 + 2M\nu - Q^2$  - квадрат инвариантной массы конечной адронной системы;  $M$  - масса нуклона, импульс рожденного адрона  $P_h$  и его угол  $\theta_h$ , а также  $z = P_h / \nu$  доля энергии виртуального фотона уносимая рожденным адроном.

В первой главе даны основные формулы и описание формализма для интерпретации полу-инклюзивных данных, а также дан обзор основных моделей, существующих в этой области, для связи полученных данных по измеренной функции поглощения адронов с проблемой адронизации кварков.

Во второй главе дается описание установки HERMES, которая является спектрометром, регистрирующим продукты реакции в переднюю полусферу в лабораторной системе отсчета. Установка состоит из двух симметричных половин (верх-низ), расположенных выше и ниже пучко-провода ускорителя (см. Фиг.1), включающих в себя различные детекторы, магнит и электромагнитный калориметр.

Разделение лептонов и адронов осуществляется детекторами переходного излучения, RICH детектором, ливневым конвертором и электромагнитным калориметром. Лептонный триггер формировался совпадением сигналов от трех перечисленных сцинтилляционных родоскопов и энергвыделением на калориметре более 3.5 ГэВ, кроме того, калориметр позволяет регистрировать нейтральные пионы по распаду на два гамма-кванта. Угловой захват установки для заряженных треков составляет +/- 170 мрад по горизонтали и 40-140 мрад по вертикали. Импульсное разрешение

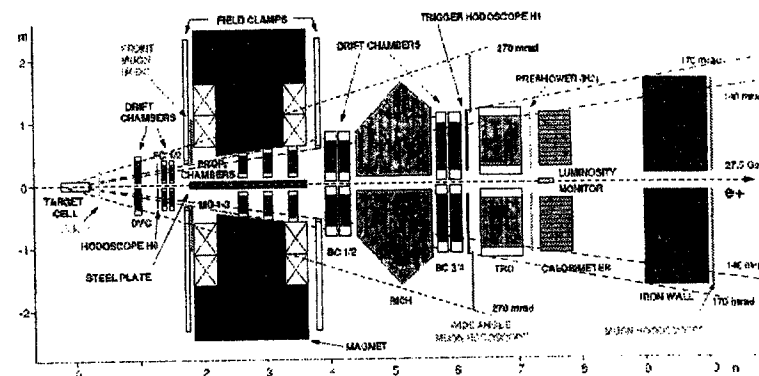


Рис. 1 Спектрометр HERMES

меняется от 0.5 до 1.5% в зависимости от значения импульса от 2 до 22 ГэВ. Угловое разрешение не хуже 1%. Эффективность разделения лептонов от адронов не хуже 97%.

Для идентификации различного типа адронов имеется RICH детектор, который позволяет идентифицировать заряженные пионы, каоны, протоны и анти-протоны в импульсном диапазоне от 2 до 15 ГэВ. В качестве фиксированных мишеней были использованы газообразные: неполяризованный дейтрон, гелий, неон, криптон и ксенон с плотностью вещества от  $10^{14}$  до  $10^{17}$  нуклонов/см<sup>2</sup>. Пучок электронов-позитронов с энергией 27.5 ГэВ обеспечивался накопителем HERA (DESY), типичный ток пучка менялся от 35 до 5 мА.

В третьей главе приводится описание процедуры анализа экспериментальных данных, необходимых кинематических ограничений и качества данных, используемых в анализе. Для селекции рассеянных лептонов были использованы следующие кинематические ограничения:

$$Q^2 > 1 \text{ ГэВ}^2$$

$$y < 0.85$$

$$W^2 < 4 \text{ ГэВ}^2$$

Дополнительно к селекции лептонов, следующие кинематические ограничения использованы для селекции адронов:

$$2 < P_h < 15 \text{ ГэВ}$$

$z > 0.2$  (для одномерных функций поглощения нижний лимит был 0.1)

$V > 6 \text{ ГэВ}$  (для одномерных функций поглощения нижний лимит был равен 4 ГэВ)

В дополнение к вышеперечисленным ограничениям для всех заряженных треков проводилась проверка на прохождение внутри углового захвата установки.

Измеряемая функция поглощения адронов в реакции электро-рождения определяется как сложное отношение множественности адронов определенного типа образованных на ядре с атомным номером  $A$ , к множественности адронов образованных на дейтроне (D):

$$R_i^h(V, Q^2, z, p_i^2) = \frac{\left( \frac{N^h(V, Q^2, z, p_i^2)}{N^+(V, Q^2)} \right)_i}{\left( \frac{N^h(V, Q^2, z, p_i^2)}{N^+(V, Q^2)} \right)_D} \quad (1)$$

где кинематические переменные  $V$ ,  $z$ ,  $Q^2$  и  $p_i^2$  были определены выше. Из вида выражения (1) следует, что измеряемая величина может быть представлена, как сложное отношение: отношения полу-инклюзивных сечений на определенном ядре к сечению на дейтроне, к такому же отношению для инклюзивного случая. Это отношение позволяет судить о сложных процессах адронизации кварка на ранней стадии его формирования, а также о механизме поглощения рожденных адронов в ядерной среде.

Большая часть систематических погрешностей в измеряемой функции поглощения, относящихся к эффективности работы детекторов, реконструкции треков, идентификации частиц сокращается в силу структуры выражения (1). Данные были скорректированы с учетом радиационных процессов, имеющих место как для инклюзивного, так и для полу-инклюзивного отношения. Эта коррекция составляет при больших значениях энергии виртуального фотона  $V > 19 \text{ ГэВ}$ : 7% для криптона и ксенона, 4.5% для неона и меньше 1% для гелия. Выборка заряженных пионов, образующихся в процессе полу-инклюзивного ГНР, была загрязнена пионами от распада  $\rho$ -мезона, образующегося в

эксклюзивном процессе. Специальные Монте-Карло исследования позволили получить следующие оценки возможного вклада от указанного процесса в отношении (1): 2-4%, 3-5%, 3.5-6% и 4-7% соответственно для гелия, неона, криптона и ксенона, для значений  $z \sim 0.7-0.8$ . Результирующие систематические погрешности, включенные в полную систематическую ошибку величины (1), следующие: систематика, обусловленная использованием различных параметризаций для расчета радиационных поправок  $\sim 2\%$ , систематика обусловленная ложной идентификацией адронов (1.5% для нейтральных пионов, 0.5% для заряженных пионов, 2% для каонов, 2% для протонов и 5% для анти-протонов), обусловленная общей нормировкой  $\sim 2\%$ , обусловленная учетом вклада от эксклюзивного  $\rho$ -мезона: (0.3-4%) для положительных пионов и (0.3-7%) для отрицательных пионов.

В четвертой главе приведены экспериментальные результаты, полученные в процессе выполнения диссертации. Сложность рассматриваемого явления адронизации кварка, когда сначала происходит формирование так называемого пре-адронного состояния, а затем происходит собственно формирование адрона, в определенном смысле упрощается в ядерной среде, где можно проследить явление формирования на ранней его стадии. При этом структура измеряемого отношения (1) позволяет исследовать это явление как с точки зрения партонной картины (формирования пре-адрона и адрона), так и с точки зрения распространения адрона в ядерной среде (вторичные рассеяния на нуклонах ядра).

Экспериментальные исследования были выполнены для одномерных функций поглощения в зависимости от переменных  $V$  и  $z$ , что является традиционным подходом для подобного рода исследований. Первые результаты по исследованию функций поглощения были получены при рассеянии лептонов на ядре азота с регистрацией в конечном состоянии заряженных адронов и пионов [1], в зависимости от переменных  $z$  и  $V$  (см. Рис. 2).

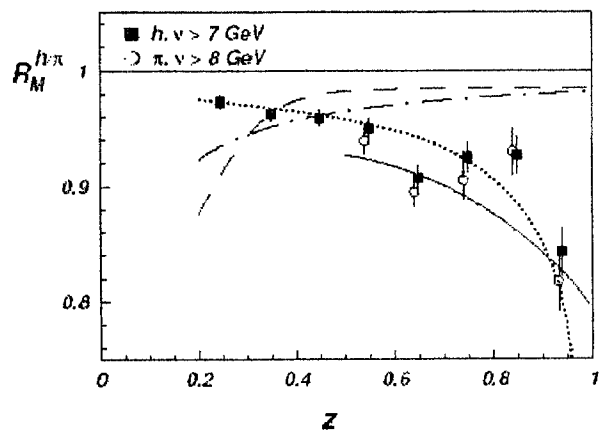


Рис. 2

Затем были выполнены исследования отношения (1) на ядре криптона, где помимо переменных  $z$  и  $\nu$ , была использована переменная  $p_i^2$ , (см. Рис.3) которая является квадратом проекции импульса рожденного адрона на направление виртуального фотона [2].

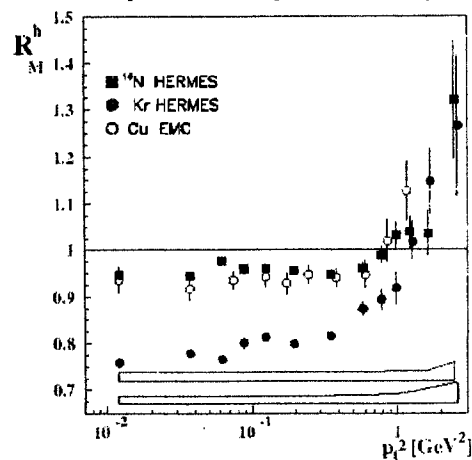


Рис. 3

Еще одним важным результатом, вошедшим в диссертацию, является измерение отношения функций поглощения адронов при наличии одного и двух адронов в конечном состоянии [3], это сложное отношение было измерено в зависимости от парциальной энергии

одного из адронов, когда второй адрон уносил более половины энергии виртуального фотона (см. Рис. 4).

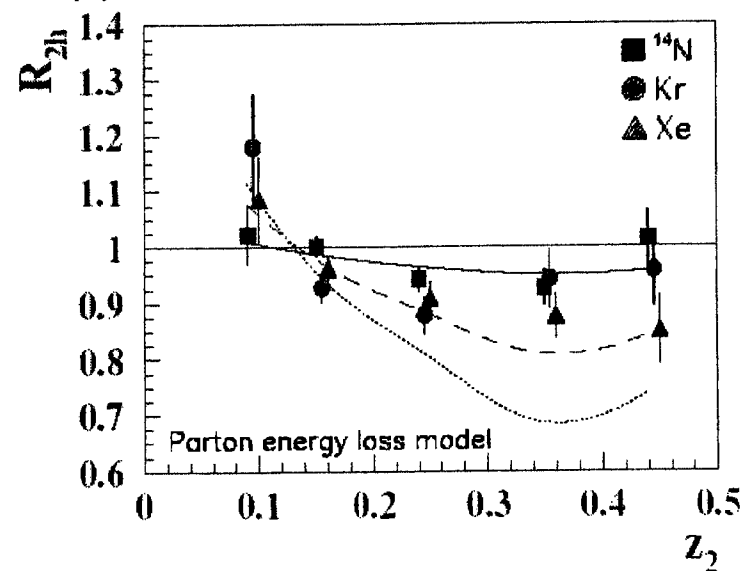


Рис. 4

Наличие в эксперименте HERMES различных газовых мишеней позволило провести измерения на ядрах гелия, неона и криптона [4]. Были измерены функции поглощения в зависимости от переменных  $z$ ,  $\nu$  (см Рис 5 и 6), а также  $p_i^2$  и  $Q^2$ .

Показана также зависимость степенного показателя  $\alpha$  и нормировочного параметра  $\beta$  от длины формирования адрона  $L$ .

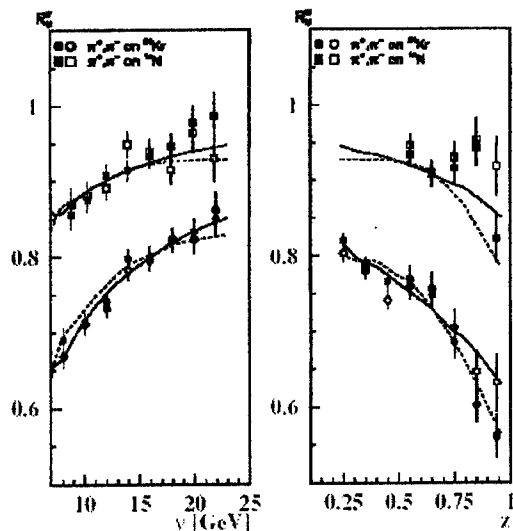


Рис. 7: Сравнение экспериментальных данных функции поглощения для Азота и Криптона с предсказанием двух-масштабной модели.

Впервые удалось получить информацию о соотношении партонного и адронного механизмов в ясном масштабе средних размеров ядер порядка нескольких ферми. Также приведено описание разработанной теоретической модели для описания полученных данных. Использованный подход является усовершенствованием двух-масштабной струнной модели [5], где вместо обычно используемого скачкообразного вида для сечения взаимодействия струны с нуклоном, вводится плавный рост этого сечения до величин адронных сечений. Показано, что в рамках разработанной модели удается описать полученные данные не только на качественном, но и на количественном уровне (Рис. 7), а также предсказать поведение функций поглощения различных адронов для широкого диапазона кинематических переменных.

В заключении даны выводы и оценка важности полученных результатов для развития различных теоретических моделей и более глубокого понимания механизмов адронизации кварков, приведены основные результаты, включенные в диссертацию:

1. Одномерные функции поглощения адронов и пионов на Азоте, представленные гистограммами по переменным  $v$ ,  $z$  [1], (Рис. 2).
2. Функции поглощения идентифицированных пионов, каонов, протонов и анти-протонов на Криптоне и Азоте представленные гистограммами по переменным  $v$  и  $z$  [2] (Рис. 5).
3. Зависимость функции поглощения заряженных адронов от поперечного импульса  $p_T^2$  на Криптоне и Азоте [2], (Рис.3).
4. Результаты по  $v$ ,  $z$ -зависимости функции поглощения для Гелия и Неона [4], (Рис. 6).
5. Отношение функций поглощения с регистрацией двух и одного адрона в конечном состоянии [3]. (Рис. 4).
6. Вывод об удовлетворительном описании полученных данных по одномерным функциям поглощения на основе усовершенствованной двух-масштабной струнной модели [5], (Рис. 7).

#### Список опубликованных работ:

1. *Hadron Formation in Deep-Inelastic Positron Scattering in a Nuclear Environment*, A. Airapetian, N. Akopov, Z. Akopov et al, *Eur. Phys. J. C* 20 (2001), 479-486
2. *Quark Fragmentation to  $\pi^{+-}$ ,  $\pi^0$ ,  $K^{+-}$ ,  $p$  and  $p$ -bar in the Nuclear Environment*, A. Airapetian, N. Akopov, Z. Akopov et al, *Phys. Lett. B* 577 (2003), 37-46
3. *Double Hadron Leptoproduction in the Nuclear Medium*, A. Airapetian, N. Akopov, Z. Akopov et al, *Phys. Rev. Lett.* 96 (2006), 162301
4. *Electroproduction of Pseudoscalar Mesons on Nuclei at HERMES*, Z. Akopov, *AIP Conference Proceedings -- August 30, 2004, Volume 717, pp.807-811*
5. *Application of the Two-Scale Model to the HERMES data on nuclear attenuation*, N. Akopov, L. Grigoryan and Z. Akopov, *Eur. Phys. J. C* 44, (2005), 219-226

### Ամփոփագիր

Ատենախոսությունը նվիրված է ժամանակակից բարձր էներգիաների ֆիզիկայի հիմնախնդիրներից մեկին, այն է՝ քվարկի հադրոնիզացման խնդրին: Առաջին անգամ հաջողվել է ստանալ տարբեր միջուկների վրա լեպտոնների ցրման վերաբերյալ մեծ ստատիստիկայով փորձարարական տվյալներ և անցկացնել ոչ միայն ավանդական՝ տարբեր կինեմատիկական փոփոխականներով հադրոնների կլանման ֆունկցիայի միաչափ վերլուծություն, այլև ֆազային տարածության մեջ երկչափ վերլուծություն՝ ըստ վիրտուալ ֆոտոնի էներգիայի  $\nu$  և էներգիայի մասնաբաժնի  $z$ , որը իր հետ տանում է հադրոնը:

Բացի դրանից, ատենախոսության մեջ առաջին անգամ ստացվել են կարևոր արդյունքներ աստիճանային ցուցչի վարքի վերաբերյալ, որը մտնում է հադրոնների կլանման ֆունկցիայի կախվածության պարամետրիզացման մեջ՝ կախված միջուկային թիրախի ատոմական համարից,  $Z$ , մեծությունից, որը բնորոշում է հադրոնի ձևավորման միջին երկարությունը:

Ստացված տվյալների նկարագրման համար մշակված է և իրականացված լարի երկչափանի վերափոխված մոդելը, որը հնարավորություն է տալիս բավականաչափ լավ նկարագրել փորձարարական տվյալները, ինչպես սովորական կլանման ֆունկցիայի համար, այնպես էլ վերջնական վիճակում երկու հադրոնների դեպքի համար:

Ատենախոսության մեջ բերված արդյունքները բազմիցս քննարկվել են ԵրՖԻ-ի և DESY-ի սեմինարներում, զեկուցվել են միջազգային կոնֆերենցիաներում և լայնորեն հայտնի են մասնագետների շրջանում: Ստացված արդյունքները, անկասկած, կնպաստեն տեսության հետագա զարգացմանը, քվարկների և գլյուոնների փոխազդեցության դինամիկայի հասկացմանը, ինչպես նաև կօգտագործվեն ապագա գիտափորձերը նախագծելիս:

