

20075



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-2001-111

На правах рукописи  
УДК 539.1.074.4,  
539.171.12/6.539.126

К-906

КУЛЬЧИЦКИЙ  
Юрий Александрович

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ СЕЧЕНИЯ РЕАКЦИЙ  
 $\pi^+ A \rightarrow K_s^0 + X, K^+ A \rightarrow K^0, K^* (892)^0 + X$  ПРИ 11,2 ГэВ  
И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК  
КАЛОРИМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА  
ЭКСПЕРИМЕНТА АТЛАС

Специальность: 01.04.16 — физика ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Дубна 2001

*Кульчицкий*

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем  
имени В.П. Джелепова  
Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

В.М. Гришин

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

В.А. Качанов

доктор физико-математических наук,  
профессор

А.А. Тяпкин

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, г. Москва

Защита диссертации состоится "29" 06 2001 года  
на заседании диссертационного совета Д 720.001.03 в Объединенном  
институте ядерных исследований; 141980, г. Дубна, Московская об-  
ласть, Россия.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "30" 05 2001 года.

Ученый секретарь диссертационного Совета  
доктор физико-математических наук, профессор

Ю.А. Батусов

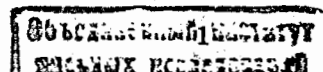
## Введение

Диссертационная работа обобщает наиболее существенные резуль-  
таты 1980 – 2000 годов, полученные автором в завершеном исследо-  
вании в области адрон-ядерных взаимодействий: измерении сечений  
ряда инклюзивных реакций и развитии методов прецизионной адрон-  
ной калориметрии в экспериментах нового поколения на ускорителях  
ТэВ-ного диапазона. В первой части диссертации содержатся данные,  
в том числе полученные впервые, об экспериментальном исследовании  
процесса адронизации s-кварка в  $\pi^+$ ,  $K^+$ -рассеянии на ядрах в области  
фрагментации налетающего мезона. Ряд этих результатов остаются и  
в настоящее время единственными сведениями в указанной области.  
Вторая часть диссертации включает полученные автором результаты  
экспериментального исследования пространственного развития адрон-  
ного ливня и важных свойств калориметрического комплекса экспери-  
мента АТЛАС (ЦЕРН) с применением новых методов анализа инфор-  
мации, поступающей с адронных калориметров и комбинированных  
калориметров, состоящих из электромагнитной и адронной частей.

### Общая характеристика работы

**Актуальность темы диссертации.** Уникальную возможность  
для получения недоступной в адрон-адронных взаимодействиях инфор-  
мации о пространственно-временной структуре сильных взаимодей-  
ствий и о цветовой структуре адронов предоставляет изучение адрон-  
ядерных взаимодействий. Изучение эффектов времени формирования  
адрона возможно при использовании ядра, как совокупности нуклон-  
ных мишеней, поскольку характерное время сильных взаимодействий  
составляет порядка одного ферми. Эффект взаимного "экранирования  
цвета" различных составляющих адрона является одним из важней-  
ших качественных предсказаний квантовой хромодинамики. Он про-  
является в зависимости сечения взаимодействия от среднеквадратич-  
ного радиуса адрона. Ярким следствием эффекта "экранирования цве-  
та" является "цветовая прозрачность" ядер для "сжатых" адронных  
конфигураций. Пространственно-временная структура процесса "экра-  
нирования цветных зарядов" приводит к нетривиальному ядерному  
экранированию как жестких, так и мягких процессов. Актуальной про-  
блемой физики частиц является экспериментальная проверка фунда-  
ментальных предсказаний КХД в адрон-ядерных взаимодействиях для  
мягких процессов.

Первая часть диссертация обобщает завершённые результаты изу-



чения процесса адронизации s-кварка, выполненного на спектрометре "Гиперон" в рамках программы по исследованию образования и распада мезонов в инклюзивных процессах на ускорителе У-70 (ИФВЭ)

$$\pi^+ + A \rightarrow K_s^0 + X, \quad K_s^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-, \quad (A = Be, Cu), \quad (1)$$

$$K^+ + A \rightarrow K^0 + X, \quad K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-, \quad (A = Be, Cu, Pb), \quad (2)$$

$$K^+ + A \rightarrow K^*(892)^0 + X, \quad K^*(892)^0 \rightarrow K^+ \pi^-, \quad (A = Be, Cu, Pb) \quad (3)$$

в области фрагментации ( $0, 4 < x_f < 1, p_t < 0, 5$  ГэВ/с) налетающих адронов ( $\pi^+, K^+$ ) при энергии 11,2 ГэВ.

Актуальность измерения сечений инклюзивных процессов при энергиях  $\simeq 10$  ГэВ подтверждается осуществлением в ЦЕРН широкой программы исследований реакций  $hA \rightarrow h + X$  на установке HARP<sup>1)</sup>.

Исследование теоретических аспектов адронизации на ядрах в модели "экранирования цвета"<sup>2)</sup> и попытки экспериментального обнаружения эффектов КХД сохраняют свою актуальность до настоящего времени. Так, например, недавно получено указание на обнаружение эффекта при исследовании реакций  $\mu A \rightarrow \rho^0 \mu A$  при 470 ГэВ в эксперименте E665 (Fermilab)<sup>3)</sup>; поиск этого эффекта ведется в процессах  $eA \rightarrow \rho^0 eA$  при 25,5 ГэВ в эксперименте HERMES (DESY)<sup>4)</sup>.

Измеренные сечения адрон-ядерных взаимодействий будут полезны при планировании программы адрон-ядерных и ядро-ядерных исследований на Большом адронном коллайдере (БАК) в ЦЕРН и для более детального описания развития адронных ливней в программах моделирования (например, MARS и GEANT), используемых в экспериментах, подобных АТЛАС и в физике космических лучей.

Важнейшими задачами современной физики высоких энергий являются исследование механизма спонтанного нарушения симметрии в электро-слабом секторе фундаментальных взаимодействий (поиск одного или более хиггсовских бозонов), исследование новых физических явлений за пределами стандартной модели (суперсимметрия), прецизионное измерение массы t-кварка и W-бозона, поиск структуры кварков. Для решения этих задач предназначена установка АТЛАС. Обнаружение хиггсовского бозона кардинальным образом зависит от калориметрической информации.

<sup>1)</sup> F.Dyda et al., Proposal to Study Hadron Production for the Neutrino Factory and for the Atmospheric Neutrino Flux, CERN-SPSC/99-35, 1999.

<sup>2)</sup> В.Kopeliovich et al., PL B368 (1996) 187; PL B403 (1997) 128.

<sup>3)</sup> M.R.Adams et al., PRL 74 (1995) 1525.

<sup>4)</sup> K.Ackerstaff et al., PRL 82 (1999) 3025.

трической информации. В области масс  $m_H$  между пределом чувствительности LEP-2 ( $\simeq 100$  ГэВ) и  $m_H = 130$  ГэВ наиболее вероятен канал  $H \rightarrow \gamma\gamma$ , причем  $\gamma$ -кванты будут регистрироваться электромагнитным калориметром. В области  $130 < m_H < 600$  ГэВ мода распада  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$  реконструируется с использованием калориметрической информации для выделения  $\geq 2$  электронов. В обоих случаях фоновые события отсекаются с использованием калориметрического комплекса. Для примера, сечение образования хиггсовского бозона с массой  $\simeq 500$  ГэВ составляет  $10^{-11} \sigma_{tot}$ . При  $m_H > 600$  ГэВ доминируют каналы:  $H \rightarrow ZZ \rightarrow ll\nu\nu$ , для выделения которого необходимо точное измерение калориметрическим комплексом недостающей поперечной энергии, и  $H \rightarrow WW \rightarrow lv jet jet$ , который может быть обнаружен в случае реконструкции  $W \rightarrow jet jet$  с использованием калориметрии.

Исследование характеристик адронного калориметра нового типа, с продольным расположением детектирующих элементов (рис. 8Б), и всего калориметрического комплекса эксперимента АТЛАС, разработка и применение новых методов анализа калориметрической информации — являются актуальными проблемами физики высоких энергий. Решение этих задач необходимо для изучения физических процессов в новом ТэВ-ном энергетическом диапазоне протон-протонных взаимодействий (например, для исследования коллективных эффектов в событиях с предельно большой множественностью<sup>5)</sup>).

Решению актуальных задач прецизионной адронной калориметрии в экспериментах нового поколения на ускорителях ТэВ-ного диапазона энергий посвящена вторая часть диссертации.

#### Цель исследования:

1. Получение новых экспериментальных данных о динамике мягких адрон-ядерных взаимодействий при высоких энергиях. Исследование в рамках современных модельных представлений процесса адронизации s-кварка в ядерной среде.

2. Разработка новых методов анализа калориметрической информации, обеспечивающих достижение  $\pm 2\%$  линейности и энергетического разрешения  $50\%/\sqrt{E} \oplus 3\%$ , что позволит провести поиск хиггсовских бозонов ( $H \rightarrow WW, H \rightarrow bb, A^0/H^0 \rightarrow \tau\tau$ ), структуры кварков и явлений за пределами Стандартной модели, существенно повысить точ-

<sup>5)</sup> Ю.А.Кульчицкий и др., Исследование корреляторов для событий с предельно большой множественностью адронов; Доклад на 2-ой Международной конференции "Very High Multiplicity Physics", 7-9 апреля 2001, ОИЯИ, Дубна, Россия.

ность измерения массы t-кварка и решить другие важные физические задачи в новом ТэВ-ном диапазоне протон-протонных взаимодействий.

3. Получение новых экспериментальных данных о пространственном развитии адронного ливня, являющегося проявлением процесса полного поглощения первичного адрона в веществе ( $h^\pm + A \rightarrow X$ )<sup>6</sup>.

4. Получение характеристик адронного калориметра и всего калориметрического комплекса эксперимента АТЛАС при облучении в пучках пионов и электронов с энергиями 10 – 300 ГэВ и сравнение с результатами моделирования.

**Научная новизна.** Впервые измерены дифференциальные сечения инклюзивных процессов  $\pi^+ + Be, Cu \rightarrow K_s^0 + X$  при  $x_f > 0,4$ . Эти данные и сейчас являются единственными. Изучена их А-зависимости от  $x_f$ . Столь же единственными остаются наши измерения дваждыдифференциальных сечений  $K^+ + Be, Cu, Pb \rightarrow K^0, K^*(892)^0 + X$ . Изучена их А-зависимости от  $x_f$  и  $p_t$ . В рамках предложенной схемы проведен анализ измеренных сечений в КХД-модели, учитывающей эффекты длины формирования адронов и “цветовой прозрачности” ядер. Сечения реакций  $\pi^+, K^+ + A \rightarrow K_s^0 + X$  описаны в рамках модели кварк-глюонных струн, что делает обоснованным расширение применимости модели в области энергий меньше 100 ГэВ.

Созданы новые методы анализа калориметрической информации: беспараметрический метод определения энергии адронов в комбинированном калориметре; метод измерения нескомпенсированности электромагнитного калориметра; метод трехмерной параметризации адронных ливней.

Получены отсутствовавшие ранее данные о пространственном развитии адронного ливня ( $h^\pm A \rightarrow X$ ) в железно-сцинтилляционных калориметрах и результаты исследования характеристик адронного tile калориметра, а также всего калориметрического комплекса эксперимента АТЛАС в пучках пионов и электронов с энергиями от 10 до 300 ГэВ.

**Практическая ценность.** Результаты измерений сечений могут быть использованы при разработке программ исследований адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий на Большом адронном коллайдере, других современных ускорителях и в физике космических лучей,

<sup>6</sup> По инициативе и при лидирующем участии автора ведется измерение неизвестных неупругих сечений этих процессов на Fe при энергиях от 10 до 300 ГэВ с использованием экспериментальных данных, полученных на адронном калориметре.

а также для детального моделирования адронных ливней. Теоретический анализ полученных экспериментальных данных проясняет роль эффектов длины формирования адронов и “цветовой прозрачности” ядер в мягких адрон-ядерных взаимодействиях и будет полезен при планировании исследований динамики сильных взаимодействий в других реакциях и в более широкой области энергий.

Создан беспараметрический метод определения энергии адронов в комбинированном калориметре, который будет использован для отбора событий на уровне триггера первого уровня в эксперименте АТЛАС на Большом адронном коллайдере (ЦЕРН).

Создан метод параметризации, учитывающий трехмерную структуру адронного ливня, который в настоящее время использован при создании программы быстрого моделирования и может быть применен для улучшения двух-ливневого разделения и решения других задач калориметрии, требующих интегрирования по объему.

Предложенные новые методы анализа калориметрической информации, разработанное программное обеспечение и полученные новые результаты исследований характеристик калориметров могут быть полезны при разработке, тестовых испытаниях и калибровке адронных и комбинированных калориметров.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты законченного экспериментального исследования, выполненного с применением разработанных методик и программного обеспечения: дифференциальные сечения реакций  $\pi^+ + Be, Cu \rightarrow K_s^0 + X$  и дваждыдифференциальные сечения реакций  $K^+ + Be, Cu, Pb \rightarrow K^0, K^*(892)^0 + X$  в области фрагментации налетающих мезонов при энергии 11,2 ГэВ. Полученные данные остаются единственными.
2. Результаты теоретического анализа мягких процессов в адрон-ядерных взаимодействиях в рамках современных кварк-глюонных моделей.
3. Новые методические разработки и полученные на их основе результаты измерения важных характеристик адронного, электромагнитного и комбинированного калориметров эксперимента АТЛАС в пучках заряженных пионов и электронов.
4. Результаты экспериментального исследования пространственного развития адронного ливня в железно-сцинтилляционном калориметре.
5. Результаты исследования базовых характеристик калориметрического комплекса эксперимента АТЛАС методом моделирования.

**Личный вклад соискателя.** Диссертация написана на основе за-

вершенных научных работ, выполненных автором в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, ИФВЭ (Протвино), Институте физики НАН Республики Беларусь (Минск) и ЦЕРН (Женева) в 1980 – 2000 гг. Автору диссертации принадлежит значительный, и в ряде разделов диссертации определяющий, вклад как в постановку задач, так и в их решение.

**Апробация результатов диссертации.** Изложенные в диссертации материалы докладывались автором на научных семинарах Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, ИФ НАНБ (Минск), ИЭФ САН (Кошице); на международных совещаниях сотрудничества Гиперон (1983 – 1989 г.); в ЦЕРН на международных конференциях коллаборации АТЛАС (1995 – 2000 г.); на заседаниях специализированных комитетов ОИЯИ; на международном совещании Беларусь – ЦЕРН по экспериментам на Большом адронном коллайдере (Минск, 1996); на международной конференции “Структура адронов” (Стара-Лесна, Словакия, 1998 г.); на 8-ой (Лиссабон, Португалия, 1999 г.) и 9-ой (Анниси, Франция, 2000 г.) международных конференциях по калориметрии в физике высоких энергий. Цикл работ автора с коллегами по исследованию эффектов экранирования цвета в адрон-ядерных взаимодействиях отмечен первой премией ОИЯИ за 1991 год.

**Публикации.** Экспериментальные, теоретические и методические исследования, положенные в основу диссертации, выполнены в 1980 – 2000 гг. и опубликованы в научных журналах, трудах конференций, препринтах ОИЯИ и ЦЕРН [1] – [26].

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения. Работа изложена на 170 страницах, включая 101 рисунок и 20 таблиц. Библиографический список содержит 217 наименований.

### Содержание диссертации

**Во введении** обоснована актуальность исследования адронизации кварков в адрон-ядерных взаимодействиях при высоких энергиях и принципиальная необходимость использования адронных калориметров в современных коллайдерных экспериментах.

**В первой главе** дано описание установки “Гиперон” [1] в варианте рис. 1А, условий проведения эксперимента по исследованию инклюзивных процессов (1) – (3). Разрешение спектрометра вторичных частиц по эффективной массе найдено равным  $2,6 \pm 0,3$  МэВ в области масс  $K_s^0$ . Предложена процедура и проведен расчет точностных характеристик спектрометра, в результате построены функции разрешения

по эффективной массе систем  $(K^+\pi^-)$ - и  $(\pi^+\pi^-)$ -мезонов [2]. Разработана и использована система программ анализа информации с нашей установки [3], учитывающая особенности спектрометра и кинематику изучаемых процессов, обеспечившая быструю и эффективную ( $97 \pm 2\%$ ) обработку экспериментальных данных. Акцептанс установки рассчитывался с использованием метода существенной выборки, что позволило повысить его точность, сократив время счета для одного события. Триггерная эффективность определена по распадам  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-$ . Эффективность регистрации двухлучевого события найдена равной  $78 \pm 2\%$  [4]. В результате анализа спектров  $\pi^+\pi^-$  и  $K^+\pi^-$ -мезонов получены несмещенные значения масс  $K_s^0$  и  $K^*(892)^0$  [5].

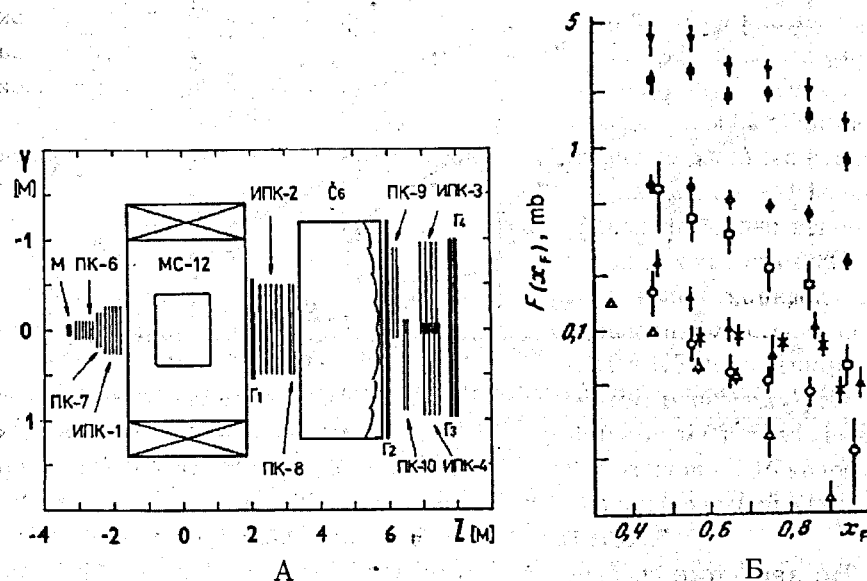


Рисунок 1: А) Спектрометр вторичных частиц установки Гиперон. Б) Дифференциальные сечения  $F(x_f)$  инклюзивного образования  $K_s^0$ -мезонов при 11,2 ГэВ ( $p_t < 0,3$  ГэВ/с) в реакциях (1) ( $\circ - \pi^+Be$ ,  $\square - \pi^+Cu$ ), (2) ( $\bullet - K^+Be$ ,  $\blacksquare - K^+Cu$ ,  $\blacktriangledown - K^+Pb$ ),  $K^+p \rightarrow K_s^0 + X$  ( $\blacktriangle$ ).  $\times$  – данные для реакции  $K^+p \rightarrow K_s^0 + X$  при 16 ГэВ<sup>7)</sup> и ( $\triangle$ ) – данные для реакции  $\pi^+p \rightarrow K_s^0 + X$  (P.Bosetti et al., NP B94, 1975, 21) при 16 ГэВ.

**Во второй главе** представлены результаты измерения инвариантных дифференциальных сечений  $F(x_f)$  процессов инклюзивного образования  $K_s^0$ -мезонов на ядрах в области фрагментации налетающего

$\pi^+$ -мезона при 11,2 ГэВ (рис. 1Б) [6]. В этой области,  $x_f > 0.4$ , нет иных данных для реакций (1) ни при каких других энергиях. На рис. 1Б приведены также измеренные нами дифференциальные сечения реакции  $K^+p \rightarrow K^0 + X$  при 11,2 ГэВ, хорошо согласующиеся с данными в том же диапазоне  $p_t$  при 16 ГэВ<sup>7)</sup>, что свидетельствует об отсутствии существенных систематических погрешностей в наших результатах.

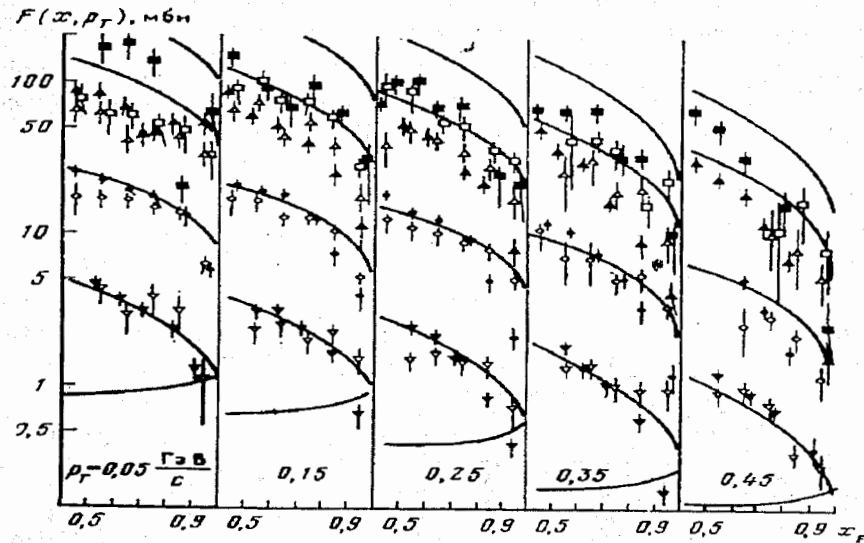


Рисунок 2: Дваждыдифференциальные инвариантные сечения  $F(x_f, p_t)$  для процессов (2) при 11,2 ГэВ ( $\circ - K^+Be$ ,  $\Delta - K^+Cu$ ,  $\square - K^+Pb$ ),  $K^+p \rightarrow K^0 + X$  ( $\nabla$ ) при 16 ГэВ (P.V.Chliarnikov et al., NP B88, 1975, 191) и расчет в рамках Монте-Карло версии МКГС ( $\blacktriangledown - K^+p$ ,  $\bullet - K^+Be$ ,  $\blacktriangle - K^+Cu$ ,  $\blacksquare - K^+Pb$ ), кривые – расчет в рамках аналитической версии МКГС без учета поглощения вторичных  $K^0$ -мезонов.

Измерены дваждыдифференциальные инвариантные сечения  $F(A, x_f, p_t)$  процессов инклюзивного образования  $K^0$  мезонов на ядрах в области фрагментации налетающего положительного каона при 11,2 ГэВ (рис. 2) [7, 8]. Для этих реакций не существует других измерений дваждыдифференциальных сечений. Сечения  $F(x_f)$  для реакций (2) приведены на рис. 1Б. Автором предложена феноменологическая формула

$$F(A, x_f, p_t) = A^{\alpha-\beta \ln A} \cdot (1-x_f)^n \cdot e^{-Bp_t^2}, \quad (4)$$

<sup>7)</sup> G.Ciapetti et al., NP B89 (1975) 365.

позволившая описать всю совокупность измеренных нами сечений реакций  $K^+ + A \rightarrow K^0 + X$ .

Зарегистрирован рост отношения сечений образования  $K^0$ -мезонов в  $K^+$  и  $\pi^+$  пучках на ядрах при  $x_f \rightarrow 1$ , объясняемый в модели кварк-глюонных струн<sup>8)</sup> различием в поведении функций фрагментации валентных, для реакций (2), и морских, для реакций (1),  $s$ -кварков [9].

Впервые измерены дваждыдифференциальные инвариантные сечения  $F(A, x_f, p_t)$  процессов инклюзивного образования  $K^*(892)^0$ -мезонов на ядрах в области фрагментации налетающего положительного каона при 11,2 ГэВ (табл. 1) [7, 10]. Для этих реакций нет других измерений ни при каких энергиях. Для реакций (3) при  $p_t < 0,2$  ГэВ/с в области  $x_f \rightarrow 1$  обнаружен рост дваждыдифференциальных сечений, связанный с процессом дифракционного образования  $K^*(892)^0\pi$  системы. При  $p_t > 0,2$  ГэВ/с характер поведения дваждыдифференциальных сечений приобретает вид  $(1-x_f)^{0,2}$ . Зависимость сечений от  $p_t^2$  описывается функцией  $e^{-Bp_t^2}$ . Обнаружен рост параметра  $B$  при увеличении  $x_f$ , который связан с увеличением вклада дифракционных процессов.

Таблица 1: Сечения реакций (3).  $p_t$  приведены в (ГэВ/с).

$x_f$	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95
$p_t$	$F(x_f, p_t)$ (мбн)					
0,05	115 ± 27	85 ± 15	85 ± 13	78 ± 12	114 ± 11	98 ± 9
0,15	96 ± 22	73 ± 9	63 ± 8	76 ± 6	81 ± 4	68 ± 9
0,25	95 ± 25	74 ± 13	64 ± 9	60 ± 5	53 ± 3	36 ± 3
0,35	—	57 ± 20	43 ± 10	31 ± 6	28 ± 3	21 ± 2
0,45	—	—	36 ± 9	24 ± 10	15 ± 4	9 ± 2
0,05	297 ± 136	314 ± 80	283 ± 58	339 ± 67	351 ± 45	370 ± 31
0,15	323 ± 127	209 ± 61	274 ± 55	281 ± 45	276 ± 33	240 ± 24
0,25	339 ± 193	404 ± 72	290 ± 57	200 ± 35	194 ± 18	116 ± 13
0,35	—	—	293 ± 165	125 ± 41	79 ± 31	53 ± 10
0,45	—	—	162 ± 98	95 ± 95	85 ± 34	57 ± 27
0,05	924 ± 377	693 ± 176	735 ± 204	558 ± 170	771 ± 118	877 ± 85
0,15	1005 ± 565	754 ± 136	288 ± 112	558 ± 85	570 ± 65	537 ± 50
0,25	976 ± 332	433 ± 282	535 ± 111	494 ± 120	409 ± 44	274 ± 34
0,35	—	452 ± 285	359 ± 124	403 ± 128	195 ± 61	146 ± 34
0,45	—	—	393 ± 141	295 ± 141	129 ± 80	116 ± 73

Нами проведен расчет дифференциальных сечений  $F(x_f)$ ,  $d\sigma/dp_t^2$  для реакций (2) и (3) в рамках кварк-партоновой модели FRITIOF. Сравнение с нашими экспериментальными результатами показало, что

<sup>8)</sup> Н.Амелин, ЯФ, 51 (1990) 211.

модельные расчеты согласуются с данными для реакций (3) и превышают более чем в два раза по величине сечения реакций (2), что свидетельствует о необходимости усовершенствования данной модели.

Автором проведена аппроксимация измеренных дваждыдифференциальных сечений реакций (2) и (3) зависимостью

$$\frac{d^2\sigma}{dx_f dp_t^2} = \sigma_0(x_f, p_t) \cdot A^{\alpha(x_f, p_t)}. \quad (5)$$

В пределах погрешностей величины  $\alpha(x_f, p_t)$  не зависят от  $x_f$  и  $p_t$ . Значения параметров  $\alpha(x_f)$  для реакций  $K^+A \rightarrow K^*(892)^0 X$  на  $\approx 15$  выше, чем для  $K^+A \rightarrow K^0 X$ . Это является первым наблюдением подобного рода и нуждается в теоретической интерпретации.

В третьей главе приведены результаты расчетов дваждыдифференциальных сечений для реакций (2) [9] в рамках Монте-Карло версии модели кварк-глюонных струн<sup>8)</sup> (МКГС). Результаты находятся в удовлетворительном согласии с нашими детальными экспериментальными данными, что расширило применимость МКГС как для описания каон-ядерных взаимодействий, так и для энергий меньше 100 ГэВ. Также наблюдается удовлетворительное согласие расчетов автора в

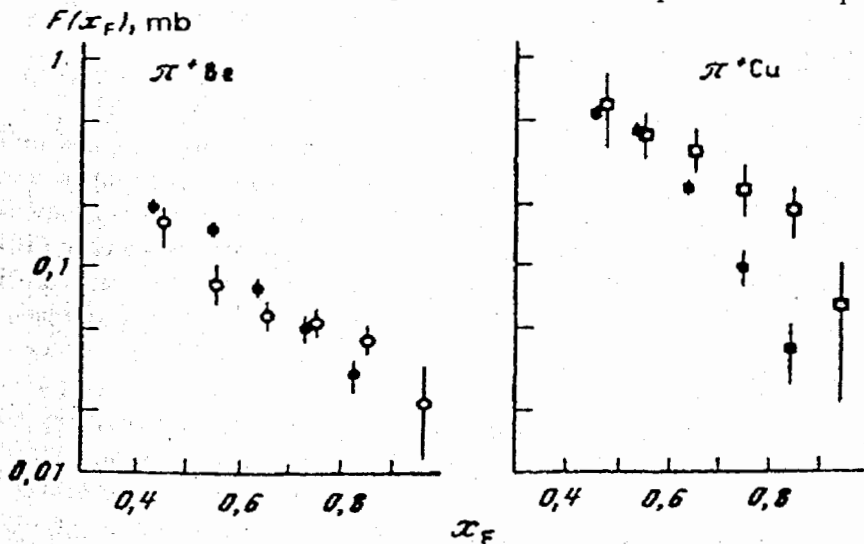


Рисунок 3: Экспериментальные значения (○) измеренных дифференциальных сечений реакций (1) и расчеты (●) в рамках МКГС.

рамках МКГС для дифференциальных сечений реакции  $\pi^+ + Be \rightarrow$

$K_s^0 + X$  с нашими экспериментальными данными (рис. 3). В то же время для реакции  $\pi^+ + Cu \rightarrow K_s^0 + X$  падение теоретических сечений с увеличением  $x_f$  существенно больше, чем измерено на эксперименте.

Для описания сечений реакций  $K^+A \rightarrow K^0, K^*(892)^0 + X$  проведен анализ вкладов в дифференциальные сечения  $F(x_f)$  от  $K^0$ - и  $K^*(892)^0$ -мезонов, образованных в результате распада резонансов  $K^*(1430) \rightarrow K^*(892)^0\pi$  и  $K^*(892) \rightarrow K^0\pi$  или дифракционного рождения  $K^*(892)^0\pi$  (распадные), либо непосредственно в процессе  $K^+A$ -взаимодействия (прямые) [11]. Сечения образования распадных  $K^0$ - и  $K^*(892)^0$ -мезонов рассчитаны с использованием экспериментальных данных.

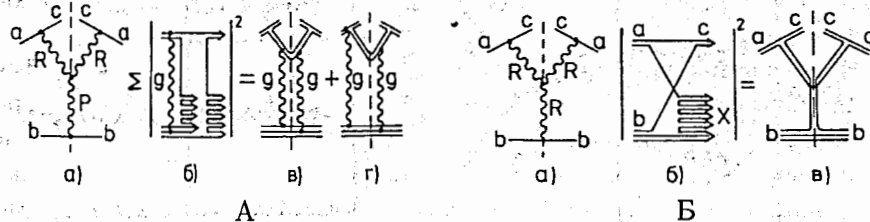


Рисунок 4: А) Трехреджионный график RRP (а) и соответствующие цилиндрические диаграммы (б, в, г). Б) Трехреджионный график RRR (а) и соответствующие планарные диаграммы (б, в).

Рассмотрены основные кварковые диаграммы для описания прямых  $K^0$ - и  $K^*(892)^0$ -мезонов: цилиндрические (рис. 4А) и планарные (рис. 4Б). Они рассчитываются в рамках модели, учитывающей при адронизации лидирующего  $\bar{s}$ -кварка эффект взаимного “экранирования цветов” кварков в адроне, перерассеяние несформировавшегося адронного состояния (струны) в ядерной среде и длину формирования вторичного адрона. Процесс адронизации для цилиндрической диаграммы (рис. 4А) происходит следующим образом: в результате взаимодействия налетающего адрона с нуклоном валентные кварки адрона образуют с кварками нуклона две струны, которые фрагментируют затем в адроны. Процесс адронизации для планарной диаграммы (рис. 4Б) таков: кварки налетающего адрона находятся в сильно асимметричной по импульсам конфигурации, так как один из кварков несет почти весь импульс. Вероятность такой конфигурации подавлена фактором  $1/\sqrt{s}$ .

Инвариантные сечения процессов (2) и (3) аппроксимированы зависимостью

$$F(x_f) = \alpha \cdot \left( F^{RRP}(x_f) + \frac{\beta}{\sqrt{s/(1 \text{ ГэВ}^2)}} \cdot F^{RRR}(x_f) \right)_{\text{прям.}} + F(x_f)_{\text{расп.}}, \quad (6)$$

где  $\alpha_{K^0} = 0.007 \pm 0.001$ ,  $\alpha_{K^*(892)^0} = 0.017 \pm 0.002$ , а  $\beta$  имеет смысл отношения реджевских вершинных функций и определяет относительный вклад планарных диаграмм. Наилучшее описание данных достигается при  $\beta = 1.1 \pm 0.2$ , что согласуется с ранее полученной для других реакций величиной этого параметра.

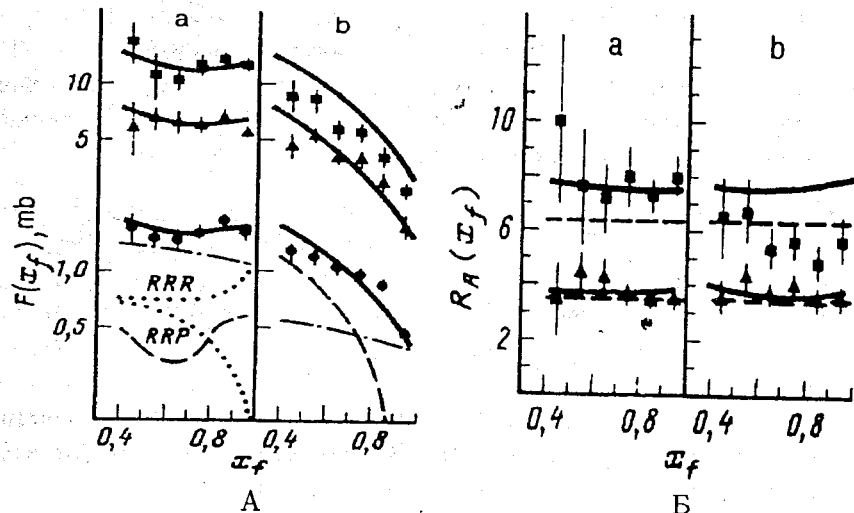


Рисунок 5: А) Сечения реакций (3) [a], (2) [b] и их модельное описание. Б) Отношения сечений процессов (3) [a], (2) [b] и их модельное описание. Пунктирные кривые – расчет в приближении Глаубера-Ситенко.

В результате проведенного анализа впервые описаны сечения  $F(x_f)$  исследованных процессов  $K^+ + A \rightarrow K^0, K^*(892)^0 + X$  (рис. 5А), их отношения (рис. 5Б) и установлено, что вклад в сечения планарных диаграмм превышает вклад цилиндрических при энергиях  $\simeq 10$  ГэВ.

Автором зарегистрирован рост отношений сечений для реакций  $K^+ + A \rightarrow K^*(892)^0 + X$  и  $K^+ + A \rightarrow K^0 + X$  на одинаковых ядрах при  $x_f \rightarrow 1$ , который в диссертации объяснен поведением сечений образования  $K^*(892)^0$ - и  $K^0$ -мезонов в результате распада дифракционных систем и резонансов, соответственно, и прекрасно описывается в рамках модели.

В четвертой главе описан калориметрический комплекс эксперимента АТЛАС (рис. 6) и требования, предъявляемые к калориметрии физическими задачами по поиску хиггсовских бозонов и структуры кварков, прецизионному измерению массы t-кварка и другими.

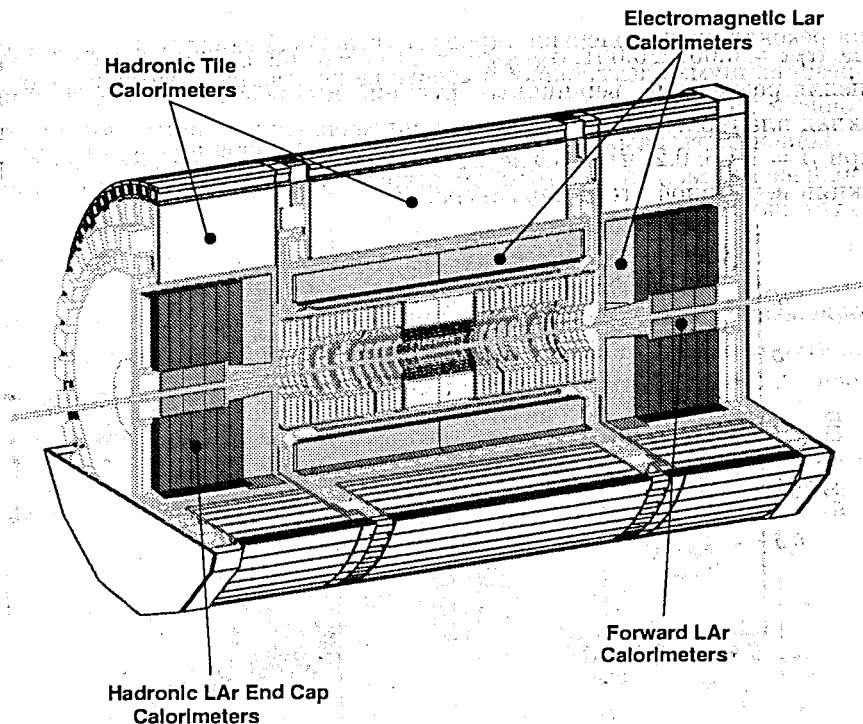


Рисунок 6: Калориметрический комплекс эксперимента АТЛАС.

Автором предложено обобщение “benchmark” метода реконструкции энергии адронов в комбинированном калориметре для калориметрического комплекса эксперимента АТЛАС [12]:

$$E_{rec} = \sum [\alpha_i E_h^i + \beta_i E_{em}^i + \gamma_i (E_{em}^i)^2 + \delta_i \sqrt{E_{em3}^i E_{h1}^i}] + \kappa E_{ITC} + \lambda E_{scint}, \quad (7)$$

где  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i, \kappa, \lambda$  – параметры;  $E_h^i, E_{em}^i, E_{ITC}, E_{scint}$  – сигналы от различных частей калориметрического комплекса,  $i$  – центральный и торцевые калориметры.

С использованием этого метода, на данных моделирования, для одиночных заряженных адронов в широком диапазоне энергий, от 20 до 1000 ГэВ, и псевдобыстрот, до 3, получены первые наиболее полные сведения об энергетическом разрешении и линейности калориметрического комплекса эксперимента АТЛАС. Определен радиус конуса

$$\Delta R = \sqrt{\Delta^2 \eta + \Delta^2 \phi} \quad (8)$$

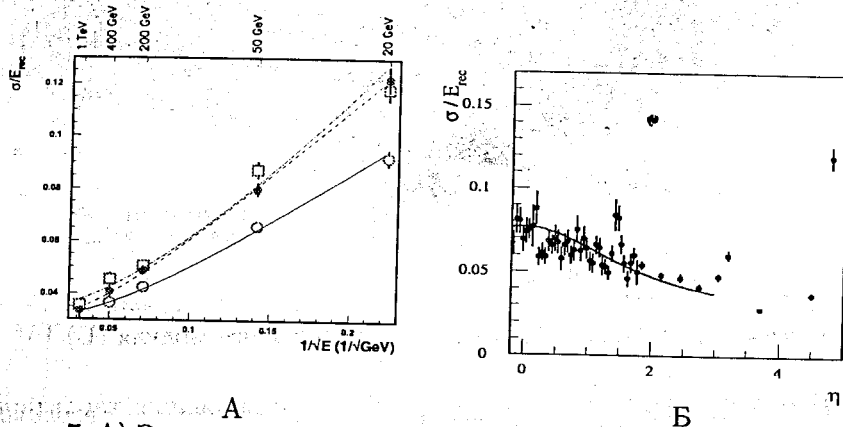


для реконструкции энергии адрона, который составил 0,3, а критерий обрезания шума электроники в ячейке калориметра оптимизирован на уровне  $\geq 2\sigma_{noise}$ .

Зависимость разрешения от энергии для пионов при  $\eta = 0,3$  представлена на рис. 7А, на котором штрих-пунктирная кривая соответствует разрешению

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{50\%}{\sqrt{E}} \oplus 3,4\% \oplus \frac{1}{E} \quad (9)$$

и описывает данные, полученные при реконструкции энергии адронов в конусе с радиусом  $\Delta R = 0,3$  и подавлении шума электроники на уровне  $\geq 2\sigma_{noise}$  в каждой ячейке калориметрического комплекса.



А

Б

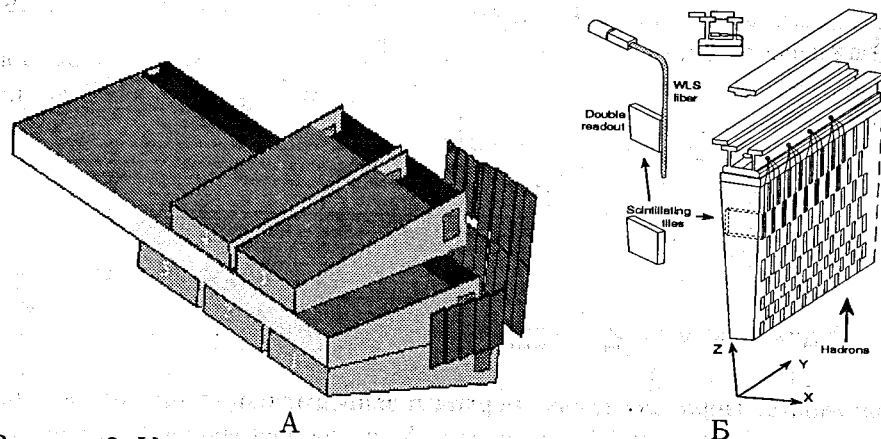
Рисунок 7: А) Энергетическое разрешение для адронов при  $\eta = 0,3$ . Б) Энергетическое разрешение для адронов с  $E_T = 50$  ГэВ.

Исследовано энергетическое разрешение и линейность для адронов с постоянными поперечными энергиями 20 и 50 ГэВ в диапазоне псевдобыстрот от  $-0,2$  до 3. На рис. 7Б представлено разрешение калориметра для пионов с  $E_T = 50$  ГэВ, где линия соответствует разрешению

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{50\%}{\sqrt{E}} \oplus 3\% \quad (10)$$

Наблюдаемое ухудшение в  $\simeq 1,5$  раза энергетического разрешения в области  $\eta = 1,3$  связано с потерей энергии адронного ливня в "мертвом" веществе между центральной и периферийной частями калориметрического комплекса. Отклонение от номинальной энергии в зависимости от энергии и псевдобыстроты находится в пределах  $\pm 2\%$ .

В итоге выполненного нами исследования получен результат принципиального значения: показано, что для одиночных заряженных адронов с энергией до 1 ТэВ калориметрический комплекс установки АТЛАС в области  $|\eta| < 3$  соответствует физическим требованиям эксперимента. Полученные нами сведения оценены коллаборацией как существенные и вошли в ее базовый документ<sup>9)</sup>.



А

Б

Рисунок 8: Установка для исследования "модуля-0" адронного tile калориметра (А) и схематическое изображение этого модуля (Б).

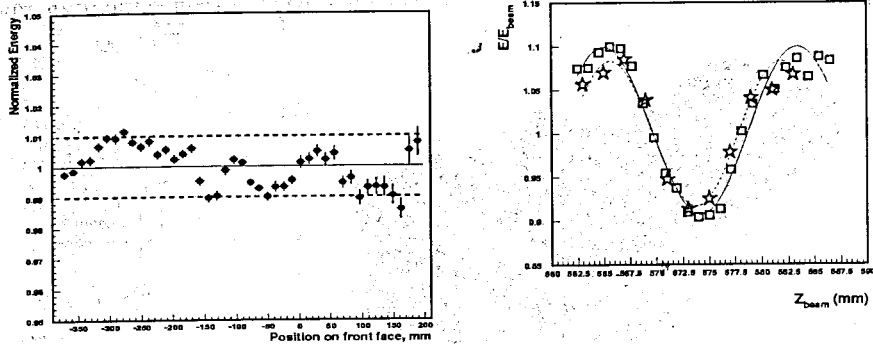
В пятой главе приведены результаты исследования характеристик адронного tile калориметра эксперимента АТЛАС при облучении в пучках электронов и пионов с энергиями от 10 до 300 ГэВ на ускорителе СПС ЦЕРН (рис. 8А) [13]. На рис. 8Б изображен концептуальный вид модуля железосцинтилляционного адронного tile калориметра с продольным расположением детектирующих элементов [14].

Нами исследовано ранее неизвестное влияние на энергетическое разрешение и линейность адронного калориметра продольной и поперечной утечки адронного ливня за его пределы [15]. Показано, что доля теряемой энергии составляет 1,8 ГэВ для пионов с энергией 100 ГэВ. Автором обнаружен новый эффект, выражающийся в улучшении энергетического разрешения калориметра при боковой утечке адронного ливня (6% утечки энергии приводит к 18% улучшению разрешения по энергии), что дало толчок к развитию нового метода реконструкции

<sup>9)</sup> A.Airapetian, ..., Y.Kulchitsky et al., ATLAS Detector and Physics Performance Technical Design Report, CERN/LHCC/99-14, 1999.

энергии в адронных калориметрах<sup>10)</sup>

С использованием специального "сканирования" пучком  $\pi$ -мезонов вдоль продольной оси калориметра исследована однородность его отклика. Автором получена рекордная для tile калориметра линейность  $RMS = 0,7\%$  вдоль продольной оси (рис. 9А). Отклонение средней энергии от номинальной стало меньше в 2 раза, чем было ранее.



А

Б

Рисунок 9: Нормированная энергия в зависимости от продольной координаты калориметра для пионов (А) и для электронов (Б), где экспериментальные данные –  $\square$ , модельный расчет –  $\star$ .

Автором разработан и применен метод реконструкции энергии электронов, учитывающий структуру tile калориметра [16]. Объяснена синусоидальная зависимость измеренной энергии электрона от продольной координаты калориметра [17] (рис. 9Б), связанная с различным энерговыделением при попадании электрона в поглощающий и детектирующий материалы калориметра. Созданный метод позволил откалибровать энергетическую шкалу адронного калориметра, измерить его энергетическое разрешение для электронов, составившее

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{(33 \pm 2)\%}{\sqrt{E}} \oplus (1,0 \pm 0,5)\% \quad (11)$$

при  $\eta = -0,55$ , и с лучшей точностью определить величину важнейшей внутренней характеристики калориметра — некомпенсированности,

$$e/h = 1,36 \pm 0,01 \pm 0,01, \quad (12)$$

<sup>10)</sup> S.Tokar et al., ATLAS-TILECAL-2000-008, 2000, CERN, Geneva, Switzerland.

отражающей различие в отклике калориметра на электромагнитную и адронную составляющие адронного ливня.

Полученные в данной главе результаты оценены коллаборацией TILECAL как существенные и вошли в ее базовый документ [13].

**Шестая глава** посвящена исследованию пространственного развития адронного ливня в железо-сцинтилляционном tile калориметре (рис. 10) [18, 19]. Разработан и применен новый метод описания про-

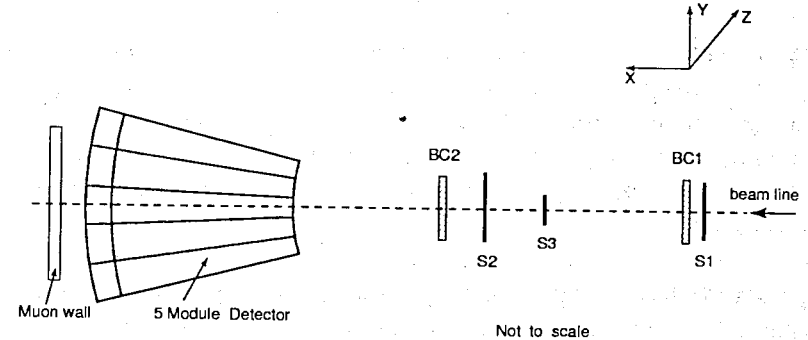


Рисунок 10: Установка для исследования прототипа tile калориметра.

странственного развития адронного ливня, основанный на полученных нами аналитических формулах. Для описания поперечного развития адронного ливня выведена формула для плотности энергии в зависимости от радиуса ливня

$$\Phi(r) = \frac{E_0}{2\pi B} \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{a_i}{\lambda_i} \cdot K_0\left(\frac{r}{\lambda_i}\right), \quad (13)$$

где  $K_0(r/\lambda_i)$  есть модифицированная функция Бесселя,  $E_0$ ,  $a_i$ ,  $\lambda_i$  являются параметрами,  $B = \sum_{i=1}^3 a_i \lambda_i$ ,  $\sum_{i=1}^3 a_i = 1$ . В этой формуле первое слагаемое соответствует электромагнитной составляющей адронного ливня, а второе и третье слагаемые — жесткой и мягкой адронным составляющим адронного ливня.

Для описания продольного развития адронного ливня от начала калориметра выведена формула [20]

$$dE(x)/dx = N \cdot \left( \left( \frac{wX_0}{a} \right) \left( \frac{x}{X_0} \right)^a \cdot e^{-\frac{bx}{X_0}} \cdot {}_1F_1\left(1, a+1, \left(b - \frac{X_0}{\lambda_I}\right) \frac{x}{X_0}\right) + \left( \frac{(1-w)\lambda_I}{a} \right) \left( \frac{x}{\lambda_I} \right)^a \cdot e^{-\frac{dx}{\lambda_I}} \cdot {}_1F_1\left(1, a+1, \frac{(d-1)x}{\lambda_I}\right) \right), \quad (14)$$

где  ${}_1F_1$  есть вырожденная гипергеометрическая функция,  $N$  – нормировка,  $a, b, d, w$  являются параметрами,  $X_0$  – радиационная длина и  $\lambda_I$  – ядерная длина взаимодействия.

В результате трехмерная параметризация пространственного развития адронного ливня выражается в виде

$$\Psi(x, r) = \frac{dE(x)}{dx} \cdot \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{a_i(x)}{\lambda_i(x)} \cdot K_0\left(\frac{r}{\lambda_i(x)}\right)}{2\pi \sum_{i=1}^3 a_i(x) \lambda_i(x)} \quad (15)$$

Определенная таким образом пространственная параметризация ливня внедряется автором с коллегами в алгоритм быстрого моделирования адронных ливней; она полезна для определения координат адронов, улучшения разделения ливней и для решения других calorиметрических задач, в которых требуется проведение интегрирования по объему calorиметра.

Поперечное развитие адронного ливня изучалось на специальной calorиметрической сборке (рис. 10) при облучении ее 100 ГэВ пионами под углом  $10^\circ$  в диапазоне  $z$  координат от  $-360$  до  $200$  мм.

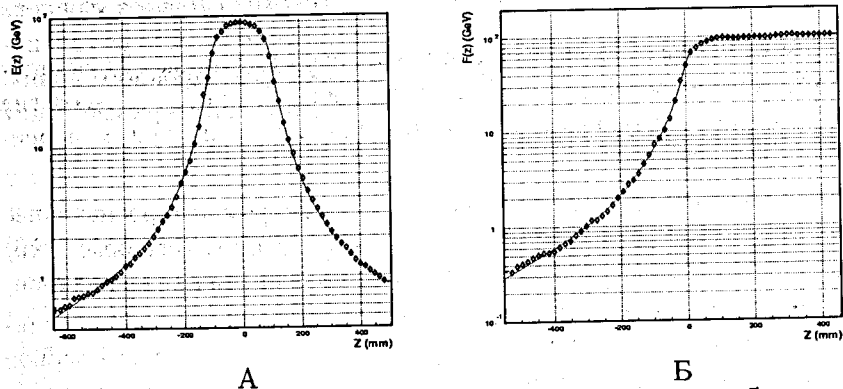


Рисунок 11: Зависимость поперечного энерговыделения в башне calorиметра,  $E(z)$ , (А) и кумулятивной функции,  $F(z)$ , (Б) для пионов с энергией 100 ГэВ от  $z$  координаты.

Получены экспериментальные распределения энерговыделения в башне calorиметра для четырех глубинных слоев и всего calorиметра (рис. 11А), описание которых функциями

$$E(z) = E_0 - \frac{E_0}{B} \cdot \sum_{i=1}^3 a_i \lambda_i \cosh\left(\frac{|z|}{\lambda_i}\right) e^{-\frac{h}{2\lambda_i}}, \quad \text{при } |z| \leq \frac{h}{2}, \quad (16)$$

$$E(z) = \frac{E_0}{B} \cdot \sum_{i=1}^3 a_i \lambda_i \sinh\left(\frac{h}{2\lambda_i}\right) e^{-\frac{|z|}{\lambda_i}}, \quad \text{при } |z| > \frac{h}{2}, \quad (17)$$

( $z$  – поперечная координата центра башни,  $h$  – поперечный размер башни) дало возможность определить параметры поперечного развития адронного ливня.

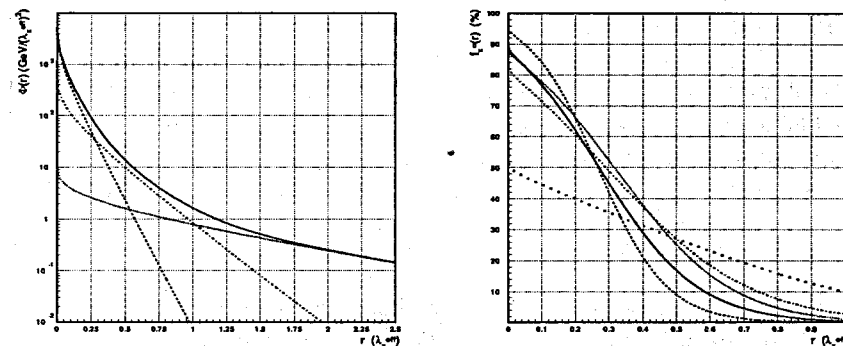


Рисунок 12: А) Зависимость радиальной плотности энергии адронного ливня (сплошная кривая) от радиуса. Б) Зависимость электромагнитной составляющей адронного ливня,  $f_{\pi^0}$ , от радиуса адронного ливня. Сплошная кривая – для всего calorиметра, остальные кривые – для его глубинных слоев.

Для описания поперечного профиля ливня автором построены ранее неиспользовавшиеся для адронных calorиметров кумулятивные энергетические распределения (рис. 11Б), аппроксимированные полученными нами функциями

$$F(z) = \frac{E_0}{2B} \cdot \sum_{i=1}^3 a_i \lambda_i e^{\frac{z}{\lambda_i}}, \quad \text{при } z \leq 0, \quad (18)$$

$$F(z) = E_0 - \frac{E_0}{2B} \cdot \sum_{i=1}^3 a_i \lambda_i e^{-\frac{z}{\lambda_i}}, \quad \text{при } z > 0, \quad (19)$$

где  $z$  – координата края башни вдоль поперечной оси. Данный способ позволяет измерить поперечный профиль адронного ливня независимо от ширины башни calorиметра.

В результате применения созданного метода для железо-сцинтилляционных калориметров получены, ранее неизвестные, данные о плотности энергии адронного ливня в зависимости от его радиуса,  $\Phi(r)$ , как для всего калориметра (рис. 12А), так и в зависимости от продольной координаты. Сравнение нашего результата с единственным известным измерением  $\Phi(r)$ , полученным другим методом для свинцово-сцинтилляционного калориметра, показало, что функции  $\Phi(r)$  имеют подобный вид, но не совпадают, так как калориметры существенно конструктивно различаются. На основе полученной информации определена электромагнитная составляющая адронного ливня,  $f_{\pi^0}(r)$ , получаемая в результате образования  $\pi^0$ -мезонов (рис. 12Б), и зависимость радиальных размеров адронного ливня от продольной координаты. Для 99% энерговыделения радиус адронного ливня составляет

$$r(99\%) = (349 \pm 7) + (22 \pm 2) \cdot x \text{ (мм)}. \quad (20)$$

Автором получены экспериментальные данные для продольного развития адронных ливней (рис. 13) при облучении установки (рис. 10) пучками пионов с энергиями от 20 до 300 ГэВ. Для сравнения на рис. 13

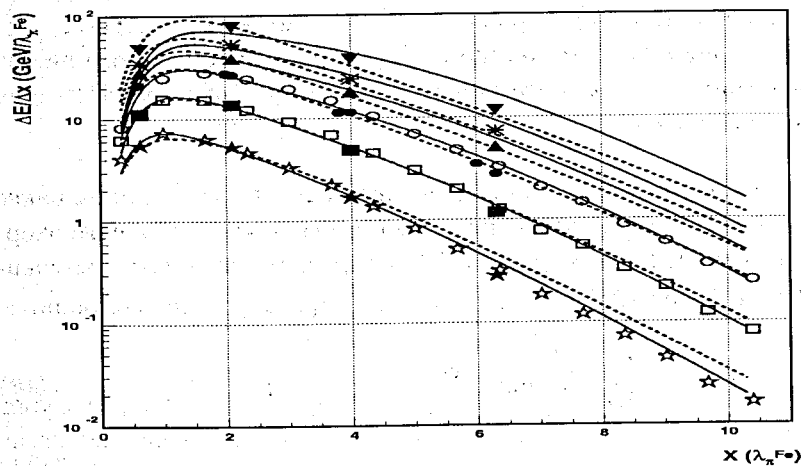


Рисунок 13: Продольные профили адронного ливня для пионов с энергиями 20 (★), 50 (■), 100 (●), 150 (▲), 200 (\*) и 300 (▼) ГэВ.

представлены результаты и для обычного железо-сцинтилляционного калориметра<sup>11)</sup> (20 ГэВ – ★, 50 ГэВ – □, 100 ГэВ – ○). Эксперимен-

<sup>11)</sup> E.Huges, Proceedings of the 1-st Int.Conf. on Calorimetry in HEP, FNAL, 1990.

тальные результаты описаны с использованием выведенной автором функции  $dE(x)/dx$  для продольного профиля адронного ливня от начала калориметра. Использование полученной нами функции  $\Phi(r)$  позволило порознь определить ранее неизвестное продольное развитие электромагнитной и адронной составляющих адронного ливня.

Полученные результаты существенно обогащают раздел “Адронный ливень” в энциклопедической труде<sup>12)</sup> о детекторах частиц.

В седьмой главе реализована программа по исследованию характеристик прототипа комбинированного калориметра эксперимента АТЛАС (рис. 14), состоящего из жидко-аргонного электромагнитного и железо-сцинтилляционного адронного калориметров, в пучках пионов и электронов с энергиями 10 – 300 ГэВ [21, 22].

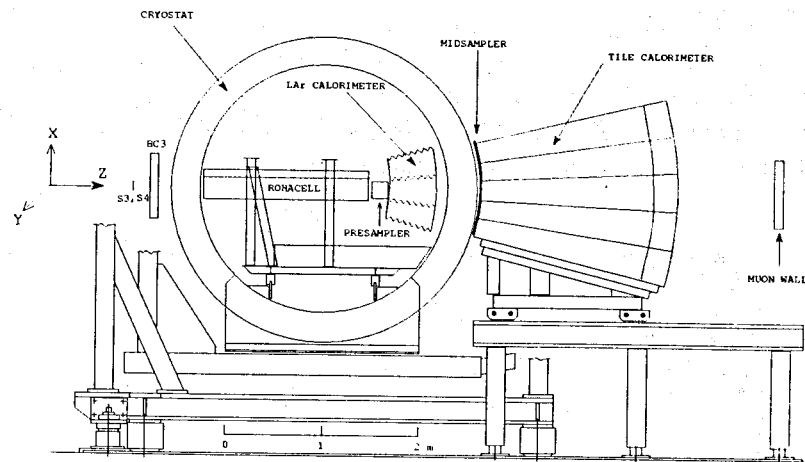


Рисунок 14: Установка для исследования характеристик комбинированного калориметра эксперимента АТЛАС.

Предложен и разработан беспараметрический метод определения энергии адронов в комбинированном калориметре [23], названный нами  $e/h$ -методом. Этот метод основан на учете нескомпенсированности электромагнитного и адронного калориметров, которые являются составными частями комбинированного калориметра. В методе принципиально не используется общепринятая методология, базирующаяся на минимизации соответствующего функционала. Он позволил впервые

<sup>12)</sup> R.K.Bock, A.Vasilescu, The Particle Detector BriefBook, Springer, Berlin, 1998.

получить несмещенные оценки величин энергии во всех сегментах комбинированного калориметра. Энергия определяется, как сумма энергий в электромагнитном и адронном калориметрах, а также энергии, теряемой в криостате между калориметрами:

$$E = \left( \frac{1}{e} \cdot \left( \frac{e}{\pi} \right) \cdot R \right)_{em} + E_{dm} + \left( \frac{1}{e} \cdot \left( \frac{e}{\pi} \right) \cdot R \right)_h, \quad (21)$$

где  $R_{em}$  ( $R_h$ ) – отклик электромагнитной (адронной) частей комбинированного калориметра,  $e_{em}$  и  $e_h$  – нормировочные константы и

$$\frac{e}{\pi} = \frac{\frac{e}{h}}{1 + \left( \frac{e}{h} - 1 \right) \cdot k \cdot \ln E} \quad (22)$$

На рис. 15А представлена зависимость отношения средней энергии пионов, нормированной к энергии пучка, от номинальной энергии. В рамках  $e/h$ -метода получена рекордная  $\pm 1\%$  линейность относительно среднего значения  $0.995 \pm 0.003$  в интервале энергий 20 – 300 ГэВ [24]. При 10 ГэВ фон от пучковых мюонов приводит к большему отклоне-

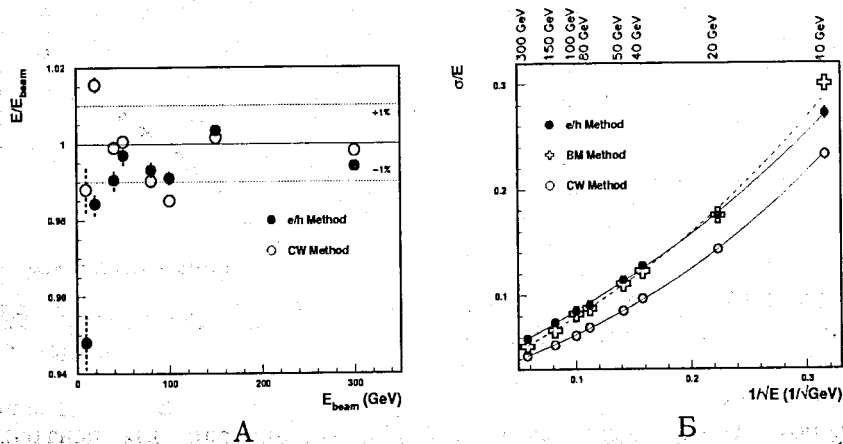


Рисунок 15: А) Энергетическая линейность для (●)  $e/h$ -метода и (○) весового “Cell Weighting” (CW) метода. Б) Энергетическое разрешение для (●)  $e/h$ , (⊠) “benchmark” (BM) и (○) весового (CW) методов.

нию от номинальной энергии. Измеренная  $e/h$ -методом энергетическая линейность комбинированного калориметра существенно лучше, чем результат, полученный много параметрическим весовым методом.

Достижение наилучшей энергетической линейности калориметрического комплекса АТЛАС принципиально важно для исследования структуры кварков, точного измерения массы  $t$ -кварка и  $W$ -бозона.

На рис. 15Б представлены зависимости относительного энергетического разрешения от  $1/\sqrt{E}$ , полученные  $e/h$ -методом, “benchmark” методом и весовым методом, являющимся наиболее сложным и точным. Для  $e/h$ -метода относительное разрешение  $\sigma/E$  составляет  $[(58 \pm 3)\%/\sqrt{E} + (2,5 \pm 0,3)\%] \oplus (1,7 \pm 0,2)/E$ , что согласуется с результатом “benchmark” метода и несколько больше, чем для весового метода [22].

Возможность при хорошем энергетическом разрешении с рекордной линейностью определить энергетическую шкалу комбинированного калориметра и простота расчета позволяют внедрить разработанный  $e/h$ -метод для отбора событий на уровне триггера в экспериментах, с масштабным использованием калориметрии, на Большом адронном коллайдере, Теватроне и других современных ускорителях. Метод уже применен для реконструкции энергии адронных струй<sup>13)</sup>, полученных в результате моделирования.

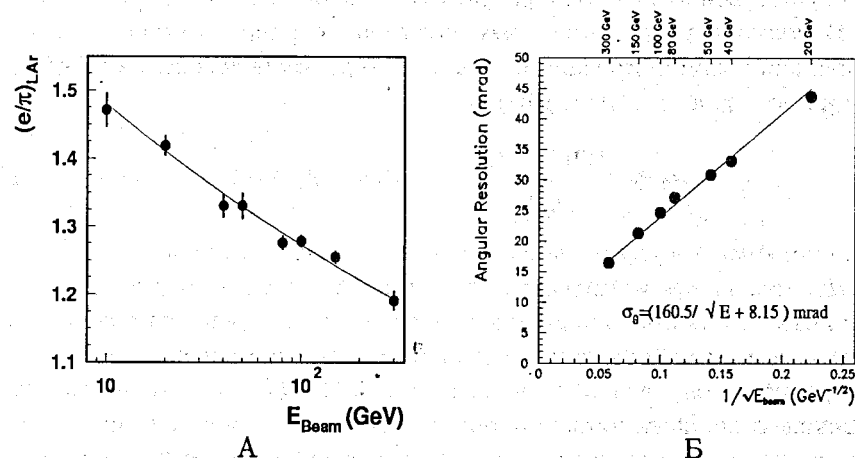


Рисунок 16: А) Зависимость  $(e/\pi)_{LAR}$  от энергии для центрального жидко-аргонного электромагнитного калориметра эксперимента АТЛАС. Б) Зависимость разрешения комбинированного калориметра эксперимента АТЛАС для полярного угла от  $1/\sqrt{E}$ .

Разработан метод измерения нескомпенсированности электромаг-

<sup>13)</sup> T.Davidek, ATLAS-TILECAL-2000-10, CERN, Geneva, Switzerland.

нитного калориметра, существенной части комбинированного калориметра [25]. Электромагнитные калориметры имеют толщину  $\sim \lambda_I$ , что не позволяет определить энергию адрона из-за большой продольной утечки адронного ливня. Идея метода заключается в измерении непосредственно отношения  $e/\pi$  с использованием зависимости

$$\left(\frac{e}{\pi}\right)_{em} = \frac{E_{beam} - E_{dm} - E_h}{(R/e)_{em}} \quad (23)$$

в пучке адронов. Ранее корректных методов для нахождения нескомпенсированности электромагнитного калориметра не существовало. Величина  $e/h$  определена в результате аппроксимации  $(e/\pi)_{em}$  (рис. 16А) функцией (22). Таким образом, экспериментально измерена нескомпенсированность центрального жидко-аргонного электромагнитного калориметра эксперимента АТЛАС, составляющая

$$e/h = 1,74 \pm 0,04 \pm 0,04, \quad (24)$$

что существенно уточняет результат моделирования<sup>14)</sup>,  $e/h > 1,66$ .

В полтора раза точнее, чем полученное ранее, измерено угловое разрешение комбинированного калориметра эксперимента АТЛАС для полярного угла [22] (рис. 16Б)

$$\sigma_\theta = \frac{(160.5 \pm 1.5)}{\sqrt{E}} + (8.2 \pm 0.2) \text{ (мрад)}, \quad (25)$$

что существенно улучшит разделение адронных ливней.

На рис. 17 представлены полученные автором экспериментальные результаты для продольной плотности энергии адронного ливня в комбинированном калориметре. Энергия в каждом продольном сегменте калориметра определялась в рамках  $e/h$ -метода, что не приводит к ее искажению. Электромагнитная и адронная части комбинированного калориметра имеют различную нескомпенсированность, что делает описание продольного профиля нетривиальным. Автором предложен и реализован метод описания продольной плотности энергии адронного ливня в комбинированном калориметре [26], основанный на учете нескомпенсированности его частей. На рис. 17 представлены результаты применения этого метода для комбинированного калориметра АТЛАС. Получено хорошее согласие с экспериментальными результатами.

<sup>14)</sup> R.Wigmans, Proc. 2nd Int. Conf. on Calorimetry in HEP, Capri, 1991.

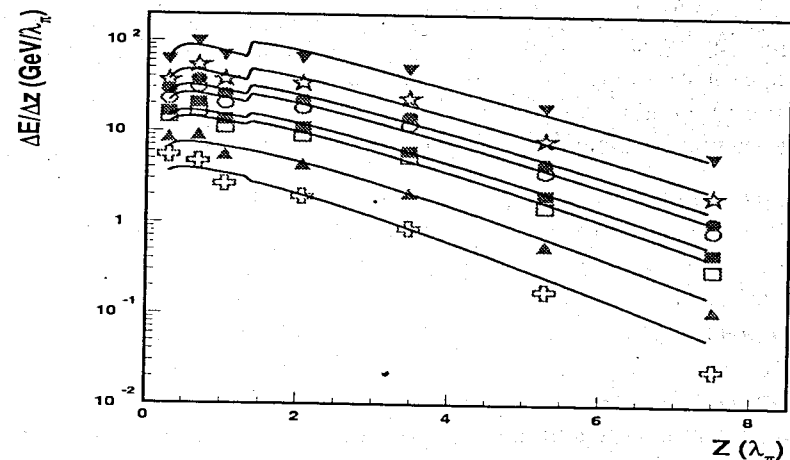


Рисунок 17: Продольные профили адронного ливня для пионов в комбинированном калориметре эксперимента АТЛАС (10 ГэВ - ✕, 20 ГэВ - ▲, 40 ГэВ - □, 50 ГэВ - ■, 80 ГэВ - ○, 100 ГэВ - ●, 150 ГэВ - ☆, 300 ГэВ - ▼). Сплошные кривые рассчитаны в рамках нового метода.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертации:

1. Впервые измерены дифференциальные сечения  $F(x_f)$  инклюзивных процессов  $\pi^+ + Be, Cu \rightarrow K_s^0 + X$  при  $x_f > 0,4$ . Исследование проведено при 11,2 ГэВ. Эти данные и по настоящее время остаются единственными. Обнаруженный при  $x_f \rightarrow 1$  рост отношений сечений инклюзивного образования  $K_s^0$ -мезонов в  $K^+A$ - и  $\pi^+A$ -взаимодействиях объясняется различием в поведении функций фрагментации валентного и морского  $s$ -кварков.
2. Столь же единственными остаются наши измерения дваждыдифференциальных сечений реакций  $K^+ + Be, Cu, Pb \rightarrow K^0, K^0(892)^* + X$ . Измерение проведено при 11,2 ГэВ в области фрагментации пучкового каона. Изучена их  $A$ -зависимость от кинематических переменных  $x_f, p_t$ . Величины параметра  $\alpha$ , полученные при аппроксимации сечений зависимостью  $\sim A^{\alpha(x_f, p_t)}$ , не зависят от кинематических переменных и на  $\simeq 15\%$  больше для реакций  $K^+ + A \rightarrow K^0(892)^* + X$ .
3. Дваждыдифференциальные сечения реакций  $K^+ + A \rightarrow K^0 + X$  описаны в рамках модели кварк-глюонных струн, что делает обоснованным расширение применимости модели для области энергий  $< 100$  ГэВ. Дифференциальные сечения процессов  $K^+ + A \rightarrow K^0, K^*(892)^0 +$

X находятся в хорошем согласии с результатами расчетов в рамках кварк-глюонной модели, учитывающей эффекты “экранирования цвета” и длины формирования адронов, что свидетельствует в пользу рассмотренной картины адронизации лидирующего  $\bar{s}$ -кварка. Установлено отношение вкладов в измеренные сечения планарных RRR и цилиндрических RRP диаграмм, составившее  $1.1 \pm 0.2$ .

4. Методом моделирования для одиночных заряженных адронов с энергией до 1 ТэВ и  $|\eta| < 3$  показано, что калориметрический комплекс АТЛАС соответствует требованиям эксперимента для энергетического разрешения,  $\sigma/E = 50\%/\sqrt{E} \oplus 3\%$ , и линейности,  $\pm 2\%$ .

5. Для адронного tile калориметра получена рекордная  $\pm 0,7\%$  энергетическая линейность вдоль его поперечной оси и обнаружен эффект улучшения энергетического разрешения при боковой утечке ливня. Для комбинированного калориметра АТЛАС в 1,5 раза улучшено угловое разрешение и описаны продольные профили адронного ливня.

6. Предложен и реализован метод трехмерной параметризации адронного ливня в адронном калориметре. Метод позволяет решать задачи калориметрии, связанные с интегрированием по объему. Для железно-сцинтилляционного калориметра впервые измерена радиальная плотность энергии адронного ливня, необходимая для быстрого моделирования. Измерение проведено в широком диапазоне по поперечной координате, до  $\simeq 2,5\lambda_I$ , и в зависимости от продольной координаты.

7. Создан и применен новый беспараметрический метод определения энергии адронов в комбинированном калориметре, учитывающий некомпенсированность его частей. В результате достигнута рекордная  $\pm 1\%$  линейность в восстановленной энергии. Быстрота и точность расчета позволяет использовать данный метод в триггере и решать задачи калориметрии без искажения энергии в сегментах калориметра.

8. Предложен и реализован не имеющий аналогов метод измерения некомпенсированности электромагнитного калориметра. Измерена некомпенсированность центрального жидко-аргонного электромагнитного калориметра эксперимента АТЛАС,  $e/h = 1,74 \pm 0,04 \pm 0,04$ . На основе созданного и примененного метода измерения энергии электронов в адронном tile калориметре с лучшей точностью определена его некомпенсированность  $e/h = 1,36 \pm 0,01 \pm 0,01$ .

#### Основные результаты опубликованы в работах:

[1] Antyukhov V.A., ..., Kulchitsky Y.A. et. al.; HYPERON Spectrometer, Instrum. Exp. Tech., 28 (1985) 1021-1030.

- [2] Кульчицкий Ю.А. и др.; Моделирование процессов инклюзивного образования нейтральных каонов на установке Гиперон; ОИЯИ-Р10-90-392, 10 с., 1990.
- [3] Виноградов В.Б., Кульчицкий Ю.А. и др.; Алгоритм распознавания многотрековых событий на установке Гиперон; ОИЯИ-Р10-85-704, 16 с., 1985.
- [4] Виноградов В.Б., Кульчицкий Ю.А. и др.; Эффективность регистрации событий на установке Гиперон в эксперименте по изучению инклюзивного рождения странных псевдоскалярных и векторных мезонов; ОИЯИ-Р10-90-230, 14 с., 1990.
- [5] Виноградов В., Кульчицкий Ю. и др.; Анализ информации с установки Гиперон в эксперименте по исследованию инклюзивного образования  $K^0$  и  $K_{892}^{*0}$ -мезонов; ОИЯИ-Р10-90-83, 14 с., 1990.
- [6] Akimenko S.A., ..., Kulchitsky Y.A. et. al.; Study of Inclusive  $K_s^0$  Mesons Production in  $\pi^+A$  and  $K^+A$  Interactions at 11,2 GeV, Physics of Atomic Nuclei, 56 (5) 1993, 619-623.
- [7] Akimenko S.A., ..., Kulchitsky Y.A. et. al.; Investigation of Inclusive Production of  $K^0$  and  $K^*(892)^0$  Mesons in  $K^+A$  Interactions at 11,2 GeV; Zeitschrift fur Physik C, 56 (1992) 537-546.
- [8] Akimenko S.A., ..., Kulchitsky Y.A. et. al.; Study of Inclusive Production of  $K^0$  mesons in  $K^+A$  interactions at 11,2 GeV, Soviet Journal of Nuclear Physics, 53 (2) 1991, 267-273.
- [9] Amelin N.S., ..., Kulchitsky Y.A. et. al.; Analysis of the Processes  $K^+ + A \rightarrow K^0 + X$  in the Quark-Gluon String Model, Soviet Journal of Nuclear Physics, 53 (5) 1991, 859-863.
- [10] Akimenko S.A., ..., Kulchitsky Y.A. et. al.; Inclusive Production of  $K^*(892)^0$  Mesons in  $K^+A$  Interactions at 11,2 GeV, Soviet Journal of Nuclear Physics, 52 (5) 1990, 884-889.
- [11] Kulchitsky Y.A.; Hadronization of the Leading  $\bar{s}$ -quark in Inclusive Production of  $K^*(892)^0$  and  $K^0$  Mesons on Nuclei, Soviet Journal of Nuclear Physics, 53 (3) 1991, 498-502.
- [12] Kulchitsky Y.A.; ATLAS Calorimeter Performance for Charged Pion; Particles and Nuclei, Letters, 2 (2000) 52-61, Dubna, Russia.
- [13] Berger E., ..., Kulchitsky Y.A. et. al.; ATLAS Tile Calorimeter TDR; CERN/LHCC/96-42, 1996, 332 p., Geneva.
- [14] Budagov J.A., Kulchitsky Y.A. et. al.; ATLAS Barrel Hadron Calorimeter Module Design; JINR-E13-95-20, 18 p., 1995.

- [15] Budagov J.A., Kulchitsky Y.A. et al.; Experimental Study of the Effect of Hadron Shower Leakage on the Energy Response and Resolution of ATLAS Hadron Barrel Prototype Calorimeter; JINR-E1-96-180, 25 p., 1996.
- [16] Kulchitsky Y.A., Vinogradov V.B.; Non-Compensation of the ATLAS Barrel Tile Module-0 Calorimeter; JINR-E1-99-12, 32 p., 1999.
- [17] Budagov J.A., Kulchitsky Y.A. et al.; Electron Response and  $e/h$  Ratio of ATLAS Barrel Hadron Prototype Calorimeter; JINR-E1-95-513, 26 p., 1995.
- [18] Amaral P., ..., Kulchitsky Y. et al.; Hadronic Shower Development in Iron-scintillator Tile Calorimetry; NIM A443 (2000) 51-70.  
Budagov J., Kulchitsky Y. et al.; Study of the Hadron Shower Profiles with the ATLAS Hadron Calorimeter; JINR-E1-97-318, 27 p., 1997.
- [19] Kulchitsky Y.A., Hadronic Shower Development in Tile Iron-scintillator Calorimetry; Proceeding of the VIII International Conference on Calorimetry in High Energy Physics, 13-19 June 1999, Lisbon, Portugal; World Scientific (2000) 481-490.
- [20] Kulchitsky Y., Vinogradov V.; Analytical Representation of a Longitudinal Hadronic Shower Development; NIM A413 (1998) 484-486.
- [21] Ajaltouni Z., ..., Kulchitsky Y.A. et al.; Results from a Combined Test of an Electromagnetic Liquid Argon Calorimeter with a Hadronic Scintillating Tile Calorimeter; NIM A387 (1997) 333-351.
- [22] Akhmadaliev S., ..., Kulchitsky Y. et al.; Results from a New Combined Test of an Electromagnetic Liquid Argon Calorimeter with a Hadronic Scintillating Tile Calorimeter; NIM A449 (2000) 461-477.
- [23] Kulchitsky Y.A.; Hadron Energy Reconstruction for ATLAS Barrel Combined Calorimeter, Proceedings of IX International Conference on Calorimetry in Particle Physics; 9-14 October 2000, Annecy, France; INFN, Frascati Physics Series; JINR-E1-2000-260, 10 p., 2000.
- [24] Akhmadaliev S., ..., Kulchitsky Y.A. et al.; Hadron Energy Reconstruction for the ATLAS Calorimetry in the Framework of the Non-parametrical Method, NIM A, 2001 (in press).  
Kulchitsky Y.A. et al.; JINR-E1-2000-73, 23 p., 2000.
- [25] Kulchitsky Y.A.; On the  $e/h$  Ratio of the Electromagnetic Calorimeter; Particles and Nuclei, Letters, 3 (2000) 28-34, Dubna.
- [26] Kulchitsky Y.A., Vinogradov V.B.; On the Parameterization of the Longitudinal Hadronic Shower Profiles in Combined Calorimetry; NIM A455 (2000) 499-501.

Рукопись поступила в издательский отдел

29 мая 2001 года.