

## ИЗМЕРЕНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ АДРОННЫХ ЛИВНЕЙ ДО 20 ЯДЕРНЫХ ДЛИН ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Г.Г. АКОПЯН, М.О. СИМОНЯН

Ереванский физический институт

(Поступила в редакцию 4 мая 2007 г.)

Продольные профили  $\pi$ -мезонных и протонных ливней измерены до 20 ядерных длин взаимодействия в железно-сцинтилляционном адронном Tile калориметре проекта ATLAS на пучках ускорителя Super Proton Synchrotron (SPS) в Европейской Организации Ядерных Исследований (CERN) при энергиях 20–180 ГэВ. Проведен сравнительный анализ продольных профилей  $\pi$ -мезонных и протонных ливней. Экспериментальные данные параметризованы аналитически и сравнены с результатами Монте-Карло моделирования.

### 1. Введение

Адронные калориметры призваны играть важную роль в измерении энергий и направлений адронных струй в коллайдерных экспериментах. Их практически полная герметичность позволяет к тому же реконструировать поперечную составляющую энергии и, соответственно, восстанавливать кинематические параметры частиц, избежавших регистрации в детекторе. Детальное исследование отклика калориметров на адроны необходимо для разработки наилучшей стратегии энергетической калибровки. Это особенно важно для некомпенсированных калориметров, имеющих разные отклики на электромагнитную и адронную составляющие ливня. Качество Монте-Карло моделирования основано на существующих экспериментальных данных и модельных представлениях о механизмах, описывающих развитие адронных ливней. Сравнение результатов моделирования с данными новых измерений на тестовых пучках весьма важно для развития и проверки достоверности моделирования.

В настоящей работе представлены экспериментальные данные по продольным профилям  $\pi$ -мезонных и протонных ливней, полученным в специальной конфигурации тестируемых модулей адронного калориметра, при которой глубина калориметра превосходила 20 ядерных длин взаимодействия ( $\lambda = 20.55$  см для TileCal). С учетом того, что уровень продольной сегментации составлял при этом примерно 1  $\lambda$ , а поперечная герметичность свыше 99%, отмеченная конфигурация представляла уникальную возможность для прецизионных измерений. До выполнения настоящей работы существовали данные измерения только  $\pi$ -мезонных ливней в глубину до 13 $\lambda$ . Здесь представлены первые результаты измерений продольных профилей протонных ливней и дано их сравнение с  $\pi$ -

мезонными. Результаты измерений параметризованы аналитически, что позволяет рассчитать как среднее энерговыделение на любой глубине калориметра, так и величину продольной утечки энергии.

## 2. Экспериментальный метод, отбор событий

Схема эксперимента на выводе H8 ускорителя SPS, показана на рис.1. Тестовая конфигурация адронного калориметра представляла собой трехслойную сборку из двух модулей длиной 5.64 м внизу и в центре, и двух модулей длиной 2.93 м вверху. Каждый из калориметрических модулей представляет собой железно-сцинтилляционный сэндвич с периодом повторения 18 мм, с содержанием железа 14 мм. Детальное описание калориметра дано в работах [1,2].



Рис.1. Схема экспериментальной установки.

Вторичный пучок, представляющий собой смесь позитронов,  $\mu$ -мезонов,  $\pi$ -мезонов и протонов, проходил через систему триггерных счетчиков S1–S4, проволочных камер WPC1–4, порогового газового черенковского счетчика C1 и попадал в среднюю часть центрального модуля. Апертура пучка контролировалась по координатам частиц на проволочных камерах и события, не попавшие в ядро пучка, отсекались. Для режекции событий из сгустков двух и более заряженных частиц энерговыделение в счетчиках S1–S4 контролировалось порогом в соответствии с величиной одночастичных ионизационных потерь. Генерация случайных триггеров в промежутке между выводами пучка позволяла определить спектр шумов от фотодетекторов и электроники.

В эксперименте  $\mu$ -мезоны, теряющие энергию в основном на ионизацию, отделялись от электронов и адронов по малости их энерговыделения в секциях калориметра. Отделение электронной составляющей пучка от адронной производилось по признаку средней плотности энерговыделения [3], использующего сравнительную компактность электромагнитного ливня по сравнению с адронным. Протоны и  $\pi$ -мезоны идентифицировались и разделялись по амплитуде сигнала в газовом черенковском счетчике.

## 3. Монте-Карло моделирование

Процессы регистрации частиц в калориметре моделировались в рамках платформы ATHENA (версия 12.0.2), специально разработанной для проекта ATLAS с использованием пакета GEANT4 (версия geant4-07-01) [4]. Совокупность моделей, описывающих взаимодействие всех частиц от термальных энергий до 14 ТэВ, формирует т.н. физический список в терминологии GEANT4. Существует несколько физических списков в GEANT4 и,

как будет показано ниже, их предсказания различаются. Наиболее часто в калориметрических приложениях используются физические списки LHEP (Low- and High-Energy Parameterized) и QGSP (Quark-Gluon-String Precompound). Первый из них базируется на модельно зависимых параметризациях существующих экспериментальных данных и их экстраполяции. Второй список, чисто теоретический, основан на струнной модели и применим для описания взаимодействия адронов с энергиями свыше 25 ГэВ. Ниже этой энергии используется опять же модель LEP (Low-Energy Parameterized).

Моделирование в настоящей работе использовалось для многих целей: во-первых, в методике эксперимента, а также для проверки качества идентификации и разделения частиц, для получения оценок на соответствующие величины систематических ошибок. При выработке надежного критерия идентификации редких событий с большими энергетическими потерями  $\mu$ -мезонов, полномасштабно моделировались процессы взаимодействия  $\mu$ -мезонов для их отделения от малоэнергичных хвостов адронных ливней.

Моделирование отклика детектора включало имитацию эффекта насыщения световыделения в сцинтилляторах согласно закону Бирка, фотоэлектронную статистику и шумы электроники, которые были определены экспериментально и добавлены некогерентно к результатам моделирования.

#### **4. Продольные профили адронных ливней**

Обработка данных для получения продольных профилей проводилась следующим образом: 1) определялись средние значения энергетических потерь в каждой ячейке с вычетом средних значений шумов, полученных в измерениях без пучка; 2) полученный профиль нормировался на полную измеренную энергию. Экспериментальные данные по продольным профилям для протонов и  $\pi$ -мезонов показаны для разных энергий на рис.2. Как видно из рисунка, для обоих типов адронных ливней характерен быстрый сброс энергии, который достигает максимального значения в пределах первых ядерных длин взаимодействия. Далее наблюдается экспоненциальный спад потерь, который достигает примерно пяти порядков по величине на глубине 15 $\lambda$ . Ливни распространяются глубже с ростом энергии адронов. Данные простираются в глубину до 20 $\lambda$ , где средние энергии в ячейках становятся сравнимыми с фоном, формируемым в основном флуктуациями шумов.

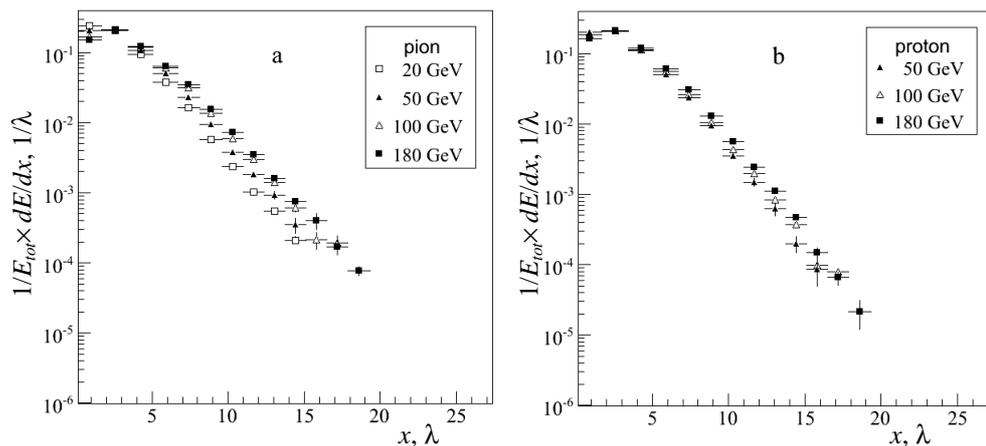


Рис.2. Продольный профиль пионных (а) и протонных (б) ливней.

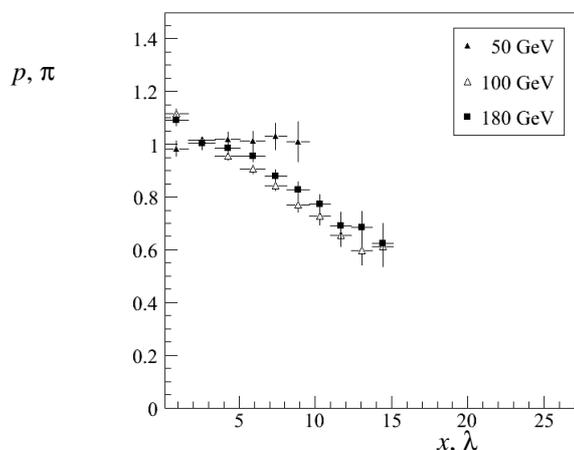


Рис.3. Отношение продольных профилей протонных и пионных ливней.

Отношение профилей протонных и  $\pi$ -мезонных ливней показано на рис.3. Так как статистические неопределенности профилей возрастают с глубиной, то отношения представлены в ограниченной области глубин, зависящих от первичной энергии адронов. Как видно из рисунка, при энергии 50 ГэВ отношение практически постоянно до глубины примерно  $10\lambda$  и близко к 1 с приемлемой статистической достоверностью. Однако при более высоких энергиях адронов отношение падает с ростом глубины, что может быть объяснено большим сечением взаимодействия протонов с ядром железа. Благодаря этому,  $\pi$ -мезонные ливни в среднем начинаются позже и, соответственно, простираются глубже. Наряду с этим, максимальные энергетические потери в начале  $\pi$ -мезонных ливней больше, чем у протонных, из-за большего их энерговыделения в секторе электромагнитных распадов, благодаря большому количеству нейтральных мезонов, инициирующих электромагнитные ливни. Эти два фактора – сечение взаимодействия и энергоотделение в электромагнитном секторе, приводящее к различиям в формировании протонных и  $\pi$ -мезонных ливней, компенсируются

при энергии 50 ГэВ.

### 5. Сравнение с результатами моделирования

Данные, полученные по профилям  $\pi$ -мезонных ливней, сравнены на рис.4 с результатами моделирования. Для удобства представлены отношения смоделированных профилей к экспериментальным. Как видно из рисунка, предсказания разных физических списков заметно различаются. Физический список LHEP достаточно хорошо, с 10%-ной точностью, описывает данные выше энергии 50 ГэВ. Однако при меньших энергиях моделируемые ливни значительно короче экспериментальных. Физический список QGSP предсказывает более короткие ливни в сравнении с данными во всем диапазоне энергий. Так, примерно на 50% меньше энерговыведения предсказывается на глубине  $10\lambda$ .

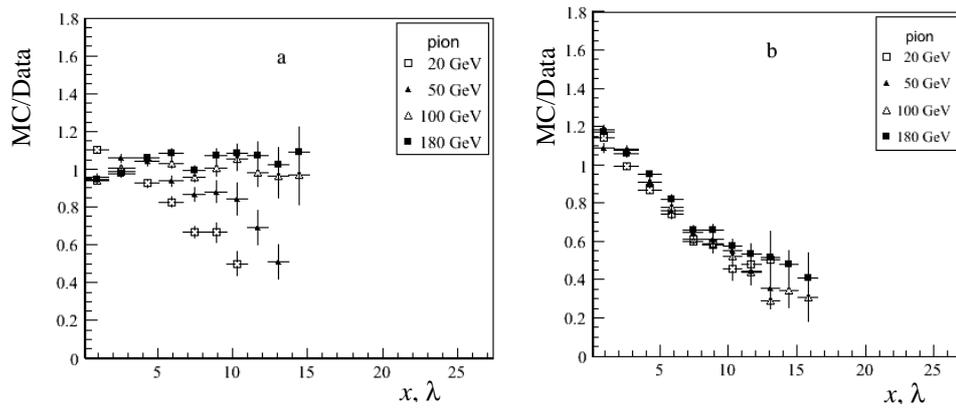


Рис.4. Отношение результатов моделирования с LHEP (a) и QGSP (b) продольных профилей пионных ливней к экспериментальным данным.

Для профилей протонных ливней можно сделать аналогичные заключения (они не представлены из-за ограниченности объема статьи). Однако в целом, описание протонных профилей заметно хуже, чем  $\pi$ -мезонных.

### 6. Аналитическое описание продольных профилей

Для аналитического описания продольных профилей ливня использовалось известное выражение [5]

$$\frac{dE}{dx} = N \left\{ \frac{wX_0}{a} \left( \frac{x}{X_0} \right)^a e^{-b\frac{x}{X_0}} {}_1F_1 \left( 1, 1+a, \left( b - \frac{X_0}{\lambda} \right) \frac{x}{X_0} \right) + \frac{(1-w)\lambda}{a} \left( \frac{x}{\lambda} \right)^a e^{-d\frac{x}{\lambda}} {}_1F_1 \left( 1, 1+a, (d-1)\frac{x}{\lambda} \right) \right\},$$

где  $X_0$  и  $\lambda$  – соответственно, радиационная и ядерная длины взаимодействия,  $a$ ,  $b$ ,  $d$  и  $w$  являются свободными энергозависимыми параметрами,  $N$  – нормировочная постоянная,  ${}_1F_1(a, b, x)$  – вырожденная гипергеометрическая функция [6]. Такое описание профиля ливня получено по аналогии с профилем электромагнитного ливня и свертки с  $\exp(-x/\lambda)$  для учета флуктуации начала адронного ливня [7]. В параметры была введена логарифмическая за-

зависимость от энергии пучка для единовременного описания всех экспериментальных данных. Результаты фитирования представлены на рис.5 совместно с экспериментальными данными, точность описания которых составляет 5–10%. Полученные результаты позволяют аналитически рассчитать среднее энерговыделение протонных и пионных ливней на любой глубине калориметра, в интервале энергии 20–180 ГэВ. При этом получены следующие значения параметров для пионных ливней:

$$a = 1.12 + 0.28 \ln E (\text{ГэВ}), \quad w = 0.70 - 0.0075 \ln E (\text{ГэВ}),$$

$$b = 0.28, \quad d = 0.819$$

и протонных ливней:

$$a = 0.75 + 0.36 \ln E (\text{ГэВ}), \quad w = 0.89 - 0.115 \ln E (\text{ГэВ}),$$

$$b = 0.36, \quad d = 0.766.$$

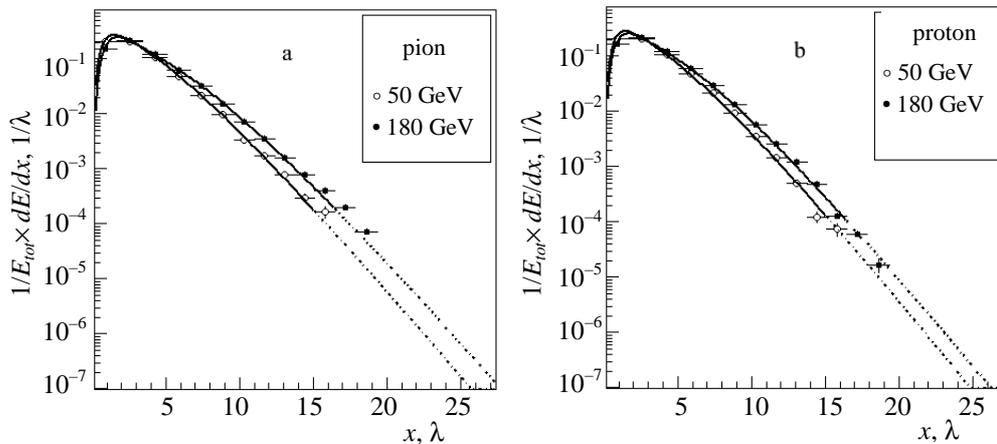


Рис.5. Аналитическое описание продольных профилей пионных (а) и протонных (б) ливней.

Энергетическая зависимость отсутствует у параметров  $b$  и  $d$ , у остальных она выражена достаточно слабо, что позволяет надеяться на корректность использования параметризации при энергиях свыше 200 ГэВ.

## 7. Заключение

Продольные профили пионных и протонных ливней в интервале энергии 20–180 ГэВ измерены до глубины в 20 ядерных длин взаимодействия. Установлено, что пионные ливни, при энергиях выше 50 ГэВ, проникают глубже в калориметр. Экспериментальные данные сравнены с результатами Монте-Карло моделирования с использованием представленных моделей. Как установлено, список QGSP предсказывает более короткие, в сравнении с экспериментом, адронные ливни при всех энергиях. LHEP достаточно хорошо описывает продольные размеры ливней при энергиях выше 50 ГэВ, но опять же более короткие при низких энергиях. Экспериментальные данные параметризованы аналитически, что позволяет рассчитывать среднее энерговыделение вдоль ливня и утечку энергии из калориметра.

В заключение авторы выражают искреннюю признательность членам коллаборации ATLAS – Т. Карли и А. Энрикес за помощь и полезные обсуждения, а также гранту INTAS для молодых ученых No. 04-83-2605.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ATLAS Collaboration, Tile Calorimeter Technical Design Report, CERN-LHCC, 96-42, 1996. CERN, Geneva, Switzerland.
2. ATLAS Collaboration, Technical Design Report, CERN-LHCC, 94-93, 1994, CERN, Geneva, Switzerland.
3. **M.Simonyan**, Electron – Pion Separation in the ATLAS Tile Calorimeter. ATLAS note CERN-ATL-TILECAL-PUB-2006-003.
4. **J.Agostinelli** et al. Nucl. Instr. Meth., **A 506**, 250 (2003).
5. **H.Hakobyan** et al. Measurement of Pion and Proton Longitudinal Shower Profiles up to 20 Nuclear Interaction Lengths with the ATLAS Tile Calorimeter, ATLAS note ATL-TILECAL-COM-2006-014.
6. **M.Abramovitz**, **I.A.Stegun**. Handbook of Mathematical Functions. New York, Columbia University Press, 1964.
7. **R.K. Bock** et al. Nucl. Instr. Meth., **A 186**, 533 (1981).

ՀԱՂՐՈՆԱՅԻՆ ՀԵՂԵՂՆԵՐԻ ԵՐԿԱՅՆԱԿԱՆ ՊՐՈՖԻԼԻ ԶՍՓՈՒՄԸ  
ՄԻՆՉԵՎ 20 ՄԻՋՈՒԿԱՅԻՆ ՓՈԽԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ԵՐԿԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

Հ.Հ. ՀԱԿՈԲՅԱՆ, Մ.Օ. ՍԻՄՈՆՅԱՆ

Միջուկային շեռագոտությունների Եվրոպական Կազմակերպությունում (CERN), Super Proton Synchrotron (SPS) արագացուցչի փնջերի վրա, 20–180 ԳԷՎ էներգիայի տիրույթում  $\pi$ -մեզոնային և պրոտոնային հեղեղների երկայնական պրոֆիլները չափված են ATLAS նախագծի երկաթ-սցինտիլյատորային Tile հաղորնային կալորիմետրում՝ մինչև 20 միջուկային փոխազդեցության երկարություն: Կատարված է  $\pi$ -մեզոնային և պրոտոնային հեղեղների երկայնական պրոֆիլների համեմատական վերլուծություն: Փորձարարական տվյալները նկարագրված են անալիտիկ պարամետրիզացիայով և համեմատված են Մոնտե-Կարլո մոդելավորման արդյունքների հետ:

MEASUREMENT OF HADRON SHOWER LONGITUDINAL  
PROFILE UP TO 20 NUCLEAR INTERACTION LENGTHS

H.H. HAKOBYAN, M.O. SIMONYAN

Pion and proton longitudinal shower profiles are measured up to 20 nuclear interaction lengths in the iron-scintillator hadronic Tile Calorimeter of ATLAS project in the beam lines of Super Proton Synchrotron (SPS) accelerator at European Organization for Nuclear Research (CERN) in the energy range of 20–180 GeV. Comparative analysis of pion and proton longitudinal shower profiles is carried out. Experimental data are described by an analytical parameterization and compared with the results of Monte-Carlo simulation.