

На правах рукописи

Карелин Александр Владимирович

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ПРОТОНОВ И ЯДЕР
ГЕЛИЯ В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ 10^{11} - 10^{13} ЭВ В
ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва 2011

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук, профессор Воронов Сергей Александрович (НИЯУ МИФИ)

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук Свиржевский Николай Саввич (ФИАН)

Кандидат физико-математических наук Панов Александр Дмитриевич (НИИЯФ МГУ)

Ведущая организация: ИЯИ РАН

Защита состоится «12» октября 2011 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.07 НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31, тел. 324-84-98, 323-92-51

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан «___» _____ 2011 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.ф.-м.н., профессор



Е. Улин

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Протоны и ядра гелия являются наиболее существенной в количественном отношении частью космических лучей, обеспечивая эксперименты большей статистикой по сравнению с другими компонентами. Таким образом, измерение их энергетических спектров в области высоких энергий дает возможность получить информацию важную для понимания процессов возникновения в источниках частиц космического излучения, дальнейшего распространения этих частиц в межзвездной среде, а также механизмов их ускорения до релятивистских энергий.

Однако однозначных ответов на многие вопросы, связанные со спектрами протонов и ядер гелия, до сих пор не получено. Например, недостаточно данных для того, чтобы подтвердить или опровергнуть существование изломов в энергетическом спектре протонов с энергией более 1 ТэВ. Также противоречивы результаты по соотношению показателей спектров протонов и ядер гелия космических лучей.

Измерения, выполненные в эксперименте ПАМЕЛА [1] непосредственно в околоземном космическом пространстве с помощью новейших детекторов, проясняют некоторые вопросы, связанные со спектрами протонов и ядер гелия космических лучей в энергетическом интервале от 200 ГэВ до 15 ТэВ.

Цель работы

Целью работы является создание методики и определение с помощью нее энергетических спектров протонов и ядер гелия в спутниковом эксперименте ПАМЕЛА в интервале энергий от 50 ГэВ до 15 ТэВ и от 50 ГэВ/нуклон до 3,5 ТэВ/нуклон, соответственно на основании данных, полученных в измерениях в околоземном космическом пространстве.

Научная новизна и значимость работы

Научная значимость работы.

С помощью позиционно-чувствительного калориметра, входящего в состав спектрометра ПАМЕЛА, определены энергетические спектры протонов и ядер гелия первичных космических лучей в области энергий от 50 ГэВ до 15 ТэВ и от 50 ГэВ/нуклон до 3,5 ТэВ/нуклон соответственно, что необходимо для уточнения моделей генерации и распространения космического излучения. Были разработаны методы выделения протонов и ядер гелия из общего потока частиц, падающих на установку, и определения их энергии.

Новизна работы.

1. Разработана новая методика восстановления энергетических спектров протонов и ядер гелия первичного космического излучения в области энергий до десятков ТэВ по данным позиционно-чувствительного полупроводникового электромагнитного калориметра, причем для определения энергии частиц использовалась топология развития электромагнитных каскадов. Методика позволяет получать спектры ядерных частиц высоких энергий с помощью калориметра, который является «тонким» с точки зрения ядерных взаимодействий.
2. Впервые одним прибором за пределами атмосферы проведены измерения первичных потоков протонов и ядер гелия в диапазоне энергий от 50 ГэВ до 15 ТэВ и от 50 ГэВ/нуклон до 3,5 ТэВ/нуклон соответственно.
3. Восстановленные энергетические спектры протонов и ядер гелия различны в указанных диапазонах и их степенные индексы равны $\gamma_p=2,70\pm 0,05$ и $\gamma_{He}=2,47\pm 0,07$, соответственно, что, по-видимому, связано с различием в процессах ускорения в источниках и распространения в космическом пространстве.

Достоверность

Достоверность полученных результатов подтверждается проверками с использованием различных общепринятых кодов

моделирования, данных тестовых экспериментов в пучках заряженных частиц на ускорителе и полётных данных. Причем впервые в спутниковом эксперименте использована информация с магнитного спектрометра для калибровки данных, получаемых из калориметрических измерений. Энергетические спектры, восстановленные с помощью калориметра и магнитного спектрометра в доступном для магнитного анализа диапазоне энергий, совпадают, что также подтверждает надежность полученных результатов.

Практическая ценность работы

Разработанная методика для восстановления энергетических спектров протонов и ядер гелия с помощью «тонкого», с точки зрения ядерных взаимодействий, позиционно-чувствительного калориметра является универсальной и с незначительными изменениями в программном обеспечении может быть применена в аналогичных экспериментах. Результаты данной работы могут быть использованы для уточнения существующих на сегодняшний день теоретических моделей, объясняющих происхождение и ускорение космического излучения. Точное знание спектров протонов и ядер гелия необходимо для исследователей, работающих над проблемами, связанными с нейтрино, регистрируемыми на поверхности Земли, в подводных и подземных экспериментах. Полученные спектры протонов и ядер гелия помогут с большей точностью рассчитывать процессы генерации вторичных античастиц, таких как позитроны и антипротоны, что позволит в дальнейшем более надежно оценить фон при поиске экзотических источников античастиц, таких как взаимодействие частиц «темной» материи. Кроме того, знание потоков частиц в околоземном пространстве будет способствовать решению актуальных практических задач защиты космической техники от излучения.

На защиту выносятся результаты

1. Методика восстановления энергетических спектров протонов и ядер гелия космических лучей в диапазоне энергий более 50 ГэВ/нуклон с помощью «тонкого» (0.6 ядерной длины) позиционно-чувствительного полупроводникового стрипового calorиметра и сцинтилляционных детекторов.

2. Восстановленные энергетические спектры протонов и ядер гелия в диапазоне энергий от 50 ГэВ до 15 ТэВ и от 50 ГэВ/нуклон до 3,5 ТэВ/нуклон, соответственно.

3. Полученное различие в показателях энергетических спектров протонов и ядер гелия космических лучей в интервале от 50 ГэВ/нуклон до 3.5 ТэВ/нуклон.

Вклад автора

Выносимые на защиту результаты были получены автором лично. Автором разработана, оптимизирована и проверена методика восстановления энергетических спектров протонов и ядер гелия космических лучей в околоземном пространстве с помощью сцинтилляционных детекторов и позиционно-чувствительного calorиметра в эксперименте ПАМЕЛА. По этой методике была осуществлена обработка данных, полученных во время проведения измерений аппаратурой на борту ИСЗ Ресурс-ДК, и определены энергетические спектры протонов и ядер гелия в диапазоне энергий от 50 ГэВ до 15 ТэВ и от 50 ГэВ/нуклон до 3,5 ТэВ/нуклон, соответственно.

Апробация работы

Промежуточные и основные результаты, полученные в ходе работы над диссертацией, обсуждались на Международной конференции по космическим лучам ICRC 31 г. Лодзь (Польша) в 2009, Европейском симпозиуме по космическим лучам ECRC 22 г. Турку (Финляндия) в 2010, конференциях COSPAR 38 г. Бремен (Германия) и ICATPP 12 г. Комо (Италия) в 2010, Всероссийской конференции по космическим лучам ВККЛ 32 г. Москва 2010, Курчатовских молодежных научных школах в 2009-2010 гг., на

международных совещаниях в рамках проекта ПАМЕЛА в 2009-2010 гг., а также на совещаниях и научных сессиях в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Результаты, полученные по теме диссертации, были опубликованы в 18 работах (из них 9 входят в перечень ВАК).

Структура диссертации

Диссертация изложена на 113 страницах, состоит из 7 глав, в том числе Введения и Заключения, включает в себя 70 иллюстраций, 6 таблиц. Работа содержит список литературы из 102 наименований и 1 приложение.

В **первой главе** обосновывается актуальность темы, излагаются теоретические аспекты исследования космических лучей и, в частности, протонов и ядер гелия, формулируется задача исследования.

Во **второй главе** описываются различные методики определения спектров протонов и ядер гелия космических лучей с помощью калориметров, нашедших применение в спутниковых и аэростатных экспериментах. Приводится описание первых экспериментов по восстановлению спектра протонов группой Н.Л. Григорова на спутниках «Протон» [2]. Описывается также современное состояние исследований на примере таких баллонных экспериментов, как АТИС [3] и CREAM [4].

В **третьей главе** приводится описание прибора ПАМЕЛА. Магнитный спектрометр ПАМЕЛА был создан для проведения прецизионных измерений потоков частиц в околоземном космическом пространстве. Научными задачами эксперимента ПАМЕЛА являются определение энергетических спектров антипротонов, позитронов, ядер, протонов, электронов в широком диапазоне энергий, а также изучение солнечной модуляции потоков космических лучей за довольно продолжительное время. Измерения проводятся на околоземной орбите (высота 350 – 650 км, наклонение 70°), длительность измерений уже составила около 5 лет, и они продолжаются по сегодняшний день.

Технические характеристики спектрометра:

- геометрический фактор $21.6 \text{ см}^2\text{ср}$ для высокоэнергичных частиц (более 1 ГэВ);
- угловая апертура $19^\circ \times 16^\circ$;
- точность измерения координаты трекером: 4 мкм в проекции отклонения (X) и 15 мкм в проекции Y;
- мёртвое время - 5 мс для одиночной частицы;
- разрешающее время схемы совпадений - 110 нс;
- полная масса 470 кг;
- максимальная потребляемая мощность 355 Вт;
- габариты прибора $123 \times 89 \times 91 \text{ см}^3$.

Экспериментальное оборудование ПАМЕЛА включает в свой состав следующие детекторы (см. рис.1):

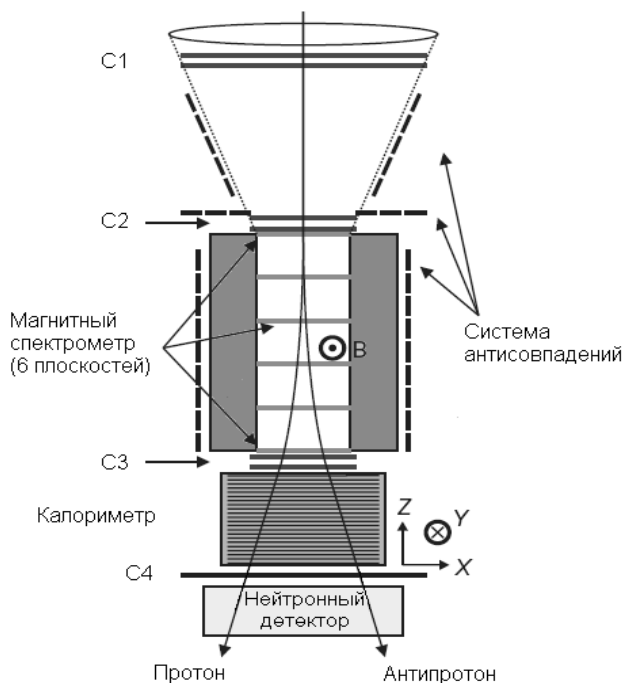


Рис. 1 Схематическое изображение спектрометра ПАМЕЛА.

1. Магнитный спектрометр с шестью плоскостями микроstriповых детекторов, служащими для определения знака заряда и импульса частицы.
2. Время-пролетная система (ВПС), состоящая из трех парных сцинтилляционных плоскостей (счетчики С1, С2, С3), которая вырабатывает главный триггер, отбирает частицы, приходящие в апертуру прибора, измеряет скорость пролета частиц, участвует в определении заряда путем измерения ионизационных потерь в сцинтилляторах.
3. Stripовый многослойный электромагнитный калориметр (толщина 17 рад. длин), идентифицирующий тип частицы, измеряющий энерговыделение, позволяющий определять направление проходящей через прибор частицы.
4. Нижний сцинтилляционный ливневый детектор С4, регистрирующий долю энергии ливней, уносимой частицами каскада, выходящими из калориметра.
5. Нейтронный детектор, помогающий разделять электромагнитные и ядерные каскады по количеству регистрируемых нейтронов, рождаемых при взаимодействиях в калориметре.
6. Систему счетчиков антисовпадений, регистрирующую частицы, попадающие в прибор вне апертуры, а также выходящие из прибора вторичные частицы.

Магнитный спектрометр имеет предел при идентификации типа и определении жесткости частиц космических лучей в районе ~ 1 ТВ, поэтому для расширения измеряемого энергетического диапазона в область до 15 ТэВ были использованы данные, получаемые калориметром.

Калориметр состоит из 44 слоёв кремниевых stripовых детекторов, прослоенных 22-мя пластинами вольфрама толщиной 2.3 мм каждая ($Z=74$, $A=183.85$, $\rho=18.1$ г/см³, $X_0=0.3735$ см). Один слой включает в себя 96 stripов с шагом 2,2 мм, причем stripы в соседних слоях расположены ортогонально друг другу, чтобы измерять пространственное распределение каскада в двух проекциях. Суммарная толщина составляет 0.6 ядерной длины взаимодействия или 17 радиационных длин. Амплитуда с каждого stripа оцифровывается 16-битным АЦП.

В **четвёртой главе** дается подробное описание методики восстановления энергетического спектра протонов космических лучей. На основании моделирования спектра протонов методом Монте-Карло были получены распределения энерговыделений в калориметре прибора ПАМЕЛА при прохождении через прибор протонов различных энергий в интервале от 20 ГэВ до 20 ТэВ. Были использованы современные, общепризнанные в мире коды моделирования Geant3 [5] и Geant4 [6]. Чтобы избавиться от не взаимодействующих частиц, был произведен предварительный отбор событий, который накладывал определенные ограничения на величины энерговыделений в слоях и стрипах калориметра, связанные с продольным и поперечным развитием каскада вторичных частиц. Одновременно было добавлено требование, чтобы частица проходила в апертуре прибора. Последнее выполнялось путем восстановления направления прилета частицы с помощью метода наименьших квадратов, причем исключались события с плохо восстановленной осью ливня. Для каждого отдельного события была определена плоскость начала каскада вторичных частиц по специально выработанному в рамках методики критерию.

Дополнительно были отобраны только те события, в которых первичные частицы провзаимодействовали в верхней половине калориметра согласно критерию определения плоскости начала каскада вторичных частиц. Данное требование существенно по той причине, что чем глубже начинается ливень, тем больше доля недетектируемой энергии каскада и тем, следовательно, хуже энергетическое разрешение.

Для того, чтобы получить спектр протонов космических лучей, необходимо выделить эти частицы из общего потока всех регистрируемых прибором частиц (электронов, позитронов, ядер).

С первого взгляда может показаться, что доля электронов, являющихся фоном, составляющая порядка 1% в космических лучах, мала. Однако следует принять во внимание, что вероятность электронов испытать взаимодействие с веществом калориметра намного больше, чем для протонов. Поскольку в разработанном методе для восстановления спектров используются события, инициировавшие каскад в калориметре, то доля имитаций протонов электронами будет повышенной в отобранных событиях.

Кроме того, электронные каскады имитируют ливни протонов большей энергии и их относительное (к протонам) количество в отобранных событиях возрастает еще сильнее. Поэтому, учитывая, что около 96% электронов взаимодействуют в первых слоях калориметра, события с высоким энерговыделением (более 8 мип*) в этих слоях были исключены из рассмотрения, и, таким образом, устранена значительная доля имитаций протонов электронами. Чтобы выделить протоны как однозарядные частицы на фоне многозарядных ядер, были использованы измерения ионизационных потерь в сцинтилляторах ВПС.

Для определения энергии протонов использовалось значение величины отношения полного энерговыделения E_{tot} (мип) к числу сработавших стрипов N_{hit} – α и рассматривались его распределения в зависимости от первичной энергии протонов (см. рис.2).

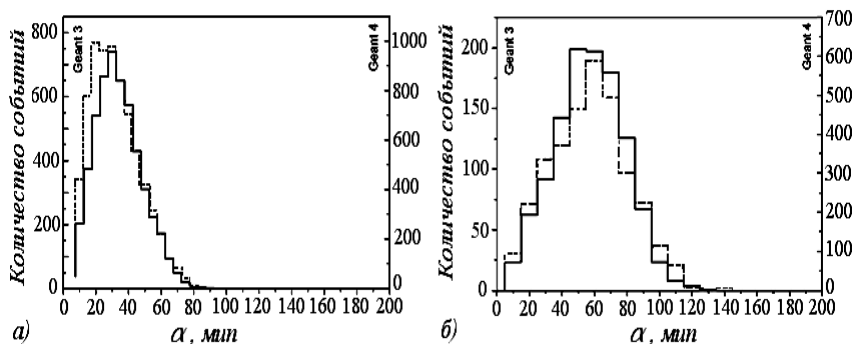


Рис. 2 Распределения числа событий по параметру α для промоделированных протонов с энергией а) 1 ТэВ, б) 3 ТэВ. Пунктирной линией показаны результаты моделирования, выполненного с помощью пакета Geant3, сплошной – Geant4.

Поскольку энергетическое разрешение калориметра в случае измерения энергии протонов и ядер, инициировавших ливни, не очень высокое, то для восстановления спектра протонов по величинам α применялись методы, использующиеся при решении некорректно поставленных задач.

*Один мип равен энергии, выделившейся в детекторе при прохождении одной минимально ионизирующей частицы

Математически задача восстановления спектров излучения сводится к нахождению решения интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода. Для ее решения необходима добавочная априорная информация, которая должна быть дополнительно задана. Такая информация была получена путем моделирования потоков протонов распределенных по степенному закону с показателем близким к реальному. Моделируемые протоны имели изотропное угловое распределение и налетали в апертуру прибора. Применялась основанная на теореме Байеса итерационная методика, подробно описанная в работе [7]. Данная методика, используя матрицу корреляций между истинной и измеренной энергией отобранных частиц, корректирует количество событий в каждом энергетическом интервале.

Для восстановления абсолютных значений потоков с помощью данных моделирования была вычислена зависимость от энергии отношения количества событий до и после всех применявшихся отборов. Таким образом определялось поведение эффективности в энергетическом диапазоне 0,05 – 15 ТэВ. Для каждого отдельного критерия отбора были найдены возможные систематические неточности, связанные с расчетом эффективности. Одновременно эффективности отборов были проверены с помощью полетных данных. Сравнивались также между собой результаты моделирования различными программными пакетами и данные тестовых калибровок на ускорителе ЦЕРН в пучках заряженных частиц.

В **пятой главе** приводится описание методики восстановления спектра ядер гелия космических лучей. Первоначальный отбор и отбор событий, попадающих в апертуру спектрометра ПАМЕЛА, для ядер гелия был подобен отбору протонов. Для ядер гелия строились аналогичные протонным распределения по отношению полного энергосодержания в калориметре к количеству сработавших стрипов. Для разработки методики использовались полетные данные, полученные при помощи магнитного спектрометра, а также данные моделирования при помощи пакета Geant4. Общий характер зависимости величины эффективности отбора от энергии для ядер гелия оказался схож с протонным. Примесь протонов в

отобранных событиях, интерпретируемых как ядра гелия, составила величину не более 4 % .

В **шестой главе** представлены результаты, полученные для спектров протонов и ядер гелия космических лучей (см рис.3). Приводятся данные других экспериментов. С тех пор как впервые непосредственно в околоземном космическом пространстве были определены спектры протонов и ядер гелия в эксперименте ПРОТОН, лишь несколько баллонных экспериментов граничили в своих измерениях с данным энергетическим диапазоном и только один спутниковый – СОКОЛ [8]. В баллоне эксперименте, проводившимся группой Райана в 1970-ых, был получен спектр протонов до энергий 2 ТэВ и спектр ядер гелия до энергий 300 ГэВ/нуклон.

Измерения в эксперименте ПРОТОН обнаружили излом в интегральном протонном спектре в области около 1 ТэВ. Однако ни одна из последующих групп исследователей не подтвердила данный результат. Если принять во внимание систематические и статистические ошибки, то спектральные индексы у спектров протонов и ядер гелия, полученные группой Райана [9], нельзя считать различающимися. Для протонов с энергией 50 ГэВ – 2 ТэВ этот индекс составляет -2.75 ± 0.03 , а для ядер гелия с энергией 20 – 400 ГэВ/нуклон – -2.77 ± 0.05 . Данные первых полетов JACEE - 1, 2, 3, [10], где энергетические спектры протонов измерялись от 5 ТэВ и выше, а спектры ядер гелия от 2 ТэВ/нуклон (в следующих полетах измерялись спектры, от 20 ТэВ), также демонстрируют отсутствие различия спектральных индексов протонов и ядер гелия. Их величины составляют -2.81 ± 0.13 и -2.82 ± 0.2 соответственно. Из измерений, проведенных аппаратурой СОКОЛ [8], следует, что в области энергий больше 5 ТэВ доля протонов по отношению к доле ядер гелия уменьшается. Причем степенной спектральный индекс оказался равным для протонов -2.85 ± 0.14 при $E > 5$ ТэВ, а для ядер гелия -2.64 ± 0.12 при $E > 1$ ТэВ.

Результаты АТИС-2 также обозначили различие в формах спектров протонов и ядер гелия во всем исследованном энергетическом интервале – от 50 до 10^4 ГэВ.

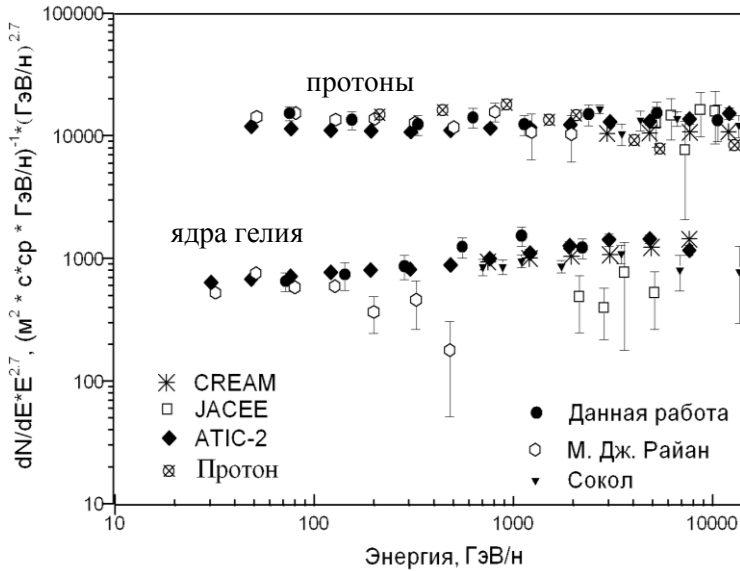


Рис. 3 Восстановленные спектры протонов и ядер гелия космических лучей. Сравнение с другими, опубликованными на сегодняшний день, результатами измерений.

Эксперимент CREAM подтвердил результаты ATIC-2, утверждая, что спектры протонов и ядер гелия не являются пропорциональными друг другу в энергетическом интервале $2.5 \times 10^3 - 2.5 \times 10^5$ ГэВ, и что в этой области спектры могут быть аппроксимированы степенными функциями с индексами -2.66 ± 0.02 для протонов и -2.58 ± 0.02 для ядер гелия.

В энергетической области, доступной для измерения с помощью магнитного спектрометра ПАМЕЛА (до 1,2 ТВ), осуществлялось сравнение данных, полученных с помощью калориметра и магнитного спектрометра. Обе группы данных демонстрируют совпадение, что говорит о надежности измерений спектров обоими детекторами, входящими в состав прибора ПАМЕЛА.

Восстановленные с помощью магнитного спектрометра энергетические спектры протонов и ядер гелия были аппроксимированы степенными функциями в различных энергетических диапазонах. Так в области с энергией более 100

ГэВ/нуклон индексы γ_{He} и γ_{p} оказались равными [11]:

$$\gamma_{\text{He}} = -2,477 \pm 0,06 \pm 0,03;$$

$$\gamma_{\text{p}} = -2,67 \pm 0,03 \pm 0,05,$$

где первые погрешности статистические, а вторые - систематические.

В то же время аппроксимация полученных в настоящей работе спектров в энергетическом интервале более 50 ГэВ/нуклон дала следующие результаты для спектральных индексов:

$$\gamma_{\text{He}} = -2,47 \pm 0,07;$$

$$\gamma_{\text{p}} = -2,70 \pm 0,05,$$

где ошибки включают и статистические, и систематические погрешности.

Таким образом, данные обоих детекторов одного прибора находятся в хорошем согласии и с точки зрения степенной аппроксимации спектров.

Общие результаты приведенных экспериментов по измеренным спектральным индексам протонов и ядер гелия сведены в таблице 1.

Таблица 1. Спектральные индексы протонов и ядер гелия по данным различных экспериментов

Эксперимент	Энергия	p	He
Протон	0,07– 0,8 ТэВ, 10–1000 ТэВ 1–10 ТэВ	2.65±0,05 3.2±0,1	
Сокол	5 – 100 ТэВ (p) 1 – 50 ТэВ/нуклон (He)	2,85±0,14	2,64±0,12
Памела (магнитный анализ)	0,2 – 1,2 ТэВ (p) 0,1– 0,6 ТэВ/нуклон(He)	2,67±0,03	2,447±0,06
AMS-1 [12,13]	0,01 – 0,2 ТэВ (p) 0,00002 – 0,025 ТэВ/нуклон (He)	2,780±0,009	2,740±00,026
Группа Райана	50 ГэВ – 2 ТэВ (p) 0,02 – 0,4 ТэВ/нуклон (He)	2,75±0,03	2,77±0,05
JAСEЕ -1,2,3	5 - 500 ТэВ (p) 2 – 50 ТэВ/нуклон (He)	2,81±0,13	2,82±0,20

Полученные в эксперименте приборные распределения событий по параметру α сравнивались с моделированными по тому же параметру. Для протонов и ядер гелия моделировались распределения с измеренной величиной показателя энергетического спектра протонов, равной $-2,7$, а также спектры с показателем $-2,5$, соответствующим измеренному наклону энергетического спектра другой компоненты - ядер гелия.

Сравнение получившихся распределений параметра α после применения стандартной процедуры отбора подтвердило выводы о разных показателях наклона аппроксимирующих степенных функций для протонов и ядер гелия космических лучей.

Так как полученные в настоящей работе спектры протонов и ядер гелия имеют разные показатели, то для их объяснения можно предположить, что разные типы частиц ускоряются в различных источниках космических лучей.

Для их описания была выбрана трехкомпонентная модель Зацепина-Сокольской [14]. Согласно данной модели структура спектров космических лучей обуславливается суперпозицией спектров от трех типов источников. Первым типом являются взрывы сверхновых звезд массой 8-15 солнечных масс частицы, рожденные в них, попадают непосредственно в межзвездное пространство. Второй тип - это взрывы массивных сверхновых (15-25 солнечных масс), которые группируются в кластеры. Частицы при взрыве такой сверхновой попадают в ее собственный звездный ветер, который отличается от звездного ветра других типов звезд, будучи обусловленным последней стадией эволюции звезды и являясь чрезвычайно интенсивным. Комбинация ассоциаций звезд данного типа и ветров от них образует «супербабл», т.е. область горячего сверхплотного газа, окруженного холодной нейтральной водородной оболочкой. Предполагается, что наше Солнце расположено внутри такой области. Третий тип источников - это новые звезды, во время взрывов которых происходят процессы, в целом схожие с взрывом сверхновых. Каждый из вышеперечисленных источников дает свой вклад в спектр.

Для данной модели с помощью аппроксимации полученных экспериментальных результатов были уточнены значения параметров для третьего класса источников – новых звезд.

На рис. 4 показан компонентный состав источников спектров протонов и ядер гелия в диапазоне 0,1 – 3,5 ТэВ/нуклон согласно с представлениями в рамках трехкомпонентной модели. Видно, что спектр ядер гелия в энергетической области 100 ГэВ/нуклон – 3,5 ТэВ/нуклон в большей степени обусловлен источниками первого класса, тогда как для протонов с энергией до 1 ТэВ большую роль играют источники третьего класса. Источники второго класса не оказывают существенного влияния на форму спектров.

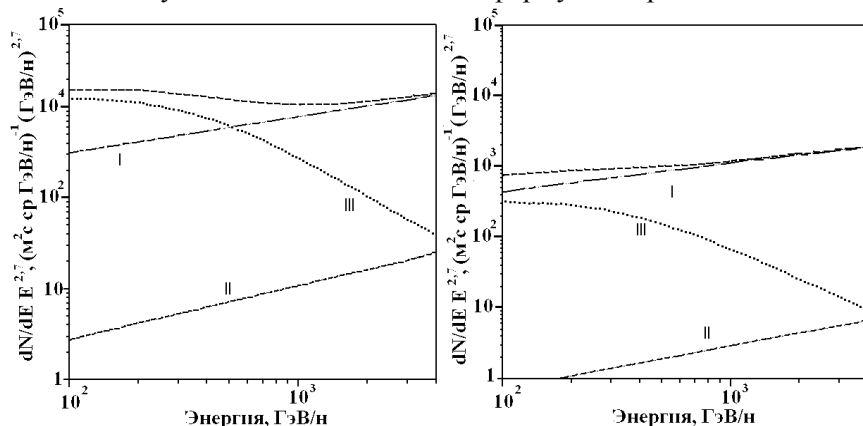


Рис. 4 Вклад отдельных источников в суммарные потоки галактических протонов (слева) и ядер гелия (справа) в рамках аппроксимации полученных результатов трехкомпонентной моделью

В Заключении приводятся основные результаты работы:

1. Разработана методика выделения протонной компоненты и ядер гелия из общего потока регистрируемых частиц с помощью использования позиционно-чувствительного полупроводникового калориметра и сцинтилляторов время-пролетной системы спектрометра ПАМЕЛА. После применения методики количество имитаций в восстанавливаемом протонном спектре ядрами гелия составляет сотую долю процента, электронами – не более 1%. При восстановлении спектра ядер гелия доля имитаций протонами не превышает 4%.
2. Разработана методика построения энергетических спектров протонов и ядер гелия по данным позиционно-чувствительного

электромагнитного калориметра спектрометра ПАМЕЛА. Для определения энергии применяется параметр α , учитывающий пространственное распределение каскада в калориметре. Отбор по параметру α позволил избавиться от «хвостов» в распределениях, тем самым минимизируя эффект значительного статистического преобладания имитаций малыми энергиями высоких при восстановлении спектра.

3. Разработанная методика была всесторонне проверена с использованием данных тестового эксперимента в пучках заряженных частиц на ускорителе; данных, полученных в полете с помощью магнитного спектрометра; расчётов Монте-Карло различных программных пакетов моделирования, в результате чего была признана надёжной. Впервые в спутниковом эксперименте была осуществлена возможность использовать данные магнитного спектрометра для калибровки получаемых данных по калориметру. Результаты проведенных проверок подтвердили стабильность работы экспериментального оборудования и правильность моделирования его отклика на протоны и ядра гелия.
4. С помощью разработанной методики по данным спектрометра ПАМЕЛА были получены энергетические спектры протонов и ядер гелия космических лучей в диапазоне энергий от 50 ГэВ до 15 ТэВ и от 50 ГэВ/нуклон до 3,5 ТэВ/нуклон, соответственно.
5. Аппроксимация полученных в настоящей работе спектров в указанных диапазонах энергий, дала следующие результаты:

$$\frac{dN_p}{dE_p} = (662 \pm 7) \times E^{-2,7 \pm 0,05},$$

$$\frac{dN_{He}}{dE_{He}} = (246 \pm 1) \times E^{-2,47 \pm 0,07}$$

Ошибки включают и статистические, и систематические погрешности.

6. Полученные спектры протонов и ядер гелия космических лучей демонстрируют различие в формах спектра. Это может говорить о том, что протоны и ядра гелия ускоряются в различных астрофизических источниках. Полученные

результаты хорошо описываются трехкомпонентной моделью Зацепина-Сокольской. В рамках данной модели полученные результаты позволили уточнить значения параметров для третьего класса источников модели – новых звезд.

Публикации

- 1) С.В. Борисов, С.А. Воронов, А.В. Карелин, Разделение электронов и протонов с помощью калориметра в экспериментах по прямому измерению состава и энергетических спектров космических лучей, УФН, 2009, т. 179, №9, стр. 931-944.
- 2) С.А. Воронов, Г.И. Васильев, А.В. Карелин, М.Ф. Рунцо, Метод измерения энергии протонов выше 20 ГэВ с помощью тонкого (около 0.6 ядерных длин) дискретного калориметра, Космические исследования, 2010, т. 48, № 3, стр. 246-251.
- 3) С.В. Борисов, С.А. Воронов, А.В. Карелин, С.А. Колдобский, М.Ф. Рунцо, Определение характеристик каскада частиц, инициированного электронами и протонами, в позиционно-чувствительном калориметре, Письма в ЭЧАЯ, 2010, т. 7, №1, стр. 8-11.
- 4) С.В. Борисов, М. Боецио ...А.В. Карелин и др., Измерение спектров электронов и позитронов высоких энергий в эксперименте «ПАМЕЛА», Краткие сообщения по физике, 2010, т. 37, №6, стр. 35-45
- 5) С.А. Воронов, С.В. Борисов, А.В. Карелин, Измерение энергии электронов и протонов калориметрами в физике космических лучей, на спутниковых и баллонных экспериментах за последние 20 лет, Космические исследования, 2011, т. 49, №3, стр. 1-17.
- 6) С.В. Борисов, С.А. Воронов ...А.В. Карелин и др., Спектр протонов высоких энергий космических лучей, Краткие сообщения по физике, 2011, т. 38, №3, стр. 15-27.
- 7) А.В. Карелин, О. Адриани, Дж. Барбарини и др., Измерение потоков протонов и ядер гелия высоких энергий, Известия РАН, серия физическая, 2011, т. 75, №3, стр. 358–361.

- 8) A.V. Karelin, S.V. Borisov, A. M. Galper, S.A. Voronov, The proton and helium cosmic ray spectra, ASTRA, 2011, v. 7, pp. 235-238.
- 9) O. Adriani, G. Barbarino ...A.V. Karelin, et al., PAMELA measurements of Proton and Helium spectra challenge the current paradigm of cosmic ray acceleration and propagation, Science, 2011, v. 332, №6025, pp. 69-72.
- 10) С.А. Воронов, А.М. Гальпер, Е.Ф. Макляев, М.Ф. Рунцо, А.В. Карелин, Калибровка детекторов С4 и НД спектрометра «ПАМЕЛА» в пучках заряженных частиц на ускорителе SPS ЦЕРН, Научная сессия МИФИ-2007: Сб. науч. тр. – М.: МИФИ, 2007, т. 7, стр. 57-58.
- 11) С.А. Воронов, А. М. Гальпер, Е. Ф. Макляев, М. Ф. Рунцо, А.В. Карелин, Калибровка в 2007 году детектора С4 спектрометра ПАМЕЛА в пучках заряженных частиц на ускорителе SPS (ЦЕРН), Научная сессия МИФИ – 2008: Сб. науч. тр. – М.: МИФИ, 2008, т. 9, стр. 148.
- 12) С.А. Воронов, А.М. Гальпер ...А.В. Карелин и др., Метод отождествления частиц в магнитном спектрометре ПАМЕЛА, Научная сессия МИФИ – 2008: Сб. науч. тр. – М.: МИФИ, 2008, т. 9, стр. 153.
- 13) С.В. Борисов, С.А. Воронов ...А.В. Карелин и др., Методика измерения электрон-позитронного спектра с использованием калориметра спектрометра ПАМЕЛА, Научная сессия МИФИ – 2009: Сб. науч. тр. – М.: МИФИ, 2009, т. 4, стр. 69.
- 14) A. Karelin, The measurement of cosmic ray proton energy with electromagnetic calorimeter of PAMELA instrument, 31th International Cosmic Ray Conference, Lodz, Poland, 2009, HE.0493.
- 15) A.V. Karelin, G.I. Vasiliev, S.A. Voronov et al., Positron identification on proton background using combined detector data for PAMELA experiment, 31th International Cosmic Ray Conference, Lodz, Poland, 2009, HE.0495.
- 16) С.В. Борисов, С.А. Воронов, А.М. Гальпер, А.В. Карелин, Измерение спектров протонов и ядер гелия в космических лучах с помощью электромагнитного калориметра в эксперименте «ПАМЕЛА», Тр. научн. сессии НИЯУ МИФИ-2010, сборник статей – М.: НИЯУ МИФИ, 2010, т. 4 стр. 103.

- 17) С.В. Борисов, С.А. Воронов, А.М. Гальпер, А.В. Карелин, Измерение спектров электронов и позитронов высоких энергий в эксперименте «ПАМЕЛА», Тр. научн. сессии НИЯУ МИФИ-2010, сборник статей – М.: НИЯУ МИФИ, 2010, т. 4 стр. 111.
- 18) А.М. Galper, L. Grishantseva ... A.V. Karelin et al., Three years of the PAMELA mission, Invited, rapporteur and highlight papers ICRC31, Lodz 2010, pp. 199-206.

Литература

- [1] P. Picozza, A.M. Galper, G. Castellini et al., *ApJ.*, 27, 296 (2007)
- [2] Н.Л. Григоров, В.Е. Нестеров, И.Д. Рапопорт и др., *Космич. Исслед.*, 5, 3, 395 (1967)
- [3] А.Д. Панов, Дж.Х. Адамс, Х.С. Ан, *Известия РАН Серия Физическая*, 73, 5, 602 (2009)
- [4] H.S. Ahn, P. Allison, M.G. Baglies, et al., *ApJ Lett.*, 714, 89-93 (2010)
- [5] R. Brun, F. Carminati, GEANT Detector Description and Simulation Tool. CERN Geneva (1993)
- [6] K. Amako, *Nucl. Instr. Meth. A* 453, 455-460 (2000)
- [7] G. D'Agostini, *Nucl. Instr. Meth. A* 362, 487 (1995)
- [8] И.П. Иваненко, В.Я. Шестоперов, Д.М. Подорожный и др., *Известия АН серия физическая*, 57, 7, 76 (1993)
- [9] M.J. Ryan, J.F. Ormes, and V.K. Balasubrahmanyam, *Phys. Rev. Lett.* 28, 985 (1972)
- [10] T.H. Burnett, S. Dake, M. Fuki et al., *Phys. Rev. Lett.* 51, 11, 1010-1013, (1983)
- [11] O. Adriani, G.C. Barbarino, G.A. Bazilevskaya et al., *Science*, 332, №6025, 69-72 (2011)
- [12] J. Alcaraz, D. Alvisi, B. Alpat et al., *Physics Letters B*, 472, 215-226 (2000)
- [13] J. Alcaraz, B. Alpat, G. Ambrosi et al., *Physics Letters B*, 494, 193-202 (2000)
- [14] V.I. Zatsepin, N.V. Sokolskaya, *A&A*, 458, 1-5 (2006)