



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИКФИА СО РАН,

чл.-корр. РАН Е.Г. Бережко

«25» апреля 2014 г.

Отзыв ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института космических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера

Сибирского отделения РАН

на диссертацию Панова Александра Дмитриевича

«Энергетические спектры ядер первичных космических лучей от протонов до железа по результатам эксперимента АТЭС-2», представленной на соискание

ученой степени доктора физико-математических наук

по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Диссертационная работа Панова А.Д. выполнена в научно-исследовательском институте ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова».

Диссертация изложена на 385 страницах, состоит из введения, десяти глав, выводов, двух приложений, 162 рисунков, 22 таблиц и списка цитируемой литературы из 358 наименований. По теме диссертации опубликовано 27 статей, из которых 18 входят в список ВАК РФ.

Диссертация посвящена решению актуальной задачи экспериментального определения энергетических спектров основных компонент космических лучей (КЛ) – протонов, ядер гелия и более тяжелых ядер – в области энергий от 50 ГэВ до 50 ТэВ. Важность этой задачи определяется тем, что без ее решения невозможно выполнение детальных сопоставлений наблюдаемых спектров КЛ с предсказаниями моделей, описывающих генерацию и распространение КЛ, т.е. в конечном итоге решить проблему происхождения КЛ.

Актуальность темы диссертации обусловлена еще и тем, что ситуация, сложившаяся к началу 2000-х годов в результате выполнения ряда экспериментов на баллонах и космических аппаратах, оказалась весьма неоднозначной. Результаты разных экспериментов, как правило, значительно различаются между собой. К тому же все они имеют низкую статистическую обеспеченность в области энергий выше 1 ТэВ. Эту сложившуюся неоднозначность ранее выполненных экспериментов был призван разрешить баллонный эксперимент Advanced Thin Ionization Calorimeter (ATIC), который был реализован в Антарктиде в течение 2000-2008 гг. Основной целью этого эксперимента, результаты которого составляют основу диссертации А.Д. Панова, является выполнение надежных измерений спектров протонов и более тяжелых ядер вплоть до железа одним прибором на основе единой методики в широком диапазоне энергий от 50 ГэВ до 50 ТэВ.

В **первой главе** диссертации представлен обзор ранних, упрощенных моделей распространения космических лучей в Галактике, поясняется характер возникающих при этом задач и показано, что для их решения необходимо иметь надежно определенные энергетические спектры КЛ. Введено понятие «стандартной модели» происхождения КЛ. Представлен детальный обзор экспериментов, проведенных до начала 2000-х годов в области энергий от десятков ГэВ/нуклон до нескольких ТэВ/нуклон, подробно описаны методы калибровки приборов и методики получения данных. Показано, что результаты ранее выполненных экспериментов плохо согласуются между собой. Обоснованно сделан вывод о том, что для разрешения этой ситуации необходимо проведение новых экспериментов.

Вторая глава диссертации посвящена описанию баллонного эксперимента ATIC-2, результаты которого положены в основу диссертации. Описаны конструкция детекторов заряженных частиц, электроника, результаты испытаний прибора на пучках ускоренных частиц в ЦЕРНе, результаты полетных испытаний. Основной вывод автора состоит в том, что из 4-х полетов, совершенных в 2000-2008 годах, только эксперимент ATIC-2 (полет 29.12.2002-18.01.2003 гг.) можно

признать успешным, поскольку аппаратура работала надежно в течение всего полета. Именно данные этого эксперимента являются основой диссертации.

Вопросы различных методик калибровки детекторов частиц, влияния альбедных частиц на величины определяемых зарядов частиц с помощью кремниевой матрицы подробно описываются в **третьей главе**. Автор показал, что в данные измерений характеристик всех ядер, кроме железа, необходимо вносить соответствующие поправки, учитывающие даже малые искажения.

Измерение энергосвечения сцинтилляционным ВГО-калориметром изучено в **четвертой главе** диссертации. В ней дано детальное описание методики измерения энергии, выделяемой заряженными частицами в калориметре, процедуры амплитудной калибровки прибора, определения температурной зависимости чувствительности 4-мя разными методами и выработаны рекомендации для корректировки результатов измерений энергосвечения.

В **пятой главе** приводятся методы амплитудной калибровки системы сцинтилляционных годоскопов и ее использования как детектора заряда частиц. Рассмотрена коррекция нелинейности отклика сцинтилляторов и координатно-зависимой нелинейности на регистрацию частиц. Сделан вывод о том, что для получения корректных измерений заряда частиц необходимо усреднять заряд, найденный по данным кремниевой матрицы и по сцинтилляторам, что существенно улучшает зарядовое разрешение.

Задача восстановления энергетических спектров КЛ по спектру энергосвечений в калориметре рассмотрена в **шестой главе**. Отмечено, что энергетическое разрешение тонкого калориметра в эксперименте АПС составляет величину 30-40%, поэтому некоторые особенности спектров КЛ могут быть смазаны. Чтобы избежать этого, автор для решения этой некорректно поставленной задачи использует метод регуляризации Тихонова. Он отмечает, что этот метод успешно работает для спектров протонов и ядер гелия, которые наиболее статистически обеспечены. Для более тяжелых ядер проявляются признаки неустойчивости решения, поэтому для них он применяет другой метод — метод дифференциальных сдвигов, который устойчив для частиц с нижним порогом энергии 200 ГэВ.

Результаты измерения спектров протонов и ядер гелия представлены в **седьмой главе** диссертации. В результате эксперимента АТЭС-2 спектры протонов и ядер гелия определены с достаточно хорошей статистической обеспеченностью в рекордно широком интервале энергий от 30 ГэВ до 30 ТэВ, что является наиболее важным результатом диссертации. Впервые надежно установлены две важные особенности этих спектров. Во-первых, спектр протонов оказался более мягким в сравнении со спектром ядер гелия. Во-вторых, оба спектра имеют заметное отклонение энергетической зависимости от степенной, выражающееся в наличии «вогнутости», состоящей в том, что спектры являются несколько более мягкими при энергиях ниже 1 ТэВ по сравнению со спектром в области энергий выше 1 ТэВ. Существование этих особенностей спектров протонов и ядер гелия подтверждено в последующих экспериментах: AMS-02, CAPRICE98 и BESS-TeV. Кроме того, на основе данных АТЭС-2, автором установлено, что вблизи энергии 1 ТэВ не наблюдается каких-либо резких изменений спектров, подобных тем, что были зафиксированы в более поздних экспериментах CAPRICE98 и BESS-TeV. Следует отметить, что сопоставление полученных экспериментальных результатов с теоретическими предсказаниями выполнено автором недостаточно полно. Хотя в диссертации и содержатся ссылки на нелинейную теорию ускорения КЛ в остатках сверхновых, которая на сегодня дает наиболее полную картину формирования спектра КЛ с энергиями вплоть до 100 ПэВ, основное внимание автор уделяет феноменологическим моделям, которые не обладают какой-либо предсказательной возможностью. В этом состоит основной недостаток работы.

Восьмая глава посвящена исследованию спектров ядер от лития до кремния $4 < Z < 14$, суммарного спектра всех компонент КЛ (спектр всех частиц) и зависимости среднего логарифма атомного номера $\langle \ln A \rangle$ от энергии. Здесь также приведены результаты определения отношения потоков V/C и N/O .

Отношение потоков ядер от серы до марганца и связанные с ними отношения обильных тяжелых ядер к потоку железа изучаются в **девятой главе**. Целью исследований в этой главе на основе данных АТЭС является проверка результатов более раннего эксперимента HEAO-3-C3. В конечном итоге автор подтвердил наличие прогиба с минимумом около энергии 30 ГэВ/нуклон в отношениях потока

ядер от углерода до кремния к потоку ядер железа. Следует однако заметить, что статистическая обеспеченность этого результата невысока.

Десятая глава посвящена сравнению и анализу данных, полученных в ходе выполнения эксперимента АТЭС с более поздними экспериментами. Показано, что все более поздние данные подтвердили основные результаты эксперимента АТЭС-2. Исключением являются измерения потока ядер различных элементов, характеризующихся большими неопределенностями в области максимальных энергий.

Новизна полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации состоит в том, что в ней впервые создана комплексная система обработки данных эксперимента АТЭС-2, на основе которой определены энергетические спектры ядер в рекордно широкой области энергий от 50 ГэВ до 50 ТэВ. Научная значимость полученных автором диссертации результатов определяется тем, что в настоящее время данные эксперимента АТЭС-2 широко используются при проверке предсказаний теоретических моделей ускорения и распространения КЛ. Личный вклад автора определяется тем, что все методики калибровки детекторов и обработки данных созданы и реализованы лично им, все экспериментальные результаты, которые выносятся на защиту, получены автором и представлены им на ряде представительных российских и международных научных форумов. Обоснованность и достоверность полученных в диссертации результатов обусловлена тем, что для их получения использованы современные экспериментальные методы, а основные результаты измерений подтверждены последующими экспериментами. Теоретической основой исследования послужили труды отечественных и зарубежных исследователей в области физики частиц высоких энергий и космических лучей. В методологическую основу исследования были положены современные методы статистической обработки экспериментальных данных.

Оценивая достоинства диссертационной работы, следует отметить большой объем привлеченных к анализу данных, полученных в различных экспериментах по прямому измерению потоков ядер химических элементов в широкой области энергий. В работе сделан значительный шаг в создании методик калибровки

детекторов и обработки данных, полученных в эксперименте АТЭС-2, выполняемом на баллонах в районе Антарктиды, и получены важные результаты для понимания природы происхождения КЛ.

К основным результатам диссертационного исследования, обладающим научной новизной, относятся следующие положения и разработки соискателя:

1. Создана единая комплексная методика обработки данных эксперимента АТЭС.
2. Впервые надежно определены энергетические спектры ядер вплоть до железа в широкой области энергий от 50 ГэВ до 50 ТэВ.
3. Установлено различие спектров протонов и ядер гелия (спектр протонов более мягкий) и существенное отклонение формы спектров от степенной, которое состоит в наличии «вогнутости» спектров, т.е. в том, что спектры являются более мягкими при энергиях ниже 1 ТэВ по сравнению со спектрами в области энергий выше 1 ТэВ.

В целом диссертация заслуживает высокой оценки. Однако, она не свободна от недостатков, основные из которых состоят в следующем.

1. Сопоставление полученных экспериментальных результатов с теоретическими предсказаниями выполнено в диссертации недостаточно глубоко и детально. Автор исходит из упрощенных представлений о том, что согласно «стандартной модели» ожидаемые энергетические спектры ядер КЛ при ультрарелятивистских энергиях являются степенными. Поэтому всякое отклонение от степенной зависимости по энергии в наблюдаемых спектрах трактуется автором как отклонение от стандартной модели. В эксперименте АТЭС-2 установлено, что спектры протонов и ядер гелия нестепенные. Диссертант заключает, что это противоречит стандартным представлениям. Было бы правильно рассматривать в качестве стандартной модели кинетическую нелинейную теорию ускорения КЛ в остатках сверхновых (первоначально разработана сотрудниками ИКФИА СО РАН), которая хоть и нуждается в экспериментальной проверке, но способна объяснить наблюдаемые свойства КЛ вплоть до энергии 100 ПэВ. Эта

теория, в частности, естественным образом предсказывает нестепенные, «вогнутые» энергетические спектры КЛ. Поскольку именно такие спектры установлены в эксперименте АТЭС-2 для протонов и ядер гелия, то следовало бы говорить о согласии со стандартной моделью, а не наоборот. В то же время автор уделяет необоснованно много внимания умозрительным теоретическим построениям, не обладающим какой-либо предсказательной силой.

2. Сравнение полученных результатов с результатами более поздних экспериментов приводит автора к заключению о том, что установленные экспериментом АТЭС-2 особенности спектров протонов и ядер гелия подтверждаются измерениями эксперимента PAMELA и находятся в противоречии с экспериментом AMS-02. Объективно ситуация выглядит прямо противоположным образом. Эксперимент PAMELA действительно подтвердил различие энергетических спектров протонов и ядер гелия, а также, с некоторой натяжкой, наличие вогнутости их спектров. Однако, при этом эксперимент PAMELA обнаружил наличие другой особенности спектров – резкий излом при энергии 240 ГэВ/нуклон. Эта особенность не обнаружена ни в эксперименте АТЭС-2, ни в недавнем эксперименте AMS-02. С определенной долей уверенности сегодня можно говорить о том, что излом при энергии 240 ГэВ/нуклон, наделавший много шума в научной литературе, отсутствует. Поэтому, однозначное заключение о согласии результатов экспериментов АТЭС-2 и PAMELA представляется не вполне обоснованным. Вместе с тем степень различия результатов экспериментов АТЭС-2 и AMS-02 автором преувеличена.
3. Вывод автора о том, что измеренные энергетические спектры ядер тяжелее гелия при энергиях выше 200 ГэВ/нуклон становятся все более жесткими с ростом энергии нельзя признать надежно установленным ввиду недостаточно высокой статистической обеспеченности.
4. Надписи ко всем рисункам в диссертации и автореферате приведены только на английском языке, а таблицы представлены как на русском, так и

английском, что является нарушением формальных требований, предъявляемым к тексту диссертации и автореферата.

Однако отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертации. Соискателем проделана большая работа и получены новые важные результаты в активно развивающейся области науки. Все полученные автором результаты прошли достаточную апробацию: они опубликованы в рецензируемых журналах и доложены на ряде представительных международных и отечественных конференций. По новизне, научной и практической значимости полученных результатов работа в полной мере отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям по физико-математическим наукам. Содержание диссертации изложено в логически последовательной форме, стиль изложения в целом четкий и ясный. Диссертация имеет характер завершеного научного исследования. Автореферат достаточно полно соответствует содержанию диссертации. Наиболее существенные положения и выводы, защищаемые соискателем, в полной степени отражены в его научных публикациях, прошедших независимое рецензирование. Полученные А.Д. Пановым результаты представляют интерес для таких научных организаций России, как ФИАН, ИОФАН, ИЯИ РАН, НИЯУ МИФИ, ИПФ РАН, ИЗМИРАН, ИКФИА СО РАН.

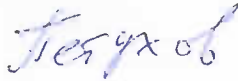
Таким образом, диссертация А.Д. Панова является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований получены значительные результаты, и их совокупность можно квалифицировать как крупное научное достижение. Это соответствует требованиям, изложенным в п.п. 9-11 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением от 24.09.2013 г. № 842 Правительства Российской Федерации, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, А.Д. Панов, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц.

Отзыв обсуждён и одобрен 23 апреля 2014 г. на общем семинаре № 4
Института космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО
РАН.

Отзыв составили:

заведующий лаборатории теории
космической плазмы,

д.ф.-м.н.



Станислав Иванович Петухов

почтовый адрес: 677980, г. Якутск, пр. Ленина, д.31, ИКФИА СО РАН

тел.: +7(4112)390454

факс: +7(4112)390450

e-mail: petukhov@ikfia.sbras.ru

заведующий лаборатории

космических лучей высоких энергий,

к.ф.-м.н., доцент



Сергей Анатольевич Стародубцев

почтовый адрес: 677980, г. Якутск, пр. Ленина, д.31, ИКФИА СО РАН

тел.: +7(4112)390455

факс: +7(4112)390450

e-mail: starodub@ikfia.sbras.ru

24 апреля 2014 г.

Подписи

С.И. Петухова и С.А. Стародубцева

заверяю,

Ученый секретарь ИКФИА СО РАН

к.ф.-м.н.




Г.А. Макаров