

## ОТЗЫВ

официального оппонента Быкова А. М.

на диссертацию Петрова Никиты Александровича

«Исследование состава космических лучей в диапазоне энергий 1,5– 100 ПэВ на архивных данных эксперимента KASCADE с использованием машинного обучения», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий

Исследования космических лучей (КЛ) имеют более чем столетнюю историю, но остается еще немало нерешенных вопросов, связанных с прибывающими из космоса высокоэнергичными заряженными частицами. Природа нескольких изломов в спектре КЛ, в частности, «колена» на энергии  $\sim 3$  ПэВ и второго «колена» на энергии  $\sim 300$  ПэВ остаются не вполне выясненными. Центральной является теория, что «колено» возникает из-за ограниченной энергии ускоренных в галактических источниках протонов, а максимальные энергии ядер остальных элементов пропорциональны их заряду. В этом контексте актуальной является задача анализа массового состава КЛ высоких энергий. Для КЛ с энергиями выше ПэВ такое исследование возможно только путем изучения широких атмосферных ливней (ШАЛ) вторичных частиц. Например, в нескольких экспериментах по исследованию ШАЛ – KASCADE, IceTop, LHAASO, TibetASy и др. – было зафиксировано изменение массового состава первичных частиц в сторону более тяжелого с увеличением энергии в области 10-100 ПэВ, а анализ данных радио телескопа LOFAR указал на легкую компоненту выше 100 ПэВ. Однако, задача восстановления состава и потоков первичных частиц на основе регистрируемых на Земле характеристик ШАЛ является нетривиальной и содержит ряд неопределенностей, начиная с различий в моделях адронных взаимодействий и моделях Монте-Карло развития ШАЛ. Поэтому имеет смысл как получение новых экспериментальных данных, так повторная обработка уже имеющихся с помощью современных подходов и методов. Диссертация Н. А. Петрова посвящена новой обработке архивных данных эксперимента KASCADE, накопленных за 17 лет его работы, с помощью современных методов машинного обучения и новых моделей адронных взаимодействий, разработанных уже с учетом результатов работы Большого адронного коллайдера. Актуальность работы не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложения. Объем диссертации составляет 99 страниц и включает 38 рисунков, 10 таблиц, а также список литературы из 88 наименований.

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации и дан краткий обзор исследований массового состава космических лучей с энергиями порядка и выше ПэВ. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, обоснована их научная новизна и достоверность, а также указаны сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертации.

В Главе 1 приводится описание эксперимента KASCADE. Дана характеристика использованных экспериментальных данных, приведены критерии их отбора. Также описываются наборы моделирования Монте-Карло, на основе которых обучался и тестировался классификатор.

Глава 2 посвящена подробному описанию использованных в работе методов машинного обучения и анфолдинга данных. Приведены результаты сравнения эффективности различных моделей классификаторов для задачи восстановления типа первичной частицы по характеристикам ШАЛ. Показано, что наилучшим образом для этой задачи подходит сверточная нейронная сеть CNN, которая и используется в работе для получения матриц смешивания массовых компонент первичных частиц. Подробно описана процедура обучения и тестирования CNN на данных Монте-Карло моделирования и части (20%) реальных экспериментальных данных. Также автор приводит описание использованного в работе двухступенчатого анфолдинга, необходимого для того, чтобы перейти к "истинным" значениям типа и энергии первичной частицы. Наконец, приведены значения статистических и систематических неопределенностей, возникающих на всех этапах обработки данных. Результат обработки "открытой" (20%) части экспериментальных данных KASCADE показывает, что результаты в целом соотносятся с полученными ранее в работах KASCADE, но есть и различия, в частности, потоки протонов в заново обработанных данных значительно превышают потоки, полученные ранее. Систематическая неопределенность методики заметно более низкая, чем в оригинальном исследовании.

В Главе 3 представлены результаты применения вышеописанных методов к полному набору экспериментальных данных KASCADE. Исследованы неопределенности, которые возникают из-за выбора различных генераторов адронных взаимодействий. Построены спектры массовых компонент первичных КЛ (протоны, гелий, углерод, кремний и железо), а также средний логарифм их массы в зависимости от энергии. Вновь обработанные результаты KASCADE оказываются ближе к массовому составу, полученному в экспериментах IceTop и TALE, чем представленные в оригинальном исследовании KASCADE, в особенности это касается протонов и ядер железа. Также исследованы изломы в спектрах компонент КЛ и, помимо статистически значимых изломов в спектрах протонов и гелия на энергиях, примерно соответствующих ожидаемым «коленям» в спектрах этих элементов, найдено указание на излом в спектре железа на  $\sim 4.5$  ПэВ. Этот интересный результат еще только предстоит объяснить.

В Заключение автором сформулированы основные результаты диссертации, а в Приложении представлены таблицы с численными значениями основных результатов работы.

Диссертационная работа Петрова Н.А. является законченным оригинальным научным исследованием, в котором развиты новые методы обработки данных эксперимента KASCADE и выполнен анализ особенностей массового состава космических лучей. Исследования КЛ очень высоких энергий невозможно проводить напрямую, а исследования ШАЛ являются модельно-зависимыми и содержат большие систематические неопределенности. В такой ситуации разработка новых методик обработки экспериментальных данных, а также переобработка архивных данных с учетом развития моделей Монте-Карло и адронных взаимодействий, необходимы для восстановления массового состава и спектра КЛ. Разработанные в работе методы анализа данных с использованием машинного обучения полезны для дальнейшего развития исследований высокоэнергичных КЛ. Методы исследований и выносимые на защиту положения хорошо обоснованы, достоверны и значимы для физики высоких энергий.

Достоинством диссертации также является хороший язык и понятный стиль изложения материала.

По тексту диссертации у оппонента имеются несколько вопросов и пожеланий.

1. В работе, как и в используемом моделировании методом Монте-Карло, исследуется пять массовых компонент первичных частиц: протоны, гелий, углерод, кремний, железо. Из диссертации не до вполне ясно, под «компонентой» подразумевается группа ядер близких масс, или ядра с конкретной массой? Первичные частицы в Монте-Карло имеют конкретные массы (p, He, C, Si, Fe), а наборы моделирований содержат частицы со всеми массами, которые потом делятся на пять групп? Стоило более подробно описать эти понятия в диссертации.
2. В связи с предыдущим замечанием, нет ли тогда поправок при применении методов восстановления массы первичной частицы при переходе от данных Монте-Карло к реальным данным, где представлено большее разнообразие масс частиц? Что происходит с первичными частицами промежуточных масс из реальных данных – они отбрасываются или причисляются к одной из массовых групп? Если отбрасываются – то как это происходит? А если нет – то как сравнивать данные по массовым компонентам с IceTop, где всего 4 массовые компоненты, а не 5?
3. Возможно ли обучать CNN классификатор одновременно на моделях Монте-Карло с разными генераторами адронных взаимодействий (например, всеми современными)? Имеет ли это смысл?
4. Некоторые термины, используемые в диссертации, поясняются не сразу или недостаточно подробно (напр., анфолдинг, классификатор, случайный лес). В разделе 2.1 хотелось бы более подробного описания различных классификаторов и базовых принципов их действия.

Вышеперечисленные замечания не имеют принципиального характера и не снижают высокой общей оценки результатов автора диссертации.

Результаты Н.А.Петрова опубликованы в трех статьях и докладывались на нескольких представительных конференциях. Исследование может быть востребовано в институтах ведущих исследования по физике космических лучей: НИИЯФ МГУ, Иркутском Университете, ИЯИ РАН, МИФИ, ФИАН, ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН и др. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа полностью отвечает требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а Никита Александрович Петров, безусловно, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Официальный оппонент: **Быков Андрей Михайлович**

Руководитель отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук (ФГБУН ФТИ им. А.Ф.Иоффе),

доктор физ.-мат. наук, профессор, академик РАН

адрес: ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, Россия, 194021

тел.: +7 (812) 292-7180

e-mail: [byk@astro.ioffe.ru](mailto:byk@astro.ioffe.ru)

Дата 03.06.2025

\_\_\_\_\_ / Быков А.М.

Подпись Быкова А.М. заверяю,

Ученый секретарь ФГБУН ФТИ им. А.Ф.Иоффе

Дата 03.06.2025

\_\_\_\_\_ / Патров М.И.

Список основных публикаций А.М. Быкова по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Быков А.М. «A peculiar hard X-ray counterpart of a Galactic fast radio burst» A. Ridnaia, D. Svinkin, D. Frederiks, A. Bykov et al., *Nature Astronomy*, Volume 5, p. 372-377 (2021), DOI: 10.1038/s41550-020-01265-0.
2. Быков А.М. «PeV Photon and Neutrino Flares from Galactic Gamma-Ray Binaries», A.M. Bykov, A.E. Petrov, M.E. Kalyashova, S.V. Troitsky. *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 921, Issue 1, articleid. L10, 5 pp. (2021), DOI: 10.3847/2041-8213/ac2f3d.
3. Быков А.М. «Acceleration of Cosmic Rays to Energies above  $10^{15}$  eV by Transrelativistic Shocks». A. M. Bykov, S.M. Osipov, V.I. Romanskii. *J.Exp. Theor. Phys.* 134 (2022) 4, 487-497, DOI: 10.1134/S1063776122040161.
4. Быков А.М. «X-ray emission from Westerlund 2 detected by SRG/ART-XC and Chandra: search for radiation of TeV leptons». A. M. Bykov, Yu. A. Uvarov, M. E. Kalyashova, D. V. Badmaev, I.Yu. Lapshov, A. A. Lutovinov, I. A. Mereminskiy, A. N. Semena. *MNRAS* 525 (2023) 1553-1561, DOI: 10.1093/mnras/stad2356.
5. Быков А.М. PeV proton acceleration in gamma-ray binaries, Bykov, A.M., Petrov, A.E., Ponomaryov, G.A., Levenfish, K.P., Falanga, M., *Advances in Space Research*, v. 74, p.4276, 2024, DOI: 10.1016/j.asr.2024.01.021.
6. Быков А.М. X-ray polarization: A view deep inside cosmic ray driven turbulence and particle acceleration in supernova remnants Bykov, A.V. Osipov, S.M., Uvarov, Yu.A., Ellison, D., Slane P., *Physical Review D*, v. 110, id.023041, 2024, DOI: 10.1103/PhysRevD.110.023041.