

Отзыв научного руководителя на диссертационную работу

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 ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий»

Проблема происхождения галактических космических лучей является одной из старейших, но в то же время актуальных в астрофизике. Со времени их первого экспериментального наблюдения прошло более ста лет, однако какие объекты являются их источниками до сих пор достоверно неизвестно, можно лишь утверждать что заряженные частицы с энергиями в диапазоне от примерно 10 ГэВ до примерно 100 ПэВ и выше рождаются внутри нашей Галактики. Стандартная парадигма, согласно которой источниками таких частиц являются галактические сверхновые, а так называемое «колено» (излом энергетического спектра космических лучей при энергиях около 3 ПэВ) соответствует предельной энергии их ускорения, в последние годы столкнулась с проблемами, вызванными в первую очередь наблюдением гамма-излучения с энергиями до ~ 1 ПэВ не ассоциированного с остатками сверхновых. В этом контексте особенно актуальным оказывается углубленное исследование свойств потока космических лучей, в частности построение спектров его отдельных массовых компонент (групп ядер близких масс). При энергиях от ~ 1 ПэВ и выше такое исследование составляет технически сложную задачу, поскольку из-за малости потока космических лучей при этих энергиях они регистрируются лишь косвенно, через ливни заряженных частиц порождаемые ими в атмосфере Земли.

Петров Никита Александрович окончил магистратуру Новосибирского государственного университета по специальности «Физика» в 2020 году. Будучи аспирантом НГУ и сотрудником ИЯФ СО РАН, он в 2021 году начал заниматься физикой космических лучей под моим руководством в рамках проекта РНФ «Анализ состава и анизотропии космических лучей путем переобработки данных KASCADE-Grande с помощью машинного обучения».

В диссертационной работе Н.А. Петрова задача построения спектров отдельных массовых компонент потока космических лучей решена с использованием архивных данных эксперимента KASCADE (работал с 1996 по 2013 годы в Карлсруэ, Германия) и методов машинного обучения, разработанных им специально для этой цели. Экспериментальные данные и Монте-Карло симуляции, использованные для этой работы, были предоставлены проектом KCDC и находятся в публичном доступе. Для решения поставленной задачи Н.А. Петров предложил использовать сверточную нейронную сеть (CNN), написал программный код реализующий эту сеть, провел большую работу по подготовке данных к использованию с этим методом. Также им проделаны разнообразные проверки устойчивости построенного метода анализа (включающего в себя полный анфолдинг полученных результатов) и оценены всевозможные систематические неопределенности, связанные как с самим методом, так и с Монте-Карло симуляциями и данными эксперимента. Результаты этих исследований описаны им во второй главе диссертации. В третьей главе диссертации описано применение разработанных методов к полному набору данных KASCADE и построены спектры пяти отдельных массовых компонент потока космических лучей (протоны, ядра гелия, углерода, кремния и железа), а также средний логарифм их массы в зависимости от энергии. Показано, что точность определения спектров отдельных массовых компонент и среднего логарифма массы с помощью разработанного метода превосходит не только точность оригинальных методов эксперимента KASCADE, но и точность аналогичных результатов таких ведущих современных экспериментов как IceTop и TALE. Кроме того, проведена оценка зависимости полученных результатов от модели высокоэнергичных адронных взаимодействий, используемой в Монте-Карло эксперимента (т. н. «теоретическая неопределенность»),

показано что она доминирует над остальными неопределенностями. Наконец, Н.А. Петровым выполнен успешный поиск изломов в спектрах отдельных массовых компонент. Впервые достоверно показано наличие «колена» в спектре протонной и гелиевой компонент при соответствующих энергиях, что является весомым аргументом в пользу классической теории зависимости предельной энергии ускорения космических лучей от магнитной жесткости (т. н. цикл Питерса). Кроме того, впервые обнаружено указание на обратный излом в спектре железной компоненты, причем энергия этого излома (4.5 ПэВ), в предположении ее зависимости от магнитной жесткости, соответствует энергии излома в спектре протонной компоненты, недавно обнаруженной экспериментом GRAPES-3. Этот результат является очень интересным с точки зрения физики космических лучей и не имеет в настоящее время однозначного теоретического объяснения.

Вклад Н.А. Петрова во все вышеописанные результаты является определяющим. Они были опубликованы в трех статьях, две из которых вышли в высокорейтинговых международных журналах (входят в список ВАК). Кроме того, результаты были апробированы на нескольких международных конференциях и рабочих совещаниях, включая European Cosmic Ray Symposium; на конкурсе молодых ученых ИЯФ СО РАН работа Н.А. Петрова заняла второе место.

Считаю, что диссертация «Исследование состава космических лучей в диапазоне энергий 1,5 – 100 ПэВ на архивных данных эксперимента KASCADE с использованием машинного обучения» является актуальной, имеет научную значимость и полностью соответствует требованиям предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор, Петров Никита Александрович, безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий».

03.09.2024 г.

Научный руководитель
старший научный сотрудник ЛОБДФЧиА ИЯИ РАН,
к.ф.-м.н.

Кузнецов Михаил Юрьевич

Адрес: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а
Телефон: 8 (499) 783-92-91
E-mail: mkuzn@inr.ac.ru

Ученый секретарь ИЯИ РАН
к.ф.-м.н.

Вересникова Анна Васильевна