

## ОТЗЫВ

Официального оппонента Птускина Владимира Соломоновича о диссертационной работе Я. В. Жежер «Исследование массового состава космических лучей и поиск нейтрино ультравысоких энергий по данным эксперимента Telescope Array», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика.

Диссертация Я. В. Жежер посвящена исследованию свойств космических лучей ультравысоких энергий на основе данных двух основных крупномасштабных экспериментов, в которых исследуются космические лучи с энергиями выше  $10^{18}$  эВ - обсерватории им. Пьера Оже (Auger) и эксперимента Telescope Array. Основная доля наблюдаемых у Земли частиц с этими энергиями повидимому приходит от внегалактических источников. Вопрос о происхождении частиц самых высоких энергий, включая природу их источников, механизмы ускорения и переноса, относится к числу наиболее важных и актуальных проблем физики. В диссертации исследуются массовый состав космических лучей сверхвысоких энергий и доля протонов по отношению к гелию, а также поставлены верхние ограничения на поток нейтрино ультравысоких энергий. Данные о составе космических лучей и о потоке нейтрино необходимы для изучения процессов рождения, ускорения и распространения космических лучей и предсказания потоков космогенных нейтрино и фотонов. Также результаты определения доли протонов по отношению к гелию могут применяться для изучения вопросов безопасности будущих коллайдеров, ограничивая возможность рождения черных дыр при ультравысоких энергиях.

Качество выполненных исследований характеризует Я. В. Жежер как сложившегося квалифицированного специалиста. Этому безусловно способствовала ее работа в

Институте ядерных исследований РАН, в котором был получен целый ряд выдающихся научных результатов по физике космических лучей. Высокий уровень исследований и творческая атмосфера этого научного коллектива проявляются в работах автора диссертации. К этому добавляется участие в международной научной коллаборации Telescope Array.

Диссертация состоит из Введения, трех глав основного текста, Заключения, двух Приложений, Списка сокращений и Списка литературы.

В первой главе исследован массовый состав космических лучей с энергиями  $10^{18} - 10^{20}$  эВ по данным наземной решетки эксперимента Telescope Array и получено значение среднего массового числа первичных частиц  $\ln A \geq 2.0 \pm 0.1(stat.) \pm 0.44(syst.)$  без заметной зависимости от энергии. Дополнительная ошибка из-за неопределенности модели адронных взаимодействий в атмосфере оценивается как  $\delta \ln A = 0.4$ .

Во второй главе диссертации, используя данные о распределении максимальной глубины развития ливней в экспериментах Auger (при энергиях  $10^{18} - 10^{18.5}$  эВ) и Telescope Array ( $10^{18.3} - 10^{19.3}$  эВ) с учетом экспоненциального «хвоста», определены ограничения на отношение содержаний протонов и ядер гелия:  $p/He > 7.3$  (QGSJET II-04),  $p/He > 24.0$  (EPOS-LHC) и  $p/He > 0.43$  (QGSJET II-04),  $p/He > 0.63$  (EPOS-LHC) соответственно; в скобках указаны использованные при этом модели взаимодействия частиц в земной атмосфере.

В третьей главе диссертации из анализа сильно наклонных ШАЛ получен верхний предел на поток астрофизических нейтрино по данным наземной решетки эксперимента Telescope Array  $EF_{\nu} < 1.58 \times 10^{-6}$  ГэВ см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> ср<sup>-1</sup> при энергиях выше  $10^{18}$  эВ.

Значительная часть результатов диссертационной работы получена с использованием разработанного автором метода машинного обучения, основанного на использовании алгоритма усиленных деревьев решений и позволяет исследовать большой массив

многомерных данных. Данный способ анализа использует данные наземной решетки эксперимента Telescope Array и основан на наборе наблюдаемых, чувствительных к составу первичных частиц. Данные наземных решеток экспериментов по изучению космических лучей ультравысоких энергий имеют статистику гораздо большую, чем статистика флюоресцентных детекторов, поэтому их использование в принципе позволяет улучшить точность полученных результатов.

Для достижения поставленных целей автором были созданы наборы модельных Монте-Карло событий наземной решетки эксперимента Telescope Array. Я. В. Жежер показала свою высокую квалификацию в использовании современного программного обеспечения для моделирования космических лучей сверхвысоких энергий, такого, как пакет CORSIKA и отдельные процедуры, разработанные в коллаборации Telescope Array.

Полученные результаты во многом являются уникальными — впервые в рамках коллаборации Telescope Array исследован массовый состав и поставлены верхние ограничения на поток нейтрино ультравысоких энергий по данным наземной решетки; полученные результаты на нижний предел доли протонов по отношению к гелию позволили уточнить ряд теоретических моделей происхождения космических лучей ультравысоких энергий, а также сделать выводы в пользу безопасной работы будущих 100 ТэВ ускорителей частиц.

При изучении диссертации возникло несколько замечаний по ее содержанию:

1. В диссертации, помимо рисунка 1.1, на котором изображены распределения используемых наблюдаемых для наборов модельных Монте-Карло событий и экспериментальных данных, не обсуждается относительная эффективность отдельных переменных для классификации событий.
2. В настоящее время точность определения состава космических лучей сверхвысоких энергий остается слишком низкой для решения многих

астрофизических задач. Это связано и с недостатком данных о самих космических лучах, и с неопределенностью моделей адронных взаимодействий, и, в некоторой степени, с методическими проблемами. Полезным в этом отношении была бы формулировка в диссертации направлений, по которым можно усовершенствовать разработанный автором метод усиленных деревьев решений.

3. В каждой главе текста в разделе Выводы следовало дать ссылки на соответствующие публикации автора, в которых были изложены полученные оригинальные результаты.

Приведённые замечания не снижают ценности диссертации.

По мнению оппонента работа Я. В. Жежер заслуживает высокой оценки. Диссертация является оригинальной научно - квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором теоретических исследований решается ряд важных задач по определению состава космических лучей ультравысоких энергий. Основные выносимые автором на защиту результаты являются новыми. Они были успешно представлены на многих российских и зарубежных научных конференциях и семинарах. Основные статьи опубликованы в престижных научных журналах и имеют высокий индекс цитирования. В частности, Я. В. Жежер являлась ответственным автором статьи коллаборации Telescope Array: R.U. Abbasi et al. 2019, "Mass composition of ultra-high energy cosmic rays with the Telescope Array Surface Detector Data", Phys. Rev D 99, 022002.

Автореферат верно отражает содержание диссертации.

Диссертация Я. В. Жежер «Исследование массового состава космических лучей и поиск нейтрино ультравысоких энергий по данным эксперимента Telescope Array», полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям согласно «Положению о присуждении ученых степеней», утвержденному

Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Яна Валерьевна Жежер несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Доктор физико-математических наук  
главный научный сотрудник  
лаборатории астрофизических исследований ИЗМИРАН

В. С. Птускин

23.04.2019

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН) 108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4.  
Тел. 8 (495) 851-0925. E-mail: vptuskin@izmiran.ru

Птускин Владимир Соломонович

Доктор наук по специальности 01.04.02 — теоретическая физика

Главный научный сотрудник лаборатории астрофизических исследований ИЗМИРАН

Список основных публикаций по теме диссертации за последние 5 лет:

1. V. Ptuskin, S. Rogovaya and V. Zirakashvili. On the determination of source spectrum of ultra high energy cosmic rays // *J. Phys. Conf. Ser.* 632, no. 1, 012101 (2015).
2. V. Ptuskin. Origin of Cosmic Rays: Modern status // *EPJ Web Conf.* 145, 03001 (2017).
3. V. N. Zirakashvili and V. S. Ptuskin. Cosmic ray acceleration in magnetic circumstellar bubbles // *Astropart. Phys.* 98, 21 (2018).
4. V. N. Zirakashvili and V. S. Ptuskin. Cosmic Rays and Nonthermal Radiation in Middle-Aged Supernova Remnants // *Astron. Lett.* 44, no. 12, 769 (2018).
5. L. Nava, S. Recchia, S. Gabici, A. Marcowith, L. Brahimí and V. Ptuskin. Non-linear diffusion of cosmic rays escaping from supernova remnants - II. Hot ionized media // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 484, no. 2, 2684 (2019).