

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Тана Найнг Со «Облученные космическими лучами метеоритные оливины как инструмент поиска сверхтяжелых элементов в природе»**, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «приборы и методы экспериментальной физики».

Актуальность темы исследования

В диссертационной работе Тана Найнг Со представлены результаты исследований зарядового спектра ядер космических лучей. Актуальность этих результатов определяется возможностью их использования при анализе астрофизических моделей, связанных с нуклеосинтезом и эволюцией звёзд. В качестве объекта исследований автором были выбраны метеориты (палласиты), которые, двигаясь в космическом пространстве, сотни миллионов лет облучаются космическими частицами. В диссертации подробно описана методика работы с кристаллами оливинов из палласитов, и методика определения зарядов ядер по характеристикам их следов. Полученные автором результаты позволяют говорить о существовании и распространенности сверхтяжелых элементов в природе, и утверждать, что изучение треков галактических космических лучей в кристаллах оливина из метеоритов открывает новые возможности в исследовании потоков и спектров космических лучей, имеющих большое значение для ядерной физики, физики элементарных частиц и астрофизики. Разработанные автором программные пакеты носят универсальный характер и успешно используются в других экспериментах.

Новизна и практическая значимость работы

Научная новизна работы проделанной работы заключается в следующем:

- Создана уникальная, не имеющая аналогов, база экспериментальных данных о зарядовом составе галактических космических лучей, включающая около 26000 треков ядер с $Z > 40$.

- Разработаны алгоритмы и созданы программы на языке C++ для успешно реализованного автоматизированного анализа и идентификации следов частиц в трековых детекторах.
- Выполнены оценки распределений вторичных частиц, возникающих при прохождении через метеорит тяжелых ионов и показано влияние фрагментации ионов на зарядовый спектр на основе расчетных моделей, разработанных на базе программного пакета Geant4.
- Разработана программа на языке C++ для демонстрации влияния отжига треков на зарядовый спектр ядер космических лучей.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, двух приложений. Список литературы содержит 149 наименования. Автором опубликовано 27 статей, в том числе 25 статей, входящих в базы ВАК, Scopus и Web of Science. Объем диссертации составляет 203 страниц, включая 92 рисунков и 13 таблиц.

Во введении обсуждается актуальность исследований, цель работы, её научная новизна и практическая значимость, приведены личный вклад, основные положения, выносимые автором на защиту и апробация работы.

В первой главе изложен обзор литературы по космическим лучам. Обсуждается их происхождение, состав и распространенность. Излагаются сведения о тяжелых и сверхтяжелых ядрах в космических лучах, методы их регистрации. Приведены зарядовые спектры тяжелых и сверхтяжелых ядер, полученных в спутниковых экспериментах.

Во второй главе рассматриваются свойства метеоритов и возможность их использования в качестве природных детекторов космических лучей. Описаны характеристики метеоритов, использованных в диссертационной работе – Marjalahti, Eagle Station, Сеймчан.

В третьей главе рассмотрены особенности прохождения ядер через вещество, описаны физические процессы, сопровождающие этот процесс. Представлены особенности взаимодействий налетающего ядра с электронными оболочками атомов и с их ядрами. Обсуждаются характеристики протравленных каналов – треков ядер, условия их возникновения и методы измерения их геометрических и динамических характеристик. Дано краткое описание типов трековых детекторов.

Созданное Тан Найнг Со программное обеспечение для анализа треков позволило автоматизировать процесс анализа характеристик ядерной фотоэмульсии, используемой в международных экспериментах по поиску явлений Новой физики - SHiP и SND@LHC.

В четвертой главе диссертации представлен эксперимент ОЛИМПИА и характеристики высокотехнологичного автоматизированного комплекса оптических микроскопов ПАВИКОМ, на котором проводились измерения в кристаллах оливинов из метеоритов. В данной главе описана авторская оригинальная методика поиска и измерения параметров треков, основанная на последовательных стадиях среза и травления. Каждая стадия включает травление, сошлифовку, поиск треков, измерение их характеристик и срез слоя в 50-70 мкм. Поскольку в процессе обработки появляется необходимость уточнения толщины срезанного слоя, автором был разработан специальный алгоритм определения толщины срезаемого слоя оливина при определении зарядов галактических ядер. Для автоматизированной обработки результатов измерений Таном Найнг Со написан и успешно применен программный пакет на языке C++.

Для получения связи между характеристиками трека и зарядом проведены калибровочные эксперименты.

Результаты измерений представлены в виде зарядовых распределений космических ядер. Кроме того, приведены оценки зарядов трёх сверхтяжёлых ядер и оценки их времени жизни.

В пятой главе обсуждаются возникшие в процессе обработки особые случаи при анализе треков ядер космических лучей в оливинах из метеоритов:

- Исследован градиент плотности треков ядер солнечных космических лучей, зарегистрированных в трех оливиновых кристаллах палласита Marjalahti.

- Исследованы зарядовые распределения необычной формы в некоторых кристаллах оливина. Показано, что это могло произойти в результате отжига треков при нагреве метеорита во время его прохождения через атмосферу.

- Исследованы причины возникновения треков особой формы. С этой целью были проведены расчёты в программном пакете GEANT4. Было показано, что причиной такой формы не могут быть ионизационные

процессы. Более вероятной причиной является фрагментация налетающих ядер.

- Рассмотрены причины искривления треков в метеорите Сеймчан и показано, что это есть результат столкновения метеорита с другим космическим телом. Вследствие этого произошел локальный нагрев метеорита, его плавление и смещение слоев оливина за счет конвекции.

В заключении сформулированы основные выводы, благодарности, приведены списки публикаций и использованной литературы.

В приложении приведены фрагменты кода разработанных программ.

Следует отметить некоторые недостатки и сделать следующие замечания:

1. На рисунке 72 в подписке написано Обычный спектр 21740 треков, а необычный спектр 6529 треков и всего 28269. В заключении приведена цифра 26000. Какие цифры правильные?
2. В тексте диссертации имеется ряд неточностей в формулировке и опечатки, например:
 1. На стр 35 по поводу уравнения 14 написано – учитывая геометрию пути, показанную на рисунке 10. Вместо 10 должен быть указан рисунок 18.
 2. На стр 27 автор написал «использованные метеориты с разными возрастами», но не обсуждал, откуда узнал о возрасте метеоритов.
 3. На рис 62 на оси-X написано «L,um». Что за единица um. Может быть μm .
 4. На стр 162 вместо рис. 90 должен быть номер 86.

Высказанные замечания не снижают принципиальной значимости диссертации. Необходимо отметить, что высокая научная новизна и актуальность приведенных данных, обоснованность выводов и достоверность результатов, полученных в ходе работы, не вызывают сомнений. Это подтверждается публикацией результатов работы в 27 статьях в ведущих международных реферируемых журналах. Автореферат диссертации полностью отражает содержание.

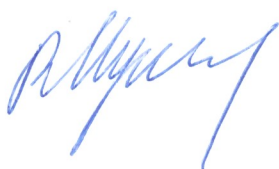
Диссертационная работа «Облученные космическими лучами метеоритные оливина как инструмент поиска сверхтяжелых элементов в природе» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским

диссертациям «Положением о присуждении ученых степеней», утверждённым постановлением правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор Тан Найнг Со безусловно заслуживает присвоения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01- «Приборы и методы экспериментальной физики».

Официальный оппонент:

Зав. Лаб. нейтринной астрофизики Отдела лептонов высокой энергии и нейтринной астрофизики ФГБУ «Институт ядерных исследований» РАН

д.ф.-м.н.



Мухамедшин Рауф Адгамович

8 сентября 2022 г.

Почтовый адрес: 117312 Москва, В-312, Пр-т 60-летия Октября 7а

Тел.: +7 (903) 212-3488

e-mail: rauf_m@mail.ru

Подпись д.ф.-м.н. Р.А. Мухамедшина заверяю.

Зав.отделом кадров ИЯИ РАН



Е.А.Горшкова

Список основных работ Р.А. Мухамедшина по теме защищаемой диссертации за последние 5 лет:

1. R.A. Mukhamedshin, V.S. Puchkov, S.E. Pyatovsky and S.B. Shaulov. Bull. Lebedev Physics Institute (2018), Vol.45, No.1, pp.380-384.
2. R.A. Mukhamedshin, V.S. Puchkov, S.E. Pyatovsky and S.B. Shaulov. AstroParticle Physics 102(2018) 32-38.
3. R.A. Mukhamedshin. Eur.Phys.J. C (2019) 79:441 (9 p.)
4. R.A. Mukhamedshin. Eur.Phys.J. C (2019) 134:584.
5. A.S.Borisov, V.G. Denisova, V.I. Galkin, ..., Mukhamedshin R.A., S.I. Nazarov, V.S. Puchkov, T. Sadykov. Physics of Atomic Nuclei 82 (2019) 827-833
6. R.A. Mukhamedshin. R.A. Eur.Phys.J. Plus (2021) 136:17.
7. R.A. Mukhamedshin. Eur.Phys.J. C (2022) 82:155.