



УТВЕРЖДАЮ

Заместитель Директора ПИЯФ

В.В. Воронин

«4» сентября 2022 г.

Отзыв

Ведущей организации

ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова» НИЦ «Курчатовский институт» 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.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

Диссертационная работа Тана Найнг Со связана с актуальными задачами современной физики, решаемыми на основе использования трековых детекторов. В частности, в ней детально описывается реализуемый автором в составе группы ФИАН эксперимент по поиску сверхтяжелых элементов в природе с помощью анализа треков ядер в оливинах из метеоритов. В работе изложена оригинальная методика работы с оливинами, представлены результаты исследования в виде зарядового распределения ядер галактических космических лучей, а также трёх найденных сверхтяжёлых ядер с зарядом $Z=119.6^{+10}$. Разработанные автором методики работы с трековыми детекторами (в том числе, с ядерной фотоэмульсией) успешно

применяются также в исследованиях на ускорителях элементарных частиц, в частности, в международных экспериментах по поиску явлений Новой физики (SHiP, NewsDM).

Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста (203 стр.), заключения, списка литературы и двух приложений. Во **введении** обоснована актуальность исследований, определена цель работы, её научная новизна и практическая значимость. Кроме того отражены личный вклад автора, основные положения, выносимые на защиту и апробация работы.

В **первой главе** обсуждается физика космических лучей их происхождение, состав и распространенность. Показана важность изучения космических лучей для фундаментальной и прикладной науки. Автор обсуждает важность поиска в природе, в частности, в космических лучах сверхтяжелых элементов острова стабильности, и показывает, что в земных лабораториях невозможно создать условия для их синтеза.

Во **второй главе** описываются метеориты как природные детекторы космических лучей, типы и особенности работы с ними. Представлена классификация метеоритов, их химический состав, приведены примеры для разных групп. Показано, что для целей диссертации наиболее подходящими метеоритами являются пироксены, в состав которых входит полупрозрачный минерал оливин.

В **третьей главе** дается описание процессов прохождения ядер через вещество трековых детекторов. Описаны физические процессы при прохождении ионов через вещество и модели возникновения травимых треков. Представлены характеристики протравленных каналов, условия их возникновения и методы их измерения. Рассмотрены типы трековых детекторов, обрабатываемых на оптических микроскопах (стекло, пластик, минералы, ядерная фотоэмульсия). В этой главе описан авторский программный комплекс для анализа характеристик российской ядерной

эмульсии, который был использован при разработке технологии её производства.

В четвёртой главе описана методика исследований треков ядер в кристаллах оливина из палласитов в эксперименте ОЛИМПИА с помощью установки ПАВИКОМ. Показано, что оливин является пороговым детектором ядер и их регистрация возможна в определённом диапазоне энергий. Кроме того, в диссертации приведены формулы для вычисления ошибок измерений длин треков ядер. В главе подробно описан разработанный автором алгоритм определения толщины срезаемого слоя оливина, который повышает точность определения зарядов галактических ядер. Представлены результаты калибровочных экспериментов, на основе которых построен алгоритм определения заряда ядер. Окончательные результаты измерений представлены в виде зарядовых распределений ядер в сравнении с результатами экспериментов на спутниках. Кроме того, приведены результаты измерений для трёх сверхтяжёлых ядер с зарядом $Z=119.6^{+10}$ и дана оценка их времени жизни.

В пятой главе описаны особые случаи при анализе треков ядер космических лучей в оливинах из метеоритов.

Была изучена радиационная история палласита по данным о градиенте плотности треков ядер в нескольких кристаллах. Было показано, что высокий градиент может быть результатом облучения низкоэнергичными солнечными космическими лучами.

Были исследованы особенности зарядовых спектров ядер из некоторых кристаллов метеоритного оливина. Путём численного решения дифференциального уравнения в частных производных было показано, что это может быть следствием отжига треков за счёт нагрева до высокой температуры при прохождении метеорита через атмосферу.

Были исследованы возможные причины возникновения треков необычной формы. Показано, что это не может быть результатом повышенной ионизации в области пика Брэгга. Более вероятной причиной является фрагментация налетающих ядер на два фрагмента, летящих под малым углом друг к другу.

Обсуждена основная причина искривления протравленных треков в некоторых кристаллах метеорита Сеймчан. Была высказана гипотеза о локальном нагреве метеорита в этом месте и последующей конвекции оливина. Эта гипотеза нашла подтверждение в работе сотрудников ГЕОХИ им. В.И. Вернадского РАН. Авторы этой работы исследовали кристаллы оливина этого метеорита фотохимическими методами, и пришли к выводу об ударном нагреве метеорита вплоть до температуры плавления оливина в результате его столкновения с другим космическим телом.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Получены данные о зарядовом составе около 26000 ядер ГКЛ с зарядом > 40 , в том числе более 22000 с $Z > 55$, которые согласуются с данными других экспериментов. Результаты работы являются весомым вкладом в мировую статистику экспериментов по поиску сверхтяжелых ядер в природе. Кроме того, зарегистрировано три ядра, величина заряда которых оценивается как $Z=119.6^{+10}$. Оцененное время жизни этих сверхтяжелых ядер – минимум десятилетия, на много порядков превышает время жизни трансфермиевых ядер, синтезированных на ускорителях. Полученные результаты являются аргументами в пользу теоретической гипотезы о существовании острова стабильности трансфермиевых природных ядер.

2. Разработаны алгоритмы и созданы программы на языке C++ для автоматизированного анализа и идентификации следов частиц в трековых детекторах.

3. Исследовано влияние отжига треков на зарядовый спектр ядер космических лучей по результатам измерений в оливинах из метеоритов.

4. Проведен анализ фрагментации сверхтяжёлых ядер при их прохождении через вещество метеорита и её влияние на появление треков особой формы.

5. Изучена радиационная история палласитов по данным трекового анализа и влияние солнечных космических лучей на плотность распределения треков ядер.

6. Проведён анализ особенностей треков в метеорите Сеймчан и получено объяснение искривления его протравленных треков.

7. На основе программных пакетов для автоматизированной обработки изображений в кристаллах оливинов создано программное обеспечение для оценки качества ядерной фотоэмульсии и обработки изображений зёрен AgBr полученных на электронном микроскопе.

Основные результаты диссертации используются специалистами по анализу нуклеосинтеза во Вселенной в результате r- и s- процессов.

Также, автором создано уникальное программное обеспечение, которое может быть использовано при распознавании и анализе треков частиц в твёрдотельных детекторах.

Ключевым итогом выполненных исследований диссертационной работы является успешно реализованный поиск тяжелых и сверхтяжелых ядер в космических лучах. Полученные результаты убедительно демонстрируют то, что трековая методика дает возможность получать приоритетные результаты при изучении треков ядер космических лучей в кристаллах оливина из метеоритов, что открывает новые возможности в исследовании потоков и спектров космических лучей в области тяжелых и сверхтяжелых ядер,

имеющих большое значение для ядерной физики, физики элементарных частиц и астрофизики.

Диссертация написана хорошим языком и довольно тщательно оформлена, тем не менее, в диссертации имеются следующие недостатки:

1) в диссертации приводится сравнение спектра космических ядер с экспериментами на спутниках, однако не проведено сравнение с другими экспериментами, которые использовали метеориты как детектор космических ядер;

2) в подписи к рисунку, показывающему зарядовое распределение ядер, для вертикальной оси использовано слово “содержание”, хотя общепринятым термином является слово “распространённость”, тем более, что на самом рисунке приведено слово “abundance”;

3) На рисунках 83(а) и 84 (а,б) не проведены линии, обозначенные номером 1.

Однако, указанные выше замечания не снижают общей высокой оценки работы.

Все использованные в диссертации экспериментальные результаты являются **новыми** и были получены автором **лично** или при его определяющем непосредственном участии.

Полученные результаты диссертации могут быть использованы при анализе распространённости элементов во Вселенной, а также могут представлять большой интерес для ЦЕРН, ОИЯИ, ПИЯФ, ИТЭФ, ИЯИ РАН, МГУ, МИФИ, МФТИ, а также в ряде других научных учреждений.

Список публикаций автора по теме диссертации включает 27 работы, опубликованных в ведущих международных реферируемых журналах, а материал диссертации **апробировался** автором на семинарах и многих

международных и национальных конференциях. **Автореферат** в целом верно отражает содержание диссертации.

Диссертация «Облученные космическими лучами метеоритные оливины как инструмент поиска сверхтяжелых элементов в природе» Тана Найнг Со соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук «Положением о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» и Постановление Правительства Российской Федерации от 20 марта 2021 г. № 426), а ее автор Тан Найнг Со заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01- Приборы и методы экспериментальной физики.

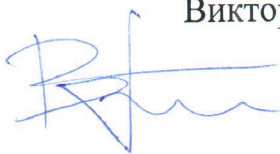
Отзыв составил доктор физ.-мат. наук Ким В.Т.,

Данный отзыв составлен по итогам обсуждения доклад Тана Найнг Со на семинаре ОФВЭ НИЦ КИ - ПИЯФ 14 июня 2022 г.

Зам. руководителя ОФВЭ по научной работе и заведующий лабораторией физики элементарных частиц, доктор физико-математических наук

«14» сентября 2022 года

Виктор Тимофеевич Ким



Почтовый адрес:

188300 г. Гатчина Ленинградской области, мкн Орлова роща, д. 1

НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ

Тел: (81371) 46722

Email: kim_vt@pnpi.nrcki.ru

Основные публикации В.Т. Кима за последние 5 лет по теме диссертации:

1. Tumasyan A., ... Kim V. et al., Study of dijet events with large rapidity separation in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 2/76 \text{ TeV}$ // JHEP 03 (2022) P. 189.
2. Sirunyan A.M., ... Kim V. et al., Search for long-lived particles decaying into muon pairs in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ collected with a dedicated high-rate data stream // JHEP 04 (2022) P. 062.
3. V.V. Abramov, ..., V.T. Kim, ... et al., Possible Studies at the First Stage of the NICA Collider Operation with Polarized and Unpolarized Proton and Deuteron Beams // Physics of Particle and Atomic Nuclei (2021) – Vol. 52. – P. 1044-1119.
4. A.Yu. Egorov and V.T. Kim, Production of dijets with large rapidity separation at colliders // J. Phys. Conf. Ser. 1690 (2020) 1, 012158.
5. Kim V.T., Matveev V.A., Pivovarov G.B., Skewed Sudakov regime, harmonic numbers, and multiple polylogarithms // Physical Review D 99 (2019), № 2, P. 025016.
6. Kim V.T., Pivovarov G.B., Skewed Sudakov Regime at One Loop // Physics of Particles and Nuclei Letters (2019) – Vol. 16. – P. 530.
7. Kim V.T., QCD Asymptotics at Collider Energies // Physics of Particles and Nuclei Letters (2019) – Vol. 16. – P. 414.
8. A. M. Sirunyan, ..., V. Kim et al., Electroweak production of two jets in association with a Z boson in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ // Eur. Phys. J. C 78 (2018) 589.
9. V.T. Kim, QCD Evolution of Nuclear Structure Functions at Large X: EMC Effect and Cumulative Processes // Phys. Part. Nucl. Lett. 15 (2018) no.4, 384-386.