УДК 550.42

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯДОВ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР ПРИ ПОИСКЕ ИХ В ПРИРОДЕ

А. Б. Александров¹⁻⁴, В. А. Алексеев⁵, А. В. Багуля¹, А. Е. Волков^{1,6,7}, А. А. Гиппиус¹, Л. А. Гончарова¹, С. А. Горбунов¹, В. М. Грачев⁸, А. Б. Дашкина⁴, Г. В. Калинина⁵, Н. С. Коновалова^{1,4}, Н. М. Окатьева^{1,4}, Т. А. Павлова⁵, Н. Г. Полухина^{1,4,8}, Н. И. Старков^{1,4}, Тан Найнг Со¹, М. М. Чернявский¹, Т. В. Щедрина^{1,4}

В статье представлены результаты поиска треков тяжеелых и сверхтяжелых ядер галактических космических лучей в диапазоне зарядов Z=26-129, идентифицированных в кристаллах оливина из метеоритов Марьялахти и Игл Стейшн. Полученная в эксперименте ОЛИМПИЯ база данных, включающая характеристики 21743 треков, на сегодняшний день является крупнейшей в пределах данного диапазона зарядов. В нее входят три трека сверхтяжелых ядер, $Z=119^{+10}_{-6}$, с оценкой минимального времени жизни около нескольких десятков лет, которые можно рассматривать как прямое экспериментальное доказательство существования естественных сверхтяжелых ядер из "острова стабильности".

Ключевые слова: сверхтяжелые ядра, галактические космические лучи, оливин, распознавание образов.

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: polukhinang@lebedev.ru.

 $^{^{2}}$ Неапольская лаборатория Национального института ядерной физики Италии, Неаполь.

³ Неапольский Университет имени Фредерико II, Неаполь.

 $^{^4}$ НИТУ "МИСиС", 119049 Россия, Москва, Ленинский пр-
т, 4.

 $^{^{5}}$ Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН), 119991 Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 19.

 $^{^6}$ Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", 123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

 $^{^7}$ Лаборатория ядерных реакций им. Г. Н. Флерова, ОИЯИ (ЛЯР ОИЯИ), 141980 Дубна, Московская область, Россия.

⁸ НИЯУ "МИФИ", 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

В эксперименте ОЛИМПИЯ (ОЛИвины из Метеоритов – Поиск тяжёлых И сверх-тяжёлых Ядер) проводятся исследования треков галактических ядер в оливинах из метеоритов на автоматизированной установке ПАВИКОМ, включающей микроскоп, видеокамеру и стол для передвижения по координатам X, Y и Z [1–3]. В настоящее время обнаружено и идентифицировано 21743 треков ядер галактических космических лучей, зарядовый состав которых представлен на рис. 1 в сравнении с результатами других экспериментов.

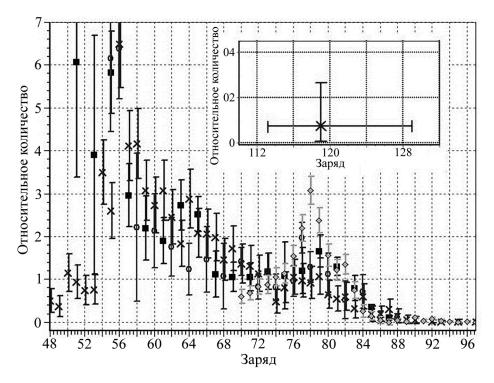


Рис. 1: Зарядовый спектр ядер галактических космических лучей по результатам различных экспериментов: ОЛИМПИЯ (кресты), HEAO-3 (квадраты) [4], ARIEL-6 (ромбы) [5] и UHCRE (круги) [6].

В процессе работы в метеорите Игл Стейшн было обнаружено три сверхдлинных трека с аномально большой скоростью травления [2]. На рис. 2 показаны их изображения на микроскопе при увеличении 20^{\times} , а на рис. 3 — схематическое изображение трека с рис. 2(a) с размерами отдельных частей. Размер поля зрения 555×444 мкм. С учетом погружения треков в глубину их длина оказалась равной 550 ± 5 мкм (трек на рис. 2(a), травление 8 часов), 590 ± 5 мкм (трек на рис. 2(b), травление 8.5 часов) и 680 ± 5 мкм (трек на рис. 2(b), травления 10 часов). При этих временах травления скорость травления сверхдлинных треков составляет примерно 69 ± 2 мкм/час.

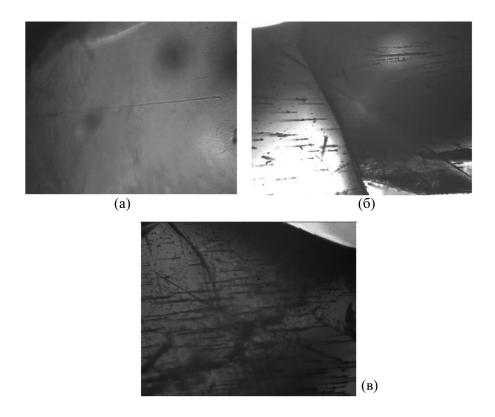


Рис. 2: Треки трех сверхтяжелых ядер в метеоритном оливине.

Однако трек на рис. 2(а) выходит из кристалла в эпоксидную смолу. Травящий раствор может проникать в эту область через возможный зазор между смолой и оливином и протравливать трек также и с этой стороны, а не только с поверхности кристалла. Но даже если считать, что процесс травления происходит с двух сторон и скорость травления в два раза меньше, т.е. 34.5 мкм/час, она всё равно чрезвычайно велика по сравнению с максимальной скоростью травления урана вблизи точки остановки, равной 26 мкм/час [2]. Треки на рис. 2(б) и 2(в) только одним концом заходят за границу кристалла, но каждый из них проходит через область, содержащую трещину, через которую также может проникать травящий раствор. Поэтому их скорости травления также следует поделить на два. В результате нижняя граница величины скорости травления составляет около 35 мкм/час.

Обычный метод оценки зарядов, принятый в нашей работе, основан на калибровочных кривых, ограниченных сверху зарядом Z=92 и скоростью травления 26 мкм/час [7, 8], и интерполяции внутри этого диапазона. Поэтому экстраполяция кривых в область 35 мкм/час может быть чреватой слишком большими ошибками. Кроме того, кинетика травления треков тяжелых ионов в оливине исследовалась и при помощи микро-

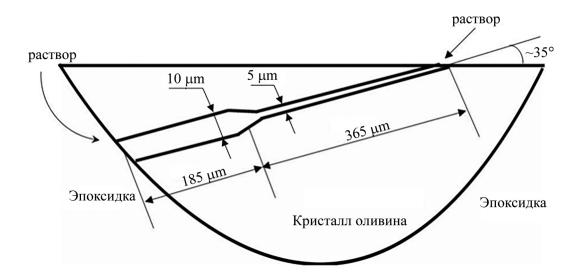


Рис. 3: Схематическое изображение трека с рис. 2(а) и процесса его травления.

скопической модели [9]. Учёт изменения химической структуры вдоль траектории иона в модели [10] показал, что ядро может быть идентифицировано по продольной скорости травления любого участка траектории, наблюдаемого в оптический микроскоп, если длина этого участка составляет более 200 мкм.

Поэтому для оценки зарядов трех сверхдлинных треков использовался другой метод. Трек на рис. 2(а) имеет довольно сложную геометрическую форму, которая может быть названа "шприц" [7]. Вначале он имеет довольно узкий участок шириной порядка 5 мкм, сменяющийся широкой частью шириной около 10 мкм. Треки такой формы составляют примерно 2% от общего числа треков. 98% всех треков, обнаруженных и идентифицированных в оливине, имеют такую же форму, как оба сверхдлинных трека на рис. 2(б) и 2(в). Широкая часть трека появляется в конце пути ядра перед точкой его остановки в оливине. Поскольку у трех обонаруженных треков эта часть довольно длинная, можно предположить, что точка выхода ядра из кристалла расположена недалеко от точки остановки. В этой области трека скорость травления ядер практически постоянна [7]. По этой причине можно считать скорость 35 мкм/час скоростью травления исследуемого ядра в точке остановки и воспользоваться ходом зависимости скорости травления для других ядер в этой области, известным из калибровочных измерений. На рис. 4 показана зависимость скорости травления вблизи точки остановки от величины заряда для пяти ядер, полученная из калибровочных облучений на ускорителях. Эта зависимость с довольно хорошей точностью может быть аппроксимирована прямой линией, которая показана на рис. 4 вместе с коридором ошибок на

95%-ом уровне достоверности. Если эту прямую экстраполировать в область скорости травления 35 мкм/час вместе с коридором ошибок, то, при решении обратной задачи, на этом уровне достоверности была получена оценка заряда $Z=119^{+10}_{-6}$.

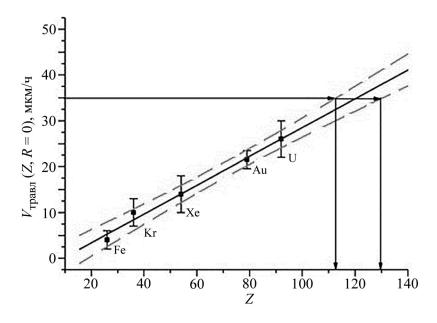


Рис. 4: Зависимость скорости травления в оливине вблизи точки остановки от величины заряда для пяти ядер, полученная на основе калибровочных экспериментов [11]. Пунктирные линии обозначают коридор ошибок на уровне достоверности 95%. Вертикальные линии определяют на уровне достоверности 95% возможный интервал зарядов ядер, трек которых имеет скорость травления 35 мкм/час в оливине.

В данной работе мы используем кристаллы оливина из двух метеоритов, Марьялахти и Игл Стейшн, причем сверхтяжелые ядра обнаружены только во втором. Возникает вопрос, почему треки сверхтяжелых ядер (три штуки) не найдены (пока) и в другом метеорите. По нашему мнению, ответ на этот вопрос заключается в том, что условия для формирования таких ядер являются экстраординарными и возникают чрезвычайно редко. В результате появление сверхтяжелых ядер – это единичные события, в отличие от более "легких" ядер таких, как, например, ядра урана, условия образования которых намного "мягче" и которые возникают намного чаще, создавая в космосе хоть и очень слабый, но регистрируемый поток. Кроме всего прочего, вероятность облучения зависит от близости детектора (метеорита) к источнику такого редкого излучения. Видимо, метеориту Игл Стейшн "повезло" больше.

Представленные данные демонстрируют эффективность метеоритного метода для изучения тяжелой составляющей галактических космических лучей. На сегодняшний день в эксперименте ОЛИМПИЯ обнаружено и идентифицировано 21743 трека ионов тяжелее железа, что даёт статистически значимые данные об относительном количестве тяжелых и сверхтяжелых ядер в галактических космических лучах. Важнейшим результатом эксперимента является обнаружение трёх треков ядер с зарядами в диапазоне 119^{+10}_{-6} . В настоящее время обработка кристаллов продолжается, и есть основания надеяться не только на дальнейшее увеличение статистики, но и на обнаружение новых интересных событий.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] В. Л. Гинзбург, Н. Г. Полухина, Н. И. Старков и др., Докл. РАН **402**(4), 1 (2005).
- [2] А. В. Багуля, Л. Л. Кашкаров, Н. С. Коновалова и др., Письма в ЖЭТФ 97(12), 811 (2013).
- [3] A. B. Aleksandrov, I. Yu. Apacheva, E. L. Feinberg, et al., Nucl. Instr. Meth. **535**(1-2), 542 (2004).
- [4] W. R. Binns, T. L. Garrard, P. S. Gibner, et al., Astrophys. J. **346**, 997 (1989).
- [5] D. O'Sullivan, A. Thompson, C. Domingo, et al., Nucl. Tracks Radiat. Meas. 15, 673 (1988).
- [6] J. Donnelly, A. Thompson, D. O'Sullivan, et al., Astrophys. J. 747, 1 (2012).
- [7] V. Alexeev, A. Bagulya, M. Chernyavsky, et al., Astrophys. J. 829(2), 120 (2016).
- [8] В. А. Алексеев, А. В. Багуля, А. Е. Волков и др., Краткие сообщения по физике ФИАН 44(11), 41 (2017).
- [9] S. A. Gorbunov, A. I. Malakhov, R. A. Rymzhanov, and A. E. Volkov, J. Phys. D. Appl. Phys. **50**(39), 395306 (2017).
- [10] S. A. Gorbunov, R. A. Rymzhanov and A. E. Volkov, Scientific Reports 9, 15325 (2019).
- [11] Н. Г. Полухина, УФН 6(182), 656 (2012).

Поступила в редакцию 2 декабря 2019 г. После доработки 2 декабря 2019 г.

Принята к публикации 3 декабря 2019 г.