

## ПОИСК СЛЕДОВ ТЯЖЕЛЫХ И СВЕРХТЯЖЕЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЯДЕР В ОЛИВИНАХ ИЗ МЕТЕОРИТОВ

В.П.Перельгин, С.Г.Стеценко, Г.Н.Флеров

Представлены результаты исследования следов ядер космических лучей с  $Z \geq 50$  в кристаллах оливина из метеоритов. При обработке кристаллов применялась методика контролируемой термической регрессии следов ядер. В приведенном спектре длин следов ядер с  $Z \geq 50$  выделяются группы длиной  $190 \div 230$  мкм, отнесенные к Th-U, и аномально протяженных следов длиной  $310 \div 360$  мкм. Обсуждается предположение о существовании в космических лучах ядер сверхтяжелых элементов (СТЭ) с  $Z \geq 110$ . Детально обоснованы эксперименты по однозначной идентификации происхождения аномально протяженных следов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

### Search for the Tracks of Heavy and Superheavy Cosmic Ray Nuclei in Olivines from Meteorites

V.P.Perelygin, S.G.Stetsenko, G.N.Flerov

The results of investigating the tracks of cosmic ray nuclei with  $Z \geq 50$  in olivine crystals from meteorites are presented. The olivine crystals were processed using the technique of the controlled annealing of nuclear tracks. The obtained spectrum of track lengths of nuclei with  $Z \geq 50$  exhibits two pronounced groups of tracks:  $190\text{-}230 \mu\text{m}$  tracks, attributed to Th-U nuclei, and anomalous  $310\text{-}360 \mu\text{m}$  tracks. The hypothesis that superheavy elements (SHE) with  $Z \geq 110$  may be present in cosmic ray nuclei is discussed. Experiments on unambiguous identification of the origin of anomalously extended tracks are discussed in detail.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

В работе изложены результаты экспериментов по изучению зарядового спектра галактических ядер и поиску в его составе ядер сверхтяжелых элементов.

Такие исследования проводились с 1967 года сначала с помощью ядерных эмульсий, а затем — полимерных трековых детекторов, облучавшихся на шарах-зондах или искусственных

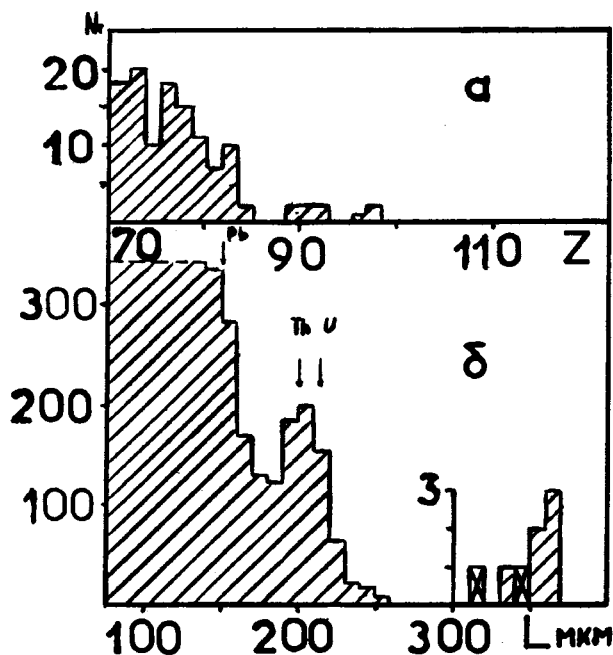


Рис.1. Результаты трековых исследований по поиску ядер СТЭ в космических лучах: а — распределение атомных номеров  $Z$  ядер, зарегистрированных в стопке полимерных детекторов на орбитальной станции "Скай-лэб" /2/; б — распределение травимых длин треков ядер с  $Z > 50$  в оливинах из метеоритов. Отжиг при  $430^{\circ}\text{C}$ , в течение 32 ч. Перечеркнуты треки, низкоэнергетические части которых выходили за пределы кристаллов.

спутниках Земли /1,2/. За 10 лет работы было зарегистрировано всего 23 трека ядер с  $86 \leq Z \leq 96$  и ни одного события в области  $Z \geq 100$ .

Из этих экспериментов наиболее информативными являются данные о распространенности ядер с  $Z > 50$ , полученные Прайсом с сотрудниками при экспонировании большой стопки пластиков на орбитальной станции "Скайлэб" в 1974-1975 гг. (рис.1а). Распространенность ядер группы Th-U, полученная в этом опыте, составляла  $2 \cdot 5 \cdot 10^{-7}$  от распространенности ядер Fe для ядер с  $E > 300$  МэВ/нукл. /2,3/. Всего в этом опыте было зарегистрировано 7 ядер группы  $90 \leq Z \leq 96$ . Очевидно, что распространенность СТЭ много меньше распространенности Th-U, поэтому в этом эксперименте исключалась возможность обнаружения таких ядер. Для поиска СТЭ нужно увеличить число зарегистрированных ядер с  $Z \geq 90$  в сотни раз. Возможное решение этой задачи заключается в исследовании треков космических ядер в кристаллах оливина из метеоритов. Главное преимущество таких кристаллов — их способность регистрировать и сохранять треки ядер космических лучей с  $Z \geq 23$  в течение сотен миллионов лет /4/. Оценки показывают, что за время  $10^8$  лет через каждый квадратный сантиметр поверхности метеорита прошло  $\approx 2 \cdot 10^4$  ядер группы Th-U. Имея высокие энергии ( $> 500$  МэВ/нукл.), такие ядра могут проходить до полной остановки в веществе метеорита

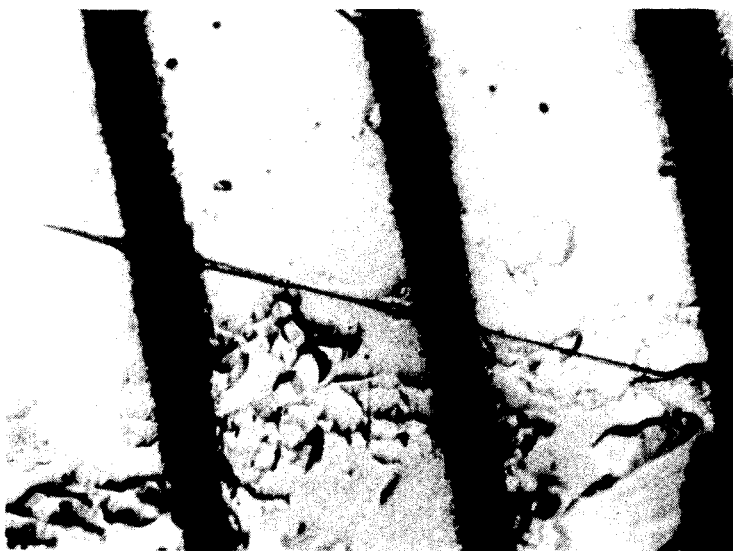
несколько сантиметров и создают в самом конце пробега такие зоны дефектов длиной  $\approx 1$  мм, которые можно наблюдать после химического травления в оптическом микроскопе при увеличении 100X-500X. Учет ядерных взаимодействий и спада энергетического спектра показал, что наибольшее количество ядер останавливается в слое  $1 \div 2$  см от доатмосферной поверхности<sup>/5/</sup>, но обычно при прохождении атмосферы Земли метеорит теряет слой  $5$  см<sup>/6,7/</sup>, в котором остановилось более 90% ядер с  $Z > 50$ . Исследуя кристаллы из метеоритов, мы по плотности треков ядер группы Fe определяли глубину расположения кристаллов от доатмосферной поверхности<sup>/7,10/</sup>. Плотность треков ядер группы железа в метеоритах-палласитах Марьялахти и Игл Стейшн оказалась в пределах  $10^{10} \div 10^{11} \text{ см}^{-3}$ , столь высокая плотность треков ядер указывает на то, что в этих кристаллах может содержаться до  $10^3 \text{ см}^{-3}$  треков ядер группы Th-U. Таким образом, несмотря на большой объем потерянной информации используемая нами методика позволяет во много раз повысить чувствительность поиска СТЭ по сравнению с уровнем, достигнутым с помощью ядерных эмульсий и пластиков<sup>/1-3/</sup>.

Для идентификации зарядов ядер космических лучей использовалось соответствие между полной травимой длиной трека и атомным номером ядра<sup>/5,8/</sup>. Идентификация ядер осложнялась частичной регрессией треков за время пребывания метеорита в космическом пространстве. Такая регрессия приводит к отличию в длинах треков разного возраста для ядер с одинаковым  $Z$ <sup>/9/</sup>. Сильно затрудняла поиск и идентификацию треков наиболее тяжелых ядер высокая плотность треков ядер группы Fe. Поэтому мы применили методику контролируемой регрессии (отжига) треков<sup>/10/</sup>. Нагревание кристаллов до  $430^\circ \text{C}$  и выдержка в течение 32 ч при этой температуре приводили к полному исчезновению травимых треков ядер группы Fe и устранению зависимости длин треков от их возраста для треков ядер с  $Z > 50$ <sup>/11/</sup>.

По оценкам, сделанным в рамках модели Каца и Кобетича<sup>/12,13/</sup>, травимая длина неотожженных треков ядер Xe, U и  $Z = 114$  составляет соответственно 230 мкм, 1160 и 1830 мкм. Процесс отжига мы контролировали по изменению длины треков ядер Xe, Pb, U, полученных после облучения кристаллов на ускорителе УНИЛАК. После отжига полная травимая длина треков ядер Xe составляла  $26,5 \pm 1,3$  мкм. Используя эту точку как калибровочную, по уточненной В.А.Дитловым<sup>/13/</sup> модели Каца-Кобетича можно рассчитать, что длина треков ядер U уменьшится до 210-230 мкм, ядер с  $Z = 114$  — до 340-380 мкм.



а



б

Рис.2. Микрофотографии протравленного кристалла оливина, облученного лазером (а) и через систему щелей ускоренными ионами  $^{59}\text{Ni}$  (б).

Для протравливания треков, полностью заключенных в объеме кристаллов, необходимо ввести внутрь объема травящий раствор. С этой целью кристаллы облучались специально сформированными по длительности, форме и мощности импульсами лазера. В облученных лазером кристаллах образовывалась система микротрещин (рис.2а), обеспечивающих про-

никновение раствора внутрь кристалла <sup>/11, 14/</sup>. Травление оливинов проводилось раствором <sup>/15/</sup> в течение ~ 4 дней в герметическом объеме при температуре 100°С.

Всего в опытах с отоженными кристаллами было просмотрено около 12 см<sup>3</sup> оливинов, главным образом, из метеорита Марьялахти. Измерялись все треки длиной более 50 мкм. Результаты этих измерений представлены на графике (рис.16). Как следует из рис.16, в распределении длин треков выделяется группа 190-220 мкм, а также 8 протяженных треков длиной 310-360 мкм.

Приведенный на рис.16 спектр длин треков позволяет выдвинуть предположение о существовании в космических лучах ядер сверхтяжелых элементов с  $Z \geq 110$ .

В самом деле, группа треков 190-220 мкм, очевидно, относится к ядрам U. Минимум в области длин треков 160-180 мкм обусловлен малыми временами жизни атомных ядер в области  $83 < Z < 90$ . Увеличение числа треков в области 120 ÷ 150 мкм согласуется с относительно высокой распространенностью группы Pt - Pb. Распространенность ядер, отвечающих трекам длиной 190-220 мкм, по отношению к железу составляет  $1 \div 2 \cdot 10^{-7}$ . Этот результат, в той же области энергий ядер, согласуется с распространенностью ядер Th-U в космических лучах, полученной в экспериментах, выполненных с трековыми и электронными детекторами, на шарах-зондах и спутниках <sup>/1-3/</sup>.

Треки аномальной длины (310-360 мкм) образуют группу, далеко отстоящую от группы Th-U. Такая группа в спектре длин треков соответствует ядрам с  $Z = 110 \div 114$  <sup>/18/</sup>. Отсутствие треков длиной 260-310 мкм в спектре длин может, естественно, объясняться коротким временем жизни ядер с  $96 < Z < 110$ .

Предположение, что группа треков 310 ÷ 360 мкм соответствует ядрам с  $Z \geq 110$ , подтверждается полученными нами данными о разности скоростей травления отдельных частей треков <sup>/16/</sup>, а также совпадением направления треков 310-360 мкм с максимумом углового распределения треков ядер с  $Z > 50$  в тех же кристаллах.

Таким образом, данные рис.16 позволяют дать оценку распространенности ядер СТЭ в космических лучах. Эта величина составляет  $(3 \div 10) \cdot 10^{-8}$  от распространенности ядер группы Th-U, что в  $10^3 \div 10^4$  раз выше предела содержания СТЭ в веществе Солнечной системы, полученного при изучении активности спонтанного деления каменных метеоритов Алленде и др. <sup>/17/</sup>. Это отличие может естественным образом объясняться как разницей в возрасте Солнечной системы  $\sim 4,6 \cdot 10^9$  лет и космических лучей  $\sim 10^7$  лет, так и единствен-

ностью события нуклеосинтеза в Солнечной системе и непрерывностью этого процесса во Вселенной.

Полученная нами величина согласуется с оптимистическими оценками нуклеосинтеза в  $\gamma$ -процессе. Согласно предсказаниям <sup>18/</sup> содержание СТЭ в космических лучах составляет  $10^{-1} - 3 \cdot 10^{-4}$  от распространенности Th-U. Позднейшие оценки, учитывающие "обрезание" синтеза в  $\gamma$ -процессе из-за запаздывающего деления, предсказывают либо уменьшение выхода ядер СТЭ в  $10 \div 500$  раз <sup>19, 20/</sup>, либо полный запрет синтеза ядер СТЭ <sup>21/</sup>. Разногласия в полученных оценках показывают, что экспериментальное решение вопроса о существовании и распространенности СТЭ весьма важно для понимания процесса нуклеосинтеза.

Весомым доказательством того, что обнаруженные треки относятся к ядрам СТЭ, явилось бы наблюдение в конце пробега этих ядер треков осколков спонтанного деления. Весьма вероятно, что за среднее время существования треков ядер в метеорите Марьялахти  $\approx 10^8$  лет, остановившиеся в оливине ядра СТЭ могли испытать спонтанное деление. Из-за пороговых свойств оливина остановившееся ядро СТЭ находится на расстоянии  $\approx 10$  мкм от окончания травимого трека. Модельные эксперименты показывают, что использованный нами отжиг может увеличить это расстояние до  $\approx 25$  мкм, а также несколько уменьшить длину треков осколков спонтанного деления от  $\approx 18$  до  $12 \div 15$  мкм. В настоящее время разрабатывается методика выявления треков осколков деления с использованием ускоренных ядер <sup>235</sup>U и последующего их деления тепловыми нейтронами.

Естественно, для обнаружения эффекта спонтанного деления СТЭ требуется большее число треков в группе  $310 \div 360$  мкм, что требует увеличения производительности просмотра и измерения. Одна из возможностей, показанная на рис.26, заключается в облучении кристаллов тяжелыми ионами с  $Z > 30$  через многощелевой коллиматор. В результате повышается эффективность выявления треков, облегчается просмотр кристаллов и создаются условия для автоматизации измерения треков.

В заключение авторы выражают глубокую признательность Г.М.Тер-Акопяну, Ю.Ц.Оганесяну за ряд полезных советов и обсуждений, а также П.Амбрустеру, Р.Шпору, Р.Брандту и П.Фатеру за предоставленную возможность проведения калибровок кристаллов оливина ускоренными тяжелыми ионами и плодотворные дискуссии.

## Л и т е р а т у р а

1. Fowler P.H. et al. Proc. of the 15th Int. Cosmic Ray Conf., Plovdiv, 1977, 1, p.8,275.
2. Shirk E.K., Price P.B. Astrophys.J., 1978, 220, p.719.
3. Fowler P.H. et al. Proc. of the 18th Int.Cosmic Ray Conf., Bangalor, 1983, vol.1, p.34.
4. Maurette M., Pellas P., Walker R.M. Nature, 1964, 204, p.871.
5. Otgonsuren O. et al. Astrophys.J., 1976, 210, p.258.
6. Flerov G.N. et al. Geoch.Cosmoch.Acta, 1976, 40, p.305.
7. Перельгин В.П. и др. Геохимия, 1977, №6, с.863.
8. Лхагвасурен Д.и др. Изв.АН СССР, сер.физ., 1979, 43, с.862.
9. Кашкарова В.Г., Перельгин В.П. Метеоритика, 1979, №38, с.55.
10. Kapuscik A. et al. Proc. 6th Int.Conf. on Nucl. Photography. CEPI, Roma, 1966, p.458.
11. Lhagvasuren D. et al. Solid State Nuclear Track Detector. (Ed. by H.Francaus et al.). Pergamon Press, 1980, p.997.
12. Katz R., Kobetich E.I. Phys.Rev., 1968, 170, p.402.
13. Ditlov V.A., Perelygin V.P., Stetsenko S.G. Abstracts of 12th Int. Conf. on SSNTD, Acapulco, Mexico, 1983, p.5.
14. Перельгин В.П., Стеценко С.Г. Письма в ЖЭТФ, 1980, 32, с.622.
15. Krishnaswami S. et al. Science, 1972, 1974, p.287.
16. Перельгин В.П. и др. Международная школа-семинар по физике тяжелых ионов. ОИЯИ, Д7-83-644, Дубна, 1983, с.558.
17. Flerov G.N., Ter-Akopian G.M. Rep.Prog.Phys., 1983, 46, No.7, p.817.
18. Schramm D.N., Fiset E.O. Astrophys.J., 1973, 198, p.552.
19. Кузнецов В.И. ЯФ, 1979, 30, с.321.
20. Klapdor H.V., Ota T., Metzinger J. Z.Phys.A, 1981, 299, p.213.
21. Klapdor H.V. Международная школа-семинар по физике тяжелых ионов. ОИЯИ, Д7-83-644, Дубна, 1983, с.128.

Рукопись поступила 12 марта 1985 года.