

Фрагментация ядер урана в железо-никелевой матрице палласитов: теоретическая оценка эффекта наложения ядер-фрагментов на распространенность первичного потока галактических космических лучей

А. В. Багуля¹, Л. А. Гончарова¹, А. И. Ивлиев², Г. В. Калинина², Л. Л. Кашкаров²,
Н. С. Коновалова¹, Н. М. Окатьева¹, Н. Г. Полухина¹, А. С. Русецкий¹, Н. И. Старков¹

¹Физический Институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

²Институт геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского РАН, Москва

bagulya@sci.lebedev.ru; leokash@mail.ru

Приводятся результаты теоретических расчетов величин выхода ядер – продуктов процесса фрагментации высокоэнергичных (400 и 1000 МэВ/нуклон) ядер урана при их взаимодействии с ядрами железо-никелевого сплава, отвечающего по своему составу металлической матрице палласитов.

Ключевые слова: оливин, галактические космические лучи, треки заряженных частиц, фрагментация ядер урана, железо-никелевая мишень

Ссылка: Багуля, А. В., А. Б. Александров, М. С. Владимиров, Л. А. Гончарова, А. И. Ивлиев, Г. В. Калинина, Л. Л. Кашкаров, Н. С. Коновалова, Н. М. Окатьева, Н. Г. Полухина, А. С. Русецкий, Н. И. Старков (2012), Фрагментация ядер урана в железо-никелевой матрице палласитов: теоретическая оценка эффекта наложения ядер-фрагментов на распространенность первичного потока галактических космических лучей, *Вестник ОНЗ РАН*, 4, NZ9001, doi:10.2205/2012NZ_ASEMPG

Введение

При трековых исследованиях зарядового спектра ядерной составляющей галактических космических лучей (ГКЛ), проводимых с 2006 года группой научных сотрудников Лаборатории элементарных частиц ФИАН и Лаборатории космохимии ГЕОХИ по программе проекта ОЛИМПИА [Ginzburg *et al.*, 2005], используются кристаллы оливина, выделяемые из железо-никелевой матрицы палласитов.

Методика идентификации заряда ядер основана на экспериментально установленной зависимости между скоростью травления трека вдоль следа торможения и величиной его остаточного пробега [Kashkarov *et al.*, 2008]. Однако, в результате происходящего в (Fe,Ni)-матрице палласитов процесса фрагментации, главным образом, ультра тяжелых ядер ГКЛ, происходит как занижение числа регистрируемых ультра тяжелых ядер ГКЛ, так и возрастание потока вторичных более легких ядер – продуктов процесса фрагментации.

В работе представлены результаты теоретических расчетов величины эффекта фрагментации высокоэнергичных (400 и 1000 МэВ/нуклон) ядер урана при их взаимодействии с ядрами железо-никелевого сплава, отвечающего по своему составу металлической матрице палласитов.

Методика теоретических расчетов

Количественные вычисления выхода ядер различных элементов – продуктов процесса фрагментации ядер урана при взаимодействии с ядрами мишени ($\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$) выполнены путем компьютерного моделирования процесса по программе GEANT4 [Agostinelli *et al.*, 2003]. В пакете GEANT4 для вычисления потерь энергии ионов в веществе предусмотрен учет всех возможных механизмов, в частности, осуществляется расчет тормозных способностей по формулам Бете-Блоха и интерполяция данных на основе таблиц ICRU (International Commission on Radiological Units and Measurements).

Для моделирования используется созданный при участии сотрудников ФИАН пакет Hadr01, входящий в состав GEANT4 в качестве официального примера его применения. Он позволяет моделировать процесс прохождения пучков ядер различных элементов через вещество. Результатом модельных расчетов являются распределения как первичных, так и вторичных ядер по параметрам, доступным для дальнейшего анализа. Наиболее информативными являются параметры, характеризующие потери энергии первичных ядер пучка вдоль следов их торможения,

а также энергия и заряд вторичных ядер. К настоящему времени проведены тестовые расчёты прохождения ядер ^{131}Xe , ^{207}Pb , ^{238}U через вещество в широком спектре энергий и вещества мишени. Результаты модельных расчётов дают хорошее согласие в пределах статистических ошибок с данными таблиц [Hubert et al., 1990], где представлены тормозные способности и пробег ионов с зарядами $2 \leq Z \leq 103$ для диапазона энергий от 2.5 до 500 МэВ/нуклон в различных материалах.

Результаты и обсуждение

Результаты расчета выхода ядер продуктов фрагментации ядер урана при взаимодействии с ядрами вещества мишени $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$ -состава представлены на следующих графиках и в таблицах.

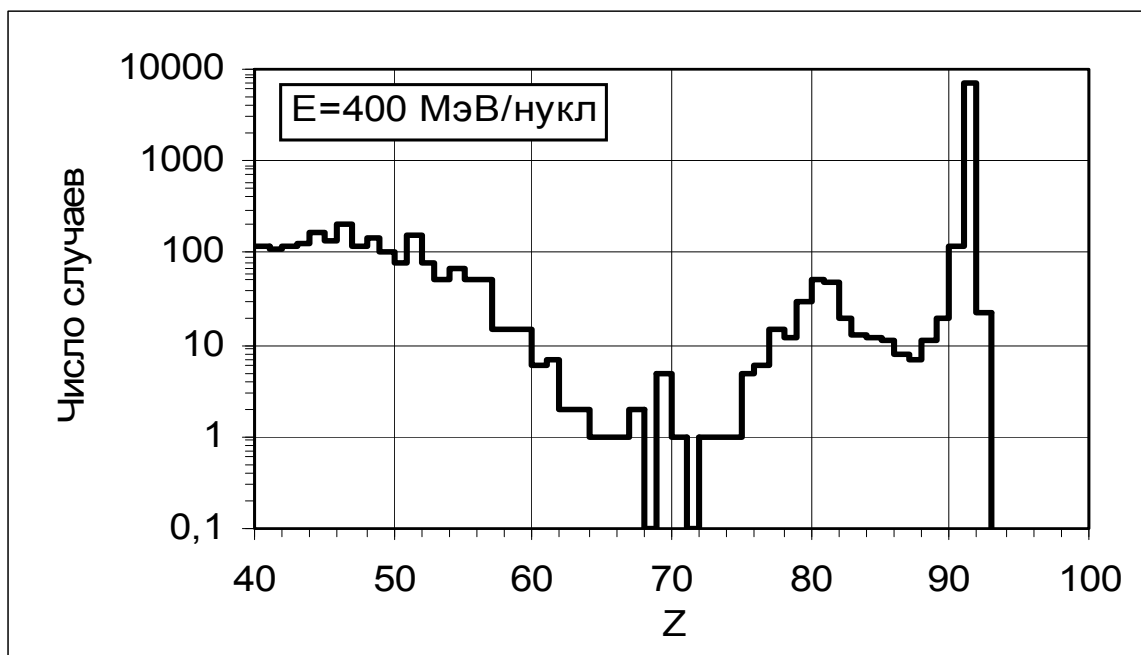


Рис. 1. Зарядовый состав ядер – продуктов фрагментации ускоренных ядер урана ($E = 400$ МэВ/нуклон) при пролете $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$ мишени толщиной 10 мм

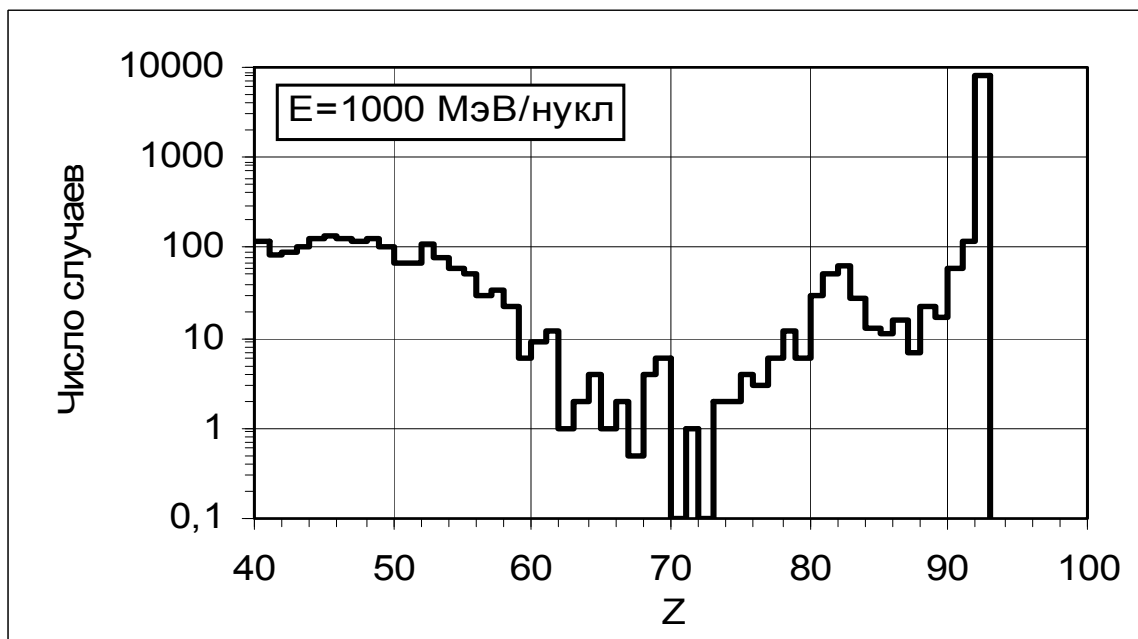


Рис. 2. Зарядовый состав ядер – продуктов фрагментации ускоренных ядер урана ($E = 1000$ МэВ/нуклон) при пролете $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$ мишени толщиной 10 мм

Фрагменты ядер урана с $E_0 = 95$ ГэВ.

В зависимости от энергии ядер фрагментов длина их пробега в контактирующем с $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$ -матрицей оливине может составлять от десятков микрон до нескольких миллиметров при их энергии от ~ 10 до ~ 1000 МэВ/нуклон, соответственно.

Распределение числа ядер урана с $E_0 = 95$ ГэВ (400 МэВ/нуклон) по энергии и соответствующей длине их остаточного пробега (RR_{ol}) в оливине, контактирующем с $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$ матрицей палласитов, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Распределение ядер U с $E_0 = 95$ ГэВ по энергии и соответствующей длине их остаточного пробега (RR_{ol}) в оливине после прохождения $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$ – мишени толщиной 10 мм

Группа Ядер	E, ГэВ	RR_{ol} , мм	ΣN_U	$\Sigma N_U / N_{U,0}^{(*)}$
I	30.5–22.5	1.7–1.0	683	~ 0.07
II	22.5–13.5	1.0–0.5	2124	~ 0.2
III	13.5–5.0	0.5–0.15	3108	~ 0.3
IV	≤ 5.0	≤ 0.15	4085	~ 0.4

(*) Число ядер урана в первичном пучке $N_{U,0} = 10000$.

Для регистрации треков, образуемых этими ядрами в оливине палласитов наибольший интерес представляют ядра II-й и III-й групп, RR_{ol} для которых лежит в интервале от ~ 1.0 до ~ 0.15 мм, т.е. в пределах протяженности «цилиндрической» зоны травимого участка трека. Суммарный поток этих ядер равен $\sim 50\%$ от $N_{U,0}$. Ядра I-й группы, на долю которых приходится $\sim 7\%$ от $N_{U,0}$, вылетают в контактирующий оливин, образуя треки в пределах их протяженной зоны «иглы». Ядра IV-й группы составляют фон сравнительно короткопробежных треков ($RR_{ol} \leq 0.15$ мм), составляющих по плотности $\sim 40\%$ от $N_{U,0}$.

Фрагменты ядер U с $E_0 = 238$ ГэВ

В распределении числа ядер урана с $E_0 = 238$ ГэВ (1000 МэВ/нуклон) по энергии на выходе $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$ – пластины 10 мм толщины при $E = (180 \pm 10)$ ГэВ наблюдается пик с числом ядер ~ 1100 , т.е. около 10% от $N_{U,0}$, представляющих первичные ядра урана, потерявшие при прохождении мишени ~ 60 ГэВ от начальной энергии. RR_{ol} для этих ядер составляет ~ 25 мм. Число ядер урана с $RR_{ol} = 0.5 - 1,0$ мм (при $E_U = 20 \pm 2$ ГэВ) составляет 520 ядер ($\sim 0,5\%$ от $N_{U,0}$). Ядра U с RR_{ol} от ~ 1 до 20 мм составляют основную группу ($\sim 90\%$ от) ядер, образующих треки в зоне «иглы».

Выход ядер-фрагментов

Для пучка первичных ядер урана с $E_0 = 95$ ГэВ результаты расчета выхода ядер различных элементов, условно разделенных на несколько групп, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Относительный выход ядер – продуктов фрагментации урана с энергией $E_0 = 95$ ГэВ в $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$ – мишени толщиной 10 мм

Группа ядер		$\Sigma N_Z^{(*)}$	$\Sigma N_Z / N_{U,0}$
№	Z		
I	40–49	1253	0.13
II	50–59	585	0.059
III	60–69	27	0.0023
IV	70–79	72	0.007
V	80–89	192	0.019
VI	90–92	7142	0.71

(*) Число ядер урана в первичном пучке $N_{U,0} = 10000$.

Суммарный выход ядер-фрагментов с $Z \geq 40$ составляет около 90% от $N_{U,0}$. Среди них на долю ядер II-й, III-й и IV-й групп приходится примерно 7% . Ядер-фрагментов с Z в интервале 80–89 наблюдается около 20% . Наибольший вклад, около 70% приходится на ядра с зарядом в интервале $Z = 90 - 92$.

Для пучка первичных ядер урана с $E_0 = 238$ ГэВ результаты расчета выхода ядер-фрагментов приведены в таблице 3.

Таблица 3. Относительный выход ядер – продуктов фрагментации урана с энергией $E_0 = 238$ ГэВ в $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$ - мишени толщиной 10 мм

Группа ядер		ΣN_Z	$\Sigma N_Z / N_{U,0}^{(*)}$
№	Z		
I	40–49	1145	0.11
II	50–59	529	0.053
III	60–69	35	0.0035
IV	70–79	36	0.0036
V	80–89	258	0.026
VI	90–92	8180	0.81

(*) Число ядер U в первичном пучке $N_{U,0} = 10000$.

В распределении по Z ядер-фрагментов, кроме затормозившихся 8180 ядер урана (~ 82% от суммарного потока первичных ядер урана $N_{U,0}$) на долю сверхтяжелых ядер фрагментов с $Z = 80–89$ приходится около 2.5%. Ядра с зарядом в интервале 60–79 составляют ~ 0.7%. Примерно 10% и 5% приходится на ядра I-й и II-й групп, соответственно.

Выводы

Количественная оценка выхода ядер-фрагментов по отношению к падающему пучку ядер урана с энергией 400–1000 МэВ/нуклон при толщине ($\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$)-мишени 10 мм показала:

Выход вторичных ядер с зарядом в интервалах $40 < Z < 49$ и $50 < Z < 59$ составляет ~ (11–13) % и ~ (5–6) %, соответственно.

На ядра с зарядом в интервале $60 < Z < 79$ приходится меньше ~ 1% от общего числа образующихся ядер-фрагментов.

Примерно (2–2.5) % ядер-фрагментов приходится на группу с зарядом $Z = 80–89$.

Доля ядер группы актинидов (Th-U) с зарядом $Z = (90–92)$ и энергией 400–1000 МэВ/нуклон, не претерпевших фрагментации в ($\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$)-мишени 10 мм толщины, составляет ~ (70–80)%.

Предварительная оценка суммарной величины эффекта наложения ядер – продуктов фрагментации высокоэнергичных ядер урана на распространенность первичных ядер ГКЛ с зарядом $50 < Z < 89$ не превышает ~ 10 %, что, вероятно, необходимо учитывать при более точной интерпретации экспериментальных данных трековых исследований зарядового состава ГКЛ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №10-02-00375-а и частично Программы № 22 фундаментальных исследований Президиума РАН.

Литература

- Agostinelli, S., et al. (2003). GEANT4 Collaboration, *Nucl. Instr. & Meth.*, vol. A506, p. 250.
- Ginzburg, V. L., N. G. Polukhina, E. L. Feinberg, et al. (2005). Problems and Horizons of the Search for Tracks of Heavy and Superheavy Nuclei in Olivine Crystals from Meteorites (OLIMPIYA project), *Doklady Physics*, vol. 50, p. 283–285.
- Hubert, F., R. Bimbot, H. Gauvin (1990). *Atomic Data and Nuclear Data Tables* 46, p. 1.
- Kashkarov, L. L., N. G. Polukhina, N. I. Starkov, et al. (2008). Geometrical track parameters in the pallasite olivine: Identification of the cosmic ray heavy nuclei, *Radiation Measurements*, vol. 43, p. S266–S268.