

# Исследование особенностей протравленных треков сверхтяжёлых ядер в оливинах из метеоритов.

**Тан Найнг Со<sup>1,\*</sup>, Полухина Н.Г<sup>1</sup>, Старков Н.И<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Физический институт им. Лебедева РАН, Москва, 119991, пр. Ленинский, 53*

*\*dr.thannaingsoe.lpiras@gmail.com*

В Физическом институте им. Лебедева РАН в рамках проекта ОЛИМПИА методом химического травления проводятся исследование сверхтяжёлых ядер из метеоритов [1]. К настоящему времени найдено более 20000 с зарядом  $Z$  более 50. Среди них около 2% ядер имеют необычную форму протравленных каналов [2]. На рисунке 1(а) показан типичный протравленный канал (“морковь”), а на рисунке 1(б) показан протравленный канал, имеющий необычную форму “шприца”. Ширина “моркови” и узкой части “шприца” составляет 3–4  $\mu\text{м}$ , а широкая часть “шприца” 6–10  $\mu\text{м}$ . Природа такого поведения протравленных каналов не ясна. Разработка моделей прохождения ядер через вещество и травления ведётся уже много лет [3]. Однако даже одна из самых современных моделей - модель молекулярной динамики [4], основанная на уравнениях химической кинетики, пока не может объяснить это явление [5].

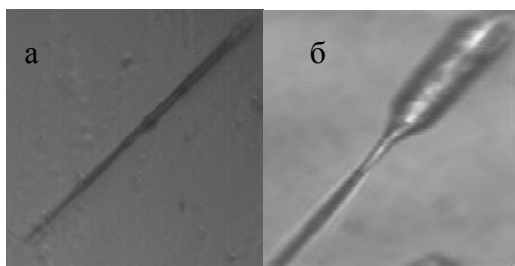


Рис 1. Травленные треки, которые имеют форму (а) морковь и (б) шприца

Чтобы получить дополнительную информацию о динамике прохождения тяжелого иона через вещество, были проведены детальные исследования пространственно-временной картины этого процесса. Расчеты проводились с использованием пакета программ GEANT4 [6], который позволяет имитировать прохождение первичных и вторичных частиц через установку и отслеживать траекторию каждой из них вплоть до точки останова. Материал детектора оливин.

Конструкция детектора включает центральную часть в виде цилиндра диаметром 2,5 нм и длиной 200 нм. Он окружён серией коаксиальных цилиндрических слоёв толщиной  $\text{Th} = 50$  нм с зазорами  $0,1\text{Th}$  между ними и длиной 2  $\mu\text{м}$ . Число цилиндрических слоёв 120.

Были проведены расчёты для нескольких ядер с энергиями от 5 до 100 МэВ/нуклон. В результате были получены различные распределения как функции времени и расстояния от иона (плотность выделенной энергии, плотность числа электронов, спектры первичных и вторичных электронов и т. д.). Диапазон исследуемых расстояний и интервалов времени составляет от 2 нм до 6 мкм, а времени от 0,5 до 50 фс, соответственно. Показано, что в некоторых случаях электроны могут достигать расстояний в несколько микрон, обладая достаточно большой энергией, однако их слишком мало, чтобы они смогли существенным образом повлиять на скорость травления в этой области.

На рисунках показаны результаты вычислений взаимодействия ядер урана с детектором. Приведены распределения характеристик электронов: плотность выделенной энергии, плотность кинетической энергии, энергия и количество. Показано, что отдельные

электроны могут улетать на расстояние до нескольких микрон от трека иона, однако их количество падает с уменьшением энергии и в любом случае слишком мало, чтобы на этом расстоянии привести к условиям, резко меняющим скорость травления.

Что касается модели молекулярной динамики, то расчёты, сделанные с её помощью, показывают наличие некоторого расширения области повреждений материала в конце пути ядра, что может приводить к более широкому размеру канала травления здесь. Но это обусловлено наличием брегговского пика, т.е. большей величиной ионизационных потерь вблизи точки останова ядра. Геометрический масштаб этого явления на несколько порядков меньше, чем геометрические характеристики “шприца” и не может объяснить их происхождение.

По этой причине природа возникновения треков такой формы пока остаётся не выясненной.

## Литературы

- [1] Natalia Polukhina, Nikolai Starkov, Than Naing Soe, *The Astrophysical Journal*, 829:120, 2016 (18pp)
- [2] N. Polukhina, N. Starkov, T. Soe, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, Vol. 46, No. 12, 2019, pp. 383.
- [3] R.L. Fleischer, P.B. Price and R.M. Walker, *Nuclear Tracks in Solids*, University of California Press, 1975. S.A. Durrani and R.K. Bull, *Solid State Track Detection Principles*, Pergamon Press, 1987
- [4] S.A. Gorbunov, A.I. Malakhov, R.A. Rymzhanov and A.E. Volkov, *Journal of Physics D*, Volume 50, Number 39, 2017, <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa8153>
- [5] S.A. Gorbunov, R.A. Rymzhanov and A.E. Volkov, *Scientific Reports*, volume-9, Article number: 15325, 2019, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51748-y>
- [6] J.Allison et al (GEANT4 collaboration), *Nuclear Instrument Methods A*, 506 (2003) 250