

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации **Горбунова Сергея Александровича** «Модель формирования треков быстрых тяжёлых ионов в твёрдых телах», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика.

Темой диссертационной работы С. А. Горбунова является исследование треков быстрых тяжёлых ионов (БТИ) в твердых телах. Хотя исследования воздействия ионов с энергиями выше нескольких сотен МэВ на твердые тела ведутся в течение уже почти 30 лет, установившегося понимания механизмов возбуждения облучаемого вещества при прохождении столь быстрых ионов все еще нет. Это связано, прежде всего, с ограниченными возможностями экспериментальной характеристики изменений, происходящих в областях с поперечными сечениями всего в несколько нанометров и длящихся доли пикосекунды. Для объяснения результатов прохождения БТИ через твердые тела приходится активно привлекать теоретические модели, но это также не просто, поскольку применимость макроподходов для описания возбуждений в треках, как это широко практиковалось еще десятилетие назад, крайне сомнительна и требует использования подгоночных параметров. Поэтому разработка подходов, позволяющих изучать процессы диссипации энергии БТИ путем прямого численного моделирования, исходя из фундаментальных принципов на стыке научных дисциплин (физика твёрдого тела, статистическая физика, физическая кинетика), является крайне важной и актуальной.

Согласно автореферату, диссертация С. А. Горбунова состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. В результативной части автореферата автор описывает конкретные изученные задачи, методические подходы к их решению и полученные результаты.

Крайне интересной оригинальной чертой используемого автором описания взаимодействия быстрых электронов, создаваемых в треке пролетающего быстрого иона, с ионами мишени является использование формализма динамического структурного фактора. Такой подход позволяет единообразно описывать электрон-ионное взаимодействие в широком диапазоне энергий электронов, от очень быстрых до движущихся примерно с энергией Ферми. Соответственно, одной из составляющих многоуровневой численной модели описания взаимодействия БТИ с



твердыми телами на разных масштабах времени и пространства является воспроизведение динамического структурного фактора материала мишени. Несомненным достоинством диссертационной работы является отработка метода численного расчета динамической парной корреляционной функции с помощью метода молекулярной динамики, с дальнейшей конвертацией этой функции в динамический структурный фактор. Методика оттестирована на примере жидкого алюминия и позволила хорошо воспроизвести известные экспериментальные данные.

Далее расчетный структурный фактор был использован при расчете скорости передачи энергии от возбужденных электронов к ионной подсистеме материала. Эта величина является важнейшим параметром модели, поскольку именно она определяет, какая часть энергии возбужденных электронов затрачивается на разогрев кристаллической решетки и/или на атермическое создание повреждений. Использованный подход позволил не только корректно воспроизвести оба известных предельных выражения (для быстрых и сравнительно медленных электронов), но и описать область переходных энергий. Тем самым, автору удалось оценить, до каких энергий электронов разумно пользоваться широко (но часто безосновательно) применяемой моделью электрон-фононной передачи энергии от электронов к ионной подсистеме в треке, что является несомненным достижением работы.

Знание эффективности обмена энергией между возбужденными электронами и ионами позволило автору оценить локальный разогрев материала в области трека, используя подробное численное моделирование разлета быстрых электронов от траектории БТИ с помощью Монте-Карло программы TERKIS. Автором выполнены расчёты для трех практически важных материалов (фторид лития, диоксид алюминия и оливин) и продемонстрировано, что ни в одном из них локальный разогрев в треке не достигает значений, сколько-нибудь близко приближающихся к температуре плавления. Этот вывод ставит под серьезное сомнение традиционные представления о том, что структурные изменения в треках являются результатом релаксации «теплового пика».

Среди прочих достижений работы, следует отметить предложенную автором физическую модель химической активации изолятора (на конкретном примере оливина, используемого в физике космических лучей как природный детектор) в треке БТИ, позволившую рационально и весьма разумно объяснить весьма нетривиальную кинетику травления треков ядер космического излучения. Особым достоинством модели можно считать то, что она позволяет объяснить



экспериментальные наблюдения без использования свободных параметров, подгоняемых под калибровочные эксперименты.

Автореферат не свободен и от некоторых недостатков, В частности, в разделе, посвященном обоснованию необходимости учета энергии валентных дырок, изучаются преимущественно следствия возможной передачи энергии от дырок к ионам, но каков конкретно механизм этой передачи – остается неясным. Соответственно, не ясно насколько обосновано предположение, что в решетку передается вся энергия дырок, а не какая-то ее часть, как это имеет место для электронов. Однако этот недостаток не снижает общего благоприятного впечатления от автореферата и не влияет на основные результаты и выводы диссертации.

Судя по автореферату, представленная работа удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Исследования проведены на высоком научном уровне. По результатам работы С. А. Горбуновым опубликовано 7 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК и индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus. Результаты работы прошли апробацию на 8 международных конференциях.

Исходя из содержания автореферата, полагаю, что С. А. Горбунов заслуживает присвоения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика.

Ведущий научный сотрудник НИЦ "Курчатовский институт",  
д. ф.-м. н.



В. А. Бородин

Подпись Бородина Владимира Алексеевича удостоверяю:

Главный учёный секретарь НИЦ «Курчатовский институт»

С. Ю.Стремоухов

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182 Россия,  
Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

Телефон: +7 (499) 196-95-39

Электронная почта: [nrcki@nrcki.ru](mailto:nrcki@nrcki.ru)

01.08.2016