

## Отзыв официального оппонента В. В. Ужинского

на диссертационную работу Савина Дмитрия Ивановича

«Моделирование кинематических корреляций при взаимодействии нейтронов и лёгких ионов низкой энергии с веществом»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертационная работа Савина Д. И. посвящена важной и актуальной теме - разработке методов моделирования взаимодействий нейтронов, необходимых для создания и эксплуатации нейтронных источников и приборов на их основе. В диссертации значительное внимание уделяется применению разработанных методов.

Основной целью диссертационной работы было моделирование корреляционных эффектов при взаимодействии нейтронов с веществом в установках для элементного анализа материалов и расчёт на их основе спектров выбитых ионов в конструкционных материалах реакторов.

В настоящее время разработано достаточно большое число нейтронных транспортных программ и используемых в них моделей, однако работы по их усовершенствованию и увеличению точности продолжаются. Одним из актуальных направлений развития моделей является учёт законов сохранения в каждом взаимодействии (эксклюзивное моделирование), которые проявляются в кинематических корреляциях между вторичными частицами, наблюдаемыми в сегментированных детекторах и в доплеровском уширении гамма-линий. Поэтому представленные в диссертации исследования являются **актуальными**.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Имеется также одно приложение, в котором получается аналитическое выражение для производящей функции монтекарловского моделирования излучения пары тождественных частиц с сохранением исходного инклюзивного спектра, приведенного в базах данных. Полный объём диссертации составляет 136 страниц. Он включает 58 рисунков и 1 таблицу. Список литературы содержит 105 наименований.

**Во введении** автор обосновывает актуальность исследований, формулирует цель работы, ставит задачи, которые необходимо решить, обсуждает научную новизну и практическую значимость работы, а также перечисляет основные положения, выносимые на защиту. Подчёркивается, что автор использует для эксклюзивного моделирования взаимодействий нейтронов оценённые ядерные данные из открытых инклюзивных баз данных.

**В первой главе** автор кратко описывает используемые библиотеки оценённых ядерных данных и указывает на отсутствие в них данных о корреляциях между вторичными частицами, излучаемыми в одном взаимодействии. Отдельно обсуждается база данных EGAF (The Evaluated Gammaray Activation File), необходимая для анализа материалов по мгновенно излучаемым гамма-квантам при радиационном захвате нейтронов.

**Во второй главе** автор описывает основные принципы моделирования различных типов реакций в разработанной библиотеке физических алгоритмов CHIPS-TPT для международного пакета программ Geant4. Последовательно рассмотрено моделирование реакций радиационного захвата нейтронов, упругого рассеяния нейтронов и неупругого рассеяния нейтронов с возбуждением остаточного ядра. Предложен новый метод моделирования спектров нескольких вторичных частиц с сохранением энергии и импульса в каждом

взаимодействии, позволяющем сохранять форму исходного инклюзивного спектра при условии выполнения законов сохранения. Предложен метод эксклюзивного моделирования деления ядер нейтронами. Исследована зависимость точности таггирования нейтронов изотопами гелия в  $T(d,n)\alpha$  и  $D(d,n)^3\text{He}$  нейтронных генераторах и зависимости этой точности от спектра налетающих ионов.

**В третьей главе** рассматриваются практические применения CHIPS-TPT в прикладных задачах. Показано, что CHIPS-TPT лучше описывает спектры нейтронов из бериллиевой мишени под действием альфа-частиц по сравнению с данными библиотеки JENDL/AN-2005. Обоснован метод корреляционного обнаружения взрывчатых веществ в багаже, существенно подавляющий фон по сравнению с используемыми методами. В CHIPS-TPT лучше воспроизводятся спектры гамма-квантов, регистрируемых в каротажном приборе, по сравнению с моделированием программой MCNP, что позволяет восстанавливать состав окружающей породы с меньшим количеством калибровочных измерений на моделях с известным литографическим окружением. Предложен метод совмещения расчётов CHIPS-TPT с моделированием молекулярной динамики для оценки парабатываемых дефектов в конструкционных материалах реактора под действием нейтронов.

**В Заключение** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в создании методов моделирования взаимодействий нейтронов с ядрами с сохранением энергии и импульса в каждом взаимодействии, воспроизводящих инклюзивные спектры, приведённые в базах оценённых ядерных данных, и свободных от нефизических флуктуаций, связанных с несохранением энергии.

**Практическая значимость** работы продемонстрирована применением разработанного программного комплекса в реальных задачах и подтверждена полученным патентом.

Диссертационная работа содержит большое количество сравнений с результатами моделирования в других программах, а также с экспериментальными измерениями. **Достоверность полученных результатов и разработанных методов не вызывает сомнений.**

**Апробация результатов** работы происходила как на российских, так и на четырёх международных конференциях. Результаты докладывались и обсуждались на соответствующих тематике секциях.

Результаты работы в полной мере опубликованы в семи научных статьях в журналах, входящих в международные базы данных и системы цитирования Web of Science и Scopus, а также в список рекомендованных журналов ВАК. Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

По диссертации можно сделать некоторые замечания:

1. Многие аббревиатуры не расшифрованы как при первом использовании, так в последующем. Например, CHIPS-TPT. CHIPS – Chiral Invariant Phase Space модель, на которую даже не дается ссылок.
2. По ходу изложения CHIPS-TPT заменяется на CHIPT-TPT, см., например, Заключение.
3. Не обосновано, почему для сравнения результатов моделирования используются только MCNP и Geant4-HP.
4. Имеется довольно большое количество опечаток, например, на стр. 63 написано «неколиниарность» вместо «неколлинеарность», в подписи к Рис. 2.1 «нейтрона с

энергитq» вместо «нейтрона с энергией», на стр. 74 – «произойдйт» вместо «произойдёт».

Тем не менее, отмеченные недостатки не влияют на положительную оценку диссертационной работы Савина Д.И. Автор в полной мере продемонстрировал профессиональное знание ядерных данных, умение работать с различными программными комплексами, и хорошие творческие способности.

Диссертация Савина Д. И. «Моделирование кинематических корреляций при взаимодействии нейтронов и лёгких ионов низкой энергии с веществом» соответствует всем требованиям, предъявляемым «Положением о порядке присуждения ученых степеней» к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Уровень квалификации Савина Д. И, показывает, что он заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент

Ведущий научный сотрудник

Лаборатории информационных технологий ОИЯИ

Доктор физ.-мат. наук *В. Ужинский*, Ужинский Владимир Витальевич

*23.09.2021*

Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)

141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6

Тел. +7(49621)6-40-19, email: [lit@jinr.ru](mailto:lit@jinr.ru)

Подпись В.В. Ужинского заверяю:

Ученый секретарь ЛИТ ОИЯИ

Кандидат физ.-мат. наук



*[Signature]*  
О. Ю. Дереновская

23 СЕН 2021