

## ОТЗЫВ

Официального оппонента д-ра физ.-мат. наук, профессора Лиханского Владимира Валентиновича на диссертационную работу Ахрамеева Евгения Викторовича на тему «Исследование процессов высвобождения энергии изомерных уровней атомных ядер под действием фемтосекундных лазерных импульсов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Вопросы возбуждения изомерных ядер исследуются достаточно давно. Тем не менее, интерес к ним не ослабевает, ввиду возможных приложений. Среди них наиболее значимыми являются создание инверсной заселенности в матрице, содержащей изомерные ядра и наблюдение стимулированного распада возбужденных состояний изомерных ядер, сопровождающееся  $\gamma$ -излучением, и создание волны  $\gamma$ -свечения («горения») в системе изомерных ядер с близкорасположенным к изомерному короткоживущим промежуточным состоянием.

Поэтому тема диссертации Ахрамеева Е.В. является актуальной и практически важной.

Все результаты, представленные автором в диссертации, являются оригинальными и были получены автором впервые. Достоверность результатов определяется тем, что все результаты диссертации были получены автором на основе строгих математических формулировок, методами математической и теоретической физики. Все результаты были опубликованы в рецензируемых научных журналах и представлялись на научных конференциях.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения.

Первая глава посвящена сравнительному анализу различных моделей, описывающих возбуждение изомерных ядер через неупругое рассеяние электронов. В нерелятивистском борновском приближении с плоскими волнами (PWBA), автором были выведены формулы для расчета сечений M1–M2 возбуждения изомерных ядер через неупругое рассеяние нерелятивистских электронов. Сделан вывод, что только E1 PWBA сечение может быть использовано для оценки числа возбужденных ядер в горячей плотной плазме, в то время как для других мультиполей данное приближение может привести к значительным ошибкам.

Во второй главе автором рассмотрены все резонансные механизмы возбуждения атомных ядер в плазме, даны отрицательные оценки о применимости механизмов фотопоглощения и обратной внутренней электронной конверсии к «запуску» волны гамма-свечения в системе ядерных изомеров. Автором детально рассмотрен процесс возбуждения ядер по механизму обратного электронного моста и впервые было показано, что в случае резонансного совпадения энергий ядерного и одного из атомных переходов, механизм ОЭМ может приводить к значительному усилению эффективности возбуждения изомерных ядер (вплоть до 6 порядков для E1 переходов), чего может быть достаточно для поддержания волны гамма-свечения в системе ядерных изомеров.

В третьей главе проанализированы возможности стимулированного распада долгоживущего изомера  $^{178}\text{Hf}^{m2}$  в дейтерий-тритиевой и в d-d лазерной термоядерной плазме. Рассмотрены различные механизмы возбуждения ядер из состояния  $16^+$  (2446.09 кэВ, 31 год) на короткоживущий близкорасположенный уровень  $14^-$  (2572.4 кэВ, 68 мкс). Впервые показана принципиальная возможность наблюдения стимулированного распада  $^{178}\text{Hf}^{m2}$ . Установлено, что d-d плазма (или иная горячая лазерная плазма с температурой  $T=100$  кэВ) является более эффективным инструментом для экспериментального наблюдения стимулированного распада долгоживущего изомера  $^{178}\text{Hf}^{m2}$ . В рамках численного примера,

рассчитана дополнительная активность за счет тепловых электронов и фотонов:  $Q_{ind} \approx 10^{13} - 10^{14} \text{ s}^{-1}$ , что позволит зарегистрировать эффект.

В четвертой главе представлены результаты разработки теоретических моделей процессов высвобождения энергии ядерных изомеров и генерации гамма-излучения с помощью фемтосекундных лазерных импульсов. Впервые показано, что для оптически толстых цилиндрических образцов вещества ядерного изомера возможна реализация волны высвечивания в режиме быстрой дефлаграции со скоростью  $U \sim 10^8 \text{ м/с}$ . Для оптически тонких образцов вещества ядерного изомера при условии, что переходы между ядерными уровнями являются безызлучательными, реализация волны высвечивания может происходить в режиме детонации со скоростью  $U \sim 10^5 \text{ м/с}$ .

Пятая глава посвящена результатам моделирования в среде GEANT4 возможного эксперимента по возбуждению изомерных ядер. Для целей моделирования автором выбрана концепция двухмишенного эксперимента, как наиболее реалистичная для успешной постановки эксперимента. В среде GEANT4 автором была разработана принципиальная концепция программы моделирования процессов возбуждения изомерных ядер и регистрации конверсионных электронов, рожденных в результате девозбуждения ядер в эксперименте с двумя мишенями.

Таким образом, автором достаточно полно проанализированы механизмы возбуждения/девозбуждения изомерных ядер, а также условия по созданию и поддержанию волны гамма-свечения в системе ядерных изомеров. Описанные в диссертации **результаты представляют практическую ценность** для планирования экспериментов по возбуждению атомных ядер и анализе их результатов, а также для создания и тестирования численных кодов предназначенных для моделирования процессов по возбуждению атомных ядер.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. Результаты, представленные в главах 1 и 2, недостаточно полно подкреплены экспериментальными данными, таким образом невозможно сделать вывод о полном согласии представленных в диссертации моделей с экспериментом.

2. В главе 3 рассматриваются атомы Hf-178, помещенные в лазерную термоядерную плазму. Представляет интерес обсудить влияние добавления атомов Hf-178 на параметры плазмы.

### **Заключение**

Сделанные замечания не являются критичными, и ни коим образом не снижают высокой оценки диссертационной работы. Диссертация Ахрамеева Е.В. выполнена на высоком научном уровне и вносит существенный вклад в понимание процессов возбуждения атомных ядер в высокотемпературной плотной плазме. Диссертационная работа в целом изложена в хорошем научном стиле и характеризуется полнотой и внутренним единством. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертационной работы. Основные научные результаты диссертации с достаточной полнотой опубликованы в научных изданиях.

Диссертация Ахрамеева Е.В. соответствует критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, установленными «Положением о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, паспорту специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» и отрасли науки «физико-математические науки», а сам Ахрамеев Е.В. заслуживает присуждения ему

ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Официальный оппонент, д-р физ.-мат. наук, профессор  
Начальник отдела безопасности объектов  
атомной энергетики АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»



В.В. Лиханский

06.06.2016

Подпись В.В. Лиханского заверено  
Ученый секретарь АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»  
канд. физ.-мат. наук



А.А. Ежов