

Отзыв официального оппонента к.ф.-м.н. Трощикова Сергея Юрьевича на диссертацию Хан Дон Ена «Фоторасщепление изотопов молибдена», представленную на соискание  
ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц».

Диссертация Хан Дон Ена посвящена исследованию фотовозбуждения и распада гигантского дипольного резонанса (ГДР) в изотопах молибдена (Mo). К настоящему моменту фотоядерные реакции на изотопах Mo в энергетической области ГДР исследовались прямыми методами детектирования нейтронов в нескольких работах, однако методы прямой регистрации нейтронов в проведенных экспериментах были малоэффективны. При фоторасщеплении средних и тяжелых ядер с  $A \geq 100$  начинают доминировать реакции с вылетом одного или нескольких нейтронов, а методы прямой регистрации нейтронов не позволяют надежно разделять реакции различной множественности, что приводит к отсутствию надежной экспериментальной информации о различных каналах фоторасщепления ядер. Такая информация необходима для исследования механизма распада гигантского дипольного резонанса средних и тяжелых ядер, а также механизма процессов в области высокоэнергичного участка сечения фоторасщепления.

В настоящей работе для экспериментального исследования фотоядерных реакций применялся метод наведенной активности, суть которого заключается в том, что конечное ядро, образующееся в результате фотоядерной реакции, регистрируется по спектру его распада, что позволяет однозначно разделять фотонуклонные реакции различного типа. Для этого мишень из исследуемого вещества облучается пучком тормозных фотонов и затем перемещается к спектрометру, на котором происходит измерение спектров остаточной активности мишени. По результатам одного эксперимента можно получить информацию обо всех фотонуклонных реакциях, произошедших на различных изотопах мишени. Высокая чувствительность метода позволяет исследовать каналы фоторасщепления атомных ядер с вылетом большого числа нуклонов и низкими сечениями реакций, недоступные для наблюдений методами прямой регистрации. Возможность проводить длительные измерения после окончания облучения позволяет измерять активность ядер с большим периодом полураспада и получать достоверную информацию о соответствующих парциальных каналах реакций. Также метод наведенной активности позволяет регистрировать продукты реакций в метастабильных состояниях.

Экспериментальная часть работы заключалась в том, что образец естественной смеси молибдена был облучен тормозным излучением с максимальными энергиями 19,5 МэВ, 29,1 МэВ и 67,7 МэВ в течение 1-4,5 часов, после чего спектры остаточной активности измерялись в течение 18, 196 и 138 часов. На основе анализа измеренных спектров были определены выходы 26 фотоядерных реакций на изотопах Mo.

В процессе выполнения работы автором были решены следующие основные задачи:

- 1) измерение выходов фотоядерных реакций на стабильных изотопах Mo;

- 2) исследование характеристик фотоядерных реакций в зависимости от массового числа изотопа Мо.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 131 страницу. Она включает 71 рисунок и 33 таблицы. Список литературы включает в себя 87 наименований.

Во введении представлена область исследований, сформулирована цель работы, обоснована актуальность поставленной цели и кратко описано содержание диссертации. Также кратко описаны основные результаты, полученные в диссертации, показаны их научная и практическая значимость и достоверность. Описан личный вклад автора в работу и выполненная апробация работы.

В первой главе диссертации описаны основные характеристики изотопов Мо. Приведена общая информация о химическом элементе Мо и список всех его стабильных и радиоактивных изотопов, проведен анализ свойств изотопов на основе модели ядерных оболочек с учетом спин-орбитального расщепления и модели жидкой капли. Показано изменение формы ядер изотопов Мо при заполнении нейтронами оболочки  $N = 51-82$  и соответствующее изменение их физических свойств, в частности, снятие вырождения одночастичных уровней в модели ядерных оболочек. В конце первой главы сделан вывод о том, что описанные особенности основных состояний изотопов Мо проявляются при больших энергиях, в частности, при возбуждении гигантского дипольного резонанса с энергией 10-30 МэВ.

Во второй главе описаны результаты экспериментов по измерению сечений фотоядерных реакций на изотопах Мо, проведенных ранее с использованием трех различных методов: на пучках тормозного излучения, на пучках квазимонохроматических фотонов и на пучках гамма-квантов обратного комптоновского рассеяния лазерных фотонов на пучке электронов. Описаны условия проведения указанных экспериментов, приведены графики измеренных сечений фотоядерных реакций, параметры сечений сравниваются в одной сводной таблице. В конце главы сделаны выводы о том, что:

- 1) на всех измеренных изотопах ярко проявляется гигантский дипольный резонанс;
- 2) основными каналами распада резонанса являются каналы распада с испусканием нейтронов;
- 3) полученные характеристики фотонейтронных сечений в различных работах в целом согласуются друг с другом. Однако при более детальном анализе становится видно, что расхождения в результатах различных работ выходят за пределы статистических погрешностей приведенных их авторами;
- 4) в методах прямой регистрации нейтронов в реакциях различной множественности имеются систематические ошибки, обусловленные несовершенством метода детектирования нейтронов;
- 5) в случае легких стабильных изотопов величины интегральных сечений фотопротонных реакций сопоставимы с интегральными сечениями фотонейтронных реакций;

- б) для дальнейшего уточнения механизма фотоядерных реакций на изотопах Мо необходимы новые типы экспериментов, в которых непосредственно измеряются выходы различных продуктов распада резонанса.

Третья глава диссертации посвящена использованной в работе методике измерения выходов фотоядерных реакций. В главе описана экспериментальная часть методики, приведены фотографии и схемы эксперимента. Большое внимание уделяется обработке и анализу экспериментальных данных. Поиск максимумов в измеренных спектрах остаточной активности и расчет изменения их интенсивностей проводился с помощью автоматической системы набора и анализа спектров, разработанной ранее в НИИЯФ МГУ. Идентификация каждого максимума проводилась по двум параметрам: его энергии и периоду полураспада. Как правило, оба параметра должны точно совпадать с табличными значениями. Однако в сложных случаях многократных последовательных бета-распадах учитывалось накопление изотопов не только в ходе облучения, но и в ходе измерения, что влияло на временную зависимость величины максимума в спектре остаточной активности. В конце главы приведены формулы, по которым проводился расчет величин выходов фотоядерных реакций.

В четвертой главе описаны полученные экспериментальные результаты и проведен их сравнительный анализ совместно с данными ранних экспериментов, описанных в главе 2, и с результатами расчета сечений фотоядерных реакций на основе программы TALYS и комбинированной модели фотоядерных реакций (КМФР). Подробно рассмотрены все зарегистрированные в ходе экспериментов изотопы, образовавшиеся при распаде гигантского дипольного резонанса в изотопах Мо, приведены возможные каналы их образования. В работе обнаружены четырнадцать, одиннадцать, девять фотоядерных реакций для экспериментов с верхними границами 67,7 МэВ, 29,1 МэВ и 19,5 МэВ соответственно. Описаны принципы расчета сечений фотоядерных реакций в программе TALYS и в КМФР. Указано, что расчет по КМФР лучше согласуется с экспериментальными результатами при рассмотрении фотопротонных реакций, чем расчет в программе TALYS, что объясняется отсутствием в TALYS правил отбора по изоспину.

Пятая глава диссертации посвящена научной и практической значимости полученных результатов. В главе рассмотрены процессы нуклеосинтеза изотопов Мо в природных условиях и показано, что изотопы  $^{92,94}\text{Mo}$  являются обойденными, то есть не могут образовываться в результате процессов захвата нейтронов. Сделан вывод о том, что такие изотопы в природных условиях образуются в ходе фотонейтронных реакций на более тяжелых изотопах Мо. В качестве примера практической значимости проведенной работы описана возможность наработки медицинского изотопа  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  в ходе облучения изотопа  $^{100}\text{Mo}$  гамма-квантами с энергией в диапазоне 10-20 МэВ.

В заключении коротко перечислены основные результаты, полученные в работе.

Переходя к оценке работы, стоит отметить, что автор провел ценное и качественное исследование, выполненное в актуальной области науки с применением обоснованных теоретических моделей и современного экспериментального оборудования. Полученные результаты имеют мировой уровень и характеризуют автора как исследователя высокой квалификации. Диссертация хорошо оформлена и

снабжена графическим материалом, основные результаты сведены в наглядные таблицы.

К работе имеются следующие замечания:

- 1) в главе 2 следовало более полно описать причины возникновения расхождений в величинах сечений фотоядерных реакций, измеренных в различных экспериментах, так как именно эти расхождения, не устраненные до настоящего момента, в значительной степени обуславливают актуальность работы;
- 2) в главе 4 следовало более подробно описать расчет величин выходов фотоядерных реакций на изотопах Mo, в частности, переход от величин площадей максимумов в спектрах к количеству распавшихся ядер;
- 3) в работе встречаются ошибки и опечатки, которые, впрочем, не мешают пониманию смысла текста.

Сделанные замечания являются второстепенными и не снижают значимости полученных Хан Дон Еном результатов. Полученные результаты являются новыми и актуальными. Все основные результаты диссертации достаточно полно и своевременно опубликованы в печати. Полученные в диссертации результаты достоверны. Апробация работы состоялась на ряде международных конференций и семинаров. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Таким образом, диссертационная работа Хан Дон Ена «Фоторасщепление изотопов молибдена» является законченной научно-квалификационной работой, содержащей новое решение актуальной научной задачи – исследования фоторасщепления изотопов молибдена, имеющей существенное значение для физики атомного ядра и элементарных частиц.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор Хан Дон Ен заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц».

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник отдела  
роста монокристаллов федерального  
государственного бюджетного научного  
учреждения "Технологический институт  
сверхтвердых и новых углеродных  
материалов"

Подпись Трощиева С.Ю. заверяю,  
кандидат физико-математических наук,  
ученый секретарь ФГБНУ ТИСНУМ



Трощиев С.Ю.  
«11» марта 2016 г.

Батов Д.В.  
«11» марта 2016 г.