

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИЯИ РАН  
Кравчук Л.В.  
«27» апреля 2016 года



## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук на диссертационную работу 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 посвящена экспериментальному изучению выходов фотоядерных реакций на стабильных изотопах молибдена. Образец естественной смеси молибдена облучался тормозным излучением с максимальными энергиями 19.5 МэВ, 29.1 МэВ и 67.7 МэВ. Для исследования был использован метод регистрации наведенной активности, в котором в отличие от методов прямой регистрации продуктов реакции непосредственно определяется конечное ядро. В результате может быть получена информация о всех фотонуклонных реакциях, произошедших на различных изотопах мишени. Высокая чувствительность метода наведенной активности позволяет исследовать различные каналы фоторасщепления атомных ядер с вылетом большого числа нуклонов. Интерес к этой теме связан не только с фундаментальными проблемами ядерной физики, но и различными приложениями. В частности, фотоядерные методы широко используются для гамма — активационного анализа и неразрушающего определения химического и изотопного состава вещества. Для получения максимальной точности в гамма-активационном анализе требуется знание характеристик фотоядерных реакций, влияющих на величину наведенной активности.

Таким образом, актуальность, новизна, научная и практическая ценность работы не вызывают сомнения.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

Во введении дается краткое описание гигантского дипольного резонанса, сформулированы цели, основные результаты, полученные в диссертации, научная значимость и значение полученных результатов исследования для практики.

В первой главе приводятся основные характеристики изотопов Мо. Показано, что низколежащие возбужденные состояния изотопов Мо с числом нейтронов вблизи

В первой главе приводятся основные характеристики изотопов Мо. Показано, что низколежащие возбужденные состояния изотопов Мо с числом нейтронов вблизи магического числа  $N=50$  хорошо описываются в рамках одночастичной оболочечной модели ядра. С увеличением числа нейтронов по мере заполнения оболочки  $N=50-82$  происходит увеличение деформации ядра и большую роль начинают играть возбужденные состояния, обусловленные связью одночастичных и коллективных возбуждений. Возбужденные состояния изотопов  $A>100$  хорошо описываются на основе модели Нильссона. Если в легких изотопах Мо особенную роль играют колебательные степени свободы и связь одночастичных и колебательных степеней свободы. В тяжелых изотопах Мо возникает статическая деформация, что приводит к образованию вращательных полос, обусловленных связью одночастичных состояний в деформированном потенциале и вращательных степеней свободы.

Во второй главе диссертации обсуждаются результаты измерений сечений фотоядерных реакций на изотопах Мо, полученные разными методами.

В третьей главе описана методика эксперимента и обработки данных. Мишень из естественной смеси изотопов молибдена облучалась тормозным излучением, образующимся при торможении ускоренных электронов в тормозной мишени (конверторе). Затем облученная мишень переносилась на измерительную установку, на которой измерялись спектры наведенной  $\gamma$ -активности. Измерительная установка состояла из коаксиального детектора из сверхчистого германия (HPGe) с энергетическим разрешением 0.9 кэВ для энергии 122 кэВ.

В четвертой главе приведены полученные экспериментальные данные в сравнении с теоретическими расчетами, выполненными на основе программы TALYS и комбинированной модели фотоядерных реакций (КМФР).

В пятой главе сделана попытка объяснения нуклеосинтеза изотопов  $^{92-100}\text{Mo}$  на основе полученных данных, а также изучена возможность получения радиоактивных изотопов  $^{99}\text{Mo}$  в фотоядерных реакциях.  $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$  или  $^{235,238}\text{U}(\gamma, F)^{99}\text{Mo}$  под действием тормозного  $\gamma$ -излучения.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы. Среди важных результатов можно отметить следующие:

1. С помощью активационной методики впервые измерены выходы фотоядерных реакций на стабильных изотопах молибдена под действием тормозных  $\gamma$ -квантов при трех значениях верхней границы тормозного спектра 19.5 МэВ, 29.1 МэВ и 67.7 МэВ.

2. В результате анализа спектров наведенной активности получены выходы следующих реакций:

$^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ ,  $^{100}\text{Mo}(\gamma, np)^{98}\text{Nb}$ ,  $^{100}\text{Mo}(\gamma, np)^{98m}\text{Nb}$ ,  $^{98}\text{Mo}(\gamma, p)^{97}\text{Nb}$ ,  $^{98}\text{Mo}(\gamma, p)^{97m}\text{Nb}$ ,  
 $^{97}\text{Mo}(\gamma, p)^{96}\text{Nb}$ ,  $^{98}\text{Mo}(\gamma, np)^{96}\text{Nb}$ ,  $^{96}\text{Mo}(\gamma, p)^{95}\text{Nb}$ ,  $^{97}\text{Mo}(\gamma, np)^{95}\text{Nb}$ ,  $^{96}\text{Mo}(\gamma, p)^{95m}\text{Nb}$ ,  
 $^{97}\text{Mo}(\gamma, np)^{95m}\text{Nb}$ ,  $^{94}\text{Mo}(\gamma, n)^{93}\text{Mo}$ ,  $^{95}\text{Mo}(\gamma, 2n)^{93}\text{Mo}$ ,  $^{94}\text{Mo}(\gamma, n)^{93m}\text{Mo}$ ,  $^{95}\text{Mo}(\gamma, 2n)^{93m}\text{Mo}$ ,  
 $^{94}\text{Mo}(\gamma, np)^{92}\text{Nb}$ ,  $^{94}\text{Mo}(\gamma, np)^{92m}\text{Nb}$ ,  $^{92}\text{Mo}(\gamma, n)^{91}\text{Mo}$ ,  $^{92}\text{Mo}(\gamma, n)^{91m}\text{Mo}$ ,  $^{92}\text{Mo}(\gamma, p)^{91}\text{Nb}$ ,  
 $^{92}\text{Mo}(\gamma, p)^{91m}\text{Nb}$ ,  $^{92}\text{Mo}(\gamma, 2n)^{90}\text{Mo}$ ,  $^{92}\text{Mo}(\gamma, np)^{90}\text{Nb}$ ,  $^{92}\text{Mo}(\gamma, np)^{90m}\text{Nb}$ ,  $^{92}\text{Mo}(\gamma, 2np)^{89}\text{Nb}$ ,  
 $^{92}\text{Mo}(\gamma, 2np)^{89m}\text{Nb}$ .

3. Обнаружено увеличение выхода реакции  $(\gamma, p)$  в изотопе  $^{92}\text{Mo}$ , которое, по-видимому, обусловлено оболочечной структурой исследуемого ядра.

Личный вклад автора заключался в расшифровке, физическом анализе измеренных спектров и оценке величины выходов реакций, а также в сравнении полученных экспериментальных данных с результатами теоретических моделей. В целом работа выполнена на высоком научном уровне. Однако, она не лишена недостатков.

1. В работе отсутствует какая – либо информация о фоновых условиях эксперимента, что для экспериментальной работы является существенным недостатком.
2. Утверждение, что «показана возможность образования обойденных изотопов  $^{92,94}\text{Mo}$  в фотоядерных реакциях в природных условиях нуклеосинтеза» - не обосновано. Рассматриваемая область энергий (гигансткий дипольный резонанс) не соответствует астрофизическим условиям.

Указанные недостатки несколько снижают общую высокую оценку диссертации, хотя в целом работа заслуживает положительной оценки. Диссертация Хан Дон Ена представляет собой законченное исследование, имеющее большое значение для рассматриваемой области физики. Полученные результаты могут быть использованы в ИЯИ РАН, ОИЯИ, НИИЯФ МГУ и в других научно-исследовательских организациях, занимающихся теоретическими и экспериментальными исследованиями фотоядерных реакций.

Результаты диссертации полно отражены в публикациях автора. По теме диссертации опубликованы 3 статьи в реферируемых журналах. Объем диссертации составляет 131 страницу машинописного текста. Она включает 71 рисунок и 33 таблицы. Список цитированной литературы состоит из 87 наименований. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Диссертация удовлетворяет требованиям п.8 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением №74 Правительства Российской Федерации от 30 января 2002 г. в редакции Постановления №227 Правительства РФ от 20.04.02006, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, и ее автор Хан Дон Ен заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – «физика атомного ядра и элементарных частиц».

Отзыв составил заведующий лабораторией  
фотоядерных реакций ИЯИ РАН  
доктор физико-математических наук,  
профессор

В.Г. Недорезов

Подпись В.Г.Недорезова заверяю,  
Ученый секретарь ИЯИ РАН,  
к.ф.-м.н.



А.Д. Селидовкин