

Ա.Ի. ԱԼ ԻԽԱՆՅԱՆԻ ԱՆՎԱՆ ԱԶԳԱՅԻՆ ԳԻՏԱԿԱՆ ԼԱԲՈՐԱՏՈՐԻԱ  
(ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ)

**Բախշիյան Տիրուհի Սարսիմելի**

**ՄԻՋՈՒԿԱՅԻՆ ՌԵԱԿՏԻՎՆԵՐԻ ՈՒ ՍՈՒՄԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ  
ԲԺՇԿԱԿԱՆ ԻՉՈՏՈՊՆԵՐԻ ՍՏՏՏՄԱՆ ՆՊՍԱԿՈՎ ԵՎ  
ԻՉՈՍԵՐ ՅԱՐԱԲԵՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՔՆՆԱՐԿՈՒՄԸ**

Ա.04.16. - «Միջուկի, տարրական մասնիկների և տիեզերական  
ճառագայթների ֆիզիկա» մասնագիտությամբ  
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական  
աստիճանի հայցման ատենախոսություն

**ՍԵՂՍԱԳԻՐ**

ԵՐԵՎԱՆ 2017

---

НАЦИОНАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ИМ. А.И. АЛИХАНИЯ  
(ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ)

**Бахшиян Тируи Максимеловна**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИИ  
С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ МЕДИЦИНСКИХ ИЗОТОПОВ И  
АНАЛИЗА ИЗОМЕРНЫХ ОТНОШЕНИИ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук по специальности  
01. 04.16 «Физика ядра, элементарных частиц и космических лучей»

ЕРЕВАН 2017

Ատենախոսություն թեման հաստատված է Երևանի պետական  
համալսարանում:

Գիտական ղեկավար՝  
Դանազոն Այվանյան

Ֆիզմաթ. գիտ. դոկտոր Ա.Ս.

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ Ֆիզմաթ. գիտ. դոկտոր Ն.Ա.  
Դեմյոնիսյան  
Ֆիզմաթ. գիտ. թեկնածու Ա.  
Մարգարյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկական  
ետազոտությունների Ինստիտուտ (\$ՀԻ)  
Պաշտոնությունը կայանալու է 2017 թ. փետրվարի 21-ին, ժամը  
14:00

Ա.Ի. Ալիխանյանի անվան Ազգային գիտական լաբորատորիայում  
գործող ՀՀ  
ԲՈՅ-ի «Միջուկի և տարրական մասնիկների ֆիզիկա» 024  
մասնագիտական խորհրդի նիստում  
(0036, Երևան, Ալիխանյան Եղբայրների փող. 2):

Առենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ Ա. Ի. Ալիխանյանի  
անվան Ազգային գիտական լաբորատորիայի գրադարանում:  
Սեղմագիրն առաքված է 2017 թ. հունվարի 19-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար,  
Ֆիզմաթ. գիտ. դոկտոր՝ Դ.Ռ.  
Կարախանյան

---

Тема диссертации утверждена в Ереванском государственном университете.

Научный руководитель: доктор физ.- мат. наук А.С.Данагулян  
Официальные оппоненты: доктор физ.- мат. наук Н.А. Демехина  
кандидат физ.- мат. наук. А. Маргарян  
Ведущая организация: Институт физических исследований (ИФИ) НАН  
РА

Защита состоится 21 февраля 2017 г. в 14 часов на заседании  
специализированного совета ВАК «Физика ядра и элементарных частиц» РА  
024, действующего при Национальной научной лаборатории им. А. И.  
Алиханяна  
(0036, Ереван, ул. Братьев Алиханян 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национальной научной  
лаборатории им. А. И. Алиханяна.

Автореферат разослан 19 января 2017 г.

Ученый секретарь спец. совета,  
доктор физ.-мат. наук Д.Р. Караханян

**Общая характеристика работы**

Работа посвящена исследованию характеристик продуктов ( $\gamma$ ,  $n$ ), ( $p$ ,  $n$ ), ( $d$ ,  $2n$ ) и ( $\alpha$ ,  $p3n$ ) ядерных реакций, включая:

- Измерение выходов фотоядерных процессов с целью использования экспериментальных данных для разработки методики получения медицинских радиоизотопов. Мишени обогащенных изотопов олова <sup>112,118,124</sup>Sn и натурального состава Te, HfO<sub>2</sub> облучались на ускорителе ЛУЭ 50 ННЛА при энергии  $E_{\gamma\max} = 40$  МэВ. Для измерения выходов радиоактивных продуктов использовалась методика наведенной активности.
- Расчет сечений образования основных и изомерных состояний в реакциях, инициированных гамма квантами, протонами, дейтронами и альфа-частицами. Ядерные реакции были выбраны с учетом сохранения постоянства массовых чисел мишеней и ядер-продуктов. В работе также были рассчитаны изомерные отношения (ИО) для ядер-продуктов переходной области. Экспериментальные данные сравниваются с данными, рассчитанные в рамках программного пакета TALYS 1.4. Обсуждается зависимость ИО от типа и энергии налетающей частицы, спина мишени и ядра-продукта, разницы спинов изомерного и основного состояния продуктов и мишени ( $\Delta = (I_m - I_g - I_{\text{targ}})$ ), массового числа продукта и отношения  $R_{(d,2n)}/R_{(p,n)}$ ,  $R_{(\alpha,p3n)}/R_{(p,n)}$ . Для объяснения несоответствий расчетных и экспериментальных данных были изучены схемы  $\gamma$  переходов ядер продуктов <sup>44</sup>Sc<sub>23</sub>, <sup>82</sup>Rb<sub>45</sub>, <sup>86</sup>Y<sub>47</sub>, <sup>87</sup>Y<sub>48</sub>, <sup>96</sup>Tc<sub>53</sub>, <sup>99</sup>Tc<sub>56</sub>, <sup>127</sup>Te<sub>75</sub>, <sup>129</sup>Te<sub>77</sub>, <sup>131</sup>Te<sub>79</sub>. Был проведен анализ возможного вклада высокоспиновых ирраст состояний на значения изомерных отношений.

### Актуальность работы

Развитие ядерной медицины напрямую связано с возможностью генерации необходимых радионуклидов, их стоимостью и доступностью. В последнее время для производства медицинских радиоизотопов стали использовать электронные ускорители с применением фотоядерных реакций. При этом электронные ускорители и полученная на них радионуклидная продукция (с учетом возможных радиационных отходов) экологически более безопасны, чем ядерные реакторы, имеют меньшую стоимость, чем циклотроны и с их помощью можно получать некоторые радионуклиды, которые либо трудно, либо практически невозможно получать на реакторах и циклотронах.

Экспериментальные данные по выходам фотоядерных реакций показали:

Выходы медицинских радиоизотопов  $^{111}\text{In}$  и  $^{117\text{m}}\text{Sn}$  обеспечивают возможность производства в фотоядерных реакциях.

Производство  $^{124}\text{Sb}$  и  $^{177\text{g}}\text{Lu}$  медицинских радиоизотопов в фотоядерных реакциях нецелесообразно, из-за малого значения выходов.

Несмотря на значительное число работ, посвященных исследованию ИО, до сих пор некоторые вопросы по-прежнему остаются актуальными. Изомерные отношения зависят от большого числа параметров: типа реакции, сорта и энергии падающих частиц, ядерных характеристик мишени и снаряда, энергетических и спиновых переменных ядер-продуктов. Систематизация величин изомерных отношений затруднена ввиду недостатка, неточности и неоднозначности экспериментальных данных. Вследствие этого дополнительная информация о характере зависимости изомерных отношений от определенных переменных представляет интерес для понимания механизма в целом. В работе подробно обсуждается влияние структур возбужденных состояний ядер-продуктов переходной области на значения ИО.

### **Практическая ценность**

На основе полученных экспериментальных результатов сделаны выводы о возможности фотоядерного производства медицинских радиоизотопов  $^{111}\text{In}$ ,  $^{117\text{m}}\text{Sn}$ ,  $^{124}\text{Sb}$ ,  $^{177}\text{Lu}$  при энергии  $E_{\gamma\text{max}} = 40$  МэВ.

Результаты анализа показали расхождения экспериментальных и расчётных данных. Сделанные выводы о причинах несоответствий могут служить основой для некоторых изменений в программном пакете TALYS.

### **Научная новизна работы**

Впервые получены экспериментальные данные относительно выходов продуктов  $^{173,175}\text{Hf}$ , образованных в ( $\gamma$ ,  $xn$ ) реакциях при энергии  $E_{\gamma\text{max}} = 40$  МэВ.

Замечены несоответствия экспериментальных и расчётных данных ИО для ядер продуктов  $^{44}_{21}\text{Sc}_{23}$ ,  $^{82}_{37}\text{Rb}_{45}$ ,  $^{86}_{39}\text{Y}_{47}$ ,  $^{87}_{39}\text{Y}_{48}$ ,  $^{96}_{43}\text{Tc}_{53}$ ,  $^{99}_{43}\text{Tc}_{56}$ ,  $^{127}_{52}\text{Te}_{75}$ ,  $^{129}_{52}\text{Te}_{77}$ ,  $^{131}_{52}\text{Te}_{79}$ , которые объяснены влиянием структур возбужденных состояний ядер-продуктов на значения ИО.

**Целью** настоящей работы является исследование возможности производства медицинских изотопов в фотоядерных реакциях и анализа изомерных отношений, образованных в ( $\gamma$ ,  $n$ ), ( $p$ ,  $n$ ), ( $d$ ,  $2n$ ) и ( $\alpha$ ,  $p3n$ ) реакциях.

### **Результаты и основные положения, выносимые на защиту**

- Получение экспериментальных значений выходов медицинских радиоизотопов  $^{111}\text{In}$ ,  $^{117\text{m}}\text{Sn}$ ,  $^{124}\text{Sb}$ ,  $^{177}\text{Lu}$  с целью обсуждения возможности их фотоядерного производства. Измерение выходов ядер-продуктов  $^{110}\text{Sn}$ ,  $^{126\text{g}}\text{Sb}$ ,  $^{127}\text{Sb}$ ,  $^{129\text{g}}\text{Sb}$ ,  $^{179}\text{Lu}$ ,  $^{123\text{m}}\text{Te}$ ,  $^{129\text{m}}\text{Te}$ ,  $^{173}\text{Hf}$  и  $^{175}\text{Hf}$ .
- Получение экспериментальных значений изомерных отношений продуктов  $^{119\text{m,g}}\text{Te}$ ,  $^{121\text{m,g}}\text{Te}$ ,  $^{117\text{m,g}}\text{In}$ ,  $^{123\text{m,g}}\text{Sn}$ .
- Расчёт сечений образования ядер-продуктов (от  $^{44\text{m,g}}\text{Sc}$  до  $^{127\text{m,g}}\text{Xe}$ ) образованных в  $(p, n)$ ,  $(d, 2n)$  и  $(\alpha, p3n)$  реакциях по коду TALYS 1.4. Сравнение экспериментальных данных с расчетными данными.
- Обсуждение зависимости значений ИО от типа и энергии налетающей частицы, спина мишени и ядра-продукта, разницы спинов изомерного и основного состояния продуктов и мишени ( $\Delta = (I_m - I_g - I_{\text{targ}})$ ), массового числа продукта, отношения  $R_{(d,2n)}/R_{(p,n)}$   $R_{(\alpha p3n)}/R_{(p,n)}$  и структур возбуждённых состояний ядер-продуктов.

### Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Она содержит 125 страниц, включает в себя 6 таблиц, 53 рисунков и список литературы из 203 наименований.

### Краткое содержание диссертации

**Во введении** кратко описываются преимущества использования методов ядерной физики в медицине, а также успешное применение радионуклидов в диагностике и при лечении. Обсуждается необходимость альтернативных методов производства медицинских радиоизотопов. Обоснованы важность и актуальность исследований фотоядерных реакции, сформулированы цели и задачи исследования.

Обзор литературных данных проводится по отдельности в каждой главе, при необходимости – разделе, в соответствии с тематикой.

**Первая глава** состоит из трех частей: описание линейного ускорителя электронов ЛУЭ 50 ННЛА, метода наведенной активности, условий проведения эксперимента.

В данной работе исследуемые мишени обогащенных изотопов олова  $^{112,118,124}\text{Sn}$  и натурального состава  $\text{Te}$ ,  $\text{HfO}_2$  были облучены на линейном

ускорителе электронов ЛУЭ 50 ННЛА при энергии  $E_e = 40$  МэВ и среднем токе 10 мкА. Для максимального выхода  $\gamma$  квантов в качестве оптимального конвертера был выбран тантал толщиной 2 мм. Наведенная активность в мишенях измерялась при помощи сверхчистого германиевого детектора. Радиоактивные ядра идентифицировались по периодам полураспадов и энергиям характерных  $\gamma$  линий. Использование HPGe-детектора позволило идентифицировать образованные в результате ядерных реакций радиоактивные ядра с большой точностью. Фотозффективность детектора была определена при помощи стандартных  $\gamma$  источников (ОСГИ). Разрешение детектора составляло 1.66 кэВ для линии 1.33 МэВ и 618 эВ для линии 122 кэВ. Интенсивность пучка  $N_\gamma$  была определена посредством мониторинжной реакции. В качестве мониторинжной реакции были выбраны  $^{65}\text{Cu}(\gamma, n)^{64}\text{Cu}$  (выход - 53 мбн) и  $^{63}\text{Cu}(\gamma, 2n)^{61}\text{Cu}$  (выход - 2.6 мбн) реакции [1]. Интенсивности пучка были равны  $1.06 \times 10^{16}$  и  $2.35 \times 10^{15}$  фотонов/час для первого и для второго облучений, соответственно. В качестве монитора была выбрана медная фольга натурального состава толщиной 50 мкм. Мишени  $^{112,118,124}\text{Sn}$  также представляли собой тонкие фольги. Для изготовления мишеней из  $\text{HfO}_2$  и  $^{\text{нат}}\text{Te}$  порошкообразный материал был спрессован в таблетки. Было проведено два облучения. При первом облучении монитор и мишени  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{Te}$  и  $^{112}\text{Sn}$  облучались в течение 18 мин. При втором облучении монитор и мишени  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{Te}$  и  $^{118,124}\text{Sn}$  облучались 44 мин. Число падающих фотонов на монитор и остальные мишени считалось одинаковым, поскольку все мишени тонкие и поглощение фотонов незначительное.

**Вторая глава** диссертации посвящена расчетам и обсуждениям выходов продуктов фотоядерных реакций на мишенях  $^{112,118,124}\text{Sn}$ ,  $^{\text{нат}}\text{Te}$ ,  $^{\text{нат}}\text{Hf}$ , изучению изомерных отношений, описанию программного пакета TALYS, сравнению экспериментальных данных с расчетными.

Фотоядерные реакции это ядерные реакции, происходящие при поглощении гамма квантов ядрами атомов. При поглощении  $\gamma$  кванта ядро получает избыток энергии без изменения своего нуклонного состава. Как и другие ядерные реакции, поглощение ядром гамма кванта возможно только при выполнении необходимых энергетических и спиновых соотношений. Если переданная ядру энергия превосходит энергию связи нуклона в ядре, то распад образовавшегося ядра происходит чаще всего с испусканием нуклонов. Такой распад ведёт к ядерным реакциям типа  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, p)$ .

На сегодняшний день существуют издания и международные базы данных, объединяющие все доступные экспериментальные данные по фотоядерным реакциям [2, 3]. Однако некоторые реакции до сих пор не исследованы. Например, не было экспериментальных данных относительно

выходов продуктов  $^{173,175}\text{Hf}$ , образованных в  $(\gamma, xn)$  реакциях. В табл. 1 приведены выходы фотоядерных реакций на мишенях обогащенных изотопов олова  $^{112,118,124}\text{Sn}$  и натурального состава Te,  $\text{HfO}_2$ , а также типы реакций, ведущих к образованию рассматриваемых продуктов.

Анализ полученных результатов показал, что, в основном, выходы  $(\gamma, n)$  реакций растут с увеличением массового числа ядра-мишени.

Изотопы  $^{119m,g}\text{Te}$  и  $^{121m,g}\text{Te}$  образуются посредством двух каналов: в  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, 3n)$  реакциях. Однако поскольку пороги рассматриваемых  $(\gamma, 3n)$  реакций порядка 30 МэВ и сечения  $(\gamma, n)$  значительно превосходят сечения  $(\gamma, 3n)$  реакций, то основным каналом образования  $^{119m,g}\text{Te}$  и  $^{121m,g}\text{Te}$  в данном случае можно считать  $(\gamma, n)$  реакции.

Таблица 1.  
Выходы фотоядерных реакций на мишенях обогащенных изотопов олова  $^{112,118,124}\text{Sn}$  и натурального состава Te,  $\text{HfO}_2$ .

Ядро продукт	Тип реакции	Выход $\sigma$ , мбн	Ядро продукт	Тип реакции	Выход $\sigma$ , мбн
$^{110}\text{Sn}$	$^{112}\text{Sn}(\gamma, 2n) ^{110}\text{Sn}$	$3.2 \pm 0.3$	$^{123m}\text{Te}$	$^{124}\text{Te}(\gamma, n) ^{123m}\text{Te}$ $^{125}\text{Te}(\gamma, 2n) ^{123m}\text{Te}$ $^{126}\text{Te}(\gamma, 3n) ^{123m}\text{Te}$	$5.3 \pm 0.6$
$^{117m}\text{In}$	$^{118}\text{Sn}(\gamma, p) ^{117m}\text{In}$	$1.4 \pm 0.14$	$^{121m}\text{Te}$	$^{122}\text{Te}(\gamma, n) ^{121m}\text{Te}$ $^{124}\text{Te}(\gamma, 3n) ^{121m}\text{Te}$	$1.6 \pm 0.2$
$^{117g}\text{In}$	$^{118}\text{Sn}(\gamma, p) ^{117g}\text{In}$	$1.25 \pm 0.12$	$^{121g}\text{Te}$	$^{122}\text{Te}(\gamma, n) ^{121g}\text{Te}$ $^{124}\text{Te}(\gamma, 3n) ^{121g}\text{Te}$	$9.0 \pm 0.8$
$^{123m}\text{Sn}$	$^{124}\text{Sn}(\gamma, n) ^{123m}\text{Sn}$	$280 \pm 25$	$^{119m}\text{Te}$	$^{120}\text{Te}(\gamma, n) ^{119m}\text{Te}$ $^{122}\text{Te}(\gamma, 3n) ^{119m}\text{Te}$	$0.075 \pm 0.01$
$^{123g}\text{Sn}$	$^{124}\text{Sn}(\gamma, n) ^{123g}\text{Sn}$	$138 \pm 40$	$^{119g}\text{Te}$	$^{120}\text{Te}(\gamma, n) ^{119g}\text{Te}$ $^{122}\text{Te}(\gamma, 3n) ^{119g}\text{Te}$	$0.75 \pm 0.07$
$^{126g}\text{Sb}$	$^{128}\text{Te}(\gamma, pn) ^{126g}\text{Sb}$ $^{130}\text{Te}(\gamma, p3n) ^{126g}\text{Sb}$	$0.06 \pm 0.01$	$^{129m}\text{Te}$	$^{130}\text{Te}(\gamma, n) ^{129m}\text{Te}$	$23.3 \pm 3$
$^{127}\text{Sb}$	$^{128}\text{Te}(\gamma, p) ^{127}\text{Sb}$ $^{130}\text{Te}(\gamma, p2n) ^{127}\text{Sb}$	$1.2 \pm 0.15$	$^{173}\text{Hf}$	$^{174}\text{Hf}(\gamma, n) ^{173}\text{Hf}$ $^{176}\text{Hf}(\gamma, 3n) ^{173}\text{Hf}$	$2.1 \pm 0.2$
$^{129g}\text{Sb}$	$^{130}\text{Te}(\gamma, p) ^{129g}\text{Sb}$	$0.27 \pm 0.02$	$^{175}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}(\gamma, n) ^{175}\text{Hf}$ $^{177}\text{Hf}(\gamma, 2n) ^{175}\text{Hf}$ $^{178}\text{Hf}(\gamma, 3n) ^{175}\text{Hf}$	$61 \pm 3$
$^{179}\text{Lu}$	$^{180}\text{Hf}(\gamma, p) ^{179}\text{Lu}$	$4.0 \pm 0.4$	-	-	-

Выходы ( $\gamma$ ,  $p$ ) реакций намного меньше выходов ( $\gamma$ ,  $n$ ) реакций. Полученные результаты совпадают с имеющимися в литературе экспериментальными данными (табл. 1).

Получены экспериментальные значения выходов основных и изомерных состояний для  $^{119}\text{Te}$ ,  $^{121}\text{Te}$ ,  $^{117}\text{In}$ ,  $^{123}\text{Sn}$  остаточных ядер (табл. 1). Проведены исследования изомерных отношений (таб. 2).

В настоящее время известно более сотни возбужденных изомерных состояний с периодами полураспада больше 1 с. Основной причиной изомерии является большая разница спинов изомерного и основного состояний ядер ( $\Delta I \geq 3$ ). ИО ( $Y_i/Y_j$  - отношения выходов высокоспинового состояния к низкоспиновому) зависит от большого числа переменных: механизма фотоядерной реакции, типа и энергии налетающих частиц, структуры и распада ядра продукта. Были сравнены экспериментальные значения с данными, рассчитанными с помощью кода TALYS 1.4. Результаты сравнительного анализа позволяют судить о правильности выбора механизма и структур возбужденных состояний ядер-продуктов переходной области. В таблице 2 приведены экспериментальные и расчётные значения ИО.

Таблица 2.

Экспериментальные и рассчитанные при помощи кода TALYS 1.4 значения ИО (\*Данные относительно выхода  $^{129g}\text{Te}$  ( $3/2^+$ ) взяты из [4]).

Ядро-продукт	Эксперимент	TALYS							
		(1)		(2)		(3)		(4)	(5)
		(6)	(7)	(6)	(7)	(6)	(7)		
$^{117}\text{In}$	$0.89 \pm 0.09$	0.87	0.88	0.91	0.88	0.89	0.85	1.1 1	1.25
$^{119}\text{Te}$	$0.10 \pm 0.02$	0.12	0.11	0.13	0.13	0.12	0.12	0.1 5	0.18
$^{121}\text{Te}$	$0.18 \pm 0.03$	0.14	0.14	0.16	0.16	0.15	0.14	0.1 9	0.21
$^{129}\text{Te}$	$0.55 \pm 0.11^*$	0.08	0.09	0.1	0.1	0.09	0.1	0.1 6	0.13



$^{123}\text{Sn}$	0.49±0.14	$\frac{0.26}{7}$	0.267	0.29	$\frac{0.29}{4}$	0.27	0.27	$\frac{0.3}{6}$	0.35
-------------------	-----------	------------------	-------	------	------------------	------	------	-----------------	------

Рассматриваемые продукты образованы в реакциях с вылетом одного или нескольких нуклонов (табл. 1) и экспериментальные значения ИО меньше единицы (табл. 2), т.е. заселение высокоспиновых состояний происходит с меньшей вероятностью.

Полученный результат качественно можно интерпретировать в рамках статистической модели составного ядра. В результате развития каскада из ядра-мишени вылетают высокоэнергетические нуклоны, оставляя ядру большую энергию возбуждения и угловой момент. Последующая испарительная стадия сопровождается вылетом низкоэнергетических нуклонов и  $\gamma$  квантов. С увеличением числа вылетевших частиц первичное спиновое распределение расширяется. Следовательно, с увеличением числа каскадных частиц высокоспиновое состояние образуется с большей вероятностью по сравнению с низкоспиновым. Таким образом, ИО имеют значения больше единицы для продуктов каскадно-испарительного процесса [5, 6, 7].

С течением времени создатели программного пакета TALYS исходя, из новых экспериментальных данных усовершенствуют его. Этот код дает возможность вычислять сечения изомерных и основных состояний продуктов при различных ( $\gamma$ ,  $n$ ,  $p$ ,  $d$ ,  $t$ ,  $\alpha$ ,  $h$ ) налетающих частицах в диапазоне энергий 1 кэВ – 200 МэВ для мишеней с массовыми числами от 12 до 339. В TALYS 1.4 добавлены потенциалы оптической модели, что позволяет улучшить результаты расчетов поперечного сечения реакции под действием дейтронов. Оптическая модель используется для сферических, сфероидальных и деформированных ядер. Для этих ядер кроме одночастичных состояний вводятся коллективные вибрационные и ротационные состояния (полосы).

Для расчета сечений и выходов по статистической модели необходимо иметь информацию об энергетических уровнях возбужденного послекаскадного ядра. Если информация о дискретных уровнях возбуждения ядра недоступна или неполна, то для расчетов используется функция распределения плотности ядерных уровней (аналитическая зависимость плотности ядерных уровней от энергии возбуждения, спина и четности уровня). TALYS 1.4 содержит пять различных моделей для функции распределения плотности ядерных уровней.

Три из них – это феноменологические модели, дающие несколько отличающиеся друг от друга виды функции распределения:

- ☛ модель Постоянная температура + Ферми газа (*Constant temperature + Fermi gas model*) (в табл. 2 и на рис. 1 модель отмечена как (1));

- ✦ смещенная модель Ферми-газа (*Back-shifted Fermi gas model*) (модель (2));
- ✦ Обобщенная сверхтекучая модель (*Generalised superfluid model*) (модель (3)).

Функция распределения плотности ядерных уровней содержит параметр “обрезания спина” (*spin-cut parameter*), который определяет ширину распределения угловых моментов. При микроскопических вычислениях было замечено, что параметр обрезания спина зависит от оболочечных эффектов. TALYS 1.4 позволяет делать расчеты с использованием параметра обрезания спина как зависящим от оболочечных эффектов, так и независящим (*Spin-cut model 1, Spin-cut model 2*) (в табл. 2 модели отмечены как (6) и (7)) [8].

Две из них – это другие модели для функции распределения плотности ядерных уровней с микроскопическим подходом:

- ✦ плотности уровней берутся из таблицы Гориели (*Microscopic level densities from Goriely's table*) (модель (4) в табл. 2), в которой приведены плотности уровней на основе расчетов, сделанных Хартри-Фоком;
- ✦ включает в себя детальные вычисления собственных плотностей ядерных уровней и изменений (*Microscopic level densities from Hilaire's table*) (модель (5) в табл. 2), возникающих за счет коллективных эффектов.

Как можно заметить, значения ИО, полученные при помощи феноменологических моделей, мало отличаются друг от друга и во всех случаях меньше значений, полученных при использовании микроскопических моделей. Наибольшее расхождение экспериментальных и расчетных данных наблюдается в случае нейтроноизбыточных ядер  $^{129}\text{Te}$  и  $^{123}\text{Sn}$ . Для ядра  $^{117}\text{In}$  микроскопические модели дают значения ИО, большие 1, что не соответствует эксперименту. В остальных случаях соответствие удовлетворительное.

На рис. 1 приведены ИО для изотопов Te, измеренные в ( $\gamma, n$ ) реакциях при  $E_{\gamma\text{max}} = 40$  МэВ.

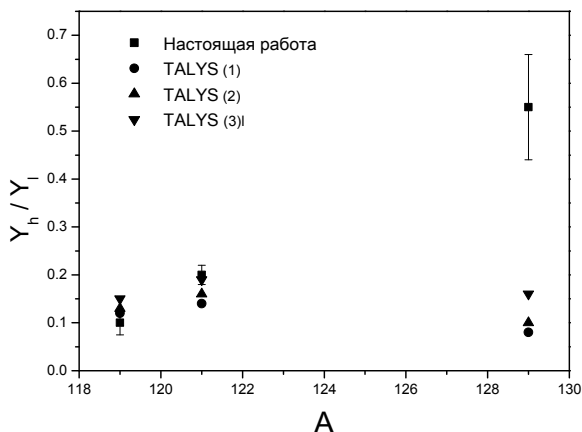


Рис. 1. Зависимость ИО от массового числа продукта для изотопов теллура.

В метастабильном состоянии рассматриваемые ядра имеют спин  $11/2^-$ , в основном состоянии  $^{119}\text{Te}$ ,  $^{121}\text{Te}$  имеют спин  $1/2^+$ , ядро  $^{129}\text{Te}$  имеет спин  $3/2^+$ . Как можно заметить, для ядер Te, которые находятся вблизи замкнутого по числу протонов ядра Sn и характеризуются небольшим значением параметра деформации, значения ИО растут с увеличением числа нейтронов. Аналогичная зависимость была замечена в работах [9, 10] при  $E_{\text{ymax}} = 25$  МэВ.

На рис. 1 помимо экспериментальных данных приведены значения ИО, рассчитанные при помощи кода TALYS 1.4 с использованием трех феноменологических моделей для функции распределения плотности ядерных уровней. Можно сказать, что расчетные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными в случае ядер  $^{119}\text{Te}$  и  $^{121}\text{Te}$ . В случае же ядра  $^{129}\text{Te}$  экспериментальные данные почти в 4 раза превосходят расчетные.

Полученные экспериментальные данные показывают, что для ядер теллура значения ИО растут с увеличением числа нейтронов. Расчетные данные не отражают этой зависимости. Значения ИО зависят от структуры заселения высокоспинового изомерного состояния. Расхождения экспериментальных и расчетных данных могут быть связаны с неполной информацией возбужденных состояний ядер в программном пакете TALYS 1.4 (для получения дополнительной информации см. в главе 4).

На рис. 2 приведены зависимости ИО от максимальной энергии тормозного излучения для реакций  $^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119m,g}\text{Te}$  и  $^{122}\text{Te}(\gamma, n)^{121m,g}\text{Te}$ . Помимо полученных результатов использованы данные работ [11, 12, 13, 14].

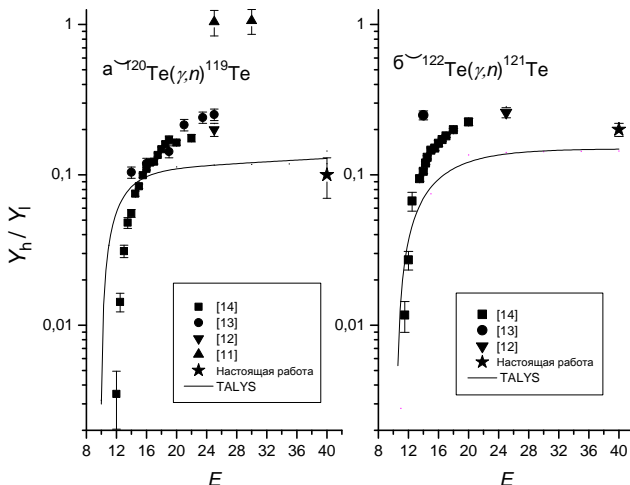


Рис. 2. Зависимость ИО от максимальной энергии тормозного излучения для реакций а)  $^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119m,g}\text{Te}$ , б)  $^{122}\text{Te}(\gamma, n)^{121m,g}\text{Te}$ .

Имеющиеся экспериментальные данные в основном хорошо согласуются, кроме данных работы [11], где для ИО реакций  $^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119m,g}\text{Te}$  получены значения, большие единицы. Наблюдается крутой рост значений ИО начиная с порога до гигантского дипольного резонанса, затем рост замедляется, а при  $E_{\gamma, \text{max}} = 40$  МэВ значение ИО несколько уменьшается. Рост кривых связан с увеличением энергии возбуждения остаточного ядра, в котором развивается каскад  $\gamma$  квантов. С увеличением максимальной энергии тормозного излучения (начиная с энергии 25 МэВ) вклад прямых процессов увеличивается, что особенно заметно для околomagических ядер, и ведет к снижению вероятности образования высоковозбужденного состояния ядра [9]. В работе [15] собраны имеющиеся в литературе данные по ИО реакций  $^{130}\text{Te}(\gamma, n)^{129m,g}\text{Te}$  в области энергий до  $E_{\gamma, \text{max}} = 72$  МэВ, где хорошо видна аналогичная зависимость.

На рис. 2 приведены также данные, полученные с использованием кода TALYS 1.4. В области энергий за максимумом дипольного резонанса расчетные

кривые расположены ниже экспериментальных. Начиная с энергии  $\sim 25$  МэВ расчетные ИО практически не меняются, в то время как экспериментальные значения несколько уменьшаются.

**Третья глава** состоит из двух частей: кратко описывается применение радиоактивных изотопов  $^{111}\text{In}$ ,  $^{117\text{m}}\text{Sn}$ ,  $^{124}\text{Sb}$ ,  $^{177}\text{Lu}$  в ядерной медицине и обсуждается возможность фотоядерного производства этих медицинских радиоизотопов.

### $^{111}\text{In}$

Радиоизотоп  $^{111}\text{In}$  применяется для диагностики опухолей головы и шеи, легких и конечностей, в сочетании с ОФЭКТ (однофотонная эмиссионная компьютерная томография) и рентгеновской компьютерной томографией. Кроме того этот радиоизотоп используется в Оже-терапии.

$^{111}\text{In}$  изотоп формируется в мишени  $^{112}\text{Sn}$  посредством двух каналов одновременно:

в  $(\gamma, n)$  реакции образуется ядро  $^{111}\text{Sn}$ , которое распадается в  $^{111}\text{In}$  с периодом полураспада 35.3 минут [ $^{112}\text{Sn}(\gamma, n) \rightarrow ^{111}\text{Sn} \rightarrow ^{111}\text{In}$ ];

в  $(\gamma, p)$  реакции образуется непосредственно конечный радиоизотоп  $^{111}\text{In}$  [ $^{112}\text{Sn}(\gamma, p) \rightarrow ^{111}\text{In}$ ].

Выходы  $(\gamma, p)$  реакций, как правило, меньше выходов  $(\gamma, n)$  реакций. В случае мишени  $^{112}\text{Sn}$  эти выходы отличаются на порядок. Однако преимущество  $(\gamma, p)$  реакций в том, что мишень и продукт являются различными химическими элементами и значит их разделение не так сложно. Таким образом, два канала образования ведут к большому выходу (152 мбн) продукта  $^{111}\text{In}$  без носителя (см. таб. 3).

Фотоядерный способ получения  $^{111}\text{In}$  из мишени олова позволяет получить образцы, не содержащие примеси долгоживущих изотопов In.

### $^{117\text{m}}\text{Sn}$

Свойства радионуклида  $^{117\text{m}}\text{Sn}$  позволяют использовать его в диагностических и терапевтических целях. Единственная гамма-линия (158.56 кэВ с 86.4% интенсивностью) удобна для осуществления визуализации (см. таб. 3). Относительно небольшой период полураспада (13.6 дн) обеспечивает приемлемую дозовую нагрузку на пациента. Радиофармацевтические препараты, включающие в себя  $^{117\text{m}}\text{Sn}$ , используются в паллиативной терапии при костных метастазах.

В данной работе мы также измерили фотовыход радиоизотопа  $^{117\text{m}}\text{Sn}$  из мишени  $^{118}\text{Sn}$ . Использование обогащенной мишени позволяет избежать образования долгоживущего радиоизотопа  $^{113}\text{Sn}$  в фотоядерных реакциях. Возможные реакции в мишени  $^{118}\text{Sn}(\gamma, p)^{117\text{m,g}}\text{In}$  ( $T_{1/2} (^{117\text{m}}\text{In}) = 116.2$  мин,  $T_{1/2} (^{117\text{g}}\text{In}) = 43.2$  мин). Таким образом, в мишени помимо  $^{117\text{m}}\text{Sn}$  образуется только короткоживущие изотопы  $^{117\text{m,g}}\text{In}$ .

Несмотря на то, что выход  $^{117m}\text{Sn}$  в фотоядерных реакциях меньше (см. таб. 3), фотопроизводство этого радионуклида может обеспечить активности, необходимые для терапевтического использования без долгоживущих радиоактивных примесей.

В таблице 3 приведены распадные характеристики радиоактивных ядер  $^{111}\text{In}$ ,  $^{117m}\text{Sn}$ ,  $^{124g}\text{Sb}$ ,  $^{177g}\text{Lu}$ , их каналы образования и измеренные выходы.

Таблица 3.

Распадные характеристики радиоактивных ядер  $^{111}\text{In}$ ,  $^{117m}\text{Sn}$ ,  $^{124g}\text{Sb}$ ,  $^{177g}\text{Lu}$ , их каналы образования и выходы.

Ядро продукт	$T_{1/2}$	Реакция	Порог реакции + кулоновский барьер МэВ	$E_{\gamma}$ (кэВ), Интенсивность (%)	Выход мБн
$^{111}\text{In}$	2.805 д	$^{112}\text{Sn}(\gamma, n) ^{111}\text{Sn}$	10.79	171.28, 90%	152 ± 15
		$^{112}\text{Sn}(\gamma, p) ^{111}\text{In}$	7.55 + 11.3	245.395, 94%	
$^{117m}\text{Sn}$	13.6 д	$^{118}\text{Sn}(\gamma, n) ^{117m}\text{Sn}$	9.33	158.56, 86.4%	17.5 ± 1.7
$^{124g}\text{Sb}$	60.2 д	$^{125}\text{Te}(\gamma, p) ^{124}\text{Sb}$	8.69 + 11.3	602.729, 98.26%	0.71 ± 0.03
		$^{126}\text{Te}(\gamma, pn) ^{124}\text{Sb}$	17.8 + 11.3		
$^{177g}\text{Lu}$	6.734 д	$^{178}\text{Hf}(\gamma, p) ^{177}\text{Lu}$	7.34 + 14	112.95, 6.4%	0.61 ± 0.06
		$^{179}\text{Hf}(\gamma, pn) ^{177}\text{Lu}$	13.44 + 14	208.37, 11.0%	
		$^{180}\text{Hf}(\gamma, p2n) ^{177}\text{Lu}$	20.7 + 14		

### $^{124}\text{Sb}$

$^{124}\text{Sb}$  изотоп применяется в качестве калибровочного источника высокоэнергетичных фотонов. Помимо этого, наличие  $\beta$  - группы с большой энергией и  $\gamma$  - излучения позволяет использовать  $^{124}\text{Sb}$  в интраваскулярной брахитерапии (внутрисосудистой брахитерапии).

Рассмотрим возможность получения  $^{124}\text{Sb}$  в фотоядерных реакциях на мишени натурального Те.

Облучение мишени Те натурального состава ведет к различным каналам реакций и формированию множества долгоживущих радионуклидов.

Выход изотопа  $^{124}\text{Sb}$  невелик (см. таб. 3). При использовании обогащенной мишени  $^{125}\text{Te}$ , выход  $^{124}\text{Sb}$  может возрасти до 10 мБн (предполагая основным каналом образования  $^{124}\text{Sb}$  реакцию  $^{125}\text{Te}(\gamma, p) ^{124}\text{Sb}$ ,

выход реакции в случае обогащенной до 100% мишени можно получить умножением значения на 14, приведенного в табл. 3).

Принимая во внимание небольшой выход  $^{124}\text{Sb}$  в фотоядерных реакциях, фотопроизводство  $^{124}\text{Sb}$  кажется не рациональным.

### $^{177}\text{Lu}$

Радиоизотоп  $^{177}\text{Lu}$  широко используется в ядерной медицине, поскольку имеет удобные распадные характеристики ( $T_{1/2} = 6.7$  дн,  $E_\gamma = 112.95$  кэВ с 6.4% интенсивностью; 208.37 кэВ с 11.0% интенсивностью) (см. таб. 3) и хорошо координируемые химические свойства. Будучи короткоживущим  $\beta$ -излучателем  $^{177}\text{Lu}$  пригоден для радиотерапии. Он может использоваться как заменитель  $^{131}\text{I}$  или усилитель  $^{90}\text{Y}$ .

В настоящее время лантаноид  $^{177}\text{Lu}$  используется для лучевой терапии рецептора соматостатина (пептидный гормон), радио-иммунотерапии, паллиативной терапии костей и радио-синовэктомии (иссечение синовиальной оболочки сустава).

Облучение мишени  $\text{HfO}_2$  натурального состава ведет к различным каналам реакций и формированию множества долгоживущих радиоизотопов.

В случае фотопроизводства  $^{177}\text{Lu}$  из мишени  $\text{Hf}$  натурального состава основным каналом образования интересующего нас радиоизотопа является  $^{178}\text{Hf}(\gamma, p)^{177}\text{Lu}$ . Другие реакции (см. таб. 3) маловероятны из-за большого энергетического барьера. Выход реакции для случая обогащенной до 100% мишени можно найти, умножая приведенное в таблице значение на фактор 3.66 (в этом случае выход будет равен 2.33 мбн). Таким образом, малый выход реакции не может обеспечить достаточных активностей даже в случае использования обогащенной мишени.

**В четвертой главе** диссертации анализируются ИО для ядер-продуктов (от  $^{44m,g}\text{Sc}$  до  $^{127m,g}\text{Xe}$ ), образованных в  $(p, n)$ ,  $(d, 2n)$  и  $(\alpha, p3n)$  реакциях рассчитанные по коду TALYS 1.4 (выбор реакции с одинаковыми массовыми числами мишеней и ядер-продуктов позволяют нам получить зависимость значений ИО от типа бомбардирующих частиц). Обсуждается зависимость значений изомерных отношений от типа и энергии налетающей частицы, спина мишени и ядра-продукта, разницы спинов изомерного и основного состояния продуктов и мишени ( $\Delta = (I_m - I_g - I_{\text{tag}})$ ), массового числа продукта, отношения  $R_{(d,2n)}/R_{(p,n)}$   $R_{(\alpha,p3n)}/R_{(p,n)}$  и схем возбужденных состояний ядер-продуктов.

При сравнении экспериментальных результатов с данными, рассчитанными по коду TALYS 1.4, получено, что:

- Расчетные данные сечений образования продуктов ядерных реакций в основном и изомерном состояниях, вызванных протонами, дейтронами и  $\alpha$ -частицами хорошо отражают зависимость ИО от типа налетающей частицы.
- Значения ИО в ядерных реакциях под действием дейтронов больше, чем в реакциях под действием протонов. Этот вывод хорошо коррелирует с экспериментальными данными, имеющимися в литературе. При этом отношения  $R_{(d,2n)}/R_{(p,n)}$  имеют наибольшие значения для ядер-продуктов с высокими спинами. Замечено, что в случае магических ядер-мишеней или ядер-продуктов  $R_{(d,2n)}/R_{(p,n)}$  имеют наименьшие значения.
- Для всех рассмотренных ядер тенденция изменения ИО в зависимости от энергии, рассчитанная в  $(p, n)$  реакциях, сохраняется и в  $(d, 2n)$  реакциях.
- Кривые энергетической зависимости ИО для нечетных по массовому числу ядер-продуктов лежат выше, по сравнению с четными по массовому числу ядрами-продуктами как для  $(p, n)$ , так и для  $(d, 2n)$  реакций, поскольку к спине падающей частицы прибавляется спин ядра-мишени.
- Установлено уменьшение ИО в зависимости от разницы спинов изомерного и основного состояния продуктов и мишеней ( $\Delta = (I_m - I_g - I_{\text{тарг}})$ ) как для  $(p, n)$ , так и для  $(d, 2n)$  реакций.
- Показано, что для ядер продуктов  $^{44}\text{Sc}$ ,  $^{86}\text{Y}$ ,  $^{87}\text{Y}$ ,  $^{129}\text{Te}$ ,  $^{94,96}\text{Tc}$ ,  $^{124}\text{Sb}$  экспериментальные данные сильно расходятся с расчетными данными. Расхождение для ядер продуктов переходной области может быть связано с неполной информацией возбужденных состояний ядер в программном пакете TALYS.

На рисунке 3 приведены функции возбуждения для основных (рис. 3(б)) и изомерных (рис. 3(а)) состояний изотопов  $^{86}_{35}\text{Y}_{47}$ , полученные в  $^{86}\text{Sr}(p, n)^{86\text{m},9}\text{Y}$  реакции экспериментально [20, 21] и с использованием кода TALYS 1.4. Можно заметить, что рассчитанные с использованием кода TALYS данные в изомерном состоянии дают сильно заниженные результаты по сравнению с экспериментальными данными.

В основном состоянии соответствие хорошее. Причины расхождений могут быть связаны с представлением уровней возбуждения ядра в коде TALYS. Девозбуждение посредством испускания  $\gamma$  квантов ядер, имеющих ираст-



состояния, приводит к тому, что высокоспиновое изомерное состояние конечного ядра образуется с большей вероятностью, чем предсказывает программный пакет.

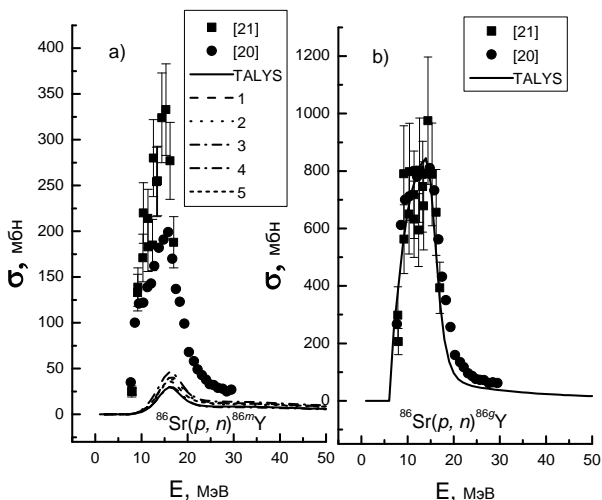


Рис. 3. Экспериментальные и рассчитанные с помощью кода TALYS 1.4 функции возбуждения для реакций  $^{86}\text{Sr}(p, n)^{86m,g}\text{Y}$  для всех возможных моделей для ядерных уровней (обозначения см. в тексте).

С целью возможного объяснения несоответствий экспериментальных и расчетных данных были изучены высокоспиновые ираст уровни  $^{44}_{21}\text{Sc}_{23}$ ,  $^{82}_{37}\text{Rb}_{45}$ ,  $^{86}_{39}\text{Y}_{47}$ ,  $^{87}_{39}\text{Y}_{48}$ ,  $^{96}_{43}\text{Tc}_{53}$ ,  $^{99}_{43}\text{Tc}_{56}$ ,  $^{127}_{52}\text{Te}_{75}$ ,  $^{129}_{52}\text{Te}_{77}$ ,  $^{131}_{52}\text{Te}_{79}$  ядер продуктов. В результате проведенных исследований сделан вывод, что наличие высокоспиновых ираст уровней влияет на значения изомерных отношений.

Ираст уровень это ближайший к основному состоянию энергетический уровень ядра при определенном высоком спине, то есть состояние ядра с наименьшей энергией.

В настоящее время интенсивно (экспериментально и теоретически) исследуются схемы высокоспиновых ираст уровней сферидальных и деформированных ядер, которые образуются в реакциях с тяжелыми ионами.

Высокоспиновые ирраст состояния переходных ядер имеют разные каналы образования: а) многократное кулоновское возбуждение, б) образование компаунд - ядра и его последующий распад.

а) В ядерных реакциях, когда налетающий тяжелый ион имеет кинетическую энергию меньше кулоновского барьера иона и ядра мишени, происходит многократное дальнедействующее кулоновское взаимодействие. Сила отталкивания между ионом и ядром не позволяет иону проникнуть внутрь ядра и вызывать взаимодействие с вылетом частиц. Энергия налетающего иона растрчивается на вращение, а не на нагревание ядра, то есть оно остается "холодным" [16, 17]. Ядро мишень возбуждается, но не меняет свой состав. Образуются ирраст уровни. Если ядро - мишень деформировано по числу нейтронов, то образуются также коллективные вращательные полосы при  $\gamma$  распаде образующего ядра продукта.

б) Под действием тяжелого иона образуется компаунд ядро (например,  $^{73}\text{Ge}(^{16}\text{O}, p2n)^{86}\text{Y} - [18]$ ) с высокой энергией возбуждения. Энергия возбуждения складывается из энергии связи иона в компаунд ядре и приносимой ионом кинетической энергии. Из этого возбужденного состояния могут идти реакции с вылетом нейтронов и заряженных частиц (протонов - если энергия достаточно для преодоления кулоновского барьера), т.е. реакции ( $xp$ ,  $ул$ ). В результате конечное ядро - продукт проходит через ряд возбужденных состояний, в том числе высокоспиновых.

Как показали исследования [18, 19], при девозбуждении ирраст полос через электрические дипольные ( $E1$ ) и квадрупольные ( $E2$ ), магнитные дипольные ( $M1$ ) переходы высокоспиновые долгоживущие изомерные состояния заселяются с большей вероятностью, в результате чего и увеличиваются изомерные отношения.

**В заключении** приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе:

- Впервые получены экспериментальные данные относительно выходов продуктов  $^{173,175}\text{Hf}$ , образованных в ( $\gamma$ ,  $xn$ ) реакциях при энергии  $E_e = 40$  МэВ.
- Получено, что выход  $^{111}\text{In}$  обеспечивает получение образцов высокой активности без носителя и не содержащих примесей долгоживущих изотопов индия для применения в медицине. Выход радионуклида  $^{117m}\text{Sn}$  может обеспечить терапевтическое количество этого радиоизотопа без долгоживущих радиоактивных примесей.
- Получено, что фотопроизводство  $^{124}\text{Sb}$  и  $^{177g}\text{Lu}$  радиоизотопов нецелесообразно даже при использовании обогащенных мишеней Те и

HfO<sub>2</sub>, из-за малого значения выходов и образование большого количества побочных долгоживущих радиоизотопов.

- Получены сечения для ядер-продуктов от <sup>44</sup>Sc до <sup>127</sup>Xe в реакциях с одинаковыми массовыми числами мишеней и ядер-продуктов на основе расчетов по коду TALYS 1.4. Расчетные данные сравнены с экспериментальными данными. Показано, что расчетные данные хорошо отражают зависимость значений изомерных отношений от типа и энергии налетающей частицы, спина мишени и ядра-продукта, разницы спинов изомерного и основного состояния продуктов и мишеней ( $\Delta = (I_m - I_g - I_{\text{targ}})$ ), массового числа продукта, отношения  $R_{(d,2n)}/R_{(p,n)}$   $R_{(sp,2n)}/R_{(p,n)}$ .
- Показано, что для ядер продуктов <sup>44</sup>Sc, <sup>86</sup>Y, <sup>87</sup>Y, <sup>129</sup>Te, <sup>94,96</sup>Tc, <sup>124</sup>Sb экспериментальные данные сильно расходятся с расчетными данными. Расхождение для ядер продуктов переходной области может быть связано с неполной информацией возбужденных состояний ядер в программном пакете TALYS.

### **Список работ, составивших содержание диссертации:**

1. А.С. Данагулян, Г.О. Оганесян, Т.М. Бахшиян, Р.О. Авакян, А.Э. Аветисян, И.А. Керобян, Р.К. Даллакян, Фотоядерные реакции на

- мишенях  $^{112,118,124}\text{Sn}$ ,  $^{\text{нат}}\text{Te}$ ,  $^{\text{нат}}\text{Hf}$ , ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, том 77, с. 1378–1385 (2014).
2. А.С. Данагулян, Г.О. Оганесян, Т.М. Бахшиян, Р.О. Авакян, А.Э. Аветисян, И.А. Керобян, Р.К. Даллакян, Получение медицинских радиоизотопов  $^{111}\text{In}$ ,  $^{117\text{m}}\text{Sn}$ ,  $^{124}\text{Sb}$  и  $^{177}\text{Lu}$  в фотоядерных реакциях, ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, том 78, с. 483–488 (2015).
  3. Т. М. Бахшиян, Обсуждение изомерных отношений в  $(p, n)$  и  $(d, 2n)$  реакциях, ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, том 79, с. 2 – 7 (2016).
  4. А.С. Данагулян, Г.О. Оганесян, Т.М. Бахшиян, Г.В. Мартиросян, Особенности изомерных отношений в ядерных реакциях с различными налетающими частицами, ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, том 79, с. 220–228 (2016).
  5. А.С. Данагулян, Г.О. Оганесян, Т.М. Бахшиян, И.А. Керобян, Анализ изомерных отношений среднетяжелых ядер, ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, том 79, с. 461–467 (2016).

Основные результаты диссертационной работы были представлены на международных конференциях:

1. A.S. Danagulyan, T.M. Bakhshiyani, G.H. Hovhannisyan, Some Features of isomeric ratios in nuclear reactions induced by  $p$ ,  $d$ , and  $\alpha$ , NUCLEUS 2015, Saint-Petersburg, June 29 – July 3, p. 119 (2015).
2. A.S. Danagulyan, G.H. Hovhannisyan, T.M. Bakhshiyani et al., Formation of the medical radionuclides  $^{111}\text{In}$ ,  $^{117\text{m}}\text{Sn}$ ,  $^{124}\text{Sb}$  and  $^{177}\text{Lu}$  in photonuclear reactions, NUCLEUS 2013, Moscow, October 8 – 12, p. 252 (2013).

Միջ ու կ այ ի ն ռ Ե ա կ ց ի ան Ե ռ ի ու ս ու մ ն ա ս ի ռ ու թ յ ու ն ը ք ժ կ ա կ ան  
ի գ ո տ ու չ ն Ե ի  
ս տ ա ց մ ան ն ա ս ա տ ա կ ո վ և ի գ ո մ Ե ռ հ ա ղ ա ք Ե ռ ու թ յ ու ն ն Ե ռ ի  
ք ն ն ա ղ կ ու մ ը

Ա մ փ ո փ ա գ ի ը

Ատենախոսական աշխատանքը նվիրված է ֆոտոմիջուկային ռեակցիաներում  $^{111}\text{In}$ ,  $^{117\text{m}}\text{Sn}$ ,  $^{124}\text{Sb}$  և  $^{177}\text{Lu}$  բժշկական ռադիոիզոտոպների ստացմանը  $E_{\gamma\text{max}} = 40$  ՄեՎ էներգիայի դեպքում և  $(\gamma, n)$ ,  $(p, n)$ ,  $(d, 2n)$ ,  $(\alpha, p3n)$  ռեակցիաներում առաջացած արդյունք-միջուկների իզոմերիարաբերությունների քննարկմանը:

$^{112,118,124}\text{Sn}$  հարստացված և  $\text{Te}$ ,  $\text{HfO}_2$  բնական բաղադրությամբ թիրախները ճառագայթվել են երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտի գծային էլեկտրոնային արագացուցիչի վրա  $E_e = 40$  ՄեՎ էներգիայի դեպքում: Իրականացվել է երկու ճառագայթում՝ 18 ր. և 44 ր. տևողությամբ: Արդյունք-միջուկների ( $^{110}\text{Sn}$ ,  $^{126\text{g}}\text{Sb}$ ,  $^{127}\text{Sb}$ ,  $^{129\text{g}}\text{Sb}$ ,  $^{179}\text{Lu}$ ,  $^{123\text{m}}\text{Te}$ ,  $^{129\text{m}}\text{Te}$ ) ելքերի հաշվարկը կատարվել է ներմուծված ակտիվության մեթոդով, որպես մոնիտոր ռեակցիա օգտագործելով  $^{65}\text{Cu}(\gamma, n)^{64}\text{Cu}$  (ելքը - 53 մբն) և  $^{63}\text{Cu}(\gamma, 2n)^{61}\text{Cu}$  (ելքը - 2.6 մբն):

$(\gamma, x)$  ռեակցիայում  $^{111}\text{In}$ ,  $^{117\text{m}}\text{Sn}$ ,  $^{124}\text{Sb}$  և  $^{177}\text{Lu}$  բժշկական ռադիոիզոտոպների փորձարարական ելքերի արժեքներից ելնելով կատարվել է հետևյալ եզրակացությունը՝

$^{111}\text{In}$  (152 ± 15 մբն) իզոտոպի ելքը ֆոտոմիջուկային ռեակցիաներում ապահովում է նրա կիրառությունը միջուկային բժշկության մեջ:  $^{117\text{m}}\text{Sn}$  իզոտոպի ելքը (17.5 ± 1.7 մբն) կարող է ապահովել նրաթերապևտիկ քանակությունը:

Ֆոտոմիջուկային ռեակցիաներում  $^{124}\text{Sb}$  և  $^{177\text{g}}\text{Lu}$  իզոտոպների արտադրությունը նպատակահարմար չէ նրանց փոքր ելքերի արժեքների (0.71 ± 0.03 և 0.61 ± 0.06 մբն, համապատասխանաբար) պատճառով, նույնիսկ հարստացված  $\text{Te}$  և  $\text{HfO}_2$  թիրախների դեպքում:

Չափվել են հետազոտվող թիրախներում  $E_{\gamma\text{max}} = 40$  ՄեՎ էներգիայի դեպքում բոլոր հնարավոր ֆոտոմիջուկային ռեակցիաների ելքերը: Առաջին անգամ ստացվել են  $^{173}\text{Hf}$  (2.1 ± 0.2

մբև) և  $^{175}\text{Hf}$  ( $61 \pm 3$  մբև) արդյունաբերական փորձարարական ելքերը ( $\gamma, xn$ ) ռեակցիաներում:

Կատարվել է  $^{119m,g}\text{Te}$ ,  $^{121m,g}\text{Te}$ ,  $^{117m,g}\text{In}$ ,  $^{123m,g}\text{Sn}$  արդյունաբերական կենտրոնի իզոմեր հարաբերությունների փորձարարական և հաշվարկային տվյալների համեմատություն: Հաշվարկային արդյունքները ստացվել են TALYS 1.4 ծրագրային փաթեթի միջոցով: Այս կողմից միջոցով ստացվել են նաև  $^{44}\text{Sc}$ -ից մինչև  $^{127}\text{Xe}$  արդյունաբերական կտրվածքները և իզոմեր հարաբերությունները ( $p, n$ ), ( $d, 2n$ ) և ( $\alpha, p3n$ ) ռեակցիաներում: Այդ արդյունքները համեմատվել են ներկայումս գրականության մեջ առկա փորձարարական տվյալների հետ: Քննարկվել են իզոմեր հարաբերությունների կախվածությունը ընկնող մասնիկի տեսակից և էներգիայից, թիրափ և արդյունաբերական սպինից, ( $p, n$ ) և ( $d, 2n$ ) ռեակցիաներում  $E = 10$  ՄեՎ էներգայի դեպքում արդյունաբերական կենտրոնի իզոմեր և հիմնական վիճակների և կենտրոնի սպինների տարբերությունից ( $\Delta = (I_m - I_g - I_{\text{target}})$ ), արդյունաբերական կենտրոնի զանվածային թվից,  $R_{(d,2n)}/R_{(p,n)}$ ,  $R_{(\alpha,p3n)}/R_{(p,n)}$  հարաբերությունից: Քննարկվել են նաև ( $p, n$ ) և ( $d, 2n$ ) ռեակցիաներում Sb, Ag, Rh, Tc, In արդյունաբերական կենտրոնի իզոտոպների իզոմեր հարաբերությունների էներգետիկ կախվածությունը: Փորձարարական և հաշվարկային տվյալների համեմատության ժամանակ նկատվել է, որ  $^{44}\text{Sc}$ ,  $^{86}\text{Y}$ ,  $^{87}\text{Y}$ ,  $^{129}\text{Te}$ ,  $^{94,96}\text{Tc}$ ,  $^{124}\text{Sb}$  միջուկների դեպքերում արդյունքներն իրարից կտրուկ տարբերվում են: Այդ անհամապատասխանությունների բացատրության նպատակով ուսումնասիրվել են  $^{44}_{21}\text{Sc}_{23}$ ,  $^{82}_{37}\text{Rb}_{45}$ ,  $^{86}_{39}\text{Y}_{47}$ ,  $^{87}_{39}\text{Y}_{48}$ ,  $^{96}_{43}\text{Tc}_{53}$ ,  $^{99}_{43}\text{Tc}_{56}$ ,  $^{127}_{52}\text{Tc}_{75}$ ,  $^{129}_{52}\text{Tc}_{77}$ ,  $^{131}_{52}\text{Tc}_{79}$  արդյունաբերական կենտրոնի բարձր սպինային իռաստմակարդակները: Ուսումնասիրությունների արդյունքում եզրակացվել է, որ այդ գրգռված բարձր սպինային վիճակներն ազդում են իզոմեր հարաբերությունների արժեքների վրա:

Investigation of nuclear reactions for production of medical isotopes  
and analysis of isomeric ratios

Abstract

This thesis is devoted to the medical isotopes  $^{111}\text{In}$ ,  $^{117\text{m}}\text{Sn}$ ,  $^{124}\text{Sb}$ ,  $^{177}\text{Lu}$  production in the photonuclear reactions and analysis of the isomeric ratios, formed in the  $(\gamma, n)$ ,  $(p, n)$ ,  $(d, 2n)$ ,  $(\alpha, p3n)$  reactions.

The targets of enriched tin isotopes  $^{112,118,124}\text{Sn}$  and the natural composition Te,  $\text{HfO}_2$  were irradiated at the linear electrons accelerator at the energy  $E_e = 40$  MeV. Two irradiations were realized: within 18 min. and 44 min. respectively. The yields of products of photo-nuclear reactions were measured by the method of induced activity. As a monitor reaction were selected  $^{65}\text{Cu}(\gamma, n)^{64}\text{Cu}$  (yield - 53 mb) and  $^{63}\text{Cu}(\gamma, 2n)^{61}\text{Cu}$  (yield - 2.6 mb) reactions.

Based on the experimental yields of medical radioisotopes  $^{111}\text{In}$ ,  $^{117\text{m}}\text{Sn}$ ,  $^{124}\text{Sb}$ ,  $^{177}\text{Lu}$  in the photonuclear reactions the following conclusions are made:

The yield of  $^{111}\text{In}$  isotope ( $152 \pm 15$  mb) provides to production carrier-free sample of high activity and does not containing impurities long-lived indium isotopes for use in medicine. The yield of  $^{117\text{m}}\text{Sn}$  radionuclide ( $17.5 \pm 1.7$  mb) can also provide a therapeutic amount of radioisotope without long-lived radioactive impurities.

The production of radioisotopes  $^{124}\text{Sb}$  and  $^{177\text{g}}\text{Lu}$  is inadvisable in photonuclear reactions, even when using enriched targets (Te and  $\text{HfO}_2$ ), due to the small value of the yields ( $0.71 \pm 0.03$  and  $0.61 \pm 0.06$  mb, respectively) and the formation of a large amount of by-long-lived radioisotopes.

We measured all the possible yields of photo-nuclear reactions products in the investigated targets at energy  $E_{\gamma\text{max}} = 40$  MeV. The experimental yields of products  $^{173}\text{Hf}$  ( $2.1 \pm 0.2$  mb) and  $^{175}\text{Hf}$  ( $61 \pm 3$  mb) formed in  $(\gamma, xn)$  reactions are obtained for the first time.

The experimental values of the isomeric ratios  $^{119\text{m,g}}\text{Te}$ ,  $^{121\text{m,g}}\text{Te}$ ,  $^{117\text{m,g}}\text{In}$ ,  $^{123\text{m,g}}\text{Sn}$  products are obtained. It is analyzed the dependence of the experimental values of the isomeric ratios on the energy of  $\gamma$  rays and the mass number of the

product. The experimental data are compared with those calculated by the code TALYS 1.4. Isomeric ratios of  $^{44m,g}\text{Sc}$  to  $^{127m,g}\text{Xe}$  products, formed in the  $(p, n)$ ,  $(d, 2n)$  and  $(\alpha, p3n)$  reactions with the same mass numbers of targets and products, were also calculated by TALYS 1.4. These data are compared with the available in the literature experimental data. The dependence of the values of the isomeric ratios on the type and energy of the incident particle, the spin of the target and the nucleus-product, the difference of the spins of the isomeric and ground state products and an odd number of targets in the  $(p, n)$  and  $(d, 2n)$  reactions at energy  $E_{\gamma\text{max}} = 10 \text{ MeV}$  ( $\Delta = (I_m - I_g - I_{\text{target}})$ ), the mass number of the product, the relationship  $R_{(d,2n)}/R_{(p,n)}$ ,  $R_{(\alpha,p3n)}/R_{(p,n)}$  are discussed. Dependence of the isomeric ratios of Sb, Ag, Rh, Tc, In isotopes on incident particles energy in the  $(p, n)$  and  $(d, 2n)$  reactions are also discussed. Discrepancies of the experimental and calculated data for the  $^{44}\text{Sc}$ ,  $^{86}\text{Y}$ ,  $^{87}\text{Y}$ ,  $^{129}\text{Te}$ ,  $^{94,96}\text{Tc}$ ,  $^{124}\text{Sb}$  products have been observed. For the inconsistencies explanation the high-spin yrast levels of  $^{44}_{21}\text{Sc}_{23}$ ,  $^{82}_{37}\text{Rb}_{45}$ ,  $^{86}_{39}\text{Y}_{47}$ ,  $^{87}_{39}\text{Y}_{48}$ ,  $^{96}_{43}\text{Tc}_{53}$ ,  $^{99}_{43}\text{Tc}_{56}$ ,  $^{127}_{52}\text{Te}_{75}$ ,  $^{129}_{52}\text{Te}_{77}$ ,  $^{131}_{52}\text{Te}_{79}$  products have been studied. As a consequence of the investigations, it is found that these high-spin yrast levels affect the value of the isomeric ratios.

### **Цитируемая литература**

1. Handbook on photonuclear data for applications. Cross sections and spectra, IAEA-TENDOC-1178, 2000.
2. A.V. Varlamov, V.V. Varlamov, D.S. Rudenko and M.E. Stepanov, *Atlas of Giant Dipole Resonances*, IAEA NUCLEAR DATA SECTION (1999).
3. <http://cdfc.sinp.msu.ru/exfor/index.php>
4. Н.А. Демехина, А.С. Данагулян, Г.С. Карапетян, Анализ изомерных отношений в  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, p)$  реакция в области энергии гигантского резонанса, ЯФ 65, 390-395 (2002).
5. А.С. Данагулян, Н.А. Демехина, Изомерные отношения выходов в фотоядерных реакциях, ЯФ т. 27, вып. 4, стр. 877-881 (1978).
6. J.R. Huizenga, R. Vandenbosch, Interpretation of Isomeric Cross-Section Ratios for  $(n, \gamma)$  and  $(\gamma, n)$  Reactions, Phys. Rev. 4, 120 (1960).



- R. Vandenbosch *et al.*, Isomer Ratios for  $^{87}\text{Y}$ ,  $^{87m}\text{Y}$  and the Spin Dependence of the Nuclear Level Density, *Phys. Rev.* 13, 137 (1965).
7. А.С. Данатулян, Г.О. Оганесян, А.Р. Балабекян и др., Исследование изомерных отношений в реакциях при высоких энергиях, *ЯФ* 76, 2, стр. 1-7 (2013).
  8. <http://www.talys.eu/>
  9. Ю.П. Гангрский, А.П. Тончев, Возбуждение изомерных состояний в фотоядерных реакциях, *ЭЧАЯ* (1996) т. 27 вып. 4, стр. 1044-1098.
  10. В.М. Мазур, Возбуждение изомерных состояний в фотонейтронных реакциях в области гигантского дипольного резонанса, *ЭЧАЯ* (2000), т. 31 вып 6, стр. 386-430.
  11. С.Р. Палванов, О. Раджабов, *Атомная энергия* 87, 533 (1999).
  12. А.Г. Белов, Ю.П. Гангрский, А.П. Тончев, Н.П. Балабанов, Возбуждение изомерных состояний  $11/2$  в реакциях  $(\gamma, n)$ , *ЯФ* 59, № 4, 585-591 (1996).
  13. Tran Duc Thiep, Truong Thi An, Nguyen Tuan Khai, *et al.*, The isomeric ratios in some photonuclear reactions  $(\gamma, n)$ ,  $(\gamma, p)$ ,  $(\gamma, 2n)$  and  $(\gamma, np)$  induced by bremsstrahlungs with end-point energies in the Giant Dipole Resonance region, *Phys. Part. Nucl. Lett.*, vol.6, Issue 2, pp 126–133 (2009).
  14. В.М. Мазур, З.М. Биган, Д.М. Симочко, Т.В. Полторжицька, *Письма в ЭЧАЯ* 9, 411 (2012).
  15. Tran Duc Thiep, Truong Thi An *et al.*, Study of the isomeric ratios in photonuclear reactions of natural indium induced by bremsstrahlungs with end-point energies in the giant dipole resonance region, Vol. 10, Issue 4, pp 340–348 (2013).
  16. Ш. Бриансон, И.Н. Михайлов, Структура высокоспиновых состояний атомных ядер из кулоновского возбуждения, *ЭЧАЯ* (1982), т. 13, вып. 2, стр. 245-299.
  17. О. Бор, Б. Моттельсон, Структура атомного ядра, изд. «Мир», Москва, т. 2, стр. 50 (1977).
  18. Jian Li, C.Y. He, Y. Zheng, Signature splitting and magnetic rotation in  $^{86}\text{Y}$ , *Phys. Rev. C* 88, 014317 (2013).
  19. A. Astier, M.G. Porquet, Ts. Venkova *et al.*, High-spin structures of  $^{124-131}\text{Te}$ : Competition of proton- and neutron-pair breakings, *Eur. Phys. J. A* 50: 2(2014).
  20. В.Н. Левковский, Сечения активации нуклидов средней массы ( $A=40-100$ ) протонами и  $\alpha$  частицами средних энергий ( $E=10-50$  МэВ) *Интер-Весы*, Москва (1991).
  21. F. Rosch, S. M.Qaim, and G. Stocklin, Nuclear Data Relevant to the Production of the Positron Emitting Radioisotope  $^{86}\text{Y}$  via the  $^{86}\text{Sr}(p, n)$  and  $^{(nat)}\text{Rb}(^3\text{He}, xn)$  Processes, *Radiochimica Acta* 61, 1 (1993).