

ВЛИЯНИЕ КАНАЛА РЕАКЦИИ НА ИЗОМЕРНОЕ ОТНОШЕНИЕ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ $^{184m,g}\text{Re}$

Р.В. АВЕТИСЯН

Национальная научная лаборатория им. А.И. Алиханяна, Ереван, Армения

e-mail: rave@mail.yerphi.am

(Поступила в редакцию 18 марта 2019 г.)

Исследовано влияние канала реакции на Изомерное Отношение (ИО) при получении $^{184m,g}\text{Re}$ изомерной пары. Были вычислены функции возбуждения для $^{184m,g}\text{Re}$, образованные в результате следующих реакций: $^{184}\text{W}(\text{p},\text{n})$, $^{186}\text{W}(\text{p},3\text{n})$, $^{184}\text{W}(\text{d},2\text{n})$, $^{186}\text{W}(\text{d},4\text{n})$, $^{181}\text{Ta}(\alpha,\text{n})$ и $^{185}\text{Re}(\gamma,\text{n})$. Для этой цели были использованы различные модели ядерных кодов TALYS 1.9 и EMPIRE 3.2. Изомерные отношения, вычисленные для вышеупомянутой изомерной пары для различных каналов (протон-, дейtron-, альфа- и гамма-индуцированные реакции), были определены от порога реакции до 50 МэВ. В рамках работы было проведено сравнение теоретических расчетов с экспериментальными данными.

1. Введение

Исследования ядерных изомеров вносят важный вклад в развитие и понимание структуры ядра. Они открывают множество возможностей для изучения возбужденных состояний ядер. Экспериментальные измерения и теоретические расчеты сечений изомерных пар в зависимости от энергии падающих частиц дают полезную информацию о таких параметрах как спин, четность, а также о структуре уровней образовавшегося ядра. Особый интерес представляют исследования реакций с участием различных бомбардирующих частиц, поскольку при каждом типе частиц бывает получена информация относительно отдельных групп вышеуказанных параметров. При использовании широкого набора бомбардирующих частиц бывает получена более полная информация относительно свойств ядерных уровней.

Исследования функций возбуждения и ИО ядерных реакций имеют большое значение для тестирования моделей ядерных реакций. Изучение изомерных сечений дает важную информацию о механизме ядерной реакции, в частности, о механизме передачи энергии и углового момента в процессе реакции.

ИО определяется различным образом, а именно, отношение сечения высокоспинового состояния к низкоспиновому или отношение сечения изомерного уровня к полному сечению. В данной работе ИО определяется как отношение

сечения изомерного уровня к полному сечению.

Как известно, ИО зависит от величины спинов основного и изомерного состояний, разности энергий между уровнями, наличия промежуточных состояний и моды распада, а также от начала предравновесного излучения [1, 2]. Таким образом, экспериментальные и теоретические исследования ИО как функции от энергии падающей частицы и канала реакции могут привести к полезной информации о спине и о структуре уровней конечного ядра.

Различные теоретические модели по-разному описывают механизмы ядерных реакций. Информация о соотношении сечений в основном и изомерном состояниях представляет интерес с разных точек зрения, а именно для фундаментальных исследований (например, исследование механизма взаимодействия адрон-ядро, проверки различных теоретических моделей), а также для прикладных исследований (например, для оптимизации выхода медицинских радиоизотопов и оценки сопутствующих примесей). Для развития теоретических моделей необходимо проведение сравнений предсказаний различных моделей реакций [3].

Относительная заселенность основного и изомерного состояний определяется начальной энергией возбуждения, распределением спинов составного ядра, числом и типом испускаемых ядерных частиц, которые уносят энергию и угловой момент [2].

Для получения $^{184\text{g,m}}\text{Re}$ изотопа соответствующие характеристики из NuDat 2.7 [4] для реакций $^{184}\text{W}(\text{p}, \text{n})$, $^{186}\text{W}(\text{p}, 3\text{n})$, $^{184}\text{W}(\text{d}, 2\text{n})$, $^{186}\text{W}(\text{d}, 4\text{n})$, $^{181}\text{Ta}(\alpha, \text{n})$ и $^{185}\text{Re}(\gamma, \text{n})$ собраны в Таблице.

Как видно из таблицы, период полураспада изомерного состояния

Пороги и характеристики распада исследуемых реакций

Ядро	Реакция	Порог реакции, МэВ	E_γ , кэВ	Интенсивность, (%)	Период полураспада, день	Спин
$^{184\text{g}}\text{Re}$	$^{184}\text{W}(\text{p}, \text{n})$	2.27	792.067 894.76 903.282	37.7 15.7 38.1	35.4	3(-)
	$^{186}\text{W}(\text{p}, 3\text{n})$	15.29				
	$^{186}\text{W}(\text{d}, 4\text{n})$	17.62				
	$^{184}\text{W}(\text{d}, 2\text{n})$	4.54				
	$^{181}\text{Ta}(\alpha, \text{n})$	10.08				
	$^{185}\text{Re}(\gamma, \text{n})$	7.67				
$^{184\text{m}}\text{Re}$	$^{184}\text{W}(\text{p}, \text{n})$	2.46	104.7395 216.547 252.845 1173.77	13.6 9.5 10.8 1.23	169	8(+)
	$^{186}\text{W}(\text{p}, 3\text{n})$	15.48				
	$^{186}\text{W}(\text{d}, 4\text{n})$	17.81				
	$^{184}\text{W}(\text{d}, 2\text{n})$	4.73				
	$^{181}\text{Ta}(\alpha, \text{n})$	10.27				
	$^{185}\text{Re}(\gamma, \text{n})$	7.86				

значительно больше, чем основного состояния, однако измерить сечения для обоих состояний возможно.

Вышеупомянутые ядерные реакции, в зависимости от канала, исследуются на разных ускорителях. Протон-индукционные реакции удобно провести на циклотронах, в частности, на С18/18 [5], который установлен в Национальной Научной лаборатории им. А.Алиханяна и будет запущен в ближайшее время. Измерение гамма-индукционной реакции проводится на линейном ускорителе ЛУЭ-75 [6] Национальной Научной лаборатории им. А.Алиханяна. Исследования дейтрон- и альфа-индукционных реакций можно провести на ускорителях, которые обеспечивают соответствующие пучки.

2. Модельные вычисления и результаты

Особый интерес представляет проведение расчетов с использованием различных кодов и сравнение полученных результатов. Модельные коды обычно используются для расчета сечений ядерных реакций, особенно в тех случаях, когда отсутствуют экспериментальные данные или имеются существенные разногласия между ними. Более того, модельные коды позволяют экстраполировать и прогнозировать экспериментальные данные, а также обеспечивать их согласованность.

В настоящей работе с этой целью вычисления проводились программными пакетами TALYS 1.9 [7] и EMPIRE 3.2 [8], в которых используется библиотека входных параметров RIPL-3 (Reference Input Parameter Library) [9], включающая в себя ядерные массы, дискретные уровни и схемы распадов, плотности ядерных уровней, оптические параметры и т.д.

TALYS 1.9 – программа для анализа и предсказания сечений ядерных реакций. Основной целью ее создания является моделирование ядерных реакций с участием нейtronов, фотонов, протонов, дейтронов, тритонов, ^3He - и α -частиц в диапазоне энергий 1 кэВ – 200 МэВ и для нуклидов с атомной массой $A \geq 12$.

EMPIRE 3.2 представляет собой программу расчета ядерных реакций, включающую различные ядерные модели. В коде EMPIRE 3.2 в качестве начальных частиц могут быть выбраны фотоны, нуклоны, дейтроны, тритоны, α -частицы, легкие и тяжелые ионы. Диапазон энергий начинается чуть выше резонансной области в случае нейтрана и распространяется до нескольких сотен МэВ для реакций, индуцированных тяжелыми ионами. Вычисления проводятся на базе основных моделей ядерных реакций: оптической, составного ядра, предравновесной и равновесной эмиссии, гибридного моделирования Монте-Карло.

Расчеты зависимости ИО от энергии падающих частиц для изомерной пары $^{184m,g}\text{Re}$, из реакций $^{184}\text{W}(\text{p},\text{n})$, $^{186}\text{W}(\text{p},3\text{n})$, $^{184}\text{W}(\text{d},2\text{n})$, $^{186}\text{W}(\text{d},4\text{n})$ и $^{185}\text{Re}(\gamma,\text{n})$, выполненные кодами TALYS 1.9 и EMPIRE 3.2, представлены на Рис.1–4.

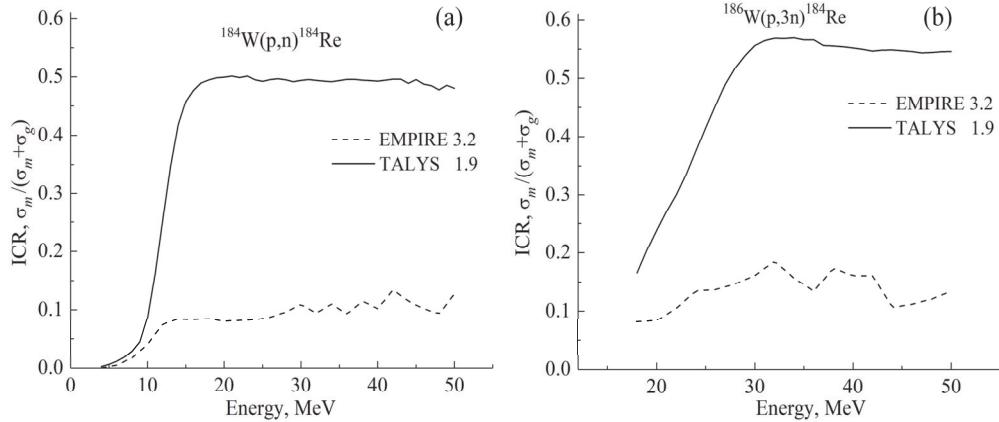


Рис.1. Теоретический расчет ИО изомерной пары $^{184m,g}\text{Re}$ от реакций:
(a) $^{184}\text{W}(\text{p},\text{n})$ и (b) $^{186}\text{W}(\text{p},3\text{n})$.

Для всех каналов реакций (Рис.1–4) результаты вычислений ИО по коду TALYS 1.9 значительно превышают значения ИО, вычисленные по коду EMPIRE 3.2. Однако поведение этих зависимостей схожее, а именно, в области низких энергий для каждой реакции ИО растет с увеличением энергии, затем при относительно высоких энергиях достигает насыщения.

Как показали исследования, с увеличением энергии первичной частицы ИО растет, а затем наступает насыщение. Однако, в зависимости от канала реакции насыщение наступает при разных энергиях падающей частицы. В случае испускания многих частиц насыщение происходит при более высокой энергии падающей частицы.

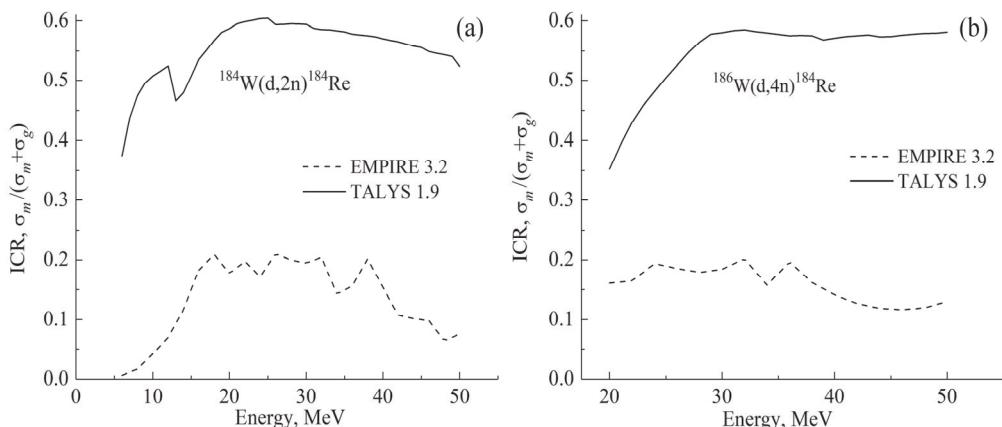


Рис.2. Теоретический расчет ИО изомерной пары $^{184m,g}\text{Re}$ от реакций:
(a) $^{184}\text{W}(\text{d},2\text{n})$ и (b) $^{186}\text{W}(\text{d},4\text{n})$.

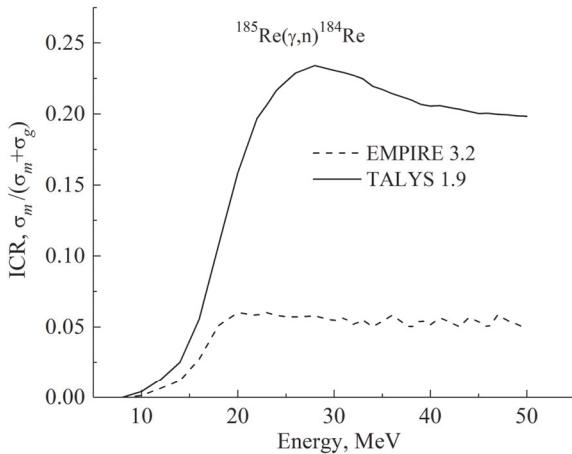


Рис.3. Теоретический расчет ИО изомерной пары $^{184\text{mg}}\text{Re}$ от $^{185}\text{Re}(\gamma, \text{n})$ реакции.

На Рис.4 для $^{181}\text{Ta}(\alpha, \text{n})^{184}\text{Re}$ реакции представлено сравнение теоретических расчетов ИО с использованием кодов TALYS 1.9 и EMPIRE 3.2 с экспериментальными данными [11–13, 15]. Наблюдаются несоответствия между экспериментальными данными различных авторов и теоретическими расчетами с использованием кодов TALYS 1.9 и EMPIRE 3.2.

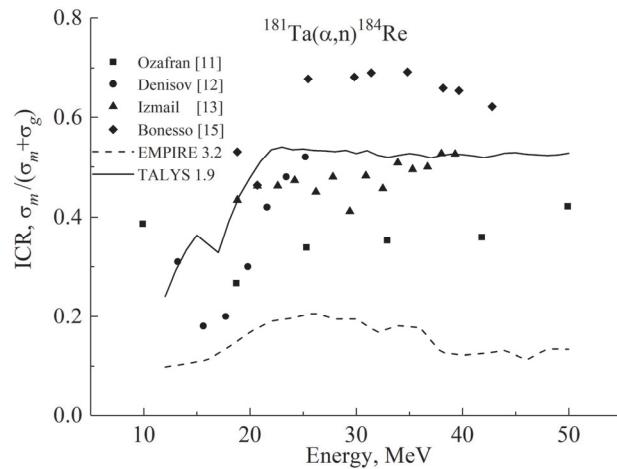


Рис.4. Теоретический расчет ИО изомерной пары $^{184\text{mg}}\text{Re}$ с экспериментальными данными от $^{181}\text{Ta}(\alpha, \text{n})$ реакции.

Для понимания природы разногласий в ИО между результатами, полученными при вычислениях с использованием различных моделей и экспериментальными данными, отдельно по кодам TALYS 1.9 и EMPIRE 3.2 проводились вычисления функций возбуждения для $^{181}\text{Ta}(\alpha, \text{n})^{184}\text{Re}$ реакции. Это обусловлено тем, что в отличие от реакций на обогащенных изотопах вольфрама, относительно которых экспериментальные данные в базе данных EXFOR (Experimental

Nuclear Reaction Data) [21] отсутствуют, экспериментальные данные по реакции $^{181}\text{Ta}(\alpha, n)^{184}\text{Re}$ имеются. В случае реакции на вольфраме имеются экспериментальные данные только для натурального вольфрама. По этой причине сравнение функций возбуждения, а также ИО для вольфрама проводилось для реакции $^{\text{nat}}\text{W}(p, xn)^{184\text{g}}\text{Re}$. На Рис.5 представлено ИО для реакции $^{\text{nat}}\text{W}(p, xn)^{184\text{m,g}}\text{Re}$ совместно с имеющимися экспериментальными данными [18, 20]. Несмотря на скучность экспериментальных данных по ИО, наблюдается их однозначное согласие с теоретическими расчетами по коду EMPIRE 3.2.

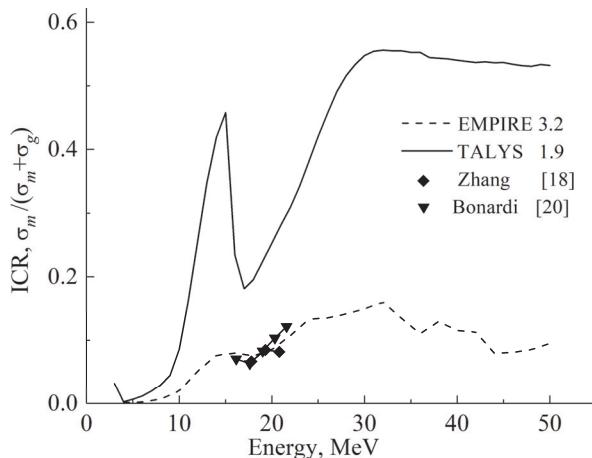


Рис.5. ИО $^{184\text{m,g}}\text{Re}$ изомерной пары от $^{\text{nat}}\text{W}(p, xn)$ реакции.

Сравнение экспериментальных данных функций возбуждения для полного сечения ^{184}Re [9–11, 13–15] и сечения основного состояния $^{184\text{g}}\text{Re}$ [16–20] из реакций $^{181}\text{Ta}(\alpha, n)$ и $^{\text{nat}}\text{W}(p, xn)$, соответственно, с расчетными данными с использованием кодов TALYS 1.9 и EMPIRE 3.2 приведено на Рис.6 и Рис.7.

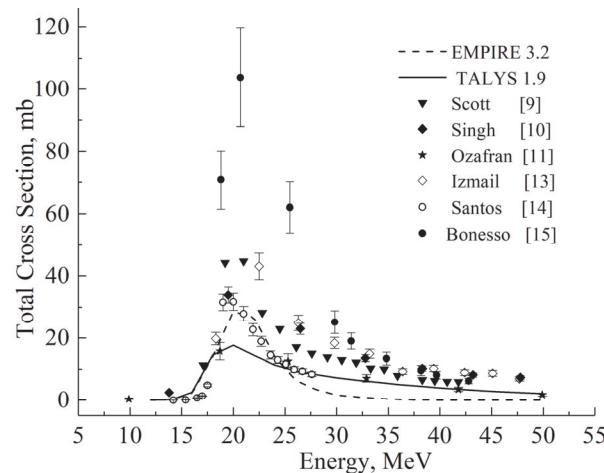


Рис.6. Сравнение теоретических и экспериментальных данных функций возбуждения для $^{181}\text{Ta}(\alpha, n)^{184}\text{Re}$ реакции.

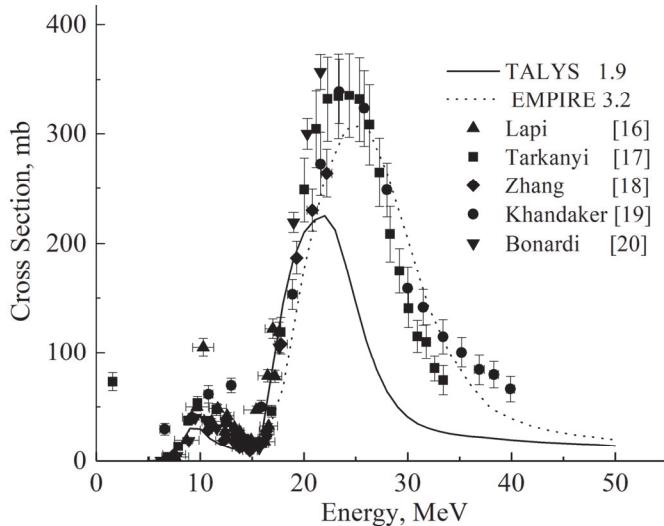


Рис.7. Сравнение теоретических и экспериментальных данных функций возбуждения для $^{181}\text{Ta}(\text{p},\text{xn})^{184\text{g}}\text{Re}$ реакции.

Для реакции $^{181}\text{Ta}(\alpha,\text{n})^{184}\text{Re}$, как и в случае ИО (Рис.4), функция возбуждения из [15] намного выше, чем значения других экспериментальных данных и теоретических расчетов. Однако, местоположение пика функций возбуждения как для различных экспериментальных данных, так и для теоретических расчетов находится в одной и той же области энергий. Между экспериментальными данными и теоретическими расчетами наилучшее согласие наблюдается в случае вычислений по программе TALYS 1.9.

В случае протон-индукционной реакции на натуральном вольфраме (Рис.7) в области низких энергий экспериментальные данные по функции возбуждения хорошо согласуются с теоретическими расчетами по кодам TALYS 1.9 и EMPIRE 3.2. Однако в области энергий выше 20 МэВ, где наблюдается расхождение между теоретическими расчетами, экспериментальные данные лучше согласуются с вычислениями по EMPIRE 3.2.

Наблюдаемые значительные расхождения между данными говорят о том, что необходимо проведение новых измерений функций возбуждений по разным каналам от порога реакции до 50 МэВ. Новые экспериментальные данные будут способствовать уточнению теоретических моделей и повышению их предсказательной силы.

3. Заключение

С использованием ядерных кодов TALYS 1.9 и EMPIRE 3.2 были выполнены расчеты ИО для $^{184\text{m,g}}\text{Re}$ изомерной пары. В случае, когда спин изомерного состояния выше спина основного состояния ИО для разных каналов реакции расчет до энергии ~ 30 МэВ, после чего остается практически постоянным для всех

каналов реакций. Для канала реакции (α, n) вычисленные ИО по разным кодам не совпадают с экспериментальными данными.

Отсутствие экспериментальных данных для изомерного состояния ^{184}Re на обогащенной мишени не дает возможность сравнить теоретические вычисления и экспериментальные значения ИО для протонного канала реакции. Поэтому в данной работе приведены сравнения сечения образования $^{184\text{g}}\text{Re}$ и ИО для реакции $^{\text{nat}}\text{W}(\text{p}, \text{xn})^{184\text{g}}\text{Re}$ с результатами теоретических вычислений по кодам TALYS 1.9 и EMPIRE 3.2, между которыми наблюдаются расхождения в области относительно высоких энергий (> 20 МэВ). Лучшее согласие экспериментальных данных по сечениям и ИО наблюдается с вычислениями по коду EMPIRE 3.2.

Приведенные в данной статье расчеты показывают, что значения ИО для гамма-индуцированной реакции существенно ниже, чем для протон-, дейtron- и альфа-индуцированных реакций, в то время как для последних трех каналов реакций ИО имеют почти одинаковые значения.

Анализ выполненных вычислений показал, что влияние канала реакции играет существенную роль. Для экспериментальных данных функций возбуждения и изомерных отношений в случае альфа-индуцированных реакций относительно лучшее описание дает код TALYS 1.9. Также можно видеть, что ИО резко возрастает и достигает максимума при более низкой первичной энергии в случае эмиссии одной частицы, тогда как ИО медленно увеличивается для многочастичной эмиссии.

Для более детального исследования поведения ИО в зависимости от канала реакции планируется проведение экспериментов на протонных и фотонных пучках.

Автор благодарит И.А. Керобян за плодотворные обсуждения и руководство работой. Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного комитета по науке МОН РА в рамках научного проекта № 18Т-1С297.

ЛИТЕРАТУРА

1. **B. Satheesh, M.M. Musthafa.** Int. J. Mod. Phys. E, **20**, 2119 (2011).
2. **B. Satheesh, M.M. Musthafa, B.P. Singh, R. Prasad.** Int. J. Mod. Phys. E, **21**, 1250059 (2012).
3. **T. Najumunnisa, M.M. Musthafa.** Proceedings of the DAE Symp. on Nucl. Phys., **59**, 460 (2014).
4. **R.R. Kinsey, et al.** Data extracted from the NUDAT database, version 2.7 (2018) <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>
5. IBA <https://www.iba-radiopharmasolutions.com/products/cyclotrons> .
6. **A. Sirunyan, A. Hakobyan, G. Ayvazyan, A. Babayan, H. Vardanyan, G. Zohrabyan, K. Davtyan, H. Torosyan, A. Paryan.** J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **53**, 271 (2018).

7. **A. Koning, S. Hilaire, S. Goriely.** 'TALYS 1.9. A nuclear reaction program', 2017.
8. **M. Herman, R. Capote, M. Sin, A. Trkov et al.** 'EMPIRE-3.2 Rivoli modular system for nuclear reaction calculations and nuclear data evaluation', 2013.
9. **N.E. Scott, J.W. Cobble, P.J. Daly.** Nuclear Physics A, **119**, 131 (1968).
10. **N.L. Singh, S. Mukherjee, D.R.S. Somayajulu.** Nuovo Cimento A, **107**, 1635 (1994).
11. **M.J. Ozafrañ, H.O. Mosca, M.E. Vazquez, W.R. Froch, S.J. Nassiff.** Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, **172**, 155 (1993).
12. **V.Yu. Denisov, V.A. Zheltonozhskii, S.V. Reshit'ko.** Yad. Fiz., **56**, 99 (1993).
13. **M. Ismail.** Journ. Pramana, **50**, 173 (1998).
14. **W.M.S. Santos, S. de Barros, J.C. Suita.** J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., **26**, 301 (2000).
15. **O. Bonesso, O. Capurro, M. Ozafrañ, M. Tavelli, M. de la Vega Vedoya, C. Wasilevsky, S. Nassiff.** National Atomic Energy Commission (CNEA), Argentina, 17 (2017).
16. **S. Lapi, W.J. Mills, J. Wilson, S. McQuarrie, J. Publicover, M. Schueler, D. Schyler, J.J. Ressler, T.J. Ruth.** Applied Radiation and Isotopes, **65**, 345 (2007).
17. **F. Tarkanyi, S. Takacs, F. Szelecsenyi, F. Ditroi, A. Hermanne, M. Sonck.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, **252**, 160 (2006).
18. **X. Zhang, W. Li, K. Fang, W. He, R. Sheng, D. Ying, W. Hu.** Radiochim. Acta, **86**, 11 (1999).
19. **M.U. Khandaker, M.S. Uddin, K. Kim, M.W. Lee, K.S. Kim, Y.S. Lee, G.N. Kim, Y.S. Cho, Y.O. Lee.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, **266**, 1021 (2008).
20. **M. Bonardi, F. Groppi, E. Persico, S. Manenti, K. Abbas, U. Holzwart, F. Simonelli, Z. B. Alfassi.** Radiochim. Acta, **99**, 1 (2011).
21. Experimnetal Nuclear Reaction Data (EXFOR). Database Version 2019. <https://www-nds.iaea.org/exfor/>

INFLUENCE OF REACTION CHANNEL ON ISOMER RATIO
OF $^{184m,g}\text{Re}$ ISOMERIC PAIR

R.V. AVETISYAN

The influence of reaction channel on the Isomeric Cross-section Ratio (ICR) of the production of $^{184m,g}\text{Re}$ was investigated. The excitation functions for the $^{184m,g}\text{Re}$ isomeric pair produced through the $^{184}\text{W}(\text{p},\text{n})$, $^{186}\text{W}(\text{p},3\text{n})$, $^{184}\text{W}(\text{d},2\text{n})$, $^{186}\text{W}(\text{d},4\text{n})$, $^{181}\text{Ta}(\alpha,\text{n})$ and $^{185}\text{Re}(\gamma,\text{n})$ reactions were calculated by different models of TALYS 1.9 and EMPIRE 3.2 codes. The ICR calculated for the above mentioned isomeric pair through various reaction channels (proton, deuteron, alpha and gamma induced reactions) was determined for incident energy ranges from threshold up to 50 MeV. The comparisons of theoretical calculations with the available experimental data for the reactions were done.