

РЕДКИЕ ПРОЦЕССЫ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ЯДЕР В ОБЛАСТИ СРЕДНИХ МАСС

А.Р. БАЛАБЕКЯН^{1*}, Г.О. ОГАННИСЯН¹, С.В. ГАГИНЯН¹, С.Г. ПОГОСЯН¹,
М.А. ХАЧАТРЯН¹, Э.Л. КАРАПЕТЯН¹, Д.Р. ДРНОЯН¹, К. КАТОВСКИЙ²

¹Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

²Технологический университет Брно, Брно, Чехия

*e-mail: balabekyan@ysu.am

(Поступила в редакцию 12 ноября 2025 г.)

Исследованы редкие процессы кластеризации в ядрах ванадия и обогащённого никеля. В частности, рассмотрены реакции с вылетом одной и двух α -частиц, а также процессы деления в данных мишенях. Выполнены расчёты с использованием программы TALYS 1.97. Показано, что методом наведённой активности возможно исследовать вероятность реакции ${}^{64}\text{Ni}(p, 2\alpha n){}^{56}\text{Mn}$. Расчёты показывают, что существует реальная возможность регистрации и более тяжёлых фрагментов, например изотопа ${}^{48}\text{Sc}$, образующегося при взаимодействии протонов с обогащённым никелем.

1. Введение

Структура и свойства атомного ядра имеют ключевое значение для понимания происхождения и эволюции Вселенной. Возможность существования кластеров в ядре представляет собой важный инструмент для объяснения механизмов синтеза различных элементов. Природа ядерных сил, связывающих нуклоны, определяет сферическую форму и энергетический баланс ядра. Отклонение возбужденного состояния ядра от сферической формы может быть обусловлено изменением протонно-нейтронной структуры ядерного вещества или образованием нуклонных ассоциаций. Вопрос о том, существуют ли кластеры в ядре изначально или формируются в процессе ядерного возбуждения, остаётся недостаточно изученным. Исследование процессов кластеризации и последующего распада кластеров является одной из актуальных задач современной ядерной физики. Кластерные структуры можно изучать в ядерных реакциях, инициируемых различными частицами — протонами, γ -квантами и др.

Образование α -частиц в ядрах также относится к процессам кластеризации. В ряде экспериментальных и теоретических работ образование α -частиц рассматривается как формирование структур, постоянно или временно существующих в ядре [1–5]. Особый интерес представляют реакции типа (p, α) на изотопах никеля.

Реакции (p, α) на изотопах никеля имеют практическое значение в различных областях. В ядерной астрофизике изучение таких реакций позволяет глубже понять механизмы нуклеосинтеза в звёздах и процессы образования элементов. В медицинской радиофармацевтике продукты реакций, включая изотопы кобальта, находят применение в диагностике и терапии, например в позитронно-

эмиссионной томографии (ПЭТ). В ядерной энергетике знание особенностей этих реакций необходимо для оценки радиационной стойкости материалов и разработки новых конструкционных материалов для ядерных реакторов.

В настоящей работе исследуются реакции с образованием одной или двух α -частиц при взаимодействии с протонами низких энергий. Кроме того, рассматривается вероятность делимости и образования фрагментов более тяжёлых, чем α -частица, в ядрах со средними массовыми числами.

2. Реакции (p, α) и ($p, 2\alpha$)

Исследование α -кластеризации ядер находится в центре внимания как теоретиков, так и экспериментаторов-ядерщиков [6–8]. В работе [9] показано, что вероятность α -кластеризации в ядрах свинца мала, однако она значительно возрастает в области ядер кальция, что может иметь важные последствия для ограничения энергии симметрии ядра.

На рис.1 приведены экспериментальные значения сечений реакций (p, α), взятые из базы данных EXFOR [1–4], в зависимости от энергии для мишеней ^{64}Ni и ^{58}Ni . На рисунке также показаны теоретические расчёты, выполненные с использованием программы TALYS 1.97 [10].

Как видно из рисунков, недостаток экспериментальных данных для мишени ^{58}Ni не позволяет уточнять теоретические модели. В области энергий 10–18 МэВ для мишени ^{64}Ni наблюдается значительный разброс экспериментальных значений, что также требует уточнения.

Были выполнены расчёты сечений реакций (p, α) для мишени ^{64}Ni с использованием программы FLUKA. Расчёты проведены для четырёх энергий протонов, и получены следующие результаты: при энергии 17 МэВ $\sigma = 5.74$ мб; 16 — $\sigma = 5.27$; 14 — $\sigma = 4.78$; 13 МэВ — $\sigma = 4.99$. Как видно из приведённых данных и рис.1, теоретические предсказания программы FLUKA существенно ниже как экспериментальных данных, так и расчётов, выполненных с использованием программы TALYS.

Особый интерес представляют реакции с испусканием нескольких α -частиц,

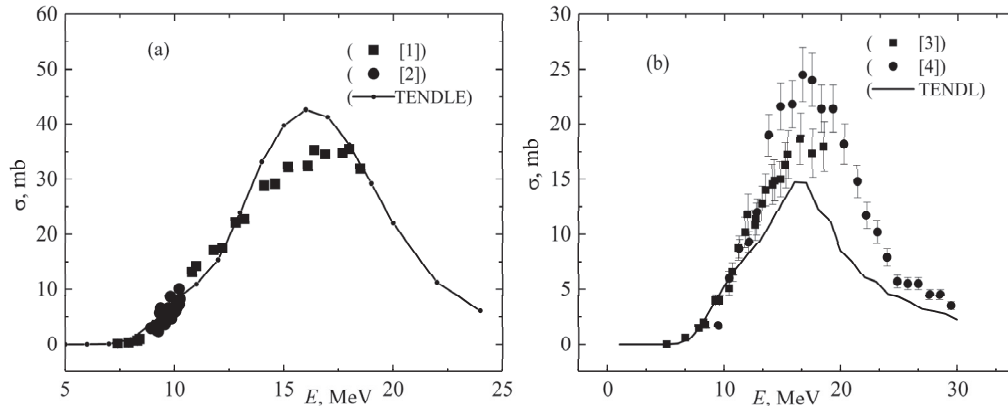


Рис.1. Зависимость сечений реакций (p, α) от энергии протонов для мишеней: (a) ^{58}Ni : ■ — точки из работы [1], • — точки из работы [2]; (b) ^{64}Ni : ■ — точки из работы [3], • — точки из работы [4]. Сплошные кривые — расчёты, выполненные с использованием программы TALYS.

в частности $(p, 2\alpha)$, $(p, 2\alpha n)$ и $(p, 2\alpha p)$. На рис.2 приведены зависимости сечений реакций $(p, 2\alpha)$ от энергии протонов, рассчитанные по программе TALYS.

Исследование реакций $(p, 2\alpha)$ представляет интерес с точки зрения выяснения механизма их протекания. Остаются открытыми вопросы: вылетают ли две α -частицы одновременно или последовательно? Коррелированы ли они, то есть образуются ли в виде кластера ${}^8\text{Be}$, или же испускаются как независимые частицы? Ответы на эти вопросы можно получить либо путём прямой регистрации вылетающих α -частиц, либо методом наведённой активности [11], регистрируя ядро-остаток.

На рис.2 приведены только теоретические оценки этих реакций, поскольку в реакции ${}^{64}\text{Ni}(p, 2\alpha)$ образуется изотоп ${}^{57}\text{Mn}$ с периодом полураспада $T_{1/2} = 85.4$ с, и из-за столь короткого времени полураспада метод наведённой активности оказывается непригодным для его регистрации. В случае реакции ${}^{58}\text{Ni}(p, 2\alpha)$ образуется ${}^{51}\text{Mn}$ с $T_{1/2} = 45.84$ мин. Однако, наиболее интенсивная γ -линия этого изотопа — 511 кэВ, что делает невозможной оценку сечения его образования из-за вклада аннигиляционных фотонов.

Прямая регистрация α -частиц, образующихся в процессе реакции, позволяет получить ответы на указанные вопросы. При последовательном механизме, например, $p + {}^{64}\text{Ni} \rightarrow \alpha + {}^{61}\text{Co}^*$ (возможно, возбужденное) $\rightarrow \alpha + {}^{57}\text{Mn}$, возникает промежуточное состояние ${}^{61}\text{Co}^*$, которое проявляется в виде характерных γ -пикулов, связанных со второй α -частицей, и в специфических особенностях суммарной кинематики. Одновременный (коррелированный, кластерный) распад имеет место в случае, когда две α -частицы выбрасываются как коррелированная пара, без ярко выраженного промежуточного уровня. Такой механизм проявляется в непрерывных распределениях относительной энергии частиц и характерных угловых корреляциях.

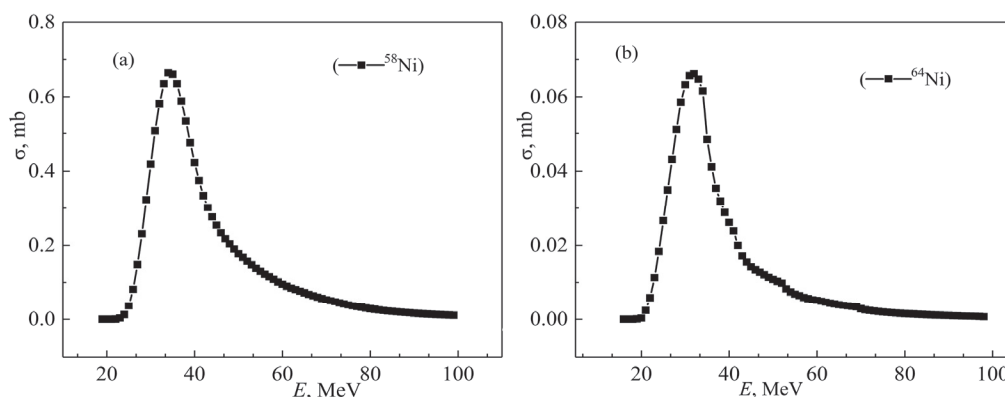


Рис.2. Зависимость сечений реакций $(p, 2\alpha)$ от энергии протонов для мишеней: (a) ${}^{58}\text{Ni}$ и (b) ${}^{64}\text{Ni}$, рассчитанные по программе TALYS.

3. Реакции деления

В области ядерной физики процесс деления является одним из наиболее фундаментальных и интересных явлений. Хотя деление тяжёлых ядер при низких энергиях изучено достаточно хорошо, деление ядер промежуточной массы в тех

же условиях исследовано значительно слабее и представляет собой область, где теоретические предсказания и экспериментальные данные только начинают согласовываться, раскрывая сложность ядерной динамики.

В процессе деления высвобождается значительное количество энергии, и этот процесс играет важную роль в широком спектре областей — от ядерной энергетики до астрофизики. Хотя деление традиционно ассоциируется с тяжёлыми ядрами, такими как уран и плутоний, оно также наблюдается в ядрах средней массы, обычно в диапазоне массовых чисел от 60 до 140. В отличие от более тяжёлых систем, ядра промежуточной массы обладают специфическими особенностями, которые ставят под сомнение существующие теоретические модели и требуют новых подходов к описанию механизма распада. Для ядер средней массы процесс деления включает сложное взаимодействие ядерных сил, оболочечной структуры и коллективных движений. В отличие от тяжёлых ядер, где барьер деления хорошо определён и играет ключевую роль, в ядрах со средними массами доминируют поверхностные барьеры, что приводит к увеличению вероятности распада при относительно низких энергиях возбуждения. Кроме того, взаимодействие отдельных нуклонов с коллективными степенями свободы влияет на динамику деления, формируя характерные угловые распределения и спектры осколков.

В работе [12] показано, что расщепление ядер при развитии внутриядерного каскада приводит к тому, что увеличение делимости, отражающее уменьшение высоты барьера деления лёгких ядер, должно наблюдаться при значениях $Z^2/A < 15$. Этот вывод основан на экстраполяции модели жидкой капли в область лёгких ядер. Между тем данная модель предсказывает, что при определённом критическом значении $(Z^2/A)_{cr}$ процесс деления должен уступить процессу фрагментации ([6] и ссылки в нём). Обнаружение резкого уменьшения делимости при малых значениях Z^2/A по сравнению с расчётами, приведёнными в [12], подтвердило бы справедливость одного из ключевых предсказаний модели жидкой капли.

В ряде работ [13, 14] исследована зависимость делимости от коэффициента делимости Z^2/A . На рис. 3 работы [13] и рисунке 2 работы [14] показаны, что делимость возрастает в массовой области, где $Z^2/A < 17$. Из этих рисунков видно, что в указанной области массовых чисел наблюдается существенное расхождение между теоретическими предсказаниями и экспериментальными данными. В диапазоне ядер с массами $A \leq 50$ и при энергиях взаимодействующих фотонов ≤ 100 МэВ [8] отмечается увеличение коэффициента делимости, что в целом согласуется с результатами расчётов в рамках капельной модели. Пороги деления лёгких ядер находятся в области энергий 20–50 МэВ. С ростом энергии увеличивается вклад процессов испарения нуклонов, вследствие чего становится невозможным надёжно выделить вклад именно деления.

Исходя из этих соображений, подобные процессы наиболее удобно изучать в области энергий, близких к пороговым. Однако, поскольку выходы деления ядер промежуточных масс в этом энергетическом диапазоне крайне малы, имеющихся экспериментальных данных недостаточно для детального сравнения с модельными расчётами.

4. Экспериментальная методика

Экспериментально методом наведённой активности можно исследовать реакции, в которых образуются α -частицы, а также фрагменты, более тяжёлые, чем α -частица.

В табл.1 приведены реакции деления и образования α -частиц на изотопах никеля и ванадия в протон-ядерных взаимодействиях. В таблице также указаны пороги соответствующих реакций.

В таб.1 приведены также остаточные ядра с их характерными параметрами, которые могут быть зарегистрированы методом наведённой активности. Как видно из таблицы, периоды полураспада и характерные энергии излучения остаточных радиоактивных ядер позволяют исследовать вероятность их образования активационным методом.

Табл.1. Реакции деления и образования α -частиц на изотопах никеля и ванадия

Мишень	Реакция	Образованные фрагменты	Остаточные ядра	Период полураспада	Характерные энергии, кэВ, интенсивность, %	Пороговая энергия, МэВ
^{64}Ni	(p,α)	$^4\text{He}+^{61}\text{Co}$	^{61}Co	1.65 час	64.41(84.7) 917.5(3.6)	0
^{64}Ni	$(p,2\alpha n)$	$^{56}\text{Mn}+2^4\text{He}+n$	^{56}Mn	2.58 час	846.76(88.85) 1810.73(26.9) 2113.09(14.2)	16.068
^{64}Ni	(p,f)	$^{47}\text{Ca}+^{18}\text{F}$	^{47}Ca	4.536 день	489.23(5.9) 807.86(5.9) 1297.09(67)	18.627
^{64}Ni	(p,f)	$^{48}\text{Sc}+^{17}\text{O}$	^{48}Sc	43.71 час	175.36(7.47) 983.53(100) 1037.52(97.5) 1212.88(2.38) 1312.12(100)	14.726
^{51}V	(p,f)	$^{24}\text{Na}+^{28}\text{Al}$	^{24}Na	14.956 час	1368.62(99.99) 2754.91(99.87)	20.034
^{51}V	(p,f)	$^{22}\text{Na}+^{30}\text{Al}$	^{22}Na	2.6 год	1274.54(99.94)	24.34

Используя метод улавливающих фольг [15], можно определить сечения образования указанных остаточных ядер для нескольких энергий падающих протонов. По программе SRIM [16] были рассчитаны потери энергии в обогащённой мишени ^{64}Ni . Для мониторинга интенсивности пучка планируется использовать медную фольгу. На рис.3 представлен набор мишеней и рассчитанные по программе SRIM потери энергии в этих мишенях.

В результате расчётов получены следующие значения энергий протонов в обогащённых мишенях никеля: 17.31, 15.92, 14.32 и 12.77 МэВ. Число используемых фольг в мишени сборке обусловлено доступным количеством обогащённого изотопа ^{64}Ni . В табл.2 приведены толщины мишеней.

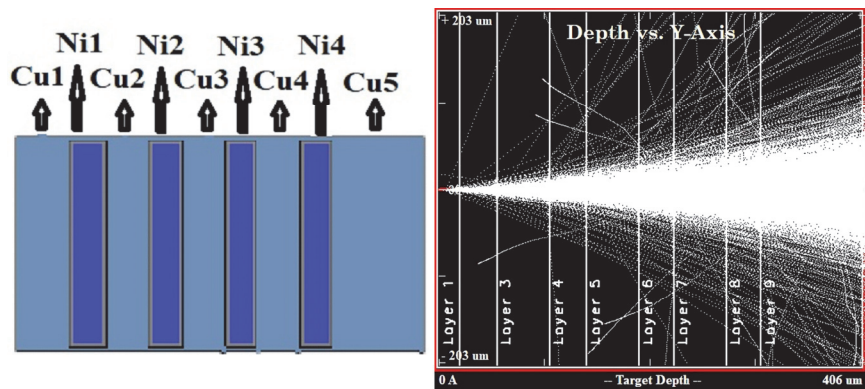


Рис.3. Набор мишеней и общий вид взаимодействия пучка с набором мишеней, рассчитанный по программе SRIM.

Эксперименты будут проводиться на протонном пучке циклотронной установки CYCLON 18 при энергиях до 18 МэВ (Армения). Поскольку сечения редких процессов очень малы, регистрация характерных γ -спектров будет выполняться в низкофоновой лаборатории, расположенной в соляном руднике.

В табл.1 также приведены реакции с пороговыми энергиями выше 18 МэВ. Планируется провести их исследование на протонных пучках установки BM@N, ОИЯИ (Дубна, РФ)

Табл.2. Толщины мишеней

Мишени	Cu1	Ni1	Cu2	Ni2	Cu3	Ni3	Cu4	Ni4	Cu5
Толщины, мкм	20	35	50	35	50	33	50	30	100

5. Заключение

Исследованы реакции, приводящие к вылету одной или двух α -частиц из обогатённых изотопов ^{64}Ni и ^{51}V . Проведённый анализ показал, что методом наведённой активности возможно изучать реакцию $^{64}\text{Ni}(p,2\alpha n)^{56}\text{Mn}$ на циклотроне CYCLON-18, поскольку период полураспада и спектральные характеристики образующегося ядра ^{56}Mn позволяют надёжно регистрировать его образование.

Кроме того, расчёты показывают, что существует реальная возможность регистрации и более тяжёлых фрагментов, например изотопа ^{48}Sc , образующегося при взаимодействии протонов с обогатённым никелем. Его характерные γ -линии и сравнительно удобный период полураспада создают условия для применения активационного метода с использованием набора улавливающих фольг.

Полученные результаты подтверждают перспективность метода наведённой активности для исследования редких процессов, включающих многократный вылет α -частиц и образование тяжёлых фрагментов. Проведение экспериментов при нескольких энергиях протонов позволит уточнить энергетическую зависимость сечений и уменьшить существующие расхождения между теоретическими расчётами и экспериментальными данными.

Такой подход в дальнейшем даст возможность более глубоко исследовать механизм кластеризации в ядрах средней массы и проверить предсказания современных моделей ядерной динамики.

Исследование выполнено при поддержке Комитета по высшему образованию и науке МОНКС РА (научный проект № 25RG-1C067).

ЛИТЕРАТУРА

1. **S. Kaufman.** Phys. Rev., **117**, 1532 (1960).
2. **I. Kumabe, H. Ogata, T. Komatuzaki, N. Inoue, S. Tomita, Y. Yamada, T. Yamaki, S. Matsumoto.** Nuclear Physics, **46**, 437 (1963).
3. **S.M. Qaim, M. Uhl, F. Rosch, F. Szelecsenyi.** Phys. Rev., C, Nuclear Physics, **52**, 733 (1995).
4. **V.N. Levkovski.** Cross sections of medium mass nuclide activation ($A=40-100$) by medium energy protons and alpha-particles ($E=10-50$ MeV). Inter-Vesti: Moscow, Russia, (1991).
5. **A.R. Balabekyan, N.A. Demekhina, E. Melyan, S. Faltajanyan, A. Aleksanyan, S. Amirkhanyan, H. Gulkanyan, T. Kotanjyan, A.S. Hakobyan.** J. Contemp. Phys. (Armenian Academy of Sciences), **55**, 1 (2020).
6. **T. Otsuka, T. Abe, T. Yoshida, Y. Tsunoda, N. Shimizu, N. Itagaki, Y. Utsuno, J. Vary, P. Maris, H. Ueno.** Nature Communications, **13**, 2234 (2022).
7. **J. Tanaka, C. Bertulani, S. Type.** European Physics Journal, Web of Conferences **227**, 01001 (2020).
8. **D.S. Delione, A. Dimitriescu.** European Physics Journal A, **59**, 210 (2023).
9. **S. Yang, R. Li, Chang Xu.** Phys. Rev. C, **108**, L021303 (2023).
10. GitHub - arjankoning1/talys: The nuclear reaction model code .
11. **A.R. Balabekyan, S.V. Gaginyan, J.R. Drnoyan.** J. Contemp. Phys., **51**, 211 (2016).
12. **A.S. Iljinov, E.A. Cherepanov, S.F. Chigrinov.** Z. Physick, **A287**, 37 (1978).
13. **D.A. de Lima.** Nuovo. Cim., **103**, 701 (1990).
14. **V. Emma, S. Lo Nigro, C. Milone.** Nuclear Physics, **A257**, 438 (1976).
15. **M. Choudhary, A. Sharma, N. Singh, A. Gandhi, S. Dasgupta, J. Datta, K. Katovsky, A. Kumar.** Nuclear Physics, **A1038**, 122720 (2023).
16. **J.F. Ziegler.** Nucl. Instr. Methods, **B 219–220**, 1027 (2004).

RARE CLUSTERING PROCESSES IN NUCLEI IN THE INTERMEDIATE MASS RANGE

A.R. BALABEKYAN, G.H. HOVHANNISYAN, S.V. GAGINYAN, S.G. POGHOSYAN,
M.A. KHACHATRYAN, E.L. KARAPETYAN, J.R. DRNOYAN, K. KATOVSKY

Rare clustering processes in vanadium and enriched nickel nuclei were investigated. In particular, reactions involving the emission of one or two alpha particles, as well as fission processes in these targets, were studied. Calculations were performed using the TALYS code. It was found that the induced activity method can be used to investigate the probability of the $^{64}\text{Ni}(p, 2\alpha n)^{56}\text{Mn}$ reaction, Calculations show that there is a real possibility of registering heavier fragments, for example the isotope ^{48}Sc , which is formed during the interaction of protons with enriched nickel.