

УДК 539.17

Н.В. Афанасьева, Н.А. Буркова, К.А. Жаксыбекова*

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, НИИЭТФ, Казахстан, г. Алматы

*E-mail: zhkulyana@mail.ru

Однонуклонные спектроскопические характеристики ядер с $A=7$

Обсуждаются однонуклонные спектроскопические S -факторы и типы кластеризации ядер. Проведен сравнительный анализ спектроскопических протонных S_p и нейтронных S_n -факторов для переходов как в основное, так и возбужденные состояния соответствующих ядер-остатков ${}^6\text{Li}$ - ${}^6\text{He}$, рассчитанных в рамках двухтельной αt -модели ядра ${}^7\text{Li}$ с новыми уточненными результатами теоретических расчетов спектроскопических S -факторов для канала ${}^7\text{Li} \rightarrow {}^6\text{He} + p$, полученными в рамках модели оболочек, а также с использованием двух вариационных методов Монте-Карло. Для конструкции виртуального тритиевого кластера ${}^3\text{H}$ выбирались: трансляционно-инвариантная модель оболочек, которая соответствует симметричной волновой функции по относительным координатам и имеет свободно варьируемый осцилляторный параметр r_0 , а также «реалистические» волновые функции, которые представляют собой вариационные функции, параметры которых подобраны так, чтобы воспроизводился наблюдаемый формфактор ядра трития ${}^3\text{H}$.

Ключевые слова: спектроскопический S -фактор, кластерная модель, метод проектирования, волновая функция относительного движения, кластер

N.V. Afanasyeva, N.A. Burkova, K.A. Zhaksybekova

The one-nucleon spectroscopic characteristics of nuclei with $A=7$

One-nucleon characteristics of nuclei – spectroscopic S -factors and types of their clustering are under discussion. Also the comparative analysis of the obtained proton S_p and neutron S_n spectroscopic factors are given as for the ground state and for the low excited states corresponding to the ${}^6\text{Li}$ - ${}^6\text{He}$ residual nuclei, calculated earlier within the two-body αt -model of ${}^7\text{Li}$ with the new reevaluated results of theoretical calculations of spectroscopic S -factors for the channel ${}^7\text{Li} \rightarrow {}^6\text{He} + p$, obtained within the shell model and also with using of two variation methods of Monte-Carlo: VMC and GFMC (Green function Monte Carlo). For a description of virtual ${}^3\text{H}$ cluster were used: the translational and invariant shell model which corresponds to the symmetric wave functions on relative coordinates and has freely varied oscillator parameter r_0 , and also the "realistic" wave functions which represent the variation functions with parameters determined so that the observed form factor of ${}^3\text{H}$ was reproduced.

Keywords: spectroscopic S -factor, cluster model, projecting method, relative motion wave function, cluster

Н.В. Афанасьева, Н.А. Буркова, К.А. Жақсыбекова

 $A=7$ ядролары үшін бірнуклондық спектроскопиялық сипаттамалар

Ядролардың бірнуклондық спектроскопиялық S -факторлары және кластеризация типтері қарастырылды. ${}^6\text{Li}$ - ${}^6\text{He}$ ядро-қалдықтардың негізгі және қозған күйлеріне өту спектроскопиялық протондық S_p және нейтрондық S_n -факторларының салыстырмалы талдауы жасалды. Осы спектроскопиялық факторлар ${}^7\text{Li}$ ядросының αt -моделі шеңберінде ${}^7\text{Li} \rightarrow {}^6\text{He} + p$ каналы үшін

кабықшалар моделі және Монте-Карлоның екі вариациялық әдісін қолдану шеңберінде спектроскопиялық S -факторларының теориялық есептеулердің жаңа нақтыланған нәтижелерімен есептелді. ${}^3\text{H}$ виртуалдық тритий кластердің конструкциясы үшін трансляциялық-инварианттық кабықшалар моделі таңдалды, бұл модель салыстырмалы координаттар бойынша симметриялық толқындық функцияға сәйкес келеді және дербес вариацияланатын осцилляторлық r_0 параметріне ие және де «реалистикалық» толқындық функциялар таңдалды, бұл функциялар вариациялық болып табылады, олардың параметрлерінің таңдауы ${}^3\text{H}$ ядросының көрінетін формфакторы дұрыс алыну үшін жасалды.

Түйін сөздер: спектроскопиялық S -фактор, кластерлі тәсілі, проектілеу тәсілі, салыстырмалы қозғалысының толқындық функциясы, кластер.

Введение

Важной проблемой в теоретическом анализе ядерно-физических процессов является нахождение корректного вида волновых функций ядер, участвующих в рассматриваемых взаимодействиях. Поскольку это возможно лишь в рамках определенных моделей, предпочтительно использование модельных представлений, воспроизводящих как можно более обширную спектроскопическую информацию о ядрах. На сегодняшний день многочастичная модель оболочек (ММО) является для легких ядер наиболее полной и разработанной [1]. Опыт использования ММО показал, что ее применение является оправданным при рассмотрении процессов, затрагивающих внутреннюю область ядра. При исследовании же периферических процессов, в частности, реакций фоторасщепления ядер, становятся очевидными недостатки ММО, связанные с неправильной асимптотикой волновых функций – слишком быстрым убыванием на больших расстояниях.

При рассмотрении периферических процессов наиболее приемлемыми являются потенциальные кластерные модели (ПКМ), волновые функции которых имеют корректную асимптотику [2]. Вместе с тем, именно периферические процессы доминируют в области низких и сверхнизких энергий взаимодействия, к которой сейчас привлечено все возрастающее внимание, например,

проблема нуклеосинтеза нейтронно-дефицитных p -ядер. В целом, изучение структуры легких ядер, в том числе низкоэнергетические околопороговые фотонуклонные (γ, N) реакции, имеет связь и с ядерной астрофизикой, а также и с прикладной термоядерной физикой.

Однонуклонные характеристики ядер – спектроскопические S -факторы, приведенные ширины θ^2 , парциальные ширины Γ , импульсные распределения нуклонов – являются важным элементом для исследования реакций, в которых происходит отделение или присоединение к ядру-мишени одного нуклона. Таковыми являются прямые ядерные реакции срыва или подхвата, реакции упругого или неупругого рассеяния нуклонов на ядрах, резонансные реакции с возбуждением высоколежащих уровней составного ядра и с последующим их распадом по нуклонному каналу.

В настоящее время для ядер ядра $1p$ -оболочки накоплен разнообразный экспериментальный материал. Изучение однонуклонных характеристик в легких ядрах было начато в реакциях срыва дейтрона и подхвата нуклона типа (d,p) , (d,n) , (p,d) . Механизм этих реакций хорошо установлен: это либо передача нуклона из слабо связанного дейтрона ядру-мишени – реакция срыва, либо подхват налетающим нуклоном протона или нейтрона из ядра-мишени – (p,d) и (n,d) . В дальнейшем было показано, что подобный простой полюсной механизм является доминирующим и в ряде других прямых процессов типа (${}^3\text{He}, \alpha$),

(d, t) , $(\alpha, {}^3\text{He})$, (t, d) и т.д. Основной структурной характеристикой во всех этих реакциях является спектроскопический S -фактор, устанавливающий связь между различными состояниями соседних ядер. Аналогичная структурная информация может быть получена в реакциях квазиупругого выбивания нуклонов налетающими протонами типа $(p, 2p)$ и (p, pn) , а также электронами $(e, e'p)$. Эксперименты по квазиупругому выбиванию из ядра нуклонов электронами, проведенные на голландском ускорителе НИКНЕФ в последние годы, характеризуются высоким энергетическим разрешением ($E \approx 0,1$ МэВ), что позволяет изучать переходы на отдельные уровни остаточных ядер. (См., например, обзор [3] и цитируемую там литературу).

Статическая и динамическая кластеризация ядер

В течение 80–90-х годов группой теоретиков под руководством проф. В.И. Кукулина (НИИЯФ МГУ, г. Москва) была создана динамическая модель легких ядер [4–8], которая впервые позволила описать структуру ядер ${}^6, {}^7\text{Li}$, ${}^6\text{He}$, ${}^7, {}^9\text{Be}$, ${}^9\text{B}$, свойства их возбужденных состояний и вероятности различных процессов на них. Впервые были предсказаны характерные геометрические формы, которые впоследствии были обнаружены в экспериментах в ИАЭ им. Курчатова.

Согласно мультикластерной динамической модели с Паули проектированием (МДМП) ядро состоит из небольшого числа кластеров, в каждом из которых содержится не более 4-х нуклонов. Принцип Паули учитывается эффективно посредством введения глубоких притягивающих кластер-кластерных потенциалов с запрещенными состояниями или введением отталкивательного кора [4–8].

Отметим, что при описании ядра ${}^7\text{Li}$ в αt -представлении на основе простых бинарных моделей с использованием глубоких притягивающих кластер-кластерных потенциалов с запрещенными состояниями (ПЗС) удается

воспроизвести практически все статические характеристики (энергия связи, зарядовый и магнитный радиусы, квадрупольный момент и т.д.) этого ядра [3].

В работе [9] было предложено различать статическую и динамическую кластеризацию ядер. Такой подход, с нашей точки зрения, является наиболее плодотворным и в дальнейшем в процессе работы в этом направлении высказанное предложение можно рассматривать как концепцию.

На рисунке 1 приведены примеры типов кластеризации. Как видно из рисунка, статическому типу кластеризации отвечает, например, канал фрагментации ${}^7\text{Li} \alpha t \rightarrow \alpha + t$, когда исходная кластерная конфигурация не отличается от кластеризации конечного канала. Если рассматриваются распады в каналы ${}^7\text{Li}\{\alpha t\} \rightarrow {}^6\text{He}\{\alpha nn\} + p$, ${}^7\text{Li}\{\alpha t\} \rightarrow {}^6\text{Li}\{\alpha d\} + n$, которые связаны с разрушением (или "перестройкой") тритиевого кластера, то речь идет о динамической кластеризации. В данном случае ситуация, с одной стороны, существенно усложняется, а с другой – открываются новые возможности для исследования спектроскопии этих каналов, особенностей динамических и статических характеристик конституэнтного кластера t , которые, в принципе, могут отличаться от соответствующих характеристик свободного ядра трития ${}^3\text{H}$. Следует отметить, что изучение динамического типа кластеризации [9] требует как новых теоретических подходов, так и поисков возможностей экспериментальной проверки развиваемой концепции. Именно в таком контексте детально обсуждаются результаты экспериментальных измерений процесса квазиупругого выбивания протонов ${}^7\text{Li}(e, e'p){}^6\text{He}$ на установке НИКНЕФ [10].

Примером промежуточной кластеризации является распад в канал ${}^8\text{Li}\{\alpha tn\} \rightarrow {}^7\text{Li}\{\alpha t\} + n$, когда сам конституэнтный кластер не разрушается (как и в случае статической кластеризации), но в процессе фрагментации задействована только одна степень свободы, а не все, как было в случае динамической кластеризации.

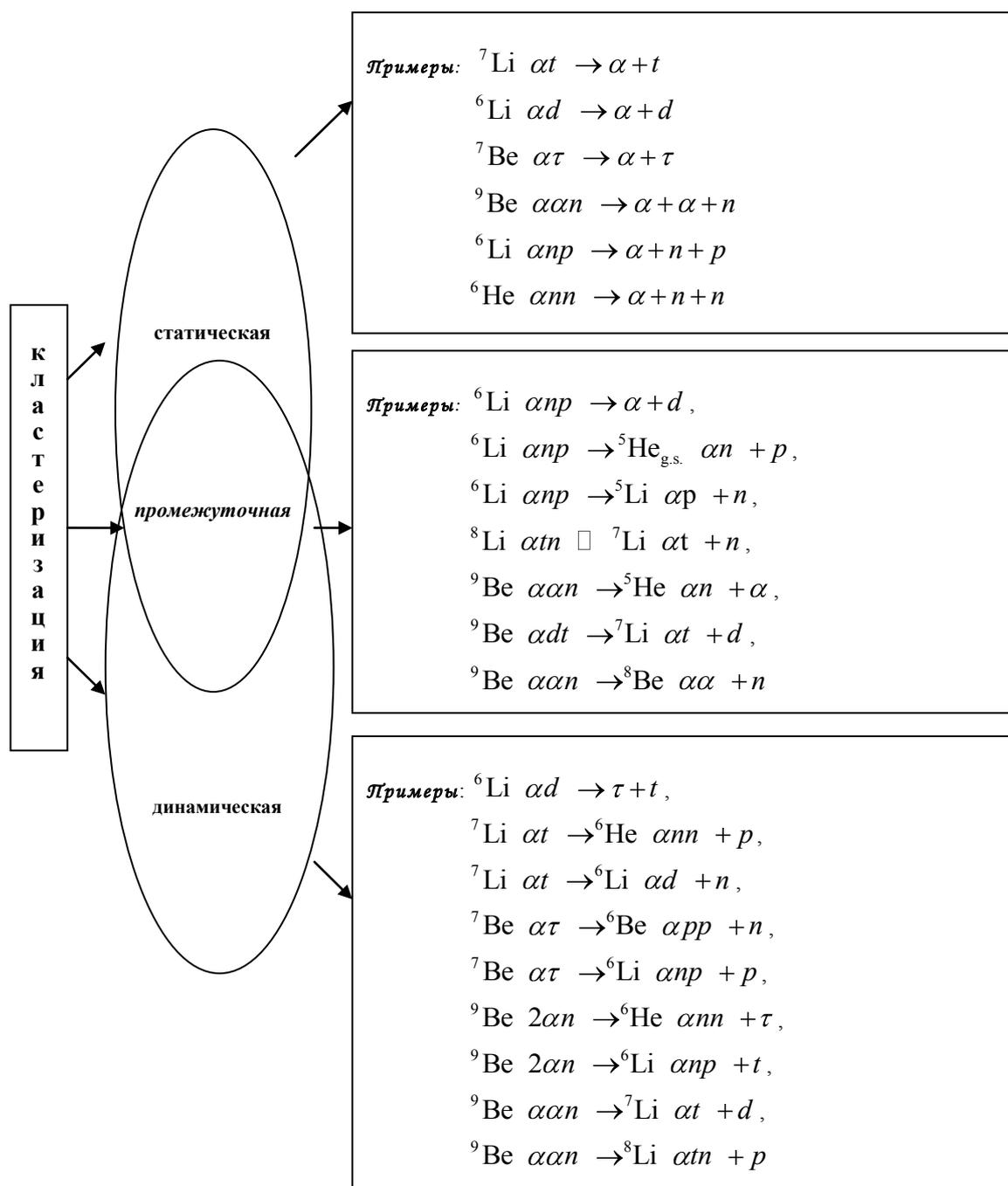


Рисунок 1 – Типы кластеризации в каналах фрагментации ядер с $A=4-9$

В работах [2, 3] был рассмотрен математический метод построения волновых функций (ВФ) относительного движения в каналах фрагментации, в которых исходная кластерная конфигурация не совпадает с типом кластеризации в конечном канале – метод

проектирования. Для канала ${}^6\text{Li } \alpha t \rightarrow {}^6\text{He} + p$ были рассчитаны протонные спектроскопические факторы S_{0+1} и S_{2+1} для переходов на основное и первое возбужденное состояния ядра ${}^6\text{He}$. При этом были рассмотрены следующие

варианты конструкции виртуального тритиевого кластера ${}^3\text{H}$: трансляционно-инвариантная модель оболочек (ТИМО), которая соответствует симметричной ВФ по относительным координатам и имеет свободно варьируемый осцилляторный параметр r_0 , а также «реалистические» ВФ, которые представляют собой вариационные функции, параметры которых подобраны так, чтобы воспроизводился наблюдаемый формфактор ядра трития ${}^3\text{H}$. В случае ТИМО размеры кластера ${}^3\text{H}$ можно варьировать с помощью параметра r_0 , симулируя «диффузный» или «сжатый» кластер. Во втором

случае – среднеквадратичные размеры ${}^3\text{H}$ фиксированы и соответствуют параметрам свободного трития.

В таблице 1 представлено сравнение полученных результатов по протонным спектроскопическим S-факторам с расчетами по модели оболочек (МО) [1] и вариационного метода Монте-Карло [10], а также экспериментальные данные по нейтронным S-факторам, которые были пересчитаны в протонные спектроскопические факторы, используя безмодельное соотношение $S_p/S_n=2$, полученное и обоснованное в [3].

Таблица 1 – Спектроскопические нейтронные и протонные факторы в изобар-аналоговых каналах ${}^7\text{Li}_{g.s.} \rightarrow {}^6\text{Li} + n$ и ${}^7\text{Li}_{g.s.} \rightarrow {}^6\text{He} + p$

j^π, T	$0^+, 1$		$2^+, 1$		$1^+, 0$	$3^+, 0$
	${}^6\text{Li}$	${}^6\text{He}$	${}^6\text{Li}$	${}^6\text{He}$	${}^6\text{Li}$	${}^6\text{Li}$
E_x , МэВ	3,563	g.s.	5,37	1,797	g.s.	2,186
S^{theor} [1]	0,285	0,571	0,208	0,416	0,804	0,593
S^{theor} [11]		0,56		0,34		
S^{exp} [12]	0,24	0,48*	0,14	0,28*	0,87	0,67
S^{exp} [13]	0,31*	0,62	0,165(0,16)*	0,37 (0,32)		
S^{exp} [10] NIKHEF	0,21*	0,42(4)	0,08*	0,16(2)		
S^{exp} [14]	0,3*	0,6	0,2*	0,4		
S^{theor}_{VMC} [10;15]		0,41		0,19		
S^{theor}_{VMC} [16]	0,221 (I)** 0,183 (II)**	0,442 (I)** 0,365 (II)**		0,274 (I)**	0,709 (I)** 0,612 (II)**	0,500 (I)** 0,436 (II)**
S^{theor}_{SM} [17]	0,345	0,691		0,466	0,841	0,646
S^{theor}_{GFMC} [16]	0,203 (I)** 0,204 (II)**	0,406 (I)** 0,409 (II)**			0,668 (I)** 0,657 (II)**	0,435 (I)** 0,447 (II)**
S^{exp} [18]	0,19(3)	0,44(6)			0,74(11)	
S^{exp} [19]					0,73±0,05	
S^{exp} [20]			0,231		0,43	0,72(14)
S^{exp} [21]						0,58(13)
S^{theor} , $r_0=1,3$	0,224	0,461	0,146	0,291		
S^{theor} , $r_0=1,67$	0,286	0,581	0,168	0,334		
S^{theor} , $r_0=2,36$	0,228	0,456	0,111	0,219		

* Экспериментальные данные, пересчитанные с учетом отношения $S_p/S_n=2$ [3].
** I – расчеты с ВФ модели оболочек; II – расчеты с кластерными ВФ [16].

Также в таблице 1 приведены теоретические и экспериментальные значения по нейтронным спектроскопическим S -факторам для канала ${}^7\text{Li} \rightarrow {}^6\text{Li} + n$: переходы на основное (1^+ , 0) и первое возбужденное состояние (3^+ , 0) ядра ${}^6\text{Li}$. Сравнение экспериментальных спектроскопических S -факторов для канала ${}^7\text{Li} \rightarrow {}^6\text{He} + p$ показывает, что данные [13, 14, 20] находятся в довольно хорошем согласии между собой, но при этом противоречат экспериментальным результатам NIKHEF [10], а также значениям [12, 18]. Причиной такого расхождения экспериментальных результатов измерений вполне может быть различие методик извлечения S -факторов из экспериментальных сечений.

В таблице 1 представлены и уточненные результаты теоретических расчетов спектроскопических S -факторов для канала ${}^7\text{Li} \rightarrow {}^6\text{He} + p$, полученные в рамках модели оболочек [17], а также с использованием двух вариационных методов Монте-Карло: VMC и GFMC (Green Function Monte Carlo) [16]. Как видно,

модельные расчеты в этом случае также различаются между собой. Так, например, результаты теоретических расчетов S_p -факторов [10, 15, 16] находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными NIKHEF [10] и [12, 18], в то время как теоретические значения [1, 11, 17] согласуются с экспериментальными результатами [13, 14, 20]. Из таблицы 1 также видно, что в расчетах [3] в целом можно добиться согласования с теми или иными данными за счет вариации осцилляторного параметра r_0 .

Таким образом, для выяснения расхождений между имеющимися значениями по спектроскопическим S -факторам представляется актуальным систематический анализ имеющихся экспериментальных данных.

Работа выполнена по гранту КН МОН РК ГФ 1124/ГФ.

References

- 1 Boyarkina A.N. Structura yader $1p$ -obolochki [Tekst]. – М.: MGU, 1973. – 62 p.
- 2 Burkova N. A., Zhaksybekova K.A., Zhusupov M. A. Potential Theory of Cluster Photodisintegration of Light Nuclei // Physics of Particles and Nuclei. – 2005. – V. 36, № 4. – P. 427-467.
- 3 Burkova N. A., Zhaksybekova K.A., Zhusupov M. A. One-nucleon spectroscopy of light nuclei [Tekst] // Phys. of Part. and Nucl. – 2009. – Vol. 40, No. 2. – P. 162-205.
- 4 Smirnov Yu.F. Nekotorye voprosy sovremennogo sostoyaniya modeli obolochek // Izv. AN SSSR. – 1974. – V. 38, №8. – P. 1627-1638.
- 5 Ishkhanov B.S., Kapitonov V.N., Orlin V.N. Modeli atomnyakh [Tekst]. – М.: Izd. Moskovskogo universiteta, 1997. – 155 p.
- 6 Neudachin V.G., Smirnov Yu.F. Zapreshennyye sostoyaniya v sistemakh iz dvukh I trekh sostavnykh chastiz // V kn.: Sovremennyye problemy optiki I yadernoi fiziki. – Kiev: Naukova Dumka, 1974. – P. 225-241.
- 7 Kukulín V.I., Neudatchin V.G., Smirnov Yu.F. Microscopically substantiated local optical potentials for scattering of light nuclei [Tekst] // Nucl. Phys. A. – 1975. – Vol. 245, №3. – P. 429-443.
- 8 Kukulín V.I., Neudatchin V.G., Smirnov Yu.F. Vzaimodeistvie sostavnykh chastiz i prinzip Pauli // ECHAYA. – 1979. – V.10, вып. 6. – P. 1236-1293.
- 9 Chuvil'skiy Yu.M., Ryzhykh G.G. Spektroskopicheskiy faktor kanala ${}^6\text{Li} \rightarrow \alpha + d$ v $\alpha + 2N$ -modeli s antisimmetrizatsiey [Tekst] // Izv. RAN. Ser. fiz. – 1990. – V. 54, №11. – P. 2276-2280.
- 10 Lapias L., Wesseling J., Wiringa R.B. Correlations in the ground state wave function of ${}^7\text{Li}$ [Tekst] // Nucl. Phys. A. – 2000. – Vol. 663-664. – P. 377-380.
- 11 Barker F.C. Intermediate coupling shell-model calculations for light nuclei [Tekst] // Nucl. Phys. – 1966. – Vol. 83. – P. 418-448.

- 12 Ajzenberg-Selove F. Energy levels of light nuclei $A=5-10$ [Текст] // Nucl. Phys. A. – 1988. – Vol. 490. – P. 1-225.
- 13 Brady F.P., King N.S.P., Bonner B.E. et al. ${}^6\text{Li}(n,d){}^5\text{He}$ and ${}^7\text{Li}(n,d){}^6\text{He}$ with 56.3 MeV neutrons // Phys. Rev. C. – 1977. – Vol.16, №1. – P. 31-41.
- 14 Sakuta S.B., Novatskiy B.G., Stepanov D.N. i dr. Eksperimental'noe issledovanie vysokovozbuzhdennykh sostoyaniy yader ${}^5,6\text{He}$ i ${}^{5,6}\text{Li}$ v reaczyakh odnonuklonnogo podkhvata (${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Be}$) i (${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$) // YaF. – 2002. – V. 65, №10. – P. 1819-1825.
- 15 Lapias L., Wesseling J., Wiringa R.B. Nuclear structure studies with the ${}^7\text{Li}(e,e'p){}^6\text{He}$ Reaction [Текст] // Phys. Rev. Lett. – 1999. – Vol. 82, №22. – P. 4404-4407.
- 17 Brida I., Pieper Steven C., and Wiringa R.B. Quantum Monte Carlo calculations of spectroscopic overlaps in $A \leq 7$ nuclei. [Текст] // <http://arXiv:1106.3121v1> [nucl-th] 15 Jun 2011.
- 18 Cohen S. and Kurath D. Spectroscopic factors for the 1p-shell [Текст] // Nucl. Phys. A. a. 1967 – Vol. 101, №1. – P. 1-16.
- 19 Wuosmaa A. H., Schiffer J. P., Rehm K. E., et al. Structure of ${}^7\text{He}$ by proton removal from ${}^8\text{Li}$ with the $(d, {}^3\text{He})$ reaction [Текст] // Phys. Rev. C – 2008 – Vol. 78 – 041302.
- 20 Jun S., Zhi-Hong L., Bing G. et al. Neutron spectroscopic factors of ${}^7\text{Li}$ and astrophysical ${}^6\text{Li}(n,\gamma){}^7\text{Li}$ reaction rates [Текст] // <http://arXiv:1001.4329v1> [nucl-ex] 25 Jan 2010.
- 21 Li T.Y. and Mark S.K. DWBA analysis of ${}^6\text{Li}(p, d){}^5\text{Li}$ and ${}^7\text{Li}(p, d){}^6\text{Li}$ reactions at 100 MeV [Текст] // Nucl. Phys. A. – 1969. – Vol. 123. – P. 147-160.
- 22 Towne I. S. A DWBA analysis of (p, d) reactions on light nuclei at 156 MeV [Текст] // Nucl. Phys. A. – 1969. – Vol. 126. – P. 97-114.