

*Секция 3*

***ТЕОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ***

---

**ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ  
СЕЧЕНИЕ  $(t, p)$  РЕАКЦИИ НА  $^{16}\text{O}$**

**Л. И. Галанина, Н. С. Зеленская**

Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова,  
Научно-исследовательский институт ядерной  
физики имени Д.В. Скобельцына, ГСП-1,  
г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, тел/факс  
(495)9392507, E-mail: [galan\\_lidiya@mail.ru](mailto:galan_lidiya@mail.ru)

**THE CROSS SECTION OF  $(t, p)$   
REACTION AT  $^{16}\text{O}$  NUCLEUS**

**L. I. Galanina, N. S. Zelenskaya**

Lomonosov Moscow State University  
Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,  
1(2), Leninskie gory,  
GSP-1, Moscow 119991, Russia,  
phone/fax (495)9392507,  
E-mail: [galan\\_lidiya@mail.ru](mailto:galan_lidiya@mail.ru)

Интерес к исследованию реакции  $^{16}\text{O}(t, p)^{18}\text{O}$  вызван тем, что конечное ядро  $^{18}\text{O}$  имеет два избыточных нейтрона. Эти нейтроны могут иметь две пространственные конфигурации – динейтронную и сигарообразную, каждая со своим механизмом образования: динейтронная – срыв (рис. 1а), сигарообразная – независимая передача нейтронов (рис. 1б). Экспериментальные дифференциальные сечения реакции  $^{16}\text{O}(t, p)^{18}\text{O}$  детально исследованы в [1]. Там же утверждается, что механизм срыва динейтрона, рассчитанный в рамках метода искаженных волн, не может дать адекватное описание эксперимента варьированием параметров оптических потенциалов (ОП) и введением дополнительных нормировок. В настоящей работе мы повторили проведенные в [1] расчеты, используя современные коды FRESKO, [2], OLYMP [3] и QUADRO [3].

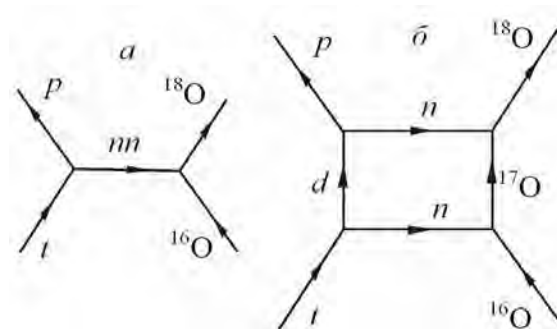


Рис. 1. Диаграммы, иллюстрирующие механизмы  $^{16}\text{O}(t, p)^{18}\text{O}$  реакции: а – срыв динейтрона, б – независимая передача нейтронов

Параметры ОП варьировались в коде FRESKO для достижения наилучшего согласия с экспериментом. Полное рассчитанное сечение (рис. 2) определяется механизмом срыва

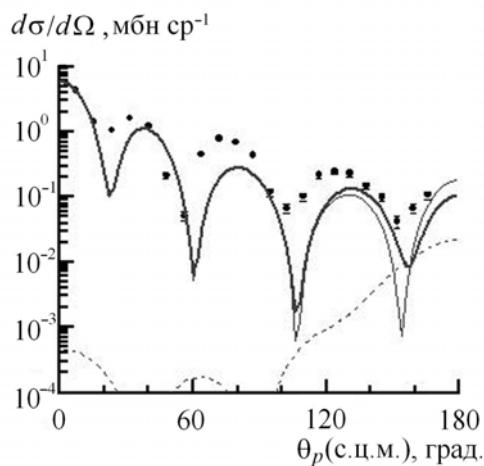


Рис. 2. Угловое распределение протонов в реакции  $^{16}\text{O}(t, p)^{18}\text{O}$  при  $E_t = 15$  МэВ: тонкая сплошная кривая – срыв динейтрона, штриховая – независимая передача нейтронов, жирная сплошная – суммарное сечение

динейтрона (вклад механизма независимой передачи нейтронов незначителен) и в целом описывает без дополнительных нормировок экспериментальное угловое распределение протонов, за исключением области углов  $60^\circ \leq \theta_p \leq 120^\circ$ .

## Список литературы

1. Cobern M. E. et al. // Phys. Rev. C. 1981. V.23. P. 2387.
2. Tompson I. J. <http://www.fresco.org.uk>.
3. Galanina L. I., Zelenskaya N. S. // ЭЧАЯ. 2012. Т. 43. С. 295.



## THE DIFFERENTIAL CROSS SECTION OF $(t, p)$ REACTION AT $^{16}\text{O}$ NUCLEUS

L. I. Galanina, N. S. Zelenskaya

Lomonosov Moscow State University Skobeltsyn  
Institute of Nuclear Physics, 1(2), Leninskie gory,  
GSP-1, Moscow 119991, Russia,  
phone/fax (495)9392507,  
E-mail: galan\_lidiya@mail.ru

Interest to study the  $^{16}\text{O}(t, p)^{18}\text{O}$  reaction is connected to the fact that the final  $^{18}\text{O}$  nucleus has two excess neutrons. These neutrons can have two spatial configurations - di-neutron and cigar with its mechanism of formation: dineutron – due the stripping mechanism (Fig. 1a), cigar-shaped – due independent neutron transfer (Fig. 1b).

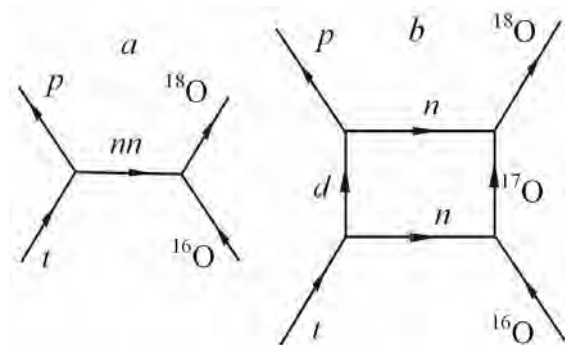


Fig. 1. Diagrams illustrating the mechanisms of  $^{16}\text{O}(t, p)^{18}\text{O}$  reaction: *a* – the dineutron stripping, *b* – independent neutron transfer

Experimental differential cross sections for  $^{16}\text{O}(t, p)^{18}\text{O}$  reaction was studied in detail in [1]. There's also indicates that the mechanism of dineutron stripping in the frame of distorted waves can

not give an adequate description of the experimental data by variation of the optical potential parameters (OP) and the introduction of additional normalization factor.

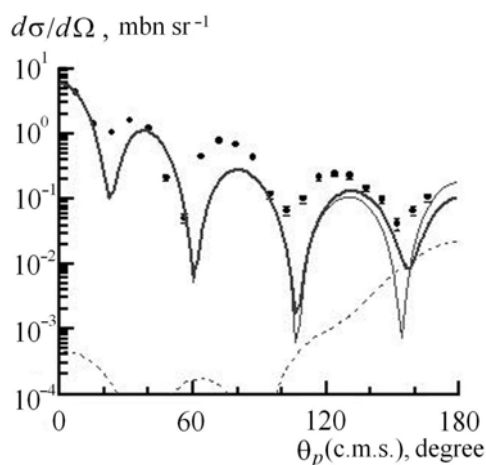


Fig. 2. Protons angular distribution in  $^{16}\text{O}(t, p)^{18}\text{O}$  reaction at  $E_t = 15$  MeV: thin solid curve – dineutron stripping, dashed – independent neutron transfer, solid – sum of both mechanisms

In this paper, we repeated the calculations done in [1] using modern codes FRESKO [2], OLYMP [3] and QUADRO [3]. OP parameters were varied at FRESKO code to achieve the best agreement with experiment. Total calculated cross section (Fig. 2) is determined by dineutron stripping mechanism (the contribution of independent neutron transfer mechanism is insignificant) and generally describes without additional normalizations the experimental angular distribution of protons, with the exception of the  $60^\circ \leq \theta_p \leq 120^\circ$  angle region.

### References

1. Cobern M. E. et al. // Phys. Rev. C. 1981. V.23. P. 2387.
2. Tompson I. J., <http://www.fresco.org.uk>.
3. Galanina L. I., Zelenskaya N. S. // Phys. Part. Nucl. 2012. V. 43. P. 147.

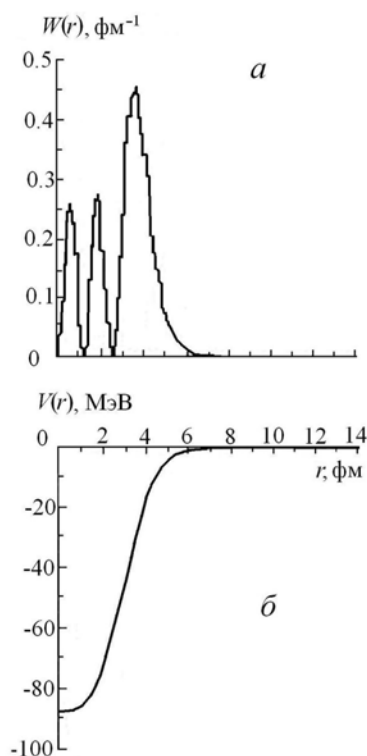


## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ДИНЕЙТРОННОЙ ПЕРИФЕРИИ В ЯДРЕ $^{18}\text{O}$

Л. И. Галанина, Н. С. Зеленская

Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова,  
Научно-исследовательский институт ядерной  
физики им. Д. В. Скобельцына, ГСП-1,  
г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2,  
тел/факс (495)9392507,  
E-mail: galan\_lidiya@mail.ru

В [1] мы показали, что угловое распределение протонов в реакции  $^{16}\text{O}(t, p)^{18}\text{O}$  определяется механизмом срыва динейтрона. Это позволило найти волновую функцию  $\Psi_{Nl}(r)$  относительного движения динейтрона и  $^{16}\text{O}$  с квантовыми числами  $N = 4, l = 0$  [2], а тем самым, плотность вероятности  $W(r) = \{r\Psi_{40}(r)\}^2$  динейтрона в  $^{18}\text{O}, nn\text{-}^{16}\text{O}$  потенциал взаимодействия  $V(r)$  (см. рисунок) и среднеквадратичное расстояние  $\langle L \rangle = \sqrt{\int r^2 W(r) dr}$  между динейтронном и  $^{16}\text{O}$ .



Плотность вероятности (а) и потенциал  $nn\text{-}^{16}\text{O}$  (б) взаимодействия

Как видно из рисунка, и  $W(r)$ , и достаточно глубокий  $V(r)$  при  $r \approx 8$  фм становятся пренебрежимо малыми, т. е. асимптотика  $W(r)$  не выходит за область действия потенциала, что свидетельствует о практическом отсутствии динейтронной периферии в  $^{18}\text{O}$ . Этот вывод подтверждает и рассчитанное нами значение  $\langle L \rangle = 3,32$  фм, которое лишь на 18 % превышает среднеквадратичный радиус  $^{18}\text{O}$ . Такое поведение динейтронной периферии в  $^{18}\text{O}$  можно объяснить значительной величиной (12,19 МэВ) энергии связи динейтрона в ядре  $^{18}\text{O}$ . Т.о., несмотря на наличие двухнейтронного избытка в  $^{18}\text{O}$ , наши расчеты показывают, что это ядро является компактным образованием и не имеет динейтронную периферию.

### Список литературы

1. Галанина Л. И. Зеленская Н. С. // Предыдущий тезис
2. Галанина Л. И. Зеленская Н. С. // Ядерная физика 2015. Т. 78. С. 685.



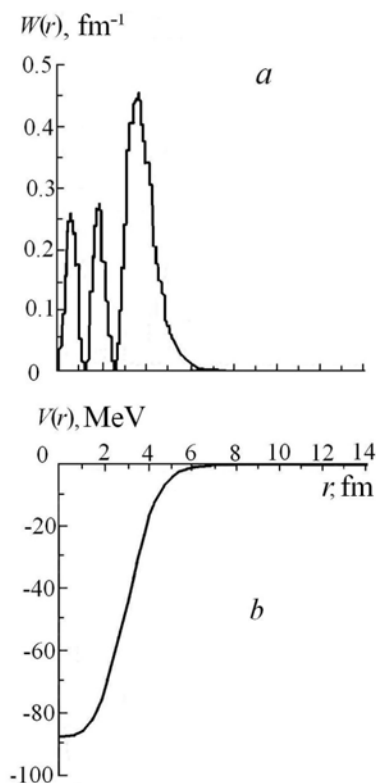
## DETERMINING THE SIZE OF DINEUTRON PERIPHERY AT $^{18}\text{O}$ NUCLEUS

L. I. Galanina, N. S. Zelenskaya

Lomonosov Moscow State University Skobeltsyn  
Institute of Nuclear Physics, 1(2),  
Leninskie gory, GSP-1, Moscow 119991, Russia,  
phone/fax (495)9392507,  
E-mail: galan\_lidiya@mail.ru

In [1] we have shown that the angular proton distribution in the  $^{16}\text{O}(t, p)^{18}\text{O}$  reaction determines by dineutron stripping mechanism. We have defined the wave function of relative movement of dineutron and  $^{16}\text{O}$  with quantum numbers  $N = 4, l = 0$  [2], and thereby the probability density of dineutron in  $^{18}\text{O}, nn\text{-}^{16}\text{O}$  potential interactions (see. figure) and

the mean square distance  $\langle L \rangle = \sqrt{\int r^2 W(r) dr}$  between the neutron and  $^{18}\text{O}$ .



Probability density (a) and  $m\text{-}^{16}\text{O}$  potential interactions (b)

As can be seen from the figure, both  $W(r)$  and quite deep  $V(r)$  become negligible at  $r \approx 8$  fm, so asymptotic behavior of  $W(r)$  does not go beyond the potential acting. This indicates that dineutron periphery in  $^{18}\text{O}$  substantially absence. This conclusion is also confirmed by the calculated value of  $\langle L \rangle = 3.32$  fm that only 18 % greater than the mean square  $^{18}\text{O}$  radius. This neutron periphery behavior in  $^{18}\text{O}$  can be explained by the large value (12.19 MeV) of binding dineutron energy in  $^{18}\text{O}$  nucleus. Thus, despite the presence of two-neutron excess in  $^{18}\text{O}$ , our calculations show that it is sufficiently compact nucleus also has no dineutron periphery.

### References

1. Galanina L. I., Zelenskaya N. S. // Previous thesis
2. Galanina L. I., Zelenskaya N. S. // Phys. Atom. Nucl. 2015. Vol. 78. No. 5. P. 685.

## О СХОДИМОСТИ РЕШЕНИЯ ТРЁХЧАСТИЧНОЙ ЗАДАЧИ РАССЕЙЯНИЯ В МЕТОДЕ САМОСОГЛАСОВАННОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ШРЕДИНГЕРА

Н. Ф. Голованова

Московский государственный университет  
дизайна и технологии  
119071 г. Москва ул. Малая Калужская д. 1  
e-mail: nina4110@yandex.ru

В методе самосогласованного решения [1, 2] задачи рассеяния частицы на связанной системе находится решение уравнения Шредингера, записанного в координатах Якоби

$$\left[-\frac{\hbar}{2M}\Delta_{\vec{R}} + V(\vec{R}, \vec{r})\right]e^{if(\vec{R}, \vec{r})}\Phi_0(\vec{r}) = (E - E_0)e^{if(\vec{R}, \vec{r})}\Phi_0(\vec{r}), \quad (1)$$

где  $\Phi_0(\vec{r})$  есть волновая функция внутреннего состояния двухчастичной системы при энергии  $E_0$ . Функция  $f(\vec{R}, \vec{r})$  действительна и такова, что сохраняется нормировка волновой функции. Комплексный потенциал  $V(\vec{R}, \vec{r}) = v(\vec{R}, \vec{r}) + iu(\vec{R}, \vec{r})$  содержит как информацию о двухчастичном взаимодействии, так и о состоянии связанной системы и, в принципе, может зависеть от энергии. В уравнении (1)  $\vec{r}$  и  $\vec{R}$  – координаты Якоби относительного движения частиц в паре, и движения частицы 1 относительно центра масс системы  $(m_2, m_3)$ ,  $M$  – соответствующая координате  $\vec{R}$  приведённая масса а  $\mu$ -приведённая масса частиц связанной системы. В асимптотическом случае функцию  $f(\vec{R}, \vec{r})$  можно разложить в ряд, относительно координат вектора  $\vec{r}(x, y, z)$ . Коэффициенты этого ряда находятся из уравнения (1). Сходимость разложения  $f(\vec{R}, \vec{r})$  определяется тем, что действительная и мнимая части потенциала входят в каждый член разложения не выше, чем в первой степени. В данной работе на примере реакций рассеяния протонов и  $\alpha$  частиц на лёгких ядрах в рамках трёхчастичной модели были получены оценки нескольких первых членов разложения  $f(\vec{R}, \vec{r})$  с потенциалами и волновыми функциями связан-

ной системы гауссова вида и исследована сходимость.

### Список литературы

1. Golovanova N. F., Golovanov A. A. Czech. J. Phys. 2006. Vol. 56, Suppl.A, p. 275–280
2. Голованова Н. Ф. // Известия РАН. Серия физическая, 2015, том 79, № 4, с. 626



## ABOUT CONVERGENCE OF THREE PARTICLES SCATTERING PROBLEM'S SOLUTION IN METHOD OF SELF-CONSISTENT SCHRODINGER EQUATION'S SOLUTION

N. F. Golovanova

Moscow State University of Design and Technology, 1 Malaya Kaluzhskaya ul. 119071 Moscow, Russia, e-mail: nina4110@yandex.ru

In the self-consistent method [1, 2] this is finding the solution of the Schrodinger equation for problem of scattering particle on two - particles bound system in Jacoby coordinates

$$\left[-\frac{\hbar}{2M}\Delta_{\vec{R}} + V(\vec{R}, \vec{r})\right]e^{if(\vec{R}, \vec{r})}\Phi_0(\vec{r}) = (E - E_0)e^{if(\vec{R}, \vec{r})}\Phi_0(\vec{r}), \quad (1)$$

where  $\Phi_0(\vec{r})$  is the interne bound system 's wave function at the energy  $E_0$ . In equation (1)  $f(\vec{R}, \vec{r})$  is real and the wave function's normalization is conserved. The complex potential  $V(\vec{R}, \vec{r}) = v(\vec{R}, \vec{r}) + iu(\vec{R}, \vec{r})$  contains the information as about two-particle interactions so about the wave function of the bound system and in principle may depend on the energy. In the equation (1)  $\vec{r}$  and  $\vec{R}$  are the Jacoby coordinates of the relative motion of particles in pare and particle 1 with the center of

system  $(m_2, m_3)$ , mass accordingly.  $M$  is a three particles reduced mass and  $\mu$  - the bound system reduced mass.

The function  $f(\vec{R}, \vec{r})$  can be expanded into series relative the coordinates of the vector  $\vec{r}(x, y, z)$  in the asymptotic. Coefficients of series are defined from the equation (1).

The iterative convergence for the function  $f(\vec{R}, \vec{r})$  is in fact, because the real and imaginary parts of potential  $V(\vec{R}, \vec{r})$  are contained in an each term of series in the power not more than one. The rate of convergence depends on the potential's type.

In this work we obtained the several first term's estimates of series for the function  $f(\vec{R}, \vec{r})$  by the example of the elastic protons and  $\alpha$ -particle's scattering on light nucleus in three particle problem's frame with Gaussian potential and the final function of the bound system and then it was investigated the iterative convergence.

### References

1. Golovanova N. F., Golovanov A. A. Czech. J. Phys. 2006, vol.56, Suppl.A, p. 275-280.
2. Golovanova N. F. ISSN № 1062-8738 Bulletin of the Russian Academy of Sciences Physics, 2015, Vol. 79, p. 948.



## ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕОРИИ РАССЕЯНИЯ КВАНТОВЫХ ЧАСТИЦ И УНИТАРНОСТЬ

Н.Ф. Голованова

Московский государственный университет дизайна и технологии  
119071 г. Москва ул. Малая Калужская д. 1,  
e-mail: [nina4110@yandex.ru](mailto:nina4110@yandex.ru)

Оптические методы, такие как метод эйконала и разложение Глаубера, в принципе, являются приближённым решением уравнения

Липпмана – Швингера для T-матрицы при малых углах рассеяния. Они удобны для вычислений, но при больших углах рассеяния в эйкональную амплитуду требуется вводить поправки. Для этого используют оборванный ряд Ватсона или другие приближённые методы, сходимость которых невозможно установить. К тому же в области энергий, где эйконал может быть эффективно применён, надо вводить комплексный потенциал, для которого приближение эйконала не удовлетворяет условию унитарности. Это приводит к невозможности правильно оценить вклады разных процессов в амплитуду и получить достоверные значения сечений и других характеристик.

В работах [1, 2] был предложен метод математического эйконала (ММЭ) решения уравнения для T-матрицы, в котором матричные элементы представлены в виде сходящегося разложения по степеням профильных функций  $\omega(\vec{r}_\perp, \alpha) = \exp[-2i\chi_x(\vec{r}_\perp, \alpha)] - 1$  с параметром ММЭ  $\alpha$ , определяемым из оптической теоремы. В этом методе нет ограничений на малость углов рассеяния. Полученные в работах [2, 3] дифференциальные сечения упругого протон-протонного рассеяния при энергиях от средних, до сверхвысоких с помощью двух релятивистских спиновых амплитуд для пары протонов в ММЭ с минимумом параметров хорошо описали экспериментальные данные в отличие от расчётов в методе релятивистского эйконала В данной работе произведено обобщение ММЭ на случай рассеяния частицы на ядре, а также в этом методе рассчитаны дифференциальные сечения упругого рассеяния ионов с А от 11 до 40 при средних энергиях.

#### Список литературы

1. Golovanova N. F., Golovanov A. A. // *Rus. J. Math. Phys.* 2003. V. 10. P. 31.
2. Голованова Н. Ф. // *Известия вузов. Физика* 2013. т.56. №6. с. 97.
3. Голованова Н. Ф. // *Известия РАН. Серия физическая*, 2014, том 78, № 11, с. 1425.



## OPTICAL METHODS IN THE QUANTUM PARTICLES SCATTERING THEORY AND THE UNITARITY

N. F. Golovanova

Moscow State University of Design and Technology, 1 Malaya Kaluzhskaya ul.  
119071 Moscow, Russia, e-mail:  
[nina4110@yandex.ru](mailto:nina4110@yandex.ru)

Optical methods so as eikonal method and Glauber expansion are approximate methods of the Lippmann – Schwinger equation's solution for T-matrix at small scattering angles in principle. They are usable for the calculations, but there is a need to introduce the corrections for not small angles scattering. These corrections are in literature or in the form of the broken Watson expansion or another approximated methods, which iterative convergence is not evidently. In addition, it is necessary to use the complex potential in the energy region, where the eikonal approach has the effective application. But the eikonal amplitude doesn't satisfy to unitarity in case of the complex potential. Those circumstances don't permit to estimate a real contribution of distinct processes to the amplitude and to obtain the valid cross-sections and another characteristics.

There were suggested the mathematical eikonal method (MME) for the T-matrix equation's solution in articles [1, 2], where the matrix elements are convergent expansions by powers of profile functions  $\omega(\vec{r}_\perp, \alpha) = \exp[-2i\chi_x(\vec{r}_\perp, \alpha)] - 1$  with the MME parameter, that is determined from the optical theorem. This method hasn't the angle's restriction.

The elastic proton-proton scattering differential cross-sections, those were obtained in articles [2,3] at energies from medium to LHC with two relativistic spin amplitudes of protons pair in MME described well experimental data using minimum parameters, while the eikonal and relativistic eikonal calculations don't show the agreement with the experimental distributions even at double parameter's number.

In this work we made the generalization of MME on the case of particle-nuclear scattering and so considered in this method the elastic collision ions with A from 11 to 40 at medium energies. The differential cross-sections are obtained.

## References

1. Golovanova N. F., Golovanov A. A. // *Rus. J. Math. Phys.* 2003. V. 10. P. 31
2. Golovanova N.F., *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Fiz.*, 2013. Vol. 56. p. 97
3. Golovanova N. F., *Bulletin of Russian Academy of Science Physics*. Vol. 78 № 1 p. 1158



**ФРАГМЕНТЫ В СТОЛКНОВЕНИЯХ  
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В  
ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ С  
НЕРАВНОВЕСНЫМ УРАВНЕНИЕМ  
СОСТОЯНИЯ**

**А.Т. Дьяченко, И. А. Митропольский<sup>1</sup>**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, С.-Петербург, Россия, 190031, Московский пр. 9, тел.:(812)736-46-36, факс: (812)314-98-69, e-mail: [dyachenko\\_a@mail.ru](mailto:dyachenko_a@mail.ru); <sup>1</sup>Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова, Гатчина, Россия, 188300, Орлова роща

Для описания столкновений тяжелых ионов используем гидродинамический подход с неравновесным уравнением состояния, которое учитывает процесс релаксации нуклонной функции распределения от первоначально неравновесного состояния к состоянию локального термодинамического равновесия [1]. Процесс формирования вторичных частиц описывается путем выделения области горячего пятна hot spot при взаимодействии областей перекрытия сталкивающихся тяжелых ионов, включая описание стадий сжатия, расширения и разлета системы на нуклоны и фрагменты. По найденной функции распределения нуклонов и фрагментов вычислены двойные дифференциальные сечения испускания образующихся вторичных частиц. Вычисленные спектры протонов и фрагментов  $^4\text{He}$ ,  $^7\text{Li}$ ,  $^9\text{Be}$  находятся в согласии с экспериментальными данными [2], полученными в столкновениях  $^{14}\text{N} + ^{124}\text{Sn} \rightarrow f + X$  при энер-

гиях 32 МэВ/нуклон для налетающих ядер азота. Согласие расчетных спектров с экспериментальными было достигнуто при модуле сжатия  $K = 210$  МэВ.

**Список литературы**

1. Дьяченко А. Т., Гриднев К. А., Митропольский И. А. Особенности неравновесного уравнения состояния в столкновениях тяжелых ионов промежуточных энергий // *Известия РАН. Сер. Физическая*. 2015. Т. 79. № 7. С. 952–957.
2. Avdeichikov V. V. et al. (CHIC-Collaboration). Chemical and kinetic temperatures extracted in reaction of  $^{14}\text{N} + ^{112}\text{Sn}$ ,  $^{124}\text{Sn}$  at 32 MeV/nucleon // *Proceedings of the International School-Seminar on Heavy Ion Physics (Dubna 1993)*, JINR, E7-93-274, Dubna, 1993, Vol. 2. P. 238–245.



**FRAGMENTS IN HEAVY-ION  
COLLISIONS IN HYDRODYNAMIC  
APPROACH  
WITH A NON-EQUILIBRIUM EQUATION  
OF STATE**

**A.T. D'yachenko, I. A. Mitropolsky<sup>1</sup>**

Emperor Alexander I Petersburg state transport university, St.- Petersburg, Russia, 190031, Moscow ave. 9, tel.:(812)736-46-36, fax: (812)314-98-69, e-mail: [dyachenko\\_a@mail.ru](mailto:dyachenko_a@mail.ru); <sup>1</sup> В.П. Konstantinov Petersburg nuclear physics institute, Gatchina, Russia, 188300, Orlova roscha

For the description of the heavy-ion collisions, we have used a hydrodynamic approach with a non-equilibrium equation of state, which takes into account the relaxation of the nucleon distribution function from the initial non-equilibrium state to the state of a local thermodynamic equilibrium [1]. The process of secondary particles production is described by highlighting of a hot spot as area in interaction of overlapping areas of colliding heavy ions, including into account a description of stages of the compression, expansion and freeze-out of the sys-



tem into nucleons and fragments. The double differential cross sections for the emission of the formed secondary particles were calculated by the found distribution function of nucleons and fragments. The calculated spectra of protons and the  $^4\text{He}$ ,  $^7\text{Li}$ ,  $^9\text{Be}$  fragments are in agreement with the experimental data [2] obtained in the reaction  $^{14}\text{N} + ^{124}\text{Sn} \rightarrow f + X$  at energy of 32 MeV/nucleon for the incident nitrogen nuclei. The agreement between the calculated and experimental spectra was achieved with the compression module  $K = 210$  MeV.

### References

1. D'yachenko A. T., Gridnev K. A., Mitropolsky I. A. Features of a non-equilibrium equation of state in heavy-ion collisions at intermediate energies // Bulletin of the Russian Academy of Science. Physics. 2015. V. 79. No. 7. P.858–863.
2. Avdeichikov V. V. et al. (CHIC-Collaboration). Chemical and kinetic temperatures extracted in reaction of  $^{14}\text{N}+^{112}\text{Sn}$ ,  $^{124}\text{Sn}$  at 32 MeV/nucleon // Proceedings of the International School-Seminar on Heavy Ion Physics (Dubna 1993), JINR, E7-93-274, Dubna, 1993, Vol. 2. P. 238–245



## ПРИМЕНЕНИЕ ДИФРАКЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА РЕАКЦИЙ С ГАЛО-ЯДРАМИ

**В. П. Заварзина, В. А. Сергеев**

Институт ядерных исследований Российской  
академии наук  
Проспект 60-летия Октября, 7а, Москва, 117312  
Телефон 8(499)1354063, факс 8(499) 1352268  
E-mail: [zavarzin@inr.ru](mailto:zavarzin@inr.ru)

В работах [1,2] были получены и применены к конкретным расчетам простые приближенные соотношения для дифференциальных (по продольным импульсам) сечений реакций срыва валентного нуклона гало-ядра. Использовалась дифракционная модель черного диска для опи-

сания взаимодействия нуклона и остова гало-ядра с ядром-мишенью. При этом предполагалось, что размеры гало-ядра значительно превышают эффективный радиус поглощения нуклона ядром-мишенью. Было показано, что особенно хорошо это приближение применимо для расчета продольных импульсных распределений частиц-остовов в реакции срыва нуклона (погрешность порядка 1 %). Поглощение остова ядром-мишенью характеризуется экспоненциальным фактором, который уменьшает ширину распределения по сравнению с исходной шириной, связанной с волновой функцией гало-ядра.

Представляет интерес расширить круг наблюдаемых величин, для расчета которых можно использовать приближение малого эффективного радиуса ядра-мишени. В настоящей работе рассмотрены в рамках вышеупомянутого подхода дифференциальные сечения дифракционного расщепления гало-ядра, а также интегральные сечения различных дифракционных процессов.

### Список литературы

1. Заварзина В. П., Пафомов В. Е., Сергеев В. А. // Известия РАН, серия физ. 2014. Т. 78. № 5. С. 662.
2. Заварзина В.П., Пафомов В.Е., Сергеев В.А // Известия РАН, серия физ. 2016. Т. 80. № 5. С. 583.



## APPLICATION OF THE DIFFRACTIVE MODEL FOR ANALYSIS OF HALO- NUCLEUS REACTIONS

**V. P. Zavarzina, V. A. Sergeev**

Institute for Nuclear Research of the Russian  
Academy of Sciences  
60-th October Anniversary prospect 7a,  
Moscow 117312, Russia  
Tel. 8(499)1354063, Fax 8(499) 1352268  
E-mail: [zavarzin@inr.ru](mailto:zavarzin@inr.ru)

In the works [1,2] simple approximate expressions for differential (in longitudinal momentum) cross sections for nucleon stripping reactions of halo

nuclei were obtained and applied in some specific calculations. The black disc diffraction model was used to describe interaction between a target nucleus and a valence nucleon (or core) of the halo projectile nucleus. The halo-nucleus size was assumed to be much greater than the effective radius of nucleon absorption by the target nucleus. It was shown [2] that this approximation is especially suitable for calculations of momentum distributions of core particles in nucleon stripping reactions (errors are of the order of 1 %). Core absorption by the target nucleus is characterized by an exponential factor which reduces the distribution width as compared with the initial width associated with the halo wave function.

It is interesting to expand a list of observable values which can be calculated using the approximation of the small target radius. In the given work are considered differential cross sections for diffractive dissociation of halo nucleus and integrated cross sections for diffractive processes on the basis of the above-mentioned approach.

### References

1. Zavarzina V. P., Pafomov V. E., and Sergeev V. A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys., 2014, vol. 78, p. 469.
2. Zavarzina V. P., Pafomov V. E., and Sergeev V. A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys., 2016, vol. 80, p. 583.



## МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ $p^{10}B$ РАССЕЙЯНИЯ В ТЕОРИИ ГЛАУБЕРА

Е. Т. Ибраева, Н. Т. Буртебаев,  
П. М. Красовицкий

Институт ядерной физики, Республика  
Казахстан, 050035, Алматы, ул. Ибрагимова, 1,  
тел.: +77273866835, факс: +7 727 3865260,  
e-mail: [ibraeva.elena@gmail.com](mailto:ibraeva.elena@gmail.com)

Структура изотопов В изучена достаточно хорошо и продолжает изучаться, поскольку многие из них являются основным поглотителем нейтронов и конструктивным элементом термо-

ядерных реакторов. Помимо фундаментальных ядерных исследований, связанных с новыми источниками энергии и реакторами нового поколения, важны и их приложения: утилизация радиоактивных отходов, радиационная безопасность, медицинское применение.

Целью нашей работы является микроскопическое описание дифференциального сечения (ДС) упругого  $p^{10}B$  рассеяния в рамках глауберовской теории, основанное на учёте дифракционного характера ядерного взаимодействия при высоких энергиях, когда длина волны относительного движения сталкивающихся частиц мала по сравнению с размерами области взаимодействия. В операторе многократного рассеяния  $\Omega$  учтены одно- и двукратные соударения. Расчет ДС проведен с волновой функцией в модели оболочек.

Сравнение ДС с экспериментом при 197 МэВ [1] и с расчетом в DWBA [2] показало, что в области передних углов ( $\theta \sim 30^\circ$ ) наш расчет согласуется с имеющимися данными. Проанализировав вклад в сечение однократных и двукратных соударений мы получили, что при нулевом угле парциальное сечение однократного рассеяния на порядок больше сечения двукратного, но с увеличением переданного импульса двукратные соударения уменьшаются не так быстро, как однократные и в дальнейшем становятся доминирующими. Минимум в сечении возникает из-за интерференции одно- и двукратных амплитуд, входящих в ДС с противоположными знаками. В приближении оптического предела рассчитаны парциальные сечения на нуклонах из разных оболочек. Показано, что столкновения с нуклонами р-оболочки определяют сечение при малых переданных импульсах, когда столкновения происходят в поверхностной области ядра, но по мере увеличения импульса нуклоны проникают во внутреннюю область ядра и доминирующим становится вклад от рассеяния на нуклонах s-оболочки.

### Список литературы

1. Betker A.C. et al. // Phys. Rev. C. 2005. V. 71. 064607.
2. Amos K., Karataglidis S., Kim Y. J. et al. // Nucl. Phys. A. 2010. V. 836. P. 50.



## MICROSCOPIC ANALYSIS OF $p^{10}B$ SCATTERING IN THE GLAUBER THEORY

**E. T. Ibraeva, N. T. Burtebaev,  
P. M. Krassovitskiy**

Institute of nuclear physics, Republic  
of Kazakhstan, 050035, Almaty, Ibragimov str. 1,  
Tel: +77273866835, Fax: +7 727 3865260,  
e-mail: [ibraeva.elena@gmail.com](mailto:ibraeva.elena@gmail.com)

The structure of B isotopes is studied quite well and its study continues, since many of them are the main absorber of neutrons and the structural element of fusion reactors. In addition to fundamental nuclear research related to new energy sources and new-generation reactors, their applications are also important: disposal of radioactive waste, radiation safety and medical applications.

The aim of our paper is the microscopic description of the differential cross section (DCS) of elastic  $p^{10}B$  scattering in the framework of the Glauber theory, based on accounting of the diffraction nature of nuclear interactions at high energies. Single and double collisions are accounted in the operator of multiple scattering  $\Omega$ . DS calculation was performed with the wave function in the shell model. The partial contribution to the single-scattering cross section from protons collisions with nucleons in different shells was calculated.

Comparison of DCS with the experiment at 197 MeV [1] and with calculation in DWBA [2] showed that in the area of front angles ( $\theta \sim 30^\circ$ ) our calculation is consistent with available data. Having analyzed the contribution of single and double collisions to the cross-section, we showed that at zero angle the partial cross-section of single scattering is one order larger than the cross-section of double scattering, but with increasing of momentum transfer the double collisions decrease not as fast as single ones and later become dominant. The minimum occurs in the cross section due to interference of single and double amplitudes included in DCS with opposite signs. In approximation of single scattering we calculated the partial cross sections on nucleons from different shells. It was shown that collisions with nucleons of p-shell determines the cross-section at small momentum transfers, the collisions with nucleons of s-shell determines the cross-section at higher momentum transfers, when protons penetrate into the internal region of the nucleus.

## References

1. Betker A.C. et al. // Phys. Rev. C. 2005. V. 71. 064607.
2. Amos K., Karataglidis S., Kim Y. J. et al. // Nucl. Phys. A. 2010. V. 836. P. 50.



## ДИФРАКЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ ПИОНОВ НА ЯДРЕ ${}^9\text{Be}$

**Е. Т. Ибраева, О. И. Имамбеков,  
Ж. А. Токсаба**

Институт ядерной физики,  
Республика Казахстан, 050035,  
Алматы, ул. Ибрагимова, 1,  
тел.: +77273866835, факс: +7 727 3865260,  
e-mail: [ibraeva.elena@gmail.com](mailto:ibraeva.elena@gmail.com)

Рассеяние пионов на ядрах неплохо изучено в последние десятилетия на мезонных фабриках LAMPF в Лос-Аламосской национальной лаборатории, PSI в институте П. Шеррера, ОИЯИ (Россия) и др. Появление новой техники получения поляризованных мишеней позволило провести эксперименты с поляризованными ядрами-мишенями, в связи с чем возрос интерес к рассеянию пионов на ядрах с ненулевым спином.

В наших предыдущих работах мы рассматривали рассеяние  $\pi^\pm$ -мезонов на ядре  ${}^9\text{Be}$  при энергиях в области  $\Delta_{33}$ -резонанса [1, 2]. В настоящей работе мы перешли к области энергий выше  $\Delta_{33}$ -резонанса и рассчитали дифференциальные сечения при энергиях  $E = 600$  и  $1000$  МэВ. В этой области расчет в рамках теории Глаубера более оправдан, т. к. соблюдаются положенные в основу теории ограничения: «замороженность» нуклонов за время взаимодействия и прямолинейность траектории рассеяния. Входными параметрами теории являются волновая функция (ВФ) ядра-мишени и элементарная  $\pi^\pm N$ -амплитуда. Преимуществом теории Глаубера является возможность работать со сложными ВФ, рассчитанными с реалистическими потенциалами взаимодействий и учитывать эффекты многократного рассеяния.

Используя разложение трехчастичных  $2\alpha n$  ВФ ядра  ${}^9\text{Be}$  в ряд по гауссоидам и альтернативную запись оператора многократного рассеяния в виде разложения рассеяния на  $\alpha$ -кластерах и нуклоне, мы рассчитали матричные элементы аналитически, используя численные методы только на последнем этапе вычислений. Было показано, что имеется зависимость ДС от ВФ, рассчитанных с разными потенциалами межкластерных взаимодействий. Учет в сечении различных компонент ВФ показал, что если их веса сравнимы по величине (как в ВФ ядра  ${}^9\text{Be}$ ), то нельзя пренебрегать ни одной из них, все они дают пропорциональный своим весам вклад в дифференциальное сечение и воспроизвести абсолютную величину сечения может только их сумма.

### Список литературы

1. Жусупов М. А., Ибраева Е. Т. // Изв. РАН. Сер. физ. 1997. Т. 61. С. 2182; ЯФ 1998, Т. 61. С. 51.
2. Жусупов М. А., Ибраева Е. Т. // ЭЧАЯ 2001. Т. 31. С. 1427; Phys. Part. Nucl. 2001. V. 31. P. 723.



### DIFFRACTION SCATTERING OF PIONS ON THE NUCLEUS ${}^9\text{Be}$

**E. T. Ibraeva, O. I. Imambekov, Zh. A. Toksaba**

Institute of nuclear physics, Republic of Kazakhstan, 050035, Almaty, Ibragimov str. 1,  
phone: +77273866835, fax: +7 727 3865260,  
e-mail: [ibraeva.elena@gmail.com](mailto:ibraeva.elena@gmail.com)

Scattering of pions on nuclei is well studied in recent decades at meson factories LAMPF at the Los Alamos National Laboratory, in PSI in P. Scherrer Institute, in JINR (Russia) and others. The availability of new equipment for preparation of the polarized targets allowed carrying out the experiments with the polarized nuclei-targets, resulting in the increased interest towards the scattering of pions on nuclei with non-zero spin.

In our previous papers, we reviewed the scattering of  $\pi^\pm$ -mesons on  ${}^9\text{Be}$  nucleus at the energies in the region of  $\Delta_{33}$ -resonance [1, 2]. In this paper, we moved to the energies region higher than  $\Delta_{33}$ -resonance and calculated the differential cross section at the energies  $E = 600$  and  $1000$  MeV. The calculation within the Glauber theory in this area is more justified, since the limitations being the basis of the theory are followed: "frozen state" of nucleons during interaction and linearity straightness of the scattering trajectory. The input parameters of the theory are the wave function (WF) of the target nucleus and elementary  $\pi^\pm N$ -amplitude. The advantage of the Glauber's theory is the ability to work with complex WFs, calculated with realistic interaction potentials and take into account the effects of multiple scattering.

Using the expansion of three-particle  $2\alpha n$  WFs of  ${}^9\text{Be}$  nucleus in a series of gaussoids and alternative recording of multiple scattering operator in the form of scattering expansion on  $\alpha$ -cluster and nucleon, we calculated the matrix elements analytically using the numerical methods only at the last stage of calculations. It was shown that there is a dependency of DSs from WFs calculated with various potentials of intercluster interactions. Accounting of various WF components in the cross-section showed that if their weights are comparable in magnitude (as in WF of  ${}^9\text{Be}$  nucleus), it is not allowed to neglect any of them, they all give the contribution proportionally to their weights into the differential cross section and only their sum can reproduce the absolute value of the cross section.

### References

1. Zhusupov M. A., Ibraeva E. T. // Izv. RAN. Phys. ser. 1997. V. 61. P. 2182; Yad. Fiz, 1998. V. 61. P. 51.
2. Zhusupov M. A., Ibraeva E. T. // Phys. Part. Nucl. 2001. V. 31. P. 723.



## О ВЫЧИСЛЕНИИ КУЛОНОВСКИХ ФУНКЦИЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

С. Ю. Игашов

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н. Л. Духова  
Россия, 127055, Москва, ул. Сушевская, д. 22  
Телефон: +7 (499) 978-7803;  
Факс: +7 (499) 978-0903;  
E-mail: igashov@theor.mephi.ru

В квантовомеханических задачах с заряженными частицами в непрерывном спектре формулировка граничных условий на больших расстояниях осуществляется в терминах кулоновских функций (КФ)  $F_L(\eta, \rho)$  и  $G_L(\eta, \rho)$  [1]. Решению проблемы разработки надёжных алгоритмов вычисления КФ посвящено много работ в частности [2–6]. Опубликованы различные программы [3–6] на языке FORTRAN. Существуют различные представления КФ, например, в виде степенных рядов, рядов по Бесселевым функциям, интегральные представления, с использованием рекуррентных соотношений, цепные дроби, асимптотические выражения [1]. Конкретные значения переменной  $\rho$  и двух параметров – орбитального момента  $L$  и кулоновского параметра  $\eta$  определяют эффективность и возможность применения тех или иных представлений для численных расчётов. Существующие алгоритмы, будучи весьма эффективны в одной параметрической области, значительно теряют точность в другой.

Разработанный алгоритм значительно расширяет область вычислений и включает в себя использование различных подходов, основанных на степенных рядах, цепных дробях, интегрировании дифференциального уравнения высокоточным методом.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант № 15-02-08007.

### Список литературы

1. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям, М.: Наука, 1979.
2. Froberg C. E., Rev. Mod. Phys. 1955. 27, 399.
3. Bardin. C. et al, Comp. Phys. Comm. 1972. 3, 73.

4. Barnett A.R., Feng D.H., Steed J. W., Goldfarb L. J. B. Comp. Phys. Comm. 1974. 8, 377.
5. Barnett A. R. Comp. Phys. Comm. 1982. 27, 147.
6. Seaton M. J. Comp. Phys. Comm. 2002. 146, 250.



## ON COMPUTATION OF COULOMB FUNCTIONS FOR NUCLEAR PHYSICS PROBLEMS

S. Yu. Igashov

Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA)  
22, ul. Sushchevskaya, Moscow 127055, Russia  
Phone: +7 (499) 978-7803; Fax: +7 (499) 978-0903;  
E-mail: alexander. [igashov@theor.mephi.ru](mailto:igashov@theor.mephi.ru)

In quantum mechanics the boundary conditions at large distances for the problems with charged particles in continuum are formulated in terms of Coulomb functions (CF)  $F_L(\eta, \rho)$  and  $G_L(\eta, \rho)$  [1]. A number of papers were focused upon the elaboration of reliable algorithm for computation of CF, in particular [2-6]. Various FORTRAN programs were proposed in [3-6]. There are different representations of CF, for example power series, series over the set of Bessel functions, integral representations, recurrence relations, continued fractions, asymptotic forms [1]. The values of the argument  $\rho$  and the two parameters – the angular momentum  $L$  and the Coulomb parameter  $\eta$  determine the efficiency and the opportunity of the application of different representations for computation. The existing algorithms being rather effective in one domain of parameters loss considerably in accuracy in another.

The proposed algorithm considerably extends the domain of reliable computation and involves various approaches based on power series expansions, continued fractions, numerical solution of differential equation by means of high precision method.

This work was partly supported by RFBR under grant № 15-02-08007.

### References

1. Abramowitz M. and Stegun I. A., Handbook of mathematical functions, Natl. Bur. Std. Appl. Math. Series 55, 1964.
2. Froberg C. E. Rev. Mod. Phys. 1955. 27, 399.
3. Bardin C. et al, Comp. Phys. Comm. 1972. 3, 73.



4. Barnett A. R. Feng D. H., Steed J. W., Goldfarb L.J.B., Comp. Phys. Comm. 1974. 8, 377.  
 5. Barnett A. R. Comp. Phys. Comm. 1982. 27, 147.  
 6. Seaton M. J. Comp. Phys. Comm. 2002. 146, 250.



**ОПРЕДЕЛЯЮЩАЯ РОЛЬ  
 WRIGGLING-КОЛЕБАНИЙ  
 ДЕЛЯЩЕГОСЯ ЯДРА  
 В ФОРМИРОВАНИИ АНИЗОТРОПИИ  
 В УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯХ  
 ПРОДУКТОВ ДВОЙНОГО  
 И ТРОЙНОГО ДЕЛЕНИЯ  
 ОРИЕНТИРОВАННЫХ ЯДЕР**

**С. Г. Кадменский, В. Е. Бунаков<sup>1</sup>,  
 Д. Е. Любашевский**

Воронежский государственный университет,  
 394006, Воронеж, Университетская площадь д. 1,  
 тел.: (473) 2208821,  
 e-mail: [kadmensky@phys.vsu.ru](mailto:kadmensky@phys.vsu.ru)

<sup>1</sup>Петербургский институт ядерной физики РАН,  
 188300, Гатчина, Орлова Роща, Россия,  
 тел.: (812) 5424875, факс: (812) 7131963,  
 e-mail: [bunakov@thd.pnpi.spb.ru](mailto:bunakov@thd.pnpi.spb.ru)

**THE DEFINING ROLE OF WRIGGLING -  
 VIBRATIONS OF FISSILE NUCLEI  
 FOR THE FORMATION ASYMMETRIES  
 IN THE ANGULAR DISTRIBUTIONS  
 OF THE ORIENTED NUCLEI OF BINARY  
 AND TERNARY FISSION PRODUCTS**

**S. G. Kadmensky, V. E. Bunakov<sup>1</sup>,  
 D. E. Lubashevsky**

Voronezh State University, 394006, Voronezh,  
 Universitetskaya pl., 1, Russia,  
 Phone: (473) 2208821 e-mail:  
[kadmensky@phys.vsu.ru](mailto:kadmensky@phys.vsu.ru)

<sup>1</sup>Petersburg Nuclear Physics Institute RAS 188300  
 Gatchina, Orlova Roscha, Russia,  
 Phone: (812) 5424875, fax: (812) 7131963,  
 e-mail: [bunakov@thd.pnpi.spb.ru](mailto:bunakov@thd.pnpi.spb.ru)

Использован тот факт [1,2], что анизотропии  
 в угловых распределениях продуктов низкоэнер-

гетического двойного и тройного деления ядер  
 возможны только при отсутствии термализации  
 состояний делящегося ядра в окрестности точки  
 его разрыва, несмотря на их неравновесный ха-  
 рактер. Подтверждено представление о том, что  
 угловые и спиновые распределения продуктов  
 деления могут быть успешно описаны только  
 при учёте нулевых поперечных колебаний деля-  
 щегося ядра в окрестности его точки разрыва [3].  
 Продемонстрировано, что близость направлений  
 вылета фрагментов деления к сохраняющемуся в  
 процессе деления направлению оси симметрии  
 делящегося ядра требует из-за влияния принципа  
 неопределённости квантовой механики появле-  
 ния когерентной суперпозиции больших значе-  
 ний относительных орбитальных моментов ука-  
 занных фрагментов и реализуется только при  
 учёте нулевых wriggling-колебаний делящегося  
 ядра. Показано, что энергетические и угловые  
 распределения нейтронов и  $\gamma$ -квантов, испаряе-  
 мых из термализованных фрагментов деления, а  
 также относительные выходы основных и изо-  
 мерных состояний указанных фрагментов опре-  
 деляются выстроенностью и большими значе-  
 ниями спинов данных фрагментов, что обуслов-  
 лено [4] совместным влиянием нулевых wrig-  
 gling- и bending-колебаний делящегося ядра при  
 доминировании wriggling-колебаний в отличие  
 от общепринятых представлений, см., например  
 [5], когда учитываются только bending-  
 колебания.

Работа поддержана Минобрнауки России в  
 рамках базовой части государственного задания  
 на 2014–2016 гг., проект № 1649.

**Список литературы**

1. Bohr A. and Mottelson B. Nuclear Structure (W.A. Benjamin, NY, Amsterdam, 1969).
2. Кадменский С. Г. ЯФ, 68, 1968 (2005).
3. J.R. Nix, W.J. Swiatecki, Nucl. Phys. A 1965 V,71, P.1.
4. Бунаков В. Е. Кадменский С. Г. Любашевский Д. Е. ЯФ, 2016. 79, 144.
5. Rasmussen J. O., Norenberg W., Mang H. J., Nucl. Phys., 1969. A136, 456.



**ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ДВУХПРОТОННОГО ВИРТУАЛЬНОГО  
РАСПАДА ЯДРА  $^{45}\text{Fe}$   
С УЧЕТОМ СВЕРХТЕКУЧИХ  
КОРРЕЛЯЦИЙ**

С. Г. Кадменский, Ю. В. Иванков

Воронежский государственный университет,  
394006, Воронеж, Университетская площадь  
д. 1, тел.: (473) 2208821,  
e-mail: [kadmensky@phys.vsu.ru](mailto:kadmensky@phys.vsu.ru)

**THE CHARACTERISTICS  
OF TWO-PROTON VIRTUAL DECAY  
OF NUCLEUS  $^{45}\text{Fe}$  WITH TAKING  
INTO ACCOUNT THE SUPERFLUID  
CORRELATION**

S. G. Kadmensky, Yu. V. Ivankov

Voronezh State University, 394006, Voronezh,  
Universitetskaya pl., 1, Russia, Phone: (473)  
2208821  
e-mail: [kadmensky@phys.vsu.ru](mailto:kadmensky@phys.vsu.ru)

При использовании теории двухступенчатых двухпротонных распадов ядер [1] проведено исследование парциальных ширин и угловых распределений вылетающих протонов для двухпротонного виртуального распада основного состояния четного по  $Z$  родительского ядра  $^{45}\text{Fe}$  в основное состояние дочернего ядра  $^{43}\text{Cr}$ . Угловое распределение  $W(\theta)$  вылетающих протонов в системе координат, ось  $Z$  – которой выбрана по направлению вылета одного из протонов, представляется при использовании обозначений работы [1] в виде

$$W(\theta) = \sum_{nlj} \int_0^{Q_0} dT_1 \left\{ \left( Y_{l_0}(\theta) \sqrt{a(lj)G^Z(nlj)} \sqrt{a(lj)G^Z(nlj)} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \sqrt{\Gamma^{A-1}(nlj)} \sqrt{\Gamma^A(nlj)} \right) / (Q_1(nlj) - T) \right\}^2, \quad (1)$$

где  $\Gamma^A(nlj)$  – протонная ширина, описывающие вылет протона из оболочечного состояния  $nlj$  ядра  $A$ ,  $a(lj)$  – коэффициент, зависящий от  $l, j$ , а  $G^Z(nlj)$  – амплитуда сверхтекучего спек-

троскопического фактора протона, определяемая в рамках сверхтекучей модели атомного ядра для четных и нечетных по  $Z$  ядер в работе [2] как  $G^Z(nlj) = \sqrt{(2j+1)/2} (-1)^l v^Z(nlj)$ , для четного  $Z$  и  $G^{Z-1}(nlj) = u^{Z-2}(nlj)$  для нечетного  $Z$ . Полная ширина  $\Gamma$  исследуемого двухпротонного распада родительского ядра определяется интегрированием по телесному углу  $d\Omega$  углового распределения (1) с учетом ортонормированности сферических функций  $Y_{l_0}(\theta)$ .

В рамках сверхтекучей модели сферического ядра [2] при использовании константы парного взаимодействия  $g_Z = 0,389$  рассчитаны сверхтекучие коэффициенты  $v^Z(nlj)$  и  $u^{Z-2}(nlj)$  для однопротонных состояний  $2S(1/2)$ ,  $2P(1/2)$ ,  $2P(3/2)$ ,  $1f(5/2)$ ,  $1f(7/2)$ , определяющих парциальные ширины двухпротонного распада ядра  $^{45}\text{Fe}$ . Для полной ширины двухпротонного распада значимыми оказались только двухпротонные парциальные ширины с вылетом протонов из оболочечных состояний  $2S(1/2)$ ,  $2P(1/2)$ ,  $2P(3/2)$ , которые оказались равными  $\Gamma(2S(1/2)) \approx 0,2 \cdot 10^{-19}$ ,  $\Gamma(2P(1/2)) \approx 0,3 \cdot 10^{-19}$  и  $\Gamma(2P(3/2)) = 0,9 \cdot 10^{-19}$  относительно энергии 1 МэВ и в сумме близки к экспериментальной полной ширине  $\Gamma \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ . В то же время угловое распределение вылетающих протонов  $W(\theta)$  (1) оказалось в заметном расхождении с соответствующим экспериментальным распределением, что продемонстрировано в работе [3].

Работа поддержана грантом РФФИ (№ 15-02-03402).

### Список литературы

1. Кадменский С. Г., Иванков Ю. В. ЯФ. 2014. Т. 77, 1075.
2. Соловьев В. Г. Теория атомного ядра: Ядерные модели. М.: Энергоиздат, 1981.
3. Кадменский С. Г., Иванков Ю. В., Любашевский Д. Е.



**Т-ИНВАРИАНТНОСТЬ  
И МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ  
Т-НЕЧЁТНЫХ И Т-ЧЁТНЫХ  
АСИММЕТРИЙ В УГЛОВЫХ  
РАСПРЕДЕЛЕНИЯХ ПРОДУКТОВ  
ДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ЯДЕР**

**С. Г. Кадменский, П. В. Кострюков**

Воронежский государственный университет,  
394006, Воронеж, Университетская площадь д.  
1, тел.: (473) 2208821, e-mail:  
[kadmensky@phys.vsu.ru](mailto:kadmensky@phys.vsu.ru)

**THE T-INVARIANCE and OF  
MECHANISMS FORMATION FOR T-  
ODD AND T-EVEN ASYMMETRIES IN  
THE ANGULAR DISTRIBUTIONS OF  
THE FISSION PRODUCTS OF ORIENTED  
NUCLEI**

**S.G. Kadmensky, P.V. Kostryukov**

Voronezh State University, 394006, Voronezh,  
Universitetskaya pl., 1, Russia,  
Phone: (473) 2208821 e-mail:  
[kadmensky@phys.vsu.ru](mailto:kadmensky@phys.vsu.ru)

Продемонстрировано, что использование условия Т-инвариантности для многочастичной многоступенчатой ядерной реакции  $a \rightarrow b$  позволяет проводить отбор возможных механизмов указанной реакции. Показано, что указанное условие требует равенства амплитуды  $T_{ba}$  исходной реакции и амплитуды  $\tilde{T}_{\bar{a}\bar{b}}$  обращенной к ней по времени реакции  $\bar{a} \rightarrow \bar{b}$ , где  $\tilde{T}$  – оператор для обратной реакции  $b \rightarrow a$ , отличающийся от оператора Т изменением порядка появления потенциалов взаимодействия частиц для различных этапов исследуемых реакций. При определении коэффициентов  $D$  асимметрий, входящих в дифференциальные сечения исследуемой реакции соотношениями типа:

$$D = (\sigma^+ - \sigma^-) / (\sigma^+ + \sigma^-), \quad (1)$$

где знаки +/- отвечают изменениям знака направлений параметров ориентации, связанных с указанными асимметриями, показано, что при едином механизме протекания исходной, обратной и обращенной по времени к ней реакций ко-

эффициенты  $D$  для этих реакций можно представить в виде одной скалярной функции  $D(x)$ , зависящей от волновых векторов и спинов частиц начального и конечного каналов реакций и удовлетворяющей условию Т-инвариантности типа:

$$D(\vec{k}_a, \vec{s}_a; \vec{k}_b, \vec{s}_b) = D(-\vec{k}_b, -\vec{s}_b; -\vec{k}_a, -\vec{s}_a). \quad (2)$$

Подтвержден результат работы [2], что найденные механизмы появления большинства из возможных асимметрий с различными Р- и Т-чётностями в реакциях двойного и тройного деления ядер-мишеней холодными нейтронами согласуются с условием Т-инвариантности (2). В то же время обнаружено, что Р – четные, Т-нечётные асимметрии  $(\sigma_n, [\mathbf{k}_3, \mathbf{k}_{LF}])$  и  $(I, [\mathbf{k}_3, \mathbf{k}_{LF}])$ , где  $\mathbf{k}_3$  и  $\mathbf{k}_{LF}$  – волновые вектора третьей частицы и легкого фрагмента, а  $\sigma_n$  и  $I$  – вектора ориентации падающего нейтрона и ядра-мишени, удовлетворяют условию Т-инвариантности (2), только при реализации последовательного механизма вылета из делящегося ядра третьей частицы и фрагментов деления.

Работа поддержана Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания на 2014–2016 гг., проект № 1649.

**Список литературы**

1. Гольдберг М., Ватсон К., Теория столкновений, М.: Мир, 1967.
2. Кадменский С. Г., Кострюков П. В., принято к печати в ЯФ, 2016.





## ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХПРОТОННОГО ВИРТУАЛЬНОГО РАСПАДА ЯДРА Fe-45

С. Г. Кадменский, Ю. В. Иванков,  
Д. Е. Любашевский

Воронежский государственный университет,  
394006, Воронеж, Университетская площадь д. 1,  
тел.: (473) 2208821, e-mail:  
[kadmensky@phys.vsu.ru](mailto:kadmensky@phys.vsu.ru)

## THE PHENOMENOLOGICAL CHARACTERISTICS OF TWO-PROTON VIRTUAL DECAY OF THE NUCLEUS Fe-45

S. G. Kadmensky, Yu. V. Ivankov,  
D. E. Lubashevsky

Voronezh State University, 394006, Voronezh,  
Universitetskaya pl., 1, Russia,  
Phone: (473) 2208821  
e-mail: [kadmensky@phys.vsu.ru](mailto:kadmensky@phys.vsu.ru)

Нормированное угловое распределение  $W(\theta)$  протонов, вылетающих при двухпротонном виртуальном распаде четного по  $Z$  родительского ядра  $(Z, A)$  [1] из основного состояния в основное состояние дочернего ядра  $(Z-2, A-2)$ , для системы координат, ось  $Z$  которой выбрана по направлению вылета одного из протонов, представляется в виде:

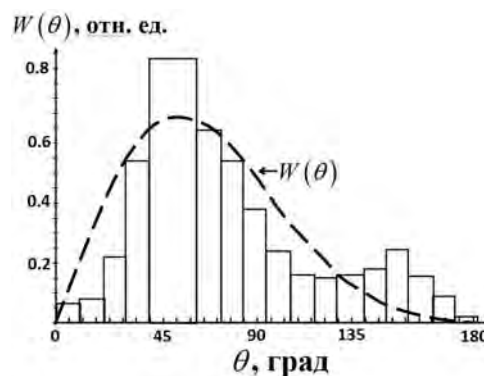
$$W(\theta) = 4\pi\Gamma^{-1} \sin\theta \sum_l a_l a_l Y_{l0}(\theta) Y_{l0}(\theta);$$

$$\Gamma = \sum_l \Gamma_l = \sum_l a_l^2, \quad (1)$$

где  $l$  – орбитальные моменты протонов,  $\theta$  – угол между направлениями вылета двух протонов, а  $\Gamma$  и  $\Gamma_l$  – полная и частичная ширина двухпротонного распада.

Для родительского ядра  $^{45}\text{Fe}$  при учете влияния протон-протонных сверхтекучих корреляций показано [2], что в формуле (1) значимыми оказываются члены с  $l=0$  и 1, соответствующие протонным оболочечным конфигурациям  $2S_{1/2}$  и  $2P_{3/2}$ ,  $2P_{1/2}$ , отвечающим различным четностям, что обеспечивает не-

симметричный характер распределения (1) относительно угла  $\theta = \pi/2$ . Проведен расчет констант  $a_0$ ,  $a_1$  и связанных с ними частичных ширин  $\Gamma_0$  и  $\Gamma_1$  при использовании метода  $-\chi^2$  из условия максимального совпадения экспериментальной ширины двухпротонного распада  $\Gamma^{\text{exp}} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{MeV}$ , а также экспериментального распределения  $W(\theta)^{\text{exp}}$  [3] для ядра  $^{45}\text{Fe}$  с шириной  $\Gamma$  и распределением (1).



Как видно из рисунка распределение  $W(\theta)$  (1) заметно отличается от распределения  $W(\theta)^{\text{exp}}$ , что свидетельствует о необходимости учета взаимодействия между вылетающими протонами. Найденные частичные ширины  $\Gamma_0 = 1,38a$  и  $\Gamma_1 = 0,22a$ , не совпадают с аналогичными усредненными ширинами  $\Gamma_0 = 0,18a$  и  $\Gamma_1 = 2a$ , где  $a = 10^{-19} \text{MeV}$ , рассчитанными в работе [2].

Работа поддержана грантом РФФИ (№ 15-02-03402).

### Список литературы

1. Кадменский С. Г., Иванков Ю. В. // Ядерная физика. 2014. Т. 77. С. 1075.
2. Кадменский С. Г., Иванков Ю. В. Тезисы докладов 66 Международной Конференции Ядро 2016. Саров, 2016.
3. Miernik K. et al. // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 99. P 1925019.



## ФОТОДЕЛЕНИЕ ЯДЕР С УЧЕТОМ WRIGGLING–КОЛЕБАНИЙ ДЕЛЯЩЕГОСЯ ЯДРА

С. Г. Кадменский, Л. В. Титова,  
Д. Е. Любашевский

Воронежский государственный университет,  
394006, Воронеж, Университетская площадь д. 1,  
тел.: (473) 2208821,  
e-mail: [kadmensky@phys.vsu.ru](mailto:kadmensky@phys.vsu.ru)

## PHOTOFISSION OF NUCLEI WITH TAKING INTO ACCOUNT WRIGGLING-VIBRATIONS OF THE FISSIONING NUCLEUS

S. G. Kadmensky, L. V. Titova,  
D.E. Lubashevsky

Voronezh State University, 394006, Voronezh,  
Universitetskaya pl., 1, Russia,  
Phone: (473) 2208821,  
e-mail: [kadmensky@phys.vsu.ru](mailto:kadmensky@phys.vsu.ru)

Формула [1] для относительного углового распределения  $W(\theta)$  фрагментов фотоделения ядер, где угол  $\theta$  отсчитывается от направления падающих фотонов, при использовании результатов работы [2] обобщена при учете отклонения углового распределения фрагментов деления во внутренней системе координат делящегося ядра от дельта – функции, которое обусловлено появлением [3] нулевых wriggling – колебаний составного делящегося ядра в окрестности его точки разрыва и представляется при использовании обозначений работ [1,2] в виде:

$$W(\theta) = \sigma_f(\theta) / \sigma_f(90^\circ) = a + b \sin^2 \theta + c \sin^2(2\theta). \quad (1)$$

Коэффициенты  $a, b, c$  в (1) рассчитываются для проекции  $K$  спина  $J$  составного ядра на его ось симметрии  $K=0$  и выражаются через параметры  $P(J) = \sigma_\gamma(J) \Gamma_f(J) / \Gamma(J)$  для электрических дипольных ( $J=1$ ) и квадрупольных ( $J=2$ ) фотонов и величины  $B_{JL}$  при  $L=0, 2, 4$ :

$$B_{JL} = \frac{2J+1}{4\pi} \sum_{l'} a_l a_{l'} \sqrt{(2l+1)(2l'+1)} \times \quad (2)$$

$$\times \sum_{jL} (-1)^{j+J+L} \frac{\sqrt{2L+1}}{\sqrt{2J+1}} C_{Jl0}^{j0} C_{Jl'0}^{j0} C_{l'00}^{L0} C_{JLM0}^{JM} \begin{Bmatrix} l & j & J \\ J & L & l' \end{Bmatrix}.$$

В (2)  $a_l$  – амплитуда распределения относительных орбитальных моментов  $l$  фрагментов деления при учете wriggling – колебаний делящегося ядра [3]:

$$a_l = \sqrt{l/C_w} \exp(-l^2 / (4C_w)), \quad (3)$$

где параметр  $C_w$  зависит от жесткости и массового параметра для wriggling – колебаний.

Сопоставляя для рассмотренных в работе [2] группы ядер  $^{234}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Pu}$  теоретические и экспериментальные значения величин  $a, b, c$ , полученные из анализа экспериментальных распределений (1), при использовании  $\chi^2$  – метода было найдено оптимальное значение параметра  $C_w = 130$ , приводящее к среднему значению относительного орбитального момента фрагментов деления  $\bar{l} = \sqrt{(\pi/2)C_w} \approx 15$ . Данное значение  $C_w$  согласуется со значением величины  $C_w = 120$ , найденной при описании спиновых распределений фрагментов спонтанного и низкоэнергетического деления тепловыми нейтронами подобных ядер.

Работа поддержана грантом РФФИ (№ 15-02-03402).

### Список литературы

1. Кадменский С. Г., Титова Л. В. Изв. РАН, Сер. Физ. 2005, 69, 703.
2. Bohr A. and Mottelson B., Nuclear Structure (W. A. Benjamin, NY, 1977) V. 2
3. Nix J. R., Swiatecki W. J., Nucl. Phys. 1965. A V. 71, P.1.



**СВОЙСТВА НОВОЙ Т-ЧЁТНОЙ,  
Р-ЧЁТНОЙ АСИММЕТРИИ  
В УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯХ  
ПРОДУКТОВ ТРОЙНОГО ДЕЛЕНИЯ  
ОРИЕНТИРОВАННЫХ ЯДЕР  
ХОЛОДНЫМИ ПОЛЯРИЗОВАННЫМИ  
НЕЙТРОНАМИ**

**С. Г. Кадменский, Л. В. Титова**

Воронежский государственный университет,  
394006, Воронеж, Университетская площадь д. 1,  
тел.: (473) 2208821,  
e-mail: [kadmensky@phys.vsu.ru](mailto:kadmensky@phys.vsu.ru)

**THE PROPERTIES  
OF THE NEW T-EVEN, P-EVEN  
ASYMMETRY IN THE PRODUCTS  
ANGULAR DISTRIBUTIONS  
OF TERNARY FISSION ORIENTED  
NUCLEI BY COLD POLARIZED  
NEUTRONS**

**S. G. Kadmensky, L. V. Titova**

Voronezh State University, 394006, Voronezh,  
Universitetskaya pl., 1, Russia,  
Phone: (473) 2208821 e-mail:  
[kadmensky@phys.vsu.ru](mailto:kadmensky@phys.vsu.ru)

В работе [1] были исследованы коэффициенты Р – нечетных, Т-нечетных асимметрий вида  $([\sigma_n, \mathbf{I}], \mathbf{k}_{LF})$  и  $([\sigma_n, \mathbf{I}], \mathbf{k}_3)$  в сечениях реакций двойного и тройного деления ориентированного ядра – мишени с вектором ориентации  $\mathbf{I}$  холодными поляризованными нейтронами с вектором поляризации  $\sigma_n$ , где  $\mathbf{k}_{LF}$  и  $\mathbf{k}_3$  – волновые вектора легкого фрагмента деления и третьей частицы. Целью настоящей работы является исследование новой Р-чётной, Т-чётной асимметрии вида  $([\sigma_n, \mathbf{I}], [\mathbf{k}_3, \mathbf{k}_{LF}])$  в сечении аналогичной реакции тройного деления. Проведен расчет коэффициента указанной асимметрии для Т – инвариантного гамильтониана ядерной системы при использовании спиновой матрицы плотности составного ядра  $\rho_{MM'}^{J_s J_{s'}}$ , учитывающей интерференцию делительных амплитуд различных пар s-нейтронных резонансов  $sJ_s$  и  $s'J_{s'}$  с одинаковыми и различными значениями их спинов

$J_s \neq J_{s'}$ , где  $J_s, J_{s'} = I \pm 1/2$ , а также методов работ [2], учитывающего кориолисово взаимодействие спина составного делящегося ядра с орбитальными моментами третьей частицы. Показано, что при использовании Т – инвариантного гамильтониана ядерной системы коэффициент  $D$  для исследуемой Р – четной, Т – четной асимметрии, как и в случае исследованных ранее коэффициентов Р – нечетных, Т – нечетных асимметрий [1], обращается в ноль для равных спинов  $J_s = J_{s'}$  интерферирующих резонансов и меняет знак при изменении порядка векторного сложения спинов нейтрона и ядра-мишени. Обнаружено, что при выборе направления оси ориентации  $\mathbf{I}$  ядра-мишени вдоль оси  $Y$  указанные асимметрии возникают только при нечетных значениях  $Q$  – порядка ориентации  $\mathbf{I}$  ядра – мишени и четных значениях  $N$  порядка ориентации составного ядра. Продемонстрировано, что значение коэффициента указанной асимметрии  $D$  требует одновременного учета вкладов значений порядка ориентации ядра – мишени  $Q = 1$  и  $Q = 3$ , если степени ориентации  $P_1(I)$  и  $P_3(I)$  соизмеримы.

Работа поддержана Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания на 2014–2016 гг., проект №1649.

**Список литературы**

1. Кадменский С. Г., Титова Л. В., Бунаков В. Е. Изв. РАН, Сер. Физ., Т. 78, 563(2014)
2. Бунаков В. Е., Кадменский С.Г., ЯФ, Т. 66, 1894(2003)



## ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР НА ТРИ СРАВНИМЫХ ОСКОЛКА И ЭФФЕКТ ВРАЩЕНИЯ

**Ф. Ф. Карпешин**

Всероссийский научно-исследовательский  
Институт метрологии им. Д. И. Менделеева  
E-mail: [fkarpeshin@gmail.com](mailto:fkarpeshin@gmail.com)

Под тройным делением обычно понимается деление ядра на два осколка, сопровождаемое эмиссией третьей легкой заряженной частицы, обычно альфа-частицы. Долгое время считалось, что при низких энергиях возбуждения ядра, не превышающих десятков МэВ, деление на три сравнимых осколка крайне маловероятно. Только сравнительно недавно получила распространение идея коллинеарного деления на три осколка. Целенаправленные поиски этой моды привели к экспериментальным значениям относительной вероятности порядка  $10^{-4}$  по сравнению с бинарным делением. Это возрождает давний интерес к вопросу.

Обычно рассматривают два механизма, которые могут реализовать данный вид деления. Один из них, на первый взгляд, очевиден: это последовательное деление ядра, сначала на два осколка, один из которых в свою очередь делится на два других. Оба события можно рассматривать происходящими случайным образом, независимо друг от друга. Другой механизм принято называть истинно тройным делением. Впрочем, долгое время этот механизм не конкретизировался. В работе [1] показано, что этот вид можно связать с соответствующей модой входных состояний. В докладе показано, что данный механизм вызывается гексадекапольной деформацией делящегося ядра, в отличие от бинарного деления, которое связано с квадрупольными колебаниями поверхности. Получены оценки на массовые отношения осколков. Показана динамика формирования и разлета коллинеарных осколков. Вычисленная вероятность истинно тройного деления  $P_{3f} \approx 10^{-4}$  соответствует наблюдаемым значениям.

Выполнены траекторные расчеты эффекта вращения оси делящегося ядра. Они позволяют исключить конфигурацию «легкий осколок в центре». Для конфигурации «тяжелый осколок в центре» угол смещения получается на уровне 0.2 градуса на единицу углового момента.

## Список литературы

1. Ф. Ф. Карпешин. Деление ядер на три сравнимых осколка. ЯФ, 2015, том 78, с. 1.



## TRUE TERNARY FISSION AND THE ROT EFFECT

**F. F. Karpeshin**

D.I. Mendeleev Institute for Metrology  
E-mail: [fkarpeshin@gmail.com](mailto:fkarpeshin@gmail.com)

Ternary fission is usually understood as nuclear fission into two normal fragments accompanied with emission of the third light charged particle, usually alpha particles. Long time it was considered that at low energies of the fissile nuclei under tens MEV, division into three comparable fragments is extremely improbable. Only rather recently, the idea of collinear fission into three fragments gained distribution. Purposeful searches of this mode resulted in experimental values of relative probability about  $10^{-4}$  in comparison with binary fission [1]. This revives old interest in the question.

Usually two mechanisms are considered which can realize this type of fission. One of them is, at first sight, obvious: this consecutive nuclear fission, at first on two fragments, one of which in turn undergoes fission into two others. Both events can be considered as occurring in a random way, independently from each other. The other mechanism is usually called the true ternary fission. However, for a long time this mechanism was not concretized. In Ref. [1] it is shown that this mode can be related with the corresponding doorway states of the hexadecapole prefission vibration. Estimation of the mass ratio is obtained as 1 : 1.87 : 1, in excellent agreement with experiment.

Results of performed trajectory calculations of the effect of the rotation of the fission axis allow to exclude configurations of type "light fragment in the center". In the case of configuration "heavy fragment in the center" calculated ROT effect turns out to be approximately 0.2 degrees per unit of angular momentum.

## References

1. F. F. Karpeshin. Ternary Fission of Nuclei into Comparable Fragments. Phys. At. Nucl., 2015, Vol. 78, p. 548.



## УЧЕТ ЭФФЕКТА ЭЛЕКТРОННОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ В ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ

Ф. Ф. Карпешин<sup>1</sup>, М. Б. Тржасковская<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский Институт метрологии им. Д. И. Менделеева

<sup>2</sup>Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова

E-mail: [fkarpeshin@gmail.com](mailto:fkarpeshin@gmail.com)

Исследуются важные особенности влияния электронной оболочки на  $\alpha$ -распад и реакции термоядерного синтеза. Предложен совершенно новый – адиабатический подход [1–3] вместо применявшегося в течение более пятидесяти лет приближения «замороженной» электронной оболочки. Показано, что последняя модель не учитывает электронных корреляций. В результате вычисленный в ее рамках эффект закономерно оказывается даже неверного знака.

Таблица. Относительное изменение полупериодов альфа-распада в голых ядрах по сравнению с обычными атомами  $Y$  (в процентах).

Ядро	$Q$ (МэВ)	$T_{1/2}$	$Y$ (%)
<sup>144</sup> Nd	1.905	$2.29 \times 10^{15}$ лет	0.24
<sup>214</sup> Rn	9.208	0.27 мкс	0.02
<sup>226</sup> Ra	4.871	1600 лет	0.23
<sup>252</sup> Cf	6.217	2.645 лет	0.28
<sup>241</sup> Es	8.320	9 с	0.12
<sup>294</sup> 118	11.81	0.89 мс	0.27

Результаты расчета изменения скорости распада в голых ядрах относительно нейтральных атомов представлены в таблице. Величина эффекта составляет десятые доли процента и меньше, в зависимости от энергии перехода и атомного номера. Показана доминирующая роль внутренних оболочек: более 80 % эффекта объяснены 1s-электронами. Это обстоятельство играет

решающую роль для эксперимента, позволяя проводить измерения малого эффекта разностным методом в одних и тех же накопительных кольцах, сравнивая, например, вероятности распада в голых ядрах и гелиеподобных ионах.

Предлагается также интересный эксперимент по изучению зарядовых состояний  $\alpha$ -частицы. Он даст уникальную информацию для тестирования наших представлений о соотношении и взаимной динамике адиабатических процессов и внезапных процессов типа встряски.

## Список литературы

1. Karpeshin F. F., Phys. Rev. C 2013, 87, 054319.

2. Karpeshin F. F., Trzhaskovskaya M.B.. In: Exotic Nuclei. Proc. 1-st Int. African Symp., Cape-Town, South Africa, 2-6 December 2013. World Scientific: 2014, P. 201.

3. Карпешин Ф. Ф., Тржасковская М. Б., ЯФ, 2015. Т. 78. С. 903.



## EFFECT OF THE ELECTRON SCREENING ON NUCLEAR REACTIONS

F. F. Karpeshin<sup>1</sup>, M. B. Trzhaskovskaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>D. I. Mendeleev Institute for Metrology;

<sup>2</sup>PNPI Kurchatov center

E-mail: [fkarpeshin@gmail.com](mailto:fkarpeshin@gmail.com)

Effect of the electron screening is considered on the rate of the alpha decay and thermonuclear reactions which take place in stellar plasma, at laboratory or in industry.

To this end, the adiabatic approach is exploited, which consecutively takes into account the adiabaticity of the motion of the alpha particle through the shells [1-3]. This approach is new in principle. It comes instead of the frozen electron shell approximation, which was applied for fifty years, giving the wrong size of the effect though.

The results of the calculation are presented in the Table. The effect is found to be of the order of



one tenth to one hundredth of a percent for the considered representative nuclei.

80 % of the effect is due to the K-shell electrons. The effect is expected to be much stronger in the nuclear reactions at small energies, ~30 keV and lower.

TABLE . The results for the relative change  $Y$  in half-periods in bare nuclides as compared to the neutral atoms, percent.

Nuclide	$Q$ (MeV)	$T_{1/2}$	$Y$ (%)
$^{144}\text{Nd}$	1.905	$2.29 \times 10^{15}$ yr	0.24
$^{214}\text{Rn}$	9.208	0.27 $\mu\text{s}$	0.02
$^{226}\text{Ra}$	4.871	1600 yr	0.23
$^{252}\text{Cf}$	6.217	2.645 yr	0.28
$^{241}\text{Es}$	8.320	9 s	0.12
$^{294}118$	11.81	0.89 ms	0.27

### References

1. F. F. Karpeshin, Phys. Rev. C 2013, **87**, 054319.
2. F. F. Karpeshin, M.B.Trzhaskovskaya. In: Exotic Nuclei. Proc. 1-st Int. African Symp., Cape-Town, South Africa, 2-6 December 2013. World Scientific: 2014, P. 201.
3. F. F. Karpeshin, M.B.Trzhaskovskaya. Phys. At. Nucl., 2015. Vol. 78. P. 903.



## ЗАВИСИМОСТЬ ПРОТЯЖЁННОСТИ НЕЙТРОННОГО ГАЛО ЯДРА ОТ АТОМНОГО ВЕСА ИЗ АНАЛИЗА СЕЧЕНИЙ РАДИАЦИОННОГО ЗАХВАТА ПРОТОНОВ

**М. В. Косов**

ФГУП «ВНИИ автоматики им. Н.Л. Духова»,

Радиационный захват протона – важная реакция нуклеосинтеза, идущая с выделением энергии [1, 2]. С этой реакцией связан синтез таких протон-избыточных изотопов как  $^{56}\text{Ni}$ ,  $^{60}\text{Zn}$ ,  $^{64}\text{Ge}$ ,  $^{68}\text{Se}$ ,  $^{74}\text{Se}$ ,  $^{78}\text{Kr}$ ,  $^{84}\text{Sr}$ ,  $^{92,94}\text{Mo}$ ,  $^{96,98}\text{Ru}$ ,  $^{138}\text{La}$ ,  $^{180}\text{Ta}$ . Конечной точкой р-синтеза считается  $^{107}\text{Te}$ . Для синтеза  $^{138}\text{La}$  и  $^{180}\text{Ta}$  была предложена экзотическая теория ню-процессов [3]. Протонный синтез по сравнению с нейтронным

синтезом затруднён кулоновским барьером, и сечение уменьшается соответствующим фактором Гамова [4, 5]. Обычно фактор Гамова используется в нулевом порядке, то есть в предположении точечного ядра. Фактор Гамова в нулевом приближении позволяет представить быстро падающие с энергией сечения в виде слабо меняющихся астрофизических S-факторов. Однако радиационный захват протонов на тяжёлых ядрах отчётливо указывает на экспоненциальное падение S-фактора с увеличением энергии. Это экспоненциальное падение можно интерпретировать как следствие конечного эффективного радиуса ядра в факторе Гамова, разложенного до второго порядка по отношению радиуса ядра к радиусу точки поворота. Большой эффективный радиус фактора Гамова может быть объяснён вытянутым радиальным распределением нейтронного гало, поскольку удалённые нейтроны могут захватывать протоны на большом расстоянии от ядра.

Представлена безмодельная аппроксимация энергетической зависимости сечений радиационного захвата протонов для 78 ядер от  $^2\text{H}$  до  $^{232}\text{Th}$ . Помимо экспоненциальной амплитуды фактора Гамова использовался один дополнительный резонанс. Для изотопов до  $^{27}\text{Al}$  резонанс совпадает с одним из известных уровней возбуждения, а для более тяжёлых ядер варьировалась ширина и положение коллективного резонанса. Дополнительными варьируемыми параметрами были относительная сила и относительная фаза главного резонанса, а также общий нормировочный коэффициент. Таким образом, сечения лёгких ядер безмодельно подгонялись четырьмя параметрами, а тяжёлых – шестью. В области Ni и Mo было обнаружено аномальное увеличение эффективного радиуса Гамова на порядок величины по сравнению с величиной радиуса половинной плотности  $1,1 \cdot A^{1/3}$  ферми. Для других ядер эффективный радиус Гамова близок к радиусу половинной плотности. В тех же областях (около Ni и Mo) резонанс конструктивно интерферирует с экспонентой Гамова. Обнаруженное аномально протяжённое нейтронное гало может привести к аномальному увеличению вероятности обмена связанным нейтроном при низких энергиях между соответствующими аномальными тяжёлыми ядрами с большой энергией связи нейтрона и лёгким ядром с малой энергией связи нейтрона. При низких температурах вероятность реакции нейтронного обмена должна расти с увеличением плотности смеси изотопов.

Обнаруженный эффект требует развития теории формирования аномального нейтронного гало в ядрах и теории обмена связанными нейтронами при низких энергиях в условиях протяжённого нейтронного гало в тяжёлом ядре.

### Литература

1. Burbidge E. M. *et al.*, Synthesis of the Elements in Stars, Rev. Mod. Phys. 1957. 29, 574.
2. Truran J. W., Cameron A. G. W. The *p*-processes in Explosive Nucleosynthesis, Astrophysical J. 171, 89 (1972).
3. Woosley S. E. *et al.*, The nu-processes, Astrophysical J. 356, 272 (1990).
4. Gamow G. Zeit. Phys. 51, 204 (1928)
5. Fadin V., Khoze V. Soviet. Jour. Nucl. Phys. 1988. 48, 487.



## ATOMIC NUMBER DEPENDENCE OF NEUTRON HALO EXTENSION FROM ANALYSIS OF PROTON RADIATIVE CAPTURE CROSS SECTIONS

M. V. Kosov

Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA).  
Moscow, Russia

Nuclear radiative capture of protons is an important exothermal reaction of the stellar nuclear synthesis [1,2]. This reaction can help to solve a problem of synthesis of such proton reach isotopes as  $^{56}\text{Ni}$ ,  $^{60}\text{Zn}$ ,  $^{64}\text{Ge}$ ,  $^{68}\text{Se}$ ,  $^{74}\text{Se}$ ,  $^{78}\text{Kr}$ ,  $^{84}\text{Sr}$ ,  $^{92,94}\text{Mo}$ ,  $^{96,98}\text{Ru}$ ,  $^{138}\text{La}$ ,  $^{180}\text{Ta}$ . The final pint of the *p*-synthesis is believed to be  $^{107}\text{Te}$ . For synthesis of  $^{138}\text{La}$  and  $^{180}\text{Ta}$  an exotic model of nu-processes was proposed [3]. The proton induced nuclear synthesis in comparison to the neutron induced nuclear synthesis is suppressed by a Coulomb barrier, and the cross-section is reduced by the corresponding Gamow factor [4,5]. Usually the Gamow factor is used in a zero approximation, assuming a point like nucleus. The zero approximation of the Gamow factor converts a sharp energy dependence of cross-sections to a smooth energy dependence of the astrophysical S-factors. But the radiative capture of

protons on heavy nuclei clearly demonstrates the exponential energy dependence of the S-factor. The exponential dependence can be interpreted as a consequence of the finite effective nuclear radius in the second-order expansion of the Gamow factor with respect to the ratio of the effective nuclear radius to the radius of the turning point. The large effective radius of the Gamow factor can be explained by an extended radial distribution of the neutron halo, as the remote neutrons can capture protons on big distances from the nucleus.

Approximation of the energy dependence of the proton radiative capture cross-sections for 78 nuclei from  $^2\text{H}$  to  $^{232}\text{Th}$  is presented. In addition to the exponential amplitude of the Gamow factor one resonance was used. For isotopes lighter than  $^{27}\text{Al}$  the resonance coincides with one of the known excitation levels and for heavier nuclei the width and the energy of the collective resonance was varied. Additional parameters are the relative strength and the relative phase of the resonance and the overall normalization factor. As a result the model-free approximation for the light nuclei cross sections required four parameters, and for heavy nuclei it required six parameters. In the region of Ni and Mo the anomalous effective radius of the Gamow factor, an order of magnitude higher than the half density radius  $1.1 \cdot A^{1/3}$  fermi, was found. For other nuclei the effective radius of the Gamow factor is close to the half density radius. In the same regions (near Ni and Mo) the constructively interference of the resonance with the Gamow exponent was found. The discovered anomalous expansion of the neutron halo can lead to anomalous increase of probability of a bound neutron exchange between heavy nuclei with large neutron binding energy and light nuclei with small neutron binding energy. At low temperatures the probability of the neutron exchange should increase with increase of density of the isotope mixture.

The discovered effect requires development of a theory of the expanded neutron halo formation and a theory of the bound neutron exchange at low energies, when the neutron halo in the heavy nucleus is anomalously expanded.

### References

1. E.M. Burbidge *et al.*, Synthesis of the Elements in Stars, Rev. Mod. Phys. 1957. 29, 574.
2. J.W. Truran, A.G.W. Cameron, The *p*-processes in Explosive Nucleosynthesis, Astrophysical J. 171, 89 (1972).

3. S.E. Woosley et al., The nu-processes, *Astrophysical J.* 356, 272 (1990).
4. G. Gamow, *Zeit. Phys.* 51, 204 (1928)
5. V. Fadin, V. Khoze, *Soviet. Jour. Nucl. Phys.* 48, 487 (1988).



### ОКОЛОБАРЬЕРНЫЕ ПЕРЕДАЧИ НЕЙТРОНА В РЕАКЦИЯХ ${}^6\text{He} + {}^{45}\text{Sc}, {}^{197}\text{Au}, {}^{64}\text{Zn}$

**М. А. Науменко, В. В. Самарин,  
Ю. Э. Пенионжкевич, Н. К. Скобелев**

Объединенный институт ядерных исследований,  
ул. Жолио-Кюри, 6, г. Дубна,  
Московская обл., Россия, 141980  
Телефон: (7-49621) 62-023,  
Телефакс: (7-49621) 28-933  
Эл. почта: [anaumenko@jinr.ru](mailto:anaumenko@jinr.ru)

Проведено исследование экспериментальных сечений образования изотопов  ${}^{44,46}\text{Sc}$  в реакции  ${}^6\text{He} + {}^{45}\text{Sc}$  [1],  ${}^{196,198}\text{Au}$  в реакции  ${}^6\text{He} + {}^{197}\text{Au}$  [2, 3] и  ${}^{65}\text{Zn}$  в реакции  ${}^6\text{He} + {}^{64}\text{Zn}$  [4]. Для расчета вероятности передачи нейтронов и сечений передачи численно решалось время-зависимое уравнение Шредингера (TDSE) [5, 6] для внешних нейтронов ядер  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^{45}\text{Sc}$  и  ${}^{197}\text{Au}$ . В случае реакции  ${}^6\text{He} + {}^{197}\text{Au}$  вкладом слияния и последующего испарения в экспериментальные данные можно пренебречь, тогда как в случае реакции  ${}^6\text{He} + {}^{45}\text{Sc}$ , данный вклад достаточно велик. Слияние-испарение было учтено с использованием испарительного кода NRV [7]. Результаты расчетов показывают в целом удовлетворительное согласие с экспериментальными данными. Используемая реализация метода TDSE также может быть применена для расчета реакций с кластерными ядрами.

#### Список литературы

1. Skobelev N.K. et al. // *J. Phys. G.* 2011. V. 38. P. 035106.
2. Penionzhkevich Yu. E. et al. // *Eur. Phys. J. A.* 2007. V. 31. P. 185.

3. Kulko A. A. et al. // *J. Phys. G.* 2007. V. 34. P. 2297.
4. Scuderi V. et al. // *Phys. Rev. C.* 2011. V. 84. P. 064604.
5. Samarina V. V. and Samarina K.V. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2012. V. 76. P. 450.
6. Samarina V. V. // *Phys. of Atom. Nucl.* 2015. V. 78. P. 128.
7. [http://nrv.jinr.ru/nrv/webnrv/evaporation\\_residue\\_theory/dialog.php](http://nrv.jinr.ru/nrv/webnrv/evaporation_residue_theory/dialog.php)



### NEAR-BARRIER NEUTRON TRANSFER IN REACTIONS ${}^6\text{He} + {}^{45}\text{Sc}, {}^{197}\text{Au}, {}^{64}\text{Zn}$

**M. A. Naumenko, V. V. Samarina,  
Yu. E. Penionzhkevich, N. K. Skobelev**

Joint Institute for Nuclear Research  
Joliot-Curie, 6, Dubna, Moscow region,  
Russia, 141980  
Phone: (7-49621) 62-023,  
Telefax: (7-49621) 28-933  
E-mail: [anaumenko@jinr.ru](mailto:anaumenko@jinr.ru)

Experimental cross sections for formation of isotopes  ${}^{44,46}\text{Sc}$  in reaction  ${}^6\text{He} + {}^{45}\text{Sc}$  [1],  ${}^{196,198}\text{Au}$  in reaction  ${}^6\text{He} + {}^{197}\text{Au}$  [2, 3] and  ${}^{65}\text{Zn}$  in reaction  ${}^6\text{He} + {}^{64}\text{Zn}$  [4] have been analyzed. To calculate the probabilities of neutron transfer and transfer cross sections the time-dependent Schrödinger equation (TDSE) [5, 6] for external neutrons of  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^{45}\text{Sc}$  and  ${}^{197}\text{Au}$  nuclei has been solved numerically. The contribution of fusion and subsequent evaporation to the experimental data is negligible in the case of  ${}^6\text{He} + {}^{197}\text{Au}$  reaction, whereas in the case of  ${}^6\text{He} + {}^{45}\text{Sc}$  reaction, it is quite large. The fusion-evaporation was taken into account using the NRV evaporation code [7]. Results of calculation demonstrate overall satisfactory agreement with the experimental data. The used realization of the TDSE method may also be applied for calculation of reactions with cluster nuclei.

#### References

1. N.K. Skobelev et al. // *J. Phys. G.* 2011. V. 38. P. 035106.



2. Yu.E. Penionzhkevich et al. // Eur. Phys. J. A. 2007. V. 31. P. 185.
3. A.A. Kulko et al. // J. Phys. G. 2007. V. 34. P. 2297.
4. V. Scuderi et al. // Phys. Rev. C. 2011. V. 84. P. 064604.
5. V.V. Samarin and K.V. Samarin // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2012. V. 76. P. 450.
6. V.V.Samarin // Phys. of Atom. Nucl. 2015. V. 78. P. 128.
7. [http://nrv.jinr.ru/nrv/webnrv/evaporation\\_residue\\_theory/dialog.php](http://nrv.jinr.ru/nrv/webnrv/evaporation_residue_theory/dialog.php)



**ОБ УНИВЕРСАЛЬНОСТИ  
В ТРЁХЧАСТИЧНОМ РАССЕЙАНИИ:  
СЛУЧАЙ НЕТОЖДЕСТВЕННЫХ  
ЧАСТИЦ**

**В.А. Руднев**

Кафедра Вычислительной Физики,  
Санкт-Петербургский государственный  
Университет, Россия, 199034, Санкт-Петербург,  
Университетская наб. д.7-9.  
E-mail: [v.roudnev@gmail.com](mailto:v.roudnev@gmail.com)

Линейное соотношение между длиной рассеяния нейтрона на дейтроне и энергией связанного состояния тритона известно как Линия Филлипса [1]. Ефимов и Ткаченко указали на связь между этим соотношением и режимом взаимодействия в системе трёх нуклонов, близком к универсальному [2]. Автором было предложено обобщение результата Ефимова и Ткаченко для трёх тождественных бозонов [3]: двух- и трёх- частичные наблюдаемые в универсальном режиме сильно скоррелированы и следуют простому соотношению, не зависящему от формы взаимодействия.

В настоящем докладе мы представляем новые результаты, касающиеся подобных универсальных соотношений для двух тождественных и одной отличающейся частиц. Исследуются случаи, когда взаимодействие приближается к универсальному в одной и двух парах частиц.

**Список литературы**

1. Phillips A. C. // Nucl. Phys. A. 1968. V. 107. P. 209.
2. Vitaly Efimov and E. G. Tkachenko // Phys. Lett. 1985. V.157B. P.10
3. Vladimir Roudnev and Michael Cavagnero // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. P. 110402



**ON UNIVERSALITY IN THREE-BODY  
SCATTERING: THE CASE  
OF NONIDENTICAL PARTICLES**

**V. A. Roudnev**

Department of Computational Physics, St-  
Petersburg State University, Russia  
E-mail: [v.roudnev@gmail.com](mailto:v.roudnev@gmail.com)

The linear correlation between the neutron-deuteron scattering length and the triton bound state energy is known as the Phillips line<sup>1</sup>. Efimov and Tkachenko have suggested that this correlation is related to nearly universal interaction regime in the three-nucleon system<sup>2</sup>. A generalization of the Efimov and Tkachenko result for three identical bosons has been proposed by the author<sup>3</sup>: the two- and three-body observables in the universal regime are strongly correlated and follow a simple interaction-independent relationship.

In this talk we present new results on similar type of universal relationship for two identical and one distinctive particles. The cases of one and two pairs approaching the universal interaction regime are considered.

**References**

1. Phillips A. C. // Nucl. Phys. A. 1968. V. 107. P. 209.
2. Vitaly Efimov and E. G. Tkachenko // Phys. Lett. 1985. V. 157B. P. 10
3. Vladimir Roudnev and Michael Cavagnero // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. P. 110402.

## НЕУПРУГОЕ РАССЕЙЯНИЕ НЕЙТРИНО НА ЯДРАХ

**С. В. Семенов**

Национальный исследовательский центр  
«Курчатовский институт»  
123182, г. Москва, пл. Курчатова, 1

Проведен расчет сечения неупругого взаимодействия нейтрино с рядом нейтроноизбыточных ядер. Исследование этих, обусловленных нейтральным током, процессов имеет важное значение для изучения явлений, происходящих при взрыве Сверхновых звезд и для создания детекторов нейтрино астрофизического происхождения. Вычисления сечения неупругого рассеяния нейтрино проводятся модельно независимым путем, основываясь на экспериментальных данных о ядерной структуре. Значения матричных элементов рассматриваемых реакций определяются из характеристик электромагнитных дипольных  $M1$ -переходов в ядрах, полученных методом ядерной резонансной флуоресценции.

Работа поддержана грантами РФФИ офи-м 14-22-03037, 14-22-03040.

data on nuclear structure. The values of matrix elements of reactions under examination are derived from the characteristics of electromagnetic dipole  $M1$ -transitions in nuclei, obtained by the nuclear resonance fluorescence method.

The work is supported by the RFBR grants of 14-22-03037, 14-22-03040.



## МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ МНОГОКАНАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЕМИНУКЛОННОЙ ЯДЕРНОЙ СИСТЕМЫ ${}^6\text{Li} + n$ ПРИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ

**А. С. Соловьев, С. Ю. Игашов**

Всероссийский научно-исследовательский  
институт автоматики им. Н. Л. Духова  
Россия, 127055, Москва, ул. Суцеская, д. 22  
Телефон: +7 (499) 978-7803;  
Факс: +7 (499) 978-0903;  
E-mail: alexander.solovyev@mail.ru

Разработан микроскопический подход к описанию реакций перестройки, включая реакции с ядрами  $p$ -оболочки, на основе многоканальной алгебраической версии модели резонирующих групп (АВМРГ) [1, 2]. В качестве примера, демонстрирующего возможности предложенного подхода, рассмотрена семинуклонная ядерная система  ${}^6\text{Li} + n$  при низких энергиях. Вычислены парциальные и полное сечения реакции  ${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$ , играющей важную роль в практических приложениях как источник трития и представляющей интерес для ядерной астрофизики как зеркальный процесс к реакции  ${}^6\text{Li}(p, \alpha){}^3\text{He}$ . Проанализирован вклад различных парциальных амплитуд в энергетическую зависимость полного сечения рассматриваемой реакции. Результаты расчетов находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными [3].

### Список литературы

1. Филиппов Г. Ф., Охрименко И. П. О возможности использования осцилляторного базиса



## NEUTRINO INELASTIC SCATTERING ON NUCLEI

**S. V. Semenov**

National Investigation Centre  
«Kurchatov Institute», Moscow, Russia,  
123182, Kurchatov Sq. , 1, Moscow, Russia

Calculations of cross section of neutrino inelastic interaction with a number of neutron-excessive nuclei have been performed. Consideration of these processes, determined by the neutral current, is essential for the investigations of phenomena, taking place in the time of Supernovae explosion and for construction of astrophysical neutrino detectors. Computations are produced by the model-independent way and are based on the experimental

для решения задач непрерывного спектра // Ядерная физика. 1980. Т. 32. С. 932–939.

2. Игашов С. Ю. Исследование процессов рассеяния и реакций в системе  ${}^6\text{Li} + n$  // Известия РАН. Серия физическая. 2001. Т. 65. С. 756–760.

3. Knox H. D., Resler D. A. and Lane R. O. Reactions leading to the  ${}^7\text{Li}$  and  ${}^8\text{Li}$  systems: shell model and  $R$ -matrix calculations // Nuclear Physics A. 1987. Vol. 466. P. 245–279.

Russian Academy of Sciences. Physics. 2001. Vol. 65. P. 817–822.

3. Knox H. D., Resler D. A. and Lane R. O. Reactions leading to the  ${}^7\text{Li}$  and  ${}^8\text{Li}$  systems: shell model and  $R$ -matrix calculations // Nuclear Physics A. 1987. Vol. 466. P. 245–279.



### MICROSCOPIC MANY-CHANNEL INVESTIGATION OF SEVEN-NUCLEON NUCLEAR SYSTEM ${}^6\text{Li} + n$ AT LOW ENERGIES

A. S. Solovyev, S. Yu. Igashov

Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA)  
22, ul. Sushchevskaya, Moscow 127055, Russia  
Phone: +7 (499) 978-7803; Fax: +7 (499) 978-0903;  
E-mail: alexander.solovyev@mail.ru

Microscopic approach based on the algebraic version of the resonating group model [1, 2] to description of transfer reactions including ones with  $p$ -shell nuclei is developed. Seven-nucleon nuclear system  ${}^6\text{Li} + n$  at low energies is adopted as an example for demonstration of the approach possibilities. Partial and total cross sections for the  ${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$  reaction playing an important role in practical applications as the source of tritium and representing interest for nuclear astrophysics as the mirror process for the  ${}^6\text{Li}(p, \alpha){}^3\text{He}$  reaction are calculated. The contributions of the partial cross sections to the energy dependence of the total cross section are considered. The results are in good agreement with the experimental data [3].

#### References

1. Filippov G.F., Okhrimenko I.P. On a possibility to use the oscillator basis for solution of problems in continuous spectrum // Soviet Journal of Nuclear Physics. 1980. Vol. 32. P. 480–487.

2. Igashov S. Yu. Investigation of scattering and reactions in the  ${}^6\text{Li} + n$  system // Bulletin of the

### РОЛЬ МЕХАНИЗМА $\Delta$ -ИЗОБАРЫ В РЕАКЦИИ $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$

Ю. Н. Узиков

Объединенный институт ядерных исследований  
Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6, Московская обл.,  
Россия, 141980. [uzikov@jinr.ru](mailto:uzikov@jinr.ru)

Резонансная структура, наблюдаемая в полном сечении реакции  $pp \rightarrow d\pi$  с максимумом при 600 МэВ, была объяснена механизмом возбуждения  $\Delta$ -изобары в промежуточном состоянии [1]. Недавно проведен новый анализ [2], показавший, что одного  $\Delta$ -механизма недостаточно для объяснения абсолютной величины полного сечения реакции  $pp \rightarrow d\pi$ , и поэтому в [2] был рассмотрен вклад дибарионов [2]. В этой ситуации важно исследовать другой канал этой реакции,  $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi$ , при аналогичных кинематических условиях, но с образованием дипротона  $\{pp\}_s$  в конечном состоянии с небольшой энергией возбуждения  $E_{pp} < 3$  МэВ, что обеспечивает доминирование состояния  $1S0$ . Из-за различия спина  $S$  и изоспина  $T$  дейтрона ( $S=1, T=0$ ) и дипротона ( $S=0, T=1$ ) реакция  $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi$  представляет собой независимый тест различных моделей реакции  $pp \rightarrow d\pi$ .

Согласно работе [3], подход [1] совершенно не годится для описания данных о реакции  $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi$ , полученных ANKE@COSY [4]. Простая модель, основанная на треугольной диаграмме одно-пионного обмена с подпроцессом  $\pi N \rightarrow \pi N$ , оказалась более успешной [5]. В данной работе реакция  $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$  исследуется на основе одно-петлевой диаграммы с подпроцессом  $\pi^0 p \rightarrow \Delta \rightarrow \pi^0 p$ . Параметры для констант связи и вершинных формфакторов, которые бы-

ли использованы нами для объяснения данных COSY о реакции перезарядки  $dp \rightarrow \{pp\}s\pi N$  [6], используются и в этой работе. Результаты расчета энергетической зависимости дифференциального сечения под нулевым углом вылета дипротона находятся в качественном согласии с формой этой зависимости при энергии протонного пучка 350–800 MeV. Однако абсолютная величина сечения ниже данных в 4–5 раз, если учитывается сход вершинного формфактора  $\pi N\Delta$  с массовой оболочкой. Если пренебречь этими эффектами, то недооценка данных по абсолютной величине составляет приблизительно 30 %. Аналогичное расхождение получено здесь при использовании вершинных формфакторов из работы [2].

### Список литературы

1. Niskanen J. A. Phys. Lett. 141B, 301 (1984).
2. Platonova M.N., Kukulín V. I. Nucl. Phys. A 946, 117 (2016).
3. Niskanen J. A., Phys. Lett. B 642, 34 (2006).
4. Kurbatov V. et al., Phys. Lett. B 661, 22 (2008).
5. Uzikov Yu. N., arXiv:0812.4661 [nucl-th].
6. Uzikov Yu. N., Haidenbauer J., Wilkin C. PoS (Baldin ISHEPP XXII) 093 (arXiv:1502.04675 [nucl-th]).



## ROLE OF THE $\Delta$ -ISOBAR MECHANISM IN THE REACTION $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$

Yu. N. Uzikov

Joint Institute for Nuclear Researches  
Dubna, Joliot-Curie 6, Moscow reg., Russian  
Federation 141980, uzikov@jinr.ru

The resonance structure observed in the total cross section of the reaction  $pp \rightarrow d\pi$  with the maximum at about 600 MeV was explained by the  $\Delta$ -isobar excitation in the intermediate state [1]. Recently new analysis was performed [2] showing, however, that the pure  $\Delta$ -mechanism is not sufficient to explain the absolute value of the total cross section of the reaction  $pp \rightarrow d\pi$  and therefore dibaryon contributions were considered in [2]. In this situation it is important to study another channel of this reaction,  $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi$ , at similar kinematics conditions but with formation of the diproton  $\{pp\}_s$  in the final state with small excitation energy  $E_{pp} < 3$  MeV providing a dominance of the  $1S_0$  state. Due to difference of the spin  $S$  and isospin  $T$  of the deuteron ( $S=1, T=0$ ) and diproton ( $S=0, T=1$ ) the reaction  $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi$  provides an independent test for the different models of the reaction  $pp \rightarrow d\pi$ .

According to [3], the approach [1] completely fails to describe the data on the reaction  $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi$  obtained by ANKE@COSY [4]. A simpler model based on the triangle diagram of the one-pion exchange with the subprocess  $\pi N \rightarrow \pi N$  turned out to be more successful [5]. In this work we study the reaction  $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$  using one-loop diagrams with the subprocess  $\pi^0 p \rightarrow \Delta \rightarrow \pi^0 p$ . The parameters for the coupling constants and vertex form factors which were used to explain the COSY data on the reaction  $dp \rightarrow \{pp\}_s \pi N$  [6], are applied here. The calculated energy dependence of the differential cross section at zero angle of the pion is in qualitative agreement in shape with the data at energy 350–800 MeV. However, its absolute value is by factor of 4–5 below the data if the off-shell behavior of the vertex  $\pi N\Delta$  form factor is taken into account. When the off-shell effects are in part neglected, the data is still underestimated by 30%. A similar underestimation is obtained here using the vertex form factors from Ref.[2].

### References

1. J.A. Niskanen, Phys. Lett. 141B, 301 (1984)

2. Platonova M. N., Kukulkin V. I. Nucl. Phys. A 2016. 946, 117.
3. Niskanen J. A. Phys. Lett. B 642, 34 (2006).
4. Kurbatov V. et al., Phys. Lett. B 2008. 661, 22.
5. Yu. N. Uzikov, arXiv:0812.4661 [nucl-th].
6. Yu.N. Uzikov, J. Haidenbauer, C. Wilkin, PoS (Baldin ISHEPP XXII) 093 (arXiv:1502.04675 [nucl-th]).



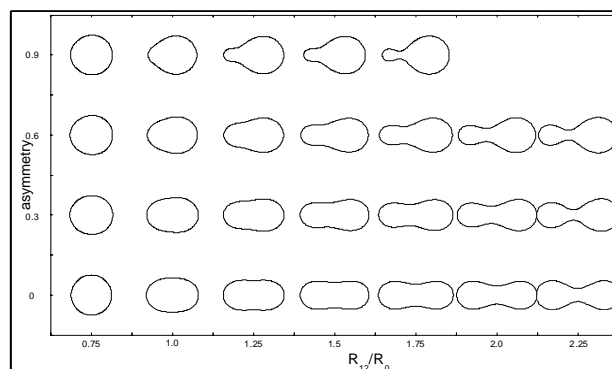
## ЭФФЕКТЫ КЛАСТЕРИЗАЦИИ В МУЛЬТИМОДАЛЬНОМ ДЕЛЕНИИ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР

А. В. Унжакова

Санкт-Петербургский государственный  
университет, Санкт-Петербург, Россия  
198504 Старый Петергоф, ул. Ульяновская 3.  
Tel./fax 812 428 72 00  
E-mail: a.unzhakova@spbu.ru

В последних теоретических исследованиях влияния кластеризации на структуру сильнодеформированных тяжелых ядер [1,2,3] было показано, что именно свойства кластеров играют главную роль в характеристиках процессов деления [4,5] и слияния. Теоретическое описание процессов альфа-распада и кластерной радиоактивности в рамках модели ди-нуклеарной системы было дано в [1]. Влияние кластеризации на структуру тяжелых ядер в области актиноидов рассматривалось в [2]. Процесс слияния в рамках модели ди-нуклеарной системы был успешно описан в [3]. Для исследования влияния кластеризации на образование различных делительных мод систематические расчёты для целого ряда ядер в области актиноидов были выполнены в данной работе. В расчётах использовался метод оболочечной поправки Струтинского и комплекс программ созданный В. В. Пашкевичем в Дубне [6]. Важной особенностью нашего подхода является использование оригинальной параметризации формы делящегося ядра, которая позволяет увеличивать размерность пространства состояний и не вводить искусственных ограниче-

ний на семейство форм. Пример результатов расчета делительных форм ядра в различных модах показан на рисунке.



Как можно видеть, именно характерные флуктуации величины масс-асимметрии приводят к появлению новых мод деления с различными высотами и ширинами барьеров деления. Таким образом, связанная с масс-асимметрией степень свободы сложной системы в пространстве состояний ответственна за образование мультимодальной структуры поверхности потенциальной энергии. В свою очередь, возникновение связанных с различными модами значений масс-асимметрии объясняется произошедшей кластеризацией внутри делящейся системы

### Список литературы

1. Kuklin S. N., Adomyan G. G., Antonenko N. V. Physics of Particles and Nuclei 47:206, 2016.
2. Shneidman T. M. et al, EPJ Web of Conferences, 107:03009, 2016.
3. Kuklin S. N., Adomyan G. G., Antonenko N. V., Sheid W. Int. J. Mod. Phys. E17: 2020, 2008.
4. Unzhakova, A. V. Pashkevich V. V., Pyatkov Y. V. Proc. of ICFN5, World Scientific, p. 652, 2014.
5. Pyatkov Y. V. et al, Nuclear Physics Present and Future, Springer, p.79-89, 2015.
6. Pashkevich V. V. Nuclear Physics A169, p.275-293, 1971.



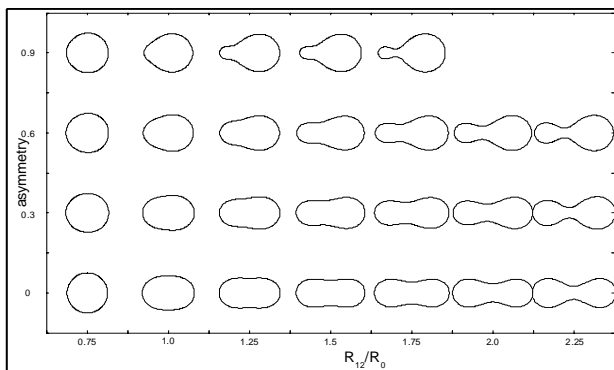
## CLUSTERING EFFECTS IN MULTIMODAL FISSION OF HEAVY NUCLEI

A. V. Unzhakova

St. Petersburg State University, St.Petersburg,  
Russia, 198504 Ulyanovskaya, 3.  
Tel./fax 812 428 72 00  
E-mail: a.unzhakova@spbu.ru

In the recent theoretical studies of the clustering effects on the strongly deformed heavy nuclei structures [1,2,3] it was shown that cluster features play the main role in both fission [4,5] and fusion processes. The description of alpha decay and cluster radioactivity in framework of the di-nuclear system configurations have been carried out in [1]. Clustering effects on the structure of heavy nuclei in actinide region have been shown in [2]. The fusion of the heavy nuclei in terms of di-nuclear system using macroscopic dynamical model was considered in [3].

To study the effects of clustering on the fission mode formation a comprehensive calculations for the variety of the actinide nuclei have been performed. The Strutinsky shell correction approach was implemented using the code developed by V. Pashkevich in Dubna [6]. Peculiar feature of this technique is the possibility to use a non-restricted axial shape parameterization of very high-dimension. The internal structure of nucleus is assumed equilibrium at each step of the collective motion. Typical results showing the clustering in the system's asymmetry-elongation plane are presented in the picture.



The possible fluctuation in mass-asymmetry coordinate causes a new fission mode formation and so determines fission barrier height and

penetrability. The mass-asymmetry degree of freedom is responsible for the origination of different modes in fission of heavy nuclei. A complex multimodal structure of the fission potential surface could be treated in terms of the large-amplitude coherent collective motion of the nucleons strongly affected by cluster organization. Our micro-macro calculations performed for a wide range of heavy nuclei show that clustering could be assumed to be a main reason of the fission mode formation.

### References

1. Kuklin S. N., Adomyan G. G., Antonenko N. V. Physics of Particles and Nuclei 47:206,2016.
2. Shneidman T. M. et al, EPJ Web of Conferences, 107:03009, 2016.
3. Kuklin S. N., Adomyan G. G., Antonenko N. V., Sheid W. Int. J. Mod. Phys. E17: 2020, 2008.
4. Unzhakova A. V., Pashkevich V. V., Pyatkov Y. V., Proc. of ICFN5, World Scientific, p. 652, 2014.
5. Pyatkov Y. V. et al, Nuclear Physics Present and Future, Springer, p.79-89, 2015.
6. Pashkevich V. V. Nuclear Physics A169, p.275-293, 1971.



## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ d С ЯДРАМИ <sup>9</sup>Be

Б. А. Уразбеков<sup>1,2</sup>, А. С. Деникин<sup>1,2</sup>,  
С. К. Сахиев<sup>3</sup>, С. М. Лукьянов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Государственный университет «Дубна»,  
Дубна, Россия

<sup>2</sup>Лаборатория ядерных реакций  
им. Г. Н. Флерова ОИЯИ, Дубна, Россия

<sup>3</sup>Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

Изучение кластерной структуры легких ядер в настоящее время является актуальной задачей в связи с бурным развитием экспериментальных методик исследования ядер, лежащих на границе стабильности, позволяющих проверить имеющиеся теоретические представления об особен-

ностях строения легких экзотических ядер. Хорошо известно, что выбор ядра-снаряда, имеющего простейшую структуру, как например ядра  $d$ ,  $t$ ,  ${}^3\text{He}$ ,  $\alpha$ , позволяют существенно упростить изучение механизмов ядерных реакций и получать непосредственную информацию о структуре ядра-мишени. В этом случае проявление ядром-мишенью ярко выраженной кластерной структуры может приводить к существенному ее влиянию на измеряемые сечения ядерных реакций таких каналов как упругое и неупругое рассеяние, а также каналы нуклонных и кластерных передач.

Ядро  ${}^9\text{Be}$  является уникальным примером ядерной системы, демонстрирующей кластерную структуру, оставаясь при этом стабильной частицей. Имеющиеся в настоящее время теоретические подходы [1] позволяют эффективно описывать свойства трехчастичных систем таких как  ${}^9\text{Be} = \alpha + n + \alpha$  на основе мультикластерной динамической модели с учетом принципа Паули. Построенная таким образом многочастичная волновая функция основного состояния может быть, в частности, использована для расчетов фолдинг-потенциалов взаимодействия ядер  ${}^9\text{Be}$  с различными снарядами. Соответствующий анализ реакции взаимодействия  ${}^4\text{He}$  с ядрами  ${}^9\text{Be}$  был выполнен нами в предыдущей работе [2]. Было показано, что построенная трехчастичная модель ядра  ${}^9\text{Be}$  и полученные на ее основе фолдинг-потенциал адекватно описывает наблюдаемые экспериментальные данные для широкого диапазона энергий столкновения и различных каналов реакции.

Настоящая работа является продолжением работы [2] и посвящена анализу данных по упругому и неупругому рассеянию и реакциям малонуклонных передач в реакциях взаимодействия ядер  $d$  с ядрами  ${}^9\text{Be}$  при энергии порядка 10 МэВ на нуклон. Цели работы заключаются в описании измеренных экспериментальных данных и сравнении спектроскопической информации с данными полученными в работе [2] и работах других авторов.

Теоретический анализ выполнен в рамках модели двойного фолдинг-потенциала с использованием волновой функции основного состояния ядра  ${}^9\text{Be}$ , построенной в трехкластерном  $\alpha + \alpha + n$  приближении. Расчеты сечения упругого рассеяния для реакции  $d(19,5 \text{ МэВ}) + {}^9\text{Be}$  выполнены в рамках оптической модели [3]. Полученный оптический потенциал применен для анализа сечений реакций передач и неупругого рассеяния в рамках модели искаженных волн [3]. Выполнен сравнительный анализ экспериментальных данных и теоретических расчетов.

#### Список литературы

1. Kukulin V. I. et al. // Nucl. Phys. A. 1984. V. 417. P. 128.
2. Уразбеков Б. А., Деникин А. С., Сахиев С. К., Буртебаев Н. Т. // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 80. № 3. С. 277.
3. Загребаев В. И., Деникин А. С., Карпов А. В. и др. // База знаний по низко энергетической ядерной физике NRV // [Электронный ресурс] – <http://nrv.jinr.ru/nrv/>.

