

Буртебаев Н., Демьянова А.С.,
Данилов А.Н., Керимкулов Ж.К.,
Джансейтов Д.М., Насурлла М.,
Алимов Д.К., Шакиров А.К.

**Исследование экзотических
состояний ядра ^{13}C**

Burtebayev N., Demyanova A.S.,
Danilov A.N., Kerimkulov Zh.K.,
Janseitov D.M., Nassurlla M.,
Alimov D.K., Shakirov A.K.

**Investigation
of exotic states of ^{13}C**

Бүртебаев Н., Демьянова А.С.,
Данилов А.Н., Керімқұлов Ж.К.,
Джансейтов Д.М., Насурлла М.,
Алимов Д.К., Шакиров А.К.

**^{13}C ядросының экзотикалық
күйлерін зерттеу**

В данной работе представлены результаты измерений дифференциальных сечений упругого и неупругого рассеяния $\alpha + ^{13}\text{C}$ при энергиях $E_\alpha = 29$ МэВ и $E_\alpha = 65$ МэВ проведенных на циклотронах: У150М Института ядерной физики (г. Алматы, Казахстан) и К-130 Университета Ювяскюля (г. Ювяскюля, Финляндия) соответственно.

Первый возбужденный уровень ядра ^{13}C представляет особый интерес, т.к. является состоянием с увеличенным радиусом, где мы можем говорить о структуре нейтронного гало. Наблюдаемый сдвиг позиций минимумов Эйри показывает, что состояние 8,86 МэВ ($1/2^-$) ядра ^{13}C и состояние 7,65 МэВ (0^+_{2-}) ядра ^{12}C имеют много общего и, с определенной уверенностью, эти уровни можно было бы назвать аналогами друг друга.

В рамках модифицированной дифракционной модели (МДМ) определены радиусы возбужденных состояний: 3,09 МэВ ($1/2^+$) и 8,86 МэВ ($1/2^-$) при $E_\alpha = 65$ МэВ и 3,09 МэВ ($1/2^+$) при $E_\alpha = 29$ МэВ.

Ключевые слова: упругое и неупругое рассеяние, модифицированная дифракционная модель, радиусы возбужденных состояний.

The differential cross-sections of the elastic and inelastic $\alpha + ^{13}\text{C}$ scattering were measured at $E(\alpha) = 29$ in U150M cyclotron of Institute of Nuclear Physics (Almaty, Kazakhstan) and $E(\alpha) = 65$ MeV in K-130 cyclotron of University of Jyväskylä (Jyväskylä, Finland).

The first excited state of ^{13}C nucleus is of special interest because, it is a state with increased radius, where we can talk about the structure of a neutron halo. The observed shift of Airy minima positions shows that the state of 8.86 MeV ($1/2^-$) ^{13}C nucleus and the state of 7.65 MeV (0^+_{2-}) ^{12}C have much in common and, with some confidence, these levels could be called analogues of each other.

The radii of the states: 3.09 ($1/2^+$) and 8.86 ($1/2^-$) were determined by the Modified diffraction model (MDM) at $E(\alpha) = 65$ MeV and 3.09 ($1/2^+$) at $E(\alpha) = 29$ MeV.

Key words: elastic and inelastic scattering, modified diffraction model, radii of the excited states.

Бұл жұмыста $\alpha + ^{13}\text{C}$ дифференциалды қималарының серпімді және серпімсіз шашырауының $E_\alpha = 29$ МэВ Ядролық физика институтының У150М (Алматы қ., Қазақстан) және $E_\alpha = 65$ МэВ Ювяскюля Университетінің К-130 (Ювяскюля қ., Финляндия) үдеткіштерінде өткізілген тәжірибелердің нәтижелері көрсетілген.

^{13}C ядросының бірінші қозған күйі айрықша қызығушылықты тудырады, себебі осы қозған күйдің радиусы ұлғайтылғандықтан, нейтрондық гало құрылымы жайлы айта аламыз. Эйри минимумдарының орналасуының өзгерісі, ^{13}C ядросының 8,86 МэВ ($1/2^-$) күйі және ^{12}C ядросының 7,65 МэВ (0^+_{2-}) күйлері жалпы қасиеттері сәйкес келетіндіктен, бұл күйлерді бір біріне ұқсас ретінде қарастыруға болады.

Модификацияланған дифракциялық үлгі төңірегінде $E_\alpha = 65$ МэВ: 3,09 МэВ ($1/2^+$) және 8,86 МэВ ($1/2^-$), $E_\alpha = 29$ МэВ: 3,09 МэВ ($1/2^+$) қозған күйлерінің радиустары анықталды.

Түйін сөздер: серпімді және серпімсіз шашырау, модификацияланған дифракциялық үлгі, қозған күйлердің радиустары.

¹Буртебаев Н., ²Демьянова А.С., ²Данилов А.Н.,
¹Керимкулов Ж.К., ³Джансейтов Д.М., ⁴Насурлла М.,
⁴Алимов Д.К., ⁴Шакиров А.К.

¹Институт Ядерной Физики, Республика Казахстан, г. Алматы

²НИЦ Курчатовский Институт, Россия, Москва

³Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
 Республика Казахстан, г. Астана

⁴Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
 Республика Казахстан, г. Алматы

*E-mail: janseit.daniar@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКЗОТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ ЯДРА ^{13}C

Введение

Ядро ^{13}C является хорошим примером «нормального» ядра, которое хорошо описывается в рамках оболочечной модели. Схема уровней ^{13}C достоверно определена до энергий возбуждения ~ 10 МэВ [1]. Тем не менее, некоторые новые подходы, такие как гипотеза α -частичного конденсата [2] предполагает появление кластерных состояний с увеличенным радиусом. Наиболее вероятным кандидатом имеющую такую структуру до сих пор считалось известное состояние Хойла (0^+ , $E^*=7,65$ МэВ) в ^{12}C . В работе [3], предполагалось, что аналогичные состояния Хойла могут быть в некоторых соседних ядрах, например, состояние $1/2^-$ ($E^*=8,86$ МэВ) в ядре ^{13}C . Наш анализ [4] данных рассеяния $\alpha + ^{13}\text{C}$ измеренных при $E_\alpha = 388$ МэВ [5] действительно продемонстрировали значительное увеличение радиуса при данном состоянии. Тем не менее, способ извлечения радиусов в рамках модифицированной дифракционной модели (МДМ) [6], используемого в работе [4], возможно является, не вполне адекватной, т.к. при высоких энергиях (≥ 100 МэВ), ядро становится слишком прозрачным. Кроме того, также обсуждалось наличие в ^{13}C некоторых состояний с увеличенными размерами радиусов, но имеющие другие структуры. Таким образом, нейтрон гало определено в первом возбужденном состоянии $3,09$ МэВ ($1/2^+$) с помощью двух независимых и взаимодополняющих друг друга методов [7, 8]. Следовательно, новые измерения, особенно при более низких энергиях, весьма желательны.

В этой работе мы изучили упругое и неупругое рассеяния $\alpha + ^{13}\text{C}$ с целью измерения радиусов возбужденных состояний ^{13}C при $E_\alpha = 29$ МэВ и $E_\alpha = 65$. В дополнение к МДМ также в соответствии с идеей, предложенной в работе [9], проанализированы изменения минимумов радуги (Эйри) в угловом распределении. Основное внимание было посвящено двум состояниям ^{13}C : $8,86$ МэВ ($1/2^-$) и $3,09$ МэВ ($1/2^+$).

Результаты и обсуждение

Эксперименты были проведены на циклотронах: У-150М ИЯФ (Казахстан) при энергии $E_\alpha=29$ МэВ и К-130 JYFL (Финляндии) при энергии $E_\alpha=65$ МэВ. В этих экспериментах использовался набор ΔE - E телескопов, из кремниевых полупроводниковых детекторов, для регистрации рассеянных альфа-частиц. Были использованы самоподдерживающиеся мишени

^{13}C (толщиной $\sim 0,4$ мг/см 2) с 86% обогащением в Казахстане и ^{13}C (толщиной 0,3 мг / см 2) с 98% обогащением в Финляндии. Мишени содержали некоторые примеси ^{12}C и ^{16}O .

Энергетические спектры рассеянных альфа-частиц (слева) и дифференциальные сечения упругого рассеяния (справа) $\alpha + ^{13}\text{C}$ с результатами расчетов в рамках оптической модели при энергиях 29 и 65 МэВ приведены на рисунках 1 и 2 соответственно.

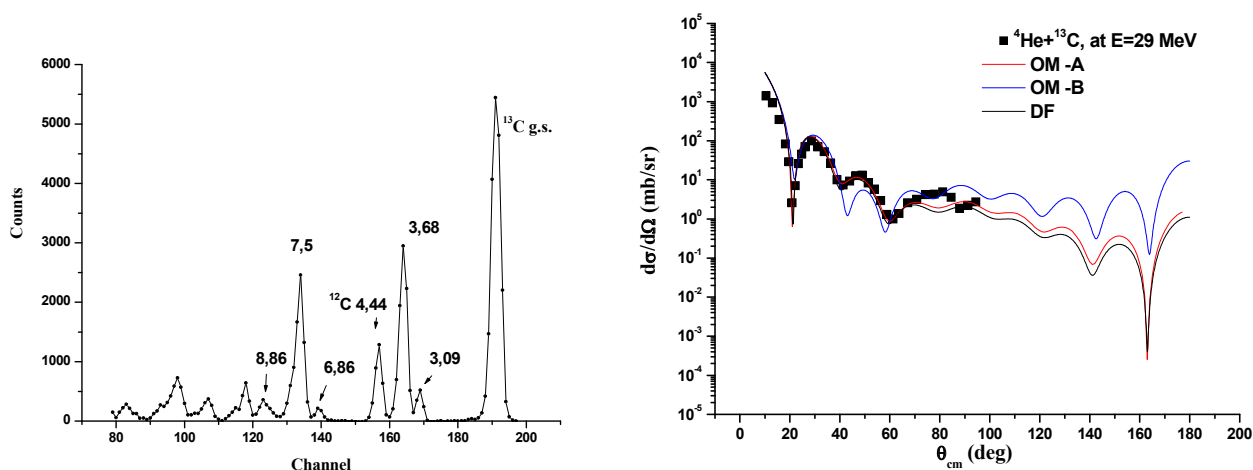


Рисунок 1 – Слева представлен: типичный спектр ($\theta=32^\circ$) рассеяния $\alpha+^{13}\text{C}$ при $E=29$ МэВ. Справа: дифференциальные сечения упругого рассеяния альфа-частиц на ядрах ^{13}C при $E=29$ МэВ. Сплошными кривыми приведены расчеты в рамках оптической модели ядра и двойной фолдинг-модели

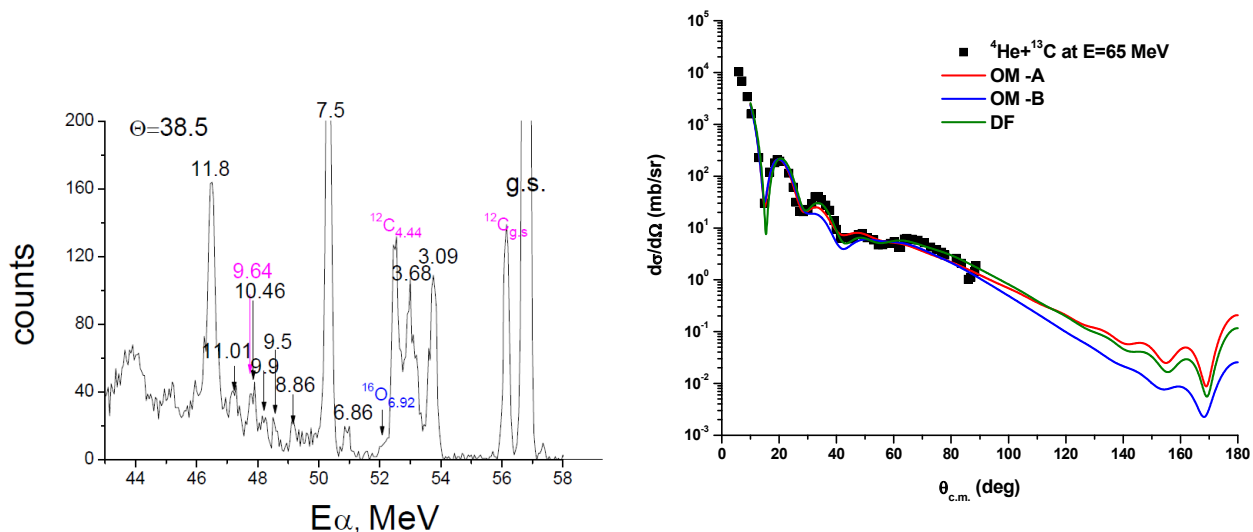


Рисунок 2 – Слева представлен: типичный спектр ($\theta=38.5^\circ$) рассеяния $\alpha+^{13}\text{C}$ при $E=65$ МэВ. Справа: дифференциальные сечения упругого рассеяния альфа-частиц на ядрах ^{13}C при $E=65$ МэВ. Сплошными кривыми приведены расчеты в рамках оптической модели ядра и двойной фолдинг-модели

На рисунке 3 (слева) представлены измерения дифференциальных сечений возбужденного состояния 8,86 МэВ ($1/2^-$) с расчетами по DWBA, справа угловые распределения этого уровня в сравнении с состоянием Хойла 7,65 МэВ (0^+) при той же энергии. Такая дифракционная картина соответствует передаче импульса с угловым моментом $L=0$. Также были идентифицированы минимумы радуги (Эйри).

Для состояния 8,86 МэВ ($1/2^-$) минимум радуги (Эйри) расположен под большим углом,

чем в случае упругого рассеяния, но в сравнении с состоянием Хойла 7,65 МэВ (0^+), минимум радуги (Эйри) расположен под меньшим углом. Наблюдаемые сдвиги позиций минимумов Эйри с больших углов при неупругих рассеяниях, по отношению к упругому рассеянию указывают на увеличение радиуса в этом возбужденном состоянии [9]. На рис.4 представлены дифференциальные сечения неупругого рассеяния $\alpha + {}^{13}\text{C}$ при $E_\alpha=29$ МэВ (слева) и $E_\alpha=65$ МэВ (справа), для состояния 3,09 ($1/2^+$) МэВ.

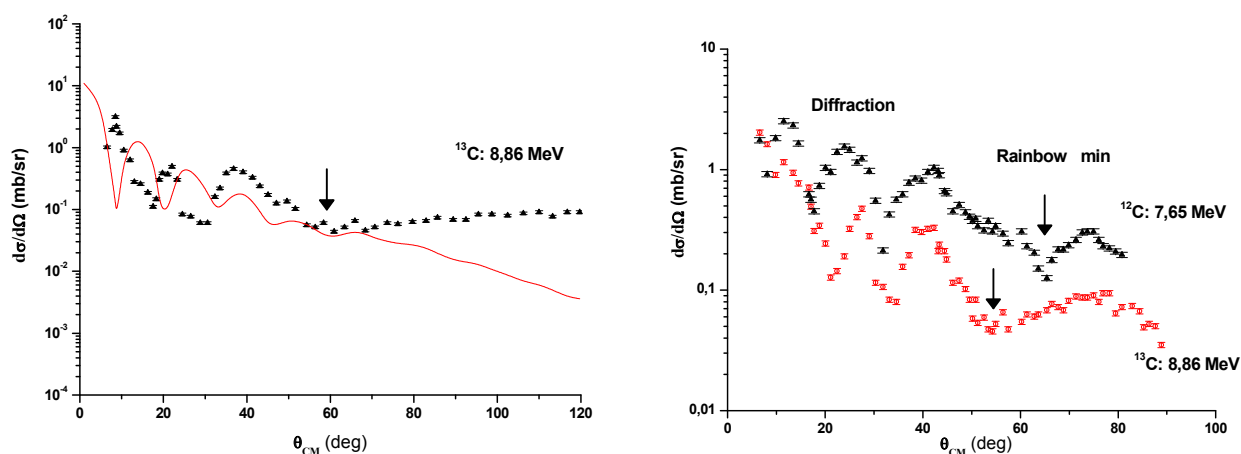


Рисунок 3 – Слева: дифференциальные сечения неупругого рассеяния $\alpha+{}^{13}\text{C}$ при $E=65$ МэВ для состояния 8,86 МэВ ($1/2^-$) с расчетами по DWBA (сплошная красная линия). Справа: сравнение дифференциальных сечений возбужденных состояния 8,86 МэВ ($1/2^-$) в ядре ${}^{13}\text{C}$ (красные точки) и состояния (Хойла) 7.65 МэВ (0^+) в ядре ${}^{12}\text{C}$ (черные точки). Позиции минимумов радуги обозначены стрелками.

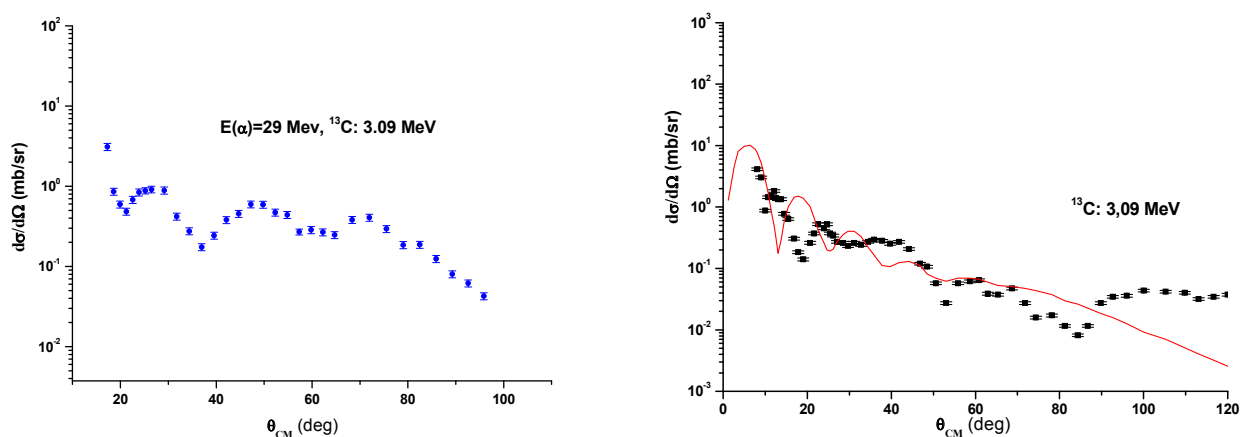


Рисунок 4 – Слева: дифференциальные сечения неупругого рассеяния $\alpha+{}^{13}\text{C}$ при $E=29$ МэВ для состояния 3,09 МэВ ($1/2^+$). Справа: дифференциальные сечения неупругого рассеяния $\alpha+{}^{13}\text{C}$ при $E=65$ МэВ для состояния 3,09 МэВ ($1/2^+$), расчет по DWBA показан сплошной линией при передаче углового момента $L = 1$

Дифракционная структура дифференциальных сечений проанализирована в рамках МДМ. Были определены радиусы возбужденных состояний ядра ^{13}C при $E_{\alpha}=29$ МэВ и $E_{\alpha}=65$ МэВ (таблица 1). Среднеквадратичный радиус (RMS root-mean square) состояния

8,86 МэВ ($1/2^-$) ($2,68 \pm 0,10$) фм немного меньше, чем радиус состояния Хойла 7,65 МэВ (0^+_{2-}) ($R_{\text{rms}} = 2,89 \pm 0,04$ фм [6]). Этот результат находится в согласии с предыдущими оценками [4] полученными из анализа литературных данных.

Таблица 1 – Дифракционные и среднеквадратичные (RMS) радиусы возбужденных состояний ядра ^{13}C определенные по МДМ.

E^* , МэВ, I^{π}	$R_{\text{диф}}$, фм	R_{rms} , фм	E_{α} , МэВ
0.00 $1/2^-$	(5.31±0.07)	2.31	65
3.09 $1/2^+$	(5.96±0.06)	2.92±0.07	65
3.09 $1/2^+$	(5.75±0.07)	2.73±0.07	29
8.86 $1/2^-$	(5.66±0.10)	2.68±0.10	65

Наблюдаемый сдвиг позиций минимумов Эйри в ядрах ^{12}C и ^{13}C сделанный на основе анализа в рамках МДМ подтверждает вывод: полученные результаты ясно показывают, что состояние 8.86 МэВ ($1/2^-$) и состояние Хойла 7,65 МэВ (0^+_{2-}) (рис.3, справа) имеют много общего и, с определенной уверенностью, эти уровни можно было бы назвать аналогами друг друга. С другой стороны, состояние Хойла 7,65 МэВ (0^+_{2-}) является вершиной вращательной полосы [10] и нет указаний на существование аналогичных полос в диапазоне состояния 8.86 МэВ ($1/2^-$). Это различие может отражать важную разницу в структуре обоих состояний.

Как было указано выше среднеквадратичный радиус состояния 3,09 МэВ ($1/2^+$) $R_{\text{rms}} = 2,92 \pm 0,07$ фм. Наш предыдущий результат, полученный из анализа некоторых опубликованных данных при меньших энергиях, дал $R_{\text{rms}} = 2,74 \pm 0,06$ фм [8]. Положение минимума Эйри для этого состояния не был определен в данной работе. Однако в любом случае он находится в области $\sim 55^{\circ}$ - 70° , которая существенно больше соответствующего минимума в упругом рассеянии, чтобы указывать на увеличение радиуса. Радиус нейт-

ронного гало R_n состояния 3,09 МэВ ($1/2^+$) также может быть определен по асимптотическим нормировочным коэффициентам (АНК) [11], полученных из анализа реакций $^{12}\text{C}(d,p)^{13}\text{C}^*(3,09 \text{ МэВ})$. Тогда радиус нейтронного гало R_n может быть преобразован в соответствующий среднеквадратичный (RMS) радиус. Подробная информация приведена в работе [12].

Среднеквадратичный радиус (RMS) полученный из анализа (d,p) – реакций при разных энергиях составил $R_{\text{rms}} = 2,68 \pm 0,26$ фм. Таким образом, все используемые методы: МДМ, АНК и ядерной радуги дали качественно аналогичные результаты. Этот подход увеличивает надежность применения МДМ и моделей АНК для определения радиусов нейтронного гало в состоянии 3,09 МэВ ($1/2^+$).

Полученные результаты демонстрируют сосуществование различных структур в ядре ^{13}C . Данный вопрос требует более тщательного теоретического исследования структур рассматриваемого состояния.

Работа была частично поддержана грантом РФФИ 12-02-00927 и грантом МОН РК №1460 ГФ4.

Литература

- 1 W. von Oertzen, M. Freer, Y. Kanada-En'yo. Nuclear clusters and nuclear molecules // Physical Reports. – 2006. – Vol. 432. – P.43.
- 2 Tohsaki A., Horiuchi H., Schuck P., Röpke G. Alpha cluster condensation in ^{12}C and ^{16}O // Physical Review Letter. – 2001. – Vol.87. – P.192501.
- 3 Milin M. and W. von Oertzen. Search for molecular bands in // European Physical Journal A. – 2002. – Vol.14. – P. 295.
- 4 Demyanova A.S., Ogloblin A.A., Danilov A.N., Belyaeva T.L., Goncharov S.A. // International Journal of Modern Physics E. – 2011. – Vol.20. – P. 915.

- 5 Kawabata T., Sasamoto Y., Maeda Y., Sakaguchi S., Shimizu Y., Suda K., Uesaka T., Fujiwara M., Hashimoto H., Hatanaka K., Kawase K., Matsubara H., Nakanishi K., Tameshige Y., Tamii A., Itoh K., Itoh M., Yoshida H.P., Kanada-En'yo Y., Uchida M. Cluster states in ^{13}C and ^{11}B // *International Journal of Modern Physics E*. – 2008. – Vol.17. – P. 2071.
- 6 Danilov A.N., Belyaeva T.L., Demyanova A.S., Goncharov S.A., and Ogloblin A.A. Determination of nuclear radius or unstable states in ^{12}C with diffraction inelastic scattering // *Physical Review C*. – 2009. – Vol. 80. – P. 054603.
- 7 Liu Z.H., Lin C.J., Zhang H.Q., Li Z.C., Zhang J.S., Wu Y.W., Yang F., Ruan M., Liu J.C., Li S.Y., and Peng Z.H. Asymptotic normalization coefficients and neutron halo of the excited states in ^{12}B and ^{13}C // *Physical Review C*. – 2001. – Vol. 64. – P.034312.
- 8 Ogloblin A.A., Danilov A.N., Belyaeva T.L., Demyanova A.S., Goncharov S.A., and Trzaska W. Effect of neutron halos on excited states of nuclei // *Physical Review C*. – 2011. – Vol.84. – P.054601.
- 9 Ohkubo S. and Hirabayashi Y. Evidence for strong refraction of ^3He in an α -particle condensate // *Physical Review C*. – 2007. – Vol.75. – P.044609.
- 10 Ogloblin A.A., Belyaeva T.L., Danilov A.N., Demyanova A.S. and Goncharov S.A. Radius of ^{12}C in the excited 2_2^+ Hoyle state // *European Physical Journal A*. – 2013. – Vol.49. – P. 46; Zimmerman W.R., Ahmed M.W., Bromberger B., Stave S.C., Breskin A., Dangendorf V., Delbar Th., Gai M., Henshaw S.S., Mueller J.M., Sun C., Tittelmeier K., Weller H.R. and Wu Y.K. Unambiguous Identification of the Second 2^+ State in ^{12}C and the Structure of the Hoyle State // *Physical Review Letters*. – 2013. – Vol. 110. – P.152502.
- 11 Liu Z.H., Zhang X.Z., Zhang H.Q. Nuclear halo and its scaling laws // *Physical Review C*. – 2003. – Vol. 68. – P.024305.
- 12 Belyaeva T.L., Perez-Torres R., Demyanova A.S., Goncharov S.A., and Ogloblin A.A. Neutron asymptotic normalization coefficients and halo radii of the first excited states of ^{13}C and ^{11}Be // *European Physical Journal Web of Conferences*. – 2014. – Vol. 66. – P.03009.

References

- 1 W. von Oertzen, M. Freer, Y. Kanada-En'yo. // *Physical Reports* 432. (2006). 43.
- 2 A. Tohsaki, H. Horiuchi, P. Schuck, G. Röpke. // *Physical Review Letters* 87. (2001). 192501.
- 3 M. Milin and W. von Oertzen. // *European Physical Journal A* 14. (2002). 295
- 4 A.S.Demyanova, A.A.Ogloblin, A.N.Danilov, T.L.Belyaeva, S.A.Goncharov // *International Journal of Modern Physics E* 20. (2011). 915
- 5 T. Kawabata, Y. Sasamoto, Y. Maeda, S. Sakaguchi, Y. Shimizu, K. Suda, T. Uesaka, M. Fujiwara, H. Hashimoto, K. Hatanaka, K. Kawase, H. Matsubara, K. Nakanishi, Y. Tameshige, A. Tamii, K. Itoh, M. Itoh, H. P. Yoshida, Y. Kanada-En'yo, M. Uchida. // *International Journal of Modern Physics E*. 17. (2008). 2071
- 6 A.N. Danilov, T.L. Belyaeva, A.S. Demyanova, S.A. Goncharov, and A.A. Ogloblin, // *Physical Review C* 80. (2009). 054603
- 7 Z.H. Liu, C.J. Lin, H.Q. Zhang, Z.C. Li, J.S. Zhang, Y.W. Wu, F. Yang, M. Ruan, J.C. Liu, S.Y. Li, and Z.H. Peng. // *Physical Review C* 64. (2001). 034312
- 8 A.A. Ogloblin, A.N. Danilov, T.L. Belyaeva, A.S. Demyanova, S.A. Goncharov, and W. Trzaska // *Physical Review C* 84. (2011). 054601
- 9 S. Ohkubo and Y. Hirabayashi. // *Physical Review C* 75. (2007). 044609
- 10 A.A. Ogloblin, T.L. Belyaeva, A.N. Danilov, A.S. Demyanova and S.A. Goncharov. // *European Physical Journal A* 49. (2013). 46; W.R. Zimmerman, M.W. Ahmed, B.Bromberger, S.C. Stave, A. Breskin, V. Dangendorf, Th. Delbar, M. Gai, S.S. Henshaw, J.M. Mueller, C. Sun, K. Tittelmeier, H.R. Weller and Y.K. Wu. // *Physical Review Letters* 110. (2013). 152502.
- 11 Z.H. Liu, X.Z. Zhang, H.Q. // *Physical Review C* 68. (2003). 024305.
- 12 T.L. Belyaeva, R. Perez-Torres, A.S. Demyanova, S.A. Goncharov, and A.A. Ogloblin // *European Physical Journal Web of Conferences*. 66. (2014). 03009.