

Буртебаев Н., Керимкулов Ж.К.,
Юшков А.В., Зазулин Д.М.,
Алимов Д.К., Джансейтов Д.М.,
Мухамеджанов Е.С.,
Насурлла М., Шакиров А.К.,
Паттаев А.

**Измерение
дифференциальных сечений
упругого рассеяния протонов
ядрами ^{14}N при**

$E_{p, \text{лаб.}} = 0.7 - 1.1 \text{ МэВ}$

Burtebayev N., Kerimkulov Zh.K.,
Yushkov A.V., Zazulin D.M.,
Alimov D.K., Jansetov D.M.,
Mukhamejanov E.S.,
Nassurlla M., Shakirov A.K.,
Pattayev A.

**Measurement of differential cross
sections of elastic scattering of
protons by nuclei ^{14}N at**

$E_{p, \text{lab.}} = 0.7 - 1.1 \text{ MeV}$

Буртебаев Н., Керимкулов Ж.К.,
Юшков А.В., Зазулин Д.М.,
Әлімов Д.К., Жансейтов Д.М.,
Мухамеджанов Е.С.,
Насұрлла М., Шакиров А.К.,
Паттаев А.

**$E_{p, \text{лаб.}} = 0.7 - 1.1 \text{ МэВ}$
энергияларда протондардың
 ^{14}N ядросынан серпімді
шашырауының
дифференциалдық қимасын
өлшеу**

Измерены дифференциальные сечения упругого $^{14}\text{N}(p,p)^{14}\text{N}$ рассеяния при энергиях налетающих протонов 0.7 – 1.1 МэВ и углах рассеяния $\theta_{\text{ц.м.}} = 32^{\circ}-166^{\circ}$. Выполнен анализ полученных в настоящей работе и имеющихся литературных данных по упругому рассеянию протонов на ядрах ^{14}N в рамках оптической модели. Найдены оптимальные значения параметров оптического потенциала, которые будут востребованы при расчетах процессов происходящих в гибридных ядерных реакторах и термоядерных установках. Теоретический анализ был проведен с использованием известной расчетной программы FRESKO. Параметры потенциала, отвечающие оптимальному соответствию экспериментальных и расчетных значений дифференциальных сечений, находились минимизацией величины χ^2 .

Ключевые слова: упругое рассеяние, цилиндр Фарадея, Fresco, дифференциальная сечения.

The differential cross sections of elastic $^{14}\text{N}(p,p)^{14}\text{N}$ scattering at energies of protons 0.7 – 1.1 MeV and scattering angles $\theta_{\text{c.m.}} = 32^{\circ}-166^{\circ}$ have been measured. The analysis of data in this work and the available literature data on elastic scattering of protons on ^{14}N nuclei in the optical model were obtained. The optimal value of the optical potential parameters that will be needed in the calculation of the processes occurring in hybrid nuclear reactors and thermonuclear installations. Theoretical analysis was carried out using a FRESKO settlement program. Parameters of the potential corresponding to optimally match of the experimental and calculated values of the differential cross sections, were found minimizing the value of χ^2 .

Key words: elastic scattering, Faraday cup, Fresco, differential cross sections.

$\theta_{\text{ц.м.}} = 32^{\circ}-166^{\circ}$ шашырау бұрыштарында және 0.7 – 1.1 МэВ энергияда протондардың $^{14}\text{N}(p,p)^{14}\text{N}$ серпімді шашырауының дифференциалдық қимасы өлшенді. Осы жұмыста оптикалық модел төңірегінде ^{14}N ядросынан протондардың серпімді шашырауы бойынша алынған және әдебиеттерде келтірілген мәліметтер талданды. Термоядролық қондырғыларды және гибритті ядролық реакторларда өтетін процестерлі есептеулерде қолданылатын оптикалық потенциал параметрлерінің оптималды мәндері табылды. FRESKO бағдарламасын қолдану арқылы теориялық талдаулар жасалды. Дифференциалдық қиманың теориялық есептеулер мәнімен тәжірибелік мәліметерді түсіндіретін оптималды потенциал параметрі және χ^2 азайту мәні табылды.

Түйін сөздер: серпімді шашырау, Фарадей цилиндрі, Fresco, дифференциалдық қима.

**¹Буртебаев Н., ¹Керимкулов Ж.К., ²Юшков А.В.,
^{1,2}Зазулин Д.М., ^{1,2}Алимов Д.К., ^{1,3}Джансейтов Д.М.,
¹Мухамеджанов Е.С., ^{1,2}Насурлла М.,
^{1,2}Шакиров А.К., ⁴Паттаев А.**

¹Институт ядерной физики, Республика Казахстан, г. Алматы

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби,
Республика Казахстан, г. Алматы

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

⁴Международный казахско-турецкий университет им. А. Ясави,
Республика Казахстан, г. Туркестан

*E-mail: diliyo@mail.ru

ИЗМЕРЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ ПРОТОНОВ ЯДРАМИ ¹⁴N ПРИ $E_{p, \text{лаб.}} = 0.7 - 1.1 \text{ МЭВ}$

Введение

По сечениям упругого рассеяния протонов на ядрах ¹⁴N при низких энергиях в настоящее время имеется экспериментальная информация, полученная разными авторами с погрешностью 5-10 % при следующих энергетических и угловых диапазонах: $\theta_{p, \text{лаб.}} = 160^\circ$, $E_{p, \text{лаб.}} = 1.4 - 2.4 \text{ МЭВ}$ [1]; $\theta_{p, \text{лаб.}} = 90^\circ - 160^\circ$, $E_{p, \text{лаб.}} = 0.9 - 4 \text{ МЭВ}$ [2]; $\theta_{p, \text{лаб.}} = 40^\circ - 140^\circ$, $E_{p, \text{лаб.}} = 1.5 - 3.5 \text{ МЭВ}$ [3]; $\theta_{p, \text{лаб.}} = 90^\circ - 160^\circ$, $E_{p, \text{лаб.}} = 1 - 3 \text{ МЭВ}$ и $\theta_{p, \text{лаб.}} = 30^\circ - 170^\circ$, $E_{p, \text{лаб.}} = 1.8 - 4 \text{ МЭВ}$ [4]; $\theta_{p, \text{лаб.}} = 90^\circ - 160^\circ$, $E_{p, \text{лаб.}} = 0.62 - 1.82 \text{ МЭВ}$ [5]; $\theta_{p, \text{лаб.}} = 140^\circ$ и 178° , $E_{p, \text{лаб.}} = 0.5 - 2.5 \text{ МЭВ}$ [6]; $\theta_{p, \text{лаб.}} = 150^\circ$, $E_{p, \text{лаб.}} = 0.85 - 1.9 \text{ МЭВ}$ [7]. Очевидно, что для надежного проведения фазового анализа и определения параметров оптического потенциала для системы $p+^{14}\text{N}$ при $E_{p, \text{лаб.}} < 1.1 \text{ МЭВ}$ необходимо провести дополнительные измерения дифференциальных сечений процесса $^{14}\text{N}(p, p)^{14}\text{N}$ с погрешностью не хуже 10% при $E_{p, \text{лаб.}} < 1.1 \text{ МЭВ}$ с шагом около 0.1 МЭВ для $\theta_{p, \text{лаб.}} = 30^\circ - 160^\circ$ с шагом около 10° . Важность данного диапазона энергий заключается в том, что именно при сверхнизких энергиях протекают процессы в термоядерных и гибридных ядерных установках.

Экспериментальная методика и результаты

В связи с вышеизложенным, на электростатическом тандемном ускорителе УКП-2-1 РГП Института ядерной физики РК проведены эксперименты по измерению упругого рассеяния протонов на ядрах ¹⁴N при $E_{p, \text{лаб.}} = 0.7 - 1.1 \text{ МЭВ}$. Величина тока пучка ограничивалась степенью стойкости мишени и нагрузочными характеристиками электронной аппаратуры и была в пределах от 1 до 80 нА. Калибровка энергии протонов в пучке осуществлялась с помощью реакций, имеющих узкие, хорошо выделенные, резонансы. Для этой цели использовались реакции $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$ при $E_{p, \text{лаб.}} = 0.632, 0.773, 0.992, 1.089 \text{ МЭВ}$ и $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$ при $E_{p, \text{лаб.}} = 0.34 \text{ МЭВ}$. Точность калибровки пучка

составляла $\pm 10^{-3}$ МэВ. Энергетический разброс в пучке был определен по ширине переднего фронта кривой выхода реакции $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ в районе резонанса при $E_{p,\text{лаб.}} = 0.992$ МэВ (ширина резонанса $< 10^{-4}$ МэВ) и не превышал $1.5 \cdot 10^{-3}$ МэВ. Фотография экспериментального оборудования расположена на ускорительном комплексе УКП-2-1 представлена на рисунке 1.

Пучок протонов проводился через коллимационную систему (два коллиматора диаметрами по 1.5 мм, расположенными на расстоянии 420 мм друг от друга) и формировался на мишени (расположенной на расстоянии 100 мм от последнего коллиматора) в пятно диаметром 2 мм. В целях минимизации количества протонов, рассеянных на торцах коллиматоров, толщина их передних стенок в районе отверстий доводилась до 0.1 мм. Цилиндр Фарадея (трубка диаметром 15 мм и длиной 150 мм), расположенный на расстоянии 120 мм от мишени, соединялся с интегратором тока, который посылал цифровой импульс на пересчетное устройство, как только собирал порцию заряда (0.1 или 10 нанокулон). Накопленный заряд определялся с погрешностью не более чем 1.5%. Для минимизации процесса нагорания углеродной пленки на мишени во время измерений применялась откачка магнито – разрядным и турбомолекулярным насосами, а внутри камеры рассеяния была установлена система азотных ловушек. Типичное давление в камере составляло $1.5 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст. Внутренний вид камеры рассеяния представлен на рисунке 1.

Для регистрации рассеянных протонов использовался поверхностно – барьерный детектор

заряженных частиц (диаметр ограничивающей диафрагмы перед детектором 2 мм, толщина чувствительной области 0.2 мм). Детектор был расположен на расстоянии 240 мм от области рассеяния и имел возможность перемещаться в угловом диапазоне от 10° до 170° . Погрешность в определении угла расположения детектора не превышала $\pm 0.2^\circ$. Детектор оснащался защитной трубкой, которая, при всех его положениях, исключала регистрацию протонов, рассеянных на торце последнего коллиматора и на цилиндре Фарадея. Второй аналогичный детектор, размещался под углом 160° по отношению к падающему пучку и использовался для контроля стабильности мишени. Энергетическое разрешение детекторов составляло 0.015 МэВ.

В качестве мишени использовалась пленка TiN с естественным изотопным составом азота ($^{14}\text{N} - 99,634\%$) и титана ($^{46}\text{Ti} - 8.2\%$, $^{47}\text{Ti} - 7.4\%$, $^{48}\text{Ti} - 74\%$, $^{49}\text{Ti} - 5.4\%$ и $^{50}\text{Ti} - 5.2\%$), изготовленная методом магнетронного напыления. Энергетические потери протонов с $E_{p,\text{лаб.}} = 0.992$ МэВ при прохождении мишени (TiN) определялись сдвигом резонанса реакции $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ при $E_{p,\text{лаб.}} = 0.992$ МэВ [8,9] и оказались равными $(8.5 \pm 1.5) \cdot 10^{-3}$ МэВ. Такая толщина мишени удовлетворяла требованиям механической и термической прочности, и в тоже время, практически не влияла на уширение спектральных линий, за исключением линий спектров, полученных под $\theta_{\text{ц.м.}} = 73.8^\circ, 84^\circ, 94.1^\circ, 104^\circ$, где уширение обусловленное толщиной мишени равно уширению за счет энергетического разрешения детектора.



Рисунок 1 – Внутренний вид центральной камеры использовавшейся для экспериментов

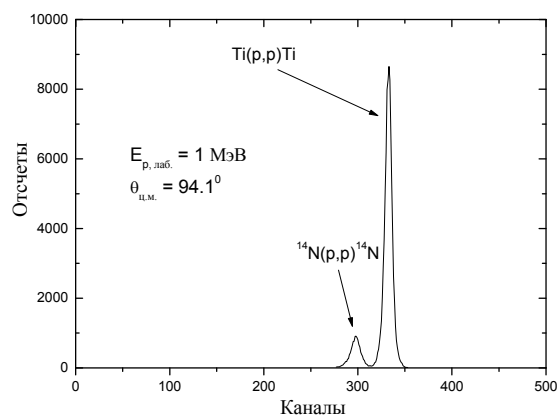


Рисунок 2 – Пример энергетического спектра протонов упруго рассеянных на ядрах мишени

Сигналы с детекторов усиливались и поступали на два 2024 – канальных анализатора. Мертвое время электроники не превышало 3%. Для каждой энергии протонов отношение площади пиков $^{14}\text{N}(p,p)^{14}\text{N}$ и $\text{Ti}(p,p)\text{Ti}$ рассеяний от стационарного детектора к показанию счетчика интегратора было константой с точностью 5% при всех положениях подвижного детектора. Лабораторная энергия, приведенная в работе,

соответствует лабораторной энергии протонов в центре мишени. Подробное описание ускорителя и экспериментальных методов можно найти в работах [8,9] и в их ссылках.

На рисунке 2 показан пример спектра упругого рассеяния протонов на ядрах мишени, полученный при $E_{p, \text{лаб.}} = 1$ МэВ. На рисунке хорошо видны пики от упругого рассеяния протонов на ядрах, ^{14}N и Ti .

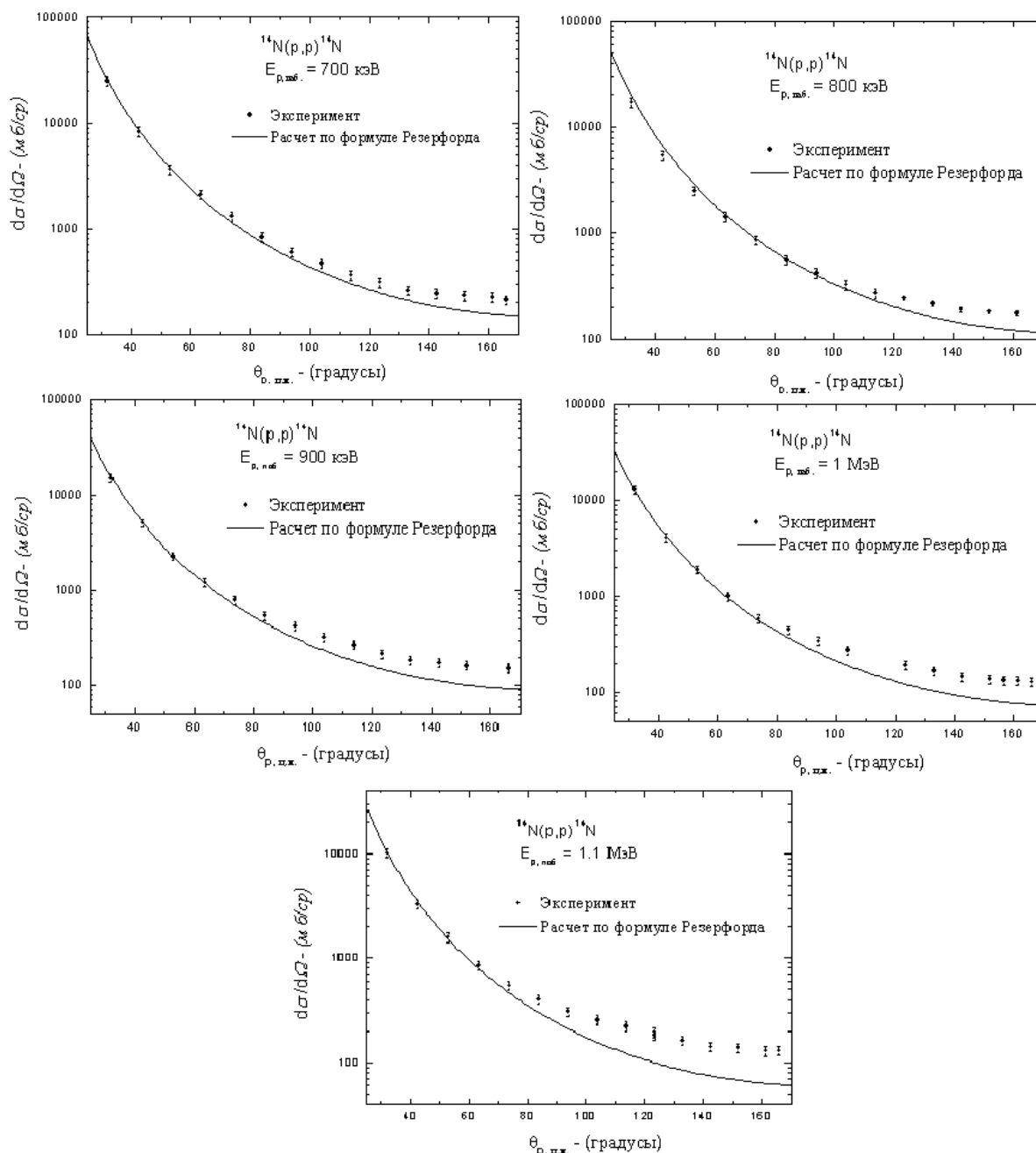


Рисунок 3 – Дифференциальные сечения упругого рассеяния протонов на ^{14}N

Угловые распределения $^{14}\text{N}(\text{p,p})^{14}\text{N}$ были измерены с погрешностью около 10 % при энергиях налетающих протонов $E_{\text{р.лаб.}} = 0.7 - 1.1$ МэВ под углами $\theta_{\text{ц.м.}} = 32, 42.6, 53.1, 63.5, 73.8, 84, 94.1, 104, 123.5, 133.1, 142.6, 151, 156.7, 161.4$ и 166 градусов. Для положений детектора при углах $\theta_{\text{ц.м.}} = 32, 42.6, 53.1, 63.5, 123.5, 133.1, 142.6, 151, 156.7, 161.4$ и 166 градусов мишень устанавливалась под прямым углом к направлению падающего пучка, а для положений детектора при $\theta_{\text{ц.м.}} = 73.8^{\circ}, 84^{\circ}, 94.1^{\circ}$ и 104° – под углом 45° .

Под выходом упругого $^{14}\text{N}(\text{p,p})^{14}\text{N}$ рассеяния принималась сумма отсчетов в спектральном пике (с предварительно вычтенным фоном), деленная на показание счетчика интегратора. Статистическая погрешность в определении выходов (включающая погрешность, вносимую вычитаемым фоном) была меньше 3.5 % при всех положениях детектора и энергиях налетающих протонов.

Спектры в которых пики от процессов $^{14}\text{N}(\text{p,p})^{14}\text{N}$ и $\text{Ti}(\text{p,p})\text{Ti}$ заметно перекрывались, анализировались с использованием предположений, что титан имеет естественный изотопный состав и дифференциальные сечения упругого рассеяния протонов на изотопах титана являются чисто Резерфордовскими. Справедливость последнего утверждения основывается на результатах обработки тех спектров, в которых пики от процессов $^{14}\text{N}(\text{p,p})^{14}\text{N}$ и $\text{Ti}(\text{p,p})\text{Ti}$ надежно разделялись. Результаты обработки экспериментальных данных по упругому рассеянию $^{14}\text{N}(\text{p,p})^{14}\text{N}$ представлены на рисунке 3. Из рисунка видно, что при углах

$\theta_{\text{ц.м.}} = 32^{\circ} - 94.1^{\circ}$ и $E_{\text{р.лаб.}} = 700$ и 800 кэВ; $\theta_{\text{ц.м.}} = 32^{\circ} - 73.8^{\circ}$ и $E_{\text{р.лаб.}} = 900$ кэВ, $\theta_{\text{ц.м.}} = 32^{\circ}, 42.6^{\circ}, 53.1^{\circ}, 63.5^{\circ}, 73.8^{\circ}$ и $E_{\text{р.лаб.}} = 1$ МэВ, а также при $\theta_{\text{ц.м.}} = 32^{\circ}, 42.6^{\circ}, 53.1^{\circ}, 63.5^{\circ}$ и $E_{\text{р.лаб.}} = 1.1$ МэВ, с погрешностью 10%, экспериментальные сечения совпали с сечениями Резерфорда, в то время как при больших углах они заметно больше Резерфордовских.

Заключение

С 10% погрешностью получены экспериментальные данные по дифференциальным сечениям упругого $^{14}\text{N}(\text{p,p})^{14}\text{N}$ рассеяния при энергиях налетающих протонов $0.7 - 1.1$ МэВ и в угловом диапазоне $\theta_{\text{ц.м.}} = 32^{\circ} - 166^{\circ}$ с шагом 10° . В перекрывающихся областях результаты настоящего измерения хорошо согласуются с литературными данными. Сечения при углах передней полусферы и энергиях $E_{\text{р.лаб.}} = 0.7 - 1.1$ МэВ измерены в настоящей работе впервые. Было обнаружено, что для $\theta_{\text{ц.м.}} = 32^{\circ} - 94.1^{\circ}$ и $E_{\text{р.лаб.}} = 700$ и 800 кэВ; $\theta_{\text{ц.м.}} = 32^{\circ} - 73.8^{\circ}$ и $E_{\text{р.лаб.}} = 900$ кэВ, $\theta_{\text{ц.м.}} = 32^{\circ}, 42.6^{\circ}, 53.1^{\circ}, 63.5^{\circ}, 73.8^{\circ}$ и $E_{\text{р.лаб.}} = 1$ МэВ, а также при $\theta_{\text{ц.м.}} = 32^{\circ}, 42.6^{\circ}, 53.1^{\circ}, 63.5^{\circ}$ и $E_{\text{р.лаб.}} = 1.1$ МэВ, с погрешностью 10%, экспериментальные сечения совпадают с сечениями Резерфорда, в то время как при больших углах они заметно больше Резерфордовских.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке программы развития атомной энергетики в Республике Казахстан по теме «Получение экспериментальных и расчетных сечений ядерных реакций, выходов осколков деления на ускорительном комплексе ИЯФ РК».

Литература

- 1 Havnrek V., Hnatowicz V., Kvltek J. Cross section for 160° elastic scattering of 1.4 – 2.4 MeV protons from nitrogen and titanium // Czech. Jour. of Phys. – 1991. – V.41, №10. – P.921-928.
- 2 Bashkin S., Carlson R.R., and Douglas R.A. Cross Sections for Elastic Scattering and Reactions Due to Protons on ^{15}N // Phys. Rev. – 1959. – V.114, №6. – P.1552-1553.
- 3 Bolmgren C.R., Freier G.D, Likely J.G. and Famularo K.F. Differential cross section measurements for the elastic scattering of protons by ^{14}N // Phys. Rev. – 1957. – V.105, №1. – P.210-212.
- 4 de Boer R.J., Bardayan D.W., Gorres J., LeBlanc P.J., Manukyan K.V., Moran M.T., Smith K., Tan W., Uberseder E. and Wiescher M. Low energy scattering cross section ratios of $^{14}\text{N}(\text{p,p})^{14}\text{N}$ // Phys. Rev. C. – 2015. – V.91. – P.045804 (10p).
- 5 Hagedorn F.B., Mozer F.S., Webb T.S., Fowler W.A. and Louritsen C.C. Elastic scattering of protons by ^{14}N // Physical Review. – 1957. – V.105, №1. – P.219-226.
- 6 Ramos A.R., Paul A., Rijniens L., da Silva M.F., Soares J.C.. Measurement of (p,p) elastic differential cross-sections for carbon, nitrogen, oxygen, aluminium and silicon in the 500 – 2500 keV range at 140° and 178° laboratory scattering angles // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B. – 2002. – V.190. – P.95–99.
- 7 Tautfest George W., Rubin S. Elastic scattering pf protons from ^{11}B and ^{14}N // Phys. Rev. – 1956. – V.103. – №1. – P.196-199.
- 8 Burtbayev N., Igamov S.B., Peterson R.J., Yarmukhamedov R. and Zazulin D.M. New measurements of the astrophysical S-factor for $^{12}\text{C}(\text{p},\gamma)^{13}\text{N}$ reaction at low energies and the asymptotic normalization coefficient (nuclear vertex constant) for the $\text{p}+^{12}\text{C} \rightarrow ^{13}\text{N}$ reaction // Phys. Rev. C. – 2008. – V.78. – P.035802 (11p).

9 Дубовиченко С.Б., Буртебаев Н., Зазулин Д.М., Керимкулов Ж.К., Амар А.С.А. Астрофизический S-фактор реакции $p^6\text{Li} \rightarrow ^7\text{Be}\gamma$ -захвата // Яд. Физ. – 2011. – Т.74, №7. – С.1013-1028.

References

- 1 V. Havrnek, V. Hnatowicz, J. Kvltek, Czech. Jour. of Phys., 41 (10), 921-928, (2010).
- 2 S. Bashkin, R.R. Carlson, and R.A. Douglas, Phys. Rev., 114(6), 1552-1553, (1959).
- 3 C.R. Bolmgren, G.D Freier, J.G. Likely and K.F. Famularo, Phys. Rev., 105(1), 210-212, (1959).
- 4 R.J. deBoer, D.W. Bardayan, J. Gorres, P.J. LeBlanc, K.V. Manukyan, M.T. Moran, K. Smith, W. Tan, E. Uberseder and M. Wiescher, Phys. Rev. C 91, 045804, (2015).
- 5 F.B. Hagedorn, F.S. Mozer, T.S. Webb, W.A. Fowler and C.C. Louritsen // Physical Review, 105(1), 219-226, (1957).
- 6 A.R. Ramos, A. Paul, L. Rijniers, M.F. da Silva, J.C. Soares, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 190, 95–99, (2002).
- 7 W. Tautfest George, S. Rubin, Phys. Rev., 103(1), 196-199, (1956).
- 8 N. Burtebayev, S.B. Igamov, R.J. Peterson, R. Yarmukhamedov and D.M. Zazulin, Phys. Rev. C 78, 035802, (2008).
- 9 S.B. Dubovichenko, N. Burtebayeva, D.M. Zazulin, ZH.K. Kerimkulov, A.S.A. Amar, Nucl. Physics, 74(7), 1013-1028, (2011) (in russ).