

УДК 539.173

А. Дүйсебаев, Б.А. Дүйсебаев, Т.К. Жолдыбаев*, Б.М. Садықов

РГП Институт ядерной физики, Казахстан, г. Алматы

*E-mail: zholdybayev@inp.kz**Процессы рассеяния нуклидов ^3He , ^4He с $E = 50,5$ и 60 МэВ на ядрах ^{24}Mg**

Изложены новые экспериментальные результаты по упругому и неупругому рассеянию нуклидов ^3He , ^4He при энергиях 50 и 60 МэВ с возбуждением состояний 1,37 и 4,12 МэВ ядра ^{24}Mg . Представлен литературный обзор.

Анализ сечений упруго-рассеянных нуклидов ^3He , ^4He на исследуемом ядре выполнен в рамках стандартной оптической модели ядра с потенциалом Вудса-Саксона с разделенными формфакторами вещественной и мнимой частей. Получены оптимальные значения потенциалов межъядерного взаимодействия. При этом в качестве критерия соответствия результатов теоретических расчетов экспериментальным данным наряду с минимизацией величины χ^2 использовались и значения объемных интегралов от действительной части оптического потенциала.

Анализ сечений неупруго-рассеянных ионов гелия на ядрах ^{24}Mg проводился методом искаженных волн с макроскопическим формфактором коллективного возбуждения с использованием полученных из упругого рассеяния оптимальных параметров оптического потенциала. Также проведен анализ методом связи каналов, где расчет выполнялся с учетом как упругого, так и неупругих каналов, определено значение параметра квадрупольной деформации $\beta_2 = 0,36 - 0,34$ ядра ^{24}Mg .

Ключевые слова: упругое и неупругое рассеяние, нуклиды гелия, оптическая модель, оптический потенциал, метод искаженных волн, метод связанных каналов.

А. Дүйсебаев, Б.А. Дүйсебаев, Т.К. Жолдыбаев, Б.М. Садықов

 $E = 50,5$ және 60 МэВ-те ^{24}Mg ядроларында ^3He , ^4He нуклидтерінің шашырау процестері

50 және 60 МэВ энергияларда 1,37 және 4,12 МэВ энергиялы ^{24}Mg ядросының күйлерін қоздырумен ^3He , ^4He нуклидтерінің серпімді және серпімсіз шашыраулары бойынша жаңа эксперименттік нәтижелер баяндалды. Әдеби шолу ұсынылды.

Зерттелетін ядрода заттық және жорамал бөліктерінің бөлінген пішін-факторлары бар Вудс-Саксон потенциалды ядроның стандартты оптикалық моделі аясында ^3He , ^4He нуклидтерінің серпімді-шашырау кималарына талдау жасалды. Ядроаралық әрекеттесу потенциалдарының оңтайлы мәндері алынды. Бұл жағдайда эксперименттік деректермен жасалған теориялық есептеу нәтижелерінің сәйкестік критерийі ретінде χ^2 шамасының минимизациясымен қатар оптикалық потенциалдың нақты бөліктерінен алынған көлемдердің мәндері де қолданылды.

^{24}Mg ядроларындағы гелий иондарының серпімсіз-шашырау кималарының талдауы серпімді шашыраудан алынған оптикалық потенциалдың оңтайлы параметрлерін қолдана отырып бірлескен қозудың макроскопиялық пішін-факторы бар бұрмаланған толқындар әдісі арқылы жүргізілді. Сонымен қатар арналар байланысы әдісімен талдау жүргізілді, онда серпімді де, сондай-ақ серпімсіз арналарды да есепке ала отырып есептеу орындалды, ^{24}Mg ядросының $\beta_2 = 0,36 - 0,34$ квадрупольдік деформациясы параметрінің мәні анықталды.

Түйін сөздер: серпімді және серпімсіз шашырау, гелий нуклидтері, оптикалық модель, оптикалық потенциал, бұрмаланған толқындар әдісі, байланысқан арналар әдісі.

A. Duisebayev, B.A. Duisebayev, T.K. Zholdybayev, B.M. Sadykov
Scattering processes of nuclides ^3He , ^4He with $E = 50,5$ and 60 MeV on ^{24}Mg nuclei

New experimental results on elastic and inelastic scattering of nuclides ^3He , ^4He at energies 50 and 60 MeV of for ^{24}Mg at excited state 1.37 and 4.12 MeV are presented. The literature review is done.

The analysis of cross-sections of elastically scattered nuclides ^3He , ^4He on studied nucleus was performed using standard optical model with Woods-Saxon potential with separated form-factors of real and imaginary parts. The optimal values of inter-nuclear interaction potentials are obtained. As a criterion for matching the results of theoretical calculations with experimental data the minimization of the χ^2 values and the values of the volume integrals of the real part of the optical potential were used.

Analysis of cross sections of inelastic scattered ions of helium nuclei ^{24}Mg was carried out using the distorted waves with form-factor of a macroscopic collective excitation using optimal optical potential parameters obtained from elastic scattering. The analysis by the method of coupled channels, where the calculation was performed taking into account both the elastic and inelastic channels was done. The quadrupole deformation parameter $\beta_2 = 0.36 - 0.34$ of nucleus ^{24}Mg was defined.

Key words: elastic and inelastic scattering, helium nuclides, optical model, optical potential, method of distorted waves, coupled-channel method.

Введение

Определение межъядерного потенциала взаимодействия сложных частиц (нуклидов водорода, гелия) с ядрами остается одной из приоритетных задач ядерной физики низких и средних энергий. Исходная информация о нем извлекается из анализа экспериментальных дифференциальных сечений упругого рассеяния частиц и ядер с ядрами с последующим их анализом в рамках оптической модели (ОМ) ядра [1]. Проблема неоднозначности параметров потенциала, присущих этому подходу, могут быть сокращены при постановке экспериментов в максимально полном угловом диапазоне с измерением сечений как упругого, так и неупругого рассеяния.

Экспериментальные данные по рассеянию нуклидов гелия на ядрах ^{24}Mg при $E = 50 - 60$ МэВ отсутствуют, тогда как именно в этой области энергий проявляются эффекты «аномального рассеяния» назад (АРН) и «ядерной радуги» (ЯР), обусловленные преломляющими свойствами потенциала.

Эксперимент

Экспериментальные исследования упругого рассеяния на ядрах ^{24}Mg проводились на выведенном пучке ионов ^3He с энергией 60 МэВ и ^4He энергией 50,5 МэВ, ускоренных на изохронном циклотроне У-150М ИЯФ [2]. В настоящей работе определены сечения неупругого рассеяния нуклидов гелия при тех же энергиях с возбуждением состояний 1,37 и 4,12 МэВ ядра ^{24}Mg . Регистрация и идентификация рассеянных частиц осуществлялась спектрометрическим блоком, состоящим из

двух поверхностно-барьерных кремниевых детекторов ($\Delta E-E$ – метод) фирмы ORTEC: пролетного – ΔE и полного поглощения – E , толщина которых выбиралась в зависимости от энергии рассеянных частиц и изменялась для E счетчика в пределах от 500 мкм до 1 мм, а для ΔE счетчика – от 18 мкм до 100 мкм. Полное энергетическое разрешение спектрометрического тракта составляло ~ 500 кэВ и определялось, в основном, энергетическим разбросом первичного пучка ускоренных ионов гелия. После предварительного отбора по времени и амплитуде в спектрометрических каналах импульсы от ($\Delta E-E$) телескопа поступали на вход системы многомерного программируемого анализа с идентификацией продуктов ядерных реакций [3].

В качестве ядра-мишени использовалась самонесущая, изготовленная методом термического испарения, тонкая пленка из обогащенного изотопа $^{24}\text{Mg} - 99,1\%$ со средней эффективной толщиной 1 мг/см². Толщина мишени определялась методом взвешивания, а также по потерям энергии α -частиц радиоактивного источника $^{241}\text{Am} - ^{243}\text{Am} - ^{244}\text{Cm}$ с точностью 6 – 9%.

Угловые распределения рассеянных ионов на изотопе ^{24}Mg измерены в диапазоне углов $12 - 172^\circ$ в лабораторной системе координат с шагом $\sim 2 - 3^\circ$. Полная погрешность измеренных сечений не превышала 10% , где вклад статистических ошибок составляет (1 – 3)% для неупругого рассеяния и погрешность калибровки интегратора тока ($\sim 1\%$).

На рис. 1–2 совместно с нашими данными приведены имеющиеся экспериментальные

сечения упругого рассеяния ^4He на ядре ^{24}Mg при энергиях 18 МэВ [4], 22,2 МэВ [5], 24,2 МэВ [6], 40 МэВ [7], 65,7 МэВ [8], 104 МэВ [9]

и 120 МэВ [10], а также ионов ^3He при энергиях 33,3 МэВ [11], 35,7 МэВ [12] и 130 МэВ [13].

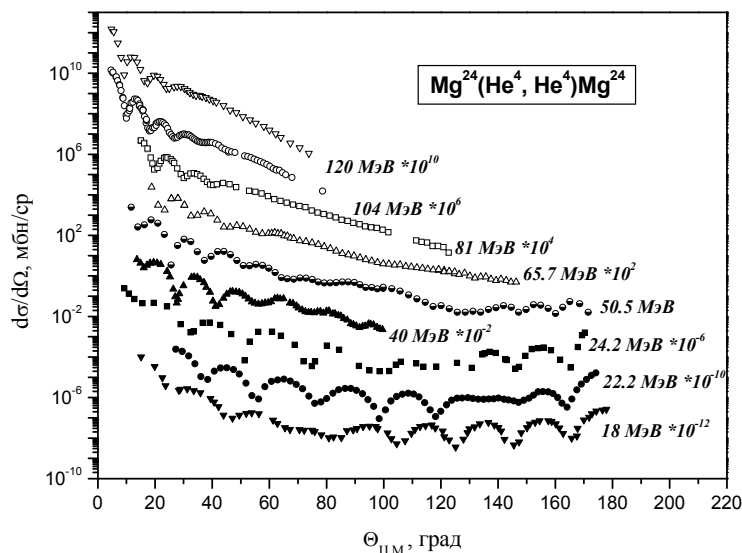


Рисунок 1 – Экспериментальные сечения упругого рассеяния ионов ^4He на ядре ^{24}Mg

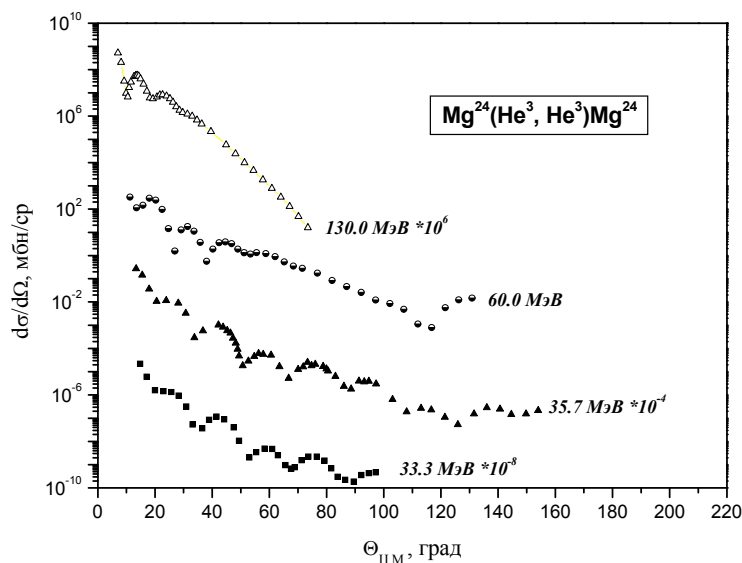


Рисунок 2 – Экспериментальные сечения упругого рассеяния ионов ^3He на ядре ^{24}Mg

Из них следует, что в интервале обратных углов $120\text{-}170^\circ$ в экспериментальных сечениях упругого рассеяния ионов ^4He осцилляции и эффекты аномального рассеяния назад четко проявляются вплоть до энергии 50 МэВ и исчезают при больших энергиях.

В случае упругого рассеяния ионов ^3He выраженная дифракционная структура проявляется в области углов до 160° при отно-

сительно низких энергиях – 35,7 МэВ. При энергии ^3He 60 МэВ осцилляции вырождаются, но начиная с угла 120° , наблюдается резкий рост сечения, обусловленный АРН. При энергии 130 МэВ происходит крутой спад сечения по экспоненте.

Анализ данных

Анализ экспериментальных данных

упруго-рассеянных ионов ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$ на ядрах ${}^{24}\text{Mg}$ выполнен в рамках стандартной ОМ [1], построенной на основе предположения о возможности описания взаимодействия нуклона или ядра с ядром комплексным потен-

циалом. Его действительная часть ответственна за рассеяние нуклона (ядра), а мнимая – за поглощение. Используемое в модели волновое уравнение Шредингера с комплексным потенциалом имеет вид

$$\hbar^2 / 2\mu \cdot \nabla^2 \cdot \Psi(\vec{r}) + [E - U(\vec{r})] \cdot \Psi(\vec{r}) = 0, \quad (1)$$

где $\Psi(\vec{r})$ – волновая функция частицы, $U(r)$ – комплексный потенциал взаимодействия, E – кинетическая энергия относительного движения в системе центра масс, μ – приведенная масса сталкивающихся систем. В качестве комплекс-

ного потенциала $U(\vec{r})$, как правило, используется потенциал Вудса-Саксона с разделенными формфакторами вещественной и мнимой частей, причем не только с разными радиусами, но и различной радиальной зависимостью мнимой части, вводя объемное

$$U(\vec{r}) = V(1 + \exp\frac{r - R_v}{a_v})^{-1} + iW_v(1 + \exp\frac{r - R_w}{a_w})^{-1} + V_c(r), \quad (2)$$

либо поверхностное поглощение

$$U(\vec{r}) = V(1 + \exp\frac{r - R_v}{a_v})^{-1} + 4iW_s \frac{d}{dr} \left[1 + \exp\frac{r - R_w}{a_w} \right]^{-1} + V_c(r). \quad (3)$$

Ядерная часть такого потенциала характеризуется вещественной V_0 и мнимой W_0 составляющими в центре ядра, его диффузностью a_w на периферии и радиусом потенциала $R_w = r_0 A^{1/3}$ фм, где A – масса ядра-мишени. $V_c(r)$ – кулоновский потенциал, принимаемый в виде потенциала равномерно

заряженной сферы с радиусом $R_C = r_0 A^{1/3}$ фм. Координата r представляет собой расстояние между центрами ядра и налетающей частицы.

Результаты анализа представлены на рисунках 3 – 4, где точки – экспериментальные данные, сплошные кривые – теоретическое описание в рамках оптической модели.

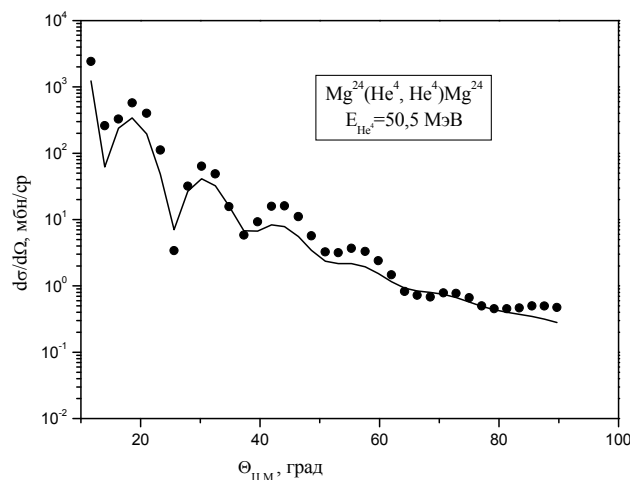


Рисунок 3 – Дифференциальные сечения упругого рассеяния ионов ${}^4\text{He}$ с энергией 50,5 МэВ на ядре ${}^{24}\text{Mg}$

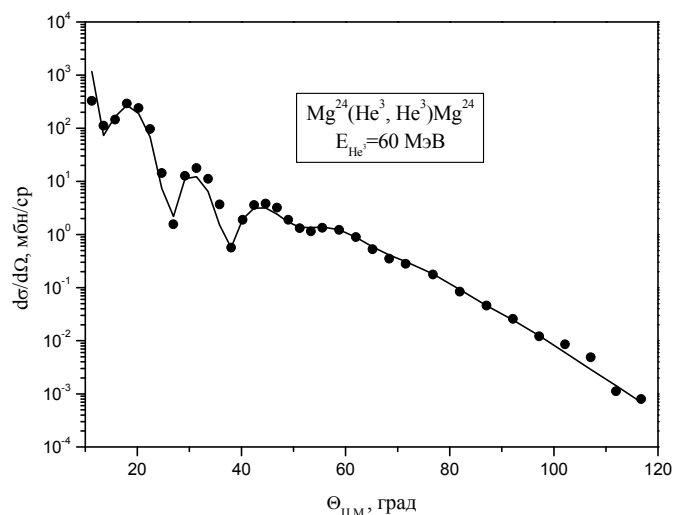


Рисунок 4 – Дифференциальные сечения упругого рассеяния ионов ^3He с энергией 60 МэВ на ядре ^{24}Mg

Параметры оптического потенциала подбирались таким образом, чтобы достичь наилучшего согласия между теоретическими расчетами, выполненными по программе SPI-GENOA [14], и экспериментальными сечениями. В качестве стартовых пара-

метров оптического потенциала использованы их величины, приведенные в работах [15, 16]. Автоматический поиск оптимальных параметров оптического потенциала производился путем минимизации величины:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\sigma^E(\theta_i) - \sigma^T(\theta_i)}{\Delta\sigma^E(\theta_i)} \right]^2, \quad (4)$$

где N – число точек; $\sigma^E(\theta_i)$, $\sigma^T(\theta_i)$ – экспериментальное и теоретическое дифференциальные сечения упругого рассеяния частиц под углом θ_i ; $\Delta\sigma^E(\theta_i)$ – погрешность $\sigma^E(\theta_i)$.

При выборе оптимальных параметров

оптического потенциала мы руководствовались не только величиной χ^2 , но и величиной объемного интеграла от реальной части V_0 оптического потенциала, определяемого как:

$$J_V = - \left(\frac{1}{A_p A_t} \right) \int V(r) 4\pi r^2 dr, \quad (5)$$

где A_p и A_t – массовые числа налетающей частицы и ядра-мишени, значение которого должно быть близким соответствующей величине нуклон-нуклонного потенциала взаимодействия, равной ≈ 400 МэВ·Фм³ [17].

Параметр кулоновского радиуса принимался равным $r_c = 1,3$ Фм. Полученные оптимальные параметры потенциала взаимодействия, значение объемного интеграла J_V и величины χ^2 приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры оптических потенциалов взаимодействия ионов ^4He , ^3He с ^{24}Mg

Ядро	Ионы	E (МэВ)	V_0 (МэВ)	r_0 (Фм)	a_0 (Фм)	W_V (МэВ)	r_V (Фм)	a_V (Фм)	J_V	χ^2
^{24}Mg	^4He	50,5	110,7	1,24	0,792	20,39	1,57	0,634	328	16,8
^{24}Mg	^3He	60	117,72	1,15	0,857	16,25	1,83	0,559	374	24,1

Анализ сечений неупругого рассеяния ионов ^3He , ^4He на ядрах ^{24}Mg проводился в рамках метода искаженных волн с макроскопическим формфактором коллективного возбуждения по программе DWUCK4 [18] с использованием полученных из упругого

рассеяния оптимальных параметров оптического потенциала (таблица 1).

Параметры деформации β_L ядра определялись путем нормировки расчетных сечений σ_{dwuck} к экспериментальным данным из соотношения:

$$d\sigma_L/d\Omega = \beta_L^2 \sigma_{\text{dwuck}}. \quad (6)$$

Результаты теоретических расчетов для возбужденных состояний приведены на рисунках 5–6, где точки – экспериментальные

данные, сплошные кривые – теоретический расчет. Параметр деформации β_2 ядра ^{24}Mg в случае ^4He составил 0,363, а в случае ^3He – 0,216.

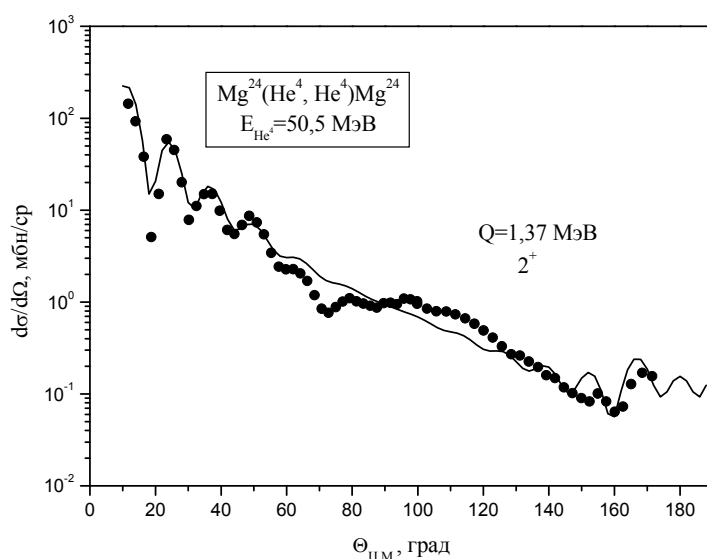


Рисунок 5 – Дифференциальные сечения неупругого рассеяния ионов ^4He с энергией 50,5 МэВ на ядре ^{24}Mg с энергией возбуждения 1,37 МэВ

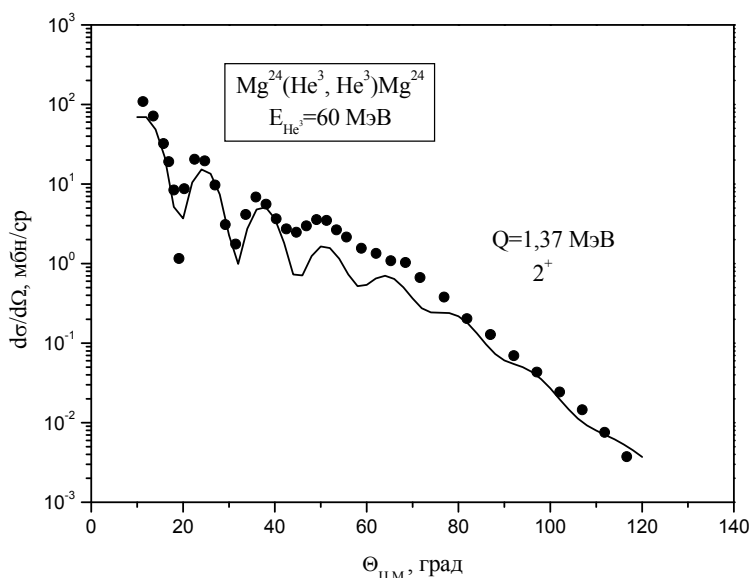


Рисунок 6 – Дифференциальные сечения неупругого рассеяния ионов ^3He с энергией 60 МэВ на ядре ^{24}Mg с энергией возбуждения 1,37 МэВ

С использованием оптических потенциалов таблицы 1 проведен анализ экспериментальных данных методом связи каналов, где расчет выполнялся с учетом как упругого, так и неупругих каналов рассеяния с возбуждением состояний 2^+ и 4^+ ^{24}Mg в ротационном приближении (расчетный код ECIS-88 [19]). Оптимальное соответствие расчетных величин с экспериментальными дан-

ными достигалось варьированием параметров V , W и β_2 . Результаты которых представлены на рисунках 7 – 8, где символы – экспериментальные данные, сплошные кривые – теоретические расчеты. Определены параметры деформации ядер $^{24}\text{Mg} + ^4\text{He}$: $\beta_2 = 0,361$ и для $^{24}\text{Mg} + ^3\text{He}$: $\beta_2 = 0,341$, близкие по величине соответствующим значениям из работы [9].

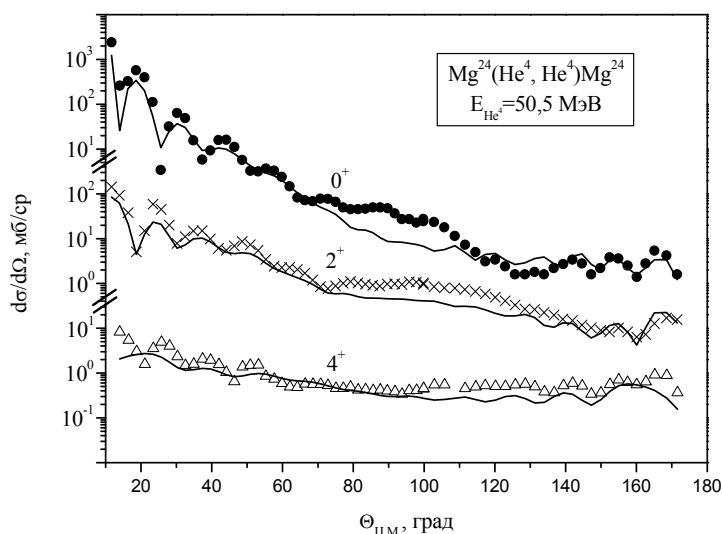


Рисунок 7 – Дифференциальные сечения упругого и неупругого рассеяния ионов ^4He с энергией $50,5$ МэВ на ядре ^{24}Mg с энергиями возбуждения для 2^+ , $Q = 1,37$ МэВ и для 4^+ , $Q = 4,12$ МэВ

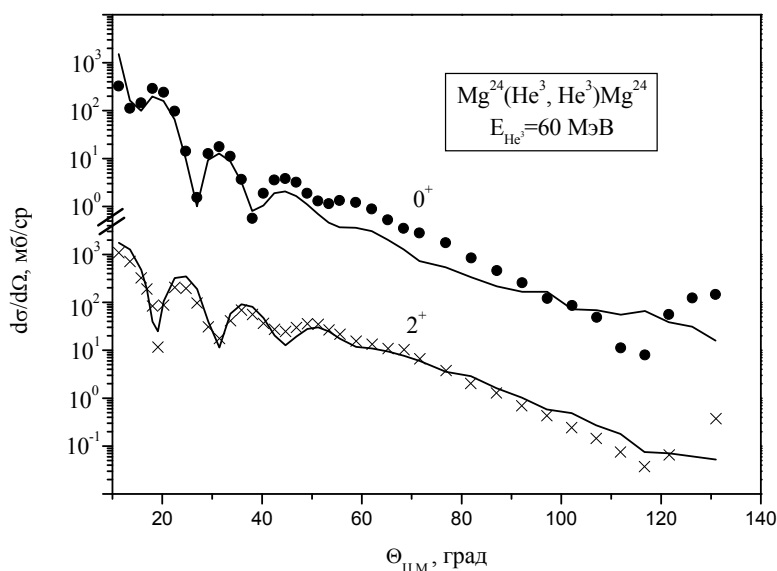


Рисунок 8 – Дифференциальные сечения упругого и неупругого рассеяния ионов ^3He с энергией 60 МэВ на ядре ^{24}Mg с энергиями возбуждения для 2^+ , $Q = 1,37$ МэВ

Работа выполнена при поддержке программы Грантового финансирования научных исследований МОН РК, грант 0605/ГФ.

References

1. Hodgson P.E. The nuclear optical model // *Rep. Progress Physics*. – 1971. – Vol.34. – P.765-819.
2. Burtebayev N.T., Duysebayev A.D., Ivanov G.N. Uprugoye rasseyaniye 50 MeV α -chastits na yadrakh 14N, 16O, 20Ne, 24Mg i 28Si // *Izv. AN KazSSR. Ser. fiz.-mat.* – 1984. – №6. – S.49-53.
3. Burtebayev N.T., Vinogradov A.A., Vongay A.D. i dr. Sistema mnogomernogo analiza dlya issledovaniya yadernykh reaktsiy na tsiklotrone IYAF AN KazSSR // *Izv. AN KazSSR. Ser. fiz.-mat.* – 1975. – № 2. – S.65-68.
4. Rongfang Y., Jian Y., Bingyin H., et.al. Backward angle anomaly in α - 24,25,26Mg scattering and 'Isotopic effect' // *Chin. J.of Nucl. Phys.* – 1982. – Vol.4. – P.193.
5. Lega J., Macq P.C. Angular momentum dependence in 22 MeV α -particle elastic scattering by light nuclei // *Nucl. Phys.* – 1974. – Vol.A218. – P.429-440.
6. Antropov A.E., Vasiljev S.I., Zarubin P.P., Orlov B.N. Elastic and inelastic scattering of α -particles through the large angles at the nuclear shell of 2s-1d // *Izv. Ross. Akad. Nauk, Ser.Fiz.* – 1974. – Vol.38. – P.2175-2185.
7. Gonchar V.Yu., Zheltonog K.S., Ivanov G.N., Kanashevich V.I., et.al. Features of diffraction scattering of α -particles on the ^{24}Mg and ^{28}Si nuclei // *Izv. Ross. Akad. Nauk, Ser.Fiz.* – 1968. – Vol.32. – P.604-607.
8. Reed M. The excitation of unnatural-parity states in ^{24}Mg , ^{20}Ne , and ^{16}O by inelastic α scattering // *Thesis: Reed.* – 1968. – 69-14.
9. Rebel H., Schweimer G.W., Schatz G., et.al. Quadrupole and hexadecapole deformation of 2s-1d shell nuclei // *Nucl. Phys.* – 1972. – Vol.182. – P.145.
10. Pignanelli M., Micheletti S., De Leo R., et.al. Nuclear matter density effects in monopole transitions // *Phys. Rev.* – 1986. – Vol.33. – P.40-49.
11. Entezami F., Basak A.K., Karban O., Lewis P.M., Roman S. Interaction of polarized ^3He particles with ^{24}Mg // *Nucl. Phys.* – 1981. – Vol.A366. – P.1-12.
12. Artemov K.P., Goldberg V.Z., Rudakov V.P., Serikov I.N. Large angle elastic scattering of ^3He // *Yadernaya Fizika.* – 1971. – Vol.13. – P.268-276.
13. Djalois A., Didelez J.-P., Galonsky A., Oelert W. Elastic scattering of 130 MeV ^3He // *Nucl. Phys.* – 1978. – Vol.A306. – P.221-228.
14. Perey F.G. SPI-GENOA an optical model search code // *NBI version.* – 1976.
15. Nolte M., Machner H., Bojowald J. Global optical potential for α -particles with energies above 80 MeV // *Phys. Rev.* – 1987. – Vol.C36. – P.1312.
16. Ershov S.N., Gareev F.A., Kurmanov R.S., et.al. Do rainbows observed in light ion scattering really pin down the optical potential? // *Phys. Lett.* – 1989. – Vol.227. – P.315-320.
17. Devries R.M., Goldberg D.A., Watson J.W., et.al. Transition between light- and heavy- ion elastic scattering // *Phys. Rev. Lett.* – 1977. – Vol.39. – P.450-461.
18. Kunz P.D. Computer program DWUCK 4 // University of Colorado, Boulder, Colorado, USA (unpublished).
19. Raynal J. ECIS-88 (unpubl).