

В.В. Дьячков^{ID}, **Я.В. Сидоров**, **А.В. Юшков**^{ID},
Ю.А. Зарипова^{ID}, **К.С. Дюсебаева**^{ID}

Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа,
Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
Казахстан, г. Алматы, e-mail: slava_kpss@mail.ru

МОДУЛЯЦИЯ УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ РАССЕЯННЫХ ИОНОВ ^{12}C НА ЯДРАХ ^{16}O И КЛАСТЕРНЫХ ЕГО ПОДСТРУКТУРАХ

Аннотация. В данной работе авторами рассмотрен вопрос об экспериментальном изучении кластерной структуры ^{16}O методом разложения экспериментальных угловых распределений дифференциальных сечений на кластерные дифракционные моды в упругом рассеянии заряженных частиц на кластерных ядрах. Описаны экспериментальные данные по реакции упругого рассеяния $^{16}\text{O}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{C})^{16}\text{O}$, взятые из международной базы данных EXFOR (M.P. Nicoli, F. Haas, R.M. Freeman, S. Szilner, Z. Basrak, A. Morsad, G.R. Satchler, M.E. Brandan. Universe-tyofHassanII), для энергий налетающих частиц 62 МэВ, 75 МэВ, 80 МэВ, 94,8 МэВ, 100 МэВ, 115,9 МэВ, 124 МэВ. Получены результаты разложения экспериментальных угловых распределений дифференциальных сечений на кластерные дифракционные моды упругого рассеяния ионов ^{12}C на ядрах ^{16}O , а также с помощью классической волновой оптики рассчитаны углы, в которых должны проявляться соответствующие кластерные структуры. Определены пики амплитуд рассеяния на различных кластерах в зависимости от энергии налетающих частиц. В углах, соответствующих пикам оптического рассеяния на альфа-кластерах при энергиях 62 МэВ, 75 МэВ, 80 МэВ, 94,8 МэВ, 100 МэВ, 115,9 МэВ, выявлены удовлетворительные совпадения экспериментальных данных с теоретическими кривыми. Определены размеры ядрамишени и кластерных подструктур. В результате подгонок получено, что наилучшим образом экспериментальные данные дифференциальных сечений угловых распределений упругого рассеяния ^{12}C на ^{16}O были описаны теоретическими кривыми в представлении об альфа-кластерной структуре ^{12}C и ^{16}O . Полученные аномально малые радиусы внутриядерных альфа-кластеров по отношению к классическому радиусу свободной альфа-частицы объясняются, скорее всего, тем, что альфа-кластеры находятся в связанном состоянии и окружены ядерной материей, что приводит к повышенной плотности материи. Помимо этого, возможно, уменьшение радиусов внутриядерных альфа-кластеров за счет так называемого EMC-эффекта.

Ключевые слова: упругое рассеяние заряженных частиц на легких ядрах, кластерные ядра, альфа-кластеры, дифракционное упругое рассеяние, аналогия с оптической дифракцией света на щели.

*V.V. Dyachkov, Ya.V. Sidorov, A.V. Yushkov,
Yu.A. Zaripova, K.S. Dyussebayeva

National open-type nanotechnology laboratory,
Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty,
e-mail: slava_kpss@mail.ru

Modulation of angular distribution of scattered ions ^{12}C on nuclei ^{16}O and cluster its substructures

Abstract. In this paper, the authors considered the question of the experimental study of the ^{16}O cluster structure by decomposing the experimental angular distributions of differential cross sections into cluster diffraction modes in elastic scattering of charged particles on cluster nuclei. Experimental data on the reaction of elastic scattering $^{16}\text{O}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{C})^{16}\text{O}$, taken from the international database EXFOR (M.P. Nicoli, F. Haas, R.M. Freeman, S. Szilner, Z. Basrak, A. Morsad, G.R. Satchler, M.E. Brandan. Universe-tyofHassanII), for incident particle energies of 62 MeV, 75 MeV, 80 MeV, 94.8 MeV, 100 MeV, 115.9 MeV, 124 MeV are described. The results of decomposition of experimental angular distributions of differential cross sections into cluster diffraction modes of elastic scattering of ^{12}C ions on ^{16}O nuclei, as well as using classical wave optics, calculated the angles in which the corresponding cluster structures

should appear. Peaks of scattering amplitudes on various clusters were determined depending on the energy of the incident particles. At the angles corresponding to the peaks of optical scattering on alpha clusters at energies of 62 MeV, 75 MeV, 80 MeV, 94.8 MeV, 100 MeV, 115.9 MeV satisfactory agreement of the experimental data with theoretical curves was revealed. The sizes of the target nucleus and cluster substructures are determined. As a result of the fittings, it was found that the best experimental data of the differential cross sections for the angular distributions of 12-C to 16-O elastic scattering were described by theoretical curves in the concept of the 12-C and 16-O alpha-cluster structure. The resulting abnormally small radii of intranuclear alpha clusters with respect to the classical radius of free alpha particles are most likely explained by the fact that alpha clusters are in a bound state and are surrounded by nuclear matter, which leads to an increased density of matter. In addition, it is possible that the radii of intranuclear alpha clusters are reduced due to the so-called EMC effect.

Key words: elastic scattering of charged particles on light nuclei; cluster nucleus; alpha clusters; diffraction elastic scattering; analogy with optical diffraction of light on a slit.

В.В. Дьячков, Я.В. Сидоров, А.В. Юшков,
Ю.А. Зарипова, К.С. Дүйсебаева

ҚазҰУ-дың ашық түрдегі ұлттық нанотехнологиялық зертханасы,
өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.,
e-mail: slava_kpss@mail.ru

^{16}O ядроларында және оның кіші құрылымдарында ^{12}C шашыраңқы иондарының бұрыштық таралуының модуляциясы

Аңдатпа. Бұл жұмыста авторлар 16-О құрылымын кластерлік ядроларда зарядталған бөлшектердің серпімді шашырауында кластерлік дифракциялық, дифференциалдық кималардың эксперименталдық бұрыштық үлестірімдерін ыдырату әдісімен эксперименталдық зерттеу туралы мәселе қаралды. EXFOR (M.P. Nicoli, F. Haas, R.M. Freeman, S. Szilner, Z. Basrak, A. Morsad, G.R. Satchler, M.E. Brandan. University of Hassan II), халықаралық деректер қорынан алынған ^{16}O (^{12}C , ^{12}C) ^{16}O серпімді шашырау реакциясы бойынша эксперименттік деректер сипатталған ұшатын бөлшектердің энергиялары үшін 62 МэВ, 75 МэВ, 80 МэВ, 94,8 МэВ, 100 МэВ, 115,9 МэВ, 124 МэВ. 16-О ядроларында 12-С иондарының серпімді шашырауының кластерлік дифракциондық, дифференциалды кималардың эксперименталдық бұрыштық таралуының ыдырау нәтижелері алынды, сондай-ақ классикалық толқындық оптика көмегімен тиісті кластерлік құрылымдар көрініс табуы тиіс бұрыштар есептелген. 16-О ядроларында 12-С иондарының серпімді шашырауының кластерлік дифракциялық сәніне дифференциалды кималардың эксперименталдық бұрыштық таралуының ыдырау нәтижелері алынды, сондай-ақ классикалық толқындық оптика көмегімен тиісті кластерлік құрылымдар бұрыштары есептелген. Ұшатын бөлшектердің энергиясына байланысты әртүрлі кластерлерде шашырау амплитудасының шыңдары анықталды. 62 МэВ, 75 МэВ, 80 МэВ, 94,8 МэВ, 100 МэВ, 115,9 МэВ энергиялары кезіндегі альфа-кластерлерде оптикалық шашыраудың тиісті шыңдарына сәйкес бұрыштарында эксперименттік деректердің теориялық қисықтар мен қанағаттанарлық сәйкестігі анықталды. Нысананың ядросының және кластерлік кіші құрылымның өлшемдері анықталды. Қалыптардың нәтижесінде 16-О-ға 12-С серпімді шашыраудың бұрыштық үлестірулерінің дифференциалдық кималарының ең жақсы экспериментальды деректері 12-С және 16-О альфа-кластерлік құрылымы туралы көріністе теориялық қисықтармен сипатталғаны алынды. Еркін альфа-бөлшектің классикалық радиусына қатысты ядроішілік альфа-кластерлердің алынған, аномальды шағын радиустары альфа-кластерлер байланысты күйде және ядролық материалмен қоршалуымен түсіндіріледі, бұл материяның жоғарытығыздығына әкеледі. Бұдан басқа, EMC-әсері есебінен ядроішілік альфа-кластерлер радиустарының азаюы мүмкін.

Түйін сөздер: жеңіл ядроларда зарядталған бөлшектердің серпімді шашырауы, кластерлік ядролар, альфа-кластерлер, дифракциялы серпімді шашырауы, жарықтың оптикалық дифракциясы бараналогия.

Введение

В настоящее время в ядерной физике активно разрабатываются кластерные ядерные модели. Особенно большие успехи достигнуты в области легчайших ядер – ${}^6\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$ [1], мультикластерная структура которых теоретически строго обоснована. Исторически, фундамент для создания микроскопической теории кластерных систем был заложен работой Д.А. Уиллера [2]. В работах К. Вильдермута и Я. Тана модель Уиллера, метод резонирующих групп, была развита для описания широкого класса ядерных систем и процессов на них [3]. В конце 80-х и середине 90-х годов прошлого века продолжалось активное изучение кластерных аспектов структуры ядра [4, 5]. Для теоретического описания кластерных моделей необходимо применять, учитывать схему принципа Паули. Для этого существует два способа. В первом способе феноменологически вводится отталкивающийся kern ядра в потенциал взаимодействия. Во втором способе потенциал строится на притягивающем ядерном взаимодействии кластерных структур ядра [6, 7], в котором из спектра составной, кластерной системы исключаются глубоко лежащие запрещенные состояния. В рамках этого способа недостаточно анализировать только экспериментальные данные упругого рассеяния, то изучаются другие неупругие процессы. В частности, в [8-10] изучается тормозное излучение в pp - и $n\alpha$ - столкновениях.

Так, например, легкие ядра, вплоть до 40-Са и особенно 4n-ядра сильно кластеризованны, что сказывается на проявлении различных кластерных эффектов при взаимодействии, в частности, с пучками ионов. Анализ таких ядер по-прежнему представляет большой интерес. Экспериментальное подтверждение кластерной ядерной структуры было выполнено в [11] и разработан кинематический метод, который позволяет выделять из возбужденных состояний спектра упругого рассеяния доминирующих типов кластерных конфигураций в сложном ядре [12, 13]. Другим из методов экспериментального определения кластерной структуры является разложение экспериментальных угловых распределений дифференциальных сечений на кластерные дифракционные моды в упругом рассеянии заряженных частиц на клас-

терных ядрах [14, 15]. В этом методе впервые был объяснен, неясный до тех пор, феномен существенного превышения сечений над Резерфордским при малых углах в дифференциальных сечениях упруго рассеянных заряженных частиц на ядрах. Это превышение оказалось фрагментом простой дифракционной картины с осцилляциями большого периода, чем осцилляции на ядре-матрице в целом. Этот большой период оказался первым дифракционным кольцом на внутриядерных пространственно обособленных α -кластерах. Такое объяснение является достоверным, так как существование α -частичной ядерной материи было всесторонне исследовано и, таким образом, доказано ранее [16] на базе иных экспериментальных данных.

В данной работе приводятся результаты разложения экспериментальных угловых распределений дифференциальных сечений на кластерные дифракционные моды упругого рассеяния ионов ${}^{12}\text{C}$ на ядрах ${}^{16}\text{O}$, а так же с помощью классической волновой оптики рассчитаны углы, в которых должны проявляться соответствующие кластерные структуры.

Экспериментальные процедуры и методология

Анализ угловых распределений упругого рассеяния был сделан на основе модели, в которой амплитуда дифракционного упругого рассеяния легких ядер, в рамках теории дифракционного рассеяния, описывается как суперпозиция волновых функций в приближении рассеяния на абсолютно черном ядре и на абсолютно черных его подструктурах. То есть, в предположении полного поглощения при взаимодействии налетающих ионов со сферами кластерной структуры и сферой ядра-мишени.

При пространственной дифференциации кластеров, разложение амплитуды осуществляется в ряд по функциям Бесселя первого порядка с соответствующими аргументами и феноменологическими коэффициентами

$$a_i = \frac{iR_i}{\theta}$$

при этих функциях, которые являются

результатом ряда модельных предположений, выдвинутых в теории дифракционного рассеяния на абсолютно черном ядре

$$A(\theta) = \sum_{i=1}^n A_i(R_i, \theta) = \sum_{i=1}^n \frac{iR_i}{\theta} J_1(kR_i\theta) = \sum_{i=1}^n a_i J_1(kR_i\theta) \quad (1)$$

где $A_i(R_i, \theta) = \frac{iR_i}{\theta} J_1(kR_i\theta) = a_i J_1(kR_i\theta)$ – амплитуда на i -й кластерной подструктуре ядра; n – количество кластерных структур в ядре.

Описание дифференциального сечения кластерной структуры атомных ядер в рамках борновского приближения было предложено Хельмом в 1956 году [17]. Роль кластерных конфигураций в атомных ядрах исследовалась Гридневым К.А. в 2002 году [18].

В работе [14] авторами было представлено ядро как система, состоящая из бинарной структуры. При $i=1$ рассеяние происходит на самом ядре, а при $i=2$ рассеяние происходит на альфа-кластере. Исходя из этих представлений, сечение рассеяния для описания дифракционного упругого рассеяния 4π легких ядер в рамках теории дифракционного рассеяния как суперпозиций волновых функций в приближении на абсолютно черном ядре и на абсолютно черных его подструктурах будет иметь следующий вид

$$\sigma(\theta) = |a_1 \cdot J_1(kR_1\theta) + a_2 \cdot J_1(kR_2\theta)|^2 \quad (2)$$

Также в [14] было установлено, что экспериментальное угловое распределение можно разложить на две дифракционных моды (с малым периодом осцилляций – рассеяние на ядре как целом и с большим периодом осцилляций – рассеяние на альфа-кластерных подструктурах ядра).

В предположении аналогии дифракции налетающих частиц на кластерах с оптической дифракцией света на щели (непрозрачном препятствии), были рассчитаны угловые распределения интенсивностей по классической формуле [19]

$$I_\varphi = I_0 \frac{\sin^2[(\pi/\lambda) b \sin \varphi]}{[(\pi/\lambda) \sin \varphi]^2} \quad (3)$$

где, в нашем случае, λ – длина волны де Бройля налетающей частицы, b – ширина щели, которая в данной работе имеет размер кластера.

На рисунке 1 представлена интенсивность рассеяния пучка заряженных ионов на кластере с характерным размером b , которая имеет осцилляции (пики первого и второго порядка) при соответствующих углах.

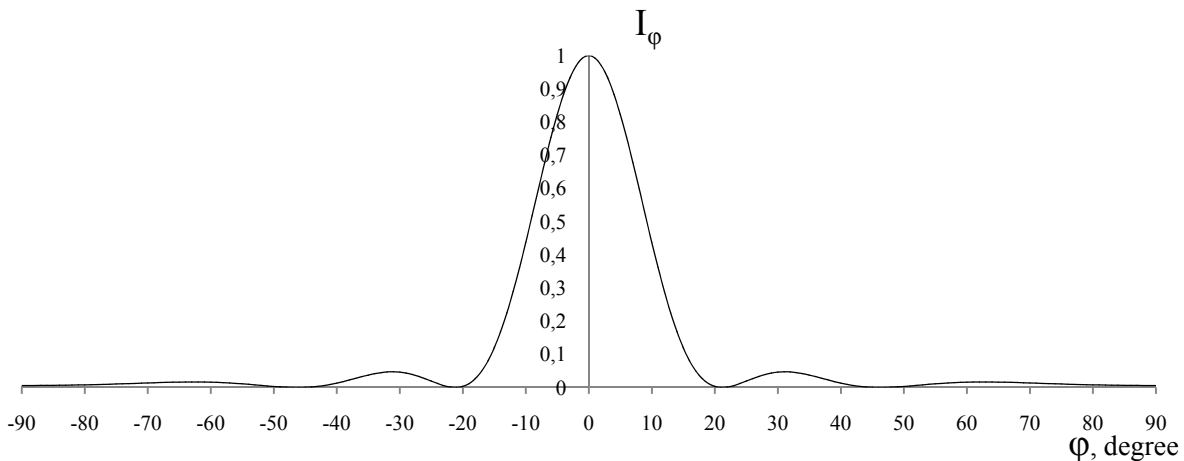


Рисунок 1 – Угловое распределение интенсивности рассеяния пучка заряженных ионов на кластере

Поиск оптимальных параметров теории к экспериментальным данным производился по критерию Пирсона путем минимизации величины χ^2

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{(\sigma_i)_T - (\sigma_i)_E}{\Delta(\sigma_i)_E} \right]^2 \quad (4)$$

где $(\sigma_i)T$ и $(\sigma_i)E$ – рассчитанные и экспериментальные величины дифференциальных сечений для данного угла θ , N – число измеренных точек.

Анализ экспериментальных данных

В результате подгонок модели (2) из [14] на рисунках 2-8 представлены теоретические зависимости угловых распределений упругого

рассеяния 12-C на 16-O из которых видно, с учетом небольших замечаний, удовлетворительное согласие с экспериментальными данными. На этих графиках теоретические расчеты были выполнены для случая, когда рассеяние пучка тяжелых ионов происходит на самом ядре-мишени как целом и на альфа-кластере. В представленной работе с помощью классической волновой оптики (3) рассчитаны углы, в которых должны проявляться соответствующие кластерные структуры.

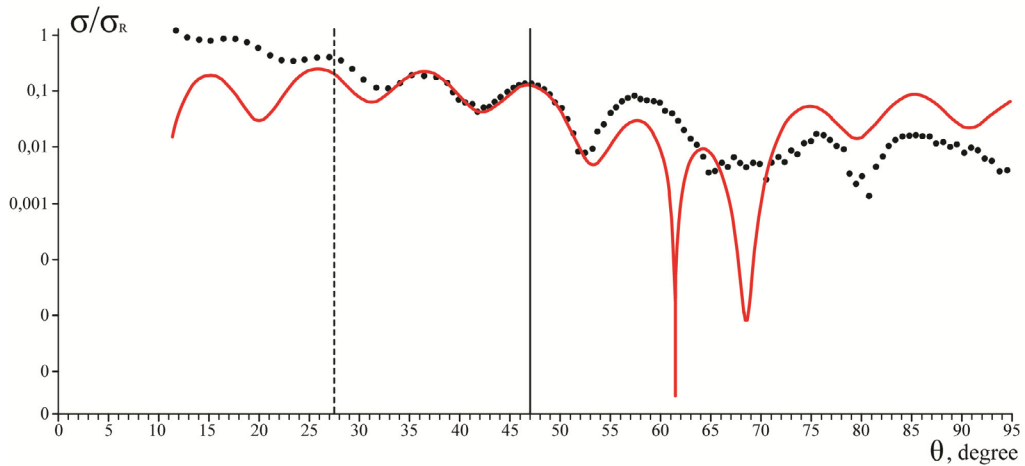


Рисунок 2 – Результаты разложения амплитуды упругого дифракционного рассеяния 12-C на 16-O с энергией E=62 МэВ, точки – экспериментальные данные; сплошная кривая – расчет (2). Штрихпунктирная и сплошная прямые соответствуют пику первого порядка на ядре как целом и на альфа кластере (3)

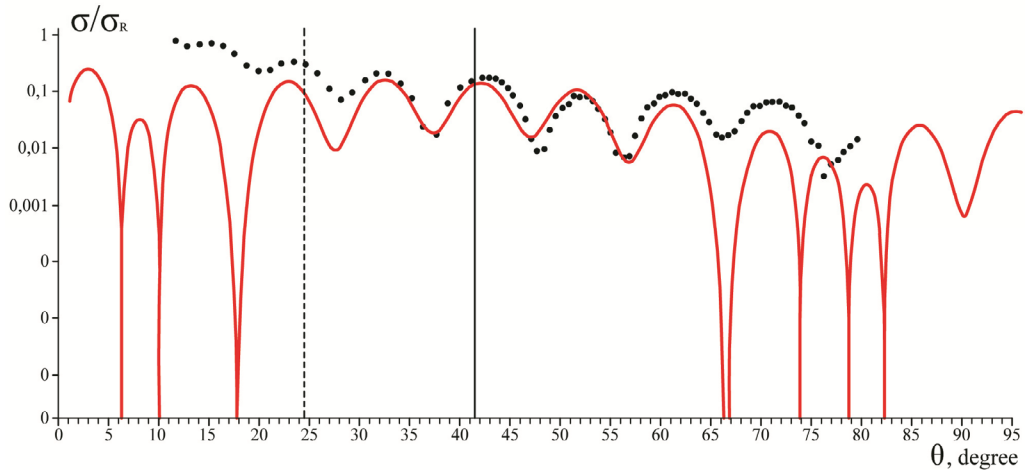


Рисунок 3 – Результаты разложения амплитуды упругого дифракционного рассеяния 12-C на 16-O с энергией E=75 МэВ, точки – экспериментальные данные; сплошная кривая – расчет (2). Штрихпунктирная и сплошная прямые соответствуют пику первого порядка на ядре как целом и на альфа кластере (3)

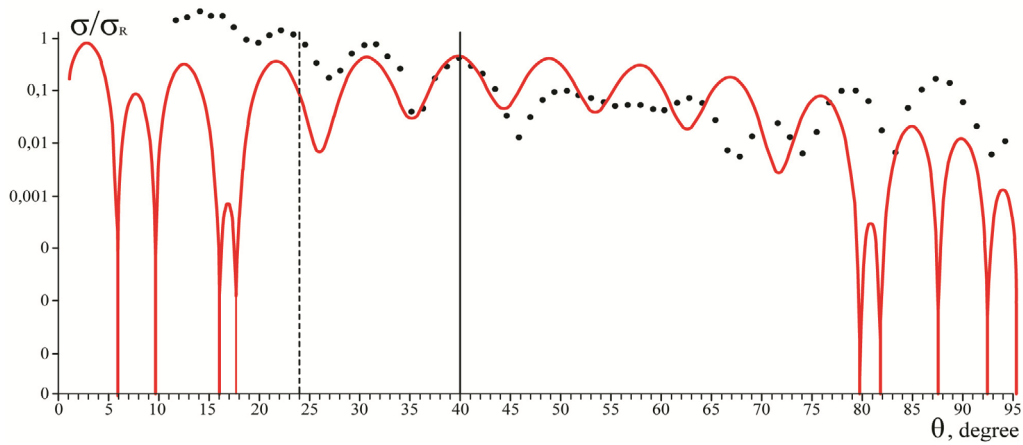


Рисунок 4 – Результаты разложения амплитуды упругого дифракционного рассеяния ^{12}C на ^{16}O с энергией $E=80$ МэВ, точки – экспериментальные данные; сплошная кривая – расчет (2). Штрихпунктирная и сплошная прямые соответствуют пику первого порядка на ядре как целом и на альфа кластере (3)

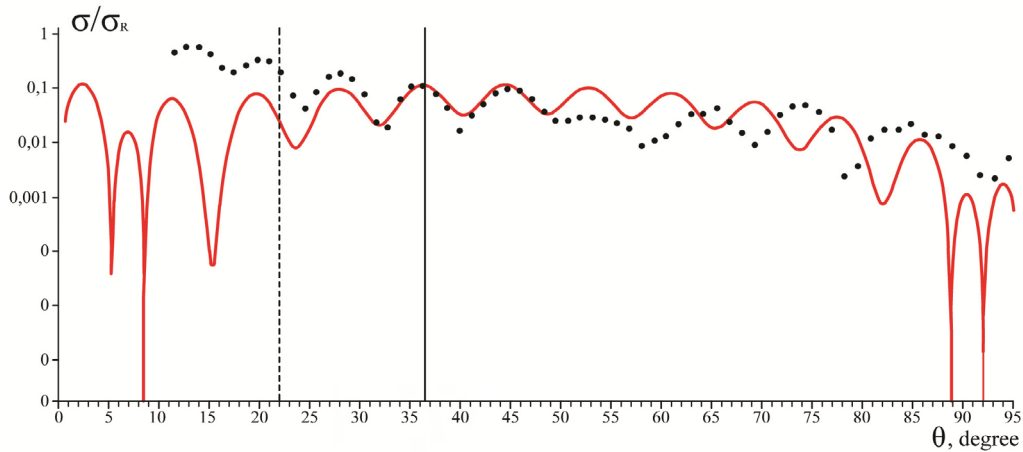


Рисунок 5 – Результаты разложения амплитуды упругого дифракционного рассеяния ^{12}C на ^{16}O с энергией $E=94,8$ МэВ, точки – экспериментальные данные; сплошная кривая – расчет (2). Штрихпунктирная и сплошная прямые соответствуют пику первого порядка на ядре как целом и на альфа кластере (3)

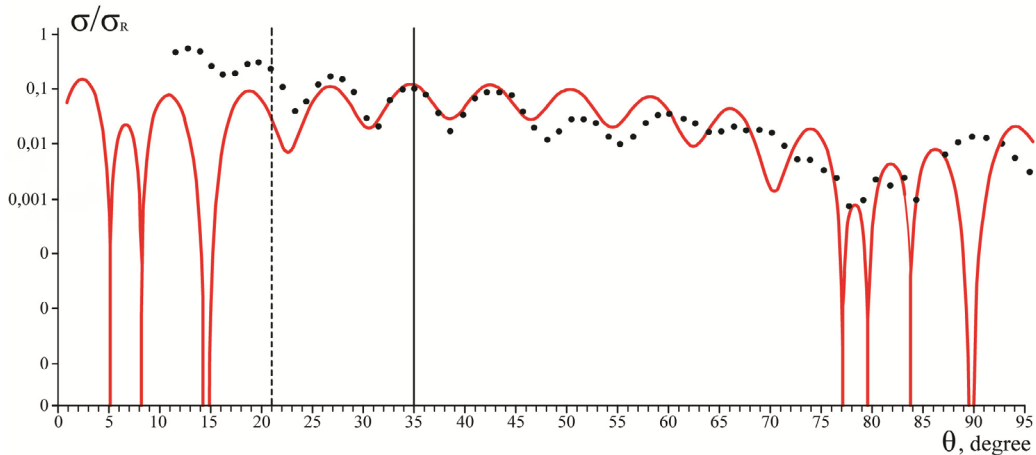


Рисунок 6 – Результаты разложения амплитуды упругого дифракционного рассеяния ^{12}C на ^{16}O с энергией $E=100$ МэВ, точки – экспериментальные данные; сплошная кривая – расчет (2). Штрихпунктирная и сплошная прямые соответствуют пику первого порядка на ядре как целом и на альфа кластере (3)

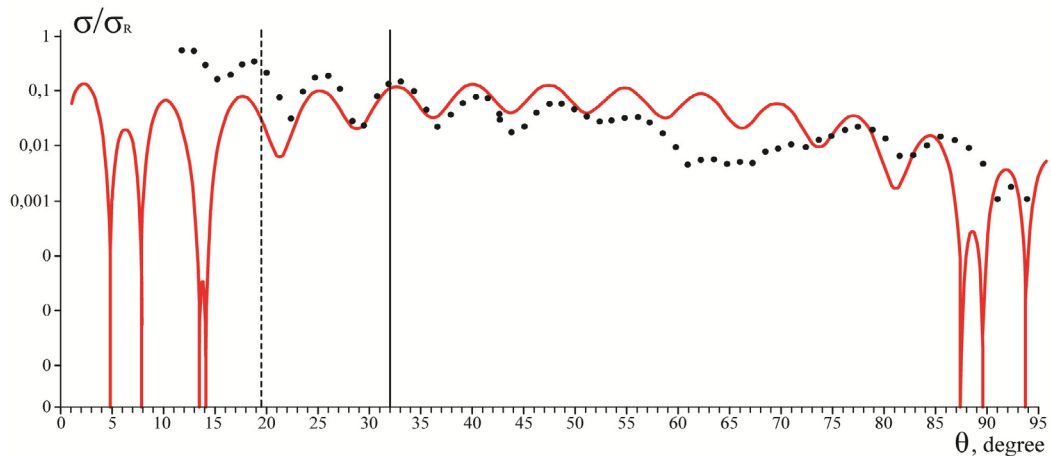


Рисунок 7 – Результаты разложения амплитуды упругого дифракционного рассеяния 12-С на 16-О с энергией $E=115,9$ МэВ, точки – экспериментальные данные; сплошная кривая – расчет (2). трихпунктирная и сплошная прямые соответствуют пику первого порядка на ядре как целом и на альфа кластере (3)

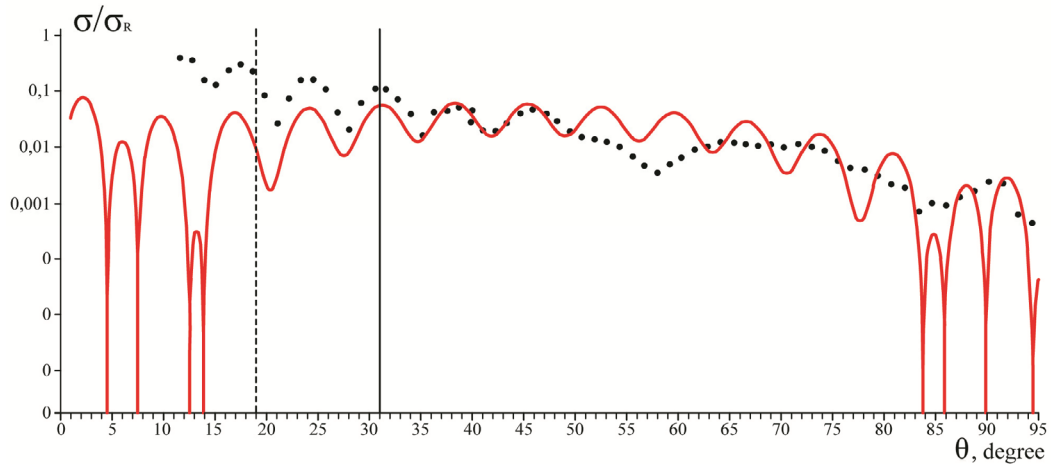


Рисунок 8 – Результаты разложения амплитуды упругого дифракционного рассеяния 12-С на 16-О с энергией $E=124$ МэВ, точки – экспериментальные данные; сплошная кривая – расчет (2). Штрихпунктирная и сплошная прямые соответствуют пику первого порядка на ядре как целом и на альфа кластере (3)

Из рис. 2-7 видно, что в области рассчитанных углов по (3) в угловых распределениях наблюдается наилучшее согласие подгонок теории (2) к эксперименту. Это показывает, что выполненные расчеты по законам классической волновой оптики удовлетворительно работают в области ядерного упругого рассеяния частиц. На рис. 8 наблюдается несовпадение теоретических распределений и экспериментальных данных в области интерференционного пика первого порядка на самом ядре и на альфа-кластере. Это связано, скорее всего, с сильным влиянием кулоновского взаимодействия, которое не учитывается в классической волновой оптике.

В таблице 1 представлены результаты расчетов радиусов ядра-мишени, альфа-кластера и весовые коэффициенты при соответствующих амплитудах рассеяния. Помимо этого в таблице вычислены классические радиусы 16-О и альфа-частицы. Видно, что радиусы ядра-мишени превышают классический радиус. Это связано с тем, что радиус, полученный из (2), является радиусом взаимодействия, в котором необходимо учитывать радиус налетающих ионов 12-С. Малость радиуса альфа-кластера, вычисленного по (2), по отношению к классическому радиусу свободной альфа-частицы, видимо, объясняется тем, что альфа-кластер находится в связанном состоянии в окружении ядерной м-

атерии. Возможно, второй причиной уменьшения радиусов внутриядерных альфа-кластеров объясняется проявлением так называемого ЕМС-эффекта [20].

Результаты радиусов ядра-мишени и внутриядерного альфа-кластера представлены на

рисунках 9-10. В таблице 2 представлены результаты расчета положений интерференционных пиков первого и второго порядков для различных нуклонных ассоциаций (кластеров) при разных энергиях налетающих ионов ^{12}C .

Таблица 1 – Таблица параметров разложения амплитуд рассеяния на кластерных подструктурах

Энергия МэВ	R_1	R_2	R_1 Классич.	R_2 Классич.	a_1	a_2	a_1/a_2
62	3,82	0,4	3,28	2,06	0,4	0,4	1,00
75	3,9	0,3	3,28	2,06	0,6	0,2	3,00
80	4	0,25	3,28	2,06	0,6	0,2	3,00
94,8	4,04	0,22	3,28	2,06	0,3	0,2	1,50
100	4,1	0,24	3,28	2,06	0,4	0,2	2,00
115,9	4,1	0,2	3,28	2,06	0,3	0,2	1,50
124	4,1	0,2	3,28	2,06	0,2	0,1	2,00

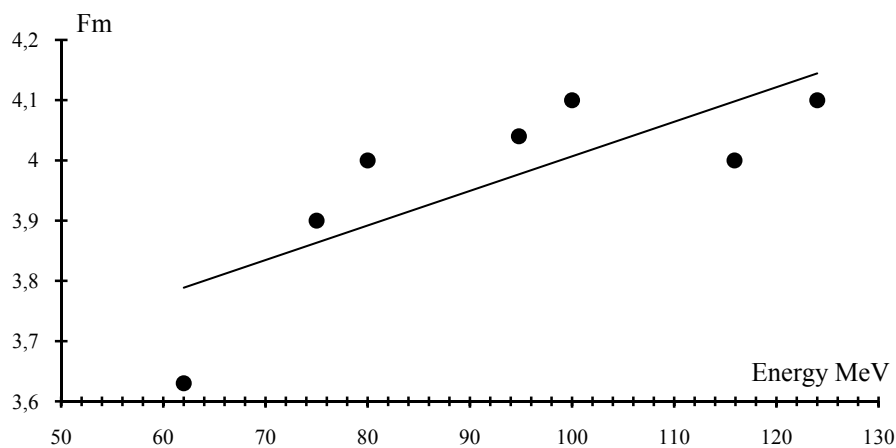


Рисунок 9 – Зависимость радиуса ядра-мишени ^{16}O , полученного из (2), от энергии налетающих ионов

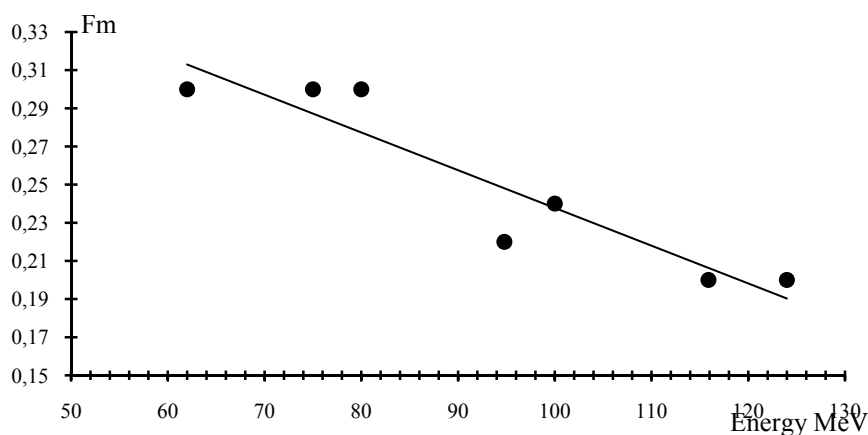


Рисунок 10 – Зависимость радиуса внутриядерного альфа-кластера, полученного из (2), от энергии налетающих ионов

Таблица 2 – Таблица углов, при которых наблюдаются максимумы амплитуд рассеяния по (3) на кластерах в зависимости от различных энергий

Энергия МэВ	Положение интерференционного пика 1 порядка (градусы)						Положение интерференционного пика 2 порядка (градусы)						Положение интерференционного пика 3 порядка (градусы)								
	Кластеры						Кластеры						Кластеры								
	О	N	С	В	Ве	Li	He	О	N	С	В	Ве	Li	He	О	N	С	В	Ве	Li	He
62	27,5	29	30,5	31,5	34	40	47	52,5	56	61	64	73	90	-	-	-	-	-	-	-	-
75	24,5	26	27,5	28,5	30,5	35,5	41,5	46	49	53	55	61	85	-	85	-	-	-	-	-	-
80	24	25	26,5	27,5	29,5	34	40	44	47	50,5	53,5	58	75	90	76	90	-	-	-	-	-
94,8	22	23	24	25	27	31	36,5	40	42	45	46,5	51,5	62,5	85	64,5	70	79	-	-	-	-
100	21	22	23	24	26	30	35	38,5	41	43	44,5	49	59,5	78	61,5	67,5	74	83	-	-	-
115,9	19,5	20,5	21,5	22,5	24	28	32	35	37	39,5	41	45,5	53,5	66	55	59	68	79	80	-	-
124	19	20	21	21,5	23	27	31	34	36	38	39,5	43	51	62	52	56	60,5	63	72	90	-

Заключение

Таким образом, в данной работе было получено следующее. Получены результаты разложения экспериментальных угловых распределений дифференциальных сечений на кластерные дифракционные моды упругого рассеяния ионов 12-С на ядрах 16-О, а так же с помощью классической волновой оптики рассчитаны углы, в которых должны проявляться соответствующие кластерные структуры. Определены пики амплитуд рассеяния на различных кластерах в зависимости от энергии налетающих частиц. В углах соответствующих пикам оптического рассеяния на альфа кластерах при энергиях 62 МэВ, 75 МэВ, 80 МэВ, 94,8 МэВ, 100 МэВ, 115,9 МэВ выявлены удовлетворительные совпадения экспериментальных данных

с теоретическими кривыми. Определены размеры ядра-мишени и кластерных подструктур. В результате подгонок получено, что наилучшим образом экспериментальные данные дифференциальных сечений угловых распределений упругого рассеяния 12-С на 16-О были описаны теоретическим кривыми в представлении об альфа-кластерной структуре 12-С и 16-О.

Полученные, аномально малые радиусы внутриядерных альфа-кластеров по отношению к классическому радиусу свободной альфа-частицы, объясняются, скорее всего, тем, что альфа-кластеры находятся в связанном состоянии и окружены ядерной материей, что приводит к повышенной плотности материи. Помимо этого, возможно, уменьшение радиусов внутриядерных альфа-кластеров за счет так называемого EMC-эффекта.

Литература

- 1 Ибраева Е.Т., Жусупов М.А., Имамбеков О., Сахиев С.К. Исследование структуры легких нестабильных ядер и механизм упругого протонного рассеяния // ЭЧАЯ.– 2011.– Т.42.– Вып. 6.– С. 1600-1691.
- 2 Wheeler J.A. On the Mathematical Description of Light Nuclei by the Method of Resonating Group Structure // Phys. Rev. – 1937. – Vol.52. – P.1107-1122.
- 3 Вильдермут К., Тан Я., Единая теория ядра. – М.:Мир, 1980. – 502с.
- 4 VargaK., Suzuki Y., Precise solution of few body problems with stochastic variational method on correlated gaussian basis// Phys. Rev. – 1995. – Vol.C52. – P.2885-2905.
- 5 Kanada H., Kaneko T., Tang Y.C. Multi-configuration resonating-group study of the five-nucleon system // Nucl. Phys. – 1989. – Vol. A504. – P.529-548.
- 6 Neudatchin V.G., Kukulin V.I., Korotkikh V.L., Korennoy V.P. A microscopically substantiated local optical potential for α – α scattering // Phys. Lett. – 1971. – Vol.B34. P.581-583.
- 7 Okai S., Park S.C. Cluster model calculation for phase shifts of α – α scattering // Phys. Rev. – 1966. – Vol.145. -P.787-793.
- 8 Неудачин В.Г., Хохлов Н.А., Широков А.М., Кныр В.А. Форма волновой функции нуклон-нуклонной системы на малых расстояниях и жесткое тормозное излучение $pp \rightarrow pp\gamma$ // ЯФ. – 1997. – Т.60. – С. – 1086-1095.
- 9 Khokhlov N.A., Кныр V.A., Neudatchin V.G., Широков A.M. Nucleon-nucleon short range wave function and hard bremsstrahlung $pp \rightarrow pp\gamma$ // Phys. Rev. – 2000. – Vol. – P. – 62.054003. 11pp.
- 10 Копытин И.В., Долгополов М.А., Хускивадзе А.А. Тормозное излучение при α – α – рассеянии и структура α -частичного потенциала // ЯФ. – 1998. – Т.61. – С.630-640.

- 11 Zaripova Yu.A., Dyachkov V.V., Yushkov A.V., Zholdybayev T.K., Gridnev D.K. Direct experimental detection of spatially localized clusters in nuclei on alpha-particle beams // *International Journal of Modern Physics E.* – 2018. – Vol. 27 (2). P. 18500171 – 18500176
- 12 Дьячков В.В., Зарипова Ю.А., Юшков А.В., Жолдыбаев Т.К., Керимкулов Ж. Кинематический метод выделения доминирующих типов кластерных конфигураций в сложном ядре // *Известия РАН. Серия физическая.* – 2017. – Т. 81, №10. – С. 1312 – 1317.
- 13 Дьячков В.В., Зарипова Ю.А., Юшков А.В. Измерения на пучках ускорителей кинематических треков как прямой метод определения мультикластерных внутриядерных амплитуд // *Вестник КазНУ. Серия физическая.* – 2015. – Т. 4, №55. – С. 80 – 84.
- 14 Гриднев К.А., Дьячков В.В., Юшков А.В. Определение статвеса волновых функций мультикластеров в легких ядрах в рамках параметризованного фазового анализа // *Известия РАН. Серия физическая.* – 2014. – Т. 78, №7. – С. 857-859.
- 15 Гриднев К.А., Дьячков В.В., Юшков А.В. Явление дифракционного подъема сечений в передней полусфере углов как эффект ядерной и кластерной интерференции // *Известия РАН. Серия физическая.* – 2015. – Т. 79, №7. – С. 950-951.
- 16 Айсина С.Я., Кутербек К.А., Павлова Н.Н., Юшков А.В. Экспериментальные основания существования альфа-частичной ядерной материи // *Известия АН. Серия физическая.* – 1989. – Т. 53, №1. – С. 37-47.
- 17 Helm R.H. Inelastic and elastic scattering of 187 MeV electrons from selected even-even nuclei // *Phys. Rev.* – 1956. – Vol. 104, №5. – P. 1466-1475.
- 18 Gridnev K.A., Kartamyshev M.P., Vaagen J.S., Lukyanov V.K., Anagnostatos G.S. The Role of Linear Alpha-Cluster Configuration for ^{12}C // *Int. J. Mod. Phys.* – 2002. – E11, 359
- 19 Савельев И.В. Курс общей физики. Т. III. – М.: Наука, 1967. – 416 с.
- 20 Higinbotham D., Miller G.A., Hen O., and Rith K., // *CERN Courier.* – April, 26, 2013

References

- 1 E.T. Ibraeva, M.A. Zhusupov, O. Imambekov, S.K. Sakhiev, *ECHAIA* 42(6), 1600-1691 (2011). (in Russ).
- 2 J.A. Wheeler, *Phys. Rev.* 52, 1107-1122 (1937).
- 3 K. Wildermuth, Y.C. Tan, *Edinayateoriyayadra*, (Moscow:Mir, 1980), 502p. (in Russ).
- 4 K. Varga, Y. Suzuki, *Phys. Rev.* C52,2885-2905 (1995).
- 5 H. Kanada, T. Kaneko, Y.C. Tang, *Nucl. Phys.* A504,529-548 (1989)
- 6 V.G. Neudatchin, V.I. Kukulkin, V.L. Korotkikh, V.P. Korennoy, *Phys. Lett.* B34,581-583 (1971)
- 7 S. Okai, S.C. Park, *Phys. Rev.* 145,787-793 (1966)
- 8 V.G. Neudachin, N.A. Khokhlov, A.M. Shirokov, V.A. Knyr, *YAF*, 60, 1086-1095 (1997) (in Russ).
- 9 N.A. Khokhlov, V.A. Knyr, V.G. Neudatchin, A.M. Shirokov, *Phys. Rev.* 62, 054003 (2000).
- 10 I.V. Kopytin, M.A. Dolgoplov, A.A. KHuskivadze, *YAF*, 61,630-640(1998).(in Russ).
- 11 Yu.A. Zaripova, V.V. Dyachkov, A.V. Yushkov, T.K. Zholdybayev, D.K. Gridnev, *International Journal of Modern Physics*, 27 (2), 18500171 – 185001716 (2018).
- 12 V.V. Diachkov, Yu.A. Zaripova, A.V. Iushkov, T.K. Zholdybaev, Zh. Kerimkulov, *Izvestiia RAN. Seriafizicheskaiia*, 81 (10), 1312 – 1317(2017)(in Russ).
- 13 Diachkov V.V., Zaripova Yu.A., Iushkov A.V., *VestnikKazNU. Seriafizicheskaiia*, 4 (55), 80-84 (2015). (in Russ).
- 14 K.A. Gridnev, V.V. Diachkov, A.V. Iushkov, *Izvestiia RAN. Seriafizicheskaiia*, 78 (7), 857-859 (2014) (in Russ).
- 15 K.A. Gridnev, V.V. Diachkov, A.V. Iushkov, *Izvestiia RAN. Seriafizicheskaiia*, 79 (7), 950-951 (2015) (in Russ).
- 16 S.Ia. Aisina, K.A. Kuterbekov, N.N. Pavlova, A.V. Ushkov, *Izvestiia AN.Seriafizicheskaiia*, 53 (1), 37-47 (1989).(in Russ).
- 17 R.H. Helm, *Phys. Rev.*, 104 (5), 1466-1475(1956).
- 18 K.A. Gridnev, M.P. Kartamyshev, J.S. Vaagen, V.K. Lukyanov, G.S. Anagnostatos, *Int. J. Mod. Phys.* E11, 359 (2002)
- 19 I.V. Savelev, *Kursobshcheifiziki*, vol. III (Moscow: Nauka), 416 (1967).(in Russ).
- 20 D. Higinbotham, G.A. Miller, O. Hen, and K. Rith, *CERN Courier*, April, 26 2013.