

FTAMP 29.05.15

О. Иманбек¹ – негізгі автор, | ©
Г. Абдраманова²¹Физ.-мат. ғылым. канд., доцент, ²Докторант

ORCID

¹<https://orcid.org/0000-0001-9207-719> ²<https://orcid.org/0000-0003-4722-141X>^{1,2}Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті,

Алматы қ., Қазақстан

¹banu.95@mail.ru<https://doi.org/10.55956/PRTV3699>

АРАЛЫҚ ЭНЕРГИЯЛАРДАҒЫ He ИЗОТОПТАРЫНДАҒЫ АДРОНДАРДЫҢ СЕРПІМДІ ШАШЫРАУЫ

Аңдатпа. Жұмыста Глаубердің көпреттік шашырауының дифракциялық теориясы негізінде аралық энергиялардағы ³He және ⁴He изотоптарындағы серпімді шашырауы зерттелді. ³He изотобының ішкі күйі қарапайым осциляторлық функциямен сипатталған. Бұл функция берілген ядроның статистикалық сипаттамаларын жақсы қайталайды. ⁴He құрылымсыз бөлшек тәрізді қарастырылады. Жұмыста жасалған есептеу схемасы бірреттік, екі- және үшреттік шашыраулардың қимадағы үлесін бөліп алуға мүмкіндік береді. Олардың әрқайсысы нақты берілген импульстар кезінде басым болады. ³He үшін есептеу нәтижелері ұшып келетін протондардың екі түрлі 600 және 715 МэВ энергиялары кезіндегі эксперимент нәтижелерімен салыстырылады және олармен жақсы үйлеседі. ⁴He изотобындағы шашырау үшін 560 МэВ энергиялары кезіндегі нәтижелер келтірілген. Барлық графиктерде қиманың абсолюттік мәнінің, сондай ақ дифракциялық минимумның орнының да сипатталуы қанағаттанарлық. Дайындалған есептеу схемасы және элементар нуклон-нуклондық амплитуданың табылған параметрлері маңызды болып табылады, себебі оларды анағұрлым күрделі үрдістерді талдау үшін қолдануға болады.

Тірек сөздер: Глаубердің дифракциялық теориясы, жеңіл ядролардың кластерлік құрылымы, адрон-нуклондық элементар амплитуда, дифференциалдық қима, ³He және ⁴He ядроларының құрылымы, шашырау операторы.



Иманбек, О. Аралық энергиялардағы He изотоптарындағы адрондардың серпімді шашырауы [Мәтін] / О. Иманбек, Г. Абдраманова // Механика және технологиялар / Ғылыми журнал. – 2024. – №2(84). – Б.458-467. <https://doi.org/10.55956/PRTV3699>

Кіріспе. Жеңіл ядролардың қасиеттері мен олардың басқа бөлшектермен өзара әсерлесу механизмін эксперименттік және теориялық зерттеу атом ядросы мен ядролық реакциялар теориясының маңызды мәселелерінің бірі болып табылады. Жеңіл ядролардағы нуклондар санының көп болмауы оларды теориялық зерттеуді жеңілдетуіне, және сонымен бірге көптеген денелердің ядролық өзара әсерлесуінің әртүрлі аспектілері көрінетіндей нуклондар санының жеткілікті болуына байланысты жеңіл ядроларды зерттеуге деген қызығушылық жоғары. Осындай зерттеулерді жүргізу үшін қолданылатын негізгі әдістер әртүрлі бөлшектердің серпімді және серпімсіз шашырауын зерттеу болып табылады. Қазіргі уақытта барлық бөлшектердің ішінен

анағұрлым толық зерттелгені энергиясы мен шашырау бұрыштарының жеткілікті кең диапазонындағы протондардың серпімді және серпімсіз шашырауы. Осыған байланысты, ${}^{3,4,6,8}\text{He}$, ${}^{8,9,11}\text{Li}$, ${}^{12,14}\text{Be}$ ядроларымен протондардың өзара әсерлесуінің дифференциалдық қимасы жылдан жылға мұқият өлшенген GSI-ПИЯФ (Германия-Ресей) [1-3] коллаборациясының эксперименттік жұмыстарының үлкен циклін атап өтуге болады. Осы жұмыстардың қызықты нәтижелерінің бірі зерттелген кейбір ядролардың экзотикалық гало құрылымдарының дәлелденуі болып табылады. Осы ғылыми коллаборация ${}^7\text{Be}$ және ${}^8\text{B}$ ядролары үшін энергиясы 700 МэВ болған кездегі алдыңғы бұрыштардағы протондардың серпімді шашырауының дифференциалдық көлденең қимасы өлшенген жаңа және өте маңызды эксперимент [4] жүргізді.

Жеңіл экзотикалық ядролармен реакцияны теориялық талдау байланысқан арналар әдісі, жазық және ауытқыған тоқындармен импульстік жуықтау, релятивистік импульстік жуықтау, оптикалық модель, Глаубердің көпреттік шашырау теориясы және т.с.с. әртүрлі модельдердің негізінде жүргізіледі. Талдау үшін қандай да бір әдісті қолдану мүмкіндігі көптеген факторларға байланысты, соның ішінде өзара әсерлесуші бөлшектердің энергиясына, реакциялардың кинематикасына және т.б. Энергиясы бірнеше жүздеген МэВ бөлшектердің үлкен емес бұрыштарға шашырауы Глаубердің көпреттік шашырау теориясымен жақсы сипатталады [5]. Глаубер теориясы мұндай зерттеулердің танылған және өте сенімді құралы болып табылады және қазіргі уақытта әртүрлі серпімді және серпімсіз процестерді талдау үшін өте сәтті қолданылады (мысалы, соңғы жұмыстардың бірін қараңыз [6]). Біз алдағы уақытта [4] жұмыстың нәтижелеріне Глаубер теориясының шеңберінде теориялық талдау жүргізуді жоспарлап отырмыз. Осыған байланысты бұрынырақ [7] жұмыста осы реакцияның дифференциалдық қимасын есептеу үшін математикалық формализм жасалған. ${}^7\text{Be}$ ядросының ішкі күйі (α - τ) екіденелік толқындық функциямен жақсы дәлдікпен сипатталады [8], мұндағы $\tau \equiv {}^3\text{He}$. Осындай жуықтауда протондардың ${}^7\text{Be}$ ядросында шашырауы Глаубер теориясының шеңберінде α және ${}^3\text{He}$ кластерлеріндегі бірреттік шашырауы мен осы екі кластерлердегі екі реттік шашыраулардың қосындысына келтіріледі. Сонымен бірге α -бөлшекті құрылымсыз деп есептеуге болады және Глаубер есептеулерінде элементар p -амплитудасының параметрлерін сәйкес кинематикалық аумақтардағы басқа тәуелсіз эксперименттерден алу керек. Бірақ, $p^3\text{He}$ -шашырауы үшін жағдай басқаша, қазіргі уақытта ғылыми әдебиеттерде оның элементар амплитудасының параметрлері табылмайды. Сондықтан біз жасаған формализмде протонның ${}^3\text{He}$ -кластеріндегі шашырауы оның үшнуклондық құрылымы ескеріліп қарастырылады. Мұндай есептеулер үшін біз таңдап алынған NN-амплитуданың параметрлеріне сәйкес қызықтырып отырған кинематикалық аумақта еркін $p^3\text{He}$ -шашырау қаншалықты дұрыс сипатталатыны туралы мәселе маңызды болып табылады. Берілген жұмыс дәл осы мәселеге арналады.

${}^3\text{He}$ ядросындағы протондардың серпімді шашырауы аралық энергияларда эксперименттік және теориялық түрде бірқатар жұмыстарда зерттелген [9-18]. Бұл жұмыстардың басым бөлігінде серпімді шашыраудың дифференциалдық қималары зерттелген. Пояризациялық сипаттамалары өлшемдері берілген жеке жұмыстар бар [13,15]. Бұл мәліметтердің теориялық талдауларында нуклондар арасындағы қысқа мерзімді әсер етуші корреляция, үш бөлшекті күш эффектiсі және т.б. талқыланды. [19] жұмыста Глаубер теориясындағы профильды функцияның комутативті жуықтауларының ролі

және онымен байланысты көп реттік шашырау процестеріндегі соқтығысулардың уақыттық ретті есекру қажеттілігі талқыланған.

Берілген жұмыста Глаубердің көп реттік шашырау теориясының шеңберінде біз 600 және 715 МэВ энергиядағы ${}^3\text{He}$ ядросындағы протондардың шашырауын талқыладық. Қажетті эксперименттік мәліметтерді [9,13] жұмыстардан аламыз. Мұндағы апробацияланған есептеу схемалары және анықталған элементар NN-амплитудалардың параметрлерін болашақта ${}^7\text{Be}$ протондардың шашырауын теориялық талдауда қолдануға болады.

Зерттеу шарттары мен әдістері. Математикалық формализмнің элементтері. Шашыраудың дифференциалдық көлденең қимасы мына өрнекпен анықталады:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |M_{if}(q)|^2, \quad (1)$$

мұндағы, $M_{if}(q)$ зерттелетін процестің матрицалық элементі. ${}^3\text{He}$ ядросындағы протондардың серпімді шашырауы үшін ол мына түрде болады:

$$M_{if}(\vec{q}) = \frac{ik}{2\pi} \int d\vec{\rho} d\vec{R}_{3He} \exp(i\vec{q}\vec{\rho}) \delta(\vec{R}_{3He}) \langle \Phi_{3He} | \Omega | \Phi_{3He} \rangle \quad (2)$$

мұнда: \vec{R}_{3He} – ${}^3\text{He}$ ядросының массалар центрінің координатасы, $q = 2k \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$ серпімді шашырау жағдайындағы, $\vec{q} = \vec{k} - \vec{k}'$ реакцияға берілген импульс, $\vec{\rho}$ – ұшып келетін бөлшектің импульсына перпендикуляр болатын әсер ету параметрі, θ – шашырау бұрышы, \vec{k} және \vec{k}' – (p - ${}^3\text{He}$) ұшып келетін және ұшып шығатын бөлшектің импульстары, Φ_{3He} – ${}^3\text{He}$ ядросының толқындық функциясы.

(2)-гі көп реттік шашыраудың Глауберов операторы Ω , ${}^3\text{He}$ ядросының үш нуклондық құрылымын есерсек, мына түрде болады:

$$\Omega_\tau = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 - \omega_1\omega_2 - \omega_1\omega_3 - \omega_2\omega_3 + \omega_1\omega_2\omega_3 \quad (3)$$

мұндағы, $\omega_j - j$ –ші нуклонның «профилінің» функциясы, ол келесі түрде анықталады:

$$\omega_j(\vec{\rho} - \vec{\rho}_j) = \frac{1}{2\pi ik} \int d^2\vec{q} \exp[-i\vec{q}(\vec{\rho} - \vec{\rho}_j)] f_{pj}(q). \quad (4)$$

мұнда, $\vec{\rho}_j$ – нысана ядросының нуклондарының екі өлшемді координаталары (жазықтықта ұшып келетін бөлшектің импульсына перпендикуляр болады).

Протон-нуклондық өзара әсерлесудің элементар амплитудасы $f_{pj}(q)$ келесі стандарттық түрде гауссоидамен параметрленеді [5]:

$$f_{pN}(q) = \frac{k\sigma_{pN}}{4\pi} (i + \gamma_{pN}) \exp\left(-\frac{\delta_{pN}}{2} q^2\right), \quad (5)$$

мұндағы: σ_{pN} – протонның нуклондармен шашырауының толық қимасы; δ_{pN} – шашырау конусының көлбеу параметрі; γ_{pN} – элементар; pN –элементар шашырауының амплитудасының шын бөлігінің жалған бөлігіне қатынасы; σ_{pN} және γ_{pN} мәндері тұрақты, ал δ_{pN} әдетте еркін pN -шашырауы бойынша тәуелсіз эксперименттік мәліметтердің ең айқын сипаттамасынан алынады.

Біз өз есептеулерімізде ${}^3\text{He}$ ядросының негізгі күйін [14,16] жұмыстардан алынған келесі толқындық функциямен сипаттаймыз:

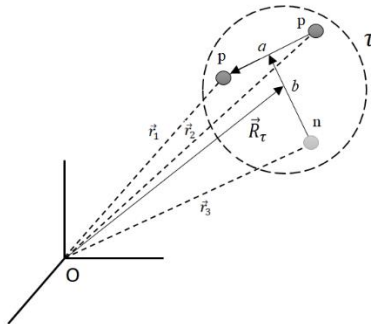
$$\Phi_{3\text{He}}(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3) = \frac{3^{3/4}\alpha^3}{\pi^{3/2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\alpha^2(\vec{r}_1^2 + \vec{r}_2^2 + \vec{r}_3^2)\right].$$

мұнда, α параметр $\langle r^2 \rangle = \frac{1}{3\alpha^2}$ шартынан анықталған, мұндағы $\langle r^2 \rangle$ ядроның орташа квадраттық радиусы. Табылған мән $\alpha = 0.343 \text{ фм}^{-1}$. Берілген функция 1-суретке сәйкес Якобидің (\vec{a}, \vec{b}) салыстырмалы координаталарында мына түрге ие болады:

$$\Phi_{3\text{He}}(\vec{a}, \vec{b}) = \frac{3^{3/4}\alpha^3}{\pi^{3/2}} \exp\left[-\alpha^2\left(\frac{3}{4}a^2 + b^2\right)\right] \quad (6)$$

Ол мына шартпен нормаланған:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Phi_{3\text{He}}(\vec{a}, \vec{b})|^2 d\vec{a} d\vec{b} = 1 \quad (7)$$



Сурет 1. ${}^3\text{He}$ ядросының бір бөлшекті және Якоби координаталары

Сонда (2) матрицалық элемент, $d\vec{R}_{3\text{He}}$ бойынша интегралданғаннан кейін, $\delta(\vec{R}_{3\text{He}})$ ескеріп, келесі түрге келеді:

$$\begin{aligned} M_{if}(\vec{q}) &= \frac{ik}{2\pi} \int |\Phi_{3\text{He}}(\vec{a}, \vec{b})|^2 \Omega_{\tau} \cdot \exp(i\vec{q}\vec{\rho}) d\vec{\rho} d\vec{a} d\vec{b} = \\ &= \int |\Phi_{3\text{He}}(\vec{a}, \vec{b})|^2 F(\vec{q}) d\vec{a} d\vec{b}, \end{aligned} \quad (8)$$

мұндағы:

$$F(\vec{q}) = \frac{ik}{2\pi} \int \Omega_{\tau} \cdot \exp(i\vec{q}\vec{\rho}) d\vec{\rho}.$$

Көп ретті шашырау операторының (3) және (4) профильді функцияның берілген түрінде, (8) өрнектегі интеграл $d\vec{\rho}$ бойынша аналитикалық түрде алынады.

Бір ретті шашырау үшін алатынымыз:

$$F_j(\vec{q}) = \frac{ik}{2\pi} \int e^{i\vec{q}\vec{\rho}} \frac{1}{2\pi i k_j} \int e^{-i\vec{q}_j(\vec{\rho}-\vec{\rho}_j)} f_j(\vec{q}_j) d\vec{q}_j d\vec{\rho}. \quad (9)$$

Бұл өрнектегі интеграл тек ғана $d\vec{\rho}$, және $d\vec{q}_j$ бойынша аналитикалық алынады және нәтижесінде $F_j(q)$ үшін аламыз:

$$F_j(\vec{q}) = \frac{k}{k_j} f_j(\vec{q}) e^{i\vec{q}\vec{\rho}_j}, \quad (10)$$

мұндағы, $\vec{\rho}_j = \alpha_j \vec{a} + \beta_j \vec{b}$, 1-суретке сәйкес алатынымыз $\alpha_1 = 1/2$, $\alpha_2 = -1/2$, $\alpha_3 = 0$, $\beta_1 = 1/3$, $\beta_2 = 1/3$, $\beta_3 = -2/3$.

$d\vec{\rho}$ бойынша интегралдаудан соң және тасымалданатын $d\vec{q}_i$ импульстер бойынша екі ретті шашырау үшін алатынымыз:

$$F_{ij}(\vec{q}) = \frac{k}{2\pi i k_i k_j} \int e^{i\vec{q}\vec{\rho}_i} e^{i\vec{q}_j(\vec{\rho}_j - \vec{\rho}_i)} f_i(\vec{q} - \vec{q}_i) f_j(\vec{q}_j) d\vec{q}_j. \quad (11)$$

(5) түріндегі элементарлық амплитуда параметрлері үшін және $d\vec{q}_j$ бойынша аналитикалық интеграл. Оның мәнін көрсетпеуіміз өте ұзақ болғандықтан. Үш ретті шашырау үшін салыстырмалы түрде алатынымыз:

$$F_{ijv}(\vec{q}) = -\frac{k}{4\pi^2 k_i k_j k_v} \int \int e^{i\vec{q}\vec{\rho}_v} e^{i\vec{q}_i(\vec{\rho}_i - \vec{\rho}_v)} e^{i\vec{q}_j(\vec{\rho}_j - \vec{\rho}_v)} f_v(\vec{q} - \vec{q}_i - \vec{q}_j) f_i(\vec{q}_i) f_j(\vec{q}_j) d\vec{q}_i d\vec{q}_j \quad (12)$$

бұл (5) амплитудалық интеграл аналитикалық түрде алынады, алайда оны өте үлкен дәлдікпен жуықтап есептеуге болады, аргументтің тиімді мәні кезіндегі амплитудаларды $f(q)$ интеграл таңбасынан шығара отырып анықтаймыз $q/3$ – ке тең. Осы жуықтауда алатынымыз:

$$F_{ijv}(\vec{q}) = -\frac{4\pi^2 k}{k_i k_j k_v} f_i\left(\frac{1}{3}\vec{q}\right) f_j\left(\frac{1}{3}\vec{q}\right) f_v\left(\frac{1}{3}\vec{q}\right) e^{i\vec{q}\vec{\rho}_v} \delta(\rho_v - \rho_i) \delta(\rho_v - \rho_j). \quad (13)$$

Әр түрлі реттік шашыраулар үшін амплитудалармен анықталған (10) – (13) матрицалық элементтер (7) оңай есептеледі және келесі құрылымдарға ие

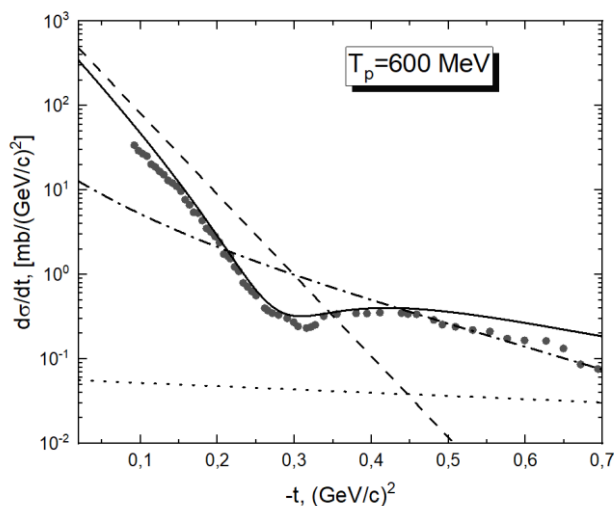
$$\begin{aligned} M_{fi}^{(j)}(q) &= C_j e^{-\lambda_j q^2} \\ M_{fi}^{(ij)}(q) &= C_{ij} e^{-\lambda_{ij} q^2} \\ M_{fi}^{(ijv)}(q) &= C_{ijv} e^{-\lambda_{ijv} q^2} \end{aligned} \quad (14)$$

мұнда, C_j , C_{ij} , C_{ijv} , λ_j , λ_{ij} , λ_{ijv} коэффициенттері элементар NN-амплитуданың параметрлері (5) және толқындық функция (6) арқылы анықталады. Бұл коэффициенттер қомақты болғандықтан, бұл жерде көрсетпейміз. Анықталған матрицалық элементтермен дифференциалдық қиманың бұрыштық тәуелділігі (1)-формуламен анықталады. Дифференциалдық қима берілген импульстің квадратына байланысты келесі түрде анықталады:

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{\pi}{k^2} |M_{if}(q)|^2. \quad (15)$$

Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау. Бұл жұмыста ³He ядросындағы протондардың дифференциал қимасындағы серпімді шашырауының 600 және 715 МэВ энергиялардағы ұшып келетін протонның

берілген импульс квадратына тәуелділігі есептелді. Осы есептеулерге сәйкес келетін эксперименттік мәліметтер [9,13] жұмыстарынан алынды. 1 және 2 суреттерде біздің есептеулер мен оларды эксперименттік мәліметтермен салыстырулар көрсетілген, Эксперимент нүктелері [9] жұмыстан алынған. Біздің есептеулерімізде бір (үзік сызық), қос (нүктелік) және үштік (кіші нүктелер) шашыраудан көлденең қиманың үлестерін және барлық еселіктердің (тұтас сызық) жалпы үлесін анықтадық. Суреттерден көрініп тұрғандай, $\theta < 30^\circ$ шашырау бұрыштарына сәйкес келетін $-t < 0,2 \text{ (GeV/c)}^2$ -ге дейінгі шағын берілген моменттерде бір реттік шашырау басым болады.



Үзік сызық бір шашырау, нүктелі сызық қосарланған шашырау, кіші нүктелер үш есе шашырау, тұтас сызық жалпы көлденең қима.

Сурет 2. 600 МэВ протон энергиясындағы 3Не ядросында протондардың серпімді шашырауына арналған дифференциалдық қима.

Бір және қосарланған шашыраудың үлестері $t = 0,3 \text{ (GeV/c)}^2$ аймағында салыстырмалы болады. Берілген импульстің одан әрі өсуімен қосарланған шашырау жалғыз шашыраудан басым болады. Бұл аймақта үш еселенген шашыраудың үлесі бір жарым есе аз және $t = 0,6-0,7 \text{ (GeV/c)}^2$ кезінде ғана байқалады. Теориялық есептеулер көлденең қиманың абсолютті мәнін және берілген импульстердің барлық диапазонындағы дифракциялық минимумдардың орнын жақсы шығарады. Берілген импульстің квадраты $0,6-0,7 \text{ (GeV/c)}^2$ болғанда эксперименттік мәліметтерді шамалы асыра бағалау бар.

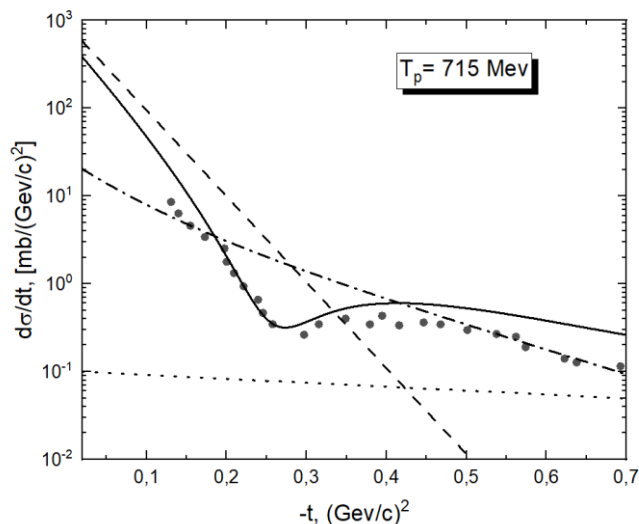
Бұл (12) өрнектегі интеграл таңбасының астынан NN әрекеттесуінің элементар амплитудасының ығысуымен байланысты болуы мүмкін. Бұл артық бағалау 7Be-де протонның шашырауын талдауда маңызды рөл атқармайды, өйткені көлденең қиманың мәні шағын шашырау бұрыштарындағы көлденең қимамен салыстырғанда өте аз. Біздің есептеулеріміз қарапайым NN амплитудаларының параметрлерінің келесі мәндерімен жүргізілді (1-кесте).

Кесте 1

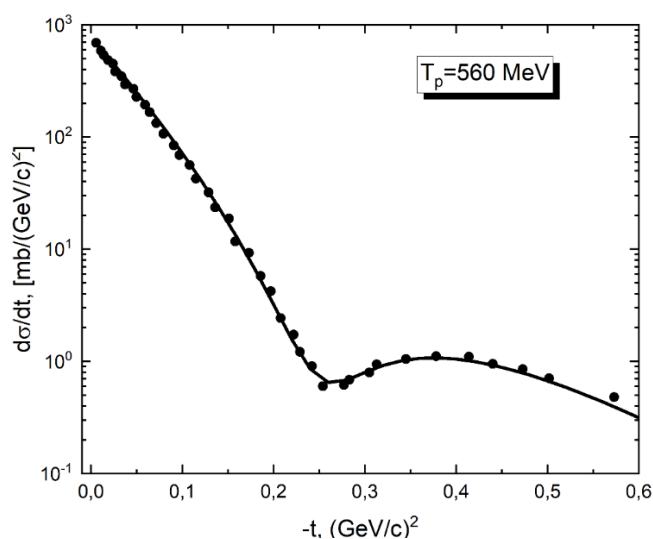
Элементар NN амплитудасының параметрлері

$T_p, \text{ МэВ}$	$\sigma_{pp}, \text{ фМ}^2$	γ_{pp}	$\delta_{pp}, \text{ фМ}^2$	$\sigma_{pn}, \text{ фМ}^2$	γ_{pn}	$\delta_{pn}, \text{ фМ}^2$
600	3,7	-0,48	2,5	3,6	-0,36	2,95
715	4,43	-0,30	3,082	3,77	-0,38	3,082

3-суретте 715 МэВ протон энергиясындағы ${}^3\text{He}$ ядросында протондардың серпімді шашырауына арналған дифференциалдық қима көрсетілген, Эксперимент нүктелері [13] жұмыстан алынды. 4-суретте 560 МэВ протон энергиясы кезінде ${}^4\text{He}$ ядросында протондардың серпімді шашырауына арналған дифференциалдық қима келтірілген.



Сурет 3. 715 МэВ протон энергиясындағы ${}^3\text{He}$ ядросында протондардың серпімді шашырауына арналған дифференциалдық қима



Сурет 4. 560 МэВ протон энергиясы кезінде ${}^4\text{He}$ ядросында протондардың серпімді шашырауына арналған дифференциалдық қима.

Қорытынды. Бұл жұмыста дифракциялық теория негізінде Глаубердің еселік шашырауына сүйене отырып, ${}^3\text{He}$ ядросындағы аралық энергиялы протондардың серпімді шашырауы зерттелген. ${}^3\text{He}$ ядросының негізгі күйі ядроның орташа квадраттық радиусын жақсы көбейтетін Гаусс типті толқындық функциямен сипатталады. Есептелген қима екі энергия бойынша эксперименттік мәліметтермен салыстырғанда: 600 және 715 МэВ кезінде

және оларды жақсы шығарады. Әр түрлі көбейтінділердің шашырауының көлденең қимаға қосқан үлесі берілген моменттің квадратына байланысты. Көрсетілген энергияларда сыналған есептеу схемасы жалпылама болып табылады және басқа аралық энергияларда деректерді талдау үшін пайдалануы мүмкін. Эксперименттік мәліметтердің ең жақсы сипаттамасынан табылған элементар нуклон-нуклон амплитудаларының параметрлері басқа авторлардың деректерімен сәйкес келеді. Осы жұмыстың нәтижесі маңызды, өйткені оларды күрделірек процестерді талдауда, атап айтқанда ${}^7\text{Be}$ ядросында протонның шашырауын талдауда қолдануға болады, мұнда ${}^3\text{He}$ ішкі жүйе ретінде ${}^7\text{Be}$ құрылымына кіреді.

Әдебиеттер тізімі

1. Neumaier S.R., Alkhazov G.D., Andronenko M.N., Dobrovolsky A.V., Egelhof P., Gavrilov G.E., Yatsoura V.I. Small-angle proton elastic scattering from the neutron-rich isotopes ${}^6\text{He}$ and ${}^8\text{He}$, and from ${}^4\text{He}$, at 0.7 GeV in inverse kinematics // Nuclear Physics A, 2002. Vol. 712. No. 3-4. P. 247-268.
2. Dobrovolsky A.V., Alkhazov G.D., Andronenko M.N., Bauchet A., Egelhof P., Fritz S., Yatsoura V.I. Study of the nuclear matter distribution in neutron-rich Li isotopes // Nuclear Physics A, 2006. Vol. 766. P. 1-24.
3. Ilieva S., Aksouh F., Alkhazov G.D., Chulkov L., Dobrovolsky A.V., Egelhof P., Zhdanov A.A. Nuclear-matter density distribution in the neutron-rich nuclei ${}^{12}\text{C}$, ${}^{14}\text{C}$ from proton elastic scattering in inverse kinematics // Nuclear Physics A, 2012. Vol. 875. P. 8-28.
4. Dobrovolsky A.V., Korolev G.A., Inglessi A.G., Alkhazov G.D., Colò G., Dillmann I., Yatsoura V.I. Nuclear-matter distribution in the proton-rich nuclei ${}^7\text{Be}$ and ${}^8\text{B}$ from intermediate energy proton elastic scattering in inverse kinematics // Nuclear Physics A, 2019. Vol. 989. P. 40-58.
5. Glauber, R.J. High Energy Collision Theory. Lectures in Theoretical Physics i Ed. by WE Brittin, LG Dunham. – New York: Intersci. Publ., 1959.
6. Hatakeyama S., Horiuchi W. Complete Glauber calculations for proton–nucleus inelastic cross sections // Nuclear Physics A, 2019. Vol. 985. P. 20-37.
7. Symagulov A., Kuchin YA., Marina Ye., Zhumabayev A., Abdurazakov A. Metody interpretatsii chernykh yashchikov mashinnogo obucheniya i ikh primeneniye dlya sozdaniya sistem podderzhki prinyatiya resheniy [Methods of interpreting black boxes of machine learning and their application for creation of decision support systems] // Izvestiya NAN RK. Seriya fiziko-matematicheskaya [News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physics and mathematics series], 2021. No. 5. P. 91-99, [in Russian].
8. Dubovichenko, S.B. Thermonuclear processes of the Universe. – Almaty: Fessenkov V.G. Astrophysical Institute “NCSRT” NSA RK, 2011. – 402 p., [in Russian].
9. Fain J., Gardes J., Lefort A., Meritet L., Pauty J.F., Peynet G., Ille B. Experimental results on elastic scattering of protons on the light nuclei ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$ and ${}^4\text{He}$ at 600 MeV // Nuclear Physics A, 1976. Vol. 262. No. 3. P. 413-432.
10. Frascaria R., Legrand D., Comparat V., Morlet M., Marty N., Willis A. Intermediate energy proton elastic scattering on ${}^3\text{He}$ and ${}^3\text{H}$ and its connection with the NN spin-isospin dependent amplitudes // Nuclear Physics A, 1976. Vol. 264. No. 3. P. 445-454.
11. Alkhazov G.D., Belostotsky S.L., Damaskinsky E.A., Dotsenko Y.V., Domchenkov O.A., Kuropatkin N.P., Volkov S.S. p- ${}^3\text{He}$ elastic scattering at 1 GeV // Physics Letters B, 1979. Vol. 85. No. 1. P. 43-46.
12. Landau R.H., Paez M.J. Antisymmetry and spin effects in p ${}^3\text{He}$ scattering // Physics Letters B, 1984. Vol. 142. No. 4. P. 235-240.
13. Hasell D.K., Bracco A., Gubler H.P., Lee W.P., van Oers W.T.H., Abegg R., Margaziotis D.J. Elastic scattering of polarized protons from ${}^3\text{He}$ at intermediate energies // Physical Review C, 1986. Vol. 34. No. 1. P. 236.

14. Hassan M.A., Hassan S.S.A. Effects of short-range correlations and three-body force on proton- ^3He scattering at high energy // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 1991. Vol. 17. No. 8. P. 1177.
15. Häusser O., Larson B., Alford W.P., Chan C., Delheij P.P.J., Henderson R.S., Vetterli M.C. Elastic scattering of polarized protons from polarized ^3He // *Physics Letters B*, 1995. Vol. 343. No. 1-4. P. 36-40.
16. Hassan M.A., Salama T.N.E., Awd-Allah H.E.A. Proton-three-nucleon nuclei elastic scattering: three-body force effect // *Indian Journal of Physics*, 2015. Vol. 89. P. 1287-1295.
17. Hassan M.A., Salama T.N.E. p- ^3He elastic scattering at 0.6–1 GeV: some short-range effects // *Indian Journal of Physics*, 2015. Vol. 89. P. 829-834.
18. Hassan M.A., Salama T.N.E., Hassan Z.S., Ismael A.M. Time-ordering effect in proton–nucleus elastic scattering // *Indian Journal of Physics*, 2019. Vol. 93. P. 1069-1080.

Бұл жұмыс «Глаубер теориясы шеңберінде адрондардың жеңіл экзотикалық ядролармен әрекеттесуін зерттеу» тақырыбындағы Қазақстан Республикасы Білім және Ғылым министрлігінің АР08855589 грантымен қолдау тапты.

Материал редакцияға 18.06.24 түсті.

О. Иманбек¹, Г. Абдраманова¹

¹*Казахский Национальный университет имени аль Фараби, г. Алматы, Казахстан*

УПРУГОЕ РАССЕЙЕНИЕ АДРОНОВ НА ИЗОТОПАХ He ПРИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЯХ

Аннотация. В работе на основе дифракционной теории многократного рассеяния Глаубера исследовано упругое рассеяние адронов на изотопах ^3He и ^4He при промежуточных энергиях. Внутреннее состояние изотопа ^3He описано простейшей осцилляторной функцией. Данная функция хорошо воспроизводит статические характеристики данного ядра. ^4He рассматривается как бесструктурная частица. Разработанная в работе схема расчета позволяет выделить вклады в сечение от однократного, двукратного и трехкратного рассеяния. Каждый из них является доминирующим при определенных переданных импульсах. Результаты расчетов для ^3He сравниваются с данными эксперимента при двух энергиях налетающего протона: 600 и 715 МэВ и хорошо воспроизводит их. Для рассеяния на ^4He приведены результаты при энергии 560 МэВ. Во всех графиках удовлетворительно описывается как абсолютная величина сечения, так и положение дифракционного минимума. Разработанная схема расчета и найденные параметры элементарной нуклон-нуклонной амплитуды являются важными, так как они могут быть использованы при анализе более сложных процессов.

Ключевые слова: дифракционная теория Глаубера, кластерная структура легких ядер, адрон-нуклонная элементарная амплитуда, дифференциальное сечение, структура ядра ^3He и ^4He , оператор рассеяния.

O. Imanbek¹, G. Abdramanova¹

¹Kazakh National University named after al-Farabi, Almaty, Kazakhstan

**ELASTIC SCATTERING OF HADRONS BY ISOTOPES He
AT INTERMEDIATE ENERGIES**

Abstract. Based on Glauber's diffraction theory of multiple scattering, the elastic scattering of hadrons by ^3He and ^4He isotopes at intermediate energies is studied. The internal state of the ^3He isotope is described by the simplest oscillator function. This function reproduces well the static characteristics of this kernel. ^4He considered as a structureless particle. The calculation scheme developed in this work makes it possible to separate the contributions to the cross section from single, double, and triple scattering. Each of them is dominant at certain transmitted impulses. The calculation results for ^3He are compared with the experimental data at two energies of the incident proton: 600 and 715 MeV and reproduce them well. For scattering by ^4He , the results are given at an energy of 560 MeV. All graphs satisfactorily describe both the absolute value of the cross section and the position of the diffraction minimum. The developed calculation scheme and the found parameters of the elementary nucleon-nucleon amplitude are important, since they can be used in the analysis of more complex processes.

Keywords: Glauber diffraction theory, cluster structure of light nuclei, hadron-nucleon elementary amplitude, differential cross section, ^3He and ^4He nucleus structure, scattering operator.