

${}^7\text{Li}$ ядросының ${}^{12}\text{C}$ ядросымен серпімді әсерлесуінің эксперименттік нәтижелері мен теориялық талдау жолдарына шолу

**Н. Амангелді¹ , Ғ. Ергалиұлы¹ , Б.Б. Балабеков^{1,2*} ,
А. Жумадил¹**

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²Қазақстан Республикасы Президентінің Іс басқармасы Медициналық орталығының Ауруханасы, Астана, Қазақстан

E-mail: nurlan.amangeldi1979@gmail.com, yergaliuly.gani@gmail.com, baglanbalabekov95@gmail.com, aminazhumadil403@gmail.com

Аңдатпа. ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ жүйесінің серпімді шашырауы бойынша жүргізілген эксперименттік және теориялық зерттеулерге кең шолу жасалған. Жеңіл ядро болып саналатын ${}^7\text{Li}$ кластерлік құрылымға ие және ыдырауға бейім болғандықтан, оның көміртеппен әсерлесуін талдау ядроның ішкі құрылымын, реакция механизмдерін және астрофизикалық процестердегі литийдің рөлін нақтылауға мүмкіндік береді. Авторлар Poling (1972), Schumacher (1973), Vineyard (1984), Katori (1988), Nadasen (1995), Parkar (2007) және Jun (2010) еңбектерін жүйелеп, энергияға тәуелді әртүрлі процестерді сипаттайды: төмен энергияларда кулондық әсер мен параметрлік белгісіздік, орташада – дифракциялық минимумдар мен ыдырау ықтималдығы, жоғарыда – бірегей потенциалдар, ал тосқауыл маңында – қосылу процесінің басымдығы. Оптикалық модельдер мен CDCC әдісі арқылы алынған нәтижелер ${}^7\text{Li}$ ядросының ыдырау әсерін, жұтылу потенциалының энергияға сызықтық тәуелділігін және толық қосылу реакциясының маңызын көрсетеді. Сонымен қатар, литийдің астрофизикалық аномалиясын түсіндіру үшін бұл жүйенің деректері ерекше мәнге ие. Шолу жұмысы әртүрлі энергия диапазонындағы эксперименттік деректерді салыстырып, олардың эволюциясын көрсетеді және ядролық құрылым мен астрофизикалық процестерді тереңірек түсінуге қосымша үлес қосады. Бұл зерттеу литийдің бастапқы нуклеосинтез кезіндегі молшылықтарын түсіндіруде маңызды дерек көзі болып табылады.

Түйін сөздер: ядролық шашырау, серпімді шашырау, ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ жүйесі, оптикалық модель, ыдырау әсері, астрофизикалық процестер, литий аномалиясы.

Жіберілді 16.04.2026. Өзгертілді 8.06.2026. Қабылданды 10.06.2026. Онлайн қол жетімді 30.06.2026.

*хат-хабар авторы

Кіріспе

Ядролық шашырау – ядро мен ядро немесе ядро мен бөлшек өзара әсерлескенде олардың қозғалыс бағыты мен энергиясының өзгеруі арқылы сипатталатын негізгі процесс. Бұл құбылыс ядролық күштердің табиғатын, ядроның құрылымдық ерекшеліктерін және реакция механизмдерін зерттеуде аса маңызды рөл атқарады. Әсіресе серпімді шашырау деректері ядроның потенциалдық өрісін, радиусын, диффузиялық қасиеттерін және кластерлік құрылымдағы қанығу әсерін анықтауға мүмкіндік береді.

${}^7\text{Li}$ ядросының басқа ядроларда шашырауын зерттеу ерекше мәнге ие. ${}^7\text{Li}$ жеңіл ядро болғанымен, оның құрылымы кластерлік сипатқа ие және ыдырауға бейім. Сондықтан ${}^7\text{Li}$ серпімді әсерлесуін талдау ядроның ішкі құрылымын нақтылауға, реакция механизмдерін ашуға және астрофизикалық процестердегі литийдің рөлін түсіндіруге мүмкіндік береді. Бұл әсіресе литийдің молшылықтарын түсіндіруде маңызды, себебі ${}^6\text{Li}$ және ${}^7\text{Li}$ изотоптарының бастапқы нуклеосинтез кезіндегі мөлшері мен қазіргі бақылаулар арасындағы айырмашылық әлі күнге дейін ядролық астрофизиканың басты мәселелерінің бірі болып отыр.

Астрофизикалық тұрғыдан литий аномалиясы — ${}^6\text{Li}$ және ${}^7\text{Li}$ изотоптарының бастапқы нуклеосинтез кезіндегі болжанған молшылықтары мен қазіргі бақылаулар арасындағы айырмашылықты білдіреді. Бұл айырмашылықты түсіндіру үшін ядролық реакциялардың нақты механизмдерін зерттеу қажет. ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ жүйесі осы тұрғыда ерекше маңызды, себебі көміртеппен серпімді әсерлесу литийдің кластерлік құрылымын, ыдырау ықтималдығын және қосылу процестерін айқындауға мүмкіндік береді. Мұндай талдау литийдің астрофизикалық процестердегі рөлін нақтылауға және литий аномалиясын түсіндіруге қосымша дерек береді.

Осыған байланысты ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ жүйесі көптеген зерттеулерде әртүрлі энергия диапазондарында қарастырылды. Poling (1972) еңбегінде оптикалық модельдің тиімділігі көрсетіліп, ${}^7\text{Li}$ үшін минималық потенциалдың тереңдігі көбірек болуы қажет екені анықталды. Schumacher (1973) жұмысы 36 МэВ энергияда серпімді шашырауды зерттеп, кластерлік құрылымдағы қанығу әсерін көрсетті. Vineyard (1984) зерттеуі 34 МэВ энергияда жүргізіліп, ыдырау әсерлерінің маңызы айқындалды. Katori (1988) және Nadasen (1995) еңбектері орташа және жоғары энергияларда ыдырау әсерін және бірегей потенциалдарды анықтауға бағытталды. Parkar (2007) жұмысы энергияға байланысты әртүрлі механизмдердің басым болатынын көрсетті: төмен энергияларда параметрлік анықталмағандық, орташада – ыдырау әсері, жоғарыда – бірегей потенциалдар, ал тосқауыл маңында – қосылу (синтез/қосылу) негізгі процесс. Jun (2010) еңбегінде ${}^7\text{Li}({}^6\text{Li}, {}^6\text{Li}){}^7\text{Li}$ серпімді шашырауы мен беріліс реакциялары зерттеліп, спектроскопиялық факторлар анықталды және астрофизикалық реакция жылдамдықтары есептелді.

Біздің жұмыс ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ жүйесінің серпімді шашырауын талдауға арналған. Бұл жүйе бойынша әртүрлі энергияларда жүргізілген эксперименттік және теориялық зерттеулердің нәтижелері жинақталып, олардың ерекшеліктері мен кемшіліктері салыстырмалы түрде қарастырылады. Шолудың басты ерекшелігі – осы уақытқа дейін жасалған эксперименттік мәндер мен теориялық талдауларды жүйелеп, олардың эволюциясын көрсету. Бұл талдау ${}^7\text{Li}$ ядросының серпімді әсерлесуін түсіндіруде энергияға тәуелді әртүрлі механизмдердің рөлін ашып көрсетеді және ядролық құрылым мен астрофизикалық процестерді түсінуге қосымша үлес қосады.

Негізгі бөлім

Осы жүйеге байланысты алғашқы экспериментті Poling et al. (1972) жүргізіп төмен энергиялардағы (4.5–13 MeV) серпімді шашырау деректері алынып, оптикалық модель арқылы талданды. Радиус пен диффузия параметрлері екі изотопқа ортақ болғанымен, ${}^7\text{Li}$ үшін жұтылу потенциалының тереңдігі көбірек екені анықталды. Бұл энергияға тәуелді абсорбцияның маңызын көрсетті. Радиус (R) және диффузия (a) мәндері екі изотоп үшін бірдей таңдалған. Реалды потенциалдың тереңдігі (V) шамалас: мысалы, жиын В үшін ${}^6\text{Li}$ — 148 МэВ, ${}^7\text{Li}$ — 166 МэВ. жұтылу потенциалының тереңдігі (W) ${}^7\text{Li}$ үшін айтарлықтай көбірек. Бұл айырмашылық нақты сандарда да көрінеді. Мысалы, Кесте 1-де ${}^6\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ және ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ потенциалдық параметрлер жиындары көрсетілген [1].

Poling (1972) жұмысы төмен энергиялардағы серпімді шашырауды оптикалық модель арқылы сипаттаудың тиімділігін көрсетті. Бұл нәтижелер кейінгі зерттеулерге негіз болды. Мысалы, Schumacher (1973) осы модельдік тәсілді орташа энергияларда (36 МэВ) қолданып, кластерлік құрылымдағы қанығу әсерін айқындады. Осылайша, Poling жұмысы бастапқы параметрлерді анықтап берсе, Schumacher зерттеуі оларды кеңейтіп, литий ядросының құрылымдық ерекшеліктерін нақтылауға мүмкіндік берді. Бұл екі зерттеу арасындағы сабақтастық ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ жүйесін әртүрлі энергия диапазондарында біртіндеп тереңірек түсінуге жол ашты.

Кесте 1. Оптикалық модельдің параметрлік жиынтықтары [1]

Жиын	R (фм)	a (фм)	V (МэВ)	W ₄₋₅ (МэВ)	W ₁₃ (МэВ)	V (МэВ)	W ₄₋₅ (МэВ)	W ₁₃ (МэВ)
			⁶ Li + ¹² C			⁷ Li + ¹² C		
A	3.50	0.65	138	6.5	8.8	157	12.0	25.0
B	3.37	0.65	148	6.9	8.5	166	12.0	26.0
C	3.21	0.63	209	7.9	10.2	232	9.0	32.0
D	3.21	0.59	332	7.8	14.5	350	18.0	35.0
E	3.21	0.58	403	13.0	18.0	420	19.0	40.0

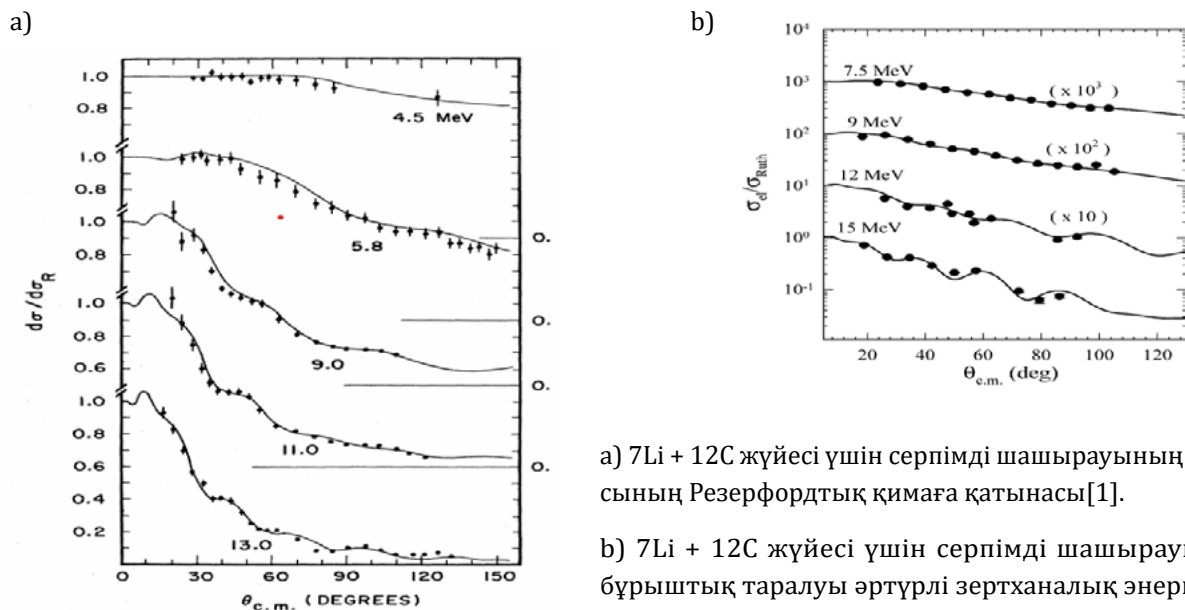
Осы нәтижелерден көрініп тұрғандай, радиус пен диффузия параметрлері екі изотопқа ортақ болғанымен, ⁷Li үшін жұтылу потенциалының тереңдігі әлдеқайда үлкен болуы қажет. Бұл ⁷Li ядросының көміртеппен соқтығысу кезінде жұтылу ықтималдығы жоғары екенін көрсетеді және оның бұрыштық таралуы ⁶Liге қарағанда «тегіс (тегістелген)» сипатқа ие болатынын түсіндіреді.

Бұдан бөлек жүргізілген тәжірибелер мен оптикалық модельдік есептеулер көрсеткендей, ⁶Li және ⁷Li изотоптарының көміртеппен соқтығысуын сипаттау үшін жұтылу потенциалының тереңдігі энергияға сызықтық тәуелділікпен өзгеруі қажет. Авторлар бұл туралы тікелей атап өтеді: «Барлық энергиялар үшін сәйкестік жақсы сақталады, егер жұтылу потенциалы тереңдігі энергияға сызықты түрде тәуелді болса» [1-5].

Сонымен қатар, есептеулерде: «жұтылу потенциалының тереңдігі W энергияға сызықты түрде тәуелді болады және ол 1-кестеде көрсетілген шектері арасында өзгереді: W4.5 — 4.5 МэВ-тағы тереңдік; W13 — 13.0 МэВ-тағы тереңдік» [1-5]. Бұл тұжырымдардан көрініп тұрғандай, энергия артқан сайын жұтылу ықтималдығы да артады, ал модельдің тәжірибелік деректермен сәйкесуі үшін жұтылу тереңдігінің сызықтық өсуін ескеру қажет.

Энергияға тәуелді абсорбция — оптикалық модельдің негізгі элементі. Ол әсіресе ⁷Li үшін маңызды, себебі бұл изотоптың реакция кезінде жұтылу ықтималдығы жоғарырақ. Сондықтан энергияға тәуелді жұтылу потенциалын енгізу деректерді дұрыс сипаттаудың шешуші шарты болып табылады.

Parkar et al. (2007) зерттеулерінде 7.5–15 MeV энергияларда серпімді шашырау және альфа-бөлшектердің бұрыштық таралуы өлшенді, синтез/қосылу қималары реакция қималарына тең болып, тікелей реакция үлесі мардымсыз. Оптикалық модель арқылы реакция қималары талданды. Бұл энергияларда тікелей реакциялар үлесі аз (<6%), ал негізгі процесс — толық қосылу (синтез/қосылу) [6]. Parkar (2007) тосқауыл маңында синтез/қосылу негізгі процесс екенін дәлелдеді, ал тікелей реакция үлесі өте аз екенін көрсетті.



Сурет 1. Төмен энергиялар – Кулондық шашырау басым.

Parkar (2007) еңбегінде тікелей реакция үлесі <6% деп көрсетілгенімен, нақты қандай процестердің осы санатқа жататыны ашылмаған. Әдетте тікелей реакцияға нуклон тасымалдау (transfer) және ыдырау (breakup) арналары кіреді. Бұл энергия диапазонында олардың үлесі мардымсыз болып шыққан, сондықтан негізгі процесс толық қосылу (синтез/қосылу) екені анықталды. Осылайша, Parkar жұмысы тікелей реакциялардың серпімді шашырауға қосқан үлесінің аз екенін сандық тұрғыдан көрсетті, ал синтез/қосылу тосқауыл маңында басым процесс болып табылады

Schumacher et al. (1973) жұмыстарында 34–36 MeV энергияларда серпімді және серпімсіз шашыраулар өлшенді. DWBA әдісі арқылы бір нуклонды тасымалдау реакциялары талданды. Нәтижелер ${}^7\text{Li}$ ядросының құрылымдық ерекшеліктерін ескергенде серпімді шашырауды жақсы сипаттауға болатынын көрсетті.

Schumacher et al. (1973) зерттеуіндегі эксперименттік нәтижелер

- ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ жүйесі үшін 36 МэВ энергияда абсолюттік дифференциалдық қималар өлшенді.
- Спектрлерде ${}^7\text{Li}$ ядросының негізгі күйі мен 0,48 МэВ-тағы бірінші қозған күйі дублет ретінде көрінді [7].
- Ал теориялық талдау жолдары: қолданылған потенциал — Вудс–Саксон түріндегі оптикалық модель (реалды және жұтылу бөліктері бар). Параметрлер бірнеше «жиын» түрінде анықталды (Кесте 2 және 3):
- Мысалы, «III» параметрлер жиыны: $V \approx 188$ МэВ, $r_r \approx 1.21$ фм, $a_r \approx 0.82$ фм, $W \approx 12.9$ МэВ.
- «IV» жиыны: $V \approx 245$ МэВ, $r_r \approx 1.21$ фм, $a_r \approx 0.76$ фм, $W \approx 14.7$ МэВ [7].
- Авторлар бірнеше параметрлік шешімдер бірдей сапалы сәйкестік беретінін атап өтеді, бірақ физикалық тұрғыдан негізделген мәндер «байланысқан күй» есептеулерімен салыстыру арқылы таңдалды.

Кесте 2. ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ жүйесі үшін оптикалық модельдің Вудс–Саксон потенциалының параметрлері (алғашқы іздеу нәтижелері) [7]

Жүйе	Энергия (МэВ)	V (МэВ)	r_r (фм)	a_r (фм)	W (МэВ)	r_v (фм)	a_v (фм)
${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$	36	139.1	1.62	0.58	18.8	1.99	0.93

Кесте 3. ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ жүйесі үшін оптикалық модельдің Вудс–Саксон потенциалының параметрлері (кеңейтілген іздеу нәтижелері) [7]

Жүйе	Энергия (МэВ)	Потенциал тобы	V (МэВ)	r_r (фм)	a_r (фм)	W (МэВ)	r_v (фм)	a_v (фм)
${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$	36	III	187.8	1.208	0.824	12.9	2.17	0.770
		IV	245.0	1.210	0.759	14.7	2.00	0.909

Нәтижелер ${}^7\text{Li}$ үшін реалды потенциалдың салыстырмалы түрде таяз екенін көрсетті, бұл литийдің кластерлік құрылымындағы ядролық күштердің ішінара қанығу эффектісімен түсіндіріледі.

Vineyard et al. (1984) зерттеулерінде 24–34 MeV энергияларда кең бұрыштық диапазонда деректер алынды. Вудс–Саксон және Қосарланған потенциалдары қолданылды. Үлкен бұрыштардағы деректер потенциалды нақтылауға мүмкіндік берді. Қосарланған потенциалдар тәжірибемен жақсы сәйкеседі, бірақ нормализация коэффициентінің <1 болуы ядроның бұзылу әсерін көрсетеді.

Эксперимент нәтижелері:

- ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ жүйесі үшін серпімді шашырау деректері 34 МэВ энергияда өлшенді.
- Бұрыштық диапазон кең болды (10° – 170°), сондықтан үлкен бұрыштардағы қималар да сенімді тіркелді.
- Алдыңғы бұрыштарда (80° дейін) деректерді оптикалық модель жақсы сипаттады, бірақ үлкен бұрыштарда сәйкестік нашар болды.
- ${}^6\text{Li}$ мен ${}^7\text{Li}$ салыстырғанда, ${}^7\text{Li}$ үшін үлкен бұрыштардағы қималар шамамен бір тәртіпке (order of magnitude) аз болып шықты. Бұл екі изотоптың потенциалдық сипаттамаларының айырмашылығын көрсетті [8].

- Теориялық талдау жолдары Вудс-Саксон потенциалдары қолданылып;
- Бірнеше параметрлік жиындар (VII, VIII, IX) алынды (Кесте 4).
- Барлық жиындар деректерді ұқсас сапада сипаттады, бірақ үлкен бұрыштардағы қималарды толық түсіндіре алмады.
- Реалды потенциалдардың тереңдігі 159–290 МэВ аралығында өзгерді, ал жұтылу бөлігі 7–11 МэВ шамасында болды [8-12].

Кесте 4. ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ жүйесі үшін Вудс-Саксон оптикалық модель параметрлері ($E = 34$ МэВ) [8]

Жиын	V_0 (МэВ)	r_r (фм)	a_r (фм)	W_0 (МэВ)	r_i (фм)	a_i (фм)
VII	159	0.63	0.73	7.20	1.38	0.85
VIII	223	0.63	0.68	8.64	1.31	0.92
IX	290	0.64	0.64	10.71	1.22	0.97

V_0 – нақты потенциал тереңдігі, W_0 – мнималық потенциал тереңдігі, r_r , a_r – нақты потенциалдың радиус және диффузиялық параметрлері, r_i , a_i – жұтылу потенциалының радиус және диффузиялық параметрлері

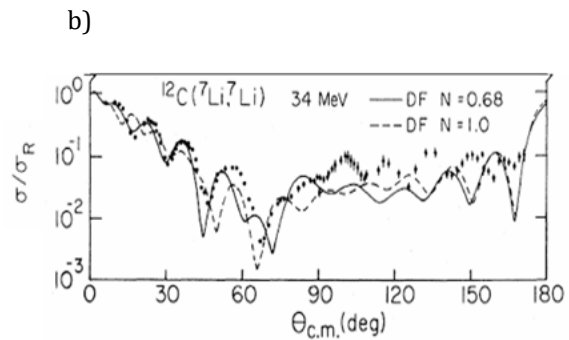
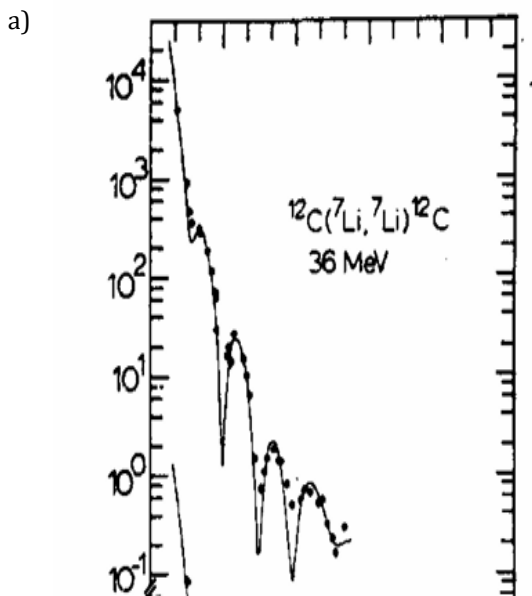
Қосарланған потенциалдар да қолданылып:

- Нормализация коэффициенті $N \approx 0.68$ болып шықты (Кесте 5).
- Бұл коэффициенттің бірліктен төмен болуы ${}^7\text{Li}$ ядросының ыдырау әсерлерімен түсіндірілді.
- Квадрупольдік бөлік қосылғанда да сәйкестік жақсармады, керісінше осцилляциялық құрылым әлсіреп кетті.

Кесте 5. ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ жүйесі үшін қосарланған оптикалық модель параметрлері ($E = 34$ МэВ) [8]

Жүйе	Энергия (МэВ)	N (норм. фактор)	W_0 (МэВ)	r_i (фм)	a_i (фм)
${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$	34	0.68	10.67	1.21	1.14

N – нақты қосарланған потенциалды масштабтау үшін қолданылатын нормализация коэффициенті, W_0 – жұтылу потенциалының тереңдігі, r_i , a_i – жұтылу потенциалының радиус және диффузиялық параметрлері.



a) серпімді шашырау және оптикалық модельге сәйкес келтіру [7].

b) Вудс-Саксон потенциалдарының негізінде ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ жүйесі үшін серпімді шашыраудың қоздыру функциясының болжамдары [8]. Эксперименттік деректер - [9].

Сурет 2. Орташа энергиялар – дифракциялық минимумдар айқын.

Katori et al. (1988) зерттеулерінде 18–28 MeV/нуклон энергияларда серпімді және инеластикалық шашыраулар өлшенді. CDCC әдісі қолданылып, ${}^7\text{Li}$ ядросының бұзылу әсері талданды. Реалды потенциалдың шамамен 25% әлсіреуі ${}^7\text{Li}$ ядросының бұзылуымен түсіндірілді.

Katori et al. (1988) эксперимент нәтижелері:

- ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ жүйесі үшін серпімді шашырау қималары 131.8 МэВ энергияда өлшенді.
- Бұрыштық диапазон кеңейтіліп, өте алдыңғы бұрыштарда (2° – 10°) және әдеттегі бұрыштарда (10° – 37°) деректер жиналды [10].
- Энергия рұқсаттылығы шамамен 400 кэВ болғандықтан, ${}^7\text{Li}$ дің 0.478 МэВ қозған күйі негізгі күйден ажыратылмады, сондықтан оның серпімді каналға қосқан үлесі кейін талқыланды.
- Қималардың белгісіздігі шамамен 15%-дан төмен болды [10-17].

Теориялық талдау жолдары: Бір арналы қосарланған моделі қолданылып, деректерді сипаттау үшін қосарлы потенциалдың реалды бөлігін айтарлықтай азайту ($\text{NR} \approx 0.6$) қажет екені белгілі болды. CDCC (coupled discretized continuum channels) әдісі қолданылып, $\text{NR} = 1.0$ кезінде деректерді жақсы сипаттады және бұл $\text{NR} < 1$ азаюының себебі — ${}^7\text{Li}$ ядросының ыдырау (breakup) әсері екенін көрсетті [10-17].

Vineyard (1984) және Katori (1988) еңбектерінде ${}^7\text{Li}$ ядросының ыдырау әсерінің маңызы көрсетілгенімен, нақты қай арналардың басым екені толық ашылмаған. Әдетте ${}^7\text{Li} \rightarrow \alpha + t$ ыдырау каналы негізгі үлес қосады, себебі бұл бөлшектердің байланысы әлсіз және ыдырау ықтималдығы жоғары. CDCC әдісінің артықшылығы — дәл осы ыдырау арналарының серпімді шашырауға сандық үлесін есептеуге мүмкіндік беруінде. Бұл тәсіл арқылы серпімді қималарды дұрыс сипаттау үшін folded-потенциалдың реалды бөлігін азайту қажеттілігі түсіндірілді. Сонымен қатар, CDCC әдісі ыдырау каналдарының серпімді шашырауға қосқан үлесін сандық тұрғыдан бағалауға мүмкіндік беріп, ${}^7\text{Li}$ ядросының құрылымдық ерекшеліктерін нақтылауда шешуші рөл атқарды.

Nadasen et al. (1995) 350 MeV энергияда серпімді шашырау деректері бірегей оптикалық потенциалдарды анықтауға мүмкіндік берді. ${}^7\text{Li}$ квадруполь моментінің әсері байқалмады. Жоғары энергияда бірегей потенциалдар алынып, төмен энергиядағы көпмәнділікті жоюға мүмкіндік берді.

Nadasen et al. (1995) зерттеу нәтижелері:

- ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ жүйесі 350 МэВ энергияда зерттелді.
- Бұрыштық диапазон: 3° – 43° (орталық масса жүйесінде).
- Қималар сегіз реттік шаманы қамтыды.
- Алдыңғы бұрыштарда аз ғана дифракциялық осцилляциялар байқалды, ал үлкен бұрыштарда қималар тегіс экспоненциалды түрде азайды. Бұл «farside» шашыраудың басымдылығымен түсіндірілді.
- ${}^7\text{Li}$ квадрупольдік моментінің әсері байқалмады: дифракциялық минимумдардың тереңдігі ${}^6\text{Li}$ нәтижелерімен ұқсас болды [18].

Теориялық оптикалық модельдік талдау арқылы:

- ECIS79 бағдарламасы қолданылды.
- Реалды және көлемдік жұтылу потенциалдары қарастырылды.
- Алты параметр бойынша іздеу жүргізіліп, бірегей шешімдер алынды.
- Үлкен бұрыштардағы деректер бірегей потенциалдарды таңдауда шешуші рөл атқарды.
- Қосарланған модельдік есептеулер нәтижесінде:
- МЗ Y-типті нуклон-нуклондық күш қолданылды.
- ${}^7\text{Li}$ және ${}^{12}\text{C}$ тығыздықтары Вудс–Саксон толқындық функцияларымен сипатталды.
- Есептелген қосарланған потенциалдар феноменологиялық бірегей потенциалдарға өте ұқсас болды
- ${}^{12}\text{C}$ үшін нормализация қажет болмады ($N = 1.0$) [18-24].

Su Jun et al. (2010) 23.7 MeV энергияда серпімді шашырау және тасымалдау реакциялары өлшенді. DWBA арқылы спектроскопиялық факторлар анықталды (0.73 және 0.90). Бұл деректер астрофизикалық тұрғыдан маңызды ${}^6\text{Li}(n,\gamma){}^7\text{Li}$ реакциясының қималарын есептеуге мүмкіндік берді. Su Jun et al. (2010) мақаласынан эксперименттік нәтижелерге көз жүгіртсек:

- Жұмыста ${}^7\text{Li}({}^6\text{Li}, {}^6\text{Li}) {}^7\text{Li}$ серпімді шашырауы және беріліс реакциялары $E_{\text{cm}} = 23.7$ МэВ энергияда өлшенді.
- Серпімді шашырау қималары оптикалық модельмен талданды, беріліс үлесі өте аз (<1%).
- Бұрыштық таралулар DWBA әдісімен қарастырылды [25].

Теориялық талдау жолдары

Оптикалық потенциал параметрлері Вудс–Саксон формасында анықталды (Кесте 6).

Кесте 6. ${}^6\text{Li} + {}^7\text{Li}$ жүйесі үшін оптикалық потенциал параметрлері ($E_{\text{c.m.}} = 23.7$ МэВ) [25]

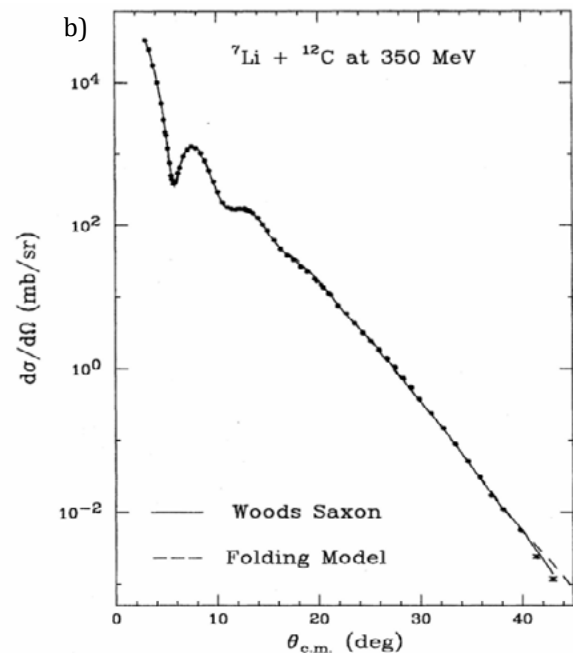
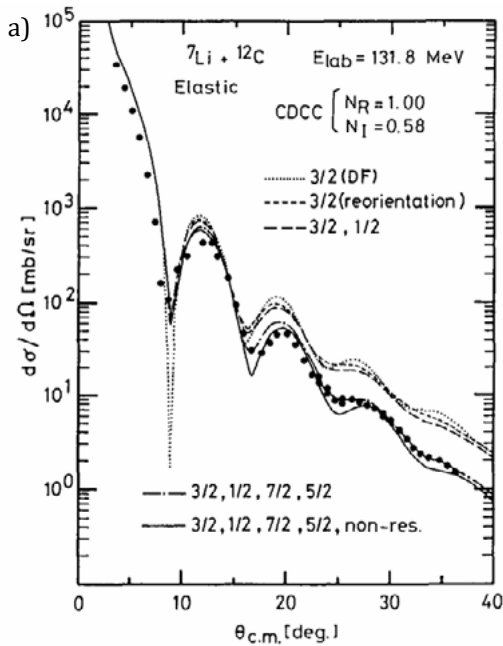
V (МэВ)	r_R (фм)	a_R (фм)	W (МэВ)	r_I (фм)	a_I (фм)	r_C (фм)	$\chi^2/\text{нүкте}$
73.4	0.50	0.92	32.6	1.00	0.80	1.25	4.0

V – нақты (real) потенциалдың тереңдігі, r_R, a_R – нақты потенциалдың радиус және диффузиялық параметрлері, W – жұтылу потенциалдың тереңдігі, r_I, a_I – жұтылу потенциалының радиус және диффузиялық параметрлері, r_C – Кулондық радиус параметрі, $\chi^2/\text{нүкте}$ – эксперименттік деректерге сәйкестік сапасы DWBA талдауымен ${}^7\text{Li} + n$ спектроскопиялық факторлары есептелді:

- Негізгі күй үшін: 0.73 ± 0.05 .
- Бірінші қозған күй үшін: 0.90 ± 0.09 [25].

Бұл мәндер бұрынғы теориялық және тәжірибелік нәтижелермен жақсы сәйкеседі.

Jun (2010) еңбегінде DWBA әдісі арқылы алынған спектроскопиялық факторлар (негізгі күй үшін 0.73 ± 0.05 және бірінші қозған күй үшін 0.90 ± 0.09) астрофизикалық реакция қималарын есептеуде шешуші рөл атқарады. Бұл факторлар тікелей ${}^6\text{Li}(n,\gamma){}^7\text{Li}$ реакциясының қималарын нормалауға енгізіледі. Мысалы, негізгі күй үшін алынған 0.73 мәні реакция қимасын шамамен 27%-ға азайтады, ал бірінші қозған күй үшін 0.90 мәні қиманы тек 10%-ға төмендетеді. Осылайша, спектроскопиялық факторлардың айырмашылығы астрофизикалық G-фактордың энергияға тәуелді қисығын қалыптастыруда маңызды: негізгі күй үлесі азайғанымен, қозған күй үлесі жоғарырақ болып, жалпы реакция жылдамдығының энергияға тәуелділігін нақтылайды. Бұл нәтижелер литий аномалиясын түсіндіруде қолданылатын астрофизикалық модельдерге сандық түзету енгізуге мүмкіндік береді.



a) ${}^7\text{Li}$ нің қозған күйлерінің әртүрлі қосылыстарының (резонанстық және резонанстық емес бөліктер) серпімді арнаға әсері. Ең үлкен үлес 4.63 МэВ және 6.68 МэВ резонанстық күйлерден келеді; ал жергілікті күйді қайта бағдарлау және 0.478 МэВ күйінің үлестері олардан аз және шамамен бірдей тәртіпте болады [10].

b) ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ 350 МэВ энергияда серпімді шашырауы үшін дифференциалды қиманың бұрыштық таралуы. Үзік емес сызық — берілген бірегей потенциал параметрлеріне сәйкес оптикалық модельдің сәйкес келтіруі; үзік сызық — қосарланған модельінің есептеулері [18].

Сурет 3. Жоғары энергиялар – экспоненциалды азаю байқалады.

Салыстырмалы талдау бөлімі

Жалпы алғанда, ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ жүйесін зерттеу біртіндеп дамып, әр кезеңде жаңа қырларын ашты. Poling (1972) төмен энергияларда оптикалық модельдің тиімділігін көрсетіп, бастапқы параметрлерді анықтады. Schumacher (1973) осы негізді орташа энергияларда кеңейтіп, кластерлік құрылымдағы қанығу әсерін айқындады. Vineyard (1984) үлкен бұрыштардағы деректерді енгізіп, ыдырау әсерінің маңызын көрсетті. Katori (1988) CDCC әдісін қолданып, ${}^7\text{Li}$ ядросының бұзылу ықтималдығын нақтылады. Nadasen (1995) жоғары энергияларда бірегей потенциалдарды анықтап, төмен энергиядағы көпмәнділікті жоюға мүмкіндік берді. Parkar (2007) тосқауыл маңында қосылу процесінің басым екенін дәлелдеді. Соңында Su Jun (2010) тасымалдау реакцияларын зерттеп, спектроскопиялық факторларды есептеп, астрофизикалық тұрғыдан маңызды нәтижелерге қол жеткізді. Осылайша, зерттеулердің хронологиясы төмен энергиядан жоғары энергияға дейінгі процестерді біртіндеп ашып, литийдің құрылымдық ерекшеліктерін және астрофизикалық рөлін толық сипаттауға мүмкіндік берді.

Poling et al. (1972) жүргізілген зерттеу көрсеткендей, оптикалық модель литийдің көміртеппен соқтығысуын сипаттауда тиімді құрал болып табылады. ${}^6\text{Li}$ және ${}^7\text{Li}$ үшін радиус пен диффузия параметрлері ортақ, ал реалды потенциалдың тереңдігі шамалас мәндер береді. Алайда, ${}^7\text{Li}$ үшін жұтылу потенциалының тереңдігі айтарлықтай көбірек болуы қажет, бұл оның реакция кезінде жұтылуға бейімділігін көрсетеді. Сонымен қатар, энергияға тәуелді абсорбцияның маңызы ерекше: модельдің тәжірибелік деректермен сәйкесуі үшін жұтылу тереңдіктің энергияға сызықтық тәуелділігін енгізу қажет. Бұл әсіресе ${}^7\text{Li}$ үшін маңызды, себебі энергия артқан сайын оның жұтылу ықтималдығы өседі. Жалпы алғанда, ${}^6\text{Li}$ дің бұрыштық таралуы дифракциялық сипатқа ие болса, ${}^7\text{Li}$ дің бұрыштық таралуы біршама «тегістелген» болып келеді. Бұл айырмашылық парциальдық амплитудаларда да көрінеді: ${}^6\text{Li}$ үшін амплитудалар үлкенірек және жұп-тақ толқындар әртүрлі траекториямен дамиды, ал ${}^7\text{Li}$ үшін амплитудалар біртекті түрде азаяды. Осылайша, литий изотоптарының көміртеппен соқтығысуын талдау олардың реакциялық қасиеттеріндегі айырмашылықты айқын көрсетеді: ${}^6\text{Li}$ — дифракциялық құрылымға бейім, ал ${}^7\text{Li}$ — энергияға тәуелді жұтылуы жоғарырақ және бұрыштық таралуы біркелкі сипатқа ие.

Schumacher (1973) еңбегінде ${}^7\text{Li}$ ядросының ${}^{12}\text{C}$ ядросымен серпімді әсерлесуі 36 МэВ энергияда зерттелді. Эксперименттік бұрыштық таралуы оптикалық модель арқылы жақсы сипатталды. Авторлар бірнеше параметрлік шешімдер ұсынғанымен, физикалық тұрғыдан негізделген мәндер байланысқан күй есептеулерімен салыстыру арқылы таңдалды. Бұл талдау ${}^7\text{Li}$ үшін реалды потенциалдың таяз екенін және кластерлік құрылымдағы ядролық күштердің қанығу әсерін көрсетеді.

Vineyard (1984) еңбегінде ${}^7\text{Li}$ ядросының ${}^{12}\text{C}$ ядросымен серпімді әсерлесуі 34 МэВ энергияда зерттелді. Эксперименттік деректер алдыңғы бұрыштарда оптикалық модельмен жақсы сипатталса да, үлкен бұрыштарда сәйкестік жеткіліксіз болды. Вудс-Саксон және қосарланған потенциалдар қолданылып, бірнеше параметрлік шешімдер алынды. Реалды потенциалдың тереңдігі 159–290 МэВ аралығында, ал нормализация коэффициенті $N \approx 0.68$ болды. Бұл нәтижелер ${}^7\text{Li}$ үшін ыдырау әсерлерінің маңызды рөл атқаратынын және үлкен бұрыштардағы қималарды түсіндіру үшін күрделірек модельдер қажет екенін көрсетті.

Katori (1988) еңбегінде ${}^7\text{Li}$ ядросының ${}^{12}\text{C}$ ядросымен серпімді әсерлесуі 131.8 МэВ энергияда зерттелді. Эксперименттік деректерді бір арналы қосарланған моделі арқылы сипаттау үшін реалды потенциалдың шамамен 40% азаюы қажет болды. Ал CDCC әдісі $NR = 1.0$ кезінде деректерді жақсы сипаттап, бұл азаюдың себебі ${}^7\text{Li}$ ядросының ыдырау әсері екенін дәлелдеді. Осылайша, ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ жүйесінде серпімді шашырауды түсіндіруде проективтің ыдырауы негізгі фактор болып табылады.

Nadasen (1995) еңбегінде ${}^7\text{Li}$ ядросының ${}^{12}\text{C}$ ядросымен серпімді әсерлесуі 350 МэВ энергияда зерттелді. Эксперименттік деректер үлкен бұрыштарда тегіс экспоненциалды азаюды көрсетті, бұл бірегей оптикалық модельдік потенциалдарды анықтауға мүмкіндік берді. Алынған потенциалдар ${}^6\text{Li}$ нәтижелерімен ұқсас болып шықты, сондықтан ${}^7\text{Li}$ дің квадрупольдік моменті бұл энергияда айтарлықтай әсер етпейді. Doublefolding модельдік есептеулер феноменологиялық потенциалдармен жақсы сәйкесіп, нормализациясыз деректерді сипаттады (${}^{12}\text{C}$ үшін). Осылайша, жоғары энергияларда ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ жүйесі үшін бірегей потенциалдар алғаш рет анықталды.

Parkar et al. (2007) « ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ жүйесі бойынша зерттеулердің эволюциясы төмен энергиядағы феноменологиялық сипаттамадан бастап, орташа энергияларда ыдырау әсерін ескеруге, ал жоғары энергияларда бірегей потенциалдарды анықтауға дейінгі даму жолын көрсетеді. Тосқауыл маңындағы энергияларда (Parkar, 2007) қосылу қималары реакция қималарына тең болып, тікелей реакция үлесі мардымсыз екені дәлелденді. Осылайша, ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ жүйесінде серпімді әсерлесуді түсіндіруде энергияға байланысты әртүрлі механизмдер басым болады: төменде — параметрлік анықталмағандық, ортада — ыдырау әсері, жоғарыда — бірегей потенциалдар, ал тосқауыл маңында — синтез/қосылу негізгі процесс.

Jun (2010) еңбегінде ⁷Li(⁶Li,⁶Li)⁷Li серпімді шашырауы және беріліс реакциялары $E_{c.m.} = 23.7$ МэВ энергияда зерттелді. DWBA талдауымен ⁷Li = ⁶Li + n спектроскопиялық факторлары сенімді түрде анықталды. Алынған мәндер ⁶Li(n, γ)⁷Li реакциясының қималарын есептеуге қолданылып, астрофизикалық энергияларда реакция жылдамдығы тұрақты екенін көрсетті. Бұл зерттеу ⁷Li ядросының құрылымын нақтылау мен астрофизикалық литий молшылықтарын түсіндіру үшін маңызды.

Кесте 7. ⁷Li + ¹²C жүйесі бойынша салыстырмалы эволюциялық талдау

Мақала	Энергия	Эксперименттік ерекшеліктер	Теориялық талдау жолдары	Негізгі тұжырым
Poling (1972)	4.5–13 МэВ	Төмен энергияларда серпімді шашырау қималары өлшенді.	Оптикалық модель, энергияға тәуелді параметрлер.	Төмен энергияларда деректерді сипаттау мүмкін болды, бірақ үлкен бұрыштарда жеткіліксіз.
Schumacher (1973)	36 МэВ	Серпімді шашырау қималары, дублет құрылымы (негізгі күй және 0.48 МэВ қозған күй).	Оптикалық модель (Вудс–Саксон). Бірнеше параметрлік шешімдер.	Оптикалық модель деректерді жақсы сипаттады, бірақ параметрлердің бірнеше шешімі бар.
Vineyard (1984)	34 МэВ	Кең бұрыштық диапазонда (10°–170°) деректер жиналды.	Вудс–Саксон және қосарланған потенциалдар. $N \approx 0.68$.	Folding потенциалдар тәжірибемен жақсы сәйкеседі, бірақ $N < 1$ ыдырау әсерін көрсетті.
Katori (1988)	131.8 МэВ	Алдыңғы бұрыштарда (2°–10°) және әдеттегі бұрыштарда (10°–37°) деректер жиналды.	Қосарланған және CDCC әдістері.	$NR < 1$ азаюының себебі — ⁷ Li ядросының ыдырауы екенін дәлелдеді.
Nadasen (1995)	350 МэВ	Жоғары энергияда (3°–43°) деректер сегіз реттік шаманы қамтыды.	Бірегей оптикалық модельдік потенциалдар анықталды. Folding модель нормализациясыз деректерді сипаттады.	⁷ Li квадрупольдік моментінің әсері байқалмады. Бірегей потенциалдар алғаш рет анықталды.
Parkar (2007)	7.5–15 МэВ (тосқауыл маңы)	Серпімді шашырау және альфабөлшектердің бұрыштық таралулары өлшенді.	Оптикалық модель (SNOOPY), статистикалық модель (PACE), FRDWBA.	Синтез/қосылу қималары реакция қималарына тең, тікелей реакция үлесі <6%. Синтез/қосылу негізгі процесс.

Jun (2010)	23.7 МэВ (${}^6\text{Li}$ + ${}^7\text{Li}$)	Серпімді шашырау және беріліс реакциялары өлшенді.	Оптикалық модель (PTOLEMY), DWBA талдау.	${}^7\text{Li} = {}^6\text{Li} + n$ спектроскопиялық факторлары анықталды (0.73 және 0.90). ${}^6\text{Li}(n,\gamma){}^7\text{Li}$ реакциясының астрофизикалық жылдамдығы есептелді.
------------	--	--	--	---

7-кестедегі параметрлерді талдау көрсеткендей, әр автордың нәтижелері энергияға және қолданылған әдіске байланысты ерекшеленеді. Poling (1972) төмен энергияларда жұтылу потенциалының сызықтық тәуелділігін көрсетті. Schumacher (1973) орташа энергияларда DWBA әдісі арқылы нуклон тасымалдау арналарын ескеріп, кластерлік қанығу әсерін ашты. Vineyard (1984) үлкен бұрыштардағы қималардың азаюын тіркеп, ыдырау әсерінің маңызын көрсетті. Katori (1988) CDCC әдісін қолданып, ${}^7\text{Li} \rightarrow \alpha + t$ ыдырау арнасының серпімді шашырауға қосқан үлесін сандық тұрғыдан бағалады. Nadasen (1995) жоғары энергияларда бірегей потенциалдарды анықтап, төмен энергиядағы көпмәнділікті жоюға мүмкіндік берді. Parkar (2007) тосқауыл маңында синтез/қосылу процесінің басым екенін дәлелдеп, тікелей реакция үлесінің (<6%) мардымсыз екенін көрсетті. Соңында Su Jun (2010) тасымалдау реакцияларын зерттеп, спектроскопиялық факторларды есептеп, астрофизикалық тұрғыдан маңызды нәтижелерге қол жеткізді. Осылайша, кестедегі параметрлерді талдау зерттеулердің бір-бірімен сабақтастығын және энергияға тәуелді механизмдердің эволюциясын айқын көрсетеді.

Қорытынды

${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ жүйесінің серпімді шашырауын әртүрлі энергия диапазондарында қарастырған зерттеулер көрсеткендей, қолданылған теориялық модельдердің тиімділігі энергияға тәуелді болып келеді:

- Төмен энергиялар (4–13 МэВ): Оптикалық модель (ОМ) ең қолайлы, себебі жұтылу потенциалының сызықтық тәуелділігі деректерді дұрыс сипаттаудың негізгі шарты болып табылады.
- Орташа энергиялар (30–40 МэВ): DWBA әдісі тиімді, өйткені нуклон тасымалдау арналары мен кластерлік қанығу әсерін ескергенде серпімді шашырау дәл сипатталады.
- Орташа-жоғары энергиялар (20–130 МэВ/нуклон): CDCC әдісі басым, себебі ол ${}^7\text{Li} \rightarrow \alpha + t$ ыдырау арнасының серпімді шашырауға қосқан үлесін сандық тұрғыдан бағалауға мүмкіндік береді.
- Жоғары энергиялар (350 МэВ және одан жоғары): байланысқан арналар және бірегей оптикалық потенциалдар тиімді, өйткені көпмәнділікті жоюға және деректерді бірегей шешімдермен сипаттауға мүмкіндік береді.
- Тосқауыл маңы (7–15 МэВ): Синтез/қосылу процесін сипаттау үшін ОМ негізінде толық қосылу қималары қарастырылды, ал тікелей реакциялар үлесі мардымсыз (<6%).
- Астрофизикалық тұрғыдан (23–24 МэВ): DWBA әдісі спектроскопиялық факторларды есептеуде тиімді болып шықты, бұл факторлар Gфактордың энергияға тәуелді қисығын нақтылауға мүмкіндік берді.

Осылайша, әр энергия диапазонында қолданылған модельдер бір-бірін толықтырып, ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ жүйесінің серпімді шашырауын жан-жақты сипаттауға мүмкіндік береді. Бұл талдау литийдің құрылымдық ерекшеліктерін ашуға және астрофизикалық процестердегі рөлін нақтылауға қосымша үлес қосады.

Алғыс айту

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі (Грант № AP26194167 «Бірнеше нысана өрісінде Li изотоптарының ыдырауы мен тритонның тасымалдануының әсері») қаржыландырады.

Авторлардың қосқан үлесі

Амангелді Н. –зерттеуге жетекшілік етті, мақаланың соңғы нұсқасын бекітті.

Ерғалиұлы Ғ. –мақаланың тұжырымдамасына өз үлесін қосты.

Балабеков Б.Б. –мәтінді және библиографияны жазып, деректерді өңдеді. Ілеспе хатты әзірлеп, редакцияға жолдауды іске асырды.

А. Жумадил –мақаланың безендірілуіне үлес қосты.

Қолжазбаны дайындау процесінде генеративті ЖИ және ЖИ пайдаланатын технологияларды пайдалану туралы мәлімдеме

Осы жұмысты дайындау процесінде автор Балабеков Б.Б. таблица құру барысында, кей тіркестерді дұрыс түсіндіре алу үшін, жұмыстың мазмұнын дұрыс жеткізу мақсатында Copilot пайдаланды. Осы құралды/сервисті пайдаланғаннан кейін автор Балабеков Б.Б. мазмұнды қажеттілігіне қарай тексерді, редакциялады және жарияланған мақаланың мазмұны үшін толық жауапты болады.

Әдебиеттер тізімі

1. J. E. Poling, E. Norbeck, and R. R. Carlson, Elastic Scattering of Lithium by Carbon, *Phys. Rev. C* 5, 1819 (1972). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.5.1819>
2. Bethge, K. Meier-Ewert, and K. O. Pfeiffer, Elastic scattering of Li6 by C12 at 20 MeV, *Z. Physik* 208, 486 (1968). <https://doi.org/10.1007/BF01393055>
3. Johnson and M. A. Waggoner, Elastic scattering of Li6 by C12 at 13 MeV, *Phys. Rev. C* 2, 41 (1970). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.2.41>
4. Bennett and I. S. Grant, Elastic scattering of Li7 by C12 at 7.3 MeV, in *Proceedings of the Third Conference on Reactions Between Complex Nuclei*, edited by A. Ghiorso, R. M. Diamond, and H. E. Conzett (University of California Press, Berkeley, 1963), p. 50.
5. Watson, Optical Potentials for the Elastic Scattering of 6Li Ions, *Nucl. Phys. A* 198, 129 (1972). [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(72\)90775-0](https://doi.org/10.1016/0375-9474(72)90775-0)
6. V. V. Parkar, K. Mahata, S. Santra, S. Kailas, A. Shrivastava, K. Ramachandran, A. Chatterjee, V. Jha, and P. Singh, *Fusion cross sections for 7Li + 12C system at near barrier energies*, *Nucl. Phys. A* 792, 187 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2007.05.013>
7. Schumacher, N. Ueta, H. H. Duhm, K.-I. Kubota, and W. J. Klages, Lithium elastic and inelastic scattering and lithium-induced single nucleon transfer reactions, *Nucl. Phys. A* 212, 573 (1973). [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(73\)90300-7](https://doi.org/10.1016/0375-9474(73)90300-7)
8. M. F. Vineyard, J. Cook, K. W. Kemper, and M. N. Stephens, *Optical potentials for the elastic scattering of 6Li+12C, 6Li+16O, and 7Li+12C*, *Phys. Rev. C* 30, 916 (1984). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.30.916>
9. B. R. Fulton and T. M. Cormier, *Phys. Lett. B* 97, 209 (1980). [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(80\)90633-4](https://doi.org/10.1016/0370-2693(80)90633-4)
10. Katori, T. Shimoda, T. Fukuda, S. Shimoura, A. Sakaguchi, M. Tanaka, T. Yamagata, N. Takahashi, H. Ogata, M. Kamimura, and Y. Sakuragi, Breakup effects of 6,7Li on elastic and inelastic scattering from 12C at 18–28 MeV/nucleon, *Nucl. Phys. A* 480, 323 (1988). [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(88\)90387-1](https://doi.org/10.1016/0375-9474(88)90387-1)
11. Z. Majka, H. Gils, and H. Rebel, *Z. Phys. A* 288, 139 (1978). <https://doi.org/10.1007/BF01408585>
12. V. Hinzdo, K. W. Kemper, and J. Szymakowski, *Phys. Rev. Lett.* 46, 590 (1981). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.46.590>
13. J. Cook, N. M. Clarke, J. Coopersmith, and R. J. Griffiths, *Nucl. Phys. A* 386, 346 (1982). [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(82\)90457-0](https://doi.org/10.1016/0375-9474(82)90457-0)
14. J. S. Eck, T. R. Ophel, P. D. Clark, J. Nurzynski, and D. C. Weisser, *Phys. Rev. C* 25, 2391 (1982). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.25.2391>
15. I. J. Thompson and M. A. Nagarajan, *Phys. Lett. B* 106, 163 (1981). [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(81\)90136-6](https://doi.org/10.1016/0370-2693(81)90136-6)
16. H. Amakawa, A. Mori, H. Nishioka, K. Yazaki, and S. Yamaji, *Phys. Rev. C* 23, 583 (1981). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.23.583>
17. R. S. Mackintosh and A. M. Kobos, *Phys. Lett. B* 116, 95 (1982). [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(82\)90584-6](https://doi.org/10.1016/0370-2693(82)90584-6)
18. Nadasen, J. Brusoe, J. Farhat, T. Stevens, J. Williams, L. Nieman, J. S. Winfield, R. E. Warner, F. D. Becchetti, J. W. Jänecke, T. Annakkage, J. Bajema, D. Roberts, and H. S. Govinden, Unique potentials for the elastic scattering of 350 MeV 7Li from 12C and 28Si, *Phys. Rev. C* 52, 1894 (1995). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.52.1894>

19. L. T. Chua, F. D. Becchetti, J. Janecke, and F. L. Milder, Nucl. Phys. A 273, 243 (1976). [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(76\)90253-4](https://doi.org/10.1016/0375-9474(76)90253-4)
20. C. B. Fulmer et al., Nucl. Phys. A 356, 235 (1981). [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(81\)90246-1](https://doi.org/10.1016/0375-9474(81)90246-1)
21. R. Huffman, A. Galonsky, R. Markham, and C. Williamson, Phys. Rev. C 22, 1522 (1980). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.22.1522>
22. A. Nadasen et al., Phys. Rev. C 37, 132 (1988). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.37.132>
23. A. Nadasen et al., Phys. Rev. C 39, 536 (1989). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.39.536>
24. A. Nadasen et al., Phys. Rev. C 47, 674 (1993). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.47.674>
25. Su Jun, Z.-H. Li, B. Guo, X.-X. Bai, Z.-C. Li, J.-C. Liu, Y.-B. Wang, G. Lian, S. Zeng, B.-X. Wang, S.-Q. Yan, Y.-J. Li, E.-T. Li, Q.-W. Fan, and W.-P. Liu, Neutron spectroscopic factors of ${}^7\text{Li}$ and astrophysical ${}^6\text{Li}(n,\gamma){}^7\text{Li}$ reaction rates, Chin. Phys. Lett. 27, 052101 (2010). <https://doi.org/10.1088/0256-307X/27/5/052101>

N. Amangeldi¹, G. Yergaliuly¹, B.B. Balabekov^{1,2*}, A. Zhumadil¹

¹ *L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

² *Hospital of the Medical Center of the Administrative Department of the President of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan*

(E-mail: nurlan.amangeldi1979@gmail.com ; yergaliuly.gani@gmail.com ; baglanbalabekov95@gmail.com ; aminazhumadil403@gmail.com)

A Review of Experimental Results and Theoretical Approaches to the Elastic Interaction between ${}^7\text{Li}$ and ${}^{12}\text{C}$ Nuclei

Abstract. The article provides a comprehensive review of experimental and theoretical studies on the elastic scattering of the ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ system. The light nucleus ${}^7\text{Li}$ has a cluster structure and is prone to breakup, making its interaction with carbon crucial for clarifying nuclear structure, reaction mechanisms, and the role of lithium in astrophysical processes. The authors systematize the works of Poling (1972), Schumacher (1973), Vineyard (1984), Katori (1988), Nadasen (1995), Parkar (2007), and Jun (2010), highlighting the energy-dependent nature of different processes: at low energies Coulomb effects and parameter uncertainties dominate, at intermediate energies diffraction minima and breakup probabilities appear, at higher energies unique potentials are observed, and near the barrier fusion processes prevail. Results obtained using optical models and the CDCC method demonstrate the significance of ${}^7\text{Li}$ breakup, the linear dependence of absorption potential depth on energy, and the importance of complete fusion. Furthermore, data on this system are particularly relevant for explaining the astrophysical lithium anomaly. The review compares experimental findings across different energy ranges, traces their evolution, and contributes to a deeper understanding of nuclear structure and astrophysical processes. This study serves as an important source for clarifying lithium abundances in primordial nucleosynthesis.

Keywords: nuclear scattering; elastic scattering; ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ system; optical model; breakup effects; astrophysical processes; lithium abundance

Н. Амангелді¹, Ғ. Ергалиұлы¹, Б.Б. Балабеков^{1,2*}, А. Жумади¹

¹ *Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, Астана, Казахстан*

² *Больница Медицинского центра Управления делами Президента Республики Казахстан, Астана, Казахстан*

(E-mail: nurlan.amangeldi1979@gmail.com , yergaliuly.gani@gmail.com , baglanbalabekov95@gmail.com , aminazhumadil403@gmail.com)

Обзор экспериментальных результатов и методов теоретического анализа упругого взаимодействия ядра ${}^7\text{Li}$ с ядром ${}^{12}\text{C}$

Аннотация. В статье представлен широкий обзор экспериментальных и теоретических исследований по упругому рассеянию системы ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$. Лёгкое ядро ${}^7\text{Li}$ обладает кластерной структурой и склонно к распаду,

поэтому его взаимодействие с углеродом позволяет уточнить внутреннее строение ядра, механизмы реакций и роль лития в астрофизических процессах. Авторы систематизируют работы Poling (1972), Schumacher (1973), Vineyard (1984), Katori (1988), Nadasen (1995), Parkar (2007) и Jun (2010), показывая зависимость различных процессов от энергии: на низких энергиях доминируют кулоновское взаимодействие и параметрическая неопределённость, на средних — дифракционные минимумы и вероятность распада, на высоких — уникальные потенциалы, а вблизи барьера — процессы слияния. Результаты, полученные с помощью оптических моделей и метода CDCC, демонстрируют влияние распада ядра ${}^7\text{Li}$, линейную зависимость глубины поглощающего потенциала от энергии и важность полного слияния. Кроме того, данные по этой системе имеют особое значение для объяснения литиевой астрофизической аномалии. Обзор сопоставляет экспериментальные результаты в разных диапазонах энергий, показывает их эволюцию и вносит вклад в более глубокое понимание ядерной структуры и астрофизических процессов. Исследование служит важным источником для объяснения избыточности лития в первичном нуклеосинтезе.

Ключевые слова: ядерное рассеяние; упругое рассеяние; система ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$; оптическая модель; эффекты распада; астрофизические процессы; литиевая аномалия

References

1. J. E. Poling, E. Norbeck, and R. R. Carlson, Elastic Scattering of Lithium by Carbon, *Phys. Rev. C* 5, 1819 (1972). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.5.1819>
2. Bethge, K. Meier-Ewert, and K. O. Pfeiffer, Elastic scattering of Li6 by C12 at 20 MeV, *Z. Physik* 208, 486 (1968). <https://doi.org/10.1007/BF01393055>
3. Johnson and M. A. Waggoner, Elastic scattering of Li6 by C12 at 13 MeV, *Phys. Rev. C* 2, 41 (1970). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.2.41>
4. Bennett and I. S. Grant, Elastic scattering of Li7 by C12 at 7.3 MeV, in *Proceedings of the Third Conference on Reactions Between Complex Nuclei*, edited by A. Ghiorso, R. M. Diamond, and H. E. Conzett (University of California Press, Berkeley, 1963), p. 50.
5. Watson, Optical Potentials for the Elastic Scattering of 6Li Ions, *Nucl. Phys. A* 198, 129 (1972). [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(72\)90775-0](https://doi.org/10.1016/0375-9474(72)90775-0)
6. V. V. Parkar, K. Mahata, S. Santra, S. Kailas, A. Shrivastava, K. Ramachandran, A. Chatterjee, V. Jha, and P. Singh, *Fusion cross sections for ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ system at near barrier energies*, *Nucl. Phys. A* 792, 187 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2007.05.013>
7. Schumacher, N. Ueta, H. H. Duhm, K.-I. Kubota, and W. J. Klages, Lithium elastic and inelastic scattering and lithium-induced single nucleon transfer reactions, *Nucl. Phys. A* 212, 573 (1973). [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(73\)90300-7](https://doi.org/10.1016/0375-9474(73)90300-7)
8. M. F. Vineyard, J. Cook, K. W. Kemper, and M. N. Stephens, *Optical potentials for the elastic scattering of $6\text{Li}+{}^{12}\text{C}$, $6\text{Li}+{}^{16}\text{O}$, and ${}^7\text{Li}+{}^{12}\text{C}$* , *Phys. Rev. C* 30, 916 (1984). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.30.916>
9. B. R. Fulton and T. M. Cormier, *Phys. Lett. B* 97, 209 (1980). [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(80\)90633-4](https://doi.org/10.1016/0370-2693(80)90633-4)
10. Katori, T. Shimoda, T. Fukuda, S. Shimoura, A. Sakaguchi, M. Tanaka, T. Yamagata, N. Takahashi, H. Ogata, M. Kamimura, and Y. Sakuragi, Breakup effects of $6,7\text{Li}$ on elastic and inelastic scattering from ${}^{12}\text{C}$ at 18–28 MeV/nucleon, *Nucl. Phys. A* 480, 323 (1988). [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(88\)90387-1](https://doi.org/10.1016/0375-9474(88)90387-1)
11. Z. Majka, H. Gils, and H. Rebel, *Z. Phys. A* 288, 139 (1978). <https://doi.org/10.1007/BF01408585>
12. V. Hinzdo, K. W. Kemper, and J. Szymakowski, *Phys. Rev. Lett.* 46, 590 (1981). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.46.590>
13. J. Cook, N. M. Clarke, J. Coopersmith, and R. J. Griffiths, *Nucl. Phys. A* 386, 346 (1982). [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(82\)90457-0](https://doi.org/10.1016/0375-9474(82)90457-0)
14. J. S. Eck, T. R. Ophel, P. D. Clark, J. Nurzynski, and D. C. Weissner, *Phys. Rev. C* 25, 2391 (1982). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.25.2391>
15. I. J. Thompson and M. A. Nagarajan, *Phys. Lett. B* 106, 163 (1981). [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(81\)90136-6](https://doi.org/10.1016/0370-2693(81)90136-6)
16. H. Amakawa, A. Mori, H. Nishioka, K. Yazaki, and S. Yamaji, *Phys. Rev. C* 23, 583 (1981). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.23.583>
17. R. S. Mackintosh and A. M. Kobos, *Phys. Lett. B* 116, 95 (1982). [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(82\)90584-6](https://doi.org/10.1016/0370-2693(82)90584-6)
18. Nadasen, J. Brusoe, J. Farhat, T. Stevens, J. Williams, L. Nieman, J. S. Winfield, R. E. Warner, F. D. Becchetti, J. W. Jänecke, T. Annakkage, J. Bajema, D. Roberts, and H. S. Govinden, Unique potentials for the elastic scattering of 350 MeV ${}^7\text{Li}$

- from ^{12}C and ^{28}Si , Phys. Rev. C 52, 1894 (1995). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.52.1894>
19. L. T. Chua, F. D. Becchetti, J. Janecke, and F. L. Milder, Nucl. Phys. A 273, 243 (1976). [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(76\)90253-4](https://doi.org/10.1016/0375-9474(76)90253-4)
 20. C. B. Fulmer et al., Nucl. Phys. A 356, 235 (1981). [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(81\)90246-1](https://doi.org/10.1016/0375-9474(81)90246-1)
 21. R. Huffman, A. Galonsky, R. Markham, and C. Williamson, Phys. Rev. C 22, 1522 (1980). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.22.1522>
 22. A. Nadasen et al., Phys. Rev. C 37, 132 (1988). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.37.132>
 23. A. Nadasen et al., Phys. Rev. C 39, 536 (1989). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.39.536>
 24. A. Nadasen et al., Phys. Rev. C 47, 674 (1993). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.47.674>
 25. Su Jun, Z.-H. Li, B. Guo, X.-X. Bai, Z.-C. Li, J.-C. Liu, Y.-B. Wang, G. Lian, S. Zeng, B.-X. Wang, S.-Q. Yan, Y.-J. Li, E.-T. Li, Q.-W. Fan, and W.-P. Liu, Neutron spectroscopic factors of ^7Li and astrophysical $^6\text{Li}(n,\gamma)^7\text{Li}$ reaction rates, Chin. Phys. Lett. 27, 052101 (2010). <https://doi.org/10.1088/0256-307X/27/5/052101>

Авторлар туралы мәлімет:

Амангелді Н. – PhD, қауымдастырылған профессор, Еуразия Ұлттық университеті, Қажымұқан к-сі, 13, 010008, Астана, Қазақстан, +7 707 951 10 18.

Ергалиұлы Ғ. – PhD, Еуразия Ұлттық университеті, Қажымұқан к-сі, 13, 010008, Астана, Қазақстан, +7 777 743 82 11.

Балабеков Б.Б. – хат-хабар авторы, докторант, Еуразия Ұлттық университеті, Қажымұқан к-сі, 13, 010008, Астана, Қазақстан, +7 702 276 11 12 .

А. Жумадил – магистрант, Еуразия Ұлттық университеті, Қажымұқан к-сі, 13, 010008, Астана, Қазақстан, +7 775 938 04 83 .

Амангелді Н. –PhD, доцент, Евразийский национальный университет, ул. Кажымукана, 13, 010008, Астана, Казахстан, +7 707 951 10 18.

Ергалиұлы Ғ. –PhD, Евразийский национальный университет, ул. Кажымукана, 13, 010008, Астана, Казахстан, +7 777 743 82 11.

Балабеков Б.Б. – автор для корреспонденции, докторант, Евразийский национальный университет, ул. Кажымукана, 13, 010008, Астана, Казахстан, +7 702 276 11 12.

А. Жумадил – магистрант, Евразийский национальный университет, ул. Кажымукана, 13, 010008, Астана, Казахстан, +7 775 938 04 83.

Amangeldi N. – PhD, Associate Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan St. 13, 010008, Astana, Kazakhstan, +7 707 951 10 18.

Yergaliuly G. – PhD, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan St. 13, 010008, Astana, Kazakhstan, +7 777 743 82 11.

Balabekov B.B. – the corresponding author, doctoral student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan St. 13, 010008, Astana, Kazakhstan, +7 702 276 11 12.

A. Zhumadil – Master’s student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan St. 13, 010008, Astana, Kazakhstan, +7 775 938 04 83.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).