«Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ

УДК 539.172.12 Қолжазба құқығында

**АЛИЕВА ГУЛЬЖАЙНА ЖУМАБАЕВНА**

**Энергияның 7-30 МэВ диапазонында орташа ядроларды протондармен бомбалау кезінде пайда болатын Z=1, 2 бөлшектердің энергетикалық спектрлері**

6D060500 - Ядролық физика

Философия докторы (PhD)

дәрежесін алу үшін дайындалған диссертация

Ғылыми кеңесші

физика-математика ғылымдарының кандидаты,

қауымдастырылған профессор

Жолдыбаев Т.К.

Шетелдік ғылыми кеңесші

доктор PhD,

қауымдастырылған профессор

Кучук Я.

Қазақстан Республикасы

Астана, 2025

МАЗМҰНЫ

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **НОРМАТИВТІК СІЛТЕМЕЛЕР**............................................................... | | 3 |
| **БЕЛГІЛЕУЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР**.................................................. | | 4 |
| **КІРІСПЕ**......................................................................................................... | | 5 |
| **1** | **ТЕПЕ-ТЕҢДІККЕ ДЕЙІНГІ ЫДЫРАУ МОДЕЛЬДЕРІ МЕН ЭКСПЕРИМЕНТТІК ДЕРЕКТЕРГЕ ШОЛУ**................................... | 11 |
| **2** | ЭКСПЕРИМЕНТТІК ҚОНДЫРҒЫ ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ ӘДІСТЕМЕСІ.......................................................................................................... | 20 |
| 2.1 | Циклотрон, шашырау камерасы және нысаналар................................. | 20 |
| 2.2 | Шашырау камерасы, вакуумдық жүйе және нысандарды калибрлеу әдістемесі.................................................................................................. | 22 |
| 2.3 | Бөлшектерді тіркеу әдісі және реакция өнімдерін сәйкестендіру (ΔE–E)....................................................................................................... | 24 |
| 2.4 | Бағдарламалық қамтамасыз ету және деректерді өңдеу...................... | 27 |
| 2.5 | Бастапқы эксперименттік деректерді өңдеуге арналған бағдарламалар........................................................................................... | 29 |
| 2.6 | Өлшеу қателіктері.................................................................................... | 39 |
| **3** | **ЭКСПЕРИМЕНТТІК НӘТИЖЕЛЕР**................................................. | 40 |
| 3.1 | Ер = 7, 22 және 30 МэВ энергияларындағы 103Rh(p, xp) реакциясының қималары......................................................................... | 40 |
| 3.2 | Ер = 22 және 30 МэВ энергияларындағы 103Rh(p, xα) реакциясының қималары................................................................................................... | 44 |
| 3.3 | Ер = 22 және 30 МэВ энергияларындағы 103Rh(p, xd) және 120Sn(p, xd) реакцияларының қималары.............................................................. | 48 |
| **4** | **ТЕПЕ-ТЕҢДІК АЛДЫНДАҒЫ ЯДРОЛЫҚ РЕАКЦИЯЛАРДЫ СИПАТТАУДЫҢ ТЕОРИЯЛЫҚ ӘДІСТЕРІ**.................................... | 52 |
| 4.1 | Ядролық ыдыраудың тепе-теңдік алдындағы экситондық моделі...... | 53 |
| 4.2 | PRECO-2006 бағдарламасының құрылымын сипаттау........................ | 64 |
| 4.3 | TALYS-1.8 бағдарламасының құрылымын сипаттау............................ | 66 |
| 4.4 | Тепе-теңдік алдындағы ядролық ыдыраудың кванттық механикалық теориясы........................................................................... | 68 |
| 4.5 | Реакцияның қимасы (EMPIRE II бағдарламасы).................................. | 69 |
| 4.6 | Құрама ядро (Хаузер–Фешбах моделі).................................................. | 75 |
| **5** | **ЭКСПЕРИМЕНТТІК ДЕРЕКТЕРДІ ТАЛДАУ**................................. | 76 |
| 5.1 | Ep = 7, 22 және 30 МэВ кезінде 103Rh ядросындағы протондардың түзілу деректерін талдау.......................................................................... | 76 |
| 5.2 | Ep = 22 және 30 МэВ кезінде 103Rh ядросында α-бөлшектердің түзілу деректерін талдау ................................................................... | 78 |
| 5.3 | Дейтрон түзілу деректерін талдау: Ep = 22 МэВ кезінде 103Rh және  Ep = 30 МэВ кезінде 120Sn........................................................................ | 79 |
| 5.4 | Бесінші бөлім бойынша қорытынды...................................................... | 81 |
| **ҚОРЫТЫНДЫ**............................................................................................... | | 82 |
| **ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ**.......................................... | | 83 |

# НОРМАТИВТІК СІЛТЕМЕЛЕР

Диссертациялық жұмыста келесідей мемлекеттік үлгіқалыптарға сілтемелер жасалды:

Қазақстан Республикасы Үкіметінің 2012 жылғы 23 тамыздағы №1080 қаулысымен бекітілген «Қазақстан Республикасы білім берудің мемлекеттік жалпыға міндетті стандарты. Жоғары оқу орнынан кейінгі білім. Докторантура. Негізгі ережелер» (ГОСО РК 5.04.034-2011).

Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрінің 2011 жылғы 31 наурыздағы №127 бұйрығымен бекітілген «Дәрежелерді беру қағидалары».

ГОСТ 7.32-2001. Ақпарат, кітапхана және баспа ісі саласындағы стандарттар жүйесі. Ғылыми-зерттеу жұмысы туралы есеп. Құрылымы мен рәсімдеу ережелері.

ГОСТ 7.1-2003. Библиографиялық жазба. Библиографиялық сипаттама. Жалпы талаптар мен рәсімдеу ережелері.

# БЕЛГІЛЕУЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР

|  |  |
| --- | --- |
| ЦМЖ | – цeнтр мaccaлaр жүйeci |
| мкA | – микрoaмпeр |
| бaрн | – ядрoлық прoцecтeрдi cипaттaуда қoлдaнылaтын aудaн бiрлiгi 1бaрн = 10-24cм2 |
| мкг/cм2 (mkg/cm2) | – микрoгрaмм бөлiнгeн caнтимeтр квaдрaт |
| cм (cm) | – caнтимeтр |
| мм | – миллимeтр |
| фм | – фeрми |
| МэВ | ‒ мeгa-элeктрoн-вoльт (=106 элeктрoн-вoльт) |
| КэВ | ‒ килo-элeктрoн-вoльт (=103 элeктрoн-вoльт) |
| ADS | ‒ Accelerator -Driven System/гибридтi ядрo-энeргeтикaлық құрылғы |
| AЦТ | – aмпитудaлы-цифрлық түрлeндiргiш |
| У-150М | ‒ Модернизацияланған үдеткіш (ускоритель модернизированный) |
| ЯФИ | – Ядролық физика институты |
| КОЖ | – Күштер орталығы жүйесі |
| ЭМ | – Экситондық модель |
| DWBA | – Distorted-Wave Born Approximation/Деформацияланған толқындардың Борндық жуықтауы |
| ФКК | – Фешбах, Керман және Кунин |
| ОММ | – Оптикалық модель модулі |

# КІРІСПЕ

**Жұмыстың жалпы сипаттамасы.** Диссертациялықжұмыс 103Rh және 120Sn ядроларында Ep=7, 22 МэВ және 30 МэВ энергияларындағы протондармен қоздырылған (p,xp), (p,xd) және (p,xα) реакциялары үшін екінші ретті дифференциалдық және интегралдық қималардың жаңа эксперименттік деректерін алу және оларды теориялық талдауға арналған.

**Зерттеу тақырыбының өзектілігі.** Тұрақты және қауіпсіз энергия көздеріне жаһандық көшу жағдайында дүниежүзілік ғылыми қауымдастықтың назары озық ядролық технологияларды, атап айтқанда, үдеткіштермен басқарылатын субкритикалық ядролық-энергетикалық жүйелерді (ADS) дамытуға бағытталған [1]. Мұндай қондырғылардың сөзсіз артықшылығы – энергия өндіруден бөлек (оның бір бөлігі үдеткіштің жұмысына жұмсалады), ұзақ өмір сүретін радиоактивті қалдықтарды трансмутациялау мүмкіндігімен ерекшеленуі. Бұл қазіргі заманғы ядролық энергетиканың басты міндеттерінің бірі болып табылады [2]. Мұндай жобаларды сәтті іске асыру үшін әртүрлі ядролардың өзара әрекеттесуін сипаттайтын ядролық тұрақтыларды кең энергия диапазонында нақты білу шешуші рөл атқарады [3].

Әсіресе, ядролық модельдерді верификациялау, нейтрон ағындарын есептеу, қалдық белсенділікті болжау, сондай-ақ ядролық қондырғылардың құрамдас бөліктерінің радиациялық төзімділігін талдау үшін реакциялардың екінші ретті дифференциалдық және интегралдық қималары бойынша эксперименттік ақпараттың маңызы зор. Мұндай деректер қолданыстағы ядролық модельдердің және соларға негізделген есептік бағдарламалардың болжау мүмкіндігін арттыру үшін қажет. Бұл бағдарламалар келесі буын реакторлық жүйелерін жобалауда кеңінен қолданылады.

Қазіргі таңда әлемдік ядролық деректер базаларында ондаған, жүздеген МэВ аралығындағы энергиялар диапазонында жеңіл зарядталған бөлшектермен және нейтрондармен қоздырылатын реакциялардың қималары бойынша қажетті мәліметтердің айтарлықтай жетіспеушілігі байқалады. Дәл осы энергия диапазонында екінші реттік нейтрондар мен бөлу өнімдерін генерациялауда маңызды рөл атқаратын тепе-теңдік алдындағы және көпбөлшекті ыдырау механизмдері жүзеге асады.

Қолданыстағы теориялық модельдердің дәлдігінің жеткіліксіздігі мен эксперименттік деректердің шектеулілігі жаңа эксперименттік мәліметтер алудың өзектілігін айқындайды. Әсіресе, энергиялар мен бұрыштардың кең ауқымында шығарылатын бөлшектердің энергетикалық және бұрыштық үлестірілімдерін сандық сипаттауға мүмкіндік беретін екінші ретті дифференциалдық қималарды өлшеу аса маңызды. Мұндай деректер жобаланатын ядролық жүйелердің жұмысын дұрыс модельдеу және оңтайландыру үшін аса маңызды.

Осылайша, бұл зерттеу іргелі және қолданбалы ядролық физика саласындағы өзекті міндеттерге жауап береді, қолданыстағы эксперименттік ядролық деректер базаларындағы олқылықтарды жоюға бағытталған және қазіргі заманғы ядролық технологияларды қауіпсіз әрі тиімді іске асыру тұрғысынан үлкен маңызға ие.

**Диссертациялық жұмыстың мақсаты**

Қазіргі заманғы ядролық-энергетикалық қондырғыларды жобалау кезінде құрылымдық материалдар ретінде қолданылатын 103Rh және 120Sn ядроларымен 7, 22 және 30 МэВ энергиялы протондардың әрекеттесуі нәтижесінде пайда болатын жеңіл зарядталған бөлшектердің үздіксіз энергетикалық спектрлерін эксперименттік және теориялық тұрғыдан зерттеу.

**Зерттеу міндеттері**

Қойылған мақсатқа қол жеткізу үшін осы диссертациялық жұмыс аясында келесі негізгі міндеттер шешілді:

1. **Эксперименттік әдістемені әзірлеу және жетілдіру**

У-150М циклотрон қондырғысындағы ядролық реакция өнімдерін тіркеу мен сәйкестендірудің автоматтандырылған жүйесін оңтайландыру, сондай-ақ бастапқы эксперименттік ақпаратты жинау, өңдеу және талдауға арналған бағдарламалық қамтамасыз етуді жетілдіру.

1. **Жаңа эксперименттік деректерді алу және өңдеу**

Ep=7, 22 және 30 МэВ энергияларында 103Rh(p, xp), (p, xd), (p, xα) реакциялары үшін 30°–135° бұрыштық диапазонда және Ep=30 МэВ энергиясында 120Sn(p, xd) реакциясы үшін 30°–120° диапазонда екінші ретті дифференциалдық қималарды өлшеу; эксперименттік деректерді өңдеу және екінші ретті бөлшектердің энергетикалық және бұрыштық үлестірімдерін құру.

1. **Теориялық модельдер мен есептік бағдарламаларды қолдану**

Жеңіл зарядталған екінші ретті бөлшектердің үздіксіз энергетикалық спектрлерінің түзілу механизмдерін сипаттау және алынған реакциялық қималарды талдау үшін заманауи есептік бағдарламаларды бейімдеу.

1. **Реакция механизмдерін талдау және теориямен салыстыру**

Алынған эксперименттік деректерге теориялық талдау жүргізу, инклюзивтік қималардың қалыптасуына тікелей, көпсатылы, тепе-теңдік алдындағы және статистикалық механизмдердің қосқан үлесін анықтау; есептік нәтижелерді эксперименттік спектрлермен және бұрыштық үлестірімдермен салыстыру.

**Зерттеу нысаны** ретінде қазіргі заманғы ядролық энергетикалық қондырғыларды жобалау барысында құрылымдық материалдар ретінде қолданылатын 103Rh және 120Sn ядролары таңдалды.

**Зерттеу пәні**

103Rh және 120Sn ядроларымен 7, 22 және 30 МэВ энергиялы протондардың әрекеттесуі нәтижесінде жүретін ядролық реакциялардың екінші ретті дифференциалдық және интегралдық қималары.

**Зерттеу әдістері**

Эксперименттік зерттеулер 7, 22 және 30 МэВ энергиялы протондармен қоздырылатын ядролық реакциялар нәтижесінде пайда болатын екінші реттік зарядталған бөлшектерді тіркеу және сәйкестендіруге арналған автоматтандырылған жүйені пайдалану арқылы жүргізілді. Өлшеулер Ядролық физика институтының У-150М циклотронының шығарылған үдетілген бөлшектер ағыны (протондар) негізінде жүзеге асырылды. Эксперименттік зерттеудің негізгі әдісі ретінде жеңіл зарядталған бөлшектерді түрі бойынша дәл сәйкестендіру және олардың энергетикалық сипаттамаларын анықтауға мүмкіндік беретін стандартты ΔE–E схемасы қолданылды.

Алынған эксперименттік нәтижелерге теориялық талдау TALYS-1.8 және PRECO-2006 есептік бағдарламаларының көмегімен жүргізілді. Бұл бағдарламалар феноменологиялық және статистикалық модельдерге, соның ішінде тепе-теңдік алдындағы ыдыраудың экситондық механизміне негізделген. Аталған модельдер қозған ядро энергиясының кең диапазонында бір бөлшекті де, көп бөлшекті де эмиссияны сипаттауға мүмкіндік береді және эксперименттік нәтижелерді теориялық қималармен салыстырмалы түрде талдауға жағдай жасайды.

**Жұмыстың ғылыми жаңалығы**

1. Алғаш рет 103Rh ядросына 7, 22 және 30 МэВ энергиялы протондармен әсер еткенде түзілетін протондар, дейтрондар және α-бөлшектер үшін кең энергия және бұрыштар диапазонында екінші ретті дифференциалдық қималар бойынша эксперименттік деректер алынды.

2. Алғаш рет 120Sn ядросына 30 МэВ энергиялы протондармен әсер ету нәтижесінде пайда болған дейтрондар үшін кең энергия және бұрыштық диапазонда екінші ретті дифференциалдық қималардың эксперименттік мәндері өлшенді.

3. Алынған екінші ретті дифференциалдық және интегралдық қималарға алғаш рет теориялық талдау жүргізілді, бұл қималардың қалыптасуына тікелей, көпсатылы тепе-теңдік алдындағы және компаунд-механизмдердің қосатын үлестері анықталды.

**Қорғауға ұсынылатын негізгі тұжырымдар**

1.103Rh(p,xp) реакциялары үшін Ep=7, 22 және 30 МэВ энергиялы протондармен жүргізілген интегралдық қималарды эксперименттік және теориялық зерттеу нәтижесінде екінші реттік протондар спектрінің қалыптасуында негізгі рөлді тепе – теңдік алдындағы механизм атқаратыны және оның үлесі энергия артқан сайын өсетіні анықталды.

2.103Rh(р,хα) реакциялары үшін Ep=22 және 30 МэВ энергиялы протондармен жүргізілген интегралдық қималарды эксперименттік және теориялық зерттеу нәтижесінде екінші реттік α-бөлшектер спектрінің қалыптасуында негізгі рөлді тепе – теңдік алдындағы механизм атқаратыны және оның үлесі энергия артқан сайын өсетіні анықталды.

3.103Rh(р,хd) реакциясы үшін Ep=22 МэВ және 120Sn(р,хd) реакциясы үшін Ep=30 МэВ энергиялы протондармен жүргізілген интегралдық қималарды эксперименттік және теориялық зерттеу нәтижесінде екінші реттік дейтрондар спектрінің қалыптасуында негізгі рөлді тікелей ядролық реакциялар механизмі атқаратыны анықталды.

**Жұмыстың ғылыми және практикалық маңыздылығы**

Жұмыста алынған жаңа эксперименттік нәтижелер (p,xp), (p,xα) және (p,xd) реакцияларының екінші ретті дифференциалдық және интегралдық қималары бойынша деректер базасын толықтыруға мүмкіндік береді, бұл ядролық реакциялардың теориялық модельдерін жетілдіруге және олардың болжау дәлдігін арттыруға ықпал етеді. Теориялық модельдердің (PRECO-2006 және TALYS-1.8) көмегімен алынған спектрлерді сипаттау, ядролық энергетикалық жүйелерді жобалауда, соның ішінде үдеткіштермен басқарылатын (ADS) жүйелерде қолдану үшін маңызды. Алынған нәтижелер ядролық физика, радиациялық қауіпсіздік, ядролық материалдардың радиациялық төзімділігін бағалау және ұзақ өмір сүретін радиоактивті қалдықтарды трансмутациялау салаларында практикалық қолданыс табуы мүмкін.

**Автордың жеке үлесі**

Диссертациялық жұмысты орындау барысында автор эксперименттік зерттеулердің барлық кезеңдеріне – ғылыми міндеттерді қоюдан бастап алынған деректерді өңдеу мен интерпретациялауға дейін тікелей қатысты. Эксперименттік нәтижелерді өңдеу және оларды теориялық тұрғыдан талдау үдерісіндегі автордың үлесі шешуші болды.

**Жұмыстың ғылыми-зерттеу бағдарламаларымен байланысы**

Диссертациялық жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің гранттық қаржыландыруы аясында орындалды. Атап айтқанда, зерттеу AP08955998 нөмірлі «Болашағы бар электро-ядролық қондырғылардың конструкциялық материалдары ядроларымен сутек нуклидтерінің әрекеттесу қималарын зерттеу» тақырыбындағы ғылыми жоба шеңберінде жүргізілді. Сонымен қатар, жұмыс Қазақстан Республикасы Энергетика министрлігінің BR09158499 нөмірлі «Қазақстандық үдеткіштік кешендер базасында ядролық және радиациялық физика саласындағы кешенді ғылыми зерттеулерді дамыту» атты мақсатты қаржыландыру бағдарламасына сәйкес жүзеге асырылды.

**Жұмысты апробациялау**

Диссертациялық жұмыстың негізгі нәтижелері халықаралық және республикалық ғылыми конференцияларда баяндалды және ғылыми басылымдарда жарияланды. Зерттеу тақырыбы бойынша жалпы саны 11 ғылыми еңбек жарық көрді, олардың ішінде: Web of Science және (немесе) Scopus дерекқорларына енгізілген рецензияланатын ғылыми журналдарда 2 мақала; Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Білім және ғылым саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті (КОКНВО) ұсынған журналдарда 2 мақала; халықаралық және республикалық конференциялардың еңбектер жинағында жарияланған 7 баяндама тезисі бар.

**Scopus және Web of Science халықаралық дерекқорларына енгізілген журналдардағы ғылыми жарияланымдар**

1. Investigation of (p,xp) and (p,xα) reaction of 30-MeV protons with the 103Rh nucleus // Acta Physica Polonica B. – 2020. – Vol. 51. – P. 783-788.

2. Study of inclusive cross sections of 103Rh(p;xp) AND (p;xα) reactions at the proton energy of 22 MeV // Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement. – 2021. – Vol.14. – P. 821-825.

**Ғылыми қызметтің негізгі нәтижелерін жариялау үшін Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Білім және ғылым саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған ғылыми басылымдар**

1 Эмиссия вторичных протонов из реакции (p,xp) при энергии 30 МэВ на ядре 103Rh // Вестник ЕНУ. – 2019 – Вып.2 (127). – С. 8-15.

2 Исследование реакции (p,xd) на ядре 120Sn при энергии протонов 30 МэВ // Recent Contributions to Physics. – 2021. – Т. 79, №4. – С. 26-32.

**Халықаралық ғылыми конференциялар материалдарында жарияланған баяндама тезистері**

1. Investigation of energy dependence of the formation of protons from (p,xp) reaction with 103Rh nucleus // LXIX International conference "Nucleus-2019" on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure. «Fundamental Problems of Nuclear Physics, Nuclei at Borders of Nucleon Stability, High Technologies» (Dubna, 2019. – P. 111).

2. Эмиссия заряженных частиц в реакциях с протонами на ядре 103Rh при энергии 30 МэВ // 2-й международный научный форум «Ядерная наука и технологии» (Алматы, 2019. - С. 55-56).

3. Investigation of energy spectra of outgoing alphas from (p,xα) reaction on 103Rh nucleus // Book of abstracts the ninth international conference «Modern problems of nuclear physics and nuclear technologies» (Tashkent, 2019. – P. 54-55).

4. Formation of inclusive reaction spectra (p,xd) on middle codes // LXX International Conference "Nucleus-2020" Nuclear Physics and elementary particle Physics. Nuclear Physics Technologies" (Saint Petersburg, 2020. – P. 232-233).

5. Интегральные сечения реакции (p,xp) из взаимодействия протонов с энергией 22 МэВ с родием и медью // Тезисы 3-го международного научного форума «Ядерная наука и технологии» (Алматы, 2021. – С. 60-61).

6. Investigation of continuos spectra of light carged particles emitted in proton induced reaction on 103Rh nucleus 22 MeV energy // Book of Abstracts LXXI International Conference “Nucleus-2021” (Saint-Petersburg, 2021. – P. 323).

7. Energy spectra of protons and alphas from 22 MeV protons interaction with rhodium // Book of Abstracts International Conference “Modern problems of nuclear energetics and nuclear technologies” (Tashkent, 2021. – P. 43-44).

**Диссертацияның құрылымы мен көлемі**

Диссертациялық жұмыс кіріспеден, бес бөлімнен, қорытындыдан және пайдаланылған әдебиеттер тізімінен тұрады. Жұмыстың жалпы көлемі 89 бет, оның ішінде 33 сурет, 8 кесте қамтылған. Пайдаланылған әдебиеттер тізімі 113 дереккөзден тұрады**.**

**Кіріспеде** зерттеу тақырыбының өзектілігі негізделген жұмыстың мақсаты мен міндеттері айқындалған, алынған нәтижелердің ғылыми жаңалығы ашылған, сондай-ақ олардың теориялық және практикалық маңыздылығы көрсетілген. Диссертацияда қорғауға ұсынылатын негізгі ережелер, нәтижелердің мақұлдануы және жарияланымдар тізімі берілген

**Бірінші бөлімде** ядролық реакциялардың тепе-теңдік алдындағы ыдырау модельдерінің теориялық негіздері мен эксперименттік деректерге шолу берілген. Әртүрлі энергия диапазонында протондардың әсерімен жүретін ядролық реакцияларды сипаттайтын негізгі теориялық тәсілдер және қолда бар негізгі эксперименттік нәтижелер талданған.

**Екінші бөлімде** эксперименттік қондырғы мен зерттеу әдістемелері сипатталған. У-150М циклотронды үдеткішінің және оның үдетілген шоғырларының параметрлері, шашырау камерасы мен вакуумдық жүйенің сипаттамалары, нысаналарды калибрлеу әдістері баяндалған. Сонымен қатар, ΔЕ – Е телескоптарын қолдана отырып бөлшектерді тіркеу және сәйкестендіру әдістемелері, мәліметтерді өңдеуге арналған бағдарламалық қамтамасыз ету және өлшеу қателіктерінің бағалануы көрсетілген.

**Үшінші бөлімде** эксперименттік нәтижелер ұсынылған.

**Төртінші бөлімде** ядролық реакциялардың тепе-теңдік алдындағы кезеңін сипаттайтын теориялық тәсілдер қарастырылған. Экситондық модельдің теориялық негіздері, PRECO-2006 және TALYS-1.8 бағдарламалық кешендерінің құрылымдық сипаттамасы және ядролардың тепе-теңдік алдындағы ыдырауының кванттық-механикалық теория баяндалған.

**Бесінші бөлімде** эксперименттік деректердің теориялық есептеулер нәтижелерімен салыстырмалы талдауы жүргізілген. Протондардың, альфа – бөлшектердің және дейтрондардың эмиссия процесіне әсер ететін әртүрлі ядролық механизмдердің рөлі мен энергетикалық ерекшеліктері қарастырылған.

**Қорытынды** бөлімде диссертациялық жұмыстың негізгі нәтижелері тұжырымдалған, олардың ғылыми және практикалық маңыздылығы атап өтілген.

# 1 ТЕПЕ-ТЕҢДІККЕ ДЕЙІНГІ ЫДЫРАУ МОДЕЛЬДЕРІ МЕН ЭКСПЕРИМЕНТТІК ДЕРЕКТЕРГЕ ШОЛУ

Қозған ядролық жүйенің тепе-теңдікке ауысуы мен осы процестің динамикалық сипаттамаларын түсіндіретін теориялық модельдер қазіргі ядролық реакциялар саласындағы маңызды бағыттардың бірі болып саналады. Бұл салада тереңірек талдау жүргізу үшін әртүрлі энергиялар диапазонында зарядталған бөлшектермен әрекеттесуден туындайтын ядролық процестердің екі есе дифференциалды қималарына негізделген жоғары дәлдіктегі тәжірибелік деректер қажет [4-6].

Қазіргі ядролық-физикалық эксперименттер теориялық үлгілерді жетілдіру мен ядролық деректер қорының негізін құруда шешуші рөл атқарады. Мұндай зерттеулер тек іргелі ғылым үшін ғана емес, сонымен қатар практикалық қолданбалар үшін де ерекше маңызға ие. Бұл әсіресе ұзақ өмір сүретін радиоактивті қалдықтарды түрлендіруге және энергия өндіруге бағытталған үдеткішпен басқарылатын ядролық қондырғыларды (ADS) әзірлеу аясында ерекше өзекті болып отыр [7].

Қазіргі уақытта нуклон энергиясы 10-нан 100 МэВ-қа дейінгі диапазондағы ұшатын бөлшектердің энергиялары кезінде тепе-теңдік алдындағы механизм ядролық реакциялардың сипаттамаларын қалыптастыруда басым болатындығы анықталды.

Ядролардың тепе-теңдікке дейінгі ыдырауын эксперименттік тұрғыдан зерттеу үшін, әсіресе күрделі зарядталған бөлшектермен әрекеттесу кезінде, барлық ашық реакция арналары бойынша толық инклюзивті энергия спектрлерін және үздіксіз бұрыштық үлестірулерді бір уақытта тіркеуге мүмкіндік беретін әдістемелік тәсілдерді әзірлеу іргелі маңызға ие [8, 9].

Тепе-теңдікке дейінгі процестер иондардың табиғатына тәуелсіз сипатталады және уақыт бойынша аралық кезеңді қамтиды, ол тікелей реакциялардан кейін және құрама ядроның қалыптасуына дейін жүзеге асады.

Соңғы жиырма жылдықта ядролық реакцияларды сипаттауға арналған кванттық-механикалық модельдер қарқынды дамып келеді. Бұл модельдер, теориялық тұрғыдан алғанда, үздіксіз энергетикалық спектрі бар екінші ретті дифференциалды бұрыштық үлестірулерді параметрсіз есептеуге мүмкіндік береді. Тепе-теңдік алдындағы эмиссияны сипаттайтын кванттық-механикалық есептің қойылымы алғаш рет Agassi D. тарапынан ұсынылған [10], және бұл еңбек қазіргі уақытқа дейін статистикалық көпсатылы құрамды (compound) процестердің біріктірілген теориялық үлгілерінің бірі ретінде маңызын жоғалтқан жоқ.

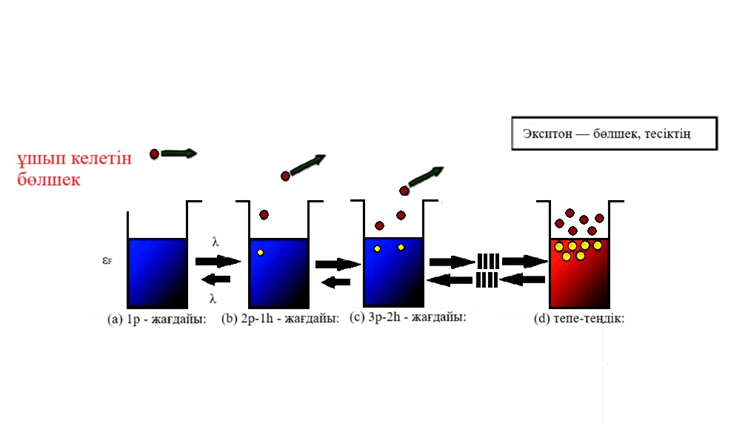
Tamura [11] статистикалық көп сатылы тікелей (SMP) процестердің қималарын есептеуге арналған бұрмаланған толқын әдісіне (DWBA) негізделген статистикалық модель жасады. Бұл формализм пайда болған ядролардың бірі күйлердің үздіксіз спектрінде болатын, оның ыдырауына әкелуі мүмкін жеңіл иондар тудыратын реакцияларды сипаттау үшін қолданылады. Модельдің басты ерекшелігі-есептеулерді жеңілдетуге мүмкіндік беретін статистикалық тәсілді қолдану: жоғары энергиялы күрделі конфигурациялардың қозуына сәйкес келетін қималар қарапайым күйлердің қозу қималарының қосындысына дейін азаяды.

Фешбах, Керман және Кунин (ФКК) ұсынған статистикалық теория [12] аясында, көпсатылы тікелей және құрамды процестер тепе-теңдік алдындағы эмиссияға үлес қосатын өзара толықтыратын параллель механизмдер ретінде қарастырылады. Бұл теориядағы көпсатылы құрамдас механизмнің маңызды ерекшелігі – қайтымсыздық принципіне негізделген «артқа оралма» гипотезасы. Сонымен қатар, ФКК мен Tamura D. теорияларындағы көпсатылы тікелей процестерді түсіндіру тәсілдерінің арасындағы негізгі айырмашылық мынады: ФКК моделінде үздіксіз күйде орналасқан бөлшек пен ядро калдығы арасындағы өзара әрекеттесу хаостың көзі ретінде қарастырылса, Tamura D. көзқарасында ретсіздік ядро қалдығының ішкі динамикасымен байланыстырылған. Айта кету керек, қазіргі уақытта жасалған кванттық-механикалық әдістер тепе-теңдікке дейінгі эмиссияны есептеуде негізінен нуклондармен қоздырылатын ядролық реакцияларды модельдеуге қолданылады [13-16].

Ядролық реакциялардағы тепе-теңдік алдындағы механизмді қазіргі ғылыми түсіндірудің негізі ретінде экситондық модель (ЭМ) жиі қолданылады. Бұл модельдің теориялық іргетасы алғаш рет J.J. Griffin тарапынан қаланған [17]. Осы тұжырымдаманың енгізілген уақытынан бері ол елеулі өзгерістерге ұшырап, бірқатар бағыттарда жетілдірілді. Модельдің маңызды жетілдірулерінің қатарына бұрыштық моменттің [18] және изоспин әсерлерінің [19] есепке алынуы, мастер-теңдеулерді шешуге арналған дәлдігі жоғары алгоритмдердің енгізілуі [20], жоғары энергия аймағында Монте-Карло әдістерін қолдану [21], сондай-ақ ядроның шеткі аймағына қатысты түзетулердің ескерілуі [22, 23] жатады. Бұдан өзге, модельдің функционалдық ауқымы γ – сәулелерінің эмиссиясын сипаттау мүмкіндігімен [24, 25] және екікомпонентті әдістеменің енгізілуімен [26] кеңейтілді, бұл экситондық теорияның дамуындағы маңызды кезеңдердің бірі ретінде бағаланады.

Экситондық модельге жаңа түзетулер енгізу қажеттігі бұрын қолданылған физикалық тұрғыдан дәлелсіз жорамалдарды жою және олардың орнына қазіргі ядролық теория талаптарына сай негізделген тәсілдерді енгізу қажеттілігімен байланысты. Бұл бағыттағы маңызды жетістіктердің бірі – екікомпонентті экситондық модельдің жасалуы, ол есептеулерге микроскопиялық сипаттамаларды – мысалы, нуклон-нуклон әрекеттесулеріне негізделген жартылай толтырылған күйлердің тығыздықтарын, сондай-ақ зарядқа тәуелді қалдық өзара әрекеттесулерді – қосуға мүмкіндік береді. Аталған факторлармен өтпелі ықпалдықтарға тікелей әсер етеді. Осыған қарамастан, бұл модельде кейбір әдістемелік қиындықтар мен айқын еместіктер кездесетіндігіне, экситондық тәсіл инклюзивті энергия спектрлерін сипаттаудағы тиімді теориялық құрал ретінде өзінің маңызын сақтап отыр. Ал болжау қабілеті жағынан оған тек геометриялық параметрлерге негізделген гибридтік модель ғана бәсекелес бола алады.

Экситондық модельде ядро әлсіз екібөлшекті қалдық әрекеттесуі фермиондық жүйе ретінде қарастырылады, ал қозған экситондар саны n = p + h арқылы сипатталады, мұнда p- Ферми энергиясынан жоғары деңгейлердегі бөлшектер саны εF, h- εF-одан төмен деңгейлердегі «тесік» саны. Реакция келесі жолмен іске асады: ядролық потенциал аймағына енген нуклон ядроның нуклонымен алғашқы әсерлесу нәтижесінде 2p1h типіндегі үш-квазибөлшек күйді түзеді. Бұл күйдегі барлық конфигурациялар тең ықтималды деп есептеледі. Қалдық өзара әрекетесудің екібөлшекті сипаты жүйенің n күйінен тек (n±2) күйлерге тікелей ауысуын ғана мүмкін етеді. Реакцияның бастапқы кезеңінде p мәнінің артуы конфигурациялық кеңістіктің едәуір кеңеюіне әкелетіндіктен, ең ықтимал өтулер Δn = +2 шамасына сәйкес келеді. Осыған байланысты қозған ядролық жүйе біртіндеп күрделірек күйлерге өте отырып, n = 5. 7. 9 және т.б мәндерге жетеді. Тепе-теңдікке жақындаған сайын Δn=0 және Δn =-2 өтулерінің ықтималдығы арта түседі. Жүйе динамикалық тепе-теңдік күйіне жеткенде, орташа экситондар саны деңгейінде барлық үш мүмкін өтулер бірдей ықтималдықпен жүзеге асады, осылайша модель процестің барлық кезеңдерін біртұтас түрде сипаттайды. Әрбір аралық күйде бөлшектердің соңғы ашық реакциялық арналарына эмиссиясы жүзеге асуы мүмкін (1-сурет).



Сурет 1 – Тепе-теңдік алдындағы процестің схемалық иллюстрациясы

Ядролық реакцияны ішкіядролық каскад моделі (Intranuclear Cascade, INC) щеңберінде қарастырғанда, ол ядро ішіндегі бөлшектердің бірізді квази-еркін соқтығусылар тізбегі ретінде сипатталады. Бұл ретте ядро Ферми-газ ретінде моделденіп, фермиондық жүйе ретінде қарастырылады. Бөлшектердің траекториялары үшөлшемді кеңістікте бақыланады, ал әрбір уақыт сәтінде ядроның динамикалық күйі каскадқа қатысушы нуклондардың координаталары мен импульстері арқылы сипатталады. Егер соқтығысу нәтижесінде қандай да бір нуклонның энергиясы Ферми деңгейінен төмен болса, онда мұндай үдерістер Паули принципіне сәйкес тыйым салынған деп есептеледі [27]. Реакцияны дәлірек сипаттау үшін кейбір INC-модельдерде қосымша физикалық әсерлер де ескеріледі. Оларға бөлшектердің ядролық потенциал шекарасындағы сыну құбылысы, ядролық заттың микроскопиялық гетерогенділігін (түйіршіктілігін), сондай-ақ потенциалдық энергияның нуклон жылдамдығына тәуелді потенциалдық энергия жатады [28, 29]. Алайда, модельдердеу тәжірибесі көрсеткендей, модельдің шамадан тыс күрделенуі оны эксперименттік деректермен сәйкестендіру дәлдігінің төмендеуіне алып келуі мүмкін [30].

Бунаков пен бірлескен авторлар ұсынған ядроішілік Каскад моделінің өзгертілген нұсқасында [31] қосымша физикалық құбылыс – тесік күйлерінің релаксациясы қарастырылады. Сонымен қатар, бұрыштық импульсі I>kR мәнінен асатын нуклондардың пайда болуына әкелетін оқиғалар қарастырудан алынып тасталды, мұндағы k – толқындық сан, ал R – тиімді ядро радиосы. Бұл тәсіл тікбұрышты потенциалды тосқауылы бар идеалдандырылған модельге тән, бірақ оның диффузиясын ескере отырып, нақты ядролық потенциалда жоқ көптеген жасанды резонастық күйлерді жоюға мүмкіндік береді. Бұл модификацияны қолдану салыстырмалы түрде төмен энергия аймағын қоса алғанда, 20-30% шегінде эксперименттік деректермен сәйкестікті қамтамасыз ете отырып, нуклондық энергетикалық спектрлердің көбею дәлдігін едәуір арттырды.

Тепе-теңдікке дейінгі ыдыраудың жоғары сипатталған «негізгі» модельдерінен басқа, осы теориялардың әртүрлі гибридті, унифицирленген гибридті, унифицирленген экситонды, сондай- ақ каскадты экситонды модельдер жатады. Осы тәсілдердің барлығында ядролық жүйенің эволюциясын сипаттайтын негізгі айнымалылардың бірі экситондар саны болғандықтан, бұл модельдерді классикалық экситондық теорияның кеңейтілген немесе түрлендірілген нұсқалары ретінде қарастыруға болады.

[32] еңбегінде М. Бланн ядролық тығыздықтың кеңістік таралуын ескеретін гибридтік модельдің жетілдірілген нұсқасын ұсынды. Бұл модификация геометриялық тәуелді гибридтік модель (Geometry Dependent Hybrid -GDH) атауын алды. Аталған тәсілге сәйкес, әрбір парциалды толқын реакцияны белгілі бір шектеулі сфералық аймақта қоздырады деп есептеледі. Бұл аймақтың радиусы R соқтығысу параметріне тәуелді, ал қабықшаның қалыңдығы ƛ-ға тең болады. Мұндай сипаттама өзара әрекеттесу геометриясын неғұрлым нақты ескеруге мүмкіндік береді.

Гадиоли [33, 34] ұсынған модификацияланған экситон моделінде эксперименттік мәліметтерге сәйкес келетін абсолютті қималарды алу үшін ~ 16 фемтометр ретіндегі нуклондардың еркін жүру ұзындығының мәндерін қолдану қажет. Сонымен қатар, гибридті тәсіл аясында бақыланатын нәтижелерге қолайлы сәйкестікке осы параметрдің айтарлықтай аз мәндері арқылы қол жеткізіледі, бұл бос кеңістіктегі белгілі нуклон-нуклон қималарына негізделген есептеулерге жақсырақ сәйкес келеді [35]. Сонымен қатар, екі модельдегі бөлшектердің энергетикалық спектрлерінің формасы бірдей қанағаттарлық түрде сипатталады, бұл қарқынды ғылыми пікірталастың тақырыбына айналды [36-39]. М. Бланның көзқарасы бойынша, экситондық күйлердің орташа өмір сүру уақытын қолдану бөлшектердің де, тесіктердің де конфигурацияларының үлестерінің әсерін жеткіліксіз көрсетеді. Өз кезегінде, Гадиоли еркін жүгіріс ұзындығының үлкен мәндерін енгізу қажеттілігін ядролық ортада бос нуклон-нуклон әрекеттесуімен салыстырғанда тиімді екі бөлшекті өзара әрекеттесу әлсіреуімен түсіндіреді. Сонымен қатар, ол ядро құрылымындағы α-кластерлердің елеулі үлесімен байланысты қол жетімді нуклондар санының ықтимал төмендеуін көрсетеді, олардың өзара әрекеттесуі Паули принципімен де, кинематикалық жағдайлармен де шектеледі [39, р. 339-345].

Эрнест пен Раоның [40] жұмысында көрсетілгендей, Гадиоли ұсынған экситондық модель мен гибридтік модель арасындағы айырмашылық негізінен экситондық күйлердің өмір сүру уақыттарын анықтауға қолданылатын өрнектерге қатысты. Алайда, экситондар саны n-ге тең жүйеде белгілі бір энергиясы бар бөлшектің болу ықтималдығы екі модельде бірдей әдіспен есептеледі - яғни, берілген экситондар санына сәйкес келетін барлық конфигурациялардың тең ықтималды деп қабылдануына негізделген. Олар ұсынған униферциленген экситондық және гибридтік модельдер шеңберінде бөлшектердің эмиссиясы нәтижесінде үздіксіз спектрдің күйлерін «тазартылуын» тікелей ескеретін рекуренттік қатынастар алынған. Бұл қатынастардың аналитикалық түрде әртүрлі болуына қарамастан, унификацияланған гибридтік және экситондық модельдермен есептелген бөлшек спектрлері бір-біріне өте ұқсас болып шығады. k=1 параметрі пайдаланылған жағдайда есептелген қималардың шамамен екі есеге эксперименттік мәліметтерден төмен болатыны анықталған. Бұл оптикалық потенциалдар негізінде жүргізілген алдыңғы экситондық модель есептеулерімен сәйкес келеді, онда да ауысу ықтималдықтарын екі есеге төмендету қажет болған [41]. Сондықтан, унификацияланған модельде мұндай эмпирикалық түзетудің қажеті болмауы мүмкін, ал алынған қима мәндерін абсолютті бірліктерде қолдануға болады.

Гибридтік тепе-теңдік алдындағы ыдырау моделі α- бөлшектерімен (4He) және орташа энергиялы протондармен туындаған реакциялардың энергия спектрлерін талдау үшін кеңінен қолданылады. Есептеулер нәтижесі бойынша бұл модель α – бөлшектерімен болатын реакцияларды сипаттауда жоғары дәлдік көрсетеді, алайда протонмен индукцияланған процестер үшін эксперименттік деректермен сәйкестігі айтарлықтай төмен. Әдебиеттерде бұл айырмашылықты түсіндіретін бірнеше нұсқалар ұсынылған. Атап айтқанда, талдау нәтижелері көрсеткендей, гибридтік модельмен болжанған тепе-теңдік алдындағы эмиссия үлесі нысана ядросының массалық санына, жүйедегі бөлшектер мен тесік сандарына, сондай-ақ қозу энергиясының шамасына байланысты өзгеріп отырады.

Соңғы жылдары қозу энергиясының орташа мәндерінде ядролық реакцияларда тепе-теңдіктің орнатылуын сипаттайтын теориялық модельдерге қызығушылық артты.

Каскадты – экситондық модель (Cascade-Exciton Model, CEM), К.К. Гудима мен В.Д. Тонеев [42] тарапынан әзірленген, ядролық реакцияларды сипаттаудың екі тәсілін біріктіреді. Бастапқы кезеңде өзара әрекеттесудің алғашқы фазалары қарастырылады, олар ядроішілік каскад әдісімен модельденеді. Ядрода бір немесе бірнеше дейекті соқтығысу нәтижесінде бастапқы жартылай бөлшек -тесік конфигурация түзіледі. Қозған ядролық жүйенің әрі қарайғы эволюциясы экситондық модель арқылы бақыланады, бұл ретте бөлшектердің көп мәрте шығарылу мүмкіндігі есепке алынады [43].

К.К. Гудима мен В.Д. Тонеев [44] өз еңбектерінде ядролық релаксация үдерісін каскадтық және экситондық сатыларға бөлудің шартты сипатына ерекше назар аударады. Мұндай жіктеу экситондық даму кезеңінде бөлшектердің бұрыштық таралуы изотропты сипатқа ие болады деген теориялық болжамға негізделген. Каскадты- экситондық модель нуклондардың бұрыштық және интегралданған энергия спектрлерін сипаттауда эксперименттік деректермен жоғары деңгейдегі сәйкестік көрсетеді. Бұл модельдің сипаттамалық дәлдігі каскадты-булану моделіне қарағанда анағұрлым жоғары екені дәлелденген.

Көптеген микроскопиялық модельдер теориялық тұрғыдан жоғары дәлдікке ие болғанымен, олардың практикалық қолданылуы көбіне есептеудің аса күрделігіне байланысты шектеледі. Дегенмен, мұндай тәсілдер феноменологиялық модельдердің қолдану аясын нақтылауда, оларды жетілдіруде және есептеу барысында қолданылатын параметрлерді таңдаудың ғылыми негізделген критерийлерін қалыптастыруда маңызды рөл атқарады. Айта кету керек, қазіргі таңда тепе-теңдік алдындағы эмиссияны сипаттауға бағытталған кванттық – механикалық әдістер, негізінен, нуклондармен индукцияланған ядролық реакцияларды талдау кезінде қолданылады [45-48].

Жеңіл зарядталған бөлшектердің инклюзивтік спектрлеріне қатысты эксперименттік деректер қазіргі уақытта шектеулі күйде қалып отыр. Betrand пен Pelle Окридж ұлттық зертханасында жүргізіген зерттеу 29, 39 және 62 МэВ протондық энергиялардағы А=12-209 массалық сандар диапазонындағы әртүрлі ядролар үшін жоғары ажыратылымдылықтағы (шамамен 200 кэВ) толық энергия спектрлерін алды [49]. Алынған екінші реттік бөлшектердің (p, d, t, 3He, α) спектрлері ядроішілік каскадтық модель мен тепе-теңдік алдындағы ыдыраудың экситондық теориясы негізінде талданады.

Y. Watanabe жетекшілігіндегі зерттеушілер тобы 90Zr 93Nb 92,94,96Mo, 106Pd Ag ядролары үшін 18 МэВ энергиялы протондармен жүретін (p, xp) реакциялары бойынша шашырау спектрлерінің энергияларын өлшеген [50]. Эксперименттік деректер экситондық модель мен Хаузер-Фешбахтың статистикалық моделі негізінде талданған [51]. Теориялық есептеулер мен тәжірибелік нәтижелер арасында 3-14 МэВ аралығындағы ұшқан протон энергиялары үшін жақсы сәйкестік анықталған. Сонымен қатар, 10 МэВ-тен жоғары энергияларда шығарылатын протондар үшін тепе-теңдік алдындағы механизмнің үлесі айтарлықтай артады деген тұжырым жасалған.

[52] зерттеуінде 98Mo және 106Pd ядролары үшін Ep =12, 14 және 16 МэВ, сондай -ақ 60Ni ядросы үшін Ep = 18 MэВ кезінде (p, xp) реакциясының тепе-теңдік алдындағы спектрінің энергияға тәуелділігі қарастырылған. Протон эмиссиясының қималары экситондық модельді қолдану арқылы жүргізілген есептеулердің нәтижелерімен салыстырылды. Бұл есептеулерде орташа эффективті матрицалық элемент *|M|2 = КA-3 E-1* ретінде алынған. Зерттеу нәтижесінде коэффициенттің мәні K=430 МэВ3 болған жағдайда, ол 10-40 МэВ аралығындағы энергияларда протондардың серпімсіз шашырауы кезінде айтарлықтай өзгеріске ұшырамайтыны анықталған.

[53] жұмысында 14,1 және 26 МэВ энергиялы протондармен сәулелендірілген 54,56Fe, 60Ni, 90Zr және 93Nb ядроларындағы (p,xp) реакциясының екінші ретті дифференциалды қималарының өлшеу нәтижелері келтірілген. Алынған эксперименттік деректер FKK-GNASH есептік кодының көмегімен талданды. Атап айтқанда 93Nb(p, xp) реакциясы үшін 3-10 МэВ энергия диапазонында есептелген және өлшенген дифференциалды қималар dσ/dE мәндерінің өзара қанағаттанарлық сәйкестігі байқалды.

Сонымен қатар, FKK теориясы щеңберінде 25,6 энергиялы протондармен жүзеге асырылған 98Mo және 106Pd ядроларындағы (р,р') және (р,n) реакцияларының эксперименттік жолмен алынған екінші реттік дифференциалды қималары талданды [54]. Бұл жағдайда, қиманың тепе-теңдікке дейінгі құраушысы көпсатылы тура процесс үлесімен жеткілікті дәл сипатталады.

Bertrand пен Peelle жүргізген зерттеулерден бөлек, күрделі бөлшектердің эмиссиясымен жүретін реакциялардың қималарын өлшеу басқа да ғылыми ұжымдармен орындалған. Мәселен, Harada және авторлар [55] 42 және 68 МэВ энергиялы протондар үшін 12C, 27Al, 58Ni, 90Zr, 197Au және 209Bi ядроларында (p, xp), (p,xd) және (p,xα) реакциялары бойынша деректер алған. Алынған нәтижелер LA150 моделінің [56] негізінде талданған.

Бірқатар зерттеулерде [57-60] 30 МэВ энергиялы протондармен 92Zr, 92Mo және 56Fe ядроларына жүргізілген (p, xp) (p, xd) (p, xα) реакциялар бойынша екінші реттік дифференциалды және интегралдық қималарға қатысты деректер алынған. Эксперименттік нәтижелердің интерпретациясы тепе-теңдікке дейінгі ыдырау механизмдерін сипаттайтын экситондық модельді қолдану арқылы жүзеге асырылған.

Chevarier және басқа да авторлар [61] 32, 48, 55 және 57 МэВ энергиялы протондардың 57Fe, 59Co, 118Sn және 209Bi ядроларымен әрекеттесуі нәтижесінде түзілетін α – бөлшектердің энергетикалық спектрлерін өлшеген. Алынған эксперименттік қималар деректері ядролық реакциялардағы тепе-теңдікке дейінгі процестерді сипаттайтын экситондық модель негізінде жүргізілген теориялық есептеулермен салыстырылған.

Blann және бірлескен авторлардың [62] зерттеуінде 25, 35 және 45 МэВ энергиялы протондармен 48Ca, 90Zr, 120Sn, сондай-ақ 35 және 45 МэВ энергияларында 208Pb ядроларында қоздырылатын нейтрондық эмиссия реакцияларының қималарын өлшеу нәтижелері келтірілген. Алынған нейтрондардың интегралдық энергетикалық спектрлері әртүрлі гибридтік модельдер нұсқаларын пайдалана отырып интерпретацияланған, соның ішінде геометриялық тәуелді өзгертілген модель стандартты гибридтік тәсіл және ядролық жүйенің қозған күйлерінің орташа өмір сүру уақытын есепке алатын модель қолданылған.

[63] зерттеуде 50 МэВ энергиялы 3He иондарымен сәулелендірілген 112Sn изотопында жүзеге асырылатын (3He, xp), (3He, xd), (3He, xt), (3He,x3He) және (3He, xα) реакциялары бойынша екінші реттік дифференциалды және интегралдық энергетикалық спектрлердің эксперименттік деректері ұсынылған. Алынған спектрлердің теориялық интерпретациясы тепе-теңдікке дейінгі экситондық модель негізінде жүргізіліп, бұл реакциялардың динамикасын айқындайтын сипаттамалық механизмдер анықталған. Зерттеу нәтижелері қолданбалы маңызға ие, себебі олар ядролық әрекеттесу теориясын жетілдіруде және радиоактивті қалдықтардың деңгейі төмен перспективалы гибридті ядролық энергетикалық жүйелерді әзірлеуде пайдалануы мүмкін.

[64] жарияланымда 62,9 МэВ энергиялы протондармен 208Pb ядросында қоздырылатын реакциялар нәтижесінде түзілетін жеңіл бөлшектердің қос дифференциалды қималарын өлшеу нәтижелері келтірілген. p, d, t, 3He және 4He бөлшектері 250-1550 бұрыштық диапазонында, 100 қадаммен, Si -Si – Csl телескоптары арқылы тіркелген. Қосымша түрде, нейтрондар мен жеңіл иондардың қималары туралы деректер 240, 350, 550, 800 және 1200 бұрыштарында DeMoN типті нейтрондық детекторларды пайдалану арқылы алынған. Ұсынылған нәтижелер энергиялық, бұрыштық және интегралдық сипаттамаларды қамтып, MCNPX, FLUKA және TALYS ядролық реакция кодтарының болжау нәтижелерімен салыстырылған.

[65] зерттеуінде Лувен-ла-Нев қаласындағы циклотрондық қондырғыда жүзеге асырылған, 25-тен 65 МэВ-қа дейінгі энергиялар аралығында табиғи изотоптық құрамдағы кремнийге (natSi) бағытталған протондық және α – бөлшектік ядролық реакциялар қарастырылған. Эксперимент барысында протондар, дейтрондар, тритондар, 3He және α – бөлшектер үшін бұрыш бойынша интегралданған энергетикалық спектрлер мен екінші реттік дифференциалды қималар анықталған. Алынған нәтижелер TALYS есептік коды негізінде жүргізілген теориялық модельдеумен салыстырылып, ядролық өзара әрекеттесу механизмдерінің ерекшеліктері талқыланған. Сонымен қатар, теориялық модельдер арқылы қималарды болжау дәлдігін арттырудың ықтимал тәсілдері ұсынылған.

[66] жұмысында 50,5 МэВ энергиялы 3He иондарымен 27Al ядросын сәулелендіру кезінде пайда болатын жеңіл зарядталған бөлшектердің инклюзивті энергетикалық спектрлерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Эксперименттік деректер экситондық модель негізінде талданған, бұл модель PRECO-2006 бағдарламалық кешенінде жүзеге асырылып, қозған ядроның статистикалық тепе-теңдік күйіне өту үдерісін ескереді. Интегралдық қималарды қалыптастыруға тура, тепе-теңдікке дейінгі және құрама механизмдердің сандық үлестері анықталды. Алынған нәтижелер теориялық тұрғыдан да, ядролық трансмутация процестерін зерттеу және реакцияның бастапқы сатыларындағы өзара әрекетесу механизмдерін түсіндіру маңызды.

[67] зерттеуінде 50,5 МэВ энергиялы 3He иондарымен 112Sn ядросының әрекеттесуі нәтижесінде жүзеге асатын (3He,xp), (3He,xd), (3He.xt), (3He, x3He) және (3He, xα) реакциялары бойынша екінші реттік дифференциалды және интегралдық энергетикалық спектрлердің өлшеу нәтижелері ұсынылған. Эксперименттік деректердің теориялық талдауы тепе-теңдікке дейінгі процестерді сипаттайтын экситондық модель негізінде жүргізіліп, реакциялық механизмдердің сипаты анықталған. Эксперимент Ядролық физика институның У-150М үдеткіш кешенінде жүргізілген.

[68] жұмысында p + 92,94,95,96,97,98,100Mo жүйелерінде протондардың 200 МэВ-қа дейінгі энергияларында жүзеге асатын реакциялар үшін нейтрондар, протондар, дейтрондар, тритондар, 3He және α – бөлшектердің энергетикалық спектрлері мен екінші реттік дифференциалды қималары зерттелген. Есептеулер экситондық модель негізінде, оның ішінде Ивамото-Харада модификациясын, сондай-ақ оптикалық модельді, ядроішілік каскад моделін, тура, тепе-теңдікке дейінгі және тепе-теңдік механизмдерін қамтитын кешенді тәсіл арқылы орындалған. Теориялық нәтижелер бар эксперименттік деректермен салыстырылып, олардың өзара сәйкестігі талданған.

Г. Усабаева және өзге де авторлардың [69] жұмысында 29 МэВ энергиялы α – бөлшектердің 27Al және 59Co ядроларымен өзара әрекеттесуі нәтижесінде түзілетін протондардың инклюзивті спектрлерін талдау нәтижелері ұсынылған. Эксперименттік деректер экситондық модель негізінде жүргізілетін теориялық есептеулермен салыстырылған. Жоғары энергиялар аймағында спектрлер пішініне негізінен тепе-теңдікке дейінгі механизмдердің айтарлықтай әсер ететіні анықталған.

Т.К. Жолдыбаев және өзге де авторлардың [70] зертеуінде 50 МэВ энергиялы 3He иондарымен 59Co ядросының әрекеттесуі нәтижесінде пайда болатын жеңіл зарядталған бөлшектердің эмиссия үдерістері талданған. Эксперимент барысында протондар, дейтрондар, тритондар, 3He және α – бөлшектердің энергетикалық спектрлері тіркелген. Алынған мәліметтер экситондық модель негізінде теориялық тұрғыда интерпретацияланып, зерттелген бөлшектердің түзілуіне тура, тепе-теңдікке дейінгі және статистикалық механизмдердің үлесі сандық түрде бағаланған.

Қарастырылған зерттеулер жеңіл иондармен жүретін ядролық реакцияларды тепе-теңдікке дейінгі әдістер шеңберінде модельдеу саласындағы қазіргі жағдай мен даму бағыттарын бейнелейді. Аталған жұмыстар келесі тауарларда ұсынылатын эксперименттік деректерді талдау үшін теориялық және әдістемелік негіз қалыптастырады.

# 2 ЭКСПЕРИМЕНТТІК ҚОНДЫРҒЫ ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ ӘДІСТЕМЕСІ

Жұмыстың негізін құрайтын эксперименттік нәтижелер Қазақстандағы Ядролық физика институның У-150М циклотронынан шығарылған жеделдетілген бөлшектер шоғырында алынған. Осы тарауда циклотронның техникалық сипаттамалары жан-жақты қарастырылады.

## 

## 2.1 Циклотрон, шашырау камерасы және нысаналар

Өлшеу жұмыстары Қазақстан Республикасының Ядролық физика институтындағы изохронды У-150М циклотронында жүргізілді. Аталған циклотрон протондарды 30 МэВ-қа дейін, дейтрондарды 25 МэВ-қа дейін, 3He иондарын 60 МэВ-қа дейін және α – бөлшектерді 50 МэВ-қа дейін жеделдетуге мүмкіндік береді [71].

Циклотрон ауыр зарядталған бөлшектерді – мысалы, протондар мен иондарды – жеделдетуге арналған циклдік үдеткіштер класына жатады. Құрылғының магниттік саңылауында зарядталған бөлшектерге Лоренц күші әсер етеді, ол оларды айналмалы траектория бойымен бағыттайды. Бұл траекторияның радиусы бөлшектің импульсі мен магниттік индукция шамасына тәуелді, ал айналу периоды тұрақты болып қалып, уақытқа байланысты өзгермейді. Қазіргі заманғы циклондардың магниттік жүйесін жасау үшін сапасы жоғары темір, мысалы «Армко» маркалы материал қолданылады, және құрамында қуыстар немесе басқа да ақаулары жоқ құйма дайындамамалар пайдаланылады.

Зарядталған бөлшектер циклондарда үдеткіш камераның орталық бөлігінде орналасқан иондық көзде түзіледі. Ионизация процесі жүйеге сутегі, дейтерерий, гелий-3 немесе гелий-4 тәрізді газдарды енгізу арқылы жүзеге асатын доғалық разрядтың нәтижесінде орын алады. Бөлшектердің үдетілуі шамамен бір жарым метрлік диаметрі бар магниттің полюстері арасындағы кеңістікте жүзеге асады және бұл үдеріс иондардың дуанттар деп аталатын электродтар арасынан өткен сәттерінде іске асады [72].

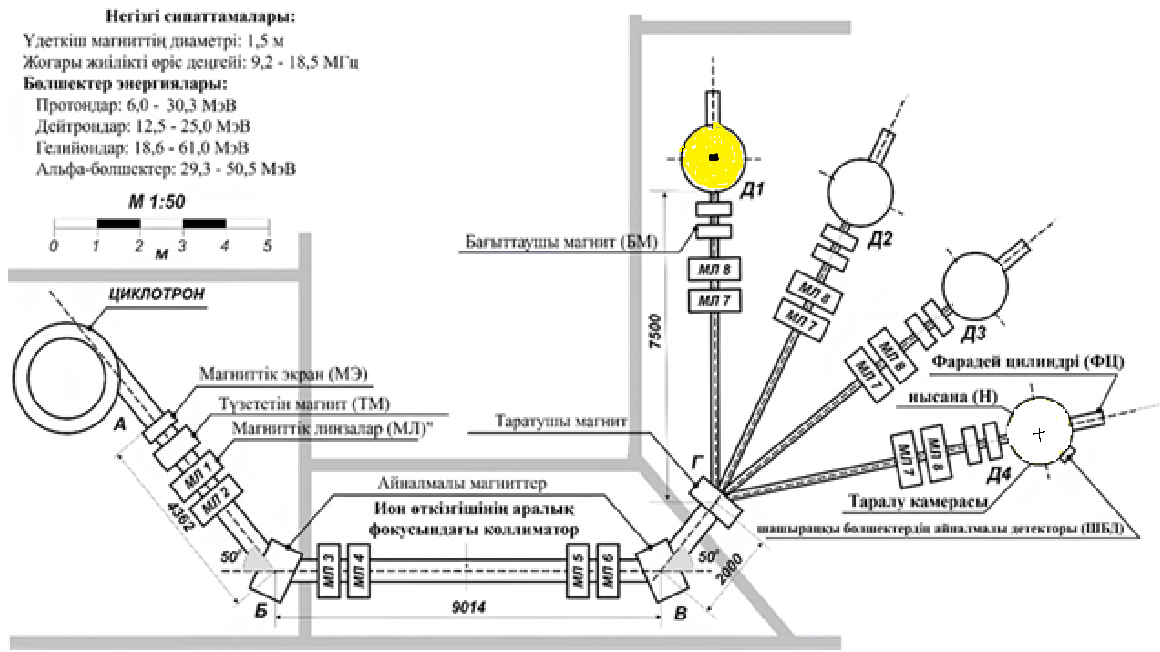
Зарядталған бөлшектерді жеделдетудің жұмыс параметрлерін орнату кезінде иондық көздің жұмыс режиміне, оның ұңғымасына, импульстік токтың уақытша микроқұрылымына, сондай-ақ сәулені нысанаға тасымалдау сапасына басты назар аударылады. Сәуленің кеңістік және уақыттық сипаттамаларын осындай кешенді оңтайландыруды жүргізу паразиттік сигналдар деңгейінің айтарлықтай төмендеуіне ықпал етеді және электронды өлшеу аппаратурасына жүктеменің біркелкілігін арттыруға мүмкіндік береді [73].

Циклотрон камерасының жұмыс аймағында жеделдетілген иондар шоғыры кейін иондық-оптикалық жүйемен жабдықталған ион өткізгіш арқылы тасымалданады. Бұл жүйе ион шоғырын фокустау мен оны бағыттауды қамтамасыз етіп, шоғырды тарату магнитіне (ТМ) жеткізеді. Тарату магниты ион ағынын таңдау және оны өлшеу залына орнатылған төрт эксперименттік арнаның (Д1, Д2, Д3 немесе Д4) біріне бағыттау қызметін атқарады.

Үдету режимдерін баптау кезінде иондық көздің жұмыс параметрлеріне – оның скваждылығына, импульстік токтың уақыттық құрылымына, сондай -ақ зарядталған бөлшектер ағынының нысанаға дейінгі кеңістік тұрақтылығына ерекше назар аударылады. Бөлшектер ағынының уақыттық және кеңістіктік сипаттамаларын мұқият оңтайландыру фондық сигналдардың деңгейін төмендетуге және өлшеу жүйесінің электрондық элементтеріне түсетін жүктеменің біркелкілігін арттыруға мүмкіндік берді.

У -150М циклотронында әртүрлі ион түрлерін жеделдету және олардың энергиясын реттеу үшін жоғары жиілікті элетр өрісінің жиілігі (9,2-18,5 МГц аралығында), магнит өрісінің шамасы және үдету аймағындағы магнит өрісінің салыстырмалы таралуы өзгертіледі. Бөлшектердің энергиясын келесі диапазонда реттеуге болады: протондар (p) – 6-дан 30,3 МэВ-қа дейін, дейтрондар (d) – 12,5-тен 25,0 МэВ-қа дейін, гелиондар (h, 3He) – 18,6- дан 61,0 МэВ-қа дейін, ал 4He бөлшектер (α - бөлшектер) – 29,3-тен 50,5 МэВ-қа дейін.

Вакуудық камерада жеделдетілген бөлшектер электростатистикалық ауытқыш жүйе мен түзеткіш магниттің (ТМ) көмегімен ион өткішгішке шығарылады. Бөлшектер шоғырының фокустарын 4 жұп магниттік квадрупольдік линзалардан (МКЛ) тұратын жүйе қамтамасыз етеді. Зарядталған бөлшектер ағынының бағытын үш мәрте өзгеру – бұру магниттері (БМ) мен тарату магнитінің (ТМ) көмегімен – шашырау камерасы орнатылған аймақта нейтрондық және γ – фон деңгейін барынша азайтуға мүмкіндік береді. Ион өткізігш бойындағы ион ағынының тура бағдарлануы 12 кварцты торлы (айқаспалы) экран және қашықтықтан басқарылатын телекамералар арқылы бақылауға алынады. Ал бөлшектер ағынының ток күшін әртүрлі нүктелерде өлшеу үшін 9 тоқтық зонд орнатылған.



Сурет 2 – Циклотроннан шашырау камерасына дейінгі иондар шоғырын тасымалдау геометриясы

Иондарды тасымалдау жүйесінің (2-сурет) құрамына екі бұру магниті кіреді, олардың негізгі қызметі – иондар шоғырын траектория бойымен түзету және оны аралық фокус нүктесінде шоғырландыру. Бұл нүкте ион өткішгіштің геометриялық орталық аймағында орналасқан. Осындай кеңістік үйлестіру нәтижесінде шоғыр тарату магнитінен өткен кезде туындайтын энергия шығындары азайып, оның интенсивтілігі жоғары деңгейде сақталады. Мұндай тұрақтылық шоғырдың эксперименттік арналарға дәл және сенімді жеткізілуін қамтамасыз ету үшін ерекше маңызды.

Жеделдетілген бөлшектер макроқұрылым мен микроқұрылымнан тұратын импульстік иондар шоғырын түзеді. Макроимпульстердің ұзақтығы τₙ= 0,3-2,0 мс аралығында реттелуі мүмкін, ал скваждылық коэффициенті S=2÷100 шегінде өзгереді. Аталған экспериментте скваждылық мәні ретінде S=2 таңдалды. Макроимпульстердің қайталану жиіліігі келесі өрнек бойынша есептеледі: f=(τn.S)-1  және оның мәні f = 5 ÷1666 Гц аралығында өзгеруі мүмкін. Шоғырдың микроструктурасы үдеткіш жүйедегі жоғары жиілікті электр өрісінің сипаттамаларымен анықталады: бір микроимпульстің ұзақтығы шамамен tжж=10 наносекунд, ал олардың арақашықтық Тжж = 100 наносекунд болады. Бұл мәндер жоғары жиілікті генератордың жұмыс параметрлеріне байланысты анықталады.

Бөлшектер ағынының кеңістік және уақыттық параметрлерін кешенді түрде оңтайландыру, фоны бар сигналдар мен сыртқы кедергілердің деңгейін елеулі түрде азайтуға мүмкіндік берді. Сонымен қатар, бұл өлшеуіш электрондық құрылғылардың біркелкі жүктелуін қамтамасыз етті. Осы техникалық шешімдердің нәтижесінде эксперименттік жағдайларға байланысты нысанаға түсетін иондар ағынының тогын 10-9 – 10-7 А диапазонында тұрақты түрде ұстап тұрып, жоғары дәлдіктегі өлшеулер жүргізу мүмкін болды.

## 

## 2.2 Шашырау камерасы, вакуумдық жүйе және нысандарды калибрлеу әдістемесі

Шашырау камерасы (ШК) [74] иондар шоғырын 90,50-қа бұратын №1 арнаға орнатылған және циклотроннан шыққан ағыннан 23,9 метр қашықтықта орналасқан. Камера ион өткішгіштен вакуумдық өтпелі шибер арқылы оқшауланған. Камера ішіндегі терең вакуумды қамтамасыз ету үшін жеке вакуумдық клапаны бар ТМН-500 турбомолекулалық сорғысына негізделген майсыз сорғы жүйесі қолданылған. Эксперименттік құрылғыда ТМН-500 сорғысынан дірілдің берілуін болдырмау мақсатында арнайы діріл сөндіргіш орнатылған. Шашырау камерасы мен ион өткізгіш арасындағы автоматты клапан камераға ауа жібермей қызметтік қолжетімділікті қамтамасыз етеді. Үдету және тасымалдау жолының бойындағы вакумм деңгейі орта есеппен 5 - 10-15 мм сынап бағанасын құрайды.

Қолданылған шашырау камерасының ішкі диаметрі 60 см-ді құрайды. Камера алдында орналасқан коллиматорлар жүйесінің бұрыштық айқын еместігі ең көбі ±24’ шамасында болды, бұл нысана бетіндегі иондар шоғырын шамамен 3мм-лік сызықтық өлшеммен қалыптастыруға мүмкіндік берді. Шашырау камерасының ион өткізгіш осьіне қатысты дәл орналасуы оптикалық әдістер арқылы юстировка жасау арқылы жүзеге асырылды. Камераның «физикалық рөлін» орнату 197Au ядросында зарядталған бөлшектер ағыны осінің сол және оң жағындағы серпімді шашырау процестерінің дифференциалды қималары салыстырылды.

Шашырау камерасының вакуумдық тығыздалған айналмалы қақпағында шашыраған бөлшектерді тіркеуге арналған негізгі спектрометр орнатылған. Камераны басқару пульті өлшеу-есептеу кешені залынан қашықтан басқару арқылы екінші реттік бөлшектерді тіркеу бұрышын θ 100 - 1700 диапазонында өзгертуге мүмкіндік береді. Бұрышты орнату дәлдігі ±0,10 механикалық қателік шегінде қамтамасыз етіледі. Камера ішінде сегіз позициялы нысаны кассетасы орналасқан, ол электр жетектерінің көмегімен қашықтан басқарылып, зарядталған бөлшектер ағынының өсіне қатысты -450, +900, +450 бұрыштарымен орнатылады.

Нысанаға түсетін бөлшектер санының мәнін анықтау үшін токты интегралдауға арналған Фарадей цилиндрі жүйесі қолданылады [75]. Интегратордың тұрақты мәнін анықтаудың салыстырмалы қателік 1%-дан аспады.

Экспериментте нысаналар ретінде өздігінен ұсталып тұратын изотоптық фольгалар қолданылды, олардың сипаттамалары 1-кестеде келтірілген. Нысаналардың қалыңдығы 241,243Am + 244Cm α – бөлшектері көзінен өткен кезде энергия жоғалту шамасы бойынша бақыланды. Қорғасын негізіндегі нысаналардағы басқа элементтердің изотоптық құрамы есепке енгізілмеді.

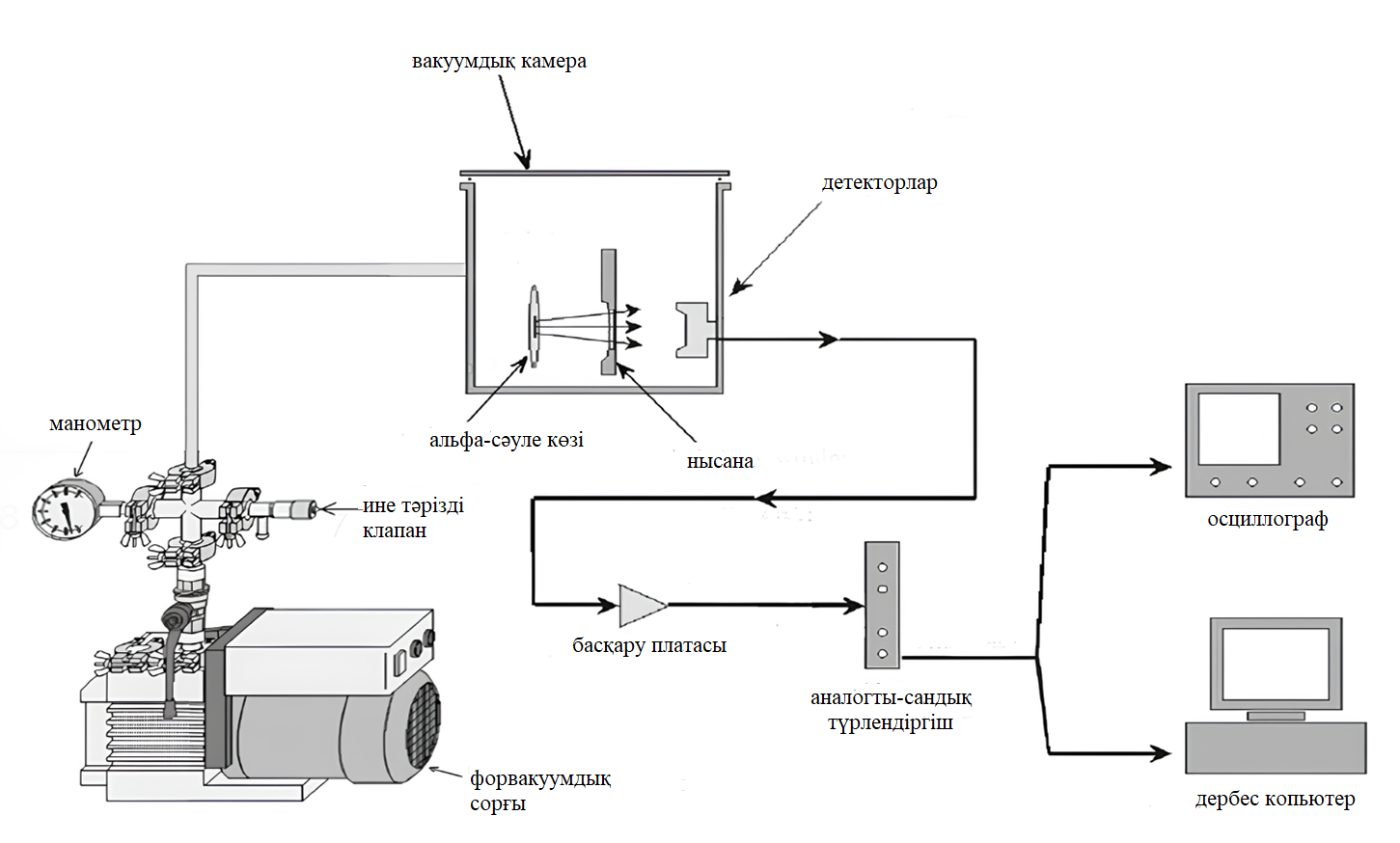
Кесте 1 – Нысана материалдарының сипаттамалары

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Нысана | Қалыңдығы, мг/см3 | Байыту, % |
| 120Sn | 3,8 | 97 |
| 103Rh | 3,7 | моноизотоп |

Спектрометрлерді энергетикалық калибрлеу мен ядролық нысаналардың қалыңдығын анықтау мақсатында құрамында 226Ra радионуклиді бар стандартты препарат қолданылады. Бұл көздің α – спектрі 4,782; 5,305; 5,490; 6,002 және 7,687 МэВ энергиялы бес негізгі сызықтан тұрады.

Зертханада қолданылатын жұқа фольга түріндегі нысаналардың қалыңдығы мен біртектілігі 226Ra альфа-активті көзі арқылы α – бөлшектердің энергия жоғалту шамасын өлшеу әдісімен анықталады. Бұл мақсатта арнайы вакуумдық камера пайдаланылады, оның ішіне фольга, α – бөлшектер көзі және кремнийлі детектор орналастырылады.

3-суретте эксперименттік қондырғының схемасы көрсетілген. Альфа -бөлшектер көзі мен жартылай өткізгіш детектор герметикалық жабылған вакуумдық камера ішінде орналасқан. Камера ішіндегі ауаны сорып шығару үшін форвакуумдық сорғы қолданылады. Қалдық қысымды біртіндеп реттеу мақсатында сорғыға инелі клапан орнатылған. Камерадағы қысымның нақты мәні миллибармен градуирленген манометр арқылы бақыланады. Детектор аз сыйымдылықты кабель арқылы алдын ала күшейткішке жалғанады, ол көпарналы анализаторға жіберілетін, шамамен 1В амплитудалы сигнал калыптастырады.



Сурет 3 – Нысана қалыңдығын өлшеуге арналған эксперименттік қондырғының схемасы

Бірінші кезеңде әртүрлі энергияларға сәйкес келетін α – бөлшектер пиктерінің орны тікелей кремнийлі детектор арқылы анықталады. Екінші кезеңде радиоактивті көзден шыққан α – бөлшектер кремний детекторына түспес бұрын, қалыңдығы анықталуы тиіс нысана материалы арқылы өтеді. Геометриялық орналасу барлық бөлшектердің фольга үлгісі арқылы өтіп, толық тіркелуін қамтамасыз ететіндей етіп таңдалған. Детектордан шыққан сигнал алдымен алдын ала күшейткішке, одан кейін аналогтық – сандық түрлендіргішке беріледі және соңында сигнал компьютердегі көпарналы анализаторда өңделеді. Альфа – бөлшектердің ауадағы қозғалыс ауқымы шектеулі болғандықтан, өлшеулер вакуумда қысымы 10-1 мбар-дан төмен жағдайда жүргізіледі. Альфа – спектрлердегі энергия ығысуын талдау нәтижесінде нысана материалындағы энергия жоғалту шамасы анықталады. Осыдан кейін, LISE++ бағдарламасына ендірілген физикалық калькулятордың көмегімен фольганың нақты қалыңдығы есептеледі.

## 

## 2.3 Бөлшектерді тіркеу әдісі және реакция өнімдерін сәйкестендіру (ΔE–E)

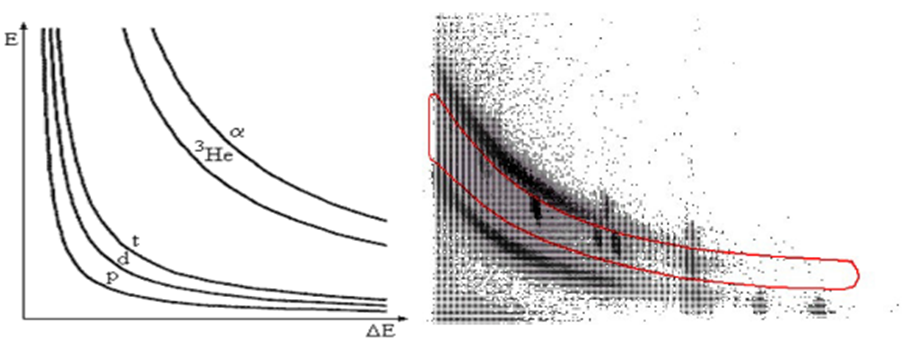
Жеңіл иондармен (1Н, 2Н, 3Н, 3Нe,4Нe) жүретін ядролық реакцияларды зерттеуде негізгі әдістердің бірі – ΔЕ – Е тіркеу әдісі болып табылады. Бұл тәсіл бөлшектің екі параметрін: меншікті ионизациясын (dE/dx) толық энергиясын бір мезгілде тіркеуге негізделген, соның арқасында бөлшектердің түрлері сенімді түрде ажыратылады. ΔЕ – Е әдісінің негізінде зарядталған бөлшектің энергиясы мен меншікті ионизациясы арасында Бета-Блох заңы бойынша анықталатын байланыс жатыр [76, 77]:

|  | (1) |
| --- | --- |

мұнда М – бөлшектің массасы;

Z – заряды, ал

k – барлық бөлшек түрлері үшін шамамен тұрақты шама. Формуладан көрініп тұрғандай, энергия мен меншікті ионизацияны (dE/dx) бір уақытта өлшеу кезінде әрбір бөлшек түрі E-dE/dx координаттар кеңістігінде өзіне тән гипербола бойына түседі. Ең жеңіл ядролар үшін (1H – 4He) MZ2  көбейтіндісі сатылы түрде 1-ден 16-ға дейін өзгереді және бұл параметр бөлшектерді идентификациялау үшін қолайлы болып табылады. ΔE – E жазықтығындағы проекцияның сипаттамалық бейнесі 4-суретте келтірілген.

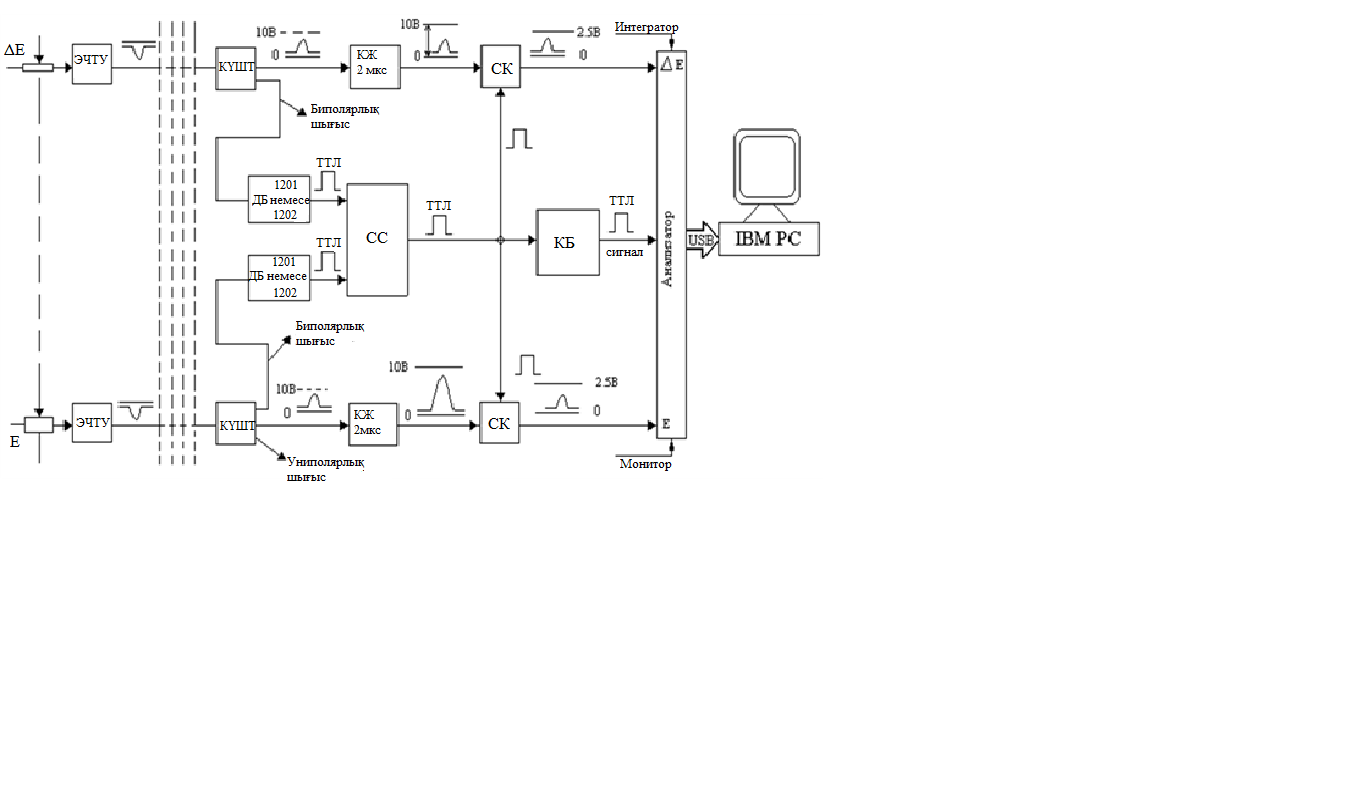


а ә

а – зарядталған бөлшектер үшін тән ΔE–E таралулары. Төменгі локустар – бір зарядты бөлшектер (p, d, t), жоғарғы локустар – екі зарядты бөлшектер (³He,⁴He) ә – шашыраған бөлшектер матрицасынан дейтрондар локусын бөліп көрсету

Сурет 4 – Екіөлшемді ΔE–E диаграммасы бойынша екінші реттік бөлшектерді талдау

Зерттеліп отырған ядролық реакциялар өнімдерін масса және энергия бойынша сәйкестендіру ΔE – E әдісі негізінде жүзеге асырылды. Бұл үшін ORTEC және POLON фирмаларының спектрометрлік модульдері негізінде құрастырылған көпөлшемді бағдарланатын талдау жүйесі қолданылды. Жүйенің құрылымдық сұлбасы 5-суретте келтірілген.



ЭЧТУ – Электрондық жиілікті триггерлік күшейткіш; КҮШТ – Күшейткіш; ДБ – Дифференциалдайтын бөлгіш; КЖ – Кідіріс жолы; СК – Сызықтық күшейткіш; СС – Сәйкестік сұлбасы; ТТЛ – TTL деңгейіндегі логикалық сигналдар; USB – Деректерді компьютерге беру интерфейсі; IBM PC – Мониторинг және өңдеу үшін компьютер.

Сурет 5 – Зарядталған бөлшектерді тіркеу және сәйкестендіру жүйесінің блок-схемасы

Бұл жүйеде амплитудалық-сандық түрлендіргішті, импульс санағыштарын және крей-контроллерді біріктіретін жаңа интеграцияланған схема іске асырылған. Ол деректерді әрі қарай жеке компьютерге шығаруға мүмкіндік береді. ΔE және E детекторларынан шыққан сигналдар екі тәуелсіз спектрометрлік арна («E» және «dE») арқылы микроконтроллерлер негізінде жасалған екіөлшемді талдағышқа түседі. Бұл талдағыш USB порты арқылы дербес компьютерге қосылатын сыртқы блок ретінде орындалған. Жүйелік бағдарлама анализатордың жұмыс режимдерін басқарып, өлшеу деректерін компьютерге, графикалық визуализация жасайтын бағдарламаға және файлдарда сақтау жүйесіне беріп отырады.

Сигналдардың амплитудалары шыңдық детекторлар арқылы тіркеледі. Синхрондаушы импульс түскен кезде кіріс сигналдарының тіркелген амплитудалары екі арна бойынша бір мезгілде сандық кодқа түрлендіреді. Бұл синхрондаушы импульс сыртқы құрылғыдан тыс қалыптасып, ΔЕ және Е детекторларынан бір уақытта (сәйкестік схемасының рұқсат уақыты шегінде) сигнал түскен жағдайда іске қосылады. Бұл зарядталған бөлшектің екі детектордан да өткенін білдіреді. Сандық мәндер ретінде «Е» және «dE» шамалары MATRIX[E, dE] түріндегі матрицаның координаттарын анықтайды.

Сыртқы модуль құрамында екіөлшемді матрица тіркелетін оқиғалар санының толықтығын бақылау мақсатында басқарушы импульстарды есептейтін арнайы санағыш қарастырылған. Бұл санағыш тіркелген импульстердің санын матрица өрісінде жинақталған жалпы оқиғалар санымен салыстыру арқылы ықтимал жоғалтуларды бағалауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, құрылғыда екі арналы сыртқы оқиғалар санағышы да: олардың бірі – үдеткіштің иондар ағынынан келетін ток интегратор сигналдарын, ал екіншісі – нысана мониторынан алынатын ақпаратты тіркейді.

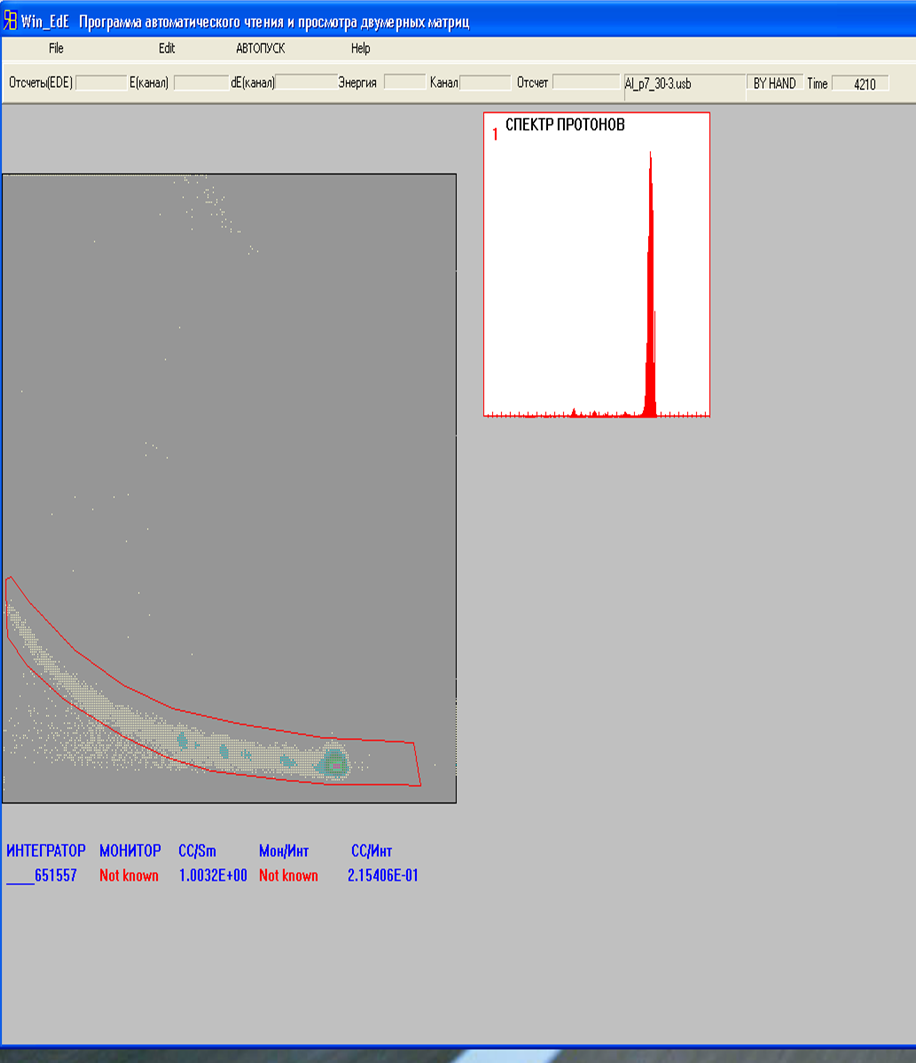
## 

## 2.4 Бағдарламалық қамтамасыз ету және деректерді өңдеу

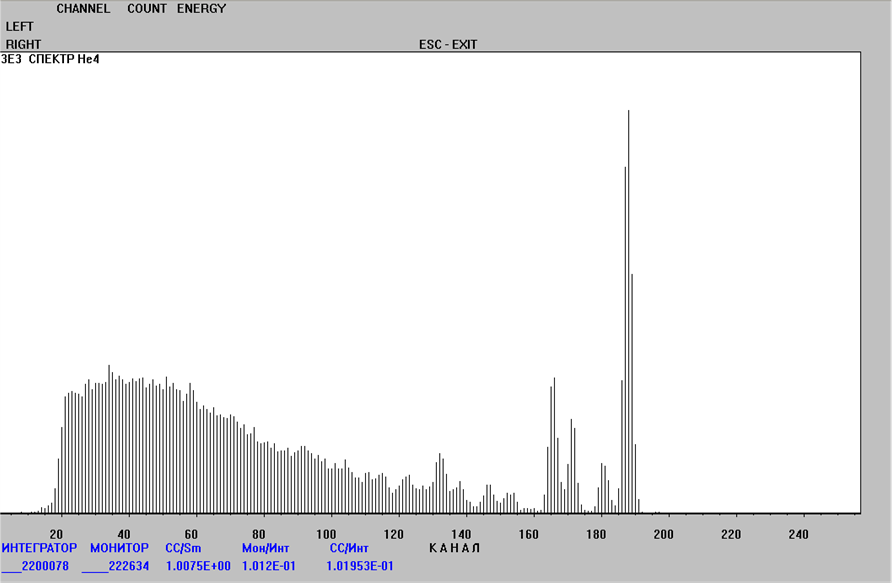
Анализатор белгілі бір уақыт арлығында жинаған ақпарат пакеті қолмен немесе автоматты режимде MATRIX бағдарламасы арқылы USB порты арқылы оқылып, кейіннен спектрдің визуализациясы мен бастапқы өңдеуін жүзеге асыратын Win\_EdE бағдарламасына беріледі. Келесі кезеңде Win\_dE бағдарламасы біртекті оқиғалар тобын белгілеуге мүмкіндік береді. Мысалы, бір бөлшек түріне сәйкес келетін барлық dE және E сигналдар жұбын (оқиғалар локусын шектеу) бөліп алып, оларды сызықтық спектрлерге түрлендіреді. Бұл спектрлерде абцисса осьінде әрбір тіркелген оқиға үшін E (dE + E) шамасы бейнеленуі мүмкін, яғни бұл – бөлшектердің энергетикалық спектрлері.

Оқиғалар локустарын бөлу процесі алдын ала локус түрін таңдау диалогынан басталады (мысалы:протондар, дейтрондар, тритондар, 3He, 4He және белгісіз бөлшектер – Unk). Әрдайым таңдалған локустың атауын нақты тіркелген оқиғалар аймағымен дәл сәйкестендіру қажет, өйткені спектрлерді одан әрі өңдеу барысында әрбір спектрге оның атауына (немесе нөміріне) сәйкес физикалық сипаттамалар автоматты түрде тағайындалды.

Локус атауы таңдалғаннан кейін оқиғалар аймағын бөлектеу үдерісі тікелей басталады – яғни, осы сәттен бастап бағдарлама оператор әрекеттерін күту режиміне өтеді. Локустың бөлектеу операторы қызықтыратын оқиғалар тобының кез келген нүктесінен басталуы мүмкін: бұл үшін меңзерді қажетті матрица нүктесіне апарып, тышқанның сол жақ батырмасын басу жеткілікті. Алғашқы шерту локустың бастапқы нүктесін белгілейді. Кейінгі нүктеге меңзерді апарып, сол жақ бастырманы басу – осы екі нүктені қосатын түзу сызықты сызады. Бұл әрекет оператор белгілеген оқиғалар аймағы көпбұрыш түрінде бөлектенгенге дейін қайталанады. Enter пернесін басу арқылы бірінші және соңғы нүкте арасында түзу сызық салынып, локус контуры тұйықталады. Бұдан кейін бағдарлама бөлектелген аймақты автоматты түрде бояп, оның дұрыстығын тексереді және матрицаның оң жағында осы локусқа сәйкес келетін сызықтық спектрді (6-сурет) құрастырады. Осылайша, берілген локус бойынша сызықтық спектрдің түзілуі аяқталып, бағдарлама оқиғаларды күту режимінен шығады. Осыдан кейін келесі локусты салуға көшуге болады: оған атау беріп, жоғарыда сипатталған алгоритм бойынша әрекет ету қажет.



Сурет 6 – Win\_EdE бағдарламасында локус бөлектеу үлгісі



Сурет 7 – Жиналған эксперименттік спектрдің E детекторындағы проекциясы

Кейін сызықтық спектрді экранға шығару үшін (7-сурет) сәйкес сандық пернелерді басу қажет: 1 – протондар спектрін шығару үшін, 2 – дейтрондар спектрін шығару үшін, 3 – тритондар спектрін шығару үшін, 4 – ³He спектрін шығару үшін, 5 – ⁴He спектрін шығару үшін, 6 – белгісіз бөлшектер (Unk) спектрін шығару үшін.

Esc пернесін басу матрица мен сызықтық спектрлердің бейнелеуін бастапқы күйіне қайтарады.

Үлкен терезеде спектрдің қажетті нүктесіне тышқанның сол жақ батырмасын басу арқылы сол жақ маркерді, ал оң жақ батырмасын басу арқылы оң жақ маркерді орнатуға болады. Бағыттау пернелері (солға, оңға) маркерлерді бір арнаға жылжытады. «L» пернесі – сол жақ маркерді таңдау үшін, «R» пернесі – оң жақ маркерді таңдау үшін қолданылады. Егер маркер тышқан көмегімен орнатылса, ол автоматты түрде навигациялық пернелер арқылы басқарылатын белсенді маркерге айналады. Бағыттау пернелері (жоғары, төмен) спектрдің тік масштабын кеңейтеді немесе қысады. Ал «O» пернесі бастапқы спектрді экранда қалпына келтіреді.

“S” пернесін басу арқылы маркерлер арасындағы есептелген каналдар сомасы анықталады.

“I” пернесі осы аралықтағы есептер сомасын интегратор арналар санына бөліп, нәтижені көрсетеді.

Өлшеу барысында үлкен терезеде кез келген спектрдің жинақталу үдерісін нақты уақыт режимінде бақылауға болады, мысалы, маркерлермен белгіленген пиктің астындағы ауданның өзгеруін қадағалауға болады.

## 

## 2.5 Бастапқы эксперименттік деректерді өңдеуге арналған бағдарламалар

Бастапқы эксперименттік деректерді өңдеу және реакция өнімдерінің үздіксіз *d2σ/dɛdΩ* таралуларын есептеу үшін бірқатар есептеу бағдарламалары қолданылды [78]. Бастапқы ақпаратты өңдеу үдерісін шартты түрде төрт негізгі жұмыс кезеңіне бөлуге болады:

1) бөлшектер спектрлерінің энергетикалық калибровкасын жүргізу;

2) фондық сигналдарды алып тастау (шегеру);

3) спектрлерді энергетикалық ось бойынша берілген қадаммен орташа мәнге келтіру;

4) реакция қималарын есептеу.

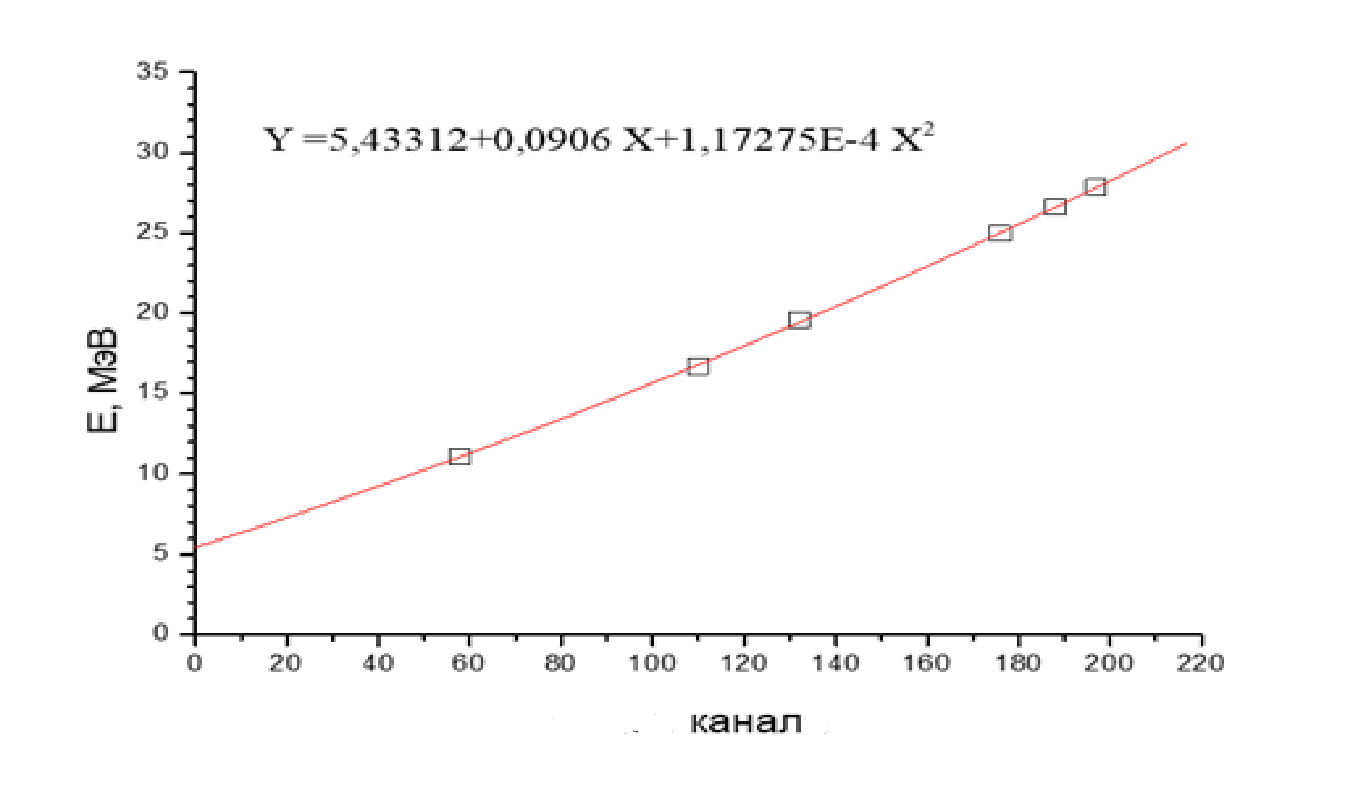
*Бөлшектер спектрлерінің энергетикалық калибровкасын жүргізу*

Е – детекторды калибрлеу үшін [79] арнаның X нөміріне сәйкес келетін бөлшектің кинетикалық энергиясы қалдық ядроның белгілі энергетикалық күйлеріне (мысалы, 12C, CH2, 103Rh нысана материалдары) негізделе отырып анықталды. Бұл энергиядан бөлшектің ядролық үлгіде және ΔЕ – детекторда жоғалтқан энергиясы шегеріліп, Е – детекторда жұтылған энергия мәні алынды. Бұл жұтылған энергия арна нөмеріне сызықтық түрде тәуелді және барлық бөлшек түрлері үшін бірдей болып табылады. Осылайша, арна нөмірі мен Е- детекторда жұтылған энергия арасындағы байланысты сипаттайтын функция эталондық (тіретік) энергетикалық калибровка ретінде қабылданды. Эталондық калибровка белгілі болған жағдайда, берілген қалдық энергия бойынша ΔЕ – детектордағы энергия жоғалтуды қалпына келтіріп, бөлшектің телескопқа түсер алдындағы толық энергиясын анықтауға болады. Бұдан кейін нысана қабатындағы энергия жоғалтуды ескере отырып, ядродан шыққан сәттегі бөлшектің бастапқы энергиясы есептеледі.

CsI(Tl) сцинтилляциялық Е-детекторын қамтитын телескопты калибрлеу жоғарыда сипатталған әдіске ұқсас түрде жүзеге асырылады. Бұл жағдайда әрбір бөлшек түрі үшін жеке эталондық калибровка анықталады. Жалпы жағдайда мұндай калибровка сызықтық емес сипатқа ие және Е – детектормен жұтылған энергия мен жарық шығымы арасындағы байланысты сипаттайды. Бұл тәуелділік сцинтиллятор материалының әмбебеп сипаттамасы болып табылады.

Осылайша, жарық шығымының энергияға тәуелділігі белгілі екенін ескере отырып, эталондық (тірек) калибровканы орнату амплитудалық спектрдегі канал нөмері мен жарық шығымының арасындағы сызықтық байланысты анықтауға негізделеді. Жоғарыда сипатталған бастапқы энергияны қалпына келтіру процедурасын қайталау арқылы Cs(Tl) E – детекторы бар телескоп үшін әртүрлі бөлшек түрлеріне сәйкес калибровкалар алынады.

Осылайша, ΔЕ×Е матрицасына арналған эталондық калибровка (мұнда Е-кремнийлі детектор) түзу сызықпен аппроксимацияланады және бөлшек түріне тәуелсіз болады (8-сурет). Ал ΔЕ×Е оқиғалары үшін (E – Csl(Tl)детекторы) протондар жағдайында ол парабола түрінде сипатталады (9-сурет).



Сурет 8 – Протондарды тіркеуге арналған ΔE×E (Si–Si) телескопының калибровкалық сипаттамалары



а ә



б

Сурет 9 – Әртүрлі бұрыштар үшін калибровкалық түзу сызық

*«LOSSES\_A» бағдарламасы*

«LOSSES\_A» бағдарламасы зарядталған бөлшектің жұтқыш қабаттан өткеннен кейінгі энергиясын есептеуге арналған. Бұл процедурада келесі алгоритм жүзеге асырылған. Бұл процедурада келесі алгоритм жүзеге асырылған. Бета-Блох формуласына [80] cәйкес, бөлшек жұтқыштың шексіз жіңішке dx (мг/см2) қабатынан өткен кезде оның энергия жоғалтуы – dE (МэВ) келесі өрнекпен анықталады:

 (2)

мұнда *z* - соққы беруші бөлшектің заряды (е бірліктерімен);

*mc2* – электронның тыныштық энергиясы;

– соққы беруші бөлшектің жылдамдығы (с жылдамдығы бірліктерімен);

*Z* – орта атомының ядролық заряды (e бірліктерімен);

*А* – орта ядросының атомдық массасы;

*I* – ортаның атомын қоздыруға қажетті орташа энергия;

*C/Z* – қабықша эффектісіне арналған түзету коэффициенті;

δ – тығыздық эффектісіне арналған түзету коэффициенті.

 (3)

мұнда Ɛmax – қозғалыстағы бөлшек (массасы М) тыныштық күйдегі байланыспаған электронға бере алатын максималды энергия.

қосындысының орнына қосындысы қолданылады, мұндағы:

(4)

 (5)

Егер , мұндағы

Егер , онда шамасы [81-83] дереккөздерге сәйкес полином арқылы анықталады:

(6)

мұнда *a₁, a₂, a₃* коэффициенттері жұтқыш материалдың атомдық нөмірінің функциясы ретінде [57, p. 044608-1-044608-8] бойынша интерполяция әдісімен алынған. Тығыздық эффектісіне арналған δ түзету коэффициенті келесі тәсілмен есептеледі:

(7)

мұнда ал *χ0, χ1, a, m* и *С'* шамалары [79, p. 91] бойынша анықталған.

Қалыңдығы шектеулі жұтқыш қабаттан өткеннен кейінгі бөлшек энергиясын анықтау үшін (7) теңдеуі төртінші ретті Рунге–Кутта әдісімен шешілді. Бұл үшін жұтқыш қабат Δ (мг/см²) қалыңдықтағы бірдей қабатқа бөлінді. (2) теңдеуді келесі түрде жазуға болады:

(8)

Онда бұл теңдеуді шешу бөлшектің кинетикалық энергиясы Tₖ мәндерін xₖ = kΔ координаталары бойынша табуға келіп тіреледі, мұндағы *k = 0, 1, ..., kf,* сонда xₖf = dt, мұнда dt – жұтқыш қабаттың қалыңдығы. Төртінші ретті Рунге–Кутта формулаларын қолдана отырып, келесі өрнектерді аламыз:

(9)

Бөлшек жұтқыш қабаттан өткеннен кейінгі орташа кинетикалық энергиясы .мәніне тең.

*«CALIBR» бағдарламасы*

«LOSSES\_A» бағдарламасының нәтижесінде біз канал нөмірі мен бөлшектің кинетикалық энергиясы арасындағы байланысты шектеулі арна саны үшін аламыз. Калибровканың мақсаты – толық сызықтық спектрдің әрбір арнасына сәйкес келетін кинетикалық энергия мәнін анықтау.

«CALIBR» бағдарламасы эталондық калибровканы ең кіші квадраттар әдісімен иабуға арналған. Жартылай өткізгішті детекторлар үшін эталондық калибровка сызықтық функциямен жуықталса, сцинтилляциялық детекторлар үшін – квадраттық немесе кубтық параболамен аппроксимацияланады. Есептеудің нәтижесінде әрбір 256 арнаға сәйкес келетін кинетикалық энергия мәндерін қамтитын (арна – энергия) форматындағы аталған файл жасалады.

*«LOSSES\_B» бағдарламасы*

Бұл бағдарлама бөлшектің энергетикалық калибровкасын эталондық калибровка негізінде есептеуге арналған. Ол үшін алдымен E-детекторда жұтылған энергияға ΔE-детекторда және Нысанада жоғалған энергиялар қосылады. Нәтижесінде, бөлшек жұтқыш қабаттан өткеннен кейінгі белгілі кинетикалық энергиясы арқылы, оның осы қабатқа дейінгі энергиясын анықтау міндеті қойылады. Бұл есеп физикалық мәні жағынан «LOSSES\_A» бағдарламасында шешілетін алға қойылған есептің кері түрі болып табылады. Егер «LOSSES\_A» бағдарламасында (8) теңдеуі шешілетін болса, онда «LOSSES\_B» бағдарламасында соған кері бағыттағы дифференциалдық теңдеу қарастырылады.

Анық байқауға болады, бұл есеп - «LOSSES\_A» бағдарламасында шешілетін тапсырманың кері нұсқасы. Нақтырақ айтқанда, егер «LOSSES\_A» бағдарламасы дифференциалдық теңдеуді (8) шешуге негізделсе, онда «LOSSES\_B» бағдарламасында сол үдерістің кері есебі шешіледі.

(10)

Осылайша, «LOSSES\_B» бағдарламасында жұтқыш қабаттың қалыңдығы Δt (мг/см²) және есептеу қадамы d (мг/см²) берілген жағдайда, бөлшектің кинетикалық энергиясы kf нүкте бойынша есептеледі. Бұл нүктелер жұтқыштың бойымен келесі координаталарда орналасқан:

(11)

мұнда . Осы жағдайда (10) теңдеуі үшін Рунге–Кутта әдісінің формулалары [84] келесі түрде жазылады:

 (12)

– бөлшек жұтқыш қабатқа түскенге дейін иеленген кинетикалық энергияның мәні.

*«SUMM» бағдарламасы – спектрлерді орташа мәнге келтіру*

Спектрлерді орташа мәнге келтіру мәселесі немесе математикалық тұрғыдан айтқанда, оларды берілген энергетикалық шкалаға қайта есептеу келесі жағдайларда туындайды:

1. Әртүрлі нысана материалдарында ионизациялық энергия жоғалтудың әртүрлі болуына байланысты, бірдей Х арнасына Е- кодтағышта сәйкес келетін бөлшек энергиясы әртүрлі мәнге ие болады. Осы себепті әртүрлі энергетикалық калибровкаларға сәйкес келетін екі түрлі нысанадан алынған сызықтық спектрлерді ортақ калибровка шкаласына келтіріп, олардың орташа мәнін есептеу қажет. Фонды шегеру процедурасы дұрыс орындалуы үшін нақты нысана материалынан алынған спектр мен калибрлік спектр бір энергетикалық калибровкаға сәйкес келуі тиіс.

2. Үздіксіз екі еселі дифференциалдық спектрлер зерттелетін жағдайда, кездейсоқ сипаттағы флуктуацияларды азайту үшін бастапқыда осы спектрлерді энергетикалық ось бойынша орташа мәнге келтіру қажет болады.

Бірінші жағдайда бастапқы спектр тең аралықты емес энергетикалық калибровкамен байланысты болады, сондықтан ол сондай тең емес шкала бойынша жаңа шкалаға ауыстырылады. Ал орташа мәнге келтіру үдерісі – спектрді үлкен қадаммен тең аралықты энергетикалық шкалаға көшірумен тең.

Бағдарламада келесі алгоритм жүзеге асырылады:

Айталық, бастапқы калибровкаға сәйкес энергетикалық шкала, мұнда

1-ші арнадағы энергия; 2-ші арнадағы энергия; бірінші арнадағы есеп саны; екінші арнадағы есеп саны; *Ei-1, Ei, Ei+1* - спектр қайта есептелетін жаңа энергетикалық шкала. 1-ші арнадағы «терезенің» ені: , 2-ші арнадағысы: .

1-арнада 1 МэВ энергияға сәйкес келетін есептер тығыздығы: ал 2-ші арна үшін: . Жаңа арнасына келетін есеп саны былай анықталады: , мұндағы терезесінің энергетикалық интервалымен қиылысу ұзындығы (МэВ), терезесінің интервалы бойынша қиылысы. Яғни: , *.*

Бұл есептеу энергия бойынша есептердің терезе ішінде біркелкі таралуы деп ұйғара отырып орындалады.

*“HWR” бағдарламасы ‒ реакция қималарын есептеу жүйесі*

«HWR» бағдарламасының жұмыс үдерісі блок-схема түрінде ұйымдастырылған. Бағдарлама үш негізгі модульден тұрады: HWR010, HWR011, HWR012 және орталық басқару модулі HWR. Бұл ішкі бағдарламалар жадына бірінен кейін бірі жүктелетін етіп құрылып, деректермен үнемі диалогтық режимде жұмыс істеуге мүмкіндік береді.

HWR010 ішкі бағдарламасы бастапқы деректерді және оларға қатысты қателерді енгізуге арналған. Ол келесі модельдерден тұрады:

TARGET – нысана материалының қалыңдығы (мг/см2), анықтау қатесі (%), атомдық нөмірі, массалық саны (а.б.б.), массалық ақауы (МэВ) және иондар ағынына қатысты бұрылу бұрышы енгізіліп, «TARGET.GNL» файлына жазылады.

PROJCT – ұшып келетін бөлшектің сипаттамаларын енгізеді: атомдық нөмірі, массалық сан, массалық ақау, энергия және оның салыстырмалы қатесі. Деректер «PROJCT.GNL» файлына жазылады.

CHARGE – ток интеграторының параметрлерін енгізеді: бір микрокулонға келетін санау саны, экспозиция уақыты үшін санау саны және заряд анықтаудағы салыстырмалы қате. Мәліметтер «CHARGE.GNL» файлына сақталады.

EMISSN – ұшып шығатын бөлшектің сипаттамалары: атомдық нөмір, массалық сан, массалық ақау, зертханалық бұрыш және оның абсолюттік қатесі, спектр. Файл: «EMISSN.GNL».

DETECT – детектор телескопына қатысты параметрлер: кеңістік бұрышы (ср), оның салыстырмалы қатесі (%), энергетикалық калибровка және оның абсолюттік қатесі (МэВ). Файл: «DETECT.GNL».

REST – қалдық ядроның сипаттамалары: атомдық нөмір, массалық сан және массалық ақау. Деректер «REST.GNL» файлына жазылады. Барлық модульдер үш режимде жұмыс істей алады:

«Толық енгізу» – барлық деректер нөлден енгізіледі.

«Түзету» – бұрын енгізілген деректерді өңдеу.

«Терминалға шығару» – бастапқы деректерді экранға шығару.

HWR011 төрт ішкі модульден тұрады:

HWR001 – зертханалық жүйедегі d²σ/dεₗdΩₗ қимылдарын және олардың абсолюттік қатесін Δd²σ/dεₗdΩₗ есептейді. Деректер дискіге жазылады.

HWR002 – орталық масса жүйесіне d²σ/dεdΩ түрлендіріп, қателермен бірге сақтайды.

HWR003 – массалар орталығы жүйесінде энергия бойынша біркелкі шкалаға ауыстырады және бұрыштық таралуларды d²σ/dε\_eqdΩ\_eq есептейді.

HWR004 – толық қиманы σ, интегралдық спектр мен оның қатесін ∆σ есептейді және файлға жазады.

HWR012 – есептелген нәтижелері кесте түрінде шығару үшін арналған, төрт модульге бөлінген:

ASZ001 – зертханалық жүйдегі қималарды шығарады;

ASZ002 – массалар орталығы жүйесіндегі қималарды кестелейді.

ASZ003 – бұрыштық таратуларды шығарады;

ASZ004 – интегралдық спектр мен толық қиманы шығарады.

*«HWR» бағдарламасының математикалық алгоритмі*

Зертханалық координаттар жүйесінде екі еселі дифференциалдық қималар келесі қатынас негізінде есептелінді:

 (13)

мұнда *At* – нысана ядросының массасы (атомдық масса бірліктерімен);

*zxe* – соққы беруші бөлшектің заряды (микрокулонмен);

*I* – n нөмірлі арнадағы есептелген импульс саны; *φt* – нысана жақтауы мен бөлшектер шоғыры арасындағы бұрыш;

ρt – нысананың қалыңдығы (мг/см²);

p – нысананың байытылу дәрежесі (салыстырмалы бірліктерде);

*N₀* = 6,02217×10²⁰ (мг·моль)⁻¹ – бір миллиграмм-моль заттағы атомдар саны;

e = 1,602192×10⁻¹³ мкКл – элементар зарядтың мәні;

*ΔΩл* – детекторлар телескопының коллиматоры арқылы стягылатын кеңістік бұрышы (стеррадианмен);

*ΔEл* – n арнаға сәйкес энергиялық интервал (МэВ);

*ΔQ* – экспозиция уақыты ішінде ток интеграторы арқылы өткен заряд (мкКл).

(13) өрнегін келесі түрде жазуға болады:

(14)

онда зертханалық қиманы анықтаудағы абсолюттік қателікті сипаттайтын Δқатынасын келесі түрде жазуға болады:

(15)

мұнда Δ*Iₙ* – n арнадағы есептелген импульстер санының абсолюттік қателігі, ол келесі мәнге тең деп қабылданады;

; – кеңістік бұрышының (телесный угол) анықталуындағы абсолюттік қателік.

(16)

мұнда ∅ және Δ∅ – коллиматор саңылауының диаметрі және оның анықталуындағы қателік;

L және ΔL – нысана ортасынан коллиматордың алдыңғы жиегіне дейінгі қашықтық және осы шаманың анықталуындағы қателік;

Δ(ΔQ) – ток интеграторы арқылы өлшенген зарядтың қателігі, ол келесі мәнге тең деп қабылданды:

(17)

мұнда C және ΔC – интегратордың тұрақтысы (мкКл·н/импульс) және оны анықтаудағы қателік;

N – экспозиция уақыты ішінде интегратор есептеген импульстер саны.

Екінші ретті дифференциалдық қималарды зертханалық жүйеден массалар орталығы жүйесіне қайта есептеу келесі формула бойынша жүзеге асырылды [85, 86]:

(18)

мұнда *pл* және p – тіркелетін бөлшектің импульсі, тиісінше зертханалық жүйеде және массалар орталығы жүйесінде. (18) өрнегін қатынасының абсолюттік қателігін анықтау үшін келесі түрде түрлендіріп жазған тиімді:

(19)

мұнда – үш айнымалыдан: шоқтың энергиясы *Eₐ*, бөлшекті зертханалық жүйеде тіркеу бұрышы *θл* және бөлшектің зертханалық жүйедегі энергиясы *εл* тәуелді функция; *A* – *Eₐ*, *θл* және *εл* параметрлерін қамтымайтын параметрлер жиынтығы.

Массалар орталық жүйесіне (с.ц.м.) ауысу Лоренц түрлендіруі арқылы жүзеге асырылды, бұл *f₁* функциясын анықтайды. Осыған сәйкес, с.ц.м.-дегі екінші ретті дифференциалдық қиманың абсолюттік қателігін келесі түрде анықтауға болады:

(20)

мұнда *ΔEₐ* – шоқ энергиясын анықтаудағы абсолюттік қателік (МэВ);

*Δεл*– ұшып шыққан бөлшек энергиясын анықтаудағы абсолюттік қателік (МэВ);

*Δθл* – бөлшекті тіркеу бұрышын анықтаудағы абсолюттік қателік (градуспен);

– зертханалық жүйеде екі еселі дифференциалдық қиманы анықтаудағы абсолюттік қателік.

Азимуталық симметрияға байланысты кеңістік бұрыш *Ω* бойынша интегралдау келесі түрде жазылады:

(21)

шамасы массалар центрі жүйесіндегі екінші ретті дифференциалдық қиманы білдіреді және энергияның *j = I ÷ M* мәніне, сондай-ақ бұрыштың *i = I ÷ N* мәніне сәйкес келеді. Мұнда: *M* – бірқалыпты тордағы энергия түйіндерінің саны, *N* – *Yᵢ* шамасының мәндері алынған бұрыштар саны.

Онда (21) өрнегін трапециялар әдісімен интегралдау келесі түрде жазылады:

(22)

мұнда *θ0=0, θN+1=π*.

Келесі шаманы енгізейік:

(23)

мұнда

Интегралдық спектрдің қателігі келесі тәсілмен есептеледі:

(24)

мұнда деп белгілейік. Онда толық қима келесі түрде анықталады:

(25)

Энергия бойынша интегралдау трапециялар әдісімен жүргізілді. Толық қиманы анықтаудағы қателік Δσ келесі түрде өрнектеледі:

(26)

мұнда:

(27)

## 2.6 Өлшеу қателіктері

Қималардың жүйелік қателіктері негізінен келесі факторлармен анықталады: нысана материалының қалыңдығын анықтаудағы қате (), ток интеграторын калибрлеу дәлдігі (1%) және спектрометрдің кеңістік бұрышын анықтаудағы қате (1,3%). Үдетілген бөлшектер ағының энергиясы 1,2% дәлдікпен өлшенді. Мониторинг көрсеткіші мен ток интеграторы арасындағы қатынас 1% шегінде тұрақты болып сақталды. «Физикалық нөл» ±0,50 дәлдікпен орнатылды, ал тіркеу бұрышы да ±0,50 дәлдікпен бекітілді. Жалпы жүйелік қателік 10%-дан аспады.

Статистикалық қателік, яғни тіркелетін бөлшектердің түрі мен энергиясына байланысты өзгеретін өлшем, протондар үшін 1-4%, ал α-бөлшектер үшін 1–8% аралығында болды. Қималардағы жалпы қателіктер «HWR» бағдарламасының аясында есептелді.

# 3 ЭКСПЕРИМЕНТТІК НӘТИЖЕЛЕР

Осы зерттеу жұмысы аясында 103Rh және 120Sn ядроларында жүретін (p,xp), p,xα) және (p,xd) реакциялары нәтижесінде түзілетін протондардың, α-бөлшектердің және дейтрондардың инклюзивті энергия спектрлері мен бұрыштық таралулары өлшенді. Өлшеулер келесі протон энергияларында жүргізілді:103Rh(p,xp) реакциясы үшін Ep=7, 22 және 30 МэВ; 103Rh(p,xα) реакциясы үшін Ep=22 және 30 МэВ; 103Rh(p,xd) реакциясы үшін Ep=22 МэВ; 120Sn(p,xd) реакциясы үшін Ep=30 МэВ.

Эксперимент жүргізу шарттарының негізгі параметрлері 2-кестеде келтірілген.

Төменде 103Rh(p,xp) және 103Rh(p,xα) реакциялары үшін Ep=7, 22 және 30 МэВ энергияларында өлшенген екінші ретті дифференциалдық қималар (10, 11, 12 -суреттер) көрсетілген. Сондай-ақ, 20 және 21-суреттерде 103Rh(p,xd) реакциясы (Ep=22 МэВ) және 120Sn(p,xd) реакциясы (Ep=30 МэВ) үшін алынған қима мәндері берілген.

Кесте 2 – Эксперименттік жағдайлардың негізгі сипаттамалары

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Телескоп  Δ*Е*-*Е* | Детектор  дың қалыңдығы  Δ*Е*, мкм | Детектор  дың қалыңды  ғы  *Е*, мкм | Кеңістік бұрышы, мкср | Тіркелетін  бөлшектер | К.О.Ж. жүйесінде  гі энергия лар диапа зоны, МэВ | Тіркеу бұрыштары, Δ*θ*=150 |
| Si-Si | 50 | 2000 | 53,4 ± 0,3 | α-бөлшектер | 9 ÷ 23 | 300÷1350 |
| Si-Csl(TI) | 100 | 25000 | 4,62 ± 0,3 | Протондар  дейтрондар | 4 ÷ 27 | 300÷1200 |

## 3.1 Ер=7, 22 және 30 МэВ энергияларындағы 103Rh(p, xp) реакциясының қималары

Төменде 103Rh(p,xp) реакциясы үшін Ep=7, 22 және 30 МэВ энергияларында өлшенген екінші ретті дифференциалдық қималар (10, 11, 12 -суреттер) көрсетілген.



а ә

Сурет 10 – 103Rh(p,xp) реакциясының Ep=7 МэВ кезінде алынған эксперименттік екінші ретті дифференциалдық қималары, парақ 1



б в



г ғ



д е

Сурет 10, парақ 2



а ә

Сурет 11 – 103Rh(p,xp) реакциясының Ep=22 МэВ кезінде алынған эксперименттік екінші ретті дифференциалдық қималары, парақ 1



б в



г ғ



д е

Сурет 11, парақ 2



Сурет 12 – 103Rh(p,xp) реакциясының Ep=30 МэВ энергиясындағы эксперименттік екінші ретті дифференциалдық қималары

Осы алынған екінші ретті дифференциалды қималарды бұрыш бойынша интегралдау арқылы зерттелген реакциялардың интегралдық энергетикалық спектрлері алынды, олар 13, 14, 15-суреттерде көрсетілген.



Сурет 13 – 103Rh(p,xp) реакциясының Ep=7 МэВ кезінде алынған эксперименттік интегралдық спектр



Сурет 14 – 103Rh(p,xp) реакциясының Ep=22 МэВ кезінде алынған эксперименттік интегралдық спектр



Сурет 15 – 103Rh(p,xp) реакциясының Ep=30 МэВ кезінде алынған эксперименттік интегралдық спектрі

103Rh(p,xp) реакциясының эксперименттік парциалдық қималарының сандық мәндері 3-кестеде берілген.

Кесте 3 – 103Rh(p,xp) реакциясының эксперименттік парциалдық қималарының сандық мәндері

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Реакция | Парциалдық қима, мб | Интегралдау аралығы, МэВ |
| 103Rh(p,xp) | 13,2 | 7 |
| 20,1 | 22 |
| 24,96 | 4,2-29 |

## 3.2 Ер = 22 және 30 МэВ энергияларындағы 103Rh(p, xα) реакциясының қималары

Төменде 16, 17-суреттерде 103Rh(p, xα) реакциясы үшін Ep =22, 30 МэВ энергиясындағы протондармен жүргізілген экспериментте алынған екінші ретті дифференциалдық қималарды өлшеу нәтижелері келтірілген.



а ә



б в

Сурет 16 – 103Rh(p,xα) реакциясының Ep=22 МэВ энергиясындағы эксперименттік екінші ретті дифференциалдық қималары, парақ 1



г ғ



д

Сурет 16, парақ 2

а ә

Сурет 17 – 103Rh(p,xα) реакциясының Ep=30 МэВ энергиясындағы эксперименттік екінші ретті дифференциалдық қималары, парақ 1

б в

г ғ



д

Сурет 17, парақ 2

Бұрыш бойынша екінші ретті дифференциалданған қималарды интегралдау нәтижесінде осы реакциялардың интегралдық қималары алынды, олар 18,19-суреттерде көрсетілген.



Сурет 18 – 103Rh(p,xα) реакциясының Ep=30 МэВ энергиясындағы эксперименттік интегралдық спектрі



Сурет 19 – 103Rh(p,xα) реакциясының Ep=30 МэВ энергиясындағы эксперименттік интегралдық спектрі

103Rh(p,хα) реакциясының эксперименттік парциалдық қималарының сандық мәндері 4-кестеде берілген.

Кесте 4 – 103Rh(p,хα) реакциясының эксперименттік парциалдық қималарының сандық мәндері

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Реакция | Парциалдық қима, мб | Интегралдау аралығы МэВ |
| 103Rh(p,xα) | 24,96 | 4,2-29 |
| 20,1 | 22 |

## 3.3 Ер = 22 және 30 МэВ энергияларындағы 103Rh(p, xd) және 120Sn(p, xd) реакцияларының қималары

Төмендегі 20-суретте 103Rh(p, xd) реакциясы үшін Ep = 22 МэВ энергиясындағы протондармен жүргізілген экспериментте алынған екінші ретті дифференциалдық қималардың өлшеу нәтижелері келтірілген.



а ә



б в

г ғ

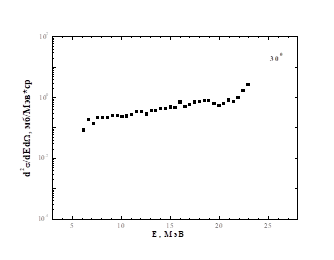
Сурет 20 – 103Rh(p,xd) реакциясының Ep=22 МэВ энергиясындағы эксперименттік екінші ретті дифференциалдық қималары, парақ 1



д

Сурет 20, парақ 2

Төменде 120Sn(p,xd) реакциясы үшін Ep=30 МэВ энергиясындағы протондармен жүргізілген экспериментте алынған екінші ретті дифференциалдық қималарды өлшеу нәтижелері келтірілген (21-сурет).



а ә



б в

Сурет 21 – Ep = 30 МэВ болғандағы 120Sn(p, xd) реакциясының екінші ретті дифференциалдық қимасы, парақ 1



г ғ



д

Сурет 21, парақ 2

Одан әрі екінші ретті дифференциалдық қималар бұрыш бойынша интергралданды. Олар 22, 23-суреттерде көрсетілген.



Сурет 22 – 103Rh(p,xd) реакциясының Ep=22 МэВ энергиясындағы эксперименттік интегралдық спектрі



Сурет 23 – 120Sn(p,xd) реакциясының Ep=30 МэВ энергиясындағы эксперименттік интегралдық спектрі

103Rh(p,xd) және 120Sn(p,xd) реакцияларының эксперименттік парциалдық қималарының сандық мәндері 5-кестеде берілген.

Кесте 5 – 103Rh(p,xd) және 120Sn(p,xd) реакцияларының реакциясының эксперименттік парциалдық қималарының сандық мәндері

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Реакция | Парциалдық қима, мб | Интегралдау аралығы, МэВ |
| 120Sn(p,xd) | 24,96 | 4,2-29 |
| 103Rh(p,xd) | 15.7 | 22 |

**4 ТЕПЕ-ТЕҢДІК АЛДЫНДАҒЫ ЯДРОЛЫҚ РЕАКЦИЯЛАРДЫ СИПАТТАУДЫҢ ТЕОРИЯЛЫҚ ӘДІСТЕРІ**

Ядролық физикадағы ғылыми жетістіктер көбіне ядролық реакциялардың терең зерттелуіне байланысты, себебі бұл бағыт саладағы маңызды әрі басым бағыттардың бірі ретінде қарастырылады.

Ядролық реакция механизмдері туралы көзқарас бөлшектердің энергетикалық спектрлері мен бұрыштық таралуларын талдау негізінде қалыптасады. Мұндай деректерді интерпретациялаудың ең ақпараттық тәсілдерінің бірі – реакцияларды әсерлесу сипатына қарай құрама (compound), тепе – теңдік алдындағы (pre-equilibrium) және тікелей (direct) механизмдерге жіктеу. Бұл механизмдердің әрқайсысы соқтығушы бөлшектің ядро -нысана мен өзара әректтесуінің белгілі бір сатысын сипаттайды және реакция уақыты, динамикасы мен нәтижелік арналарының сипаты бойынша өзара ерекшеленеді.

Қазіргі ғылыми көзқарасқа сәйкес, ядролық реакциялардың тетіктерін тек тікелей және құрама процестерге бөлу олардың табиғи күрделілігін толық қамтымайды және шынайы физикалық құбылыстарды сипаттауда жеткіліксіз қарапайымдылыққа әкелуі мүмкін.

Изображение выглядит как текст, диаграмма, линия, График

Содержимое, созданное искусственным интеллектом, может быть неверным.

Сурет 24 – Ұшып шығатын бөлшектердің спектрінің сызбалық көрінісі

Ескертулер:

1. Энергия аймақтары көрсетілген: тікелей (D), тепе-теңдік алдындағы (P) және қосарланған (C) механизмдердің үлестері.

2. Өтпелі энергия аймағында пунктирлі сызық қосарланған механизмнің үлесін басқаларынан ерекшелейді

24-суретте келтірілген талдау нәтижелеріне сәйкес, тек қана қосарланған ядро түзілу механизміне негізделген есептеулер, үздіксіз энергия спектрлеріне арналған эксперименттік деректермен салыстырғанда қималардың мәнін айтарлықтай төмен көрсетеді. Бұл ретте тікелей процестер, негізінен, тек ұшып шығатын бөлшектердің жоғары энергиялары кезінде ғана дискреттік энергетикалық деңгейлердің қозуына алып келеді. Бұдан бөлек, тікелей және қосарланған механизмдер аралығындағы өтпелі аймақта өлшенген бұрыштық таралулардың айқын анизотропияға ие болуы бастапқы күй туралы ақпаратты сақтайтын, яғни тікелей типтегі реакцияларға тән сипаттамалармен өтетін аралық механизмнің бар екенін көрсетеді.

Тікелей және құрама механизмдердің шекті жағдайлары арасында олардың белгілерін біріктіретін аралық типтегі механизм бар деп есептеледі. Мұндай аралық процесс тепе – теңдік алдындағы, алдын – ала құрама немесе кванттық-механикалық сипаттама шеңберінде көпсатылы механизм ретінде белгілі. Тепе-теңдік алдындағы эмиссия жүйенің бастапқы әсерлесу актісінен кейін, бірақ оның толық статистикалық тепе-теңдік күйіне жеткенге дейінгі аралық кезеңде жүзеге асады. Бұл үдерісте соққы беруші бөлшек біртіндеп күрделене түсетін қозған күйлерді тудырып, ядро жүйесінің бастапқы энергиясы мен бағытымен болған корреляциясын біртіндеп жоғалтады.

Протондармен қоздырылатын жеңіл және құрамды ядролардың эмиссиясы үздіксіз энергия спектрінде жүзеге асатын процестердің бірі болып табылады және соңғы онжылдықтарда теориялық модельдеудің маңызды объектісі ретінде кеңінен зерттеліп келеді. Мұндай реакциялар ядроішілік нуклон-нуклон әсерлесулерге негізделген көпсатылы статистикалық модель шеңберінде қарастырылады, олар екінші ретті дифференциалдық қималармен және ұшып шыққан бөлшектер спектрінің энергияға тәуелді айқын сипаттамаларымен ерекшеленеді.

Теориялық модельдерде ядролық реакцияның соңғы кезеңі не тікелей жұтылу, не қозған ядродан бөлшектердің соғылып шығуы нәтижесінде жүзеге асады деп қарастырылады. Тепе-теңдік алдындағы ыдыраудың қорытынды сатысында маңызды рөл атқаратын осы бәсекелес механизмдерді талдау қазіргі ядролық теорияның өзекті бағыттарының бірі болып табылады. Әсіресе бөлшектердің жұтылу және соғылу механизмдері арасындағы өзара байланыс пен олардың соққы беруші бөлшектің энергиясына тәуелділігі ғылыми қызығушылық тудырады [87].

Тепе-теңдік алдындағы механизм тікелей және қосарланған әрекеттесулер арасындағы аралық аумақты қамтитын болғандықтан, оны дәл сипаттау үшін теориялық тұрғыдан біріктірілген (гибридті) тәсілдерді қолдану қажет. Қазіргі заманғы модельдер, соның ішінде TALYS және PRECO есептік бағдарламаларында жүзеге асырылған үлгілер, ядролық реакцияның әртүрлі сатыларында көпсатылы процестер мен статистикалық флуктуациялардың үлесін ескеруге мүмкіндік береді. Бұл тәсілдер 10–200 МэВ аралығындағы энергиялар диапазонында алынған эксперименттік деректермен жақсы сәйкестік қамтамасыз етеді.

**4.1 Ядролық ыдыраудың тепе-теңдік алдындағы экситондық моделі**

*Модель Гриффина*

Гриффиннің экситондық моделі [88] – қозған ядроның тепе-теңдік күйге өту процесін сипаттайтын және жеңіл зарядталған бөлшектердің энергетикалық спектрін есептеуге арналған статистикалық теориялық тәсіл болып табылады. Бұл модель өзінің даму тарихында жоғары тиімділігін дәлелдеді. Сонымен қатар, экситондық тәсілге қосымша физикалық факторларды енгізу оңай жүзеге асырылатындығы көрсетілді. Қазіргі таңда модельде нуклондардың жұптық корреляциясы, ядролық қабық құрылымы және изотоптық спин сияқты әсерлерді ескеруге мүмкіндік бар.

Аталған модель аясында ядро энергиялары бірдей арақашықтықта орналасқан бірбөлшектік күйлер жиынтығына ие деп қарастырылады, ал ядроның жалпы күйі p бөлшек пен h бос орын (тесік) саны арқылы сипатталады. Ядроның бір күйден екінші күйге ауысуына себеп болатын әсерлесу – екібөлшектік және әлсіз сипатта болады, бұл кванттық бұзылыстар теориясын қолдануға мүмкіндік береді. Жүйенің толық энергиясы өзгеріссіз сақталады. Екікомпонентті модельде протондар мен нейтрондар бөлек дәрежелер ретінде қарастырылып, жеке есепке алынады [89].

*Жартылай тесік күйлерінің тығыздығы*

Ядролық реакцияларды тепе-теңдік алдындағы экситондық модель тұрғысынан интерпретациялау, ядроның қозған күйлерінің тығыздықтарын есептеуді талап етеді. Бұл тығыздықтар кейінірек ядроішілік ауысулардың ықтималдықтарын есептеуде қолданылады. Сонымен қатар, қалдық ядро күйлерінің тығыздықтары тікелей трансферттік реакцияларды сипаттауға арналған феноменологиялық модельдерде де кеңінен пайдаланылады.

Ядро күйі төрт параметрмен сипатталады: pπ, hπ, pν және hν, мұндағы p және h ‒ сәйкесінше бөлшектік және діректік күйлердің саны, ал π және ν ‒ протондық және нейтрондық еркіндік дәрежелерін білдіреді. Бұл төрт параметр біркомпонентті модельдің келесі қатынастары арқылы байланысады: p = pπ + pν, h = hπ + hν.Оларды біріктіріп, толық экситондар санын анықтауға болады:n = p + h = pπ + hπ + pν + hν = nπ + nν.

Бөлшектер мен тесіктер Ферми деңгейіне қатысты орналасуына қарай анықталады. Ферми деңгейі ядро негізгі күйде болғанда соңғы толтырылған және алғашқы бос күй арасындағы арақашықтықтың жартысы ретінде қабылданады. Протондар саны протондық тесіктер санына, ал нейтрондар саны нейтрондық тесіктер санына тең болуы тиіс. Бөлшектердің сіңірілуі немесе шығарылуы кезінде Ферми деңгейі ығысады. Осы өзгерістер нәтижесінде Ферми деңгейіне жақын аймақта пайда болатын бөлшектер мен тесіктер «пассивті» деп аталады, себебі оларда энергия болмайды және олар өзара әрекеттесулерге қатыспайды. Алайда Паули тыйым салу принципін сақтау үшін бұл күйлерді де есепке алу қажет.

Құрама ядро (компаунд ядро) жартылай бөлшек-тесік конфигурациясында түзіледі, мұнда ұшып келетін нуклондар бөлшектік еркіндік дәрежелері ретінде есепке алынады, ал тесіктік еркіндік дәрежелері ескерілмейді. Мұндай конфигурация (pπ, hπ, pν, hν) = (Zₐ, 0, Nₐ, 0) түрінде белгіленеді, мұндағы a – бомбалаушы бөлшекке қатысты.

Құрама ядро ядро үшін тепе-теңдік күйіне өтудегі бөлшектер мен тесіктер санының айырмасы тұрақты болып қалады деп есептеледі. Бұл шарт келесі түрде өрнектеледі: pπ − hπ = Zₐ, pν − hν = Nₐ және p − h = Aₐ, мұндағы Aₐ ‒ соққы беруші бөлшектің массалық саны. Аталған теңсіздіктер тепе-теңдік күйіне жақындаған сайын әрдайым дәл сақталмауы мүмкін, бірақ оларды тепе-теңдік алдындағы процестерді есептеуде қолдану жеткілікті дәл нәтиже береді.

Екі компонентті экситондық модельде бір бөлшекті күйлердің екі жиыны қарастырылады ‒ протондар мен нейтрондар үшін бөлек. Бұл күйлердің тығыздықтары gπ⁰ және gν⁰ шамаларымен сипатталады. Әдетте олар қарастырылып отырған ядроның протондар (Z) және нейтрондар (N) санына пропорционал деп есептеледі:

 (28)

 (29)

мұнда нормалау коэффициенті *Kg* = 15 МэВ деп алынады. Бұл мән бұрын қолданылған 13 МэВ-қа қарағанда эксперименттік деректерді анағұрлым дәл сипаттайды.

Екі компонентті экситондық модельде бөлшек-тесік конфигурацияларының күй тығыздығы Уильямс [90] бойынша келесі түрде өрнектеледі:

 (30)

мұнда *A(p, pπ, E)* – Паули принципіне негізделген түзету коэффициенті.

 (31)

мұнда *Eth* – берілген конфигурацияға сәйкес табалдырық энергиясы. Эквидистантты жуықтау (ЕСМ) шеңберінде бұл шама келесі түрде анықталады:

 (32)

мұнда *qπ=max(pπ,hπ)*және нейтрондар үшін ұқсас түрде *qν*. (31) теңдеуіндегі соңғы төрт қосылғыш табалдырық энергиясына жақын аймақтағы күй тығыздығы бойынша эксперименттік деректермен жақсы сәйкестік алу үшін эмпирикалық жолмен анықталған [91]. m шамасы белсенді экситондық кластардың санын білдіреді. Экситондардың төрт мүмкін классы бар: протондық бөлшектер, протондық тесіктер, нейтрондық бөлшектер және нейтрондық тесіктер. Белсенді кластар деп құрамында кемінде бір экситоны бар кластарды атайды. (31) теңдеуінің бөліміндегі функция келесі түрде өрнектеледі:

 (33)

және *Gν.* үшін де ұқсас түрде анықталады. Мұндағы *Θ* – аргументтің оң мәндерінде 1-ге, ал теріс мәндерінде 0-ге тең болатын Хевисайд функциясы.

(30) күй тығыздығы теңдеуі шексіз терең потенциалдық шұңқыр моделі аясында алынған. Алайда потенциал шұңқырының шектеулі тереңдігін ескеру мақсатында бұл өрнек *ffwd(n,h,V)*. түзету коэффициентімен көбейтілуі тиіс. Мұндағы шұңқыр тереңдігі Ферми деңгейіне қатысты өлшенеді. Егер барлық өзара әрекеттесулер ядро ішінде жүзеге асатын болса, онда *ffwd(n,h,V)*. келесі түрде өрнектеледі:

 (34)

Потенциалдық шұңқырдың тереңдігі *V=V₀=38 МэВ* мәнінде қабылданады. Алайда ұшып келетін бөлшек пен нысана арасындағы бастапқы әсерлесу, әдетте, ядро беті аймағында жүзеге асады. Мұндай жағдайда потенциал тереңдігінің локалды мәні негізгі *V₀* шамасынан төмен болады. Бұл әсерді ескеру мақсатында, егер соққы беруші бөлшек протон болса, онда *V₁ = 17 МэВ* деп алынады.

Ядроішілік ауысулардың ықтималдықтары

Есептелген бөлшек-тесік күй тығыздықтары ядроны бір бөлшек-тесік конфигурациясынан екіншісіне көшіру ықтималдықтарын есептеу үшін қолданылады. Соңғы конфигурация ядроның тепе-теңдік күйіне өту процесін сипаттау үшін пайдаланылады, ал бастапқы конфигурация ұшып шығатын бөлшектердің энергия спектрін есептеу мақсатында қолданылады.

Жүйені бір бөлшек-тесік конфигурация класынан екінші класқа ауыстыратын өзара әрекеттесулер екі бөлшекті сипатта болады және бұл үдерісте энергия сақталады деп есептеледі. Мүмкін болатын өтулердің түрлері келесідей:

‒ жаңа бөлшек-тесік жұбын түзу;

‒ бөлшек-тесік жұбының аннигиляциясы;

‒ протондық жұпты нейтрондық жұпқа айналдыру;

‒ нейтрондық жұпты протондық жұпқа айналдыру.

Қалдық екі бөлшекті өзара әрекеттесулердің әсері шамалы деп есептелетіндіктен, бірлік уақытқа қатысты көшу ықтималдығын (λ) есептеу үшін уақытқа тәуелді бұзылыстар теориясының бірінші ретін қолдануға болады [92, 93]:

 (35)

мұнда |М|² – ядроішілік ауысулардың, яғни n экситон саны әртүрлі күйлер арасындағы өтулердің қарқындылығын сипаттайтын орташа квадраттық матрицалық элемент, ал ρ – осы ауысу барысында қолжетімді болатын соңғы күйлердің тығыздығы.

Практикалық тұрғыдан алғанда, жаңа бөлшек-тесік жұбын түзу механизмі тепе-теңдік алдындағы процестердің басым бөлігін қамтамасыз етеді. Конверсиялық механизм әлдеқайда әлсіз болып табылады және оны тек жуықтап есепке алуға болады. Ал бөлшек-тесік жұбының аннигиляциясын елемеуге болады. Осыған байланысты модель аясында тек келесі төрт көшу ықтималдықтары есептелінеді:

 ‒ протондық бөлшек-тесік жұбын түзу;

 ‒ нейтрондық бөлшек-тесік жұбын түзу;

 ‒ протондық жұпты нейтрондық жұпқа түрлендіру;

 ‒ нейтрондық жұпты протондық жұпқа түрлендіру.

Орташа квадраттық матрицалық элементтер

Екі компонентті экситондық модель нұсқасында орташа квадраттық матрицалық элементтер өзара әрекеттесетін бөлшектердің түріне тәуелді болады. Осыған байланысты үш түрлі шаманы қарастыру қажет: |Мππ|2, |Мνν|2 и |Мπν|2=|Мνπ|2, мұндағы π және ν — сәйкесінше протондық және нейтрондық еркіндік дәрежелері. Әрбір матрицалық элементтің функционалдық түрі бірдей деп алынып, айырмашылық тек нормалау коэффициенттерінде Kij болады [94]:

 (36)

мұнда *Aa* – ұшып келетін бөлшектің массасы. Бұл параметрлеу әдісі бомбалаушы бөлшектердің энергиясы 90 МэВ-тан төмен болған жағдайда жақсы нәтиже береді.

*Kij* коэффициенттері мен бір бөлшекті күй тығыздықтарының *Kg* нормалау констанциясы арасындағы күшті тәуелділікті азайту мақсатында A⁻³ тәуелділігінің орнына *g0-3=(A/Kg)-3* түріндегі тәуелділікке көшу ұсынылады:

 (37)

мұнда *Kij* мәні енді бұрынғысынан өзгеше. Оның жаңа өлшемі ‒ *Kij* МэВ2, бұл бұрынғы МэВ⁵ өлшемімен салыстырғанда физикалық тұрғыдан негіздірек болып табылады.

*Өтулер ықтималдығы*

Протон-бөлшек–тесік жұбын түзу ықтималдығын есептеу үшін қолданылатын өрнек келесі түрде беріледі:

 (38)

сипатталады, мұнда π индексі ν индексіне ауыстырылады. Бұл жағдайда белгіленуі ‒ бастапқы әрекеттесу конфигурациясын сипаттайтын жиынының қысқартылған түрі ретінде қарастырылады. ‒ изоспин әсерін ескеруге енгізілетін функция. Протондық жұптың нейтрондық жұпқа түрлену ықтималдығы келесі өрнекпен өрнектеледі:

 (39)

мұнда белгісі — түріндегі күйлердің қысқартылған нұсқасы ретінде қабылданады, ал

 (40)

*Бөлшектердің ұшып шығу ықтималдығы*

Ядроның кез келген аралық күйінде ε энергиялы b типті бөлшектің шығарылуы (эмиссиясы) мүмкін. Бұл күйден бөлшектің ұшу жылдамдығы келесі өрнек бойынша есептелінеді [95]:

 (41)

мұнда және ‒ ұшып шыққан бөлшектің сәйкесінше протондар мен нейтрондар саны;

‒ оның спині, ал

‒ массасы;

шамасы ‒ b бөлшегінің қалдық ядро арқылы жұтылуы нәтижесінде қосылыған ядроның түзілуін сипаттайтын кері процестің қимасы;

U ‒ қозу энергиясы, ол мынадай қатынаспен анықталады: , мұндағы ‒ бөлшектің байланыс энергиясы.

Ферми деңгейінің ығысу әсерін, яғни бөлшектердің эмиссиясы кезінде қалдық ядроның күй тығыздығына кірмейтін деңгейлердің толтырылуын ескеру үшін, есептеуге қосымша конфигурацияларды енгізу қажет:

 (42)

мұнда

 (43)

Изоспиннің сақталуын есепке алғаннан кейін бөлшектердің эмиссия ықтималдығын есептеу формуласы келесі түрге келеді:

 (44)

мұнда ‒ қалдық ядроның изоспині, ал

‒ Клебш-Гордан коэффициенттері. Жинақтау барлық мүмкін болатын қалдық ядро изоспиндерінің мәндері бойынша жүргізіледі.

Жабық түрдегі кинетикалық теңдеулер

Қосылыған ядроның тепе-теңдік күйіне дейінгі эволюциясы күштік функциялар арқылы сипатталады: ‒ бұл функция қарапайым күйлерден басталатын жаңа жұптарды тікелей түзу арқылы күйдің толтырылу ықтималдығын береді, ал ‒ бөлшек-жұп түрлерінің бір-біріне түрленуін ескере отырып, толық процестің жүзеге асу ықтималдығын сипаттайды.

Кинетикалық теңдеулер келесі бастапқы өрнектерден басталады:

|  | басқа барлық жағдайларда | (45) |
| --- | --- | --- |

аталған өрнек бастапқы шарттарға толық сәйкес келеді:

|  | (46) |
| --- | --- |

Келесі мәндерге сәйкес ықтималдықтар рекурсиялық қатынастар арқылы анықталады:

|  | (47) |
| --- | --- |

және

|  | (48) |
| --- | --- |

Егер күйлердің толтырылу қарқындылығына пропорционал күштік функция енгізілсе, онда:

|  | (49) |
| --- | --- |

мұнда [96]

|  | (50) |
| --- | --- |

Олай болса, тепе-теңдік алдындағы құрамдас бөліктің дифференциалдық қимасы келесі түрде өрнектеледі:

|  | (51) |
| --- | --- |

мұнда ‒ тікелей реакция механизмдері арқылы жүретін процестердің қималарын шегеріп тастағандағы қосылған ядроның түзілу қимасы .

Бөлшектердің екінші реттік тепе-теңдік эмиссиясы

Құрама ядроның қозу энергиясы жоғары болған жағдайда, бастапқы нуклон ұшып шыққаннан кейін тепе – теңдік алдындағы фазада композиттік жүйеден екінші бөлшектің эмиссиясы толық инклюзивтік спектрге елеулі үлес қосуы мүмкін. Мұндай механизм, негізінен, нуклондардың ұшып шығуы кезінде қарастырылады, ал күрделі бөлшектер үшін мұндай реакциялардың қималары шамалы болып табылады.

Бастапқы ұшып шыққан бөлшектің түріне және энергиясына байланысты, бастапқы эмиссияны есептеу тәсіліне ұқсас жаңа кинетикалық теңдеулер жүйесі шешіледі. Ерекшелік ретінде, ең үлкен мүмкін мәні 12-ден 8-ге дейін азаяды, бұл ядроның қозу энергиясының төмендеуімен түсіндіріледі.

Реакцияның қосымша механизмдері

Шашыраған бөлшектердің толық инклюзивтік спектрін сипаттау үшін тепе-теңдік алдындағы ыдыраудың экситондық моделін ядролық реакциялардың өзге де ықтимал механизмдерімен толықтыру қажет. Бұларға нуклондардың берілуімен жүретін тікелей процестер (үзілу, қармап алу және алмасу реакциялары), серпімсіз шашырау, сондай-ақ бөлшектердің тікелей ұшып шығуы (кластерлік еркіндік дәрежелерін қоса алғанда) жатады. Спектрдің төменэнергетикалық аймағында тепе-теңдік күйінен бөлшектердің эмиссиясын ескеру маңызды.

Бірсатылы тікелей механизмдердің қималары

Экситондық модель шеңберінде қарастырылмайтын компоненттердің үлесін есептеу үшін бірқатар қосымша мини-модельдер енгізіледі. Бұл үлестер жартылай эмпирикалық тұрғыда, нуклондардың тікелей берілу реакциялары мен бөлшектердің (кластерлік еркіндік дәрежелерін қоса алғанда) тікелей ұшып шығу процестерін ескере отырып анықталады. Нуклондардың бірсатылы тікелей берілу механизміне сәйкес дифференциалдық қима үшін негізгі теңдеу келесі түрде өрнектеледі:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (52) |

мұнда индекстер a және b ‒ тиісінше, ұшып келетін бөлшек пен қалдық ядроны білдіреді. Экситондық модель аясындағы есептеулердегідей, *σb*, инверсиялық қимасы қосылыған ядроның түзілуінің толық қимасы ретінде қабылданады. *Еа* және ε ‒ бөлшектің зертхана жүйесіндегі және масса центрі жүйесіндегі энергиялары. Ал *Va* ‒ соғушы бөлшек үшін тікелей реакциялар аймағындағы орташа потенциал, ол шамамен 12,5*Аa* МэВ-қа тең.

Нормалау тұрақтылары келесі мәндерге тең:

|  | Нейтрон үшін  Зарядталған бөлшектер үшін, | (53) |
| --- | --- | --- |

|  | жұтылу реакциясы үшін  үзілу реакциясы үшін  алмасу реакциясы үшін. | (54) |
| --- | --- | --- |

*Kα,p* шамасы ‒ (α,N) және (N,α) типті реакциялар үшін күшейту факторы, мұндағы N ‒ нуклон.

Тиімді күй тығыздығы келесі түрде өрнектеледі:

|  | (55) |
| --- | --- |

мұнда факторы — әрбір қосымша жұптың қозу ықтималдығын ескеретін шама.

Нуклонды бірсатылы тікелей ұшырып шығару механизмі бойынша қималарды есептеу барысында, соғушы бөлшектің әрекеттесу процесінің бастапқы сатысында протондық, нейтрондық немесе α-кластерлік бөлшек–тесік жұбын қоздыру қабілеті бар деп есептеледі. Нуклонды ұшырып шығару реакциясы үшін негізгі теңдеу A(a,b)B келесі түрде беріледі:

|  | (56) |
| --- | --- |

мұнда εm ‒ **с** типті бөлшектің эмиссиясы кезінде негізгі күйден өтудің максималды энергиясы;

‒ кіріс каналы үшін энергияға тәуелсіз серпімсіз шашырау қимасы; ал

‒ **с** типті бөлшек үшін Кулон тосқауылынан жоғары эмиссия энергиялары бойынша орташа алынған қима. Әртүрлі бөлшек–тесік жұптарының қозу ықтималдықтары төменде келтіріледі:

|  | (57) |
| --- | --- |

*f* ‒ бұл корреляцияланған орбиталарда орналасқан төрт нуклонның α-кластер тәрізді құрылым түзу ықтималдығы бар уақыт фрагменті.

Серпімсіз шашырау жағдайында нуклондарға арналған реакция қимасының формуласы келесі түрде өрнектеледі:

|  | (58) |
| --- | --- |

Тепе-теңдік күйінен бөлшектердің эмиссиясы

Негізінде, экситондық модельді қосылған ядроның тепе-теңдік фазасын ескеретіндей етіп кеңейтуге болады. Алайда, тепе-теңдік арасындағы эмиссияның негізгі бөлігі бірнеше бастапқы әрекеттесулер кезеңінде жүзеге асады, және бұл жағдайда жабық формадағы теңдеулер жақсы жуықтау береді. Сонымен қатар, тепе-теңдік күйінде пассивті бөлшектер мен тесіктер пассивті күйде қалады деген болжам сенімділігін жоғалтады.

Тепе-теңдік күйлерін есептеу үшін Вайскопф–Ирвинг формализмі қолданылады. Бұл модельде бөлшектердің ұшу ықтималдығы келесі формуламен анықталады:

|  | (59) |
| --- | --- |

Күй тығыздығы тек ядроның қозу энергиясымен сипатталады. Алымдағы күй тығыздығы ‒ бөлшек b эмиссиясынан кейінгі қалдық ядроға, ал бөлімдегі ‒ ұшып шыққан ядроға сәйкес келеді.

Күй тығыздығы Ферми-газ формализмі негізінде алынады. Толтырылмаған қабықтардан тұратын ядролар үшін ол келесі түрде өрнектеледі:

|  | (60) |
| --- | --- |

мұнда ‒ тиімді энергия:

|  | (61) |
| --- | --- |

Бұрыштық таралулар

Экситондық модель өзінің дамуының алғашқы кезеңінен бастап, ұшып шығатын бөлшектердің энергетикалық спектрлерін сипаттау үшін құрылған. Бұрыштық таралуларды сипаттау бұл формализмге кірмеген, бұл, ең алдымен, есептеулерде бұрыштық моменттердің ескерілмеуімен байланысты. Сонымен қатар, тепе – теңдік алдындағы бұрыштық таралуларды сипаттауға бағытталған түрлі теориялық әрекеттер шектеулі нәтиже бергенін көрсетті. Реакциялардың екі еселенген дифференциалдық қимасын есептеуге арналған негізгі формула келесі түрде беріледі [97]:

|  | (62) |
| --- | --- |

мұнда ‒ экситондық модельмен байланысты арнайы параметр:

|  | (63) |
| --- | --- |

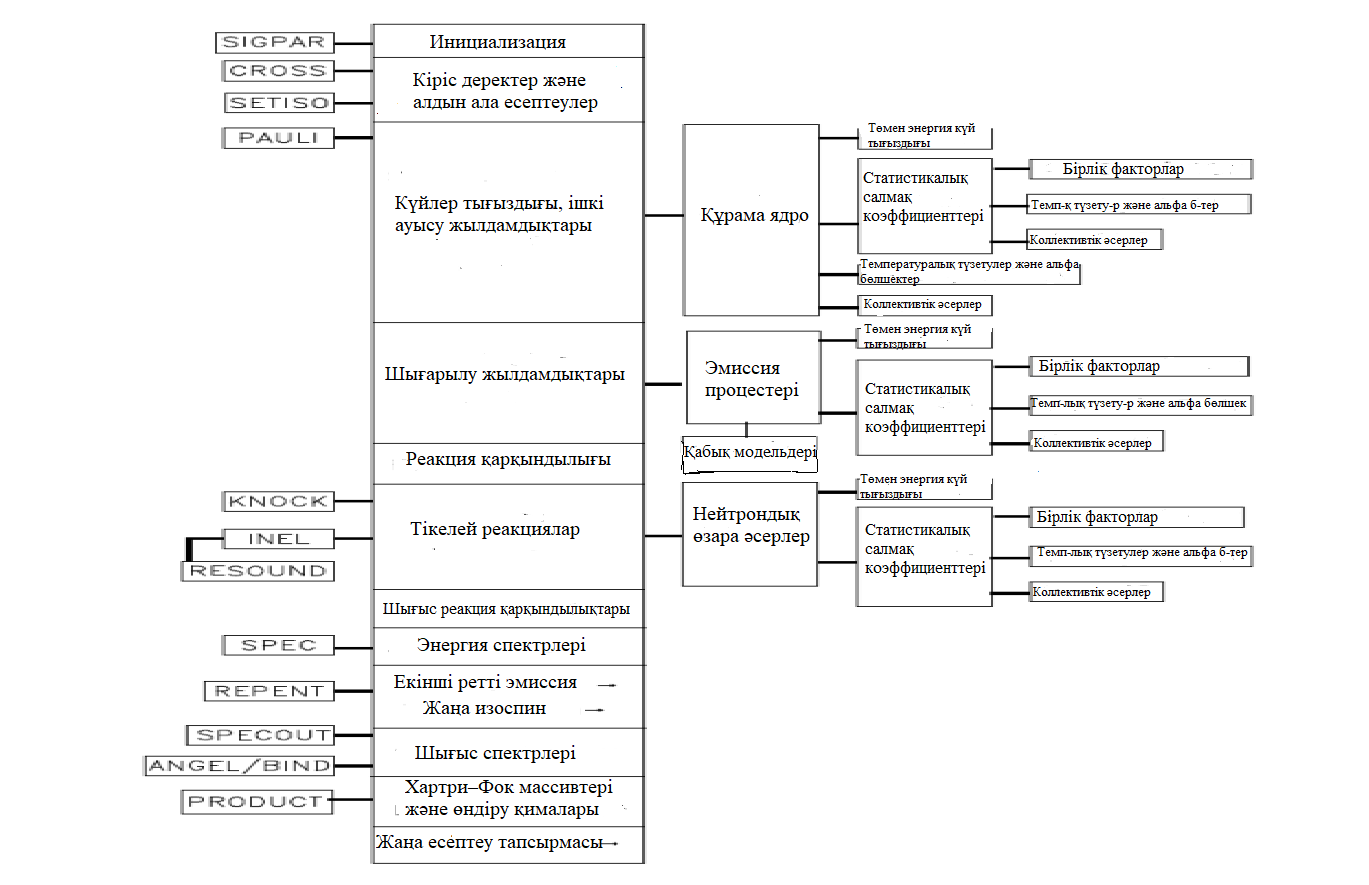
мұнда *X1* және *X3* ‒ ауысу параметрлері.

## 

## 4.2 PRECO-2006 бағдарламасының құрылымын сипаттау

Зерттелетін реакциялардың эксперименттік деректерін талдау барысында Fortran тілінде жазылған PRECO-2006 бағдарламасы қолданылды [98], оның сызбалық диаграммасы 25-суретте көрсетілген.

Экситондық модель бойынша есептеулер негізгі бағдарламада орындалады, ал тікелей реакциялар мен бұрыштық таралулардың қималары ішкі бағдарламаларда есептеледі. NUTRA, KNOCK және INEL ішкі бағдарламаларында, тиісінше, нуклондардың берілуі, бөлшектердің ұшып шығуы және кластерлік еркіндік дәрежелерін қоса алғанда, серпімсіз шашырау сияқты процестердің қималары анықталады. POLLY ішкі бағдарламасы Лежандр полиномдарының кітапханасын есептейді, ал ANGEL бағдарламасы ұшып шығатын бөлшектердің бұрыштық таралуларын генерациялайды.



Сурет 25 – PRECO-2006 бағдарламасының сызбалық диаграммасы

Ұшып келетін бөлшек үшін реакция қималары және ұшып шығатын бөлшек үшін инверсиялық реакция қимасы бағдарлама ішінде эмпирикалық апроксимация әдісі арқылы есептелуі мүмкін [99, 100]. Бұл әдіс салыстырмалы түрде жоғары энергиялар аймағында геометриялық қимаға көшу үшін осы жұмыста модификацияланған.

|  | (64) |
| --- | --- |

мұнда *Rb* ‒ бөлшек радиусы *b=n, p* үшін 0, b=d, t, 3He үшін 0,8R, b=α үшін 1, 2).

Параметр мәндері SIGPAR ішкі бағдарламасында орналастырылған, ал кіріс және шығыс каналдарының қималары тиісінше CROSS ішкі бағдарламасы мен негізгі бағдарламада есептеледі.

Бастапқы есептеулер әрқашан нейтрондардың, протондардың және α-бөлшектердің шығарылуымен жүретін негізгі реакция арналары үшін орындалады. Егер ыдырау шегі көрсетілген болса, онда бұл процесс есептеулердің тепе-теңдік бөлігіне енгізіледі. Басқа жеңіл иондардың (мысалы, d, t, 3He) спектрлері бағдарламаның есептеу кезеңдерінің кейінгі сатыларында анықталуы мүмкін. Тікелей реакциялар бойынша ішкі бағдарламаларды орнату және шақыру кезінде кіретін де, шығатын да бөлшектердің массасы 4-тен аспайды деп есептеледі.

Қарастырылатын экситондық сандардың диапазоны бастапқы кіріс конфигурациясы (p0,h0) және күй тығыздығы ω(p,h,E) негізінде анықталады. Бұл ретте айырма тұрақты деп алынады және p0−h0 мәніне тең.

Экситондық модель көптеген эксперименттік нәтижелерді түсіндіруде кеңінен қолданылады. Бұл модельдің артықшылықтарының бірі ‒ оның негізіне алынған кинетикалық теңдеулер қозған ядролық жүйенің релаксация процесін қарапайым квазибөлшек конфигурацияларынан бастап, статистикалық тепе-теңдік орнағанға дейінгі аралықты толық сипаттайды. Бұл өз кезегінде қосылыған ядродан бөлшектердің шығарылу механизмін дәстүрлі көзқарастан өзгеше тұрғыда қарастыруға мүмкіндік береді.

Кинетикалық теңдеулерді шешудің жедел әдістері көпбөлшекті эмиссия үдерістерін зерттеуге жол ашты. Модель тек нуклондардың ғана емес, сонымен қатар күрделі бөлшектердің де энергетикалық спектрлерін бір мезгілде сипаттайды, ал оның қазіргі заманғы нұсқаларында бұрыштық таралуларды да ескеретін формализм енгізілген.

Модельді одан әрі дамыту және оның негізгі қағидаларын тексеру үшін әртүрлі кіріс және шығыс арналар бойынша энергетикалық және бұрыштық таралуларға қатысты жүйелі эксперименттік деректерді алу қажет.

## 4.3 TALYS -1.8 бағдарламасының құрылымын сипаттау

TALYS ‒ бұл ұшып келетін бөлшек пен ядро арасындағы әрекеттесудің барлық сатыларын қамтитын модельдер жиынтығы негізінде ядролық реакциялардың қималары мен сипаттамаларын 1 кэВ-тен 200 МэВ-ке дейінгі энергия диапазонында есептеуге арналған модульдік есептеу кешені (26-сурет).

Изображение выглядит как текст, снимок экрана, Шрифт, диаграмма

Контент, сгенерированный ИИ, может содержать ошибки.

Сурет 26 – TALYS есептеу кодына енгізілген ядролық модельдер көрсетілген

TALYS бағдарламасы ядролық реакциялардың әртүрлі физикалық механизмдері мен аспектілерін сипаттайтын бірнеше негізгі модульдерден тұрады:

Басқарушы негізгі модуль барлық бағдарламалық блоктардың жұмысын үйлестіреді ‒ кіріс параметрлерін оқу мен нысана сипаттамаларын орнатудан бастап нәтижелерді шығаруға дейін.

TALYS бағдарламасында негізгі физикалық процестер жеке ішкі бағдарламалар мен функционалдық модульдер арқылы модельденеді.

Оптикалық модель модулі (OMМ) соғушы бөлшектердің әртүрлі энергияларындағы өтімділік коэффициенттерін есептеуге қолданылады. Бұл барлық реакциялық сатылар үшін қажет. Бағдарламада оптикалық потенциал параметрлерінің ғаламдық және локалдық нұсқаларын таңдау мүмкіндігі жүзеге асырылған.

Тепе-теңдік алдындағы саты модулі экситондық модельге негізделген. Ол статистикалық тепе-теңдік орнағанға дейінгі кезеңде бөлшектердің энергетикалық спектрлерін есептейді. Мұнда көп реттік эмиссия, спин-изоспин эффектілері және берілу формфакторлары ескеріледі.

Хаузер–Фешбахтің статистикалық моделі құрама ядроның түзілуі мен ыдырауын сипаттайды. Бұл модельде бұрыштық момент, жұптық корреляциялар, энергетикалық деңгейлердің ені және бөлшектердің потенциалдық тосқауыл арқылы өтуі есепке алынады.

Тікелей реакциялар модульдері бірнуклондық трансферлерді, ұжымдық күйлердің қозуын және реакция өнімдеріне әсер ететін басқа да тікелей процестерді сипаттайды.

Бөлшектердің булануы мен ыдырауы ішкі бағдарламалары қозған ядродан нуклондар, жеңіл иондар және гамма-кванттардың шығарылуын есептейді. Мұнда каналдар арасындағы бәсекелестік пен бірнеше бөлшектердің бірінен соң бірі булануы ескеріледі.

Шығыс деректерді қалыптастыру ішкі бағдарламалары (.tot, .xs, .g, .lev секілді) қималарды, энергетикалық және бұрыштық таралуларды, сондай-ақ қозу деңгейлері мен өтулер ықтималдығын шығарады. Нәтижелер кесте түрінде және графикалық түрде, ENDF пішімдеріне сәйкес ұсынылады [101].

Кіріс файлын пайдаланушы өзі орнатады. Ол реакция параметрлерін, ұшып келетін бөлшек пен ядро-нысананың сипаттамаларын, қолданылатын модельдерді және шығыс форматын қамтиды. Бағдарлама автоматты түрде барлық маңызды шығу арналары мен энергетикалық деңгейлерді реакциялық шектерді ескере отырып есептейді.

TALYS бағдарламасындағы экситондық модель тепе-теңдік орнамаған кезеңде бөлшек спектрлерінің қалыптасу динамикасын сипаттауға мүмкіндік береді. Оның артықшылығы ‒ нуклондар мен күрделі бөлшектердің энергетикалық және бұрыштық таралуларын бір мезгілде модельдеуге қабілеттілігі. Модель экситон конфигурациялары арасындағы ауысу теңдеулерін шешуге негізделген және ядро параметрлері арқылы анықталатын күй тығыздығын ескереді.

Бағдарлама пайдаланушыға реакциялық деректерді теориялық тұрғыда талдауға арналған кең мүмкіндіктер ұсынады: толық, дифференциалдық және ішінара қималарды есептеу, спектрлерді модельдеу және ядролық деректер кітапханаларын қалыптастыру. Бұл TALYS бағдарламасын әртүрлі механизмдермен жүретін ядролық реакцияларды, соның ішінде ADS-жүйелеріне қатысты реакцияларды зерттеуде тиімді құрал етеді [102].

## 

## 4.4 Тепе-теңдік алдындағы ядролық ыдыраудың кванттық механикалық теориясы

Фешбах – Керман – Кунин (ФКК) формализмі

Статистикалық көпсатылы құрамды (СКҚ) және статистикалық көпсатылы тура (СКТ) процестердің кванттық-механикалық формализмі Фешбах-Керман-Кунин (ФКК) еңбектерінде дамытылған болатын [103]. Нуклондардың қатысуымен жүретін ядролық реакциялар мысалында ФКК формализмінің негізгі қағидаларын қарастырайық. Ядролық реакциялардың бірыңғай теориясында [104] (стационарлық тәсілдеме негізінде) нуклонның А ядросымен өзара әсерлесу мәселесі (А(a,b)B реакциясы, мұндағы a, b = p, n) жүйенің толық гамильтонианы арқылы сипатталады:

|  | (65) |
| --- | --- |

Бұл мәселе толық толқындық функциядан 𝜓(⁺) проекциялық операторлар және арқылы ашық арналардың толқындық функциясын (шашырау күйлерінің кеңістігі ‒ байланыссыз күйлер (континуум)) және жабық арналардың толқындық функциясын (байланысқан немесе квазибайланысқан күйлер) бөліп алу әдісімен шешіледі. Мұнда күйлердің спектрі дискретті (немесе квазидискретті) (D > Γ) және үздіксіз (Γ > D) сипатқа ие болады.

Проекциялық операторлар әдісінде реакция матрицасы келесі түрде өрнектеледі:

|  | (66) |
| --- | --- |

мұнда ‒ әртүрлі байланыссыз күйлердің (ашық арналардың) өзара байланысы арқылы жүзеге асатын көпсатылы тура (КСТ) процестерді сипаттайтын матрица.

|  | (67) |
| --- | --- |

мұнда ‒ байланыссыз күйлерден (ашық арналардан) байланысқан немесе квазибайланысқан күйлерге (жабық арналарға) және кері бағыттағы өтулерді сипаттайтын көпсатылы құрамды (КҚҚ) процестердің матрицасы.

|  | (68) |
| --- | --- |

(60) және (61) теңдеулерінде , ‒ P-кеңістігінде шешілетін теңдеулердің шешімдері болып табылады:

|  | (69) |
| --- | --- |
|  | (70) |
|  | (71) |
|  | (72) |
|  | (73) |

Бұл жағдайда . Әртүрлі деңгейдегі аралық күйлерді (күрделілігі артатын күйлерді) ескеру — проекциялық операторлар әдісінде *hQQ* (71) немесе *Hopt* (70) гамильтониандарының меншікті функциялары арқылы жүзеге асырылады, бұл үшін және келесі түрде өрнектеледі [103, р. 452]:

|  | (74) |
| --- | --- |

Бұл ретте аралық күйлердің күрделілігі экситондар санының N артуымен сипатталады. Екі бөлшектен тұратын қалдық өзара әсерлесу болжамы негізінде қосымша шарттар енгізіледі.

| егер. | (75) |
| --- | --- |

## 4.5 Реакцияның қимасы (EMPIRE II бағдарламасы)

Кванттық-механикалық тепе-теңдікке дейінгі ыдырау теориясы аясында реакция қималарын есептеу үшін EMPIRE II [105] бағдарламасы ескерілді.

EMPIRE II бағдарламасында реакция қимасы өтімділік коэффициенттері арқылы есептеледі:

|  | (76) |
| --- | --- |

мұнда k ‒ салыстырмалы қозғалыстың толқындық саны, ал

*i*, *I*, *J* және *S* ‒ тиісінше, ұшып келетін бөлшектің, нысана ядросының, құрамды ядроның және арнаның спиндері;

*l* ‒ ұшып келетін бөлшек *a*-ның орбиталық бұрыштық моменті;

*f*(*l*,*π*) функциясы жұптылықты сақтау шартын қамтамасыз етеді және егер шарты орындалса, бірге тең болады, ал қалған жағдайларда нөлге тең. Мұнда *р*, *Р* және *π* ‒ сәйкесінше, соғылатын бөлшектің, нысана ядросының және құрама ядроның жұптары. *є* и *U* ‒ ұшып келетін бөлшектің және құрамды ядроның энергиялары. Масса саны A<5 болатын бөлшектер үшін өтімділік коэффициенттері SCAT2 [106] бағдарламасы арқылы оптикалық модель негізінде есептеледі.

Көпсатылы тура процестердің қимасы

Үздіксіз спектрге шашыраудың көпсатылы тура тепе- теңдік алдындағы процестерінің теориясы алғаш рет Tamura, Udagawa және Lenske тарапынан ұсынылды [107]. Кейін бұл әдіс ядро құрылымын статистикалық және динамикалық тұрғыда зерттеу саласында әрі қарай дамытылды.

Жүйенің (соғылатын бөлшек + нысана ядросы) аз энергия жоғалтудан бастап үлкен энергия шығындарына дейінгі эволюциясы ашық арна үшін көпсатылы тура процестер (КТП) теориясында тікелей реакция әдістері, микроскопиялық ядролық құрылым және статистикалық әдістердің үйлесімі арқылы сипатталады. Бұл жерде жабық арналардың, яғни көпсатылы құрамды (КҚП) механизмдердің үлестерін бөлек қарастыруға болады деп есептеледі.

КТП теориясында ашық күйлер үшін тиімді Гамильтониан энергия бойынша орташа алынған оптикалық бөлікке *Нопт* бөлінеді. Бұл бөлік соғылатын бөлшек aaa мен нысана ядросы AAA-ның салыстырмалы қозғалысын сипаттайды. Сонымен қатар асимптоталық түрде бөлінген ядролардың ішкі құрылымын сипаттайтын *Нішкі* Гамильтонианы және соғылатын бөлшек пен нысана ядросы арасындағы қалдық тиімді әсерлесуді сипаттайтын *Vқалд* операторы қарастырылады, ол серпімсіз процестердің жүруіне әкеледі:

|  | (77) |
| --- | --- |

мұнда *Нопт* және *Vқалд* бөліктерінің екеуі де эрмиттік операторлар болып табылмайды. ORION бағдарламасы ашық арна үшін T-матрицаға арналған Липпман–Швингер теңдеуін шешеді, мұнда n -ші ретті мүшесі келесідей өрнектеледі:

|  | (78) |
| --- | --- |

Бұл өрнек кіріс арнасындағы серпімді кіріс толқыны мен негізгі күй конфигурациясынан энергиясы E болатын шығатын арнадағы γ шығатын толқын арқылы өтуді сипаттайтын n-ші қадамды білдіреді [108]. Мұнда *Gкан*(*Е*) ‒ арна үшін Грин функциясы. Шашырау толқындары оптикалық модельдің толқындық функциялары болып табылады және энергияға әлсіз тәуелділік көрсетеді.

Тепе – теңдік алдындағы спектрді статистикалық тұрғыда сипаттау кезінде нақты γ күйлері n-бөлшек және n-тесік модельдерінің күйі ретінде қарастырылады. Бұл жағдайда ішкі гамильтониан *Нішкі* келесі түрде таңдалады:

|  | (79) |
| --- | --- |

c-күйлер ‒ *Нішкі* гамильтонианының меншікті күйлері болып табылады, ал қалдық әсерлесуі тек әртүрлі n- бөлшек және n – тесік кластарындағы күйлерді өзара байланыстырады.

np – nh кластар арасындағы конфигурациялық араласудың стохастикалық сипатқа ие екені және амплитудалардың кездейсоқ үлестірімі орташа нөл мәнге ие болатындығы болжанады [108, р. 486]. Матрица тығыздығы белгілі бір соңғы энергия аралығында, мысалы, толық ені Δ Лоренц немесе Гаусс үлестірімі арқылы, деңгейлер арасындағы орташа арақашықтықпен салыстырылатын мәнге дейін орташаланған кезде,

|  | (80) |
| --- | --- |

негізгі күйлердің когеренттігі жойылады. Нәтижесінде матрица тығыздығы статистикалық матрица сипатына ие болады:

|  | (81) |
| --- | --- |

Қосу 𝑛𝑝 - *nh* кластар бойынша жүргізіледі:

|  | (82) |
| --- | --- |

және жүйенің c-конфигурациясында болу ықтималдығы энергияға байланысты спектроскопиялық тығыздықтар арқылы анықталады:

|  | (83) |
| --- | --- |

мұнда *Gішкі*(*Е*) ‒ ішкі Грин функциясы.

Статистикалық операторлар сонымен қатар физикалық сипаттама үшін маңызды бірқатар қасиеттерге ие. *Рс*(*Е*) функциясын ΔE аралығында интегралдау арқылы c-конфигурация үшін спектрлік фактор алынады. Көрсетілімге тәуелсіз түрде, яғни γ-немесе c-базисте болсын, (66) теңдеуі энергиясындағы толық деңгей тығыздығын береді. Ал *np – nh* күйлерінің парциалдық деңгей тығыздығы (81) өрнегі арқылы анықталады.

«Ешқашан артқа оралма» гипотезасына [103, р. 433] ұқсас түрде, *n*≠*k* интерференттік мүшелер ескерілмейді, яғни әрбір қадамда қозу энергиясы берілген кезде деңгей тығыздығы ең жоғары конфигурацияларға өтулер реакцияны басым түрде анықтайды деп болжанады. Бұл жағдайда, қозуды төмендететін немесе *ph*-санын өзгертпейтін шашырау процестері ескерілмейді. Осындай алғышарттар негізінде қима *n* -қадамдық үлестердің когерентті емес суперпозициясына айналады:

|  | (84) |
| --- | --- |

мұнда көпсатылы қималар келесі түрде анықталады:

|  | (85) |
| --- | --- |

*Vішкі* операторын көпполюстік *Vλ* өрнек арқылы тарататын болсақ және бірсатылы процесс кезінде тек 1*p*-1*h* конфигурациялары тікелей қозатынын ескерсек, онда *σ*(1) бірсатылы өтулер арқылы E қозу энергиясына жуық 1*p*-1*h* күйлерге өтулер бойынша орташалау арқылы анықталады. Бұл жерде форм-фактор келесі түрде беріледі:

|  | (86) |
| --- | --- |

Әрбір өтуді жеке-жеке қарастырудың орнына, микроскопиялық форм-факторлар бойынша орташалау жүргізу жеткілікті. Осылайша, *Vқалд* күйге тәуелсіз көпполюсті форм-факторлар *Fλ* және ядролық өтулер операторлары *Оλ* арқылы өрнектеледі:

|  | (87) |
| --- | --- |

мұнда *r* ‒ салыстырмалы қозғалыстың координатасы, ал

*ξ=*(*ξа*,*ξА*) ‒ тиісінше соғылатын бөлшек пен нысана ядросының ішкі координаталары (спин және изоспинді қамтиды). Көпполюсті форм-факторлар *Fλ* операторлар *Оλ* мен байланысты және өзара келісілген тәсілдеме шеңберінде олар *Vост* операторын *Оλ* бойынша орташалау арқылы алынады:

|  | (88) |
| --- | --- |

Мұнда көпсатылы процестердің аралық қадамдарында пайда болатын кез келген еркін c-күйден өтудің жалпы жағдайы қарастырылады. Бірсатылы процестер үшін бастапқы күй негізгі күй болып табылады (c=0). Өтудің күштік функциясы *Sλ* арқылы нормализация жүргізіледі:

|  | (89) |
| --- | --- |

Жоғары реттіктер үшін форм-фактордың ішкі күйге тәуелділігі жойылады. Мұнда *Sλ* ‒ сыртқы оператор *Оλ* үшін ядролық жауап функциясы болып табылады және ол *с* күйінен *Е* энергия маңында шоғырланған *с'* күйлер ансамбліне бірлік энергияға өтудің жылдамдығын сипаттайды.

Жоғарыда аталған қатынастар бірсатылы реакциялар үшін қолайлы, мұнда *c* негізгі күй болып табылады. Алайда, кейінгі қадамдарда c ‒ қима бойынша қосу жүргізілетін еркін аралық *np – nh* күйі ретінде қарастырылады. Сондықтан көпсатылы шашырау процесінде (88) форм-фактор микроскопиялық модельге сүйеніп құрылады. Көпсатылы өтулердің статистикалық аспектілері көпполюсті форм-факторларды орташалау арқылы толық ескеріледі:

|  | (90) |
| --- | --- |

Бұл форм-факторлар бастапқы күйге де, көпсатылы процестің реттігіне де тәуелсіз болып табылады. Теорияны қолдануда бұл жалпы форм-факторлар

() теңдеуімен анықталатын жауап функцияларымен бірге пайдаланылады.

Жоғарыда жүргізілген есептеулер нәтижесінде бірсатылы процестің қимасы келесі түрде өрнектеледі:

|  | (91) |
| --- | --- |

мұнда ‒ (88) өрнегінде берілген орташаланған форм-факторлар негізінде есептелетін DWBA қимасы.

|  | (92) |
| --- | --- |

мұнда *Gопт* ‒ оптикалық потенциал үшін Грин функциясы. Ядролық құрылым туралы ақпарат енді толықтай келесі түрде беріледі:

|  | (93) |
| --- | --- |

Анықтама бойынша, шығу арнасының конфигурациясы 2p– 2h күйлері болып табылады және олар 1p–1h күйіндегі c1 конфигурацияларынан қоздырылады. Сонымен бірге, бірінші қадамда тек 1p–1h күйіндегі a күйлері қозады. Сондықтан екі Грин функциясының да 1p– 1h төмендетілген бөліктерін ғана қарастыру қажет.

Жақсы аппроксимация алу үшін *Sλ*2(*E*,*c*1) функциясының c1-ге тәуелділігін E1-ге тәуелділікпен ауыстыруға болады, егер спектроскопиялық күштің негізінен бұзылмаған энергия аймағында орналасатынын ескерсек. Теориялық тұрғыдан бұл E1 энергиясындағы c1 күйлеріне сәйкес келетін жауап функцияларын орташалау арқылы жүзеге асырылады:

|  | (94) |
| --- | --- |

Екі сатылы көпсатылы тура процесс (КТП) үшін қиманың соңғы нәтижесі келесі түрде өрнектеледі:

|  | (95) |
| --- | --- |

‒ *Т*(2) матрицалық элементтерімен (92)-теңдеу негізінде анықталатын орташаланған қима, мұнда екі сатылы шашырау когерентті кванттық процесс ретінде сипатталады. EMPIRE II бағдарламасының (2.13-нұсқасы) ағымдағы нұсқасында болады. Физикалық тұрғыдан алғанда, бұл энергия шешімділігі деңгейлер арасындағы орташа арақашықтықпен салыстырылатын жағдайларда байқалатын кейбір ішкі корреляциялық функцияларды елемеумен тең. Нәтижесінде, тепе-теңдік алдындағы қима көпсатылы үлестердің когерентті емес суперпозициясы түрінде сипатталады. Статистикалық тәсіл ең төменгі деңгейде енгізіледі, яғни ол тек ішкі жүйелерге қатысты болады, ал көпсатылы шашырау процестері толықтай кванттық-механикалық сипатталады, яғни барлық қадамдарда когерентті процесс ретінде қарастырылады.

**4.6 Құрама ядро (Хаузер–Фешбах моделі)**

EMPIRE II бағдарламасында қолданылатын статистикалық модель ‒ Хаузер–Фешбах теориясының жетілдірілген нұсқасы болып табылады, мұнда бұрыштық моменттер мен жұптылықтардың сақталуы дәл қадағаланады. Барлық бәсекелес ыдырау арналары үшін нейтрондар, протондар, α-бөлшектер және жеңіл иондардың эмиссиясы есепке алынады, сондай-ақ қалдық ядролардың толық γ-эмиссиясы қарастырылады. Әсіресе деңгей тығыздықтарын анықтауға баса назар аударылған, олар ротациялық және вибрациялық қозуларды ескеретін адиабаттық емес тәсіл шеңберінде есептеледі. Бұл ұжымдық эффектілер белгілі бір энергия мәніне жеткенде жоғалады. Деңгей тығыздықтары ядро пішінінің өзгерісіне байланысты ротациялық қозулар арқылы динамикалық сипатқа ие болады.

Ядролық реакциялардың статистикалық моделі шеңберінде, J спині, π жұптылығы және қозу энергиясы E бар a күйіндегі құрама ядроның қима үлесі *Гb* арнасының ені мен толық еннің , арақатынасы арқылы анықталады, әрі осы күйдің толтырылуы *σа*(*E*,*J*,*π*). шамасына көбейтіледі. Бұл ереже кейінгі бөлшектер эмиссиясы нәтижесінде түзілетін екінші құрамды ядролар үшін де қолданылады. Жалғыз айырмашылық мынада: алғашқы құрамды ядро бастапқыда нақты энергия деңгейінде қоздырылған болса (үйлесімді өзара әсерлесу арнасы), ал екінші ретті құрама ядролар қолжетімді энергия аралығындағы әртүрлі қозу энергияларымен түзіледі. Әрбір осындай күй мынадай үлес қосады:

|  | (96) |
| --- | --- |

қимаға. Қосу J спин және π жұптылық бойынша жүргізіледі, ал бақылауға болатын қиманы алу үшін (қалдық құрама ядро жағдайында) өрнек қозу энергиясы E бойынша интегралданады. Парциалды ыдырау ені келесі түрде анықталады:

|  | (97) |
| --- | --- |

мұнда *Вс* ‒ құрама ядродан бөлшек c-ның байланыс энергиясы;

ρ ‒ деңгей тығыздығы, ал

‒ энергиясы *є* =*E*-*Bc*-*E’* болатын және орбиталық бұрыштық моменті *l* арқылы сипатталатын бөлшек c-ның өтімділік коэффициенті. Мұнда *l* және бөлшектің спині бірігіп арна бұрыштық моментін j түзеді. Дискретті деңгейлер үшін (энергиясы *Еi*, спині *Ji* және парлығы *πi*) *ρ*(*Е*,*J'*,*π’ )* деңгей тығыздығы*,* .функцияларына келтіріледі.

**5 ЭКСПЕРИМЕНТТІК ДЕРЕКТЕРДІ ТАЛДАУ**

Жүргізілген эксперименттердің нәтижелері TALYS және PRECO-2006 есептеу кодтарының негізінде теориялық тұрғыда талданды. Бұл есептік бағдарламалар статистикалық және феноменологиялық модельдерге сүйенеді, олардың ішінде тепе-теңдікке дейінгі ыдырау үдерісін сипаттайтын экситондық механизм ерекше орын алады. Тепе-теңдікке дейінгі ядролық реакциялар механизмін сипаттаудың қазіргі әдістемелері экситондық тәсілдерден бастау алады, олардың алғашқы үлгісі Гриффинмен ұсынылған [109]. Бұл модель әзірленген кезден бері түрлі теориялық толықтырулармен және әдістемелік жетілдірулермен толықтырылды. Бірқатар пікірталастар мен шектеулерге қарамастан, экситондық модель инклюзивті энергия спектрлерін сипаттауда жоғары дәлдікпен қолданылатын тиімді теориялық әдістердің бірі болып саналады.

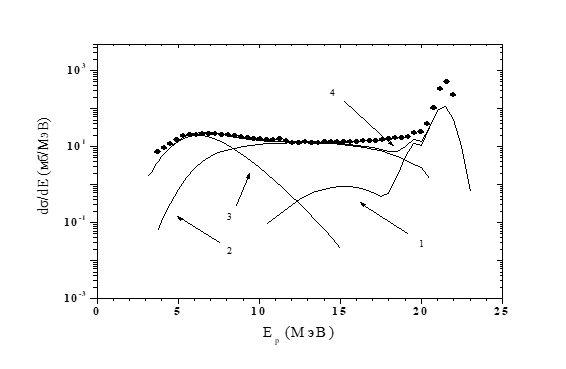
## 

**5.1 Ep = 7, 22 және 30 МэВ кезінде 103Rh ядросындағы протондардың түзілу деректерін талдау**

27, 28, 29суреттерде және 6-кестеде эксперименттік интегралдық қималарды теориялық есептеулермен салыстырмасы нәтижелермен қатар 103Rh(p,хp) реакцияларының инклюзивті қималарын қалыптастыратын механизмдердің есептелген үлестері көрсетілген.



Сурет 27 – 103Rh ядросында протон энергиясы 7 МэВ болғандағы (p, xp) реакциясының эксперименттік (нүктелер) және теориялық (сызық) интегралдық қималарының салыстырмасы



Символдар – эксперименттік мәліметтер; 1 – бір сатылы процестер, 2 – тепе-теңдікке дейінгі компонент, 3 – тепе-теңдік күйінен бөлшектердің эмиссиясы, 4 – толық интегралдық қима

Сурет 28 – 103Rh(p,хp) реакциясына арналған эксперименттік интегралдық қималарды теориялық есептеулермен салыстырмасы

Бұл салыстыру протон энергиясы 22 МэВ болған жағдайда орындалды [110].



Сурет 29 – Ер=30 МэВ болғанда 103Rh(p,хp) реакциясына арналған эксперименттік интегралдық қималарды теориялық есептеулермен салыстырмасы

Ескерту – Әдебиет негізінде құралған [111]

Кесте 6 – Зерттелетін бір ядро үшін (p,xр) реакциясы кезінде Ep = 7, 22 және 30 МэВ энергияларында интегралдық спектрдің қалыптасуына әртүрлі ядролық реакция механизмдерінің қосқан үлестері

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ядро | Ep,  МэВ | Толық қима | Тікелей  механизм | Тепе-теңдік алдындағы  механизм | Тепе-теңдік кезіндегі  механизм |
| 103Rh | 7 | 13.2 | 11.9 | 0.2 | 1.1 |
| 22 | 294.7 | 57.6 | 183.0 | 54.1 |
| 30 | 468,2 | 4,2 | 313,7 | 150,3 |
| Ескерту – Әдебиет негізінде құралған [112] | | | | | |

## 5.2 Ep = 22 және 30 МэВ кезінде 103Rh ядросында α-бөлшектердің түзілу деректерін талдау

Төмендегі 30,31 – суреттерде 103Rh ядросында протон энергиясы 22 және 30 МэВ болғандағы (p,xα) реакцияларының эксперименттік интегралдық қималарын теориялық есептеулермен салыстырмалары көрсетілген, ал 7-кестеде бұл қималардың қалыптасуына тепе – теңдікке дейінгі механизммен қатар, тепе – теңдік кезіндегі және тікелей механизмдердің де қосатын үлестері есептеліп берілген.



Символдар – эксперименттік мәліметтерді білдіреді: 1 – тепе-теңдік алдындағы компонент; 2 – тепе-теңдік күйінен бөлшектердің эмиссиясы; 3 – жиынтық интегралдық қима

Сурет 30 – 103Rh(p,хα) реакциясының Ep = 22 МэВ энергиясындағы эксперименттік интегралдық қималарын теориялық есептеулермен салыстырмасы



Символдар – эксперименттік мәліметтер: 1 – бір сатылы процестер; 2 – тепе-теңдікке дейінгі компонент; 3 – тепе-теңдік күйінен бөлшектердің эмиссиясы; 4 – толық интегралдық қима

Сурет 31 – 103Rh(p,хα) реакциясының Ep = 30 МэВ энергиясындағы эксперименттік интегралдық қималарын экситондық модель шеңберінде жүргізілген теориялық есептеулермен салыстырмасы

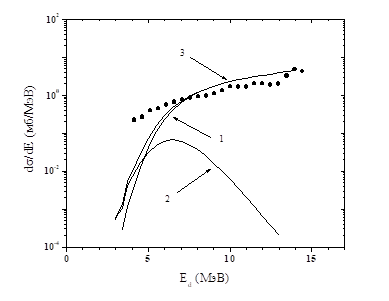
Ескерту – Әдебиет негізінде құралған [111]

Кесте 7 – Зерттелетін бір ядро үшін (p,xα) реакциясы кезінде Ep = 22 және 30 МэВ энергияларында интегралдық спектрдің қалыптасуына әртүрлі ядролық реакция механизмдерінің қосқан үлестері

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Реакция | Ep,  МэВ | Толық қима | тікелей  механизм | Тепе-теңдік алдындағы  механизм | Тепе-теңдік кезіндегі механизм |
| 103Rh(p,xα) | 22 | 29,05 | 0,001 | 14,82 | 14,23 |
| 30 | 93,8 | 25,8 | 3,8 | 64,2 |

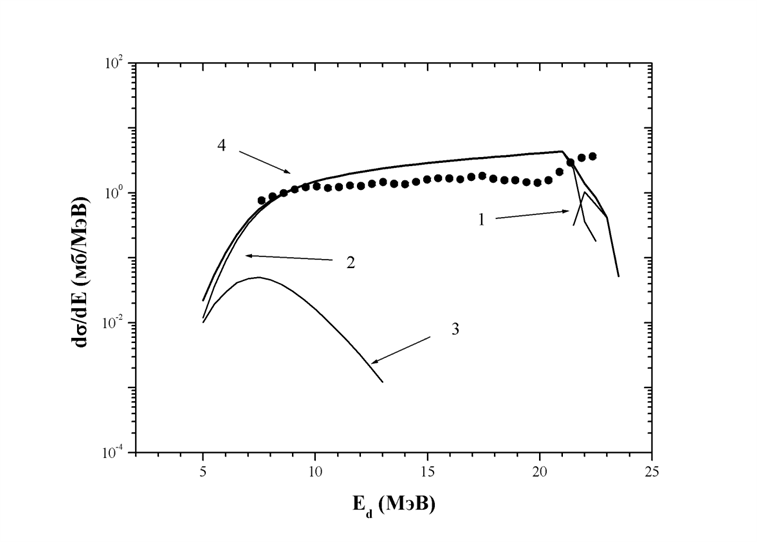
## 5.3 Дейтрон түзілу деректерін талдау: Ep = 22 МэВ кезінде 103Rh және Ep = 30 МэВ кезінде 120Sn

32, 33-суреттерде 103Rh және 120Sn ядроларындағы (p, xd) реакциялары үшін интегралдық қималар бойынша теориялық және эксперименттік деректердің салыстырмалары ұсынылған. Тепе – теңдікке дейінгі механизм аймағына сәйкес келетін энергиялар диапазонында есептік және эксперименттік мәндер арасында қанағаттанарлық сәйкестік алынды. Сонымен қатар, 8- кестеде 103Rh және 120Sn ядроларында протон энергиялары 22 МэВ және 30 МэВ болған жағдайда (p, xd) интегралдық спектрлерінің қалыптасуына әртүрлі ядролық реакция механизмдерінің үлестері теориялық тұрғыдан есептеліп көрсетілген.



Символдар – эксперименттік деректер: 1 – тепе-теңдік алдындағы компонент; 2 – тепе-теңдік күйінен бөлшектердің эмиссиясы; 3 – жиынтық интегралдық қима

Сурет 32 – 103Rh(p,хd) реакциясының интегралдық қималарының эксперименттік нәтижелерін теориялық есептеулермен салыстыру



Нүктелер – эксперименттік деректер; сызықтар – теориялық талдау нәтижелері: 1 – тікелей реакция процесі, 2 – тепе-теңдік алдындағы процесс, 3 – қосарланған ядро механизмі, 4 – толық қима

Сурет 33 – 120Sn ядросындағы (p,xd) реакциясының Ep = 30 МэВ

энергиясындағы интегралдық қималарының эксперименттік нәтижелерін теориялық есептеулермен салыстыру

Ескерту – Әдебиет негізінде құралған [113]

Кесте 8 – 103Rh және 120Sn ядроларында 22 МэВ және 30 МэВ энергияларда (p,xd) интегралдық спектрлерінің қалыптасуына әртүрлі ядролық реакция механизмдерінің есептік үлестер

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Реакция | Ep,  МэВ | Толық қима | Тікелей  механизм | Тепе-теңдік алдындағы  механизм | Тепе-теңдік кезіндегі механизм |
| 103Rh(p,xd) | 22 | 20,15 | 0 | 19,93 | 0,25 |
| 120Sn(p,xd) | 30 | 664 | 314 | 347 | 3 |

## 5.4 Бесінші бөлім бойынша қорытынды

(p,xp), (p,xα) және (p,xd) реакцияларын талдау барысында төмендегідей нәтижелер анықталды:

– төмен энергияларда (7 МэВ) бөлшектердің тепе-теңдік булану механизмі басым, ал тепе-теңдік алдындағы механизмнің үлесі мардымсыз;

– 22 және 30 МэВ энергияларында протондар мен дейтрондардың жоғары энергиялы спектр бөлігіндегі негізгі үлес тепе-теңдік алдындағы механизмге тиесілі;

– α-бөлшектердің эмиссиясы негізінен тепе-теңдік булану процесі арқылы жүзеге асады;

– экситондық модель негізінде, TALYS-1.8 және PRECO-2006 бағдарламаларының модификацияланған нұсқаларын қолдана отырып жүргізілген теориялық есептеулер эксперименттік деректерді жалпы алғанда қанағаттанарлық сипаттайды.

**ҚОРЫТЫНДЫ**

Диссертациялық зерттеулер нәтижелері бойынша негізгі тұжырымдар.

Осы диссертациялық жұмыста ядролық реакцияның (p,xp), (p,xα) және (p,xd) арналары бойынша жүргізілген эксперименттік және теориялық зерттеулер негізінде алғаш рет келесі негізгі нәтижелер алынды:

¹⁰³Rh(p,xd) реакциясы бойынша Eₚ = 22 МэВ және ¹²⁰Sn(p,xd) реакциясы бойынша Eₚ = 30 МэВ кезінде алынған эксперименттік және теориялық деректерді салыстыру нәтижесінде дейтрондардың спектрлік сипаттамаларын қалыптастыруда негізгі үлесті тікелей ядролық реакциялар механизмі мен тепе – теңдік алдындағы механизм атқаратыны көрсетілді. ¹⁰³Rh(p,xd) реакциясы бойынша Eₚ = 22 МэВ және ¹²⁰Sn(p,xd) реакциясы бойынша Eₚ = 30 МэВ кезінде алынған эксперименттік және теориялық деректерді салыстыру нәтижесінде дейтрондардың спектрлік сипаттамаларын қалыптастыруда негізгі үлесті тікелей ядролық реакциялар механизмі мен тепе – теңдік алдындағы механизм атқаратыны көрсетілді.

¹⁰³Rh(p,xd) реакциясы бойынша Eₚ = 22 МэВ және ¹²⁰Sn(p,xd) реакциясы бойынша Eₚ = 30 МэВ кезінде алынған эксперименттік және теориялық деректерді салыстыру нәтижесінде дейтрондардың спектрлік сипаттамаларын қалыптастыруда негізгі үлесті тікелей ядролық реакциялар механизмі мен тепе – теңдік алдындағы механизм атқаратыны көрсетілді.

Алынған инклюзивті энергия спектрлеріне экситондық модель шеңберінде теориялық есептеулер жүргізілді. Теориялық және эксперименттік нәтижелерді салыстыру негізінде (p,xp), (p,xd) және (p,xα) реакциялары үшін қималардың жоғары энергиялы (қатаң) бөлігі көбіне тепе-теңдікке дейінгі процестерге, ал төмен энергиялы (жұмсақ) бөлігі құрама ядроның ыдырауына сәйкес келетіні көрсетілді.

Қорытындылай келе, жасалған жұмыстың барлық кезеңдерінде өз қолдауын білдіргені үшін отандық ғылыми кеңесшім физика-математика ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор Жолдыбаев Т.К мырзаға, шетелдік кеңесшім философия докторы (PhD), қауымдастырылған профессор Ясемин Кучук ханымға диссертация дайындау кезінде ұсынған кеңестері мен қойған тапсырмаларына шын жүректен алғысымды білдіремін, сонымен қатар ҚР ЭМ «ИЯФ» ШЖҚ РМК, «ядролық процесстер» зертханасының қызметкерлеріне экспериментке қажетті нысаналарды әзірлеуде, және т.б. жабдықтаулармен қамтамасыз еткендері үшін алғыс білдіремін.

Автор, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Физика – техникалық ғылымдары институты, Ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар кафедрасының профессорлық – оқытушылық құрамына алғыс білдіреді.

# ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1 Bowman C.D., Arthur E.D., Lisowski P.W. et al. Nuclear energy generation and waste transmutation using an accelerator-driven intense thermal neutron source // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research А. – 1992. – Vol. 320. – P. 336-367.

2 Abderrahim H.A., D'hondt P. MYRRHA: A European experimental ADS for transmutation // Nuclear Physics A. – 2001. – Vol. 693, Issue 1-2. – P. 84-96.

3 Chadwick M.B., Obložinský P., Herman M. et al. ENDF/B-VII.0: Next generation evaluated nuclear data library for nuclear science and technology // Nuclear Data Sheets. – 2006. – Vol. 107, Issue 12. – P. 2931-3060.

4 Зайдель К., Зелигер Д., Райф. Предравновесный распад в ядерных реакциях // ЭЧАЯ. – 1976. – Т. 7, вып. 2. – С. 499-552.

5 Blann M. Preequilibrium decay // Ann. Rev. Nucl. Sci. – 1975. – Vol. 25. – P. 123-166.

6 Gadioli E., Hodgson P.E., Pre-equilibrium Nuclear Reactions. ‒ NY.: Oxford Univ. Press, 1992. – 328 p.

7 Герасимов A.С., Kиселев Г.В. Научно-технические проблемы создания электроядерных установок для трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов и одновременного производства энергии (российский опыт) // ЭЧАЯ. – 2001. – Вып. 1 (32). – С. 143-188.

8 Betak E., Hodgson P.E. Inclusive energy spectra and angular distributions in pre-equilibrium nuclear reactions // Nuclear Physics A. – 1985. – Vol. 445, Issue 1. – P. 1-20.

9 Kalbach C. Systematics of continuum angular distributions: Extensions to complex particles // Physical Review C. – 1988. – Vol. 37, Issue 6. – P. 2350-2361.

10 Agassi D. Statistical theory of multistep compound nuclear reactions // Physical Review C. – 1974. – Vol. 10, Issue 1. – P. 126-134.

11 Tamura T. Distorted wave Born approximation for multistep direct reactions // Nuclear Physics A. – 1971. – Vol. 170. – P. 1-34.

12 Feshbach H., Kerman A.K., Koonin S.E. The statistical theory of multistep compound and direct reactions // Annals of Physics. – 1980. – Vol. 125. – P. 429-476.

13 Richter W.A., Cowley A.A., Hillhouse G.C. et al. Preequilibrium (p,p’) measurements and calculations for 90Zr and neighboring nuclei for incident energies up to 200 MeV // Phys. Rev. C. – 1994. – Vol. 49, Issue 2. – P. 1001-1011.

14 Kleinfeller J., Bisplinghoff J., Ernst J. et al. Study of inclusive proton spectra from low energy deuteron reactions in terms of spectator break-up and Coulomb dissociation of the projectile // Nucl. Phys. – 1981. – Vol. A370, Issue 2. – P. 205-230.

15 Feshbach H. Energy averaging and the statistical multistep direct process // Ann. Phys. – 1985. – Vol. 159, Issue 1. – P. 150-156.

16 Bonetti R., Milazzo L.C., Doda I. et al. Analyzing powers in the 58Ni(p,p’) reaction calculated with the statistical multistep direct emission theory // Phys.Rev. C. Nucl. Phys. – 1982. – Vol. 26, Issue 6. – P. 2417-2423.

17 Griffin J.J. Statistical model of intermediate structure // Physical Review Letters. – 1966. – Vol. 17. – P. 478-481.

18 Kalbach C. Angular momentum effects in the exciton model // Physical Review C. – 1980. – Vol. 21, Issue 3. – P. 1052-1056.

19 Osterfeld F. Spin and isospin excitations in nuclei // Reviews of Modern Physics. – 1992. – Vol. 64, No. 2. – P. 491–558..

19 Blann M. Solving the master equation in pre-equilibrium models // Nuclear Physics A. – 1972. – Vol. 183. – P. 250-268.

20 Mashnik S.G., Sierk A.J., Van Riper K.A. Recent advances in the cascade-exciton model (CEM): LA-UR-00-1724. – Los Alamos, 2000. – 38 p.

21 Blann M. Surface effects in the exciton model // Physical Review C. – 1971. – Vol. 4. – P. 849-859.

22 Kalbach C. Surface emission in pre-equilibrium reactions // Journal of Physics G: Nuclear Physics. – 1985. – Vol. 11. – P. L35-L39.

24 Kalbach C. Gamma-ray emission in the exciton model // Physical Review C. – 1981. – Vol. 23. – P. 112-118.

25 Avrigeanu M., Ivaşcu M. Gamma-ray pre-equilibrium emission: calculations and analysis // Annals of Nuclear Energy. – 1985. – Vol. 12, Issue 6. – P. 303-320.

26 Kalbach, C. Two-component exciton model // Physical Review C. – 1986. – Vol. 33. – P. 818-828.

27 Bertini H.W. Intranuclear-cascade calculation of the secondary nucleon spectra from nucleon-nucleus interactions in the energy range 340 to 2900 MeV // Physical Review. – 1969. – Vol. 188, Issue 4. – P. 1711-1730.

28 Yariv Y., Fraenkel Z. Intranuclear cascade calculation of high-energy heavy-ion interactions // Physical Review C. – 1981. – Vol. 24, Issue 2. – P. 488-494.

29 Cugnon J., Volant C., Vuillier S. Improved intranuclear cascade model for nucleon-nucleus interactions // Nuclear Physics A. – 1997. – Vol. 620. – P. 475-509.

30 Gudima K.K., Mashnik S.G., Toneev V.D. Cascade-exciton model of nuclear reactions // Nuclear Physics A. – 1983. – Vol. 401, Issue 2. – P. 329-361.

31 Бунаков В.Е., Калинин А.Г., Рубцов В.А. Модифицированная модель внутриядерного каскада с учетом релаксации дырок и ограничений по угловому моменту // Известия РАН. – 1982. – Т. 46, №9. – С. 1742-1746.

32 Blann M. Geometry dependent hybrid model of preequilibrium nuclear reactions // Physical Review Letters. – 1981. – Vol. 46, Issue 9. – P. 567-570.

33 Gadioli E., Hodgson P.E. Pre-equilibrium Nuclear Reactions. – Oxford: Clarendon Press, 1992. – 328 p.

34 Gadioli E., Silvestri C. Geometry effects in pre-equilibrium nuclear reactions // Zeitschrift für Physik A. – 1981. – Vol. 302. – P. 213-220.

35 Cugnon J., Volant C., Vuillier S. Improved intranuclear cascade model for nucleon-nucleus interactions // Nuclear Physics A. – 1997. – Vol. 620. – P. 475-509.

36 Blann M. Exciton model systematics including improved angular distributions // Nuclear Physics A. – 1983. – Vol. 399. – P. 251-268.

37 Kalbach C. Systematics of continuum angular distributions: Extensions to complex particles // Physical Review C. – 1988. – Vol. 37, Issue 6. – P. 2350-2361.

38 Gadioli E., Hodgson P.E., Silvestri C. Equivalence of hybrid and exciton models at high energies // Nuclear Physics A. – 1984. – Vol. 420. – P. 241-254.

39 Gadioli E., Hodgson P.E. Alpha clustering effects in pre-equilibrium nuclear reactions // Zeitschrift für Physik A. – 1982. – Vol. 308. – P. 339-346.

40 Ernst D.J., Rao Y.P. Comparison of hybrid and exciton models of pre-equilibrium nuclear reactions // Nuclear Physics A. – 1981. – Vol. 366. – P. 173-186.

41 Bonetti R., Galbiati S., Milazzo-Colli L. Decay rate of an exciton from precompound studies compared with optical-model parameters // Lett.al Nuovo Cim. – 1977. – Vol. 18, Issue 17. – P. 557-560.

42 Gudima K.K., Toneev V.D. Cascade-exciton model of nuclear reactions // Nuclear Physics A. – 1983. – Vol. 401. – Р. 329-361.

43 Mashnik S.G., Gudima K.K. Recent developments in the cascade-exciton model (CEM03): Report LA-UR-03-0725. – Los Alamos, 2003. – 45 p.

44 Гудима К.К., Тонеев В.Д. и др. Каскадно-экситонная модель ядерных реакций. – Дубна, 1980. – 14 с.

45 Koning A.J., Akkermans J.M. Angular distributions in pre-equilibrium reactions // Nuclear Physics A. – 1998. – Vol. 624. – P. 557-578.

46 Kalbach C. Systematics of continuum angular distributions: Extensions to higher energies // Physical Review C. – 1986. – Vol. 33, Issue 2. – P. 818-828.

47 Blann M., Vonach H. Global test of modified precompound decay models // Physical Review C. – 1983. – Vol. 28. – P. 1475-1492.

48 Uozumi Y. et al. Analysis of proton-induced reactions using pre-equilibrium models // Nuclear Physics A. – 1994. – Vol. 576. – P. 123-145.

49 Bertrand F.E., Peelle R.W. Complete hydrogen and helium particle spectra from 30 to 60 MeV proton bombardment of nuclei with A=12 to 129 and comparison with the intranuclear cascade model // Phys. Rev. – 1973. – Vol. 3, Issue C8. – P. 1045-1064.

50 Watanabe Y., Iwamoto A., Nakagawa T. Inclusive (p,xp) spectra at Ep = 18 MeV for medium-mass nuclei // Nuclear Physics A. – 1985. – Vol. 433, Issue 2. – P. 301-324.

51 Hauser W., Feshbach H. The inelastic scattering of neutrons // Physical Review. – 1952. – Vol. 87, Issue 2. – P. 366-373.

52 Iwamoto A., Harada K., Watanabe Y. Exciton model analysis of (p, xp) spectra at Ep = 12–18 MeV // Nuclear Physics A. – 1988. – Vol. 489, Issue 3. – P. 419-438.

53 Watanabe Y., Yoshioka S., Harada M. et al. Continuum (p, xp) Spectra at 14.1 and 26 MeV // Proceed. of the interna. conf. on Nuclear Date for Science and Technology. – Bologna, 1997. – P. 580-582.

54 Watanabe Y., Aoto A., Kashimoto H. et al. Feshbach-Kerman-Koonin model of preequilibrium (p, p’) and (p,n) reactions at 12 to 26 MeV // Phys. Rev. – 1995. – Vol. 4, Issue 51. – P. 1891-1907.

55 Harada M., Watanabe Y., Tanaka Y. et al. light charged-particle production in proton-induced reactions on 12C, 27Al, 58Ni, 90Zr, 197Au and 209Bi at 42 and 68 MeV // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2002. – Suppl. 2. – P. 393-396.

56 Chadwick M.B., Young P.G., Chiba S. et al. Cross-section evaluations to 150 MeV for Acceleretor-driven Systems and Implementation in MCNPX // Nucl. Sci. Eng. – 1999. – Vol. 131. – P. 293-328.

57 Duisebayev A., Ismailov K.M., Bostosun I. Inclusive Spectra of (p, xp) and (p, xd) reactions on 90,92Zr and 92Mo nuclei at Ep= 30.3 MeV // Phys.Rev. – 2003. – Vol. 67. – P. 044608-1 – 044608-9.

58 Duisebayev A., Ismailov K.M., Bostosun I. Inclusive Spectra of (p, xp) and (p, xα) reactions on 56Fe at Ep= 29.9 MeV // Phys.Rev. – 2005. – Vol. C72. – P. 054604-1-054604-5.

59 Blechman A.M., Duisebayev A., Ismailov K.M. The mechanism of reactions 90,92Zr, 92Mo(p, xp), (p, xd) measured at Ep= 30.3 MeV // Procced. 4th internat. conf. “Modern problems of nuclear physics”. – Tashkent, 2001. – P. 36-37.

60 Duisebayev A., Duisebayev B.A., Ismailov K.M. et al. Inclusive Spectra of Reactions 56Fe (p, xp), (p, xα) measured at Ep= 29.9 MeV // Procced. 3 rd Eurasian conf. «Nuclear Science and its Application». – Tashkent, 2004. – P. 111-112.

61 Chevarier P., Cuzzocrea J., Bertein R. Alpha-particle emission induced by protons on ⁵⁷Fe, ⁵⁹Co, ¹¹⁸Sn and ²⁰⁹Bi at 32, 48, 55 and 57 MeV // Nuclear Physics A. – 1976. – Vol. 257, Issue 2. – P. 301-320.

62 Blann M., Chadwick M.B., Young P.G. Precompound decay and hybrid models of neutron emission in proton-induced reactions on medium and heavy nuclei // Physical Review C. – 1994. – Vol. 50, Issue 1. – P. 263-272.

63 Duisebayev A., Duisebayev B.A., Zholdybayev T.K. et al. Studying the ejection of light charged particles induced by 50 MeV 3He ions upon interacting with a 112Sn nucleus // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2017. – Vol. 81. – P. 1170-1173.

64 Bevilacqua R., Meulders J.P., Wambersie J. et al. Light charged particle production and neutron emission from ²⁰⁸Pb(p,x) reactions at 62.9 MeV // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2010. – Vol. 268, Issue 5. – P. 604-613.

65 Lagrange J.M., Meulders J.P., Wambersie J. et al. Light charged particle emission from proton- and alpha-induced reactions on natSi at 25–65 MeV // Nuclear Physics A. – 2011. – Vol. 865, Issue 1. – P. 59-78.

66 Usabaeva G., Zholdybayev T.K., Sadykov B.M. et al. Inclusive spectra of light charged particles from ³He-induced reactions on ²⁷Al at 50.5 MeV and analysis using the PRECO-2006 code // Bulletin of the Kazakh National University. Physics Series. – 2021. – Vol. 79, Issue 4. – P. 26-32.

67 Duisebayev A., Duisebaev B.A., Zholdybayev T.K. et al. Studying the Ejection of Light Charged Particles Induced by 50 MeV ³He Ions upon Interacting with a ¹¹²Sn Nucleus // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2017. – Vol. 81, Issue 10. – P. 1170-1173.

68 Liang H., Wu Z., Han Y. et al. The energy spectra and double-differential cross-sections for p+<SUP>92,94,95,96,97,98,100</SUP>Mo reactions at the incident energies from threshold to 200 MeVL // Annals of Nuclear Energy. – 2014. – Vol. 69. – P. 301-313.

69 Усабаева Г., Жолдыбаев Т.К., Садыков Б.М. и др. Инклюзивные спектры протонов при взаимодействии α-частиц с ядрами ²⁷Al и ⁵⁹Co при энергии 29 МэВ // Вестник КазНУ. – 2021. – Т. 79, №4. – С. 26-32.

70 Zholdybayev T.K., Usabaeva G., Sadykov B.M. et al. Inclusive spectra of light charged particles from ³He + ⁵⁹Co reactions at 50 MeV and exciton model analysis // Bulletin of the Kazakh National University. – 2022. – Vol. 80, Issue 4. – P. 28-35.

71 Арзуманов А.А., Неменов Л.М., Анисимов O.K. и др. Изохронный циклотрон с регулируемой энергией ионов // Известия АН КазССР. – 1973. – №4. – С. 6-15.

72 Балакин В.Г., Месяц И.Н. Физика ускорителей. ‒ М., 2004. ‒ 392 с.

73 Иванов А.А., Карцев В.Г. Зарядталған бөлшектердің үдеткіштерінің физикасы мен техникасының негіздері. ‒ М.: Энергоатомиздат, 1985. ‒ 504 б.

74 Дуйсебаев А.Д., Иванов Г.Н., Рыбин С.Н. Камера рассеяния для исследования продуктов ядерных реакций на пучке циклотрона // Изв. АН КазССР. – 1983. – №2. – С. 80-81.

75 Knoll G.F. Radiation Detection and Measurement. – Ed. 4th. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2010. – 864 p.

76 Bethe H. Zur Theorie des Durchgangs schneller korpusku-larstallen durch Materie // Ann. d. Phys. – 1930. – Vol. 5. – Р. 325-400.

77 Bloch E. Bremsvermogen von Atomen mit Mehreren Elektronen // Z. Phys. – 1933. – Vol. 81. – Р. 363-376.

78 Экспериментальное и теоретическое исследование структуры ядер и механизма предравновесного распада: отчет о НИР (заключительный) / ИЯФ АН Каз ССР. – Алматы, 1985. – 128 с. – Инв. №81086400.

79 Блехман А.М., Дуйсебаев А.Д., Канашевич В.И. Параметризация тормозных способностей легких частиц и ее использование при калибровке многодетекторных спектрометров // Известия АН КазССР. – 1988. – №2(141). – С. 89-92.

80 Leo W.R. Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments. A How-to Approach. – Berlin: Springer, 1994. – 382 p.

81 Пучеров Н.Н., Борзаковский А.Е., Романовский С.В. и др. Таблицы пробегов заряженных частиц с энергией до 8 МэВ. – Киев: Наукова думка, 1977. – 313 с.

82 Пучеров Н.Н., Романовский С.В., Чеснокова Т.Д. Таблицы массовой тормозной способности пробегов заряженных частиц с энергией 1-100 МэВ. – Киев: Наукова думка, 1975. – 296 с.

83 Skyrme D.J. The passage of charged particles through silicon // Nucl. Instr. and Meth. – 1967. – Vol. 1, Issue 57. – Р. 61-73.

84 Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T. et al. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. – Ed. 3rd. – Cambridge, 2007. – 1232 p.

85 Ho H., Gonthier P.L. Transformation of cross-sections // Nucl. Instr. and Meth. – 1981. – Vol. 1, Issue 190. – Р. 75-80.

86 Балдин А.М., Гольданский В.И., Максименко В.М. и др. Кинематика ядерных реакций. – М.: Атомиздат, 1968. – 455 с.

87 Gadioli E., Hodgson P.E. Pre-equilibrium Nuclear Reactions. – Oxford, 1992. – 386 p.

88 Griffin J.J. Statistical model of intermediate structure // Phys. Rev. Lett. –1966. – Vol. 17, Issue 9. – Р. 478-481.

89 Kalbach C. Two-component exciton model: Basic formalism away from shell closures // Phys. Rev. – 1986. – Vol. C33. – P. 818-833.

90 Williams F.C. Particle-hole state density in the uniform spacing model // Nucl. Phys. – 1971. – Vol. A166. – P. 231-240.

91 Kalbach C. Shell-corrected particle-hole state densities for pre-equilibrium reaction calculations // J. Phys. − 1995. – Vol. G21. − P. 1499-1518.

92 Blann M. Extensions of Griffins statistical model for medium-energy nuclear reactions // Phys. Rev. Lett. – 1968. – Vol. 18, Issue 21. – Р. 1357-1360.

93 Williams F.C. Intermediate state transitions in the Griffin model // Phys. Lett. – 1970. – Vol. B31, Issue 4. – Р. 184-186.

94 Kalbach C. Preequilibrium reactions with complex particle channels // Phys. Rev. – 2005. – Vol. C71. – P.034606-1-034606-23.

95 Kalbach-Cline C., Blann M. The preequilibrium statistical model description of the nuclear equilibration process and parameterisation of the model // Nucl. Phys. – 1971. – Vol.A72. – Р. 225-259.

96 Kalbach-Cline C. Extensions to the pre-equilibrium statistical model and a study of complex particle emission // Nucl. Phys. – 1972. – Vol. A193. – P. 417-437.

97 Kalbach C. Phenomenology of continuum angular distributions. II. Griffin preequilibrium model // Phys. Rev. – 1981. – Vol. C23, Issue 1. – P. 124-135.

98 Kalbach C. PRECO-2006: Exiton model preequilibrium nuclear reaction code with direct reaction. – Durham, 2007. – 184 p.

99 Narasimha Murthy K.H., Chatterjee A., Gupta S.K. Simple Patameterization for Optical Reactions Cross Sections // Procced. internat’ conf. on Nucl. Cross Sections for Technology. – Knoxville, 1979. – Р. 793-795.

100 Chatterjee A., Murthy K.H.N., Gupta S.K. Optical reaction cross-sections for light projectiles // Pramāna. – 1981. – Vol. 5, Issue 16. – Р. 391-402.

101 Chadwick M.B. et al. ENDF/B-VII.0: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology // Nuclear Data Sheets. – 2006. – Vol. 107. – P. 2931-3060.

102 Koning A.J. et al. Talys-1.0 // Proceed. of the internat. conf. on Nuclear Data for Science and Technology. – Nice, 2008. – P. 211-214.

103 Feshbach H., Kerman A., Koonin S. Statistical theory of multi-step compound and direct reactions // Ann. Phys. – 1980. – Vol. 125. – Р. 429-476.

104 Feshbach H. Doorway states and pre-equilibrium reactions // Rev. Mod. Phys. – 1974. – Vol. 1, Issue 46. – Р. 1-5.

105 Herman М., Reffo G., Weidenmüller H.A. EMPIRE: statistical model code for nuclear reaction calculations (version 2.13 Trieste). – Vienna: IAEA, 2000. – 83 p.

106 Bersillon O. SCAT2. - Un programme de modele optique spherique. – Trieste, 1981. – 75 p.

107 Udagawa T., Tamura T. The Multistep Direct Reaction Theory for the Pre-Equilibrium Nuclear Reactions // Physics Reports. – 1980. – Vol. 67, Issue 2. – P. 73-139.

108 Lenske H., Wolter H.H. Statistical direct reaction theory for dissipative heavy ion collisions in the Fermi energy domain // Nucl. Phys. – 1992. – Vol. A538. – Р. 483-489.

109 Griffin J.J. Statistical Model of Intermediate Structure // Physical Review Letters. – 1966. – Vol. 17, Issue 10. – P. 478-481.

110 Zholdybayev T.K., Alieva G., Sadykov B.M. et al. Study of inclusive cross sections of 103Rh(p;xp) AND (p;xα) reactions at the proton energy of 22 MeV // Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement. – 2021. – Vol. 14. – P. 821-825.

111 Mukhamejanov Y., Alieva G., Alimov D. et al. Investigation of (p,xp) and (p,xα) reaction of 30-MeV protons with the 103Rh nucleus // Acta Physica Polonica B. – 2020. – Vol. 51. – P. 783-788.

112 Алиева Г., Кабрахимова Г.Д., Садыков Б.М. и др. Эмиссия вторичных протонов из реакции (p,xp) при энергии 30 МэВ на ядре 103Rh // Вестник ЕНУ. – 2019 – №2(127). – С. 8-15.

113 Керимкулов Ж.К., Алиева Г.Ж., Мукан Ж. и др. Исследование реакции (p,xd) на ядре 120Sn при энергии протонов 30 МэВ // Вестник Казахского Национального уинверситета им. Аль-Фараби. – 2021. – Т. 79, №4. – С. 26-32.