

АНДАТПА

«8D05308 – Ядролық физика» білім беру бағдарламасы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін ұсынылған « ${}^6\text{Li}$ және ${}^8\text{Be}$ жеңіл атом ядроларының микроскопиялық екі және үш кластерлік моделі» атты Калжигитов Нурсултан Кувандиковичтің диссертациялық жұмысына

Диссертациялық жұмыстың жалпы сипаттамасы. Диссертация екі кластерлік және үш кластерлік жуықтаудағы ${}^6\text{Li}$ және ${}^8\text{Be}$ ядроларының құрылымы мен резонанстық күйлерін егжей-тегжейлі зерттеуге арналған. Бұл жұмыста өзара әрекеттесетін кластерлердің толқындық функциясы үшін неғұрлым нақты жағдайларды ескере отырып, ядролардың құрылымына және олардың резонанстарына әртүрлі әсерлердің ықпалын зерттеуге көп көңіл бөлінеді.

Диссертация тақырыбының өзектілігі. Ядролық физикада және онымен байланысты ғылым салаларында бүгінгі күнге дейін атом ядроларының құрылымы мен олардың ішіндегі нуклон-нуклондық өзара әрекеттесу формасына қатысты көптеген сұрақтар ашық және шешілмеген күйінде қалып отыр. Атом ядросы теориясында эксперименттерден алынған барлық сипаттамалар мен қасиеттерді қамтитын бірыңғай модель әлі жасалған жоқ. Қазіргі уақытта төмен энергияларда жүргізіліп жатқан эксперименттер үлкен қиындықпен жүзеге асырылуда және олардың нәтижелері теориялық есептеулерден екі немесе одан да көп есе айтарлықтай ауытқуларға ие. Теориялар мен ядролық модельдерде де ядролық өзара әсерлесу потенциалының нақты түрі әлі анықталмаған, бұл эксперименттерден алынған барлық ақпаратты қамти алмауда. Осыған байланысты, бұрын жасалған көптеген ашылуларға қарамастан, атом ядросы туралы теория жаңа эксперименттік және теориялық деректермен толықтырылып, дами беруде. Бұл салада жүргізілген зерттеулер барысында атом ядроларының құрылымы мен олардың өзара әрекеттесуін зерттеуге арналған жаңа модельдер жасалып қана қоймай, жаңа деректерді ескере отырып, қолданыстағы модельдер де жетілдіріледі.

Көптеген резонанстық күйлердің табиғаты, жеңіл және ауыр ядролар үшін де, әлі күнге дейін белгісіз болып отыр. Бұл күйлердің түзілуі ядролық физиканың іргелі сұрақтарын тікелей қозғайды, бұл ядролық және термоядролық реакцияларға қатысты болуымен қатар, онымен байланысты астрофизика салаларына да әсер етеді. Бұл резонанстық күйлердің көрінісі ғаламдағы заттың эволюциясын түсіну үшін үлкен қызығушылық тудырады. Бүгінгі күнге дейін барлығына белгілі ашық мәселелердің қатарына келесілерді жатқызуға болады: Хойл күйі және космологиялық литий мәселесі. Бұл құбылыстарды түсіну және шешу зерттелетін атомдық ядролардың ішіндегі және олардың өзара әсерлесулерінде орын алатын құбылыстармен тығыз байланысты.

Жеңіл ядроларды зерттеуде жиі қолданылатын бірнеше теориялық әдістер бар. Бұл әдістерге көпбөлшекті қабықшалар моделі, Хартри-Фок әдісі

және кластерлік модельдің әртүрлі нұсқалары жатады. Кластерлік модельдер макроскопиялық болуы мүмкін, мұнда зерттелетін кластерлердің ішкі құрылымы ескерілмейді, немесе микроскопиялық болуы мүмкін, мұнда кластерлер арасындағы өзара әрекеттесуді қарастыру барысында олардың ішкі құрылымы да сипатталады. Осы диссертациялық жұмыста жүргізілген зерттеулерде микроскопиялық кластерлік модель әдісіне, нақтырақ айтқанда, резонанстық топтар әдісінің алгебралық нұсқасына басымдық берілді.

Диссертация тақырыбы бойынша жүргізілген зерттеулер ${}^6\text{Li}$ және ${}^8\text{Be}$ ядроларындағы резонанстық күйлердің табиғатын зерттеуге бағытталған, олар ядролық физика мен астрофизиканың көптеген мәселелерінде маңызды рөл атқарады. Өз құрылымында ерекше қасиеттерге ие бұл ядролар ядролық резонанстарды зерттеудің стандартты әдістерін (S-матрица, шашырау фазалары, серпімді және серпімсіз процестердің қималары) қолдану арқылы, сондай-ақ кеңейтілген талдау әдістерін (ішкі аймақтағы толқындық функция салмағы, кластерлер арасындағы орташа қашықтық және үздіксіз спектр күйіндегі спектроскопиялық фактор) пайдалана отырып қарастырылды. Бұл зерттелетін резонанстардың табиғатына, олардың пайда болуына және оларды тудыратын әсерлерге кеңірек көзқараспен қарауға мүмкіндік берді. Осы себепті диссертация тақырыбы бойынша зерттеулерде кластерлік модель, дәлірек айтқанда, резонанстық топтар әдісінің алгебралық нұсқасы таңдалды. Сондай-ақ бірнеше бинарлық реакция арналарының есебін қамтитын жетілдірілген әдістің жаңа алгоритмі әзірленіп ұсынылды. Таңдалған кластерлік модель әдістерін қолдану кластерлік поляризация әсерінің ядролық резонанстардың құрылымы, формасы және көріністеріне әсер етуімен байланысты неғұрлым күрделі және аз зерттелген сұрақтарды қозғауға мүмкіндік берді. Сонымен қатар, қолданылатын модель шеңберінде өзара әрекеттесетін кластерлердің толқындық функцияларын неғұрлым шынайы сипаттаудан туындайтын аз зерттелген әсерлер де қарастырылды.

Диссертациялық жұмыстың мақсаты – кластерлік поляризация мен Паули принципінің жеңіл ядролар спектріне әсерін зерттеу.

Зерттеудің міндеттері:

1. ${}^6\text{Li}$ және ${}^8\text{Be}$ ядроларының құрылымын екікластерлік, содан кейін үшкластерлік модельдерді қолдана отырып, РТӨ тәсілі аясындағы есептеулер негізінде кезең-кезеңімен зерттеу.

2. Зерттелетін ядролардың негізгі қасиеттері мен сипаттамаларын, сондай-ақ олардың резонансты күйлерінің табиғатын стандартты сипаттау әдістерін және кеңейтілген әдістерді қолдана отырып талдау.

3. Кластерлік модельді бірнеше үшкластерлік конфигурацияларды және кластерлердің жақындасу кезінде олардың поляризациясын ескеру мүмкіндігіне қарай кеңейту (жалпылау).

4. ${}^6\text{Li}$ ядросындағы байланысқан және резонансты күйлердің құрылымына кластерлік поляризацияның әсерлерін зерттеу.

5. Жеңіл ядролар құрылымдарының кең ауқымды есептеулерінде артефактілі Паули резонанстарының пайда болу себептерін зерттеу және оларды жоюдың схемасын табу.

Зерттеу нысандары: ${}^6\text{Li}$ және ${}^8\text{Be}$ жеңіл ядролары.

Зерттеу пәні: ${}^6\text{Li}$ және ${}^8\text{Be}$ ядроларының байланысқан және резонансты күйлері, толқындық функциялары, спектрлері, шашырау фазалары, сондай-ақ екікластерлік және үшкластерлік модельдердегі оларға ықпал ететін құбылыстар мен әсерлер.

Зерттеу әдістері: резонансты топтар әдісі, атом ядроларының екікластерлік және үшкластерлік модельдері.

${}^8\text{Be}$ ядросының серпімді альфа-альфа шашырауы мен резонанстық құрылымын зерттеу үшін микроскопиялық екікластерлік модель қолданылды. Бұл модель резонанстық топтар әдісінің алгебралық нұсқасын білдіреді, ол екікластерлік жүйенің толқындық функциясын гармоникалық осциллятордың толық базистік функциялары бойынша, яғни осцилляторлық функциялар бойынша жіктеуге негізделеді. Әр кластер ішіндегі нуклондар арасындағы және кластерлер арасындағы өзара әрекеттесуді анықтау үшін үш белгілі, жартылай реалистік нуклон-нуклондық потенциал қолданылды: модификацияланған Хасегава-Нагата потенциалы, Волков В2 потенциалы және Миннеота потенциалы. Олардың әрқайсысы ерекше сипаттамаларға ие және нуклондар арасындағы қашықтық аз болған кездегі ядро өлшемдерімен ерекшеленеді, бұл күшті, орташа және әлсіз ядролық әсерлерді жақсы жүзеге асырады. Бұл есептік шамалардың нуклон-нуклондық потенциал формасына тәуелділігін зерттеуге мүмкіндік береді. Резонанстық күйлердің толқындық функцияларын егжей-тегжейлі талдау осцилляторлық, координаттық және импульстік кеңістіктерде жүргізілді.

${}^6\text{Li}$ ядросының резонанстық құрылымын және оның ішіндегі әртүрлі процестерді зерттеу үшін ${}^8\text{Be}$ ядросына да микроскопиялық екікластерлік РТӨАН моделі қолданылды. Бұдан бөлек, ${}^6\text{Li}$ ядросын зерттеу үшін жетілдірілген микроскопиялық көпарналы модель қолданылды, ол екі үшкластерлік конфигурацияны қамти отырып, ядроның барлық бинарлық арналарын неғұрлым нақты ескеруге мүмкіндік берді. Қолданылған әдіс ${}^6\text{Li}$ ядросының резонанстық күйлерінің спектрін энергияның кең диапазонында егжей-тегжейлі зерттеуге және оның формасы мен қасиеттеріне ықпал ететін әсерлерді анықтауда жақындауға мүмкіндік берді. Жаңа әдістің ерекше ерекшелігі ядролық жүйе күйін сипаттау үшін екі түрлі базистік функциялардың: осцилляторлық және гаусстық функциялардың бір уақытта қолданылуы болып табылады, бұл зерттелетін ядролық жүйенің толқындық функциясының неғұрлым шынайы түрін ескеруге мүмкіндік берді.

Қорғауға шығарылатын ережелер

1) Резонанстық күйлер кеңістікте ықшам формаға ие болады, және резонанс ені аз болған сайын күй ықшамдала түседі. Үздіксіз спектрдегі барлық күйлердің ішінде резонанстық күйлер массалық орташа квадраттық радиустар мен кластерлер арасындағы орташа қашықтық бойынша минималды мәндерге ие. Мысалы, ${}^8\text{Be}$ ядросындағы 1^+ резонансының массалық орташа квадраттық радиусы басқа күйлердің үздіксіз спектрдегі ұқсас радиусынан 3 есе аз.

2) Өзара әсерлесетін кластерлердің поляризациясы ${}^6\text{Li}$ ядросының негізгі күйінің және оның төмен жатқан резонанстық күйлерінің қалыптасуында маңызды рөл атқарады, бұл есептелген спектрлік параметрлерді олардың эксперименттік мәндеріне жақындатады. 1^+ негізгі күй үшін кластерлік поляризация энергияны 1.2 МэВ-ке төмендетеді (-0.249 -дан -1.474 -ке дейін), сондай-ақ 3^+ резонансының энергиясын 2.4 есеге және енін 10 есеге азайтады. Ал ${}^6\text{Li}$ ядросының жұптылығы теріс жоғары қозған күйлеріне кластерлік поляризацияның әсері өте әлсіз. Кластерлік поляризацияны визуализациялау әдісі ұсынылды.

3) Артефактілі резонанстардың (Паули резонанстары) пайда болу шарттарын анықтау үшін нақты критерий және оларды бөлу алгоритмі тұжырымдалды.

Зерттеудің жаңалығы және жұмыстың практикалық маңыздылығы. Атом ядроларының құрылымдарын кластерлік көрініс арқылы зерттеу қазіргі уақытта әлемнің көптеген елдерінде: Еуропа елдерінде, Жапонияда, АҚШ-та, жақын және алыс шетелдерде көптеген зерттеу топтарымен жүргізілуде. Қазақстанда ядролық құрылымдар мен олардың өзара әсерлесулерін зерттеудің теориялық және эксперименттік ядролық физика салаларында бай тарихы және бірнеше ғылыми бағыттары бар.

Жүргізілген жұмыстар мен алынған нәтижелер Қазақстанда да, әлемде де ғылымды дамытудағы қазіргі өзекті бағыттарға сәйкес келеді. Алынған нәтижелер абсолютті жаңа болып табылады және кластерлік ядро моделін дамытуға өз үлесін қосып, бұрыннан бар мәселелерге жаңа көзқарас ұсынады.

Жүргізілген зерттеулер шеңберінде:

1) ${}^8\text{Be}$ ядросының тар және кең резонанстары әртүрлі физикалық шамаларда: стандартты әдістерде (шашырау фазалары, шашырау қималары) және кеңейтілген талдау әдістерінде (ішкі аймақтағы толқындық функция салмағы, кластерлер арасындағы орташа қашықтық және спектроскопиялық фактор) қалай көрінетіндігі көрсетілді. Резонанстық күйлердің толқындық функцияларының координаттық және осцилляторлық кеңістіктерде өзара байланысы айқын көрсетілді. Кластерлер арасындағы орташа қашықтықты дұрыс бағалаудың жолдары ұсынылды.

2) Жеңіл ядролардағы резонанстардың табиғаты және Паули принципінің резонанстық күйлердің толқындық функцияларына әсері егжей-тегжейлі талданды. Нәтижесінде, резонанс ені аз болған сайын Паули принципінің әсері соғұрлым күштірек болатыны көрсетілді.

3) Жеңіл ядролардың көптеген жағдайларындағы Паули резонанстарының қасиеттерін жүйелі түрде талдау нәтижесінде Паули резонанстарының пайда болу шегі анықталды. Сонымен қатар, дерлік тыйым салынған күйлер (almost forbidden Pauli states) мен рұқсат етілген күйлер (allowed Pauli states) арасындағы шекара анықталды.

4) Паули резонанстарының әсерін жоюдың жаңа әдісі ұсынылды;

5) Кластерлік поляризацияның ${}^6\text{Li}$ ядросының байланысқан және резонанстық күйлерін қалыптастырудағы рөлі зерттелді.

Бұл жұмыстың басқа ғылыми зерттеулермен байланысы.

Осы диссертациялық жұмыста 2021-2023 жылдары жүзеге асырылған АР09259876 «Шағын жұлдызды нысандардың физикасы» ғылыми-зерттеу жобасының негізгі міндеттерін орындау барысында алынған материалдар мен нәтижелер ұсынылды. Диссертацияда қарастырылған бағыт бойынша зерттеулер әрі қарай 2024-2026 жылдарға арналған «Жас Ғалым» бағдарламасы аясындағы АР22683187 «Көпарналы және көпкластерлі модельдердегі жеңіл ядролар мен гиперядролардың құрылымы» ғылыми-зерттеу жобасында жалғастырылуда.

Алынған нәтижелердің сенімділігі мен негізділігі. Жүргізілген барлық зерттеулер ғылыми этика принциптері мен негізгі нормаларын сақтай отырып орындалды. Алынған нәтижелер мен ғылыми зерттеудің негізгі тұжырымдары бірнеше мәрте халықаралық ғылыми конференцияларда жоғары білікті мамандардың қатысуымен баяндалып, ұсынылды. Нәтижелер мұқият рецензиялаудан өтіп, Scopus және Web of Science дерекқорларында индекстелетін жоғары рейтингті ғылыми басылымдарда, сонымен қатар, ҒЖБССҚК ұсынған отандық журналдарда.

Автордың жеке үлесі. Докторант диссертациялық зерттеу тақырыбы бойынша келесі жұмыстарды өз бетінше орындады: әдебиет көздеріне шолу жасау, сандық және аналитикалық есептеулер жүргізу, алынған нәтижелерді талдау, зерттелетін ${}^6\text{Li}$ және ${}^8\text{Be}$ ядроларының серпімді және серпімсіз шашырау фазаларының жылжуын, сондай-ақ резонанстық күйлердің толқындық функцияларын құру. Сонымен қатар, диссертациялық зерттеу тақырыбы бойынша жарияланған мақалалардың мәтінін жазу және түзету жұмыстарын жүргізді. Докторант мақалалардың қолжазбаларын отандық және шетелдік ғылыми басылымдардың редакцияларына корреспонденция авторы ретінде ұсынуды жүзеге асырды.