

Ткаченко Алеся Сергеевнаның бD060500 – Ядролық физика мамандығы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алуға ұсынылған «Спиндік құрылымы $1+1/2, 1+1, 1/2+3/2$ болатын ядролық процестерді фазалық талдау және олардың астрофизикалық қолданылулары» атты диссертациясының
АҢДАТПАСЫ

Жұмыстың жалпы сипаттамасы. Диссертацияда аралық энергиядағы адрондар мен мезондардың шашырауының және төменгі энергиядағы ядролық астрофизика мен плазма физикасының кең ауқымды есептерін дәл шешуге қолдану үшін арна спині жоғарғы мәнге ($S > 1/2$) ие үрдістерді фазалық талдаудың формализмі жасалған. Тәжірибеде бақыланатын асимптотикалық нормалау коэффициенттері (АНК) арқылы әсерлесу потенциалын қалпына келтіру туралы кері есепті шешкенде, байланыс энергиясы және үздіксіз спектрдегі резонанстардың орыны мен енін анықтағанда жетілдірілген потенциалдық кластерлік модель (ЖПКМ) ауқымында дәл фазалық талдау әдісінің қысаңдануының аналитикалық бағамы анықталған. Жұмыста ЖПКМ-ның негізінде ${}^3\text{He}({}^2\text{H}, \gamma){}^5\text{Li}$ және ${}^{10}\text{Be}(n, \gamma){}^{11}\text{Be}$ реакциялары астрофизикалық энергияда қарастырылған.

Зерттеудің өзектілігі. Ғаламның эволюциясы үлкен жарылыстан кейін химиялық элементтер түзілуінен басталады, ал бұл түзілудің алғашқы буыны $p(n, \gamma)d$ реакциясы деп есептеледі. Ғаламның эволюциясы кезіндегі химиялық элементтердің түзілу үрдісін сипаттау мәселесі нуклон-нуклондық (NN) әсерлесу теориясының дамуына серпін берді. Қазіргі кезеңде NN -потенциалдарының ондаған түрлері бар, бірақ олардың ешқайсысы барлық үрдістерді толығымен түсіндіре алмайды. Сондықтан бұл жағдай *a priori* дейтерийден өзге күрделі атом ядроларының ортақ теориясын жасауға мүмкіндік бермейді.

Ал ауыр химиялық элементтердің синтезін зерттеу микроскопиялық тұрғыдан кванттық механика принциптеріне негізделген атом ядросының модельдеріне сүйенеді. Қазіргі ғылыми әлемде жалпыға бірдей танылған модельдердің бірі - «резонанстық топтар әдісі» (РТӘ) деп аталатын модель. Сонымен нақтылы есептерді шешу кезінде NN -потенциалын талқылауға қатысты кейбір жуықтаулардың болатыны сөзсіз.

Зерттеудің мүмкін болатын жолдардың бірі – серпімді шашырау кезіндегі тәжірибелік мәліметтер, бақыланатын энергетикалық спектрлер мен байланысқан күйлер үшін асимптотикалық тұрақтылар, сондай-ақ заряд және масса радиусы сияқты ядролардың геометриялық сипаттамаларына негізделген тұрақты бинарлық кластерлік арнадағы өзара әрекеттесу потенциалын қалпына келтіру. Бұл тәсіл кластерлік потенциалдар моделі (КПМ) ретінде белгілі.

КПМ ауқымында Паулидің іргелі принципін ескерудің екі жолы бар. Біріншісі, ядролық потенциалда аз аралықта тебілу болады деп болжау, яғни кластерлердің қабаттасуының ықтималдығының аз болатындығын, немесе

басқаша айтқанда олардың дербестігін ескеру. Екінші әдіс терең тартылыс потенциалын енгізуге негізделген, ол дискретті және үздіксіз спектрде Паули принципімен тыйым салынған күйлер (ТСК) болады деп болжалдайды. КППМ ТСК-ны қолдану кластерлік потенциалдың жетілдірілген моделі (КПЖМ) деп аталды

Бұл әдіс бұған дейін энергияның астрофизикалық және жылулық мәндерінде мынадай: $n^2\text{H}$, $p^2\text{H}$, $p^3\text{H}$, $n^6\text{Li}$, $p^6\text{Li}$, $n^7\text{Li}$, $p^7\text{Li}$, $n^8\text{Li}$, $p^9\text{Be}$, $n^9\text{Be}$, $n^{10}\text{Be}$, $p^{10}\text{B}$, $n^{10}\text{B}$, $p^{11}\text{B}$, $n^{11}\text{B}$, $n^{12}\text{C}$, $p^{12}\text{C}$, $n^{13}\text{C}$, $p^{13}\text{C}$, $n^{14}\text{C}$, $p^{14}\text{C}$, $n^{14}\text{N}$, $n^{15}\text{N}$, $p^{15}\text{N}$, $n^{16}\text{O}$, және $p^{16}\text{O}$ нуклон-ядролық арналарда нуклондарды қармау үрдістерінің толық қималары мен S -факторларын есептеу үшін қолданылған. КПЖМ қолдану тәжірибелік мәліметтерді түсіндіруге, ал кейбір жағдайларда төменгі және асатөменгі энергияларда астрофизикалық S -факторлардың сипатын сенімді болжауға мүмкіндік береді.

Бұл жұмыста төменгі және астрофизикалық энергияда ${}^3\text{He}({}^2\text{H}, \gamma){}^5\text{Li}$ және ${}^{10}\text{Be}(n, \gamma){}^{11}\text{Be}$ реакциялары алғаш рет зерттелген.

Изобарлық баламалы арналардағы ${}^3\text{He}({}^2\text{H}, \gamma){}^5\text{Li}$ және ${}^3\text{H}({}^2\text{H}, \gamma){}^5\text{He}$ радиациялық қармау реакцияларына деген қызығушылық мынадай себептерге байланысты: бұл реакциялар жұлдыздардың пайда болуының алғашқы кезеңінде болатын нуклеосинтез үрдісіндегі тізбектің бір буыны және сонымен қатар бастапқы Ғаламдағы жеңіл элементтердің синтездеуінің белгілі мәселесін шешуге мүмкіндік беретін үміткерлердің бірі болып табылады. Сонымен қатар, қысқа өмір сүретін ${}^5\text{Li}$ изотопы қатысатын астрофизикалық үрдістерде ${}^6\text{Li}$ туындауының мүмкін сценарийі қарастырылған.

Үлкен жарылыстың нуклеосинтезінде ${}^6\text{Li}$ түзілуінің балама жолы ретінде екі сатылы ${}^2\text{H} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^5\text{Li} + \gamma$ және $n + {}^5\text{Li} + \gamma \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$ үрдістері ұсынылады.

Бүгінгі таңда нейтроныбасым бериллий изотоптарының синтезіндегі жұлдыздық динамиканы зерттеу Раушердің 1993 жылы ${}^{10}\text{Be}$ радиациялық нейтронды қармау реакциясының $\langle \sigma v \rangle$ жылдамдығы үшін жасалған бірден-бір модельсіз есептеулеріне негізделген. Ал біздің жұмыста ${}^{10}\text{Be}$ спектрі мен оның спектроскопиялық сипаттамалары жөнінде заманауи мәліметтер негізінде алынған ${}^{10}\text{Be}(n, \gamma){}^{11}\text{Be}$ реакциясының жылдамдығының бағамы $\langle \sigma v \rangle$ -ның түбегейлі басқа энергетикалық тәуелділігін көрсетеді. Нәтижесінде алғаш рет Ғаламның эволюциялық тізбектерін «бериллий» немесе «бор» сценарийлері бойынша жаңаша бағалау қажет болады.

Жұмыстың мақсаты: жоғары спинді шашырау процестерін фазалық талдауға мүмкіндік беретін формализмді әзірлеу, сонымен қатар астрофизикалық есептерді шешуге қолданылатын бинарлық кластерлік арналарда өзара әрекеттесу потенциалдарын құру әдістерін аналитикалық тұрғыдан бағалау және де сынып көру.

Зерттеу міндеттері:

1. Спин құрылымы $1 + 1/2$, $1 + 3/2$ және $1 + 1$ болатын ядролық жүйелер үшін фазалық талдау формализмін құру. Шашырау фазаларын есептеуге арналған компьютерлік бағдарлама жасау;
2. Шашырау фазаларын табудың және бинарлық кластерлік арналарда өзара әрекеттесу потенциалын құрудың балама әдістеріне талдау жасау;
3. ПКЖМ аясында төменгі және астрофизикалық энергиялардағы бинарлық әсерлесу потенциалдарын құру;
4. Шашыраудың жалпы қималарын, астрофизикалық S -факторды және ${}^3\text{He}({}^2\text{H}, \gamma){}^5\text{Li}$ және ${}^{10}\text{Be}(n, \gamma){}^{11}\text{Be}$ реакцияларының жылдамдықтарын есептеу.

Зерттеу нысаны: жеңіл ядролардың кластерлік жүйелері.

Зерттеу пәні: спині бар бөлшектердің бинарлық арналарда шашырау үрдістері, сондай-ақ астрофизикалық энергиядағы радиациялық реакциялар.

Зерттеу әдістері: бұрыштық моменттің кванттық теориясы, парциалды толқындар әдісі, дифференциалдық теңдеулер мен алгебралық теңдеулер жүйелерін шешудің сандық әдістері, Шредингер теңдеуін шешудің сандық әдістері.

Қорғауға ұсынылатын тұжырымдар:

1. Спині $S > 1/2$ болатын үрдістер үшін спин-орбиталық және спин-спиндік өзара әрекеттесуді ескеретін соқтығысудың кванттық теориясы аясында, парциалды толқындар саны мен арна спинін шектемеген жағдайда шашыраудың дифференциалдық қимасы әмбебап болады деген тұжырым.

2. Үлкен Жарылыс кезінде ${}^6\text{Li}$ ядросының синтезделуінің екі сатылы ${}^2\text{H} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^5\text{Li} + \gamma$ және $n + {}^5\text{Li} + \gamma \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$ реакцияларынан тұратын механизмі 5 МэВ-ға дейінгі энергиялар үшін толық қима, астрофизикалық S -фактор және ${}^3\text{He}({}^2\text{H}, \gamma){}^5\text{Li}$ реакциясының жылдамдығы негізінде тыйым салынған күйлерді ескере отырып, жетілдірілген потенциалдың кластерлік модель аясында есептеудің нәтижесі Ғаламдағы ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$ қатынасын түсіндіруге мүмкіндік береді деген тұжырым.

3. Тыйым салынған күйлерді ескеретін жетілдірілген потенциалдық кластерлік модель 25,3 МэВ-тан 10,0 МэВ-қа дейінгі энергия диапазонында ${}^{10}\text{Be}$ ядросының нейтрондарды радиациялық қармаудың толық қималары жөніндегі тәжірибелік деректерді түсіндіруге мүмкіндік береді деген тұжырым.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы:

1. Мультиплеттік күйлер үшін серпімді шашырау қимасын құрудың әмбебап математикалық формализмі жасалды ($2S+1=1$ синглеттік күйлерден бастап $2S+1=6$ секстеттік күйлерге дейін), ол спин-орбиталық және спин-спиндік өзара әрекеттесуін ескереді және парциалдық толқындардың кез келген саны үшін, фазалық талдау жүргізуге мүмкіндік береді.

2. Тыйым салынған күйлерді ескере отырып, жетілдірілген потенциалды кластерлік моделдің негізінде 5 МэВ-қа дейінгі энергия үшін ${}^3\text{He}({}^2\text{H},\gamma){}^5\text{Li}$ үрдісінің эксперименттік толық қимасының мәні түсіндірілді. Бұл процестің Үлкен жарылыс нуклеосинтезінде ${}^6\text{Li}$ -дің түзілуіндегі рөлі екі сатылы ${}^2\text{H} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^5\text{Li} + \gamma$ және $n + {}^5\text{Li} + \gamma \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$ реакцияларынан тұратын механизмге қатысуы арқылы анықталды.

3. Жетілдірілген потенциалды кластер моделінің аясында ${}^{10}\text{Be}$ ядросының нейтрондарды радиациялық қармау үрдісінің толық қимасының тәжірибелік мәндері түсіндірілді, сондай-ақ 25,3 мэВ-дан 10,0 МэВ-ға дейінгі энергия диапазонындағы осы реакцияның жылдамдықтары есептелді.

Зерттеудің теориялық және практикалық маңыздылығы.

Спин құрылымы $\vec{s}_1 + \vec{s}_2 = \vec{1} + \vec{1} / 2$, $\vec{s}_1 + \vec{s}_2 = \vec{1} / 2 + \vec{3} / 2$ және $\vec{s}_1 + \vec{s}_2 = \vec{1} + \vec{1}$ болатын шашырау матрицасы үшін парциалды амплитудалар бойынша жіктеу түрінде ұсынылған математикалық формализм шашыраудың дифференциалдық қимасы жөніндегі тәжірибелік деректердің негізінде серпімді де, серпімсіз емес те үрдістерге жүйелі фазалық талдау жасауға мүмкіндік береді. Бұл амплитудалар бұрыштық таралудың ассиметриясы, векторлық және тензорлық поляризация, поляризацияның берілу коэффициенті тәрізді поляризациялық сипаттамаларды есептеудің құрылымдық элементі болып табылады.

Жасалған математикалық формализмнің ауқымы тек астрофизикалық мәселелермен ғана шектеліп қалмайды; оны, мысалы, плазма физикасындағы аз энергиялы үрдістерді, атап айтқанда, кванттық-механикалық құбылыстарды зерттеуде, сондай-ақ аралық энергия физикасында адрондар мен мезондардың шашырау есептерінде де қолдануға болады.

Тыңғылықты фазалық талдаулар әр түрлі: орталық, спин-спиндік, тензорлық және т.б. күрделі бинарлық әсерлесу потенциалдарын тұрғызуға мүмкіндік береді. Болашақта ұсынылған аналитика негізінде заманауи тәжірибелік мәліметтер негізінде жүйелі фазалық талдау үшін бағдарламалық кодтар мен бағдарламалық жасақтамаларды түзуға болады.

Сонымен қатар, ПҚЖМ негізінде шашырау фазаларын жанама түрде, нақтылап айтсақ жеңіл ядролардың спектрі жөніндегі тәжірибелік: қозу энергиясы E_{cm} , деңгей ені Γ , J^π кванттық сипаттамалары және де асимптотикалық нормалдау коэффициенттері (АНК) тәрізді деректерден алу мүмкіндігін көрсетеді.

Энергияның $25.3 \text{ meV} \leq E \leq 10.0 \text{ MeV}$ аймағында ${}^{10}\text{Be}(n,\gamma){}^{11}\text{Be}$ нейтрондарды радиациялық қармау үрдісі зерттелген. Реакцияның толық қималарының мәні Кулон диссоциациясының өлшемдерімен қалпына келтірілген тәжірибелік мәліметтермен жақсы сәйкес келетінін көрсетеді. Бүгінгі таңда нейтроныбасым бериллий изотоптарының синтезіндегі жұлдыздық динамиканы зерттеу Раушердің 1993 жылы алған ${}^{10}\text{Be}$ радиациялық нейтронды қармау реакциясының $\langle\sigma v\rangle$ жылдамдығы үшін жалғыз модельсіз есептеулеріне негізделген. Біздің есептеулеріміз

$^{10}\text{Be}(n,\gamma)^{11}\text{Be}$ реакциясы үшін $\langle\sigma v\rangle$ мәнінің Раушердің алған мәліметтерінен өзгеше екенін көрсетті. Сондықтан, Ғаламның алғашқы мезеттегі бейнесіндегі жеңіл элементтердің массалық үлесіндегі бериллий тізбегінің рөлі туралы түсінік түбегейлі өзгертуі мүмкін.

ПКЖМ аясында $^3\text{H}^3\text{He}$ және $n^5\text{Li}$ радиациялық қармау үрдістерінің көлденең қималары есептелді, олардың аналитикалық параметрленуі жасалды және де бұл реакциялардың жылдамдығы есептелді.

Жеңіл элементтердің таралуын және $^2\text{H}^3\text{He}$, $^2\text{H}^4\text{He}$ қармау реакцияларының жылдамдықтарын салыстыра отырып, екі сатылы $^2\text{H}+^3\text{He}\rightarrow^5\text{Li}+\gamma$ және $n+^5\text{Li}+\gamma\rightarrow^6\text{Li}+\gamma$ үрдістері әсіресе T_9 температурасы бірге жуық болғанда ^6Li түзілуіне белгілі бір үлес қосады деп ұсынылды. Осы температура интервалында нейтрондардың саны азая бастаған жоқ, ал ^2H дейтерий ядроларының және ^3He изотоптарының саны қазірдің өзінде максимумға жетеді, бұл $^2\text{H}+^3\text{He}\rightarrow^5\text{Li}+\gamma$ реакциясының шығымының жоғарылауына әкеледі. Осымен байланысты бұл реакциялардың Үлкен жарылыстың нуклеосинтезі кезінде, жұлдыздардағы және басқа астрофизикалық үрдістердегі ^6Li ядроларының жиналуына қосқан үлесін дәлірек бағалау үшін қосымша сандық есептеулер жүргізу қажет.

Ізденушінің жеке үлесі. Ткаченко Алеся зерттеудің барлық кезеңдеріне, оның ішінде фазалық талдауды сипатау үшін формализмді жасауға және $^3\text{He}(^2\text{H},\gamma)^5\text{Li}$ және $^3\text{He}(^2\text{H},\gamma)^5\text{Li}$ астрофизикалық үрдістердің ПКЖМ қолдана отырып зерттеуге тікелей қатысты. Зерттеу жұмыстарын әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінде (Алматы, Қазақстан), сондай-ақ Нью-Йорк қалалық университетінде (CUNY, Нью-Йорк, АҚШ) шетелде тағылымдамадан өту кезінде жүргізілді.

Жұмыстың апробациясы және ғылыми басылымдар. Диссертацияда алынған нәтижелер қазақстандық және ресейлік ғылыми журналдарда жарияланды: *International Journal of Mathematics and Physics* (1 мақала), *Russian Physics Journal* (2 мақала), ҚР ҰҒА Хабарлары (1 мақала); импакт-факторы бар шетелдік ғылыми журналдарда: *Nuclear Physics A* (2 мақала) және *Astroparticle Physics* (1 мақала).

Сонымен қатар, ғылыми-зерттеу жұмысының нәтижелері халықаралық конференцияларда баяндалды: «Физиканың заманауи жетістіктері және іргелі физикалық білім беру» 9-шы халықаралық ғылыми конференция (2016 ж., 12-14 қазан, Қазақстан, Алматы), «Фараби Әлемі» студенттер мен жас ғалымдардың халықаралық конференциясы (10-13 сәуір 2017 жылы және 9-12 сәуір 2018 жылы, Қазақстан, Алматы), «Ядролық ғылым және технология» халықаралық ғылыми форумы (12-15 қыркүйек, 2017, Қазақстан, Алматы), *International Conference on Few-Body Problems in Physics* халықаралық конференция (FB22, 9-13 шілде, 2018, Франция, Кон).

Жұмыс нәтижелерінің сенімділігі мен негізділігі есептеулерде кванттық теорияның бұрыштық моментінің алгебралық әдістерінің қолданатындығымен, ал әсерлесу потенциалы мен радиациялық қармау реакциясының сипаттамалары деңгей спектрлері, олардың ені, асимптотикалық тұрақты, қима мен астрофизикалық S-фактор жөніндегі заманауи тәжірибелік деректерге негізделгенімен байланысқан. Осы жұмыста алынған нәтижелердің сенімділігі мен дұрыстығын ҚР БҒМ БҒСБК және РФ ЖАК ұсынған басылымдарда, рецензиялатын халықаралық ғылыми журналдарда, сондай-ақ әртүрлі халықаралық ғылыми конференцияларда жарияланған мақалалар растайды.

Диссертация тақырыбының ғылыми жұмыс жоспарларымен байланысы. Диссертация келесі ғылыми жобалар аясында орындалды:

1. «Әлемдегі термоядролық процестерді зерттеу» (0073-8/ПЦФ-15-МОН/1-16-ОТ, 2015-2017);

2. «Жұлдыздардағы термоядролық процестерді зерттеу және ғаламның алғашқы нуклеосинтезі» (IRN: BR05236322-ОТ-19, 2018-2020).

Диссертацияның көлемі мен құрылымы. Диссертацияның көлемі - 129 баспа бет. Диссертация кіріспеден, 4 бөлімнен, қорытындыдан, пайдаланылған әдебиеттер тізімінен және 2 қосымшадан тұрады. Диссертацияда 106 бет, 19 сурет, 14 кесте бар. Пайдаланылған әдебиет тізімі 147.

Қортындылар. Бұл диссертацияда спинінің мәні үлкен ядролық үрдістерді фазалық талдаудың астрофизикалық есептерге де қолданылуға болатын математикалық формализмі сәтті жасалынған.

Сондай-ақ, ПКЖМ аясында жанама түрде тәжірибелік мәліметтерге (қозу энергиясы, деңгей ені, кванттық сипаттама, АНК) сүйене отырып зерттелетін үрдістердің шашырау фазаларын алу мүмкіндігі көрсетілген.

Алынған шашырау фазаларының негізінде ПКЖМ аясында бинарлы әсерлесу потенциалы құрылды және ${}^3\text{He}({}^2\text{H}, \gamma){}^5\text{Li}$ және ${}^{10}\text{Be}(n, \gamma){}^{11}\text{Be}$ радиациялық қармау реакцияларының сипаттамалары есептелді.

Зерттеу нәтижесінде келесі тұжырымдар жасалды:

1. Спин-орбиталық және спин-спиндік әсерлесуді ескере отырып алынған дифференциалдық қималардың аналитикалық өрнектері спиндерді бүтін және жартылай бүтін мәндерге ие арналарды зерттеуге жарамды. Әрбір, спині S-ке тең арна үшін толық дифференциалдық қима сәйкес ℓ орбиталық моментіне қатысты параметрленген тәуелсіз парциальдық амплитуда арқылы өрнектеледі және осымен байланысты бұл өрнек парциальдық толқындардың кез келген санын ескеруге мүмкіндік береді.

2. Астрофизикалық энергияларда ПКЖМ-ны қолдану S-фактор мен ${}^3\text{He}({}^2\text{H}, \gamma){}^5\text{Li}$ радиациялық қармау реакциясының толық қимасы үшін қолда бар тәжірибелік мәліметтерге сәйкес келетін теориялық нәтижелер алуға мүмкіндік берді. ${}^5\text{Li}(n, \gamma){}^6\text{Li}$ және ${}^3\text{H}({}^3\text{He}, \gamma){}^6\text{Li}$ радиациялық қармау реакцияларының жылдамдықтары мен көлденең қималарының қарапайым

параметрленуі алынды және де осы екі үрдістің жылдамдықтары мен ${}^3\text{He}({}^2\text{H},\gamma){}^5\text{Li}$ реакциясының қармау жылдамдықтары салыстырылды, ${}^5\text{Li}$ ядросының нейтронды қармауының орнықты ${}^6\text{Li}$ ядросының пайда болуына мүмкін үлесі қарастырылды.

Үлкен жарылыстың нуклеосинтезінде температураның $1,0 \times T_9$ аймағында ${}^3\text{He}({}^2\text{H},\gamma){}^5\text{Li}$ қармауында пайда болатын ${}^5\text{Li}$ ядросының нейтрондарды қармауы орнықты ${}^6\text{Li}$ -ның бастапқы жиналуына айтарлықтай үлес қосатындығы сапалы түрде көрсетілді.

3. ПКЖМ аясында $n^{10}\text{Be}$ әсерлесу потенциалы жасалынды. Бұл потенциалдар жалпылай алғанда 25,3 мэВ-тан 10,0 МэВ дейінгі диапазондағы төмен және асатөмен энергияларда ${}^{10}\text{Be}$ ядросының нейтрондарды радиациялық қармауының толық қималарының тәжірибелік мәндерін дұрыс шығарады.

Қималардың теориялық мәні энергияның 10,0 мэВ-ден 10,0 МэВ-қа дейінгі аралығында есептелінді, ал 10 эВ-тан төменгі энергиядағы қималар энергияның қарапайым функциясымен жуықталды.