

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ ва ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ФАН ДОКТОРИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ 16.07.2013.ҒМ.11.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ

ТУРСУНОВ ЭРГАШ МАҲКАМОВИЧ

**ПОТЕНЦИАЛ МОДЕЛЛАР ДОИРАСИДА
ЕНГИЛ ЯДРОЛАР СТРУКТУРАСИ**

**01.04.08 – Атом ядроси ва элементар заррачалар физикаси, тезлаштирувчи техника
(физика-математика фанлари)**

ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2015

УДК 539.12.01; 539.125; 539.143

Докторлик диссертацияси автореферати мундарижаси
Оглавление автореферата докторской диссертации
Content of the thesis of doctoral dissertation

Турсунов Эргаш Махкамovich	
Потенциал моделлар доирасида енгил ядролар структураси	3
Турсунов Эргаш Махкамovich	
Структура легких ядер в рамках потенциальных моделей	27
Tursunov Ergash Makhkamovich	
Structure of light nuclei in the frame of potential models	53
Эълон қилинган ишлар рўйхати	
Список опубликованных работ	
List of published works	75

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ ва ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ
УНИВЕРСИТЕТИ ХУЗУРИДАГИ ФАН ДОКТОРИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ 16.07.2013.ҒМ.11.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ

ТУРСУНОВ ЭРГАШ МАҲКАМОВИЧ

**ПОТЕНЦИАЛ МОДЕЛЛАР ДОИРАСИДА
ЕНГИЛ ЯДРОЛАР СТРУКТУРАСИ**

**01.04.08 – Атом ядроси ва элементар заррачалар физикаси, тезлаштирувчи техника
(физика-математика фанлари)**

ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2015

Докторлик диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида 30.09.2014/В2014.5.FM158 рақами билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Ядро физикаси институтида бажарилган.

Докторлик диссертациясининг тўлиқ матни Ядро физикаси институти ва Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги 16.07.2013.FM.11.01 рақамли илмий кенгаш веб-саҳифасида www.inp.uz манзилига жойлаштирилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз) веб-саҳифага www.inp.uz манзилига ҳамда ZIYONET ахборот-таълим порталида www.ziynet.uz манзилига жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи: **Юлдашев Бехзод Садикович**
физика-математика фанлари доктори, профессор, Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси академиги

Расмий оппонентлар: **Мусаханов Мирзаюсуф Мирзамахмудович**
физика-математика фанлари доктори, профессор, Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси академиги
Блохинцев Леонид Дмитриевич
физика-математика фанлари доктори, профессор
Усманов Пазлитдин Нуритдинович
физика-математика фанлари доктори

Етакчи ташкилот: **Бирлашган ядро тадқиқотлари институти**
Дубна, Москва вилояти, Россия Федерацияси

Диссертация химояси Ядро физикаси институти ва Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги 16.07.2013.FM.11.01 рақамли Илмий кенгашнинг « ____ » _____ 2015 й. соат ____ даги мажлисида бўлади. (100214, Тошкент ш., Улуғбек кўрғони, ЯФИ; тел. (+99871) 150-30-70; факс (+99871) 150-30-80; e-mail: info@inp.uz).

Докторлик диссертацияси Ядро физикаси институти ахборот-ресурс марказида ____ рақами билан рўйхатга олинган, диссертация билан АРМда танишиш мумкин (100214, Тошкент ш., Улуғбек кўрғони, ЯФИ; тел. (+99871) 289-31-19).

Диссертация автореферати 2015 йил « ____ » _____ да тарқатилди
(_____ 2015 й. даги № ____ рақамли реестр баённомаси).

У. С. Салихбаев
Фан доктори илмий даражасини берувчи
илмий кенгаш раиси ф.-м.ф.д., профессор

Р. Ярмухамедов
Фан доктори илмий даражасини берувчи
илмий кенгаш илмий котиби ф.-м.ф.д., профессор

И. Хидиров
Фан доктори илмий даражасини берувчи
илмий кенгаш ҳузуридаги илмий семинар раиси
ф.-м.ф.д., профессор

ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АННОТАЦИЯСИ

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти. Ҳозирги вақтда ${}^6\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{14}\text{Be}$, ${}^{19}\text{C}$, ${}^{31}\text{Ne}$ каби ортикча нейтронли гало ядроларнинг структурасини тушуниш учун катта ишлар қилинмоқда. Бу ядролар кичик боғланиш энергияси ҳамда бир ва икки нейтронли кичик бурчак моменти ($l=0,1$) эга орбиталарнинг катта масофаларгача давом этиши каби нооддий хоссаларга эга. Одатда, бу ядролар кор плюс бир неча нейтрон моделида ўрганилади. Бундан ташқари, уч заррали ${}^6\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$, ва ${}^{14}\text{Be}$ гало ядроларнинг бирорта ҳам икки заррали қисми боғланмаган, яъни улар Борромей системаларига хос хусусиятга эга. Бу ядроларнинг энергия ва заряд радиуси каби статик характеристикаларидан ташқари, уларнинг икки жисм ва уч жисм континуум-каналларига бета-парчаланиши ва электромагнетик ўтиш жараёнлари алоҳида қизиқиш уйғотади. Бу жараёнлар ядроларнинг ички структураси ва гало хоссалари ҳақида қимматли маълумотлар беради, чунки бу ўтишлар кўриляётган системаларнинг айнан гало қисмида рўй беради. Бундан ташқари, ${}^6\text{He}$ ва ${}^{11}\text{Li}$ гало ядроларнинг икки жисм дейтрон континуум каналларига бета ўтиш жараёни бўйича тажриба натижалари мавжуд, улар чуқур назарий таҳлилни талаб қилади. Бир нейтронли ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{19}\text{C}$ ва ${}^{31}\text{Ne}$ гало ядроларнинг протон плюс кор континуум каналларига бета-ўтиш жараёнларини ўрганиш бу системаларнинг статик характеристикаларига қўшимча янги гало хоссалари ҳақида маълумот беради.

Гало ядролар орасида ${}^{11}\text{Li}$ ядроси алоҳида ажралиб туради. Мазкур ядронинг бошқа енгил гало ядролардан фарқи шундаки, у қўшимча ${}^9\text{Li} + \text{протон} + \text{нейтрон}$ уч жисм континуум-каналига бета парчаланиши мумкин. Бу ўтиш мураккаб жараёни ташкил қилади ҳамда қўлланадиган назарий модел кўриляётган жараён ва ${}^{11}\text{Li}$ гало ядросининг уч жисм структураси ҳақида қимматли маълумотлар беради.

${}^6\text{Li}$ ядросининг биринчи уйғонган ҳолати ${}^6\text{He}$ гало ядроси учун изобар-аналог ҳолат ҳисобланади. Шунинг учун бу ҳолатдан дейтрон континуум каналга $M1$ -ўтиш жараёни унинг ${}^6\text{He}$ ядросига ўхшаш гало хоссалари ҳақида маълумот олишга имкон беради. $M1$ -ўтиш кенглиги учун олинадиган баҳолар мавжуд тажриба натижалари билан солиштириб кўрилиши мумкин. Бундан ташқари, бу жараёндан, кучли ўзаро таъсирда жуфтлик сақланишининг бузилиш эффектини ўрганишда фойдаланиш мумкин.

Ядро-ядро ўзаро таъсирнинг куйи тўлқинларда тақиқланган ҳолатга эга моделлари ўтган асрнинг 70-йилларида Паули принципини тўлақонли ҳисобга олиш учун, яқин масофаларда итаришувчи корга эга потенциал моделларига альтернатив сифатида таклиф қилинган эди. Улар микроскопик жиҳатдан асосланган, бошқача айтганда нуклон эркинлик даражасига таянади. Лекин, бу тақиқланган ҳолатларнинг ядро структурасидаги роли ҳозиргача етарли даражада ўрганилмаган. Айниқса, бу масала бир неча альфа кластерни ўз ичига олган ядролар учун долзарб бўлиб турибди. Истисно сифатида куйи тўлқинларда тақиқланган ҳолатларга эга Москва нуклон-нуклон потенциал модели хизмат қилиши мумкин, унинг уч нуклонли

ядролардаги хоссалари батафсил ўрганилган. Бошқа томондан қараганда, Москва моделида тақиқланган ҳолатларнинг роли бутунлай ўзгача, у нуклоннинг кварк структураси билан боғлиқ. Бир неча ядро кластеридан ташкил топган енгил ядроларда эса, тақиқланган ҳолатли моделлар Паули принципини тўлақонли ҳисобга олиш учун киритилган. Улар баъзи енгил ядроларнинг гало структураси кашф қилиниши муносабати билан, айниқса, долзарб бўлиб қолди. Енгил ядроларнинг электромагнит ва бета ўтиш жараёнларида намоён бўладиган гало хоссаларини иккита альтернатив, корли ва тақиқланган ҳолатли потенциал моделлар ёрдамида ўрганиш, бу моделларнинг махсус хоссаларини аниқлашга имкон беради.

Бир нечта альфа кластердан ташкил топган ядролар астрофизикада жуда муҳим роль ўйнайди. Иккита альфа заррача боғланмаган бўлса ҳам, лекин учта (^{12}C) ва тўртта (^{16}O) альфа кластерли ядролар катта боғланиш энергиясига эга, шунинг учун улар Борромей ядролар синфига киради. Айниқса, бундай ядролар учун реалистик боғланган ҳолат ва континуум тўлқин функцияларини олиш ўта долзарб бўлиб турибди, улар астрофизик синтез реакцияларининг кесимларини ҳисоблашга қўлланиши мумкин. Бошқа томондан, сўнгги вақтларда бу ядроларнинг структурасини ўрганиш «альфа-конденсация» мавжудлигининг башорат қилиниши муносабати билан янада долзарб тус олди.

Диссертацияда ривожлантириладиган енгил ядро моделлари ва улар асосида олинadиган натижалар $d+^6\text{Li}$ плазмасида турли ^3H , ^3He , ^4He , ^7Li , ^7Be енгил ядроларнинг ҳосил бўлиши билан кечадиган термоядро реакцияларини оптимал бошқариш учун ўта муҳимдир. Реакцияларнинг кесимидаги ноаниқликлар термоядро реакторининг кинетикасига жуда катта салбий таъсир кўрсатади, шу сабабли бу жараёнларни оптимал бошқариш учун юқори аниқликдаги назарий моделларни ривожлантириш зарур. Диссертацияда ривожлантирилган Гаусс ва Лагранж-меш базислари асосида қурилган вариацион методлар кўрсатилган реакциялар тезликларини юқори аниқликда баҳолаш учун ишлатиладиган тўлқин функцияларни ҳисоблаш учун муҳимдир.

Тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялар тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги. Диссертация Ўзбекистон Республикасида фан ва технологиялар тараққиётининг Ф2 «Физика, астрономия, энергетика ва машинасозлик» устувор йўналишига мувофиқ амалга оширилди.

Диссертация мавзуси бўйича халқаро илмий тадқиқотлар шарҳи. Енгил ядролар структураси учун назарий моделлар дунёнинг турли илмий марказларида ривожлантирилмоқда. Енгил ядроларнинг боғланган ҳолатлари структураси учун энг яхши назарий моделлар Гаусс базиси (Ниигата ва Киото, Япония ва Москва Давлат университети, Россия назарий группалари) ва Лагранж-меш базиси (Брюссель эркин университети, Бельгия группаси) устида қурилган вариацион методларга асосланади. Улар ^3H , ^3He , ^6He , ^6Li , ^{11}Li , ^9Be каби уч жисмли ядроларнинг боғланган ҳолатлар структурасини тадқиқ қилишга қўлланди. Энергия спектри, ўртача квадратик радиуси,

электрик ва магнит формфакторлари баҳоланди. Лекин, ^{12}C ядро структураси учун 3α модели доирасида бажарилган назарий тадқиқотлар ҳозирча қониқарли натижалар бермади. Локал итарувчи корли $\alpha\alpha$ -потенциал билан олинган боғланган ҳолатлар энергия спектри тажриба спектридан анча юқорида ётади. Аксинча, микроскопик моделлар спектрни бир неча МэВ пастроқдан баҳолайди. S- ва D-тўлқинларда тақиқланган ҳолатли потенциал билан уч жисм моделидаги ҳисоблашлар эса ечимнинг тақиқланган ҳолатларга ортогоналлаштириш шарти билан боғлиқ катта қийинчиликларга дуч келади. Бу қийинчиликларни бартараф этиш учун ^{12}C ядроси энергетик спектрининг $\alpha\alpha$ -тақиқланган ҳолатларни тасвирлашга сезгирлигини батафсил текшириш зарур.

Енгил ядроларнинг уч жисмли континуум структураси парчаланиш реакцияси билан кечувчи тажрибаларда (RIKEN, Япония) ва Фаддеев тенгламалари усули (Архус университети, Дания назарий группаси), комплекс масштабаш усули ва аналитик давом эттириш усули (МДУ, Россия назарий группаси) ёрдамида ўрганилмоқда. Лекин бу усулларнинг имкониятлари чегараланган. Хусусан, Фаддеев тенгламалари усули Кулон кучлари ҳисобга олинганда катта қийинчиликларга дуч келади. Аналитик давом эттириш усули ва комплекс масштабаш усули фақатгина резонанс ҳолатларга қўлланиши мумкин.

Шу пайтгача R-матрица яқинлашуви фақат икки жисм континуум масалаларига муваффақиятли қўлланди. Яқинда адабиётларда бу усулнинг гиперсферик метод доирасида уч жисм континуумига қўлланиши (Курчатов атом энергияси институти, Россия ва Копенгаген университети, Дания группалари) боғланиш потенциалининг давомийлиги туфайли жиддий муаммоларга дуч келди.

Юқорида таъкидланганидек, сўнгги йилларда ^{11}Be , ^{19}C , ^{31}Ne каби икки жисмли ва ^6He , ^{11}Li , ^{14}Be каби уч жисмли гало ядроларнинг хоссалари ниҳоятда катта қизиқиш уйғотмоқда. Санаб ўтилган назарий гуруҳлар ушбу системаларнинг боғланган ва континуум структурасини ҳамда боғланган ва континуум каналларга электромагнетик ва бета ўтиш жараёнларини ўрганиш бўйича тадқиқот ишлари олиб бормоқда.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Тақиқланган ҳолатларнинг ядро ўзаро таъсиридаги роли 3α масаласида аввалроқ хорижлик муаллифлар S. Marsh ва H. Walliser, S. Nakaichi-Maeda томонидан ўрганилган. Лекин ҳалигача бу система учун уч жисм функционал фазосидан рухсат этилган қисм фазосини тўлалигича ажратиб олиш имкони бўлмади. ^{12}C ядроси учун 3α моделда тақиқланган ҳолатга эга BFW потенциали билан олинган Шредингер тенгламасининг ечимлари тақиқланган ҳолатларнинг анчагина ҳиссасини ўз ичига олади. Ортогоналлаштирувчи псевдопотенциаллар методини қўллаш ^{12}C ядроси структурасининг адабиётларда ўрганилмаган хусусиятларини аниқлашга имкон беради.

М.В. Жуков группаси (Россия) томонидан гало ядроларнинг уч жисм континуумини тавсифлашдаги эффектив потенциалининг давомийлиги билан боғлиқ жиддий муаммолар мавжуд пропагатор методи билан уйғунликда

қўлланадиган R-матрица яқинлашувида бартараф этилиши мумкин. Бу йўл тўлқин функцияни катта масофаларда асимптотика билан улаш имконини беради. Бу усул ${}^6\text{He}$ ва ${}^{14}\text{Be}$ гало ядроларнинг, адабиётларда яхши ўрганилмаган уч жисм континуум структурасини ўрганиш учун қўлланиши мумкин.

${}^6\text{He}$ ва ${}^{11}\text{Li}$ гало ядроларнинг дейтрон чиқиши билан кечадиган икки жисм континуум каналларга бета парчаланиши бўйича тажриба натижалар ҳозирча батафсил тушунтириб берилмади. Хусусан, ${}^6\text{He}$ ядросининг бета-парчаланиши бўйича М.В. Жуков группаси томонидан бажарилган назарий ишлар нотўғри хулосага келди. Унга кўра, итаришувчи корли α -потенциаллар тажриба натижаларини, микроскопик жиҳатдан асосланган тақиқланган ҳолатли потенциалларга қараганда яхшироқ тушунтириб берар эмиш. Бундан ташқари, М.В. Жуков ва б. ва Ҳ. Ohbayasi, Ҳ. Suzuki томонидан олинган назарий баҳолар тажриба натижаларига бироз яқинроқ бўлса ҳам, ${}^{11}\text{Li}$ ядросининг дейтрон каналга бета ўтиш эҳтимоллигининг потенциалга боғлиқлиги ўрганилмади. Шунингдек, ${}^9\text{Li}+d$ да S- резонанснинг тажриба натижаларини тушунтиришдаги роли умуман ўрганилмади.

Адабиётларда ҳозиргача ${}^6\text{Li}(0+)$ изобар аналог ҳолатнинг гало хоссалари уч жисм моделида жиддий ўрганилмаган. Фақатгина Л.В. Григоренко ва б. (Россия) томонидан соддалаштирилган моделда баҳолар олинди. Бу ерда тўлиқ уч жисм формализмини ривожлантириш, M1-ўтиш матрица элементларини баҳолаш талаб этилади.

Бир нейтронли ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{19}\text{C}$ ва ${}^{31}\text{Ne}$ гало ядроларнинг икки жисм кор плюс протон континуум каналга бета парчаланиши ҳам назарий ўрганилмаган.

Юқорида таъкидланганидек, ${}^{11}\text{Li}$ гало ядросининг уч жисм ${}^9\text{Li}+p+n$ континуум каналга бета парчаланиши энг мураккаб жараён ҳисобланади. Бу жараён ҳали тажрибада ҳам, назарий жиҳатдан ҳам ўрганилмаган. Шунинг учун жараённинг модификация қилинган Кулон функцияларини қўллаб амалга ошириладиган назарий таҳлили бу ядронинг кўриладиган жараёнда намоён бўладиган янги гало хоссаларини ўрганиш имконини беради.

Диссертация тадқиқотининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги фундаментал тадқиқотлар Давлат илмий-техника дастурлари доирасида бажарилган қуйидаги лойиҳаларда ўз аксини топган:

Ф-2.1.33 – рақамли «Тебранувчи ядроларнинг мултифонон ҳолатларини тадқиқ қилиш» (2003 – 2007);

ФА-Ф2-Ф076+Ф074 – рақамли «Симметрик ва ортикча нейтронли ядролар структурасини нуклон узатиш ва бўлиниш реакцияларида тадқиқ қилиш» (2007 – 2011);

Ф2-ФА-0-10117 – рақамли «Енгил элементларнинг ҳосил бўлиши ва қуйи энергияларда кечадиган ядро реакцияларида ҳосил бўладиган экзотик ядроларнинг хоссаларини ўрганиш» (2012 – 2016).

Тадқиқотнинг мақсади енгил ядролар боғланган ва континуум структурасини ҳамда улар иштирокида қуйи энергияларда бўладиган жараёнларни тушунтириш учун кластерлараро ўзаро таъсир потенциал моделининг хусусиятларини аниқлашдан иборат.

Мақсадга эришиш учун ишда қуйидаги **тадқиқот вазифалари** қўйилган:

^{12}C ядросининг энергетик спектрини 3α кластер моделида ҳисоблаш ва тақиқланган ҳолатли потенциал моделининг ўзига хос хусусиятларини аниқлаш;

енгил ядроларнинг уч жисм континуум структурасини ўрганиш учун пропагатор методи билан уйғунликда R-матрица методини ривожлантириш, икки нейтронли гало ядролар ^6He ва ^{14}Be учун уч жисм фазаларини ҳисоблаш;

^6He ва ^{11}Li гало ядроларининг $\alpha+d$ ва $^9\text{Li}+d$ континуум каналларга бета парчаланишини уч жисм кластер модели доирасида таҳлил қилиш ва ўтиш эҳтимолликлари учун олинган натижаларнинг потенциалга боғлиқлигини аниқлаштириш;

$^6\text{Li}(0^+)$ изобар-аналог ҳолатнинг гало хоссаларини $^6\text{Li}(1^+)$ асосий ҳолатга ва $\alpha+d$ континуум каналга M1-ўтиш жараёни орқали уч жисм моделида ўрганиш ва ўтиш эҳтимолликлари учун олинган натижаларнинг потенциалга боғлиқлигини аниқлаштириш;

^{11}Li гало ядросининг $^9\text{Li}+p+n$ уч жисм континуум каналга бета парчаланиши эҳтимолликларини кластер потенциал модель доирасида баҳолаш;

бир нейтронли ^{11}Be , ^{19}C ва ^{31}Ne гало ядроларнинг икки жисм континуум каналларга бета парчаланиш эҳтимолликларини кластер потенциал модели доирасида баҳолаш;

Тадқиқот объекти сифатида ^{12}C ядросининг боғланган ҳолатлар спектри, ^6He , ^{11}Li , ^{11}Be , ^{19}C ва ^{31}Ne гало ядроларнинг икки жисм ва уч жисм континуум каналларга бета ўтиш жараёнларининг эҳтимолликлари, $^6\text{Li}(0^+)$ изобар аналог ҳолатдан $^6\text{Li}(1^+)$ асосий ҳолатга ва $\alpha+d$ континуум каналга M1-ўтиш эҳтимолликлари, ^6He ва ^{14}Be гало ядроларининг уч жисм континуум структураси танланган.

Тадқиқот предмети - енгил ядроларнинг, шу жумладан, гало ядроларнинг икки ва уч жисм структураси, ядроларда электромагнит ва бета ўтиш жараёнлари, ядро ўзаро таъсир потенциаллари, кучли ўзаро таъсир механизмларидан иборат.

Тадқиқот усуллари. Икки ва уч жисм боғланган ҳолатлари тўлқин функцияларини ва энергия спектрини ҳисоблаш учун Гаусс ва гиперсферик Лагранж-меш базисларида қурилган вариацион методларга асосланган кластер потенциал модели; икки жисм сочилиш тўлқин функцияларини ҳисоблаш учун Нумеров алгоритми; уч жисм континуум тўлқин функциясини ҳисоблаш учун Нумеров алгоритмига асосланган пропагатор усули ёрдамида гиперсферик Лагранж-меш базисда қурилган R-матрица методи; Паули тақиқланган ҳолатлардан тозалаш учун ортогоналлаштирувчи псевдопотенциаллар методи.

Диссертация тадқиқотининг илмий янгилиги куйидагилардан иборат:

биринчи марта ^{12}C ядросининг компакт асосий 0^+ ва биринчи уйғонган 2^+ ҳолатлар энергияларининг α -Паули тақиқланган ҳолатларни тасвирлашга ўта сезгирлиги кўрсатилган, бу эса уч жисм функционал фазосида «деярли таъқиқланган ҳолатларнинг» пайдо бўлишига олиб келар экан;

биринчи марта ^6He ва ^{14}Be енгил гало ядроларнинг уч жисм континуум структурасини ўрганиш учун гиперсферик Лагранж-меш базисида R-матрица усули пропагатор методи билан уйғунликда ривожлантирилган; яқинлашувчи натижалар олиш учун тўлқин функцияни жуда узок, тахминан, 1000 фм масофада асимптотикага улаш зарурлиги кўрсатилган; уч жисм тўқнашиш матрицаларининг диагонал ва хусусий фаза силжишлари ҳисобланган, ^{14}Be ядросида $E_{\text{уйғ}}=3.4$ МэВ энергияда янги 2^+ резонанс мавжудлиги прогноз қилинган;

^6He гало ядросининг $\alpha+d$ континуум каналга бета парчаланиш вақт ва энергия бирликларидаги эҳтимолликлари учун назарий баҳолар олинган; биринчи марта, тажриба натижаларини тушунтириш учун микроскопик жиҳатдан асосланган, S-тўлқинда тақиқланган ҳолатга эга ҳамда асосий ҳолат энергиясини ва фаза силжишларини тиклай оладиган αd -потенциалларидан фойдаланиш ўта муҳим эканлиги кўрсатилган; матрица элементларининг яқинлашиши учун тўлқин функцияларни 30 фм гача ва гипермомент компонентларни $K=24$ гача билиш талаб қилиниши кўрсатилган; ўтиш матрица элементларининг ички ва ташқи қисмлари ўзаро бир бирини даярли тўлиқ пасайтириши кўрсатилган;

биринчи марта $^6\text{Li}(0^+)$ изобар аналог ҳолатдан $\alpha+d$ континуум каналга M1-ўтиш вақт ва энергия бирлигидаги эҳтимолликлари учун назарий баҳолар олинган; кўрсатилдики, фақат тақиқланган ҳолатга эга потенциал ишлатилганда интеграл кенглик учун олинган баҳо (0.9 мэВ), олдиндан маълум бўлган соддалаштирилган ҳисоблашлар натижалари билан яхши мос келар экан; натижаларнинг яқинлашиши учун эффектив интеграл чегарасини 25–30 фм гача, гипермомент компонентларини $K=20$ гача олиш кераклиги кўрсатилган;

биринчи марта, ^{11}Li гало ядросининг $^{11}\text{Li}+d$ континуум каналга бета парчаланиши вақт ва энергия бирлигидаги эҳтимолликлари учун янги тажриба натижалари билан тўлиқ мос келувчи назарий баҳолар олинган; бу жараёнда $^9\text{Li}+d$ система S-тўлқинида 0.7 МэВ энергия билан аниқланган резонансининг, қандай потенциал (корли ёки таъқиқланган ҳолатли) ишлатилишидан қатъи назар, тажриба натижаларини тушунтириш учун ўта муҳимлиги аниқланган; бу резонансни тикловчи $^9\text{Li}+d$ -потенциал ўтиш эҳтимолликларининг шаклини ва абсолют қийматларини очиқ каналларга парчаланиш сабабли қўшилган ютувчи мавҳум хад ёрдамида яхши тушунтириб бера олиши кўрсатилган;

биринчи марта, ^{11}Li гало ядросининг $^9\text{Li}+p+n$ континуум каналга бета парчаланиши вақт ва энергия бирлигидаги эҳтимолликлари учун назарий баҳолар олинган;

биринчи марта, ^{11}Be , ^{19}C ва ^{31}Ne бир нейтронли гало ядроларнинг икки жисм континуум каналларга бета парчаланиши вақт ва энергия бирлигидаги эҳтимолликлари учун кластер модели доирасида назарий баҳолар олинган; бу жараёнларнинг ўтиш эҳтимолликлари валент нейтроннинг ажралиш энергиясига ўта сезгирлиги кўрсатилган.

Олинган натижаларнинг ишончлилиги замонавий квант механикаси ва назарий ядро физикаси методлари ҳамда юқори самарали сонли методлар ва алгоритмлар ишлатилганлиги, олинган назарий баҳоларнинг тажриба натижалари ва бошқа муаллифларнинг баҳолари билан мос келиши батафсил текширилгани, хулосаларнинг енгил ядролар структураси назариясининг асосий ҳолатларига мос келиши билан тасдиқланган.

Тадқиқот натижаларининг назарий ва амалий аҳамияти. Диссертацияда олинган натижаларнинг назарий ва амалий аҳамияти, улардан енгил ядролар структураси назариясини ва енгил ядроларнинг кластер моделини ривожлантиришда фойдаланиш мумкинлигидан иборатдир. Диссертацияда ривожлантирилган методлар молекуляр, атом ва ядро физикасида бир неча жисм квант механикаси муаммоларини ечишда қўлланиши мумкин. Шунингдек, икки нейтронли ^{11}Li гало ядросининг $^9\text{Li}+p+n$ уч жисм континуум каналга ҳамда бир нейтронли ^{11}Be , ^{19}C ва ^{31}Ne гало ядроларнинг икки жисм континуум каналларга бета парчаланиши эҳтимолликлари учун олинган назарий баҳолардан бу жараёнлар бўйича ўтказиладиган тажрибаларни лойиҳалаштиришда фойдаланиш мумкин. $^6\text{Li}(0^+)$ изобар аналог ҳолатдан $\alpha+d$ континуум каналга $M1$ -ўтиш эҳтимолликлари учун олинган баҳолар эса, бу жараён бўйича ўтказиладиган тажрибаларни лойиҳалаштиришда ҳамда кучли ўзаро таъсирларда жуфтлик сақланишининг бузилиш эффектини ўрганиш пайтида фойдаланилиши мумкин. Диссертацияда башорат қилинган янги $E_{\text{уйғ}}=3.4$ МэВ энергиядаги $^{14}\text{Be}(2^+)$ резонанс яқинда тажрибада $E_{\text{уйғ}}(\text{exp})=3.54(16)$ МэВ натижа билан тасдиқланди: Aksyutina Yu., Aumann T., Boretzky K., et al. “Study of the ^{14}Be continuum: Identification and structure of its second 2^+ state”, Phys. Rev. Lett. - New York, 2013. - vol. 111, N. 24. - 242501. Диссертацияда олинган назарий натижалардан ^6He ва ^{11}Li ядроларнинг дейтрон каналига бета парчаланиш жараёнлари бўйича сўнгги тажрибалар: R. Raabe, J. Buescher, et al. Physical Review C, 2009. - vol. 80, N 5.- id.054307 ва R. Raabe, A. Andreyev, M. J. G. Borge, et al. Physical Review Letters, 2008. - vol. 101, N 21.- id. 212501 ни лойиҳалаштиришда фойдаланилган. Яқинда чоп этилган мақолалар M. Grieser et al. European Physical Journal, Special Topics, 2012.-vol. 207, N1.- id.01599 ва M.J.G. Borge et al. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2013. –vol.40.- id.035109 да ушбу диссертацияда ^{11}Be , ^{19}C , ^{31}Ne ва ^{11}Li ядроларининг бета парчаланиш бўйича олинган натижалардан CERN даги ISOLDE тажриба қурилмасини лойиҳалашда фойдаланилганлиги ҳақида маълумотлар келтирилган.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Диссертацияда ривожлантирилган гиперсферик Лагранж-меш базисида пропагатор методи билан уйғунликда қурилган R-матрица усули «Енгил ядролар

спектроскопияси ва микроскопик мультикластер моделларда ядро реакциялари» (2010 – 2012) дастури доирасида ^{12}C ядросининг уч жисм континуум структурасини ва ^{11}Li ядросининг уч жисмга парчаланиш жараёни механизмини аниқлашда қўлланилган (Бельгия фан, техника ва маданият вазирлиги томонидан ташкил этилган Р6/23 рақамли дастур).

Ишнинг апробацияси. Тадқиқотнинг асосий натижалари ЎзР ФА Ядро физикаси институтининг Ядро физикаси бўлими, Ўзбекистон миллий университети, Брюссел эркин университети (Бельгия), Инха университети (Жанубий Корея Республикаси), Сюррей университети (Буюк Британия) илмий семинарларида, 6 та Халқаро конференцияларда: «50 Years of the Nuclear Shell Model» (Гейдельберг, Германия, 1999), «SOTANCP – 2010» (Брюссел, Бельгия, 2010), «Modern Problems of Nuclear Physics» (Самарқанд, 2003; Тошкент, 2009), «Nuclear Sciences and its application» (Самарқанд, 2012), «Nuclear and Radiation Physics» (Олмаота, Қозоғистон, 2011) апробациядан ўтказилди.

Натижаларнинг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича 20 та илмий иш, шундан 9 та илмий мақола халқаро журналларда (шу жумладан, 1 та мақола Халқаро илмий конференция материаллари сифатида), 1 та мақола Республика журналида (Халқаро илмий конференция материаллари сифатида), 1 та мақола Халқаро конференция тўпламларида, 1 та мақола Лос-Аламос миллий лабораторияси (АҚШ) электрон препринтларида ва 8 та тезис Халқаро конференциялар тўпламларида chop этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, саккизта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати, 2 та илова, 181 саҳифа матн, 33 та расм ва 14 та жадвалдан иборат.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида тадқиқот мавзусининг долзарблиги ва зарурияти асосланган, тадқиқот мақсади ва вазифалари таърифланган, тадқиқот объекти, предмети ва усуллари аниқланган, тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикасида фан ва технологиялар ривожининг устувор йўналишларига мослиги белгиланган, илмий янгилиги кўрсатилган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиқ берилган, улардан амалда фойдаланилгани, chop этилгани ва апробацияси ҳақида ҳамда диссертациянинг тузилиши ҳақида маълумотлар қисқача баён этилган.

Диссертациянинг **биринчи бобида** адабиётларда енгил ядролар структураси учун қўлланган потенциал моделларнинг асосий ҳолатлари ва хусусиятлари ҳақидаги мавжуд маълумотларнинг қисқача муҳокамаси берилган. Бу йўналишдаги асосий муаммолар санаб ўтилган ва уларни бартараф этиш йўллари муҳокама қилинган. Адабиётларда мавжуд

маълумотларнинг таҳлили асосида ушбу диссертациянинг мақсад ва вазифалари баён қилинган.

Диссертациянинг **иккинчи бобида** ^{12}C ядроси энергетик спектри юқори аниқликдаги Гаусс базисида қурилган 3α кластер моделида корли Али-Бодмер ва тақиқланган ҳолатли (S- ва D-тўлқинларда) Бак-Фридрих-Уитли (BFW) локал $\alpha\alpha$ -потенциаллар билан батафсил таҳлил қилинди. Бу потенциаллар, маълумки, қуйи энергияларда $\alpha\alpha$ -сочилиш тажриба натижаларини яхши тиклайди. ^{12}C ядроси асосий ҳолатининг боғланиш энергияси учун l га боғлиқ бўлмаган Али-Бодмер потенциали билан олинган натижалар (0.584266 ва 5.1220936 МэВ, мос равишда Кулон таъсирини ҳисобга олганда ва олмаганда) ўзга авторларнинг Лагранж-меш методида олинган натижалари билан деярли устма-уст тушади. Уйғонган ҳолатлар учун олинган натижалар ҳам Лагранж-меш методига яқин, лекин улар гиперсферик методга қараганда анча яхши. Юқоридаги биринчи сон тажрибавий боғланиш энергияси (7.27 МэВ) дан узоқ, ва ҳатто Али-Бодмер потенциалининг l га боғлиқ версияси ҳам жуда кам боғланиш беради (1.523 МэВ). 3α система энергиясини BFW потенциали билан ҳисоблаш учун ортогоналлаштирувчи псевдопотенциаллар методи қўлланди, у Шредингер тенгламаси ечимини тўлиқ функционал фазода топиш имкониятини беради.

Диссертацияда кўрсатилдики, 3α системанинг компакт асосий 0^+ ва биринчи уйғонган 2^+ ҳолатлар энергиялари $\alpha\alpha$ -Паули тақиқланган ҳолатларни тўғри тасвирлашга ниҳоят даражада сезгир экан. Бу натижа тақиқланган ҳолатларнинг Шредингер тенгламаси ечимидаги ҳиссасининг нооддий ўзгаришига олиб келар экан. Бу ҳисса проекторлаш доимийси λ нинг ўсиши билан камайиши керак эди, бироқ, кўрилаётган ҳолда у $\lambda=1450$ МэВ атрофида минимумга эга бўлмоқда. λ нинг бу қийматида 3α системанинг асосий ҳолат энергияси -19.763 МэВга тенг, бу эса микроскопик ҳисоблашлар натижасига яқин. λ параметрининг кейинги ўсиши 3α энергиясининг тез ўсишига олиб келади. Фуживара биринчи марта кўрсатдики, энергиянинг ва тақиқланган ҳолат ҳиссасининг бундай ўзгариши Шредингер тенгламаси ечимида «деярли таъқиқланган ҳолатларнинг» пайдо бўлишига олиб келар экан. Бундай «деярли таъқиқланган ҳолат» диссертация ишида тўлиқ уч жисм проектори операторининг $1.1847\text{E}-4$ МэВ хусусий қийматга мос хусусий ҳолати сифатида топилди. Агар бу ҳолатни рухсат этилган деб ҳисобланса, у ҳолда 3α энергияси учун -20 МэВ баҳо олинади, акс ҳолда эса -0.645 МэВ га тенг баҳо олинади. Бундай қизиқарли ҳолат биринчи марта боғланган ҳолат масаласида учрамоқда. Шундай қилиб, α -кластерли ядроларнинг компакт ҳолатлари учун Паули принципи ўта муҳим роль ўйнар экан. Бунга кўра макроскопик $\alpha\alpha$ -потенциалларни қуришнинг янги йўлини таклиф қилиш мумкин. Унинг асосий мазмуни шундан иборатки, потенциал параметрларини микроскопик методлар ёрдамида олдиндан фиксирланган $\alpha\alpha$ -тақиқланган ҳолатларга мослаштириш мумкин.

Диссертациянинг **учинчи бобида** енгил ядролар уч жисм континуум структурасини ўрганиш учун Лагранж-меш базисида қурилган гиперсферик

гармониклар методи асосида R-матрица яқинлашиши ривожлантирилган. 3.1.1 бўлимда Лагранж-меш базисида қурилган гиперсферик гармониклар методининг асосий формализми келтирилган, фақатгина гиперрадиусга боғлиқ бўлган боғланган тенгламалар системаси ва уч жисм эффектив потенциали учун аниқ ифодалар олинган. Шу ерда эффектив потенциалнинг асимптотик кўриниши келтирилган, унинг асосий ҳади $1/\rho^3$ тартибга эга. Бундан ташқари марказдан қочма кучларга мос ҳадни ҳам ҳисобга олиш керак, унинг тартиби $1/\rho^2$. Турли уч жисм парциал тўлқинлар учун эффектив потенциалнинг $1/\rho$ нинг даражалари бўйича ёйилмаси коэффицентлари ҳисобланди. 3.1.2 бўлимда эса Блох-Шредингер тенгламаси асосида уч жисм учун R-матрица формализми ривожлантирилди. Ички соҳада (25-30 фм гача) хомаки тўлқин функция Лагранж-меш базисига ёйилади. Ички соҳанинг чегарасида топилган R-матрица Нумеров алгоритми ёрдамида катта масофаларгача (тахминан 1000 фм) давом эттирилади, у ерда эса тўлқин функция асимптотикага уланади. Асимптотика нейтрал системалар учун биринчи ва иккинчи турдаги Бессел функциялари орқали, зарядланган зарралар учун эса регуляр ва нерегуляр Кулон функциялари орқали ифодаланади. Кейин, топилган R-матрица асосида тўқнашиш матрицаси топилади. Диссертациянинг 3.2-бўлимида ривожлантирилган метод ${}^6\text{He}=\alpha+n+n$ ва ${}^{14}\text{Be}={}^{12}\text{Be}+n+n$ гало ядроларнинг уч жисм континуум структурасини таҳлил қилишга қўлланди. NN-ўзаро таъсир учун Миннесота марказий потенциалидан фойдаланилган, αN -ўзаро таъсир эса спин-орбитал қисмига эга ва жуфтликка боғлиқ бўлган Канада ва б. потенциали билан ифодаланган. Бунда $V_{\alpha N}$ -потенциал, ${}^6\text{He}$ гало ядросининг асосий ҳолат энергияси $E({}^6\text{He})=-0.97$ МэВ ни тўғри тиклай олиши учун $\lambda=1.051$ факторга кўпайтирилди. ${}^{12}\text{Be}+n$ ўзаро таъсир учун эса Вуд-Саксон потенциали ишлатилди:

$$V(r) = - [V_0 + V_s \cdot l \cdot s] / [1 + \exp((r-r_0)/a)]. \quad (1)$$

Бу ерда параметрлар $V_0 = 43$ МэВ, $V_s = 6$ МэВ, $r_0 = 2.908$ фм, $a = 0.67$ фм. ${}^{14}\text{Be}$ ядросининг асосий ҳолат энергияси $E=-1.34 \pm 0.11$ МэВ ни тўғри тиклаш учун иккита турли метод қўлланди. Биринчи метод (1) потенциални $\lambda=1.08$ факторга кўпайтиришдан, иккинчи метод эса Вуд-Саксон потенциалига қўшимча уч жисм потенциали

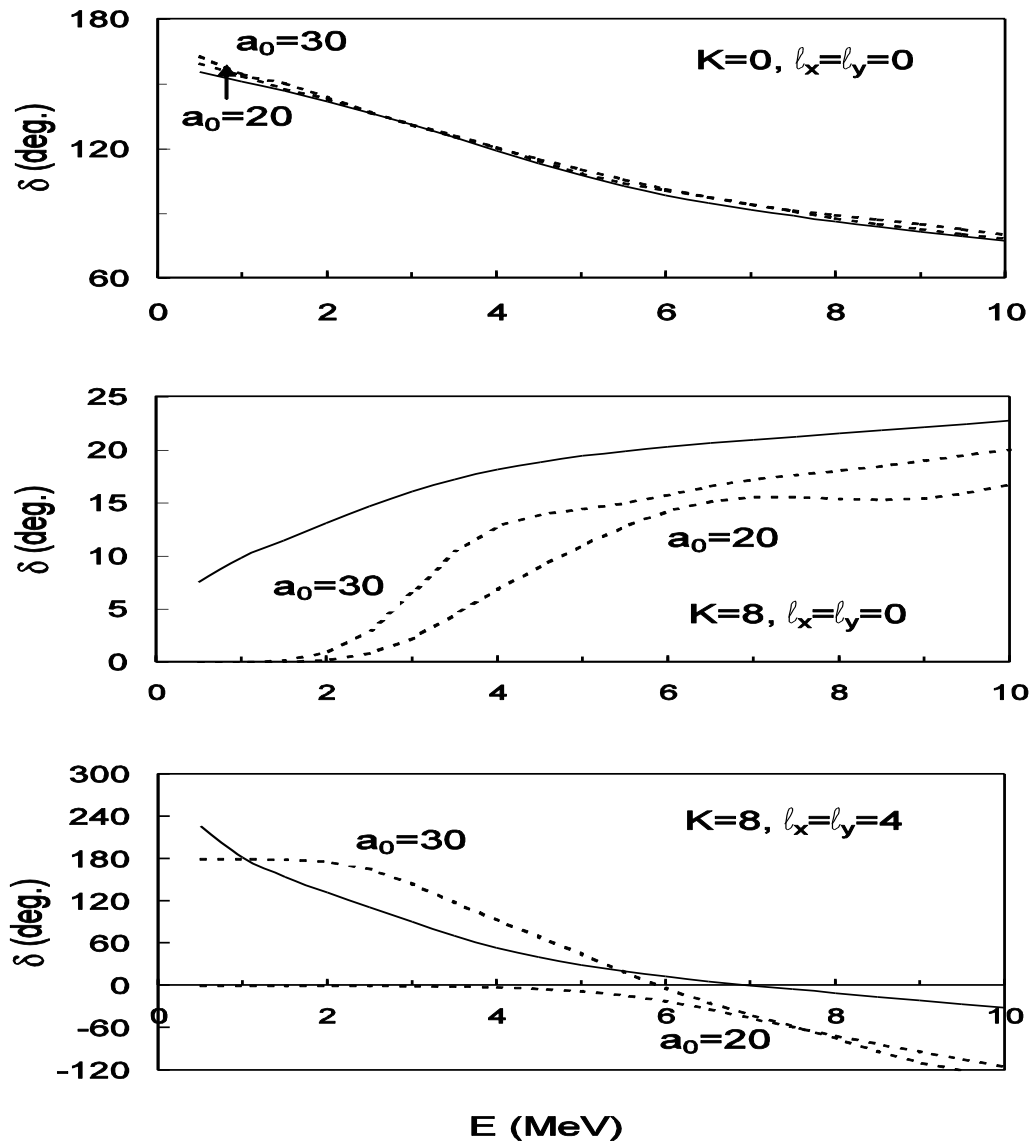
$$V_{K\gamma, K'\gamma'}(\rho) = - \delta_{K,K'} \delta_{\gamma,\gamma'} V_3 / [1 + (\rho/\rho_3)^2] \quad (2)$$

ни киритишдан иборат,
бу ерда K ва K' – гипермоментлар,
 $\gamma=(l_x, l_y, L, S)$, $\gamma'=(l'_x, l'_y, L', S')$ – уч жисм каналлари.

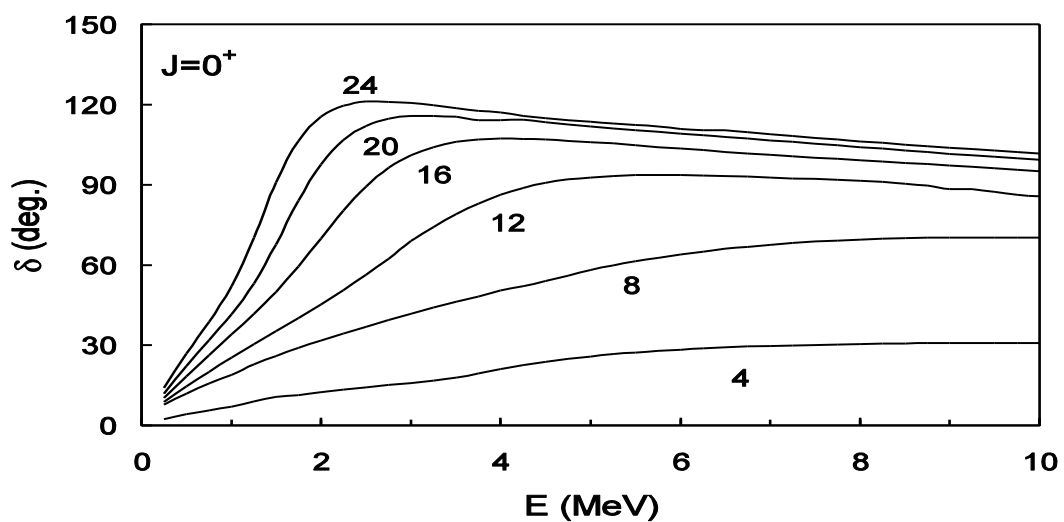
1-расмда $\alpha+n+n$ -системанинг $J^\pi=0^+$ ҳолати учун, канал радиуси $a_0=20$ фм ва $a_0=30$ фм бўлганда турли уч жисм каналларига мос ҳисобланган фаза силжишлари келтирилган, улар яқинлашишни текшириш мақсадида

пропагатор методи билан 250 фм гача давом эттирилган R-матрица усули билан солиштирилган. Кўриниб турибдики, пропагатор гипермомент K нинг қиймати катта бўлган каналлар учун муҳимдир. Тўқнашиш матричасини диагоналлаштиргандан сўнг хусусий фазаларни топиш мумкин.

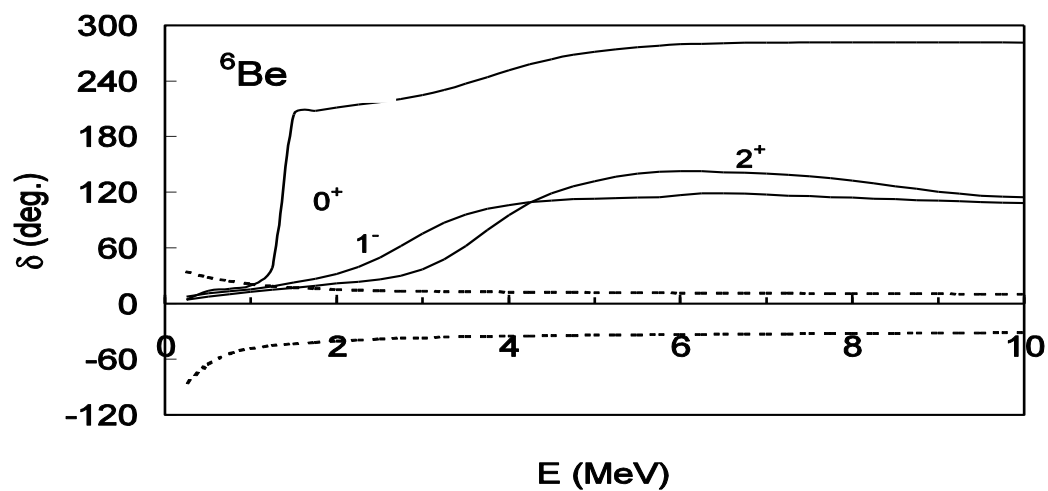
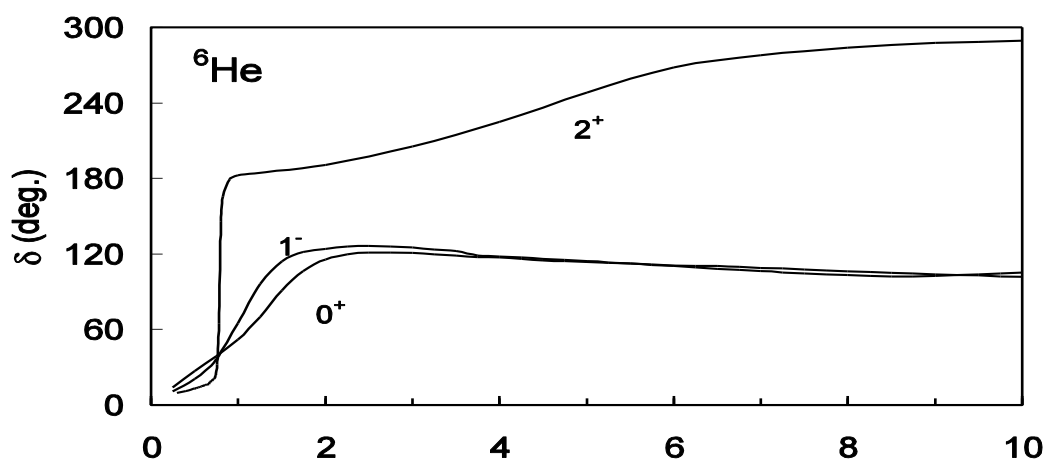
2-расмда $\alpha+n+n$ -системанинг $J^\pi=0^+$ ҳолати учун $K_{\max}$ нинг турли қийматларида хусусий фазалар келтирилган. Расмдан кўриниб турибдики, фазанинг яқинлашиши юқорида энергияларда тезроқ бажарилади.



1-расм. $\alpha+n+n$ -системанинг $J^\pi=0^+$ ҳолати учун фаза силжишлари, канал радиуслари $a_0=20$ фм ва $a_0=30$ фм (штрих чизиқлар) ва пропагатор ёрдамида 250 фм гача давом эттирилган ҳоллар учун (узлуксиз чизиқ)



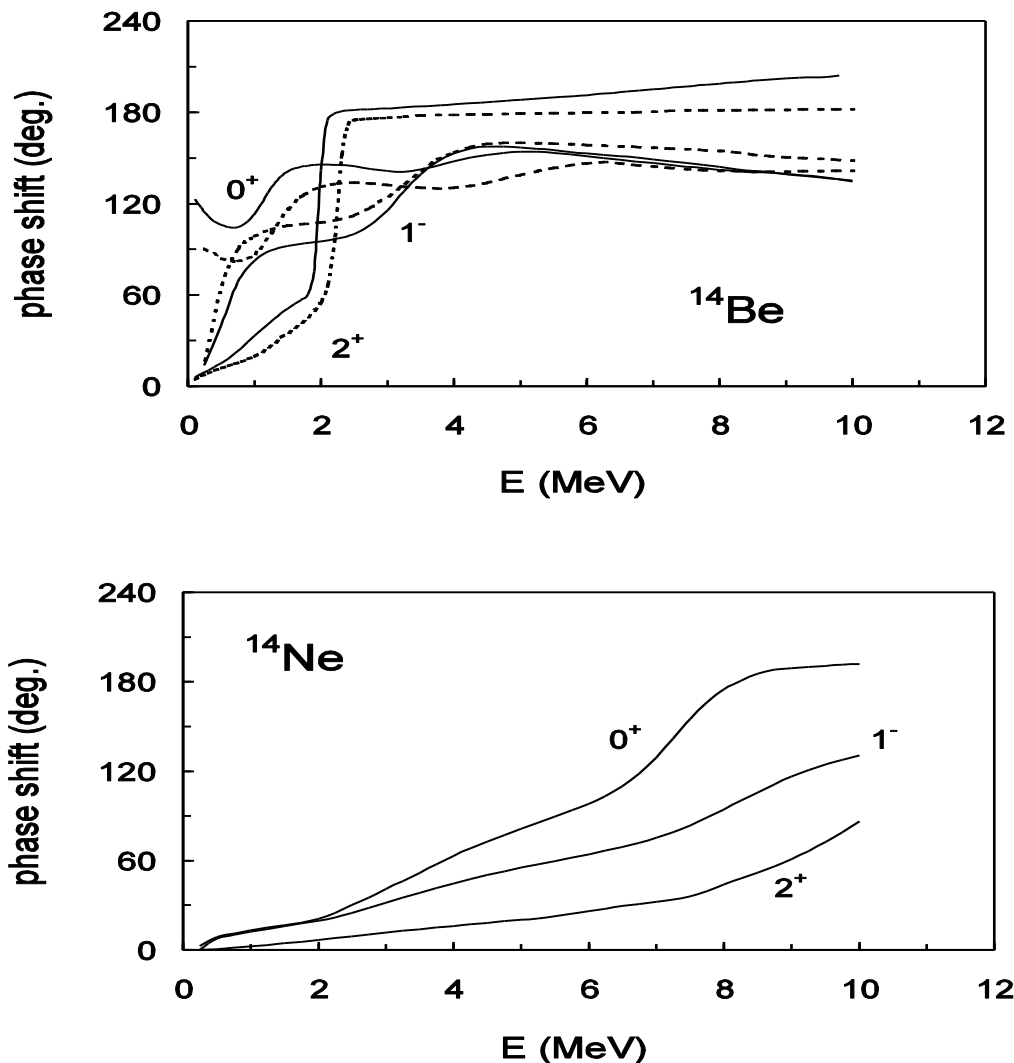
2-расм. $\alpha+n+n$ -системанинг $J^\pi=0^+$ ҳолати учун хусусий фазалар, $K_{\max}$ нинг турли қийматларида



3-расм. ${}^6\text{He}$ ва ${}^6\text{Be}$ ядроларининг $J^\pi=0^+$, 1^- , 2^+ ҳолатлари учун хусусий фазалар

3-расмда ${}^6\text{He}$ ва ${}^6\text{Be}$ ядролар $J^\pi=0^+, 1^-, 2^+$ ҳолатларининг хусусий фазалари кўрсатилган. ${}^6\text{He}$ ядросида 0.7 МэВ атрофида 2^+ тор резонансни кўриш мумкин, тажриба натижаси 0.8 МэВ дан сал пастроқ. 0^+ ва 1^- ҳолатларда эса 1.5 МэВ атрофида кенг резонанслар кўриняпти. Шунга яқин натижалар М.В. Жуков ва б. ҳамда И.Ж. Томпсон ва б. томонидан олинган. ${}^6\text{Be}$ ядросининг асосий ҳолат энергияси учун $E=1.26$ МэВ ва кенглиги учун $\Gamma=65$ кэВ қийматлар олинди, улар тажриба натижалари $E=1.37$ МэВ ва $\Gamma=92\pm6$ кэВ га яхши мос келади.

4-расмда ${}^{12}\text{Be}+n+n$ ва ${}^{12}\text{O}+p+p$ системаларнинг $J^\pi=0^+, 1^-, 2^+$ ҳолатлари учун хусусий фазалар келтирилган. Расмдан кўриниб турибдики, ${}^{14}\text{Be}$ (2^+) ҳолатда 2 МэВ атрофида (уйғониш энергияси $E_{\text{уйф}}=3.4$ MeV) тор резонанс мавжуд, тажриба учун олдиндан айтиб берилган назарий баҳо. Бу резонанснинг мавжудлиги яқинда олинган $E_{\text{уйф}}(\text{exp})=3.54(16)$ МэВ тажриба натижаси билан тасдиқланди.

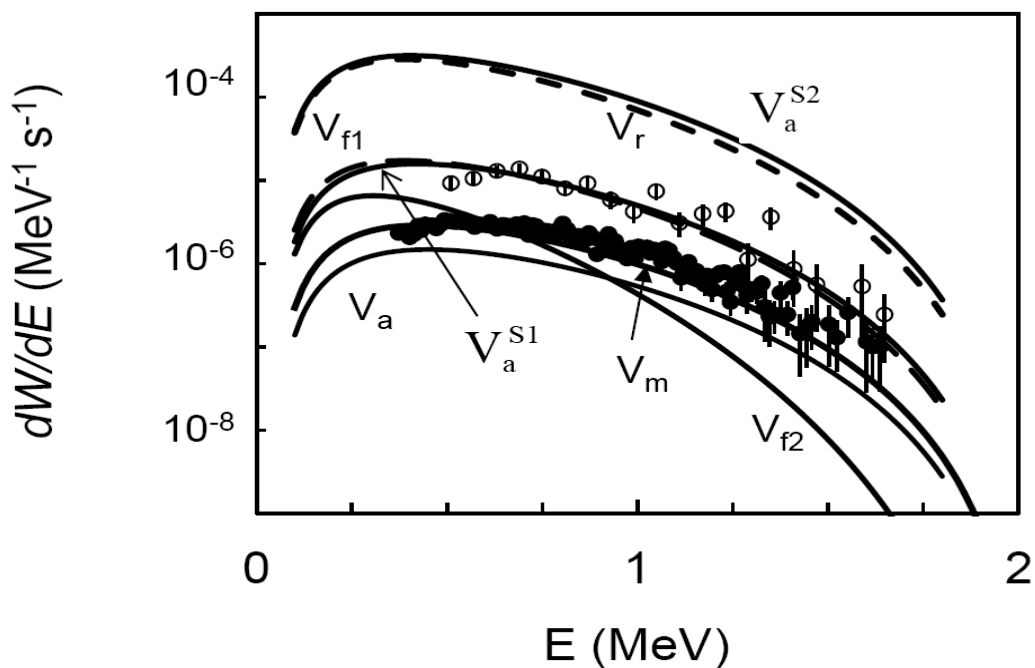


4-расм. ${}^{12}\text{Be}+n+n$ ва ${}^{12}\text{O}+p+p$ уч жисм системаларнинг $J^\pi=0^+, 1^-, 2^+$ ҳолатлари учун хусусий фазалар

Диссертациянинг **тўртинчи бобида** икки нейтронли ${}^6\text{He}(0^+)$ гало ядросининг $\alpha+d$ континуум каналга бета парчаланиш жараёни уч жисм моделида батафсил назарий таҳлил қилинган. Бу каби реакциялар фақатгина икки нейтрон ажралиш энергияси 3 МэВ дан кичик бўлган ядролар учун энергетик жиҳатдан мумкин. Кўрилатган ҳолда бу шарт ортиғи билан бажарилади: $E_{2n}=0.95$ МэВ. Максимал мумкин бўлган энергия $\alpha+d$ масса маркази системасида 2.03 МэВ га тенг. Чиқиш каналида тўлиқ момент 1 га тенг бўлгани учун, фақатгина Гамов-Теллер бета ўтиш жараёни мумкин бўлади, бунда электрон ва антинейтринонинг спинлари параллел. Жараён тўлиқ эҳтимоллиги жуда пасайиб кетган ва у $2.2\pm 1.1 \text{ E-6 сек}^{-1}$ га тенг. Диссертациянинг 4.1 бўлимида фойдаланилган модель баён қилинган. Олдинги бобдаги каби, ${}^6\text{He}$ ядросининг уч жисм тўлқин функцияси гиперсферик гармониклар методида ҳисобланди. Гамов-Теллер матрица элементлари учун аниқ ифодалар келтирилган, улар бошланғич ва охири ҳолатлар тўлқин функцияларининг қопланиш интегралли орқали ифодаланади. Диссертациянинг 4.2 бўлимида сонли ҳисоблаш натижалари келтирилган. NN-ўзаро таъсир учун Миннесота потенциали, αN -ўзаро таъсир учун эса Кукулин ва б. потенциали танланди. Эффе́ктив интегралларнинг яқинлашишини таҳлил қилиш орқали кўрсатилдики, тажриба натижаларини тушунтириш учун гипермоментнинг катта $K_{\text{max}}=24$ гача қийматларига мос уч жисм каналларини қўшиш керак, бунда интеграл чегарасини 30 фм дан кам олмаслик керак экан. Тажриба натижаларини тўғри талқин қилишда асосий уч жисм компоненти $K=0$ учун олинган матрица элементларининг ички ва ташқи (гало) қисмлари бир бирларини ўзаро пасайтириши керак эканлиги, ва натижада бу компонент жараёнга амалда ҳеч қандай ҳисса қўшмаслиги батафсил кўрсатилди. Доминант ҳисса эса $K=8$ компонентдан, ҳамда $K=2$ ва $K=10$ компонентлардан келар экан. Бу компонентлар учун матрица элементларининг гало қисмлари ҳал қилувчи аҳамиятга эга экан. $\alpha+d$ ўзаро таъсир учун бир неча потенциал моделлар синаб кўрилди (5-расмга қ.): $\alpha+d$ сочилишнинг S-тўлқинда фаза силжишларини тўғри тиклайдиган, лекин боғланган ҳолат энергиясини тикламайдиган ва кичик масофаларда корга эга потенциал (5-расмда V_r); ${}^6\text{Li}(1^+)$ ядросининг боғланиш энергияси $E=1.474$ МэВ ва фаза силжишларини берувчи, лекин S-тўлқинда яна қўшимча тақиқланган ҳолатга эга оддий Гаусс шаклидаги Дубовиченко чуқур потенциали V_a : $V(r)=V_0\exp(-\alpha r^2)$, параметрлари $V_0=-76.12$ МэВ ва $\alpha=0.20 \text{ фм}^{-2}$; фолдинг потенциаллар V_{f1} , V_{f2} ; суперсимметрик алмаштиришлар орқали V_a дан ҳосил қилинган потенциаллар V_a^{S1} ва V_a^{S2} . V_{f1} потенциал ${}^6\text{Li}(1^+)$ ядросининг боғланиш энергиясини беради ва қўшимча тақиқланган ҳолатга эга, лекин фаза силжишларини яхши тиклай олмайди. Аксинча, V_{f2} потенциал фазаларни яхши тикласа ҳам, лекин боғланиш энергиясини юқорироқ баҳолайди.

Суперсимметрик V_a^{S1} потенциал худди V_a каби фаза ва физик боғланган ҳолатни беради, лекин тақиқланган ҳолатга эга эмас. Суперсимметрик V_a^{S2} потенциал эса фақатгина сочилиш фазасини беради, лекин $\alpha+d$ системани боғламайди. Расмдан кўриниб турибдики, назарий эгри чизик пастроқда ётса

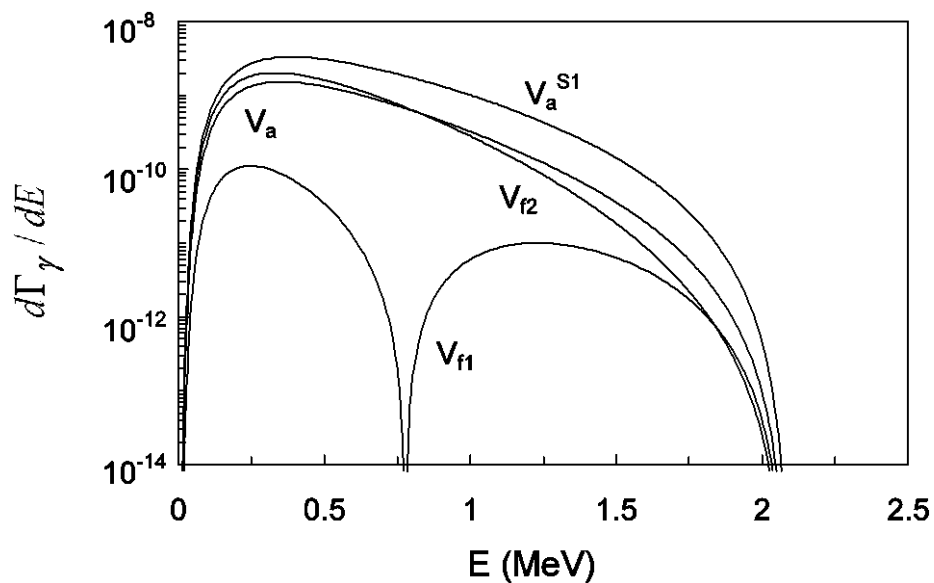
ҳам, жараённинг ўтиш эҳтимолликлари учун янги тажриба натижалари (тўлдирилган доирачалар) шакли чуқур Дубовиченко V_a потенциали билан яхши тикланар экан. V_a потенциалнинг бу ютуғи кичик масофаларда $\alpha+d$ сочилиш S-тўлқин функциясида тақиқланган ҳолатга ортогоналлик натижасида тугуннинг мавжудлиги ҳамда асосий ҳолат энергиясини ва сочилиш фазаларини тиклаш ҳисобига эришилмоқда. Потенциалнинг кенглиги ва чуқурлигини озроқ ўзгартириб, $V_0=-79.4$ МэВ ва $\alpha=0.21$ фм⁻² (5-расмда V_m потенциал), ${}^6\text{He}$ гало ядросининг $\alpha+d$ континуум каналга бета парчаланиш тажриба натижаларини жуда яхши тушунтириш мумкин экан. Шундай қилиб, тақиқланган ҳолатли $\alpha+d$ потенциаллар ушбу жараёни ёритишда ва ${}^6\text{He}$ ядросининг гало-хоссаларини намоён қилишда жуда муҳим аҳамиятга эга экан.



5-расм. Турли αd -потенциаллар учун ${}^6\text{He}(0^+)$ гало ядросининг $\alpha+d$ континуум каналга вақт ва энергия бирликларида бета-парчаланиш эҳтимолликлари

Диссертациянинг **бешинчи бобида** уйғониш энергияси $E_{\text{уйғ}}=3.563$ МэВ бўлган ${}^6\text{Li}(0^+)$ изобар-аналог ҳолатдан ${}^6\text{Li}(1^+)$ асосий ҳолатга ва $\alpha+d$ континуум каналга M1-ўтиш жараёни назарий таҳлил қилинган. Диссертациянинг 5.1 бўлимида фойдаланилган уч жисм модели батафсил баён қилинган. Бу ерда ${}^6\text{Li}$ ядросининг асосий ва уйғонган ҳолатлари $\alpha+p+n$ уч жисм моделида тасаввур қилинади, уларнинг тўлқин функциялари эса Лагранж-меш базисидаги гиперсферик гармониклар методида ҳисобланади. Шу бўлимда M1-ўтиш операторининг Якоби координатларида ифодаси берилган, матрица элементларининг охирги кўриниши эса 2-иловада келтирилган. Диссертациянинг 5.2 бўлимида ушбу жараён учун ўтказилган

сонли ҳисоблашлар натижалари келтирилган. ${}^6\text{Li}(0^+)$ изобар-аналог ҳолатдан ${}^6\text{Li}(1^+)$ асосий ҳолатга M1-ўтиш кенглиги учун 7.49 эВ га тенг назарий баҳо олинди, бу эса тажрибада олинган қиймат 8.19 ± 0.19 эВ га жуда яқин. ${}^6\text{Li}$ ядросининг магнит моменти учун назарий баҳо ($\mu=0.86$ ядро магнетони бирликларида) тажриба баҳоси 0.82 дан салгина катта. Бу баҳолар $K=20$ гача бўлган уч жисм каналларини ўз ичига олувчи тўлқин функциялар билан ҳисобланган, бу эса яхши яқинлашишни таъминлайди. NN-ўзаро таъсир учун, олдингидек, Миннесота потенциали, α N-ўзаро таъсир учун эса Кукулин ва б. потенциали ишлатилди. Якуний континуум ҳолатни тасвирлаш учун олдинги бобдаги V_a , V_{f1} , V_{f2} ва V_a^{S1} турли αd -потенциаллар синаб кўрилди.



6-расм. ${}^6\text{Li}(0^+)$ изобар-аналог ҳолатдан $\alpha+d$ континуум каналга вақт ва энергия бирликларида M1-ўтиш дифференциал кенглиги

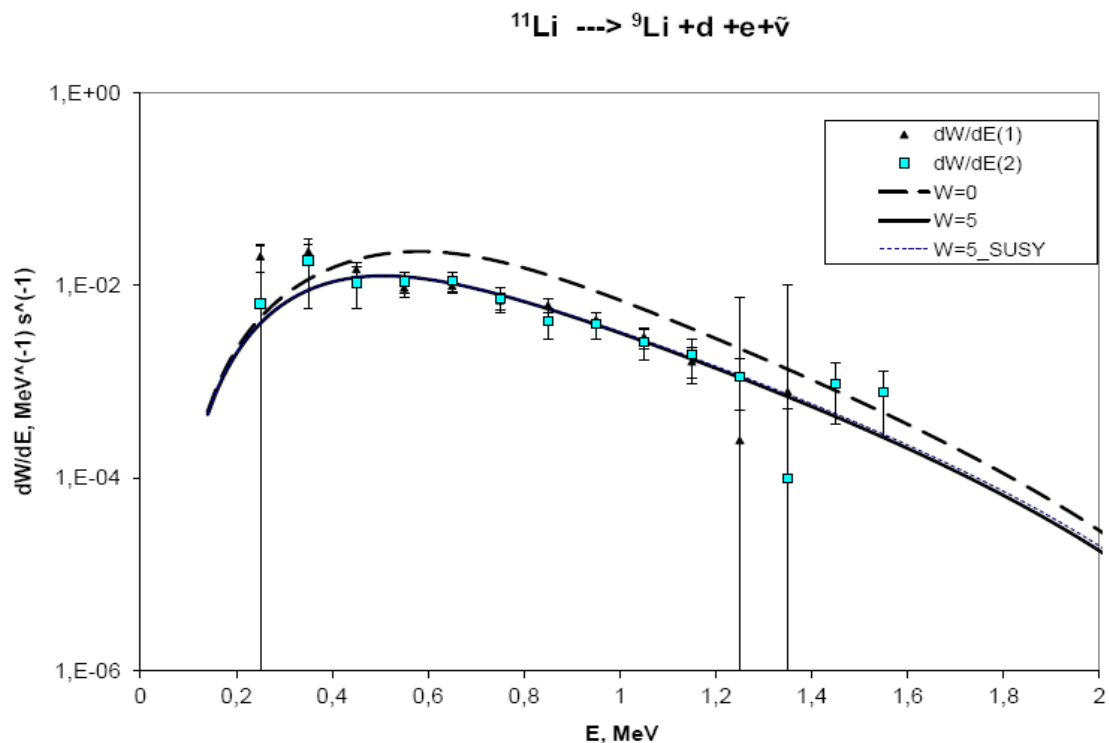
6-расмда ${}^6\text{Li}(0^+)$ изобар аналог ҳолатдан $\alpha+d$ континуум каналга M1-ўтиш дифференциал кенглиги учун назарий ҳисоблашлар натижалари келтирилган. Сочилиш фазасини яхши тиклай олмайдиган фолдинг потенциал V_{f1} учун олинган натижалар 0.6 МэВ энергия атрофида жуда пасайиб кетган, бошқа потенциаллар бундай хоссага эга эмас. Эффектив интеграллар яқинлашишининг таҳлили шуни кўрсатдики, интеграл чегараларини камида 25–30 фм олиш керак экан, ва ўтишнинг матрица элементи асосий ҳиссани $K=0$ ва $K=2$ га мос уч жисм каналлари берар экан (50% атрофида), бунда катта K га мос компонентларнинг ҳиссалари ҳам муҳим экан. M1-ўтишга асосий ҳиссани спин компоненти бериши кўрсатилди. V_a потенциал билан олинган интеграл кенглик 0.9 мЭВ Л. Григоренко ва б. томонидан соддалаштирилган моделда олинган натижалар билан яхши мос келади. Бундан ташқари, M1-ўтиш матрица элементлари ички ва гало компонентларининг ўзаро бир-бирини пасайтириши ${}^6\text{He}$ ядросининг бета парчаланишидаги қадар кучли эмас экан.

Диссертациянинг **олтинчи бобида** икки нейтронли ^{11}Li гало ядросининг икки жисм $^9\text{Li}+d$ континуум каналига бета парчаланиши назарий таҳлил қилинган. Бошланғич ядро, олдинги боблардаги каби, $^9\text{Li}+n+n$ уч жисм моделида Лагранж-меш базисида қурилган гиперсферик гармониклар методида тасвирланади. Миннесота нуклон-нуклон потенциали ва ^{11}Li ядросининг икки нейтрон ажралиш энергияси $S_{2n}=376$ кэВ ни тиклайдиган ва S-тўлқинда тақиқланган ҳолатга эга марказий $^9\text{Li}+n$ Томпсон ва Жуков потенциали ишлатилди. Максимал кинетик энергия $E_Q=2.63$ МэВ. $^9\text{Li}+d$ потенциаллар эса ^{11}Be ядросининг физик боғланган $1/2^-$ ҳолатини $E=-17.60$ МэВ энергия билан тиклаши керак, бу ҳолат $E_{\text{уйғ}}=320$ кэВ уйғониш энергиясига эга. Микроскопик кластер моделларда $^9\text{Li}+d$ системаси S-тўлқинда физик ҳолатдан пастроқда ётувчи тақиқланган ҳолатга эга. Кўрилатган моделда бундай ҳолатни $\alpha+d$ системасидаги каби чуқур потенциал ёрдамида олиш мумкин. Лекин, бу ерда иккита муҳим фарқ бор. Биринчиси, $^9\text{Li}+d$ системада S-тўлқинда резонанс мавжуд, лекин унинг ўрни тажрибадан ҳали яхши аниқланмаган ва 0.2 – 1 МэВ оралиқда ётади. Икинчи фарқи шундан иборатки, ^{11}Li ядросининг $^9\text{Li}+d$ каналдан пастроқда жойлашган бир неча очиқ реакция каналлари, масалан, $^{10}\text{Be}+n$ ва $^8\text{Li}+t$ бета парчаланиш каналлари мавжуд. Шу сабабли, бу ерда бутунлай бошқа физикани кўриш мумкин. Шу нарса аниқландики, бета парчаланиш эҳтимолликлари резонанснинг жойлашган ўрнига ниҳоят даражада кучли боғлиқ экан ва $^9\text{Li}+d$ системадаги S-тўлқинда бу резонансни тикламайдиган потенциаллар, дейтрон континуум каналга бета парчаланиш эҳтимолликларининг ҳатто тўғри тартибини ҳам бермас экан. Бунда, ўтиш эҳтимолликлари корли ёки тақиқланган ҳолатга эга потенциал ишлатилишига умуман боғлиқ эмас экан. Очиқ парчаланиш каналлари мавжудлиги учун, $^9\text{Li}+d$ потенциалга ютувчи мавҳум ҳад киритилади:

$$V(r) = -(V_0 + iW) \exp(-\alpha r^2). \quad (3)$$

Шу нарса маълум бўлдики, ютувчи ҳад ҳисобига бета ўтиш эҳтимоллиги анчагина камайиши мумкин экан.

7-расмда ^{11}Li гало ядросининг $^{11}\text{Li}+d$ континуум каналга бета парчаланиши вақт ва энергия бирлигидаги эҳтимолликлари учун кластер модели доирасида назарий баҳолар адабиётдан олинган янги тажриба натижалари билан солиштирилган ҳолда келтирилган. $^9\text{Li}+d$ потенциал параметрлари $V_0=100.1$ МэВ ва $\alpha=0.17$ фм $^{-2}$, W эса бир неча МэВ гача ўзгариши мумкин. Бу потенциал S-тўлқинда 0.7 МэВ энергия атрофидаги резонансни беради. Расмдан кўриниб турибдики, потенциалга $W=5$ МэВ билан ютувчи ҳадни қўшиш орқали тажриба натижаларини жуда яхши тиклаш мумкин экан.

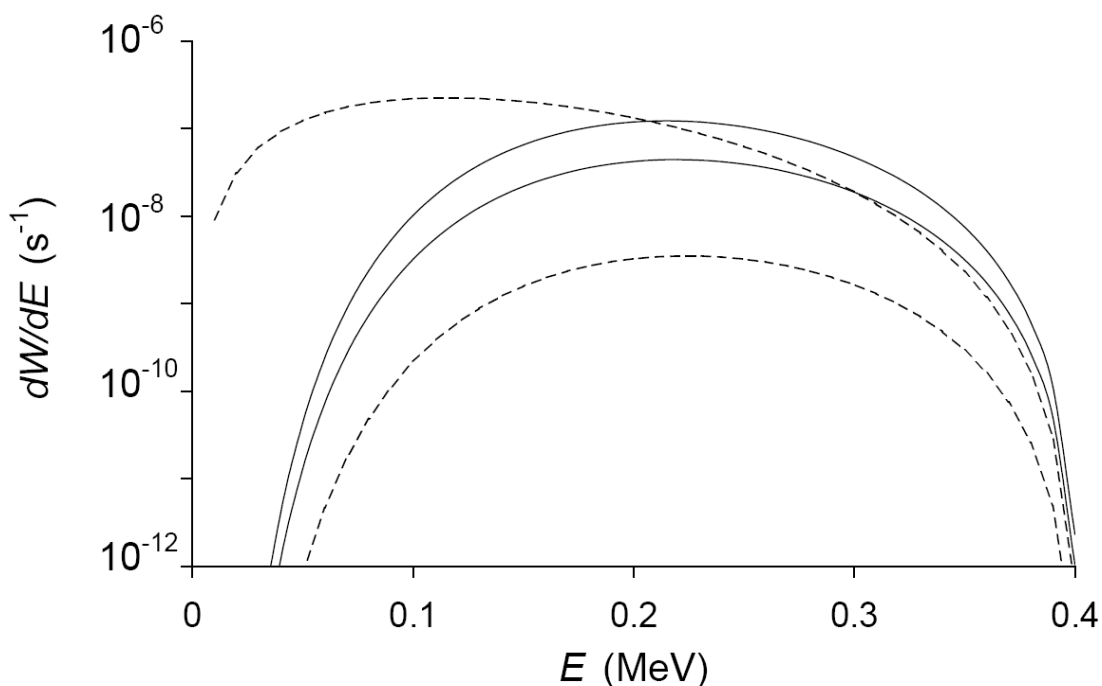


7- расм. ^{11}Li гало ядросининг $^9\text{Li} + d$ континуум каналга вақт ва энергия бирликларида бета-парчаланиш эҳтимолликлари сирт ютувчи ҳаднинг куч параметри W нинг турли қийматларида (МэВ ларда)

Бу расмдан яна шуни кўриш мумкинки, ^6He гало ядросининг бета парчаланишига зид ўлароқ, $^9\text{Li} + d$ потенциалдаги кўшимча тақиқланган ҳолатни суперсимметрик (SUSY) алмаштиришлар ёрдамида йўқотиш амалда бета ўтиш эҳтимолликларига умуман таъсир қилмас экан. Яна шу нарса топилдики, Гамов-Теллер ўтиши матрица элементларининг гало компонентлари ички компонентлардан тўла устунлик қилар экан. Ўтишнинг интеграл эҳтимоллиги учун $E > 0.2$ МэВ энергия оралиғида олинган назарий баҳо $7.3\text{E-}3 \text{ сек}^{-1}$ тажриба натижаси $8.8 \pm 1.9 \text{ E-}3 \text{ сек}^{-1}$ билан яхши мос келади.

Диссертациянинг **еттинчи бобида** ноёб $^{11}\text{Li} \rightarrow ^9\text{Li} + p + n + e + \bar{\nu}$ бета ўтиш жараёни таҳлил қилинган. Бу жараённинг ноёблиги шундаки, ҳамма икки нейтронли гало ядролар ичида фақат ^{11}Li ядроси учун гало нейтронларнинг бета ўтиш шarti, яъни $S_{2n} < (m_n - m_p - m_e)c^2 \approx 782 \text{ кэВ}$ тенгсизлик, олтинчи бобда таъкидланганидек, биров ортиғи билан бажарилади: $S_{2n} = 376 \pm 5 \text{ кэВ}$. Олдинги бобдаги каби, айнан ўша ердаги шартлар билан ^{11}Li ядросининг уч жисм тўлқин функцияси $^9\text{Li} + n + n$ боғланган ҳолати сифатида Лагранж-меш базисида қурилган гиперсферик гармониклар методида ҳисобланади. Якуний $^9\text{Li} + p + n$ система ^{11}Be ядросининг уч жисм континуум ҳолатидир. Бу ҳолат тўлқин функциясини ҳисоблаш ^6He ядросининг уч жисм континуумига нисбатан бир неча сабабларга кўра анча қийин. Асосий сабаб кор ва протон орасида Кулон итаришувчи кучининг мавжудлиги билан боғлиқ, бу

яқинлашиш радиусини ва уч жисм каналлар сонини кескин оширади. Бундан ташқари, континуум тўлқин функцияси бир неча боғланган ҳолатлар тўлқин функцияларига ортогонал бўлиши керак, бу эса континуум ҳолат структурасини ва керак бўладиган ҳисоблашларни жуда ҳам мураккаблаштиради. Бу бета ўтиш жараёнининг эҳтимоллигини баҳолаш келажак тажрибалар учун ўта муҳим бўлгани сабабли, моделни бироз соддалаштириш мумкин. Бошқача айтганда, ядро ва Кулон ўзаро таъсирлар потенциаллари қўшилган ҳолдаги ҳақиқий тўлқин функцияни моделлаштириш учун Кулон тўлқин функциясини озроқ модификация қилиш мумкин. Бу модификация Кулон функциясини чап томонга 10–15 фмга



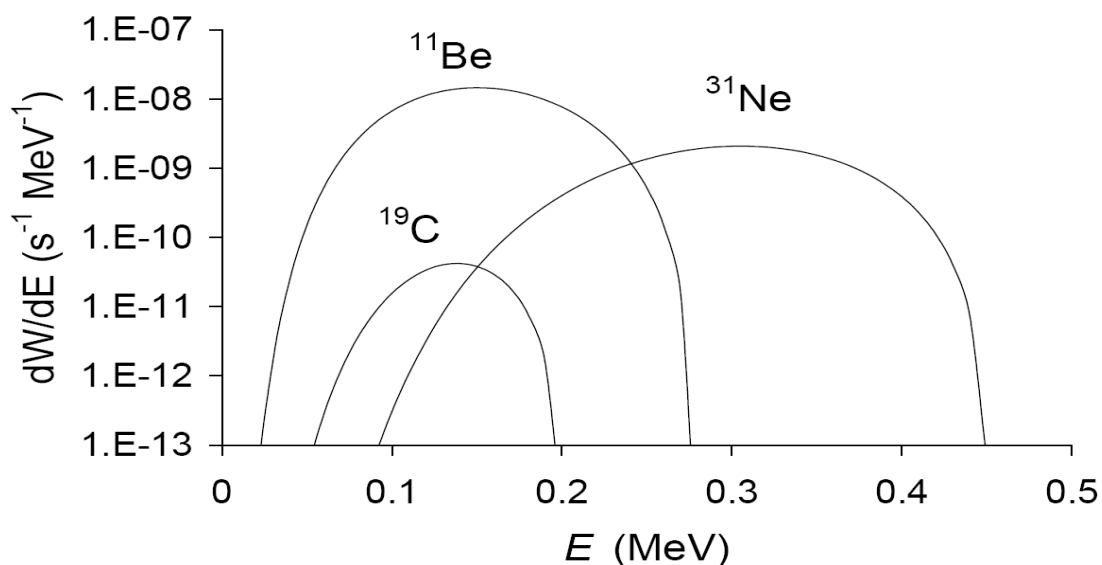
Юқоридаги штрих чизик текис тўлқин яқинлашишига, пастдаги штрих чизик эса эффектив заряд 4.83 билан соф Кулон потенциалига мос келади. Пастдаги узлуксиз чизик чап томонга $a=10$ фм га силжитилган Кулон тўлқин функциясига, юқоридаги узлуксиз чизик эса $a=15$ фм билан модификация қилинган Кулон функциясига мос келади.

8-расм. ^{11}Li гало ядросининг $^9\text{Li} + p + n$ континуум каналга вақт ва энергия бирликларида бета-парчаланиш эҳтимолликлари

силжитишдан иборат. 8-расмда ^{11}Li гало ядросининг уч жисм континуум каналга бета парчаланиши вақт ва энергия бирлигидаги эҳтимолликлари учун олинган назарий баҳолар келтирилган. Бета ўтишнинг тўла эҳтимоллиги учун текис тўлқин билан $W=3.8\text{E}-8 \text{ сек}^{-1}$ баҳо, соф Кулон тўлқини билан эса $W=5.1\text{E}-10 \text{ сек}^{-1}$ баҳо олинди. Модификация қилинган Кулон функцияси эса тўла эҳтимоллик учун $0.6\text{E}-8 \text{ сек}^{-1} < W < 1.8\text{E}-8 \text{ сек}^{-1}$ оралиқдаги баҳони берар экан. Бу баҳо ҳатто ^6He гало ядросининг бета парчаланиш эҳтимоллигидан ҳам икки тартибда кичикроқ. Жараённинг қанчалик ноёб эканини кўрсатувчи тармоқланиш коэффициенти қуйидаги муносабат билан аниқланади: $R=Wt_{1/2}/\ln 2$, бу ерда $t_{1/2}=8.75$ мсек – бошланғич ядронинг ярим емирилиш

даври. Бу катталикнинг ^{11}Li ядросининг уч жисм континуум каналга бета парчаланиш жараёни учун баҳоси $0.8\text{E}-10$ дан $2.2\text{E}-10$ гача ораликда ётар экан, бу эса ^6He ядросининг дейтрон каналга бета парчаланиши учун баҳо $(2.6\pm 1.3)\text{E}-6$ га қараганда жуда камдир. Биринчи жараён учун тармоқланиш коэффицентининг кичик қийматга эгаллигига асосий сабаб кичик Q -қийматдир ($E_Q = 0.404$ МэВ), у фаза фазосини кескин чегаралайди.

Диссертациянинг **саккизинчи бобида** бир нейтронли ^{11}Be , ^{19}C , ва ^{31}Ne гало ядроларнинг икки жисм кор плюс протон континуум каналларга бета парчаланишининг назарий таҳлили берилган. Бу ядролар учун нейтрон ажралиш энергиялари мос равишда $S_n=501$ кэВ, $S_n=580\pm 90$ кэВ, ва $S_n=0.33\pm 1.07$ МэВ га тенг. Олдиндан, бета ўтиш ядронинг гало қисмида содир бўлади деб фараз қилинади. Учала ҳолда ҳам Гамов-Теллер ўтиши билан бир қаторда Ферми ўтиши ҳам амалга ошиши мумкин. Ўтишнинг энергетик шарти $S_n < (m_n - m_p - m_e)c^2 \approx 782$ кэВ бўлиши керак, максимал мумкин бўлган энергия эса кор ва протон система масса марказида $E_Q = (m_n - m_p - m_e)c^2 - S_n$ га тенг. ^{31}Ne ядросида валент нейтрон ажралиш энергияси катта хатолик билан берилгани учун, бета ўтиш эҳтимоллиги ҳам катта ноаниқлик билан баҳоланади ва 0 дан 10^{-6} сек $^{-1}$ гача қиймат қабул қилиши мумкин. Биринчи иккита ^{11}Be ва ^{19}C ядролар учун бошланғич кор + нейтрон ҳолат S-тўлқин билан, ^{31}Ne ядроси учун эса P-тўлқин билан ифодаланади. Ўзаро таъсир потенциаллари Вуд-Саксон шаклида олинди. Уларнинг параметрлари ҳар бир вариантда биттадан қўшимча тақиқланган ҳолат билан валент нейтроннинг ажралиш энергиясини беради.



9-расм. ^{11}Be , ^{19}C ва ^{31}Ne гало ядроларнинг кор плюс протон континуум каналларга вақт ва энергия бирликларида бета-парчаланиш эҳтимолликлари

9-расмда ^{11}Be , ^{19}C ва ^{31}Ne гало ядроларнинг кор плюс протон континуум каналларга бета ўтиш эҳтимолликлари энергия ва вақт бирликларида берилган. Бу ҳисоблашларда ^{31}Ne ядросида нейтрон ажралиш энергияси

$E=0.6$ МэВ деб қабул қилинган. Бу шартларда ^{11}Be , ^{19}C ва ^{31}Ne ядролари тўла ўтиш эҳтимолликлари учун мос равишда $1.5\text{E}-9$ сек $^{-1}$, $2.7\text{E}-12$ сек $^{-1}$ ва $3.3\text{E}-10$ сек $^{-1}$ баҳолар олинди. Уларга мос тармоқланиш коэффициентлари эса $3.0\text{E}-8$, $1.8\text{E}-13$, ва $1.6\text{E}-12$ га тенг экан.

Иловаларда уч жисм моделида континуумга M1-ўтиш эҳтимоллиги учун аналитик формулалар ҳамда боғланган ва континуум ҳолатларга M1-ўтиш матрица элементлари келтирилган.

ХУЛОСА

1. ^{12}C ядроси компакт асосий 0^+ ва уйғонган 2^+ ҳолатлар энергияларининг α -Паули тақиқланган ҳолатларни тасвирлашга ўта сезгирлиги кўрсатилди.

2. Биринчи марта енгил ядроларнинг уч жисм континуум структурасини ўрганиш учун гиперсферик Лагранж-меш базисида R-матрица методи ривожлантирилди. Ички соҳа чегарасида топилган R-матрица Нумеров алгоритми ёрдамида тўлқин функция асимптотика билан уланиши керак бўлган узоқ масофаларгача (тахминан 1000 фм) давом эттирилиши кераклиги аниқланди. Метод ^6He ва ^{14}Be гало ядроларнинг уч жисм континуум структураларини таҳлил қилиш учун қўлланди, уч жисм тўқнашиш матрицаларининг диагонал ва хусусий фаза силжишлари ҳисобланди. ^{14}Be ядросида $E_{\text{уйғ}}=3.4$ МэВ энергияда янги 2^+ резонанс мавжудлиги башорат қилинди.

3. ^6He гало ядросининг $\alpha+d$ континуум каналга бета парчаланиш вақт ва энергия бирликларидаги эҳтимолликлари бўйича тажриба натижаларини тушунтириш учун микроскопик жиҳатдан асосланган, S-тўлқинда тақиқланган ҳолатга эга ҳамда асосий ҳолат энергиясини ва фаза силжишларини тиклай оладиган αd -потенциалларидан фойдаланиш ўта муҳим эканлиги кўрсатилди. Бундай ҳолда, Гамов-Теллер матрица элементларининг ички ва гало компонентлари ўзаро бир бирини деярли тўлиқ пасайтиради, ва натижада, йиғинди ўтиш эҳтимолликлари, тажриба натижаларига тўла мос равишда, хаддан ташқари камайиб кетар экан.

4. Гиперсферик гармониклар методи $^6\text{Li}(0^+)$ изобар аналог ҳолатдан $^6\text{Li}(1^+)$ асосий ҳолатга ва $\alpha+d$ континуум каналга M1-ўтиш жараёнини уч жисм формализмида ўрганиш учун қўлланди. $^6\text{Li}(1^+)$ асосий ҳолатга M1-ўтиш кенглиги учун тажриба натижаси (8.19 ± 0.19 эВ) билан яхши мос келувчи назарий баҳо олинди (7.49 эВ), ^6Li ядроси магнит моменти ($\mu=0.86$ ядро магнетони бирликларида) тажриба натижаси 0.82 дан биров фарқ қилар экан. $^6\text{Li}(0^+)$ изобар аналог ҳолатдан $\alpha+d$ континуум каналга M1-ўтиш вақт ва энергия бирлигидаги эҳтимолликлари учун назарий баҳолар олинди. Интеграл кенглик учун олинган 0.9 мэВ баҳо илгариги соддалаштирилган ҳисоблашлар натижалари билан яхши мос келар экан. $^6\text{Li}(0^+)$ изобар аналог

ҳолат ${}^6\text{He}$ ядроси каби аниқ кўринадиган гало структурага эга эканлиги кўрсатилди.

5. ${}^{11}\text{Li}$ гало ядросининг ${}^{11}\text{Li}+d$ континуум каналга бета парчаланиши вақт ва энергия бирлигидаги эҳтимолликлари учун янги тажриба натижалари билан тўлиқ мос келувчи назарий баҳолар олинди. Бу жараёнда ${}^9\text{Li}+d$ система S -тўлқинида 0.7 МэВ энергия билан аниқланган резонанснинг, қандай потенциал (корли ёки тақиқланган ҳолатли) ишлатилишидан қатъи назар, тажриба натижаларини тушунтириш учун ўта муҳимлиги кўрсатилди. Бунда гало компонентлар ички компонентлардан тўла устунлик қилар экан. Йиғинди эҳтимоллик учун $E>0.2$ МэВ энергия оралиғида олинган $7.3\text{E}-3$ сек $^{-1}$ баҳо тажриба натижаси 8.8 ± 1.9 E-3 сек $^{-1}$ билан яхши мос келади.

6. ${}^{11}\text{Li}$ гало ядросининг ${}^9\text{Li}+p+n$ континуум каналга ноёб бета парчаланиши тармоқланиш коэффиценти учун кластер модели доирасида назарий баҳолар олинди. Тармоқланиш коэффиценти ва жараённинг энергетик тақсимоли учун ишончли баҳолар модификация қилинган Кулон функциялари ёрдамида олинди. Бу функциялар ядро ва Кулон ўзаро таъсир кучларига мос келувчи реал тўлқин функциянинг ўрнини босади. Тармоқланиш коэффиценти учун жуда кичик, $0.8\text{E}-10$ дан $2.2\text{E}-10$ гача оралиқдаги баҳо олинди, бу баҳо олдин кўрилган ${}^6\text{He}$ гало ядросининг дейтрон каналига бета парчаланиш тармоқланиш коэффиценти учун олинган баҳо $(2.6 \pm 1.3)\text{E}-6$ га нисбатан жуда кам ҳисобланади. Биринчи жараён учун тармоқланиш коэффицентининг кичиклигига сабаб Q - қийматнинг камлигидир, у фаза фазосининг кескин чегараланишига олиб келади. Бета ўтишнинг тўла эҳтимоллиги 10^{-8} сек $^{-1}$ тартибга эга экан.

7. ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{19}\text{C}$ ва ${}^{31}\text{Ne}$ бир нейтронли гало ядроларнинг икки жисм континуум каналларга бета парчаланиши вақт ва энергия бирлигидаги эҳтимолликлари учун кластер модели доирасида назарий баҳолар олинди. ${}^{11}\text{Be}$ ядросининг ${}^{10}\text{Be}+p$ континуум каналга бета парчаланиш йиғинди эҳтимоллиги учун $1.5\text{E}-9$ сек $^{-1}$, ${}^{19}\text{C}$ ядроси учун эса $2.7\text{E}-12$ сек $^{-1}$ баҳо олинди. Тармоқланиш коэффиценти эса мос равишда, ${}^{11}\text{Be}$ ядроси учун $3.0\text{E}-8$ га, ${}^{19}\text{C}$ ядроси учун $1.8\text{E}-13$ га тенг экан. ${}^{31}\text{Ne}$ ядросининг ${}^{30}\text{Ne}+p$ каналга бета парчаланиш йиғинди эҳтимоллиги, валент нейтрон ажралиш энергиясининг қийматига боғлиқ равишда, 0 дан 10^{-6} сек $^{-1}$ гача оралиқда баҳоланар экан. Ажралиш энергияси ҳозирча тажрибаларда яхши аниқланган эмас. Бу катталиқнинг 0.25 МэВдан 0.35 МэВгача бўлган оралиқдаги қийматлари учун, бета ўтиш жараёнининг йиғинди эҳтимоллиги $3.3\text{E}-10$ сек $^{-1}$ билан баҳоланар экан, бу эса тармоқланиш коэффиценти учун $1.6\text{E}-12$ баҳога олиб келар экан.

Ўтказилган тадқиқотларнинг **асосий якуни** қуйидагидан иборат: мазкур диссертация ишида ривожлантирилган потенциал моделлар, агарда уларнинг параметрлари енгил ядроларнинг микроскопик хоссалари билан келишиш шартларидан топилган бўлса, нафақат қуйи энергиялар ядро физикаси соҳасидаги мавжуд бўлган тажриба натижаларини тўлақонли тушунтириши, балки енгил ядроларнинг янги хоссаларини ҳам олдиндан айтиб бера олиши мумкин экан.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ по ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА НАУК 16.07.2013.ФМ.11.01 при ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ
ФИЗИКИ и НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА**

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

ТУРСУНОВ ЭРГАШ МАХКАМОВИЧ

**СТРУКТУРА ЛЕГКИХ ЯДЕР
В РАМКАХ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ**

**01.04.08 – Физика атомного ядра и элементарных частиц, ускорительная техника
(физико-математические науки)**

АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Ташкент – 2015

Тема докторской диссертации зарегистрирована под номером 30.09.2014/В2014.5.FM158 в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан.

Докторская диссертация выполнена в Институте ядерной физики.

Полный текст докторской диссертации размещен на веб-странице Научного совета 16.07.2013.FM.11.01 при Институте ядерной физики и Национальном университете Узбекистана по адресу www.inp.uz.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекском, русском, английском) размещен на веб-странице по адресу www.inp.uz и на информационно-образовательном портале ZIYONET по адресу www.ziynet.uz.

Научный консультант:

Юлдашев Бехзод Садикович

доктор физико-математических наук, профессор,
академик Академии наук Республики Узбекистан

Официальные оппоненты:

Мусаханов Мирзаюсуф Мирзамахмудович

доктор физико-математических наук, профессор,
академик Академии наук Республики Узбекистан

Блохинцев Леонид Дмитриевич

доктор физико-математических наук, профессор

Усманов Пазлитдин Нуритдинович

доктор физико-математических наук

Ведущая организация:

Объединенный институт ядерных исследований

Дубна, Московская область, Российская
Федерация

Защита диссертации состоится «___» _____ 2015 г. в ___ часов на заседании Научного совета 16.07.2013.FM.11.01 при Институте ядерной физики и Национальном университете Узбекистана по адресу: 100214, г. Ташкент, поселок Улугбек, ИЯФ; тел.: (+99871)150-30-70; факс: (+99871)150-30-80; e-mail: info@inp.uz.

Докторская диссертация зарегистрирована в информационно-ресурсном центре Института ядерной физики за № _____, с которой можно ознакомиться в ИРЦ (100214, г. Ташкент, поселок Улугбек, ИЯФ; тел. (+99871) 289-31-19).

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2015 г.
(протокол рассылки № _____ от _____ 2015 г.).

У. С. Салихбаев

Председатель Научного совета по присуждению
ученой степени доктора наук д.ф.-м.н., профессор

Р. Ярмухамедов

Ученый секретарь Научного совета по присуждению
ученой степени доктора наук д.ф.-м.н., профессор

И. Хидиров

Председатель научного семинара при Научном совете
по присуждению ученой степени доктора наук
д.ф.-м.н., профессор

АННОТАЦИЯ ДОКТОРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время прилагаются большие усилия для понимания структуры нейтроноизбыточных гало-ядер ${}^6\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{19}\text{C}$, ${}^{31}\text{Ne}$ и др. Эти ядра обладают необычными свойствами, такими как малая энергия связи и большая протяженность одно- и двухнейтронных орбиталей с малыми угловыми моментами ($l=0,1$). Обычно эти ядра моделируются как кор плюс несколько нейтронов. Кроме того, ни одна из двухчастичных подсистем трехчастичных гало-ядер ${}^6\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{14}\text{Be}$ не связана – свойство, присущее Борромейским системам. Наряду с такими статическими характеристиками гало-ядер, как энергия и зарядовый радиус, большой интерес представляют процессы бета-распада и электромагнитных переходов в двух- и трехчастичные континуум-каналы. Данные процессы дают ценную информацию о внутренней структуре и гало-свойствах этих ядер, проявляющихся в изучаемых процессах, поскольку рассматриваемые переходы происходят именно в гало-частях этих систем. Более того, имеются экспериментальные данные по процессам бета-переходов гало-ядер ${}^6\text{He}$ и ${}^{11}\text{Li}$ в двухчастичные дейтронные континуум-каналы, которые требуют тщательного теоретического анализа. Бета-переходы однеитронных гало-ядер ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{19}\text{C}$, ${}^{31}\text{Ne}$ в двухчастичные кор плюс протон континуум-каналы также могут давать информацию о новых гало-свойствах этих систем в дополнение к их статическим характеристикам.

Среди гало-ядер особо выделяется ядро ${}^{11}\text{Li}$, отличающееся от других ядер тем, что дополнительно может распадаться на трехчастичный ${}^9\text{Li}$ +протон+нейтронный континуум-канал. Так как этот переход представляет собой довольно сложный процесс, теоретическая модель позволит получить ценную информацию об изучаемом процессе и трехчастичной структуре гало-ядра ${}^{11}\text{Li}$.

Первое возбужденное состояние ядра ${}^6\text{Li}$ является изобар-аналоговым состоянием гало-ядра ${}^6\text{He}$. Благодаря процессу M1-перехода данного состояния в дейтронный континуум-канал можно получить информацию о его гало-свойствах, аналогичных свойствам ядра ${}^6\text{He}$. Установленные при этом оценки для ширины M1-перехода могут быть сопоставлены с имеющимися экспериментальными данными. Данный процесс дополнительно может быть использован при изучении эффектов нарушения сохранения четности в сильном взаимодействии.

Модели ядро-ядерного взаимодействия, содержащие запрещенные состояния в низших волнах, предложены еще в 70-е годы прошлого столетия для адекватного учета принципа Паули в качестве альтернативы к потенциальным моделям с отталкивающим кором на малых расстояниях. Они имеют микроскопическое обоснование, т.е. опираются на нуклонные степени свободы. Однако роль этих запрещенных состояний в структуре ядра до сих пор не изучена надлежащим образом. Особенно важен этот вопрос для ядер, содержащих несколько альфа-кластеров. Исключение составляет

Московская модель нуклон-нуклонного потенциала с запрещенными состояниями в низших волнах. Ее свойства в трехнуклонных ядрах изучены достаточно подробно. С другой стороны, роль запрещенных состояний в Московской модели совсем другая: она связана с кварковой структурой нуклона. А в легких ядрах, состоящих из нескольких ядерных кластеров, модели с запрещенными состояниями введены исключительно для адекватного учета принципа Паули, которые стали особенно актуальными в связи с открытием гало-структуры некоторых легких ядер. Изучение гало свойств легких ядер в электромагнитных и бета-процессах с использованием двух альтернативных потенциальных моделей, с кораи и с запрещенными состояниями, поможет выяснить особые свойства этих моделей.

Ядра, состоящие из нескольких альфа-кластеров, играют исключительно важную роль в астрофизике. Хотя две альфа-частицы не связаны, ядра из трех (^{12}C) и четырех (^{16}O) альфа-кластеров обладают большими энергиями связи, поэтому принадлежат к классу Борромейских ядер. Для таких ядер особенно остро стоит проблема получения реалистических волновых функций как связанных, так и континуум-состояний, которые можно применять для расчета сечения астрофизических реакций синтеза. С другой стороны, в последнее время изучение структуры этих ядер стало еще более актуальным в связи с предсказанием существования «альфа-конденсации».

Развиваемые в диссертации модели легких ядер и получаемые на их основе результаты крайне важны для оптимального управления термоядерными реакциями в плазме $\text{d}+{}^6\text{Li}$, происходящими с образованием легких ядер ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, ${}^7\text{Li}$ и ${}^7\text{Be}$. Неопределенности в дифференциальном сечении реакций сильно влияют на кинетику термоядерного реактора, поэтому для оптимального управления этими процессами необходимо развивать теоретические модели с высокой точностью. Вариационные методы на основе гауссового и Лагранж-меш базисов необходимы для расчета волновых функций, которые используются для оценки скоростей указанных реакций с высокой точностью.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Диссертация выполнена в соответствии с Государственной научно-технической программой фундаментальных исследований ПФИ-2 – «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение».

Обзор международных научных исследований по теме диссертации. Теоретические модели для структуры легких ядер развиваются в различных научных центрах мира. Наиболее успешные теоретические модели для структуры связанных состояний основываются на вариационных методах, построенных на гауссовом (теоретические группы в Ниигате и Киото, Япония и Московском Государственном университете, Россия) и Лагранж-меш (теоретическая группа в Брюссельском свободном университете, Бельгия) базисах. Они были применены для исследования структуры трехчастичных ядер ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^6\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$. Были оценены энергетический спектр, среднеквадратичный радиус, электрические и магнитные форм-

факторы. Однако теоретическое исследование структуры ядра ^{12}C в модели 3α пока не дает удовлетворительных результатов. Спектр связанных состояний этого ядра, полученный с помощью локального α -потенциала с отталкивающим кором, лежит намного выше экспериментального спектра. В то же время микроскопические модели недооценивают спектр на несколько МэВ, а при трехчастичных расчетах, основанных на использовании потенциальной модели с α -запрещенными состояниями, встречаются большие трудности, связанные с ортогонализацией решения на запрещенные состояния. Для преодоления этих трудностей необходимо тщательно проверить чувствительность энергетического спектра ядра ^{12}C к описанию α -запрещенных состояний.

Трехчастичная континуум-структура легких ядер изучается как экспериментально через реакции развала (RIKEN, Япония), так и теоретически на основе метода уравнений Фаддеева (теоретическая группа университета Архус, Дания), метода комплексного масштабирования и метода аналитического продолжения (теоретическая группа МГУ, Россия). Однако возможности этих методов ограничены. В частности, применение метода уравнений Фаддеева сопряжено с большими трудностями при учете кулоновских сил, а метод аналитического продолжения, как и метод комплексного масштабирования, может быть применен только к резонансным состояниям.

Прежде R-матричный подход применялся к двухчастичным задачам континуума. Однако недавнее применение этого описанного в литературе подхода для трехчастичного континуума в рамках гиперсферического метода (группы Курчатовского института атомной энергии, Россия, и Копенгагенского университета, Дания) сталкивается с серьезными проблемами вследствие протяженности трехчастичного связанного потенциала.

Как отмечалось, в последние годы особый интерес представляют свойства двухчастичных ^{11}Be , ^{19}C , ^{31}Ne и трехчастичных ^6He , ^{11}Li , ^{14}Be гало-ядер. Вышеупомянутые теоретические группы проводят исследовательские работы по изучению связанной и континуум-структуры этих систем, а также процессов электромагнитных и бета-переходов в континуум-каналы.

Степень изученности проблемы. Роль запрещенных состояний в ядерных взаимодействиях прежде изучалась в задаче 3α в работах зарубежных ученых S. Marsh и H. Walliser, S. Nakaichi-Maeda. Однако до сих пор не удалось полностью выделить трехчастичное разрешенное пространство для этой системы. Полученные решения уравнения Шредингера для связанных состояний ядра ^{12}C в модели 3α с потенциалом BFW с запрещенными состояниями содержат некоторую примесь запрещенных состояний. Применение метода ортогонализирующих псевдопотенциалов позволяет выяснить особенности структуры ядра ^{12}C , которые не были представлены в литературе.

Серьезные проблемы при описании трехчастичного континуума гало-ядер в работе Российских ученых под руководством М.В. Жукова, связанные

с протяженностью трехчастичного эффективного потенциала, могут быть преодолены в R-матричном подходе в комбинации с пропагатор-методом. Этот путь позволяет сшивать волновую функцию с асимптотикой на больших расстояниях. Метод может быть использован при изучении трехчастичной континуум-структуры гало-ядер ${}^6\text{He}$ и ${}^{14}\text{Be}$, которые не были представлены в научной литературе.

До сих пор имеющиеся экспериментальные данные по процессам бета-переходов гало-ядер ${}^6\text{He}$ и ${}^{11}\text{Li}$ в двухчастичные континуум-каналы с выходом дейтрона не были детально объяснены. Проведенные теоретические работы по бета-распаду ядра ${}^6\text{He}$ группой М.В. Жукова привели к неправильному выводу, что αd -потенциалы с отталкивающим кором описывают экспериментальные данные лучше, чем микроскопически обоснованные потенциалы с запрещенными состояниями. Не была также изучена потенциальная зависимость вероятности бета-перехода ядра ${}^{11}\text{Li}$ в дейтронный канал, хотя полученные теоретические оценки в работах группы М.В. Жукова, Y. Ohbayasi, Y. Suzuki несколько близки к экспериментальным данным; при этом не была исследована роль S-волнового резонанса в системе ${}^9\text{Li}+d$ для описания данных эксперимента.

Литература также не располагает данными по изучению в деталях гало-свойства изобар-аналогового состояния ${}^6\text{Li}(0+)$ в трехчастичной модели, хотя получены упрощенные оценки в работе Российских ученых Л.В. Григоренко и др. Здесь следовало развивать полный трехчастичный формализм с выводом аналитических выражений матричных элементов M1-перехода с дальнейшей численной реализацией.

Не были также теоретически изучены бета-распады однейтронных гало-ядер ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{19}\text{C}$ и ${}^{31}\text{Ne}$ в двухчастичные континуум-каналы кор плюс протон.

Как отмечалось, наиболее сложным процессом является бета-распад гало-ядра ${}^{11}\text{Li}$ в трехчастичный ${}^9\text{Li}+p+n$ континуум-канал. Этот процесс пока не изучен ни в теоретических работах, ни в экспериментах. В силу этого проводимый теоретический анализ процесса с применением модифицированных кулоновских функций позволит изучить новые гало-свойства этого ядра, проявляемые в данном процессе.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ отражена в следующих проектах, выполненных в рамках Государственной научно-технической программы фундаментальных исследований:

Ф-2.1.33 «Исследование мультифононных состояний вибрационных ядер» (2003 – 2007);

ФА-Ф2-Ф076+Ф074 «Исследование структуры симметричных и нейтроноизбыточных ядер в реакциях передачи нуклонов и деления» (2007 – 2011);

Ф2-ФА-Ф114 «Исследование формирования легких элементов и свойств экзотических ядер, образующихся в реакциях при низких энергиях» (2012 – 2016).

Целью исследования является выяснение особенностей потенциальной модели межкластерного взаимодействия для связанной и континуум-структуры легких ядер и для описания процессов с их участием при низких энергиях.

Для достижения цели сформулированы следующие **задачи исследования**:

рассчитать энергетический спектр ядра ^{12}C в кластерной модели 3α и выяснить особенности потенциальной модели с запрещенными состояниями;

развить R-матричный подход в комбинации с пропагатором для изучения трехчастичной континуум-структуры легких ядер, рассчитать трехчастичные фазы для двухнейтронных гало-ядер ^6He и ^{14}Be ;

проанализировать бета-распады гало-ядер ^6He и ^{11}Li в двухчастичные $\alpha+d$ и $^9\text{Li}+d$ континуум-каналы в рамках кластерной модели трех тел и выяснить потенциальную зависимость вероятностей переходов;

изучить гало-свойства изобар-аналогового состояния $^6\text{Li}(0^+)$ в процессе M1-перехода в основное состояние $^6\text{Li}(1^+)$ и в $\alpha+d$ континуум в трехчастичной модели и выяснить потенциальную зависимость вероятностей переходов;

оценить вероятности бета-распада гало-ядра ^{11}Li в $^9\text{Li}+p+n$ трехчастичный континуум-канал в рамках кластерной потенциальной модели;

оценить вероятности бета-распадов однейтронных гало-ядер ^{11}Be , ^{19}C и ^{31}Ne в двухчастичные континуум-каналы в рамках кластерной потенциальной модели.

Объекты исследования: спектр связанных состояний ядра ^{12}C , вероятности бета-переходов гало-ядер ^6He , ^{11}Li , ^{11}Be , ^{19}C и ^{31}Ne в двух- и трехчастичные континуум-каналы, вероятность M1-перехода изобар-аналогового состояния $^6\text{Li}(0^+)$ в основное состояние $^6\text{Li}(1^+)$ и в $\alpha+d$ континуум, трехчастичная континуум-структура ядер ^6He и ^{14}Be .

Предметы исследования - двух- и трехчастичная структура легких ядер, в том числе гало-ядер, электромагнитные и слабые переходы в ядрах, ядерные потенциалы взаимодействия, механизмы сильного взаимодействия.

Методы исследования. Кластерные потенциальные модели, основанные на вариационных методах на Гауссовом и гиперсферическом Лагранж-меш базисах для расчета волновой функции и энергетического спектра двух- и трехчастичных связанных состояний; алгоритм Нумерова для расчета волновых функций рассеяния двухчастичной системы; R-матричный подход на гиперсферическом Лагранж-меш базисе для расчета волновой функции трехчастичного континуума с помощью пропагатора на основе алгоритма Нумерова; метод ортогонализирующих псевдопотенциалов для исключения Паули запрещенных состояний.

Научная новизна диссертационного исследования:

впервые показана сверхчувствительность энергий компактных основного 0^+ и первого возбужденного 2^+ состояний ядра ^{12}C к описанию запрещенных принципом Паули $\alpha\alpha$ -состояний, которая приводит к

появлению так называемых «почти запрещенных состояний» в трехчастичном функциональном пространстве;

впервые R-матричный подход развит в комбинации с пропагатор-методом для изучения трехчастичной континуум-структуры легких ядер ${}^6\text{He}$ и ${}^{14}\text{Be}$ в методе гиперсферических гармоник на Лагранж-меш базисе; показано, что для достижения сходимости результатов необходимо сшивать волновую функцию с асимптотикой на очень больших (примерно 1000 фм) расстояниях; рассчитаны диагональные и собственные фазовые сдвиги трехчастичной матрицы столкновения, предсказано существование нового резонанса ${}^{14}\text{Be}(2^+)$ около $E_{\text{воз}}=3.4$ МэВ;

получены теоретические оценки для вероятности бета-распада гало-ядра ${}^6\text{He}$ в $\alpha+d$ континуум-канал за единицы времени и энергии; впервые показано, что для воспроизведения данных крайне необходимо использовать микроскопически обоснованные αd -потенциалы с запрещенным состоянием в S-волне, воспроизводящие фазовые сдвиги и энергии основного состояния; показано также, что сходимость матричных элементов перехода требует знания вольновых функций вплоть до 30 фм и компоненты гипермомента вплоть до $K=24$; показано, что гало-эффекты играют важную роль при описании процесса из-за сильного взаимного подавления внутренних и внешних частей матричных элементов;

впервые получены теоретические оценки для вероятности M1-перехода изобар-аналогового состояния ${}^6\text{Li}(0^+)$ в $\alpha+d$ континуум-канал за единицы времени и энергии; показано, что только при использовании потенциала с запрещенным состоянием интегральная ширина перехода 0.9 мэВ хорошо согласуется с результатами предыдущих упрощенных вычислений; показано также, что сходимость результатов обуславливает брать границу эффективного интеграла 25-30 фм, а компоненты гипермомента вплоть до $K=20$;

впервые получены теоретические оценки для вероятности бета-перехода гало-ядра ${}^{11}\text{Li}$ в ${}^9\text{Li}+d$ континуум-канал за единицы времени и энергии, полностью воспроизводящие новые данные; показано, что в этом случае основную роль играет резонанс в S-волне в системе ${}^9\text{Li}+d$ при энергии около 0.7 МэВ независимо от того, используется потенциал с кором или с запрещенными состояниями; ${}^9\text{Li}+d$ -потенциал, который воспроизводит этот резонанс, хорошо описывает форму и абсолютные значения вероятности перехода с помощью поглощающего мнимого члена из-за открытых каналов распада;

впервые получены теоретические оценки для вероятностей бета-перехода гало-ядра ${}^{11}\text{Li}$ в ${}^9\text{Li}+p+n$ трехчастичный континуум-канал за единицы времени и энергии;

впервые получены теоретические оценки для вероятностей бета-распадов однейтронных гало-ядер ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{19}\text{C}$ и ${}^{31}\text{Ne}$ в двухчастичные континуум-каналы в рамках кластерной модели; показано, что вероятности бета-переходов сильно чувствительны к энергии отделения валентного нейтрона.

Достоверность полученных результатов обосновывается использованием современных методов квантовой механики и теоретической ядерной физики, а также высокоэффективных численных методов и алгоритмов, тщательной проверкой согласованности полученных теоретических результатов с экспериментальными данными и результатами других авторов, соответствием выводов основным положениям теории структуры легких ядер.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования. Теоретическая и практическая значимость результатов, представленных в диссертационной работе, заключается в возможности их использования для развития теории структуры ядер, кластерной модели легких ядер. Разработанные в диссертации подходы могут быть применены к решению квантово-механических проблем нескольких тел в молекулярной, атомной и ядерной физике. Полученные теоретические оценки для вероятностей бета-переходов двухнейтронного гало-ядра ^{11}Li в $^9\text{Li}+p+n$ трехчастичный континуум-канал и однейтронных гало-ядер ^{11}Be , ^{19}C и ^{31}Ne в двухчастичные континуум-каналы могут быть использованы при планировании экспериментов по этим процессам. Теоретические оценки для вероятности M1-перехода изобар-аналогового состояния $^6\text{Li}(0^+)$ в $\alpha+d$ континуум-канал могут быть использованы при планировании экспериментов по данному процессу, а также при проверке эффектов нарушения сохранения четности в сильных взаимодействиях. Прогнозируемый в диссертации новый резонанс $^{14}\text{Be}(2^+)$ около $E_{\text{воз}}=3.4$ МэВ недавно подтвердился с $E_{\text{воз}}(\text{exp})=3.54(16)$ МэВ в работе Yu. Aksyutina et al. "Study of the ^{14}Be Continuum: Identification and Structure of its Second 2^+ State", Phys. Rev. Lett. - New York, 2013. - Vol. 111, N. 24. - 242501. Полученные в диссертации результаты были использованы при планировании последних экспериментов по бета-распаду гало-ядер ^6He и ^{11}Li в дейтронный канал (R.Raabe, J.Buescher, et al. Physical Review C, 2009. - Vol. 80, N 5.- id.054307 и R.Raabe, A.Andreyev, et al. Physical Review Letters, 2008. - Vol. 101, N 21.- id. 212501). В недавних работах (M. Grieser et al. European Physical Journal, Special Topics, 2012.-Vol. 207, N1.- id. 01599 и M.J.G. Borge et al. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2013. –Vol.40.- id.035109) приведены сведения об использовании результатов, полученных автором диссертации, по бета-распадам гало-ядер ^{11}Be , ^{19}C , ^{31}Ne и ^{11}Li при планировании экспериментальной установки ISOLDE в ЦЕРНе.

Внедрение результатов исследования. R-матричный подход, развитый в диссертации на основе гиперсферического метода на Лагранж-меш базисе в комбинации с пропагатор-методом был использован для изучения трехчастичной континуум-структуры ядра ^{12}C и выявления механизма процесса трехчастичного развала ядра ^{11}Li в рамках программы «Спектроскопия легких ядер и ядерные реакции в микроскопических мультикластерных моделях» (2010-2012) (инициированной Бельгийским Министерством по науке, технике и культуре и зарегистрированной под номером P6/23).

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на семинарах Отдела ядерной физики ИЯФ АН РУз, Национального университета Узбекистана, Брюссельского свободного университета (Бельгия), Университета Инха (Корея), Университета Сюррей (Англия), на шести Международных конференциях: «50 Years of the Nuclear Shell Model», (Гейдельберг, Германия, 1999), «SOTANCP-2010» (Брюссель, Бельгия, 2010), «Modern Problems of Nucl. Phys» (Самарканд, 2003; Ташкент, 2009), «Nuclear and Radiation Physics» (Алматы, Казахстан, 2011), «Nuclear Sciences and Application» (Самарканд, 2012).

Опубликованность результатов. По теме диссертации опубликованы 20 научных работ, из них 9 научных статей в зарубежных журналах (из них одна статья входит в материалы Международной конференции), статья в республиканском журнале (статья входит в материалы Международной конференции), статья в материалах Международной конференции (Ниигата, Япония, 2003), статья в препринтах Лос-Аламосской национальной лаборатории и 8 тезисов докладов в сборниках международных конференций.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, списка использованной литературы, двух приложений и содержит 181 страницу текста, включает 33 рисунка и 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, выявлены объект, предмет и методы исследования, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике Узбекистан, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также о структуре диссертации.

В **первой главе** приведен краткий обзор литературных данных об основных положениях и особенностях потенциальной модели, применяемой для исследования структуры легких ядер. Перечислены основные проблемы в данном направлении, обсуждены возможные пути их решения. На основе анализа литературных данных сформулированы цель и задачи данной диссертационной работы.

Во **второй главе** диссертации проведен детальный анализ энергетического спектра ядра ^{12}C в кластерной потенциальной модели 3α на Гауссовом базисе с высокой точностью с локальными $\alpha\alpha$ -потенциалами Али-Бодмера с отталкивающим кором и Бака-Фридриха-Уитли (BFW) с запрещенными состояниями в S- и D-волнах. Эти потенциалы, как известно, достаточно хорошо описывают данные $\alpha\alpha$ -рассеяния при низких энергиях.

Результаты для энергии связи основного состояния ядра ^{12}C , рассчитанные с l -независимым потенциалом Али-Бодмера (0.584266 и 5.1220936 МэВ соответственно с учетом и без учета кулоновского взаимодействия), практически совпадают с результатами Лагранж-меш метода других авторов. Для возбужденных уровней также получены результаты, близкие к результатам Лагранж-меш метода, но намного лучшие, чем результаты гиперсферического метода. Первое число далеко от экспериментальной энергии связи (7.27 МэВ) и даже l -зависимая версия потенциала Али-Бодмера дает сильно заниженную оценку 1.523 МэВ. Для вычисления энергии системы 3α с потенциалом BFW применен метод ортогонализирующих псевдопотенциалов, который позволяет найти решение уравнения Шредингера в полном функциональном пространстве.

В диссертации показано, что энергии компактных основного 0^+ и первого возбужденного 2^+ состояний 3α системы сверхчувствительны к описанию запрещенных принципом Паули $\alpha\alpha$ -состояний. Этот результат также приводит к необычному поведению примеси запрещенных состояний в решении уравнения Шредингера. Примесь должна была постепенно уменьшаться с увеличением константы проектора λ , однако в данном случае она имеет минимум около 1450 МэВ. При этом значении λ энергия основного состояния равна -19.763 МэВ, что близко к результатам микроскопических расчетов. Дальнейшее увеличение λ резко повышает энергию основного состояния 3α . Как впервые показал Фуживара, такое поведение энергии и примеси свидетельствует о присутствии так называемых «почти запрещенных состояний» в решении уравнения Шредингера. Это «почти запрещенное состояние» в диссертации найдено как собственное состояние полного трехчастичного проектора, соответствующее собственному значению $1.1847\text{E-}4$ МэВ. Если принимать это состояние как разрешенное, тогда для энергии основного состояния можно получить оценку -20 МэВ, а если принять его как запрещенное, тогда оценку -0.645 МэВ. Такое интересное явление впервые возникает в задачах на связанное состояние. Таким образом, для компактных состояний α -кластерных ядер принцип Паули играет исключительно важную роль и можно предложить другой путь построения макроскопического $\alpha\alpha$ -потенциала. Суть его состоит в том, что параметры потенциала можно подгонять к запрещенным состояниям, заранее фиксированным из микроскопических $\alpha\alpha$ -расчетов.

В **третьей главе** диссертации развит R-матричный подход для изучения трехчастичной континуум-структуры легких ядер в методе гиперсферических гармоник на Лагранж-меш базисе. В разделе 3.1.1 приведен основной формализм метода гиперсферических гармоник на Лагранж-меш базисе, получены явные выражения для системы связанных уравнений и трехчастичного эффективного потенциала, которые зависят только от гиперрадиуса. Здесь же приведен асимптотический вид эффективного потенциала, главный член которого имеет порядок $1/\rho^3$. Важно также учесть центробежный член, который имеет порядок $1/\rho^2$. Для различных трехчастичных парциальных волн вычислены коэффициенты в

разложении эффективного потенциала по степеням $1/\rho$. В разделе 3.1.2 развивается трехчастичный R-матричный формализм на основе уравнения Блоха – Шредингера. Пробная волновая функция во внутренней области (до 25–30 фм) разлагается по Лагранж-меш базису. Найденная R-матрица на границе внутренней области продолжится с помощью алгоритма Нумерова вплоть до больших расстояний (около 1000 фм), где волновая функция сшивается с асимптотикой, которая в случае нейтральных систем выражается через функции Бесселя первого и второго родов, а в случае заряженных частиц – через регулярные и нерегулярные кулоновские функции. Далее матрица столкновения находится на основе найденной R-матрицы. В разделе 3.2 диссертации метод был применен к анализу трехчастичной континуум-структуры гало-ядер ${}^6\text{He}=\alpha+n+n$ и ${}^{14}\text{Be}={}^{12}\text{Be}+n+n$. Для NN–взаимодействия использован известный центральный потенциал Миннесоты, а αN -взаимодействие выбрано в качестве потенциала Канады и др., который содержит спин-орбитальный член и зависит от четности. При этом потенциал $V_{\alpha N}$ был перемножен на фактор $\lambda=1.051$, чтобы правильно воспроизвести энергию основного состояния гало-ядра ${}^6\text{He}$ $E=-0.97$ МэВ, а в качестве ${}^{12}\text{Be}+n$ взаимодействия был выбран потенциал формы Вуда – Саксона

$$V(r) = - [V_0 + V_s \cdot l \cdot s] / [1 + \exp((r-r_0)/a)] \quad (1)$$

с параметрами $V_0=43$ МэВ, $V_s=6$ МэВ, $r_0=2.908$ фм и $a=0.67$ фм.

Для правильного воспроизведения энергии основного состояния ядра ${}^{14}\text{Be}$, $E=-1.34 \pm 0.11$ МэВ использовано два метода. Первый метод основан на перемножении потенциала (1) на фактор $\lambda=1.08$, а второй состоит во включении трехчастичного потенциала

$$V_{K\gamma, K'\gamma'}(\rho) = - \delta_{K,K'} \delta_{\gamma,\gamma'} V_3 / [1 + (\rho/\rho_3)^2] \quad (2)$$

в дополнение к потенциалу Вуда – Саксона,

где K, K' – гипермоменты,

$\gamma=(l_x, l_y, L, S)$, $\gamma'=(l'_x, l'_y, L', S')$ – трехчастичные каналы.

На рис. 1 приведены рассчитанные фазовые сдвиги $\alpha+n+n$ -системы с $J^\pi=0^+$ для радиуса канала $a_0=20$ фм и $a_0=30$ фм в сравнении с использованием пропагатора вплоть до 250 фм для различных трехчастичных каналов в целях проверки сходимости. Установлено, что пропагатор важен для каналов с большим значением гипермомента K . После диагонализации матрицы столкновения можно получить собственные фазы.

На рис. 2 приведены собственные фазы $\alpha+n+n$ системы с $J^\pi=0^+$ для различных значений K_{max} . Как видно из рис.2, сходимость фазы для более высоких энергий достигается быстрее.

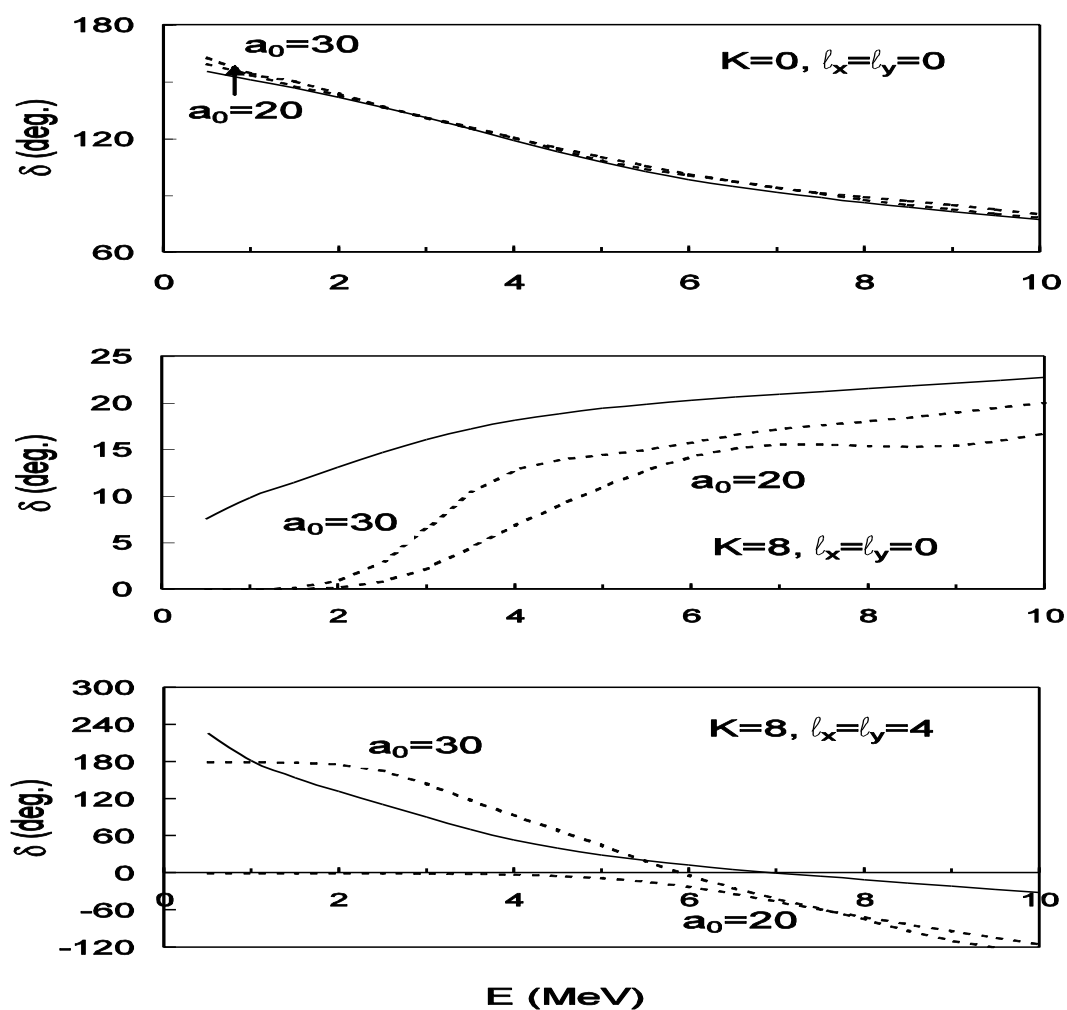


Рис. 1. Фазовые сдвиги $\alpha+n+n$ -системы с $J^\pi=0^+$ для радиуса канала $a_0=20$ фм и $a_0=30$ фм (штриховые линии) и с использованием пропагатора вплоть до 250 фм (сплошная линия)

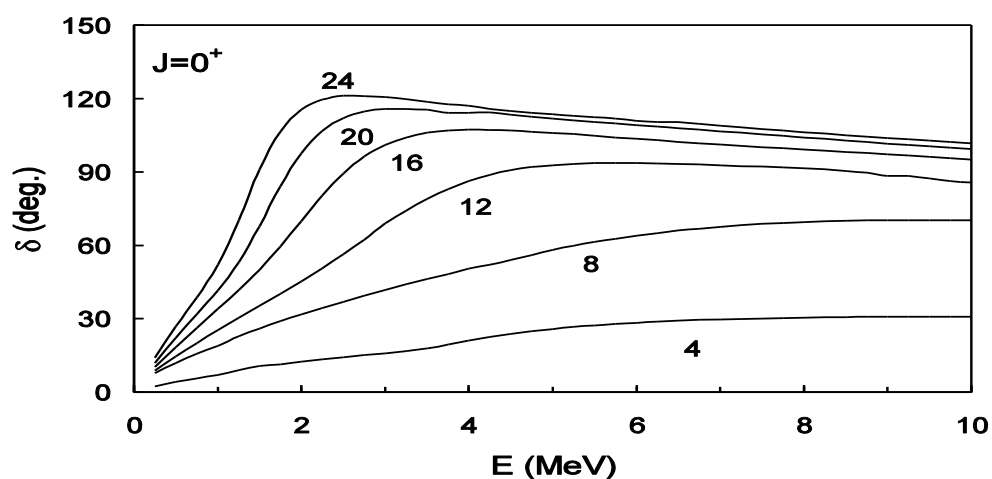


Рис. 2. Собственные фазы $\alpha+n+n$ -системы с $J^\pi=0^+$ для различных значений $K_{\max}$

На рис. 3 показаны собственные фазы состояний с $J^\pi=0^+, 1^-, 2^+$ ядер ${}^6\text{He}$ и ${}^6\text{Be}$. Для ядра ${}^6\text{He}$ можно увидеть узкий резонанс 2^+ около 0.7 МэВ, ниже, чем экспериментальное значение 0.8 МэВ, а в состояниях 0^+ и 1^- представлены широкие резонансы около 1.5 МэВ. Близкие результаты получены М.В. Жуковым и др. и И.Ж. Томпсоном и др. В ядре ${}^6\text{Be}$ для основного состояния найдено $E=1.26$ МэВ с шириной $\Gamma=65$ кэВ, что хорошо согласуется с экспериментальными данными $E=1.37$ МэВ и $\Gamma=92\pm 6$ кэВ.

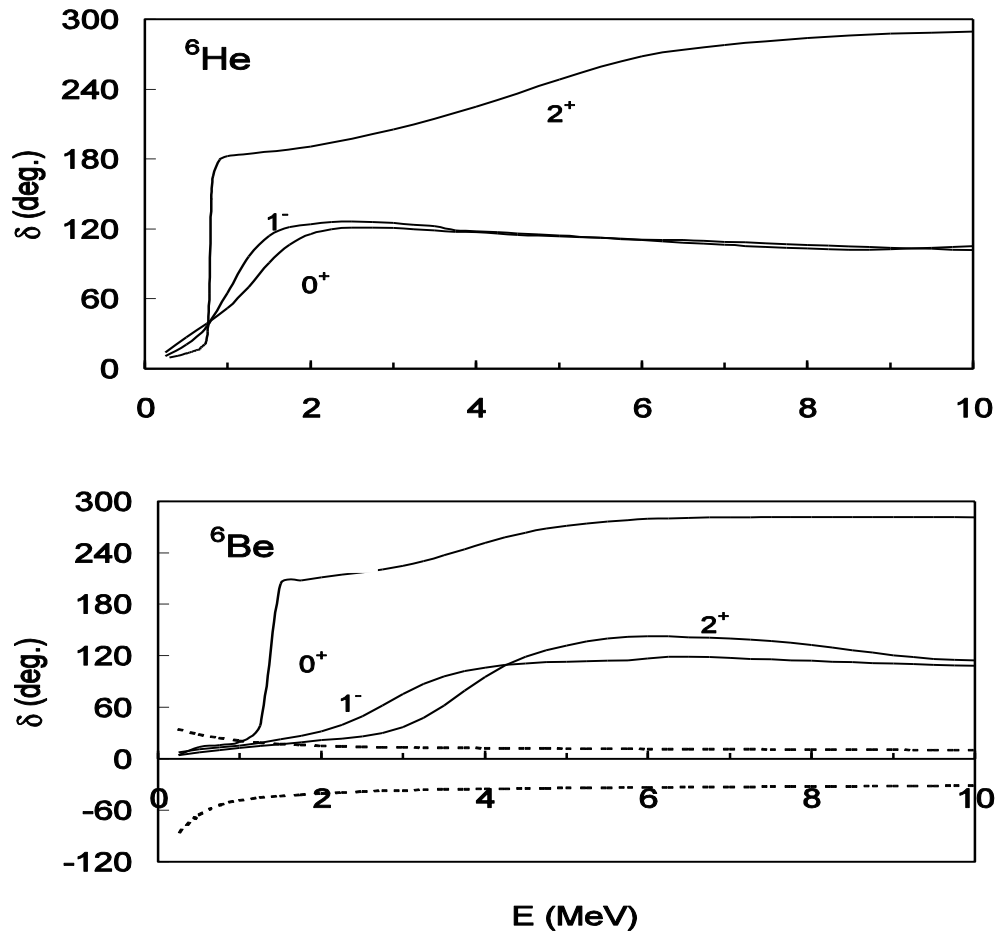


Рис. 3. Собственные фазы состояний с $J^\pi=0^+, 1^-, 2^+$ ядер ${}^6\text{He}$ и ${}^6\text{Be}$

На рис. 4 приведены трехчастичные собственные фазы ${}^{12}\text{Be}+n+n$ и ${}^{12}\text{O}+p+p$ для состояний с $J^\pi=0^+, 1^-, 2^+$. Как установлено, в состоянии ${}^{14}\text{Be}$ (2^+) имеется узкий резонанс с энергией около 2 МэВ, который соответствует энергии возбуждения $E_{\text{воз}} = 3.4$ MeV. Этот резонанс совсем недавно подтвержден в эксперименте с оценкой $E_{\text{воз}}=3.54(16)$ МэВ.

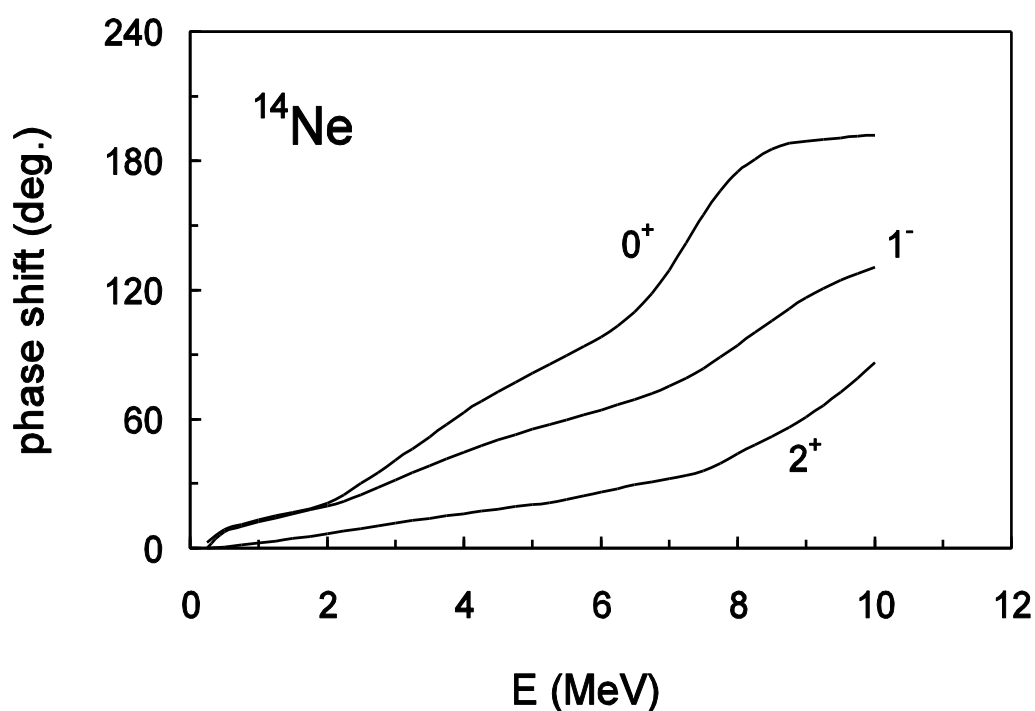
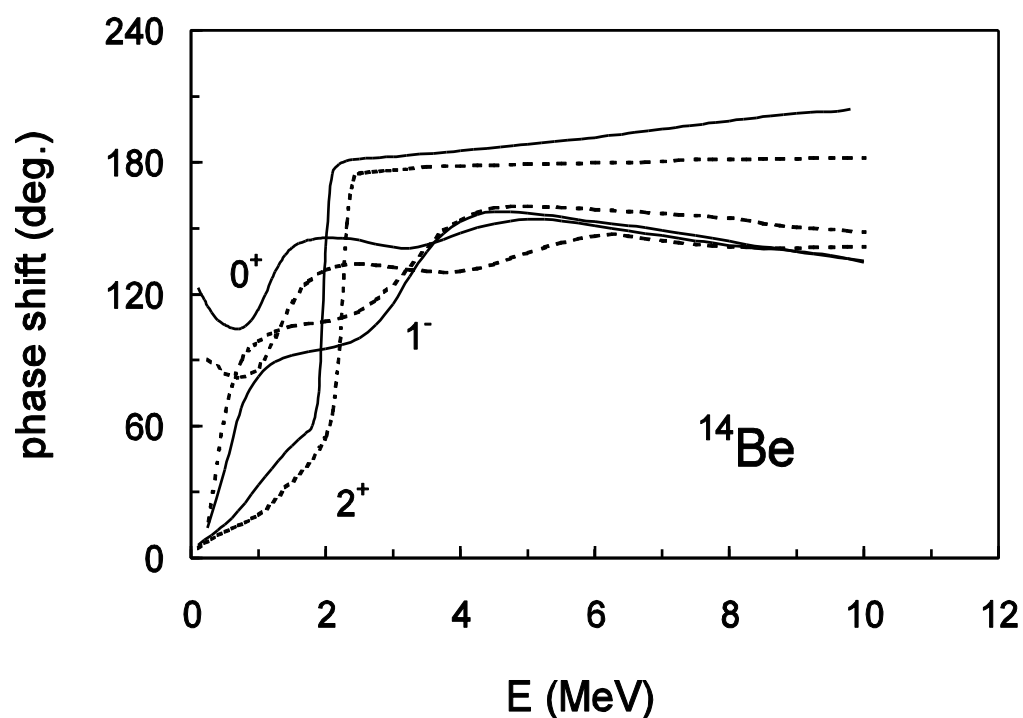


Рис. 4. Собственные фазы трехчастичных систем $^{12}\text{Be}+n+n$ и $^{12}\text{O}+p+p$ для состояний с $J^\pi=0^+, 1^-, 2^+$

В четвертой главе диссертации проведен детальный теоретический анализ бета-распада двухнейтронного гало-ядра $^6\text{He}(0^+)$ в $\alpha+d$ континуум-канал в трехчастичной модели. Реакция такого вида энергетически возможна только для ядер с энергией отделения двух нейтронов меньше, чем 3 МэВ. В

данном случае это условие выполняется с запасом: $E_{2n}=0.95$ МэВ. Максимально возможная энергия в системе центра масс $\alpha+d$ равна 2.03 МэВ. Поскольку в выходном канале полный момент равен 1, то возможен только Гамов-Теллеровский переход, для которого спины электрона и антинейтрино параллельны. Полная вероятность процесса сильно подавлена и составляет $2.2 \pm 1.1 \text{ E-6 s}^{-1}$. В разделе 4.1 диссертации изложена используемая модель. Как и в предыдущей главе, трехчастичная волновая функция ядра ${}^6\text{He}$ рассчитана методом гиперсферических гармоник. Приведены явные выражения для Гамов-Теллеровских матричных элементов, которые определяются интегралом перекрытия волновых функций начального и конечного состояний. В разделе 4.2 диссертации приведены результаты численных вычислений. В качестве NN-взаимодействия выбран потенциал Миннесоты, а αN -взаимодействие описывается потенциалом Кукулина и др.

Путем анализа сходимости эффективных интегралов показано, что для воспроизведения экспериментальных данных следует включить трехчастичные каналы вплоть до больших значений гипермомента $K_{\text{max}}=24$, при этом границу интеграла нужно брать не меньше 30 фм. Наглядно показано, чтобы правильно воспроизвести экспериментальные данные, внутренняя и внешняя (гало) части матричных элементов для основной трехчастичной компоненты $K=0$ должны взаимно подавлять друг друга. Поэтому данная компонента практически не вносит никакого вклада в процесс. Доминантный вклад дают компонента с $K=8$, а также компоненты с $K=2$ и $K=10$. Для этих компонент гало-части матричных элементов играют решающую роль. Было протестировано несколько потенциальных моделей для $\alpha+d$ взаимодействия (рис. 5): потенциал V_r с отталкивающим кором на малых расстояниях, правильно описывающий фазовые сдвиги $\alpha+d$ -рассеяния в S-волне, но не имеющий связанное состояние, глубокий потенциал Дубовиченко V_a в виде простой Гауссовой формы $V(r) = V_0 \exp(-\alpha r^2)$ с параметрами $V_0=-76.12$ МэВ и $\alpha=0.20 \text{ фм}^{-2}$, воспроизводящий энергию связи ядра ${}^6\text{Li}(1^+)$, равную $E=1.474$ МэВ, и фазовые сдвиги, но имеющий дополнительное запрещенное состояние в S-волне, фолдинг-потенциалы V_{f1} , V_{f2} и потенциалы V_a^{S1} , V_a^{S2} , полученные суперсимметричными преобразованиями из V_a . Потенциал V_{f1} воспроизводит энергию связи ${}^6\text{Li}(1^+)$ и имеет дополнительное запрещенное состояние, но плохо описывает фазовые сдвиги, а потенциал V_{f2} , хотя правильно и воспроизводит фазы, переоценивает энергию связи. Потенциал V_a^{S1} дает те же фазы и физическое связанное состояние, но не содержит запрещенное состояние, а V_a^{S2} воспроизводит только фазу рассеяния, но не дает связи.

Из рис. 5 видно, что лучшее описание формы новых экспериментальных данных (заполненные кружочки) для вероятности перехода процесса достигается для глубокого потенциала Дубовиченко V_a , хотя теоретическая кривая лежит немного ниже. Такой успех потенциала V_a достигается за счет наличия узла на малых расстояниях в волновой функции $\alpha+d$ -рассеяния в S-волне из-за ортогональности к запрещенному состоянию, а также воспроизведением энергии основного состояния и фазы рассеяния.

Небольшая модификация глубины и ширины потенциала с $V_0 = -79.4$ МэВ и $\alpha = 0.21$ фм⁻² (потенциал V_m на рис. 5) обеспечивает наилучшее воспроизведение экспериментальных данных по бета-распаду гало-ядра ${}^6\text{He}$ в $\alpha+d$ континуум-канал.

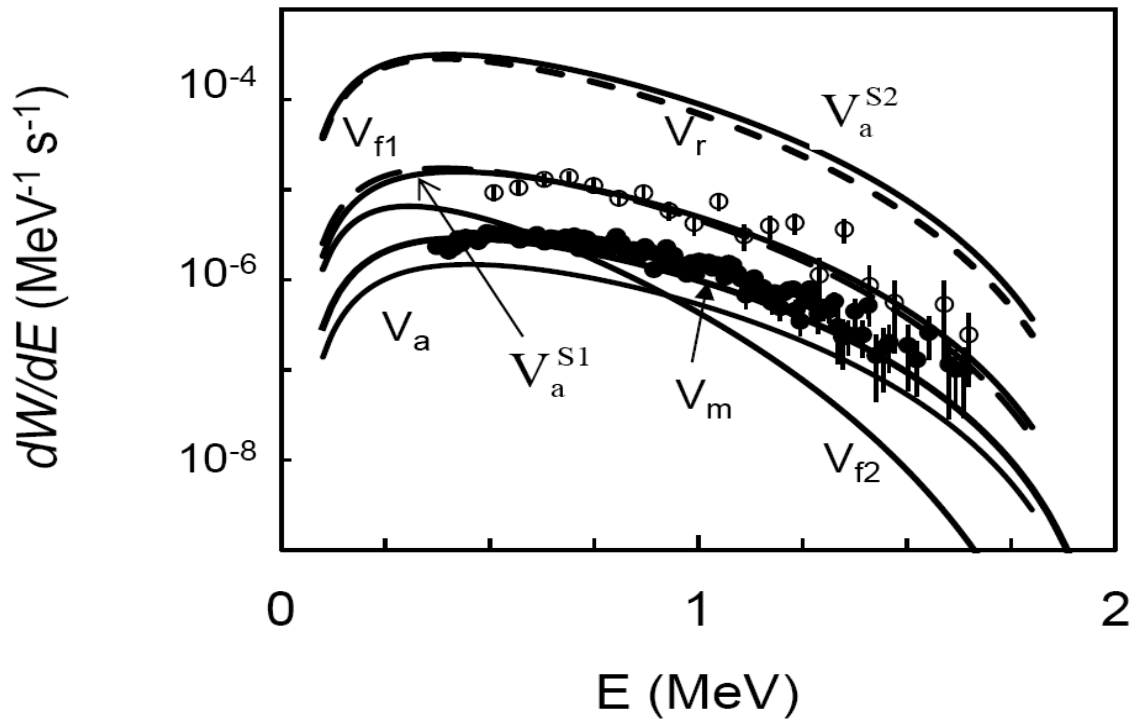


Рис. 5. Вероятности бета-распада гало-ядра ${}^6\text{He}(0^+)$ в $\alpha+d$ континуум-канал за единицы времени и энергии для различных α - d -потенциалов

Таким образом, αd -потенциалы с запрещенными состояниями играют исключительно важную роль при описании данного процесса и проявлении гало-свойств ядра ${}^6\text{He}$.

В пятой главе диссертации проведен теоретический анализ M1-перехода изобар-аналогового состояния ${}^6\text{Li}(0^+)$ с энергией возбуждения $E_{\text{воз}} = 3.563$ МэВ в основное состояние ${}^6\text{Li}(1^+)$ и в $\alpha+d$ -континуум канал. В разделе 5.1 диссертации подробно изложена используемая трехчастичная модель. Здесь основное и возбужденное состояния ядра ${}^6\text{Li}$ описываются в трехчастичной модели $\alpha+p+n$, а их волновые функции находятся методом гиперсферических гармоник на Лагранж-меш базисе. В этом же разделе описаны явные выражения для операторов M1-перехода в координатах Якоби, а окончательные выражения матричных элементов приведены во 2-м приложении диссертации. В разделе 5.2 диссертации приведены результаты численных расчетов для данного процесса. Получена теоретическая оценка 7.49 эВ для ширины M1-перехода изобар-аналогового состояния ядра ${}^6\text{Li}(0^+)$

в основное состояние ${}^6\text{Li}(1^+)$, которая хорошо согласуется с экспериментальным значением 8.19 ± 0.19 эВ. Теоретическое значение магнитного момента ядра ${}^6\text{Li}$ ($\mu = 0.86$ в единицах ядерного магнетона) немного больше экспериментальной оценки 0.82. Эти оценки были получены с волновыми функциями, включающими трехчастичные каналы вплоть до $K=20$, что обеспечивает хорошую сходимость. В качестве NN-взаимодействия выбран, как и прежде, потенциал Миннесоты, а αN -взаимодействие описывается потенциалом Кукулина и др. Для описания конечного континуум-состояния были тестированы $\alpha+d$ -потенциалы из предыдущей главы V_a , V_{f1} , V_{f2} и V_a^{S1} .

На рис.6 показаны результаты теоретических вычислений для дифференциальной ширины M1-перехода изобар-аналогового состояния ${}^6\text{Li}(0^+)$ в $\alpha+d$ континуум-канал. Результаты для фолдинг-потенциала V_{f1} , который плохо описывает фазу рассеяния, сильно подавлены в области энергии 0.6 МэВ, а остальные потенциалы не проявляют такого свойства. Анализ сходимости эффективных интегралов показал, что граница интегралов должна быть в пределах 25-30 фм, а трехчастичные компоненты с $K=0$ и 2 дают основной (около 50%) вклад в матричный элемент перехода, при этом вклады компонент с большими значениями K также важны.

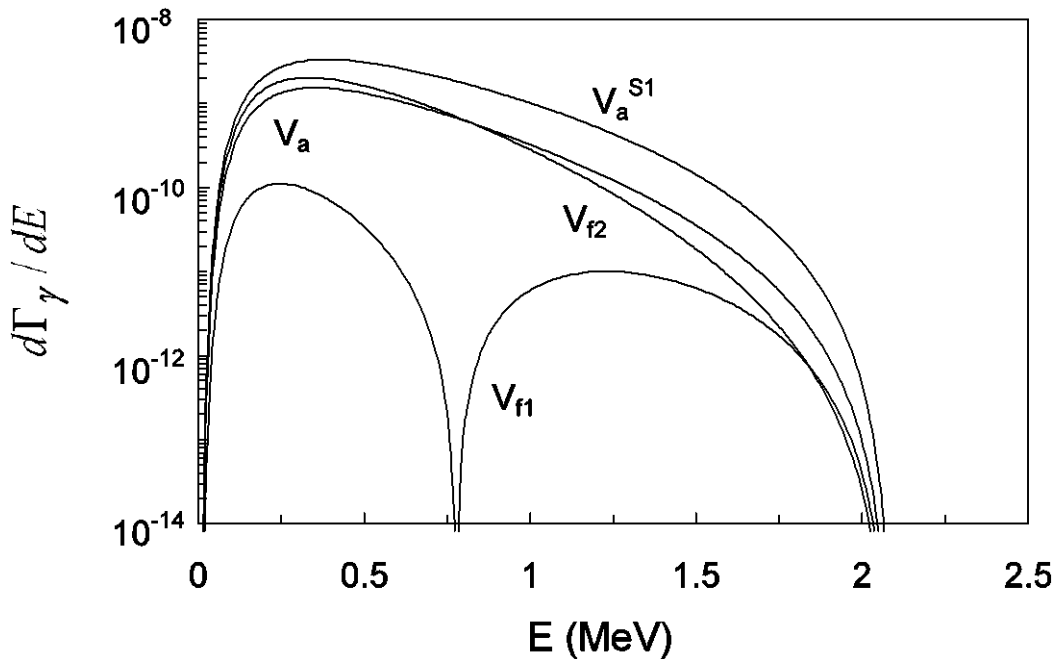


Рис. 6. Дифференциальная ширина M1-перехода изобар-аналогового состояния ${}^6\text{Li}(0^+)$ в $\alpha+d$ континуум-канал за единицы времени и энергии

Показано, что основной вклад в M1-переход дает спиновая компонента. Интегральная ширина перехода 0.9 мэВ, полученная с потенциалом V_a , хорошо согласуется с результатами предыдущих упрощенных вычислений

Л. Григоренко и др. Показано также, что взаимное подавление внутренней и гало-компонент матричных элементов M1-перехода проявляется не так сильно, как в случае бета-распада ${}^6\text{He}$.

В **шестой главе** диссертации проведен теоретический анализ бета-распада двухнейтронного гало-ядра ${}^{11}\text{Li}$ в двухчастичный ${}^9\text{Li}+d$ континуум-канал. Исходное ядро, как и прежде, описывается в трехчастичной модели ${}^9\text{Li}+n+n$ методом гиперсферических гармоник на Лагранж-меш базисе. Используются нуклон-нуклонный потенциал Миннесоты и центральный потенциал ${}^9\text{Li}+n$ Томпсона и Жукова с запрещенным состоянием в S-волне, который воспроизводит энергию отделения двух нейтронов ядра ${}^{11}\text{Li}$, т.е. $S_{2n}=376$ кэВ. Максимально допустимая энергия – $E_Q=2.63$ МэВ, а потенциалы ${}^9\text{Li}+d$ должны воспроизвести физическое связанное состояние $1/2^-$ ядра ${}^{11}\text{Be}$ с энергией $E=-17.60$ МэВ, которое является возбужденным состоянием с $E_{\text{вб}}=320$ кэВ. В микроскопических кластерных моделях система ${}^9\text{Li}+d$ имеет запрещенное состояние в S-волне ниже физического состояния. В данной модели такое состояние можно получить с помощью глубокого потенциала, как и в системе $\alpha+d$. Однако в данном случае имеются два существенных различия. Первое состоит в том, что в системе ${}^9\text{Li}+d$ имеется резонанс в S-волне, положение которого плохо определено из эксперимента и находится в пределах 0.2-1 МэВ. Второе различие касается наличия нескольких открытых каналов реакции в случае бета-распада ядра ${}^{11}\text{Li}$ ниже канала распада ${}^9\text{Li}+d$, например каналы ${}^{10}\text{Be}+n$ и ${}^8\text{Li}+t$. Поэтому в данном случае можно увидеть совсем другую физику. Оказалось, что вероятности бета-распада сильно зависят от положения резонанса, и потенциалы, которые не описывают указанный резонанс в S-волне системы ${}^9\text{Li}+d$, не воспроизводят даже правильного порядка вероятности бета-перехода в дейтронный континуум-канал. При этом вероятность перехода не зависит от того, используется ли потенциал с кором или с запрещенными состояниями. Вследствие наличия открытых каналов распада в ${}^9\text{Li}+d$ потенциал вводится поглощающий мнимый член

$$V(r) = -(V_0 + iW_0) \exp(-\alpha r^2). \quad (3)$$

Установлено, что поглощение может существенно уменьшить вероятности бета-перехода.

На рис. 7 приведены результаты теоретического анализа для вероятностей бета-распада гало-ядра ${}^{11}\text{Li}$ в двухчастичный континуум-канал ${}^9\text{Li}+d$ за единицы времени и энергии в сравнении с новыми экспериментальными данными. Параметры в ${}^9\text{Li}+d$ потенциале выбраны как $V_0=100.1$ МэВ и $\alpha=0.17$ фм $^{-2}$, а W_0 может меняться в пределах нескольких МэВ. Этот потенциал воспроизводит резонанс в S-волне при энергии около 0.7 МэВ. Как видно из рис. 7, введение поглощающего члена в потенциал с $W_0=5$ МэВ приводит к наилучшему описанию данных. На рис. 7 также можно увидеть, что удаление дополнительного запрещенного состояния из ${}^9\text{Li}+d$ потенциала с помощью суперсимметричных преобразований (SUSY)

практически не меняет вероятностей бета-перехода в противовес бета-распаду гало-ядра ${}^6\text{He}$.

Найдено также, что гало-компоненты матричных элементов Гамов-Теллеровского перехода строго доминируют над внутренними компонентами. Для интегральной вероятности перехода теоретическая оценка $7.3\text{E-}3 \text{ с}^{-1}$ хорошо согласуется с экспериментальным значением $8.8 \pm 1.9\text{E-}3 \text{ с}^{-1}$ в области энергии $E > 0.2 \text{ МэВ}$.

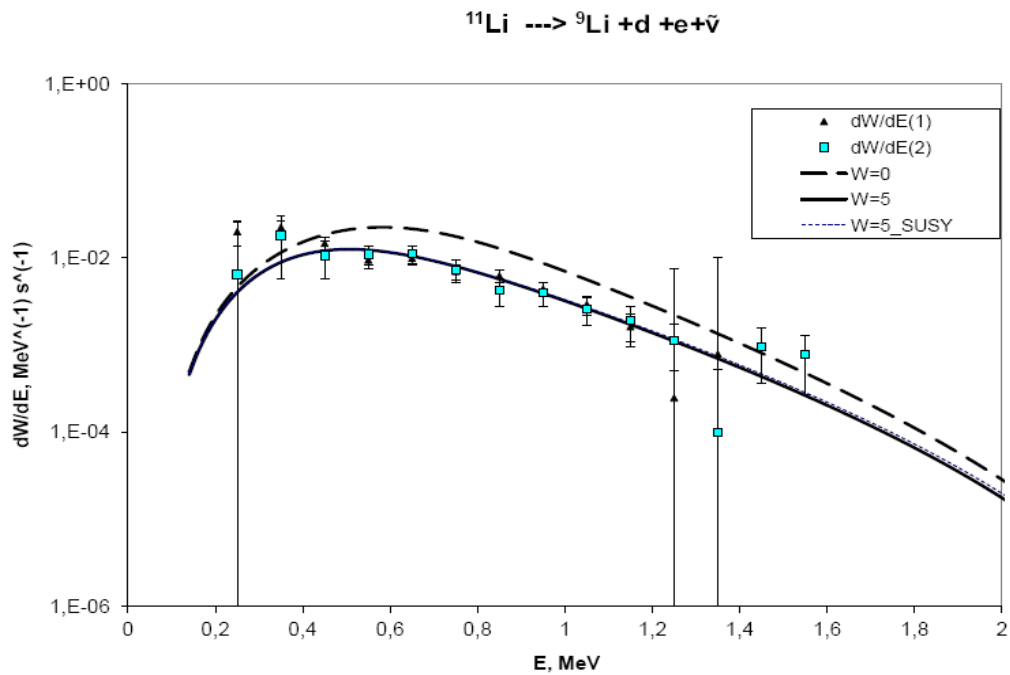
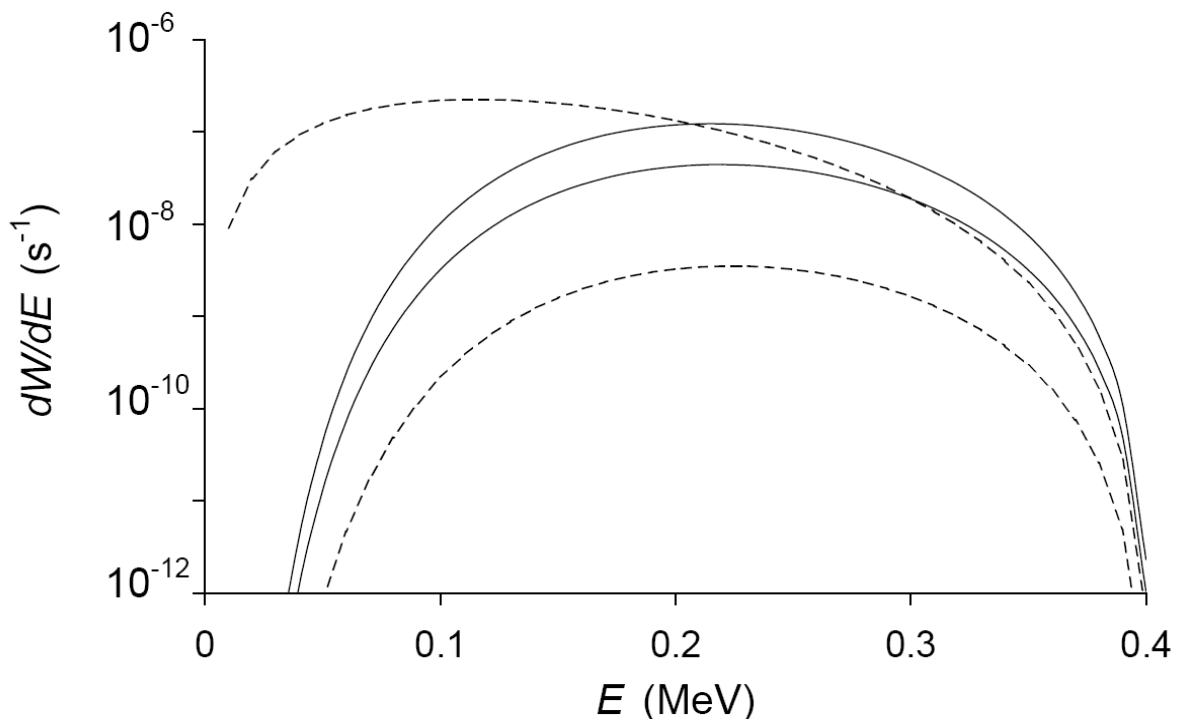


Рис. 7. Вероятности перехода за единицы времени и энергии бета-распада гало-ядра ${}^{11}\text{Li}$ в ${}^9\text{Li} + d$ континуум-канал dW/dE , вычисленные с различными значениями силы поверхностного поглощения W , МэВ

В седьмой главе речь идет об уникальном бета-переходе ${}^{11}\text{Li} \rightarrow {}^9\text{Li} + p + n + e + \bar{\nu}$. Уникальность этого процесса состоит в том, что среди всех двухнейтронных гало-ядер только для ядра ${}^{11}\text{Li}$ выполняется условие бета-перехода гало-нейтронов в указанный канал, а именно $S_{2n} < (m_n - m_p - m_e)c^2 \approx 782 \text{ кэВ}$. В случае ядра ${}^{11}\text{Li}$, как отмечалось в шестой главе, это условие выполняется с небольшим запасом – $S_{2n} = 376 \pm 5 \text{ кэВ}$. Трехчастичная волновая функция ${}^{11}\text{Li}$ описана как связанное состояние ${}^9\text{Li} + n + n$ и рассчитана методом гиперсферических гармоник на Лагранж-меш базисе, как и в предыдущей главе в тех же условиях. Конечное состояние ${}^9\text{Li} + p + n$ является трехчастичным континуум-состоянием ${}^{11}\text{Be}$. Вычисление волновой функции в этом состоянии намного сложнее, чем в трехчастичном континууме ${}^6\text{He}$ по нескольким причинам. Главная причина связана с наличием кулоновского отталкивания между кором и протоном, которое сильно увеличивает радиус

сходимости и число трехчастичных каналов. Кроме того, континуум-волновая функция должна быть ортогональна волновым функциям нескольких связанных состояний, что намного усложняет структуру континуум-состояния и требуемых вычислений. Поскольку оценка вероятности данного бета-перехода будет крайне полезна для будущих экспериментов, допускается некоторое упрощение модели, а именно используются кулоновские волновые функции с некоторой модификацией. Эта модификация состоит в сдвиге кулоновской волновой функции влево на 10-15 фм, чтобы смоделировать волновую функцию, соответствующую потенциалу с включением ядерного и кулоновского взаимодействий. На рис.8 приведены результаты проведенных вычислений для вероятности бета-распада гало-ядра ^{11}Li в трехчастичный континуум-канал за единицы энергии и времени.



Верхняя штриховая линия соответствует плосковолновому приближению, а нижняя штриховая – чисто кулоновскому отталкиванию с эффективным зарядом 4.83. Нижняя сплошная линия соответствует сдвинутой влево на $a=10$ фм кулоновской волновой функции, а верхняя сплошная – модифицированной кулоновской функции с $a=15$ фм

Рис. 8. Вероятности бета-распада гало-ядра ^{11}Li в трехчастичный континуум-канал $^9\text{Li}+p+n$ за единицы энергии и времени

Для полной вероятности бета-перехода с плоской волной получена оценка $W=3.8E-8 \text{ с}^{-1}$, а с чисто кулоновской волной – $W=5.1E-10 \text{ с}^{-1}$. Модифицированные кулоновские функции для полной вероятности перехода дают оценку в интервале $0.6E-8 \text{ с}^{-1} < W < 1.8E-8 \text{ с}^{-1}$, что даже на два порядка ниже, чем вероятность бета-распада гало-ядра ${}^6\text{He}$. Коэффициент ветвления, показывающий, насколько редок данный процесс, определяется с помощью соотношения $R= Wt_{1/2} / \ln 2$, где $t_{1/2}=8.75 \text{ м.с}$ – период полураспада исходного ядра. Оценка этой величины для бета-перехода ядра ${}^{11}\text{Li}$ в трехчастичный континуум-канал находится в интервале $0.8E-10 - 2.2E-10$, которая намного меньше, чем для бета-распада ядра ${}^6\text{He}$ в дейтронный канал $(2.6 \pm 1.3)E-6$. Причиной малости коэффициента ветвления для первого процесса является малое Q -значение $E_Q=0.404 \text{ МэВ}$, сильно ограничивающее фазовое пространство.

В восьмой главе диссертации проведен теоретический анализ бета-распадов однеитронных гало-ядер ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{19}\text{C}$ и ${}^{31}\text{Ne}$ с энергиями отделения нейтрона $S_n=501 \text{ кэВ}$, $S_n=580 \pm 90 \text{ кэВ}$ и $S_n=0.33 \pm 1.07 \text{ МэВ}$ соответственно в двухчастичные континуум-каналы кор плюс протон. Предполагается, что бета-переход происходит в гало-части ядер. Во всех трех случаях возможны фермиевские переходы наряду с Гамов-Теллеровскими переходами. Энергетическое условие перехода должно быть $S_n < (m_n - m_p - m_e)c^2 \approx 782 \text{ кэВ}$, а максимально допустимая энергия в системе центра масс кора и протона – $E_Q = (m_n - m_p - m_e)c^2 - S_n$. Поскольку энергия отделения валентного нейтрона в ядре ${}^{31}\text{Ne}$ определена с большой погрешностью, вероятность бета-перехода также имеет большую неопределенность и варьирует от 0 до 10^{-6} с^{-1} . Начальные состояния в случае первых двух ядер ${}^{11}\text{Be}$ и ${}^{19}\text{C}$ предполагаются S -волновыми состояниями кор+нейтрон, а в последнем случае ядро ${}^{31}\text{Ne}$ описывается как связанное P -волновое состояние. Взаимодействия выбираются в виде потенциала Вуда – Саксона с параметрами, которые воспроизводят энергии отделения валентного нейтрона с дополнительными запрещенными состояниями, по одному в каждом случае. На рис. 9 приведены вероятности бета-переходов гало-ядер ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{19}\text{C}$ и ${}^{31}\text{Ne}$ в кор плюс протонные континуум-каналы в единицах энергии и времени. В этих расчетах энергия отделения нейтрона в ядре ${}^{31}\text{Ne}$ фиксирована как $E=0.6 \text{ МэВ}$. При этих условиях полные вероятности переходов составляют $1.5E-9 \text{ с}^{-1}$ для ядра ${}^{11}\text{Be}$, $2.7E-12 \text{ с}^{-1}$ для ядра ${}^{19}\text{C}$ и, наконец, $3.3E-10 \text{ с}^{-1}$ – для ${}^{31}\text{Ne}$. Соответствующие коэффициенты ветвления равны $3.0E-8$, $1.8E-13$ и $1.6E-12$ соответственно для ядер ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{19}\text{C}$ и ${}^{31}\text{Ne}$.

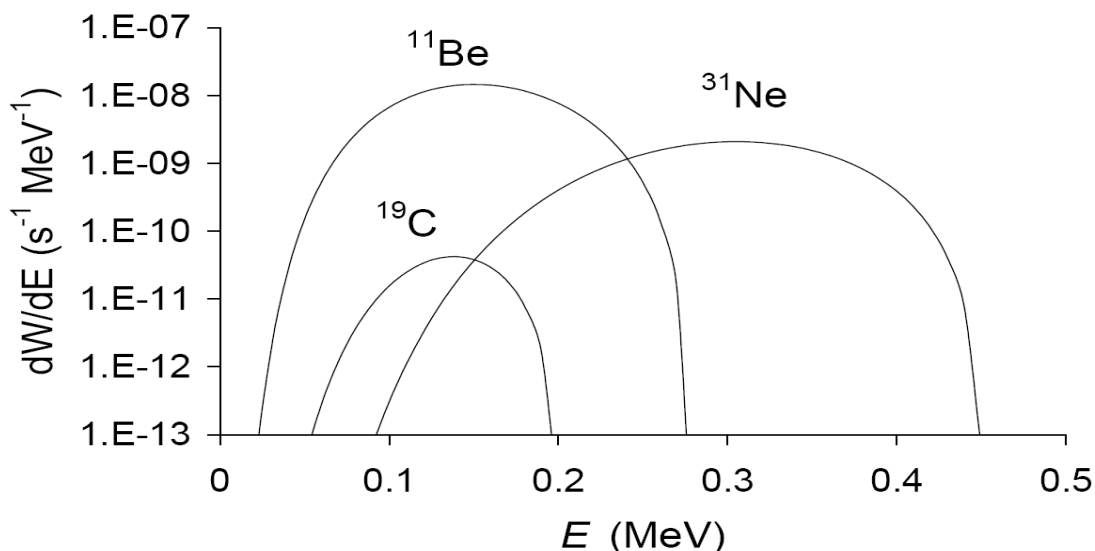


Рис. 9. Вероятности бета-переходов гало-ядер ^{11}Be , ^{19}C и ^{31}Ne в кор плюс протонные континуум-каналы за единицы энергии и времени

В приложениях приведены аналитические формулы для вероятности M1-перехода в континуум в трехчастичной модели, а также матричные элементы M1-перехода в связанные и континуум-состояния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показана сверхчувствительность энергий компактных основного 0^+ и первого возбужденного 2^+ состояний ядра ^{12}C к описанию запрещенных принципом Паули $\alpha\alpha$ -состояний.

2. Впервые R-матричный подход развит для изучения трехчастичной континуум-структуры легких ядер в методе гиперсферических гармоник на Лагранж-меш базисе с применением пропагатор-техники. Установлено, что R-матрицу, рассчитанную на границе внутренней области, нужно продолжать вплоть до больших расстояний (около 1000 фм), где волновая функция сшивается с асимптотикой. Метод был применен к анализу трехчастичной континуум-структуры гало-ядер ^6He и ^{14}Be . Рассчитаны диагональные и собственные фазовые сдвиги трехчастичной матрицы столкновения, предсказано существование нового резонанса $^{14}\text{Be}(2^+)$ при $E_{\text{воз}}=3.4$ МэВ.

3. Показано, что для воспроизведения данных по бета-распаду гало-ядра ^6He в $\alpha+d$ континуум-канал крайне необходимо использовать микроскопически обоснованные αd -потенциалы с запрещенным состоянием в S-волне, воспроизводящие фазовые сдвиги и энергии основного состояния. В этом случае вклады внутренних и гало-компонент Гамов-Теллеровских матричных элементов почти полностью подавляют друг друга, в результате суммарная вероятность перехода строго занижена в соответствии с экспериментом.

4. Метод гиперсферических гармоник на Лагранж-меше применен к изучению процесса М1-перехода изобар-аналогового состояния ${}^6\text{Li}(0^+)$ в основное состояние ${}^6\text{Li}(1^+)$ и $\alpha+d$ континуум-канал в трехчастичном формализме. Теоретическая оценка 7.49 эВ для ширины М1-перехода в основное состояние хорошо согласуется с экспериментальным значением 8.19 ± 0.19 эВ, а оценка магнитного момента ядра ${}^6\text{Li}$ $\mu=0.86$ в единицах ядерного магнетона слегка превышает экспериментальное значение 0.82. Получены теоретические оценки для вероятности М1-перехода изобар-аналогового состояния ${}^6\text{Li}(0^+)$ в $\alpha+d$ континуум за единицы времени и энергии. Интегральная ширина перехода 0.9 мэВ хорошо согласуется с результатами предыдущих упрощенных вычислений. Показано, что изобар-аналоговое состояние ${}^6\text{Li}(0^+)$, как и ядро ${}^6\text{He}$, имеет ярко выраженную гало-структуру.

5. Получены теоретические оценки для вероятности бета-перехода гало-ядра ${}^{11}\text{Li}$ в ${}^9\text{Li}+d$ континуум-канал за единицы времени и энергии, полностью согласующиеся с новыми экспериментальными данными. Найдено, что в этом случае основную роль играет резонанс в S-волне в системе ${}^9\text{Li}+d$ при энергии около 0.7 МэВ, независимо от того, используется ли потенциал с кором или с запрещенными состояниями. При этом гало-компоненты строго доминируют над внутренними компонентами. Для интегральной вероятности процесса полученная оценка $7.3\text{E-}3 \text{ с}^{-1}$ находится внутри коридора ошибок экспериментальных данных $8.8 \pm 1.9 \text{E-}3 \text{ с}^{-1}$ в области энергии $E > 0.2$ МэВ.

6. Получены теоретические оценки для коэффициента ветвления (вероятности) уникального бета-перехода гало-ядра ${}^{11}\text{Li}$ в ${}^9\text{Li}+p+n$ трехчастичный континуум-канал в рамках кластерной потенциальной модели. Разумные оценки для коэффициента ветвления и энергетического распределения распада получены с помощью модифицированной кулоновской волновой функции, которая имитирует реальную волновую функцию. Полученные оценки для коэффициента ветвления находятся в интервале $0.8\text{E-}10 - 2.2\text{E-}10$, которые намного меньше, чем для бета-распада ядра ${}^6\text{He}$ в дейтронный канал $(2.6 \pm 1.3)\text{E-}6$. Причиной малости коэффициента ветвления для первого процесса является малое Q-значение, которое сильно ограничивает фазовое пространство. Полная вероятность бета-перехода имеет порядок 10^{-8} с^{-1} .

7. Получены теоретические оценки для вероятностей бета-распада одонейтронных гало-ядер ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{19}\text{C}$ и ${}^{31}\text{Ne}$ в двухчастичные континуум-каналы в рамках кластерной потенциальной модели. Для интегральной вероятности бета-перехода гало-ядра ${}^{11}\text{Be}$ в ${}^{10}\text{Be}+p$ континуум-канал получена оценка $1.5\text{E-}9 \text{ с}^{-1}$, а для ядра ${}^{19}\text{C}$ – $2.7\text{E-}12 \text{ с}^{-1}$. Соответствующие коэффициенты ветвления равны $3.0\text{E-}8$ для ядра ${}^{11}\text{Be}$ и $1.8\text{E-}13$ – для ядра ${}^{19}\text{C}$. Полная вероятность бета-перехода ядра ${}^{31}\text{Ne}$ в ${}^{30}\text{Ne}+p$ континуум-канал может варьировать от 0 до 10^{-6} с^{-1} в зависимости от значения энергии отделения валентного нейтрона, которое в настоящее время плохо определено из эксперимента. Для энергии отделения в интервале 0.25 – 0.35

МэВ полная вероятность перехода оценивается в $3.3\text{E-}10\text{ с}^{-1}$, которая приводит к оценке $1.6\text{E-}12$ для коэффициента ветвления.

Главный итог проведенных исследований сводится к тому, что развитые в данной работе потенциальные модели могут не только адекватно описать существующие экспериментальные данные в области низкоэнергетической ядерной физики, но и предсказать новые свойства легких ядер, если параметры моделей выбираются из условия согласования с микроскопическими свойствами легких ядер.

**SCIENTIFIC COUNCIL on AWARD of SCIENTIFIC DEGREE of
DOCTOR of SCIENCES 16.07.2013.FM.11.01 at the INSTITUTE of
NUCLEAR PHYSICS and NATIONAL UNIVERSITY of UZBEKISTAN**

INSTITUTE of NUCLEAR PHYSICS

TURSUNOV ERGASH MAKHKAMOVICH

**STRUCTURE OF LIGHT NUCLEI
IN THE FRAME OF POTENTIAL MODELS**

**01.04.08- Physics of atomic nuclei and elementary particles, accelerator technics
(physics and mathematics sciences)**

ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION

Tashkent – 2015

This Post Doctorate thesis has been registered with the number 30.09.2014/B2014.5.FM158 at the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan.

Doctoral dissertation is carried out at the Institute of Nuclear Physics.

The full text of the doctoral dissertation is placed on web page of Scientific Council 16.07.2013.FM.11.01 at the Institute of Nuclear Physics and National University of Uzbekistan to the address www.inp.uz.

The abstract of dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English) is placed on web page to address www.inp.uz and information-educational portal ZIYONET to address www.ziyonet.uz.

Scientific consultant:

Yuldashev Bekhzod Sadykovich

doctor of sciences in physics and mathematics, professor,
academician of the Academy of sciences of the Republic of
Uzbekistan

Official opponents:

Musakhanov Mirzayusuf Mirzamakhmudovich

doctor of sciences in physics and mathematics, professor,
academician

Blokhintsev Leonid Dmitrievich

doctor of sciences in physics and mathematics, professor

Usmanov Pazlitdin Nuritdinovich

doctor of sciences in physics and mathematics

Leading organization:

Joint Institute for Nuclear Research

Dubna, Moscow region, Russian Federation

Defense will take place « ____ » _____ 2015 at _____ at the meeting of Scientific council number 16.07.2013.FM.11.01 at the Institute of Nuclear Physics and National University of to address: Ulugbek, Tashkent, Ph.: (+99871)150-30-70; Fax: (+99871)150-30-80; e-mail: info@inp.uz.

The doctoral dissertation is registered at Information-resource center of Institute of Nuclear Physics, №_____, it is possible to review it in the IRC (INP, Ulugbek, Tashkent city, Uzbekistan, 100214), Ph.: (+99871) 289-31-18).

Abstract of dissertation sent out on « ____ » _____ 2015 year
(mailing report № _____ dated _____ 2015)

U.S. Salikhbaev

Chairman of Scientific Council on award of
scientific degree of doctor of sciences D.Ph.-M.S.,
professor

R. Yarmukhamedov

Scientific secretary of Scientific Council on award of
scientific degree of doctor of sciences D.Ph.-M.S., professor

I.Khidirov

Chairman of scientific seminar under Scientific Council
on award of scientific degree of doctor of sciences,
D.Ph.-M.S., professor

ANNOTATION OF THE DOCTORAL DISSERTATION

Topicality and demand of the subject of dissertation. Currently, a lot of efforts are made to understand the structure of neutron-rich halo nuclei like ${}^6\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{14}\text{Be}$, ${}^{19}\text{C}$, ${}^{31}\text{Ne}$. These nuclei have special properties such as small binding energies and the extended one- and two-neutron low-momentum orbitals ($l=0,1$). Usually, these nuclei are studied in the core plus few neutrons model. Additionally, no any two-body subsystem of the three-body halo nuclei ${}^6\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$, and ${}^{14}\text{Be}$ is bound, a property of the Borromean system. In addition to the static properties, like energies and charge radii, the beta decay and electromagnetic transition processes of these nuclei to two-body and three-body continuum channels are of special interest. These processes yield useful information on the internal structure and halo properties of the nuclei, since the transitions occur namely in the halo parts. In addition, there are experimental data on the beta-decay processes of the ${}^6\text{He}$ and ${}^{11}\text{Li}$ halo nuclei into the two-body deuteron continuum channels, which need a deep theoretical analysis. The study of the beta-decay processes of the halo nuclei ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{19}\text{C}$ and ${}^{31}\text{Ne}$ to the two-body proton plus core continuum channels can yield new properties of these systems in addition to the static characteristics.

Among the halo nuclei a special place belongs to the ${}^{11}\text{Li}$ nucleus. Unlike other nuclei, it can decay additionally into the ${}^9\text{Li}$ +proton+neutron three-body continuum channel. This is the most complicated process and the theoretical model should give useful information on the process, as well as on the three-body structure of the ${}^{11}\text{Li}$ halo nucleus.

The first excited state of the ${}^6\text{Li}$ nucleus is the isobar analog state of the ${}^6\text{He}$ halo nucleus. Therefore the M1-transition process of this state to the deuteron continuum channel allows one to obtain information on its halo properties, similar to the properties of the ${}^6\text{He}$ nucleus. The obtained estimations for the width of the M1-transition can be compared with the existing experimental data. The process additionally can be used when studying the parity violation effects in the strong interaction.

The nuclear-nuclear interaction models, containing forbidden states in lowest waves, have been proposed long time ago, in the seventies of the XX-th century for an adequate account of the Pauli principle as an alternative to the potential models with a repulsive core at short distances. They have a microscopic background and, in other words, are based on the nucleonic degrees of freedom. However, the role of these forbidden states in the nuclear structure has not been properly studied until now. This question is of special interest for nuclei containing several alpha-clusters. The exclusion is the Moscow nucleon-nucleon potential model with forbidden states in lowest waves: its properties in the three-body nuclei have been studied in details. On the other hand, a role of forbidden states in the Moscow model is different and it is connected with the quark structure of the nucleon. But in light nuclei containing several nuclear clusters, the models with forbidden states are introduced exclusively for the adequate account of the Pauli principle. They

have got a special actuality in view of the discovery of the halo structure of some light nuclei.

The nuclei which consist of several alpha-clusters play an important role in astrophysics. Although the two alpha-particles are unbound, but the nuclei, containing three (^{12}C) and four (^{16}O) alpha-clusters, have large binding energies and belong to the group of the Borromean nuclei. For these nuclei, the obtaining realistic wave functions for the bound, as well as continuum states, which can be applied to the estimation of the cross-section of the astrophysical synthesis reactions, is the most difficult problem. On the other hand, study of the structure of these nuclei becomes even more actual in view of predictions of the existence of the “alpha-condensation”.

Models of light nuclei developed in the dissertation and results received on their basis are extremely important for the optimal control of the thermonuclear reactions in the $\text{d}+^6\text{Li}$ plasma, yielding the formation of light nuclei ^3H , ^3He , ^4He , ^7Li and ^7Be . Uncertainty of the differential cross sections of the reactions strongly influence on the kinetics of the thermonuclear reactor, hence for the optimal control of these processes it is necessary to develop theoretical models with a high accuracy. Variational methods on the Gaussian and Lagrange-mesh bases are needed for the calculation of wave functions which are used for the estimation of speeds of the specified reactions with a high accuracy.

Conformity of research to priority directions of development of science and technologies of the Republic of Uzbekistan. This work has been carried out in accordance with development priorities of science and technology of the Republic of Uzbekistan F2 “Physics, Astronomy, Power engineering and engineering industry”.

International review of scientific researches on theme of dissertation. Theoretical models for the structure of light nuclei are being developed in different scientific centers of the world. The most successful models for the structure of bound states of light nuclei are based on variational methods on Gaussian (theoretical groups in Niigata and Kyoto, Japan and Moscow State University, Russia) and Lagrange mesh (theoretical groups at the University Libre de Brussels, Belgium) bases. They have been applied to the study of the structure of the three-body nuclei ^3H , ^3He , ^6He , ^6Li , ^{11}Li , ^9Be . The energy spectra, root-mean square radii, electric and magnetic form factors have been estimated. However, a theoretical study of the ^{12}C nucleus in the 3α model does not give satisfactory results. The bound spectrum of this nucleus obtained with the help of the local $\alpha\alpha$ -potential with a repulsive core lays much higher than the experimental data. At the same time the microscopical models underestimate the spectrum by several MeV. And the three-body calculations using potential models with $\alpha\alpha$ -forbidden states, meet big problems connected with the orthogonalization of the solution on forbidden states. In order to overcome these difficulties it is necessary to examine carefully the sensitivity of the energy spectrum of the ^{12}C nucleus to the description of the $\alpha\alpha$ -forbidden states.

The three-body continuum structure of light nuclei is being studied through the break-up reaction in the experiments (RIKEN, Japan), as well as by theoretical

way on the basis of the Faddeev equation approach (theoretical group at the Aarhus University, Denmark), the complex scaling and analytical continuation methods (theoretical group at the MSU, Russia). However, these methods have limited capabilities. In particular, the Faddeev equation approach meets difficulties when dealing with the Coulomb forces. And the complex scaling method, as well as the analytical continuation method can be applied only to the resonance states.

In the past the R-matrix approach has been applied to the two-body continuum problems. However, a recent application of this method in the literature to the three-body continuum in the frame of the hyperspherical method (groups of the Kurchatov Atomic Energy Institute, Russia and of the Copenhagen University, Denmark) meets serious problems due to the extended three-body binding potential.

As was noted above, during the last years the properties of the two-body ^{11}Be , ^{19}C , ^{31}Ne and three-body ^6He , ^{11}Li , ^{14}Be halo nuclei present a special interest. Currently, all the above mentioned theoretical groups are interested in studying the bound and continuum structure of these systems and the electromagnetic and beta-transition processes to the continuum channels.

Degree of study of the problem. The role of forbidden states in nuclear interactions has been studied in the 3α problem by S. Marsh, H. Walliser, S. Nakaichi-Maeda. But, up to now it was impossible to separate completely the three-body allowed subspace for this system. The obtained solutions of the Schrödinger equation for the bound states of the ^{12}C nucleus in the 3α model with the BFW potential with forbidden states contain some piece of forbidden states. The application of the orthogonalising pseudopotential method allows one to find out special features of the ^{12}C nucleus that have not been studied in the literature.

Serious problems in the work of the Russian group M.V. Zhukov et al. connected with the extended three-body effective potential when describing the three-body continuum of halo nuclei, can be overcome in the R-matrix approach in a combination with the propagator method. This way allows matching of the wave function with its asymptotics at large distances. The method can be applied to the three-body continuum structure of the halo nuclei ^6He and ^{14}Be that has not been studied in the literature.

The existing experimental data on the beta-decay processes of the halo nuclei ^6He and ^{11}Li into the two-body continuum channels with the deuteron emission have not been explained in details. The theoretical researches of M.V. Zhukov et al. on the ^6He beta-decay have concluded that the αd -potentials with forbidden states describe the experimental data better than the models with forbidden states which have a microscopical background. Additionally, a potential dependence of the beta-transition probability of the ^{11}Li nucleus into the deuteron continuum channel has not been studied, although obtained results of M.V. Zhukov et al. and Y. Ohbayasi, Y. Suzuki are somehow close to the experimental data. Also, a role of the S-wave resonance in the $^9\text{Li}+d$ system has not been studied for the correct description of the experimental data.

The halo properties of the isobar-analog state $^6\text{Li}(0^+)$ have not been studied in details in the three-body model in the literature. Only some simplified

estimations have been obtained by the Russian group of L.V. Grigorenko. Here one has to develop complete three-body formalism with the extraction of analytical expressions for the matrix elements of the M1-transition with the further numerical realization.

Also, there are no studies of the beta-decay processes of the one-neutron halo nuclei ^{11}Be , ^{19}C and ^{31}Ne to the two-body continuum channels with emission of a proton.

As was noted above, the most complicated process is the beta-decay of the halo nucleus ^{11}Li into the three-body continuum channel $^9\text{Li}+p+n$. This process was studied neither in theoretical works, nor in the experiment. Therefore the theoretical analysis of the process with application of the modified Coulomb functions allows finding out new halo properties of this nucleus.

Connection of dissertational research with the plans of scientific-research works is reflected in following projects performed in the frame of the State Scientific-Technical Programs on fundamental research:

F-2.1.33 "Study of the multiphonon states of the vibrational nuclei" (2003-2007);

FA-F2-F076+F074 "Study of the structure of the symmetrical and neutron-rich nuclei in the transfer and breakup reactions" (2007-2011);

F2-FA-0-10117 "Study of the formation of light elements and properties of exotic nuclei formed in the low-energy reactions" (2011-2016).

Purpose of research is to establish special features of the potential model of the interaction between nuclear clusters for the bound and continuum structure of light nuclei and for the description of processes with these nuclei at low energies.

To achieve this goal the following **tasks of research** are formulated:

to estimate the energy spectrum of the ^{12}C nucleus in the 3α cluster model and to clarify special features of the potential model with forbidden states;

to develop the R-matrix approach in the combination with the propagator method for the study of the three-body continuum structure of light nuclei, to estimate three-body phases for the two-neutron halo nuclei ^6He and ^{14}Be ;

to analyze the beta-decay processes of the halo nuclei ^6He and ^{11}Li into the $\alpha+d$ and $^9\text{Li}+d$ two-body continuum channels in the three-body cluster potential model and to clarify potential dependence of the transition probabilities;

to study halo properties of the the isobar-analog state $^6\text{Li}(0+)$ in the magnetic M1- transition processes to the $^6\text{Li}(1+)$ ground state and to the $\alpha+d$ continuum in the three-body model and to study potential dependence of the transition probabilities;

to estimate the transition probabilities of the ^{11}Li nucleus beta-decay to the $^9\text{Li}+p+n$ three-body continuum channel in the cluster potential model;

to estimate the transition probabilities of the beta-decay of the one-neutron halo nuclei ^{11}Be , ^{19}C and ^{31}Ne to the two-body continuum channels in the frame of cluster potential model.

Objects of research are the bound spectrum of the ^{12}C nucleus, transition probabilities of the beta-decay of the halo nuclei ^6He , ^{11}Li , ^{11}Be , ^{19}C and ^{31}N to the two-body and three-body continuum channels, the probability of the M1-transition

of the isobar-analog state ${}^6\text{Li}(0^+)$ to the ${}^6\text{Li}(1^+)$ ground state and to the $\alpha+d$ continuum, three-body continuum structure of the ${}^6\text{He}$ and ${}^{14}\text{Be}$ halo nuclei.

Subjects of research are two-body and three-body structures of light nuclei, including halo nuclei, electromagnetic and weak transitions in nuclei, nuclear interaction potentials, mechanisms of the strong interaction.

Methods of research. Cluster potential model based on variational methods on Gaussian and hyperspherical Lagrange-mesh bases for the calculations of the two-body and three-body bound state wave functions and corresponding energy spectrum; Numerov algorithm for the calculation of the two-body scattering wave functions; R-matrix approach in the hyperspherical Lagrange-mesh basis for the calculation of the three-body continuum wave functions with the help of the propagation method on the basis of the Numerov algorithm; method of orthogonalizing pseudopotentials for the elimination of Pauli forbidden states.

Scientific novelty of the dissertation research presented in the dissertation consists in the following:

for the first time an extremely high sensitivity of the energies of the compact 0^+_1 and 2^+_1 states of the ${}^{12}\text{C}$ nucleus to the description of the two-body Pauli forbidden states is established, which leads to the occurrence of the so-called "almost forbidden states" in the three-body functional space;

for the first time the R-matrix approach is developed in combination with the propagator method for the study of the three-body continuum structure of light nuclei ${}^6\text{He}$ and ${}^{14}\text{Be}$ in the frame of the hyperspherical harmonics method on a Lagrange-mesh basis; it is shown that for the convergence of the results the wave function has to be matched with its asymptotics at large distances (about 1000 fm); the diagonal- and eigen-phases of the three-body collision matrix have been calculated and a new ${}^{14}\text{Be}(2^+)$ resonance is predicted near $E_x=3.4$ MeV;

theoretical estimations for the transition probabilities per time and energy units of the beta-decay of the two-neutron halo nucleus ${}^6\text{He}$ to the $\alpha+d$ continuum channel have been obtained; for the first time it is shown that for the reproduction of the experimental data on the beta-decay, it is necessary to use microscopically found αd -potentials containing a forbidden state in the S-wave, reproducing phase shifts and the ground state energy; it is also shown that for the convergence of matrix elements one needs to know wave functions up to 30 fm and hypermomentum components up to $K=24$; it is demonstrated that the halo effects play an important role in the description of the process because of mutual suppression of the internal and external parts of the matrix elements;

for the first time the theoretical estimations for the probabilities of the M1-transition per time and energy units of the isobar-analog state ${}^6\text{Li}(0^+)$ to the $\alpha+d$ continuum have been obtained; it is shown that only in the case of using the potentials with forbidden states the integral width of the transition 0.9 meV is well consistent with the previous simplified calculations; it is also shown that for convergence of the results one needs to take the upper limit of the effective integral around 25-30 fm and the hypermomentum components up to $K=20$;

for the first time the theoretical estimations for the transition probabilities per time and energy units of the ${}^{11}\text{Li}$ halo nucleus beta-decay to the two-body ${}^9\text{Li}+d$

continuum channel have been obtained, very consistent with new experimental data; it is shown that in this case, a resonance in the S-wave of the ${}^9\text{Li}+d$ system at the energy position of about 0.7 MeV plays the main role, not depending on what potential model is used: with a repulsive core or with a forbidden state; the ${}^9\text{Li}+d$ -potential which reproduces this resonance, describes well the shape and absolute values of the transition probabilities with the help of absorbing imaginary term due-to open decay channels;

for the first time theoretical estimations for the beta-decay probabilities per time and energy units of the ${}^{11}\text{Li}$ halo nucleus to the ${}^9\text{Li}+p+n$ three-body continuum channel have been obtained;

for the first time theoretical estimations for the beta-decay probabilities per time and energy units of the one-neutron halo nuclei ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{19}\text{C}$ and ${}^{31}\text{Ne}$ to the two-body continuum channels have been obtained in the potential cluster model; it is demonstrated that the transition probabilities are strongly sensitive to the separation energy of the valence neutron.

Reliability of the obtained results is provided by the followings: modern methods of quantum mechanics and the theoretical nuclear physics and highly effective numerical methods and algorithms are used; careful check of a consistence of the received theoretical results with experimental data and results of other authors is performed; conclusions are well consistent with the main provisions of the theory of structure of light nuclei.

Theoretical and practical values of research results. The theoretical and practical values of the results, presented in the dissertation, consist in the possibility to use them for the development of the theory of nuclear structure, of the cluster model of light nuclei. The methods developed in the thesis can be applied for the solution of few-body quantum mechanical problems in molecular, atomic and nuclear physics. The obtained theoretical estimations for the transition probabilities of the two-neutron halo nucleus ${}^{11}\text{Li}$ into the ${}^9\text{Li}+p+n$ three-body continuum channel and one-neutron halo nuclei ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{19}\text{C}$ and ${}^{31}\text{Ne}$ to the two-body continuum channels can be used when planning experiments on these processes. The theoretical estimations for the M1-transition probabilities of the isobar-analog state ${}^6\text{Li}(0^+)$ to the $\alpha+d$ -continuum can be used when planning experiments on this process and also when examining the parity violation effects in the strong interaction. The new resonance ${}^{14}\text{Be}(2^+)$ around $E_x=3.4$ MeV predicted in the dissertation has been confirmed recently in the experiment with $E_x(\text{exp})=3.54(16)$ MeV: Aksyutina Yu., Aumann T., Boretzky K., et al. “Study of the ${}^{14}\text{Be}$ continuum: Identification and structure of its second 2^+ state”, Phys. Rev. Lett. - New York, 2013. - vol. 111, N. 24. - 242501. The theoretical results presented in the thesis have been used when planning the last experiments on the beta-decay of halo nuclei ${}^6\text{He}$ and ${}^{11}\text{Li}$ into the deuteron channel by R. Raabe, J. Buescher, et al. in Physical Review, 2009. – vol. C80, N 5. – id.054307 and by R. Raabe, A. Andreyev et al. in Physical Review Letters, 2008. – vol. 101, N 21. – id.212501. In recent papers of M. Grieser et al., European Physics Journal, Special Topics, 2012. - vol. 207, N 1, - id.01599, and M.J.G. Borge et al. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2013. - vol. 40. – id.035109 the results

on the beta-decay of one-neutron halo nuclei ^{11}Be , ^{19}C and ^{31}Ne into two-body and of two-neutron halo nucleus ^{11}Li into the three-body continuum channels, presented in the thesis have been used to help devising a storage ring for the ISOLDE facility at CERN.

Realization of the research results. The R-matrix approach in the hyperspherical Lagrange-mesh basis in combination with the propagator method developed in the dissertation work has been used when the three-body continuum structure of the ^{12}C nucleus is studied and when the mechanism of the three-body breakup of the ^{11}Li nucleus is studied in the frame of the program “Spectroscopy of light nuclei and nuclear reactions in microscopical models” (2010-2012) (initiated by the Belgian-State Federal Services for Scientific, Technical and Cultural Affairs and registered by number P6/23).

Approbation of the work. Main results of the dissertation have been reported at the seminars of the Nuclear physics department of the INP of the UzAS, of the National University of Uzbekistan, of the Brussels Free University (ULB), of the Surrey University (England), of the Inha University (Korea), at 6 International Conferences "50 Years of the Nuclear Shell Model" (Heidelberg, Germany, 1999), "SOTANCP-2010" (Brussels, Belgium, 2010), "Modern Problems of Nuclear Physics" (Samarkand, 2003; Tashkent, 2009), "Nuclear and Radiation Physics" (Almaty, Kazakhstan, 2011), "Nuclear science and its application", (Samarkand, 2012).

Publication of results. The main results of the dissertation have been published in 20 scientific works, 9 of them are in international leading journals (1 of them is as Proceedings of the International Conference), 1 paper is published in Uzbek Journal of Physics (as Proceedings of the International Conference), 1 paper is in the Proceedings of the International Conference (Niigata, Japan, 2003), 1 preprint is in the Los-Alamos e-arXiv and 8 Abstracts are of International Nuclear Physics Conferences.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, eight chapters, conclusion, a reference list and two appendices. The dissertation is printed on 181 pages, and includes 33 figures and 14 tables.

MAIN CONTENTS OF THE DISSERTATION

In the introduction a topicality and a validity of the dissertational subject have been justified, a purpose and problems, objects and subjects of the investigations have been formulated, a conformity of the research to priority directions of the scientific and technological development of the Republic of Uzbekistan is defined, a scientific novelty of the obtained results is given, a reliability of the results is proved, theoretical and practical values of the performed work are listed, an information about the approbation of the work and about the structure of the Dissertation is given.

In the first chapter a short review of the literature on the main positions and features of the potential models applied for the study of the structure of light nuclei is presented. Main problems in this field are listed and possible ways of the solution are discussed. In view of the analysis of the literature, the aim and tasks of the Dissertation have been formulated.

In the second chapter of the dissertation a theoretical analysis of the energy spectrum of the ^{12}C nucleus in the 3α cluster potential model on the Gaussian basis of a high accuracy is performed with the local $\alpha\alpha$ -potentials of Ali and Bodmer with a repulsive core (AB) and with the deep potential of Buck, Friedrich and Wheatley (BFW) with forbidden states in the S- and D-waves. As is known, these potentials describe well the experimental data of the $\alpha\alpha$ -scattering at low energies. Theoretical results for the binding energy of the ground state of the ^{12}C nucleus, obtained with the l-independent AB potential (0.584266 and 5.1220936 MeV with and without the Coulomb interaction, respectively) actually are identical with the results of other authors in the Lagrange-mesh method. For the excited levels the results again are close to the results of the Lagrange-mesh method, but they are better than for the hyperspherical method. The first number is far from the experimental binding energy (7.27 MeV) even l-dependent version of the AB-potential yields a strong underestimation 1.523 MeV. For the calculations of the 3α energies with the BFW potential a method of orthogonalizing pseudopotentials is used, which allows to solve the Schrödinger equation in the complete functional space. In the dissertation it is shown that the energies of the compact ground 0^+ and first excited 2^+ states of the 3α system are strongly sensitive to the description of the $\alpha\alpha$ -Pauli forbidden states. This result also leads to the unusual behavior of the mixture of forbidden states in the solution of the three- body Schrödinger equation.

The mixture must decrease, with increasing projecting constant λ , which, however, in the given case has a minimum at around 1450 MeV. At this value of λ , the ground state energy is -19.763 MeV, which is very close to the results of microscopic studies. Further increasing of λ yields a strong increase of the 3α ground state energy. As was shown by Fujiwara for the first time, this behavior of the energy and mixture, results in the occurrence of so-called “almost forbidden states” in the solution of the Schrödinger equation. This “almost forbidden state” in present study was found as an eigenstate of the complete three-body projector corresponding to the eigenvalue $1.1847\text{E-}4$ MeV. If one accepts this state as an allowed one, then for the 3α ground state energy the estimation occurs to be -20 MeV, but if it is accepted as a forbidden state, then the estimation -0.645 MeV is obtained. Such interesting phenomenon arises for the first time in the bound state problems. Thus, for the compact states of the α -cluster nuclei the Pauli principle plays the exclusively important role, hence one can suggest a new way to build the $\alpha\alpha$ -potential. Namely, the parameters of the potential can be fitted to forbidden states, preliminary fixed from the microscopic $\alpha\alpha$ -calculations.

In the third chapter of the dissertation the R-matrix approach is developed for the study of the three-body continuum structure of light nuclei in the hyperspherical harmonics method on a Lagrange mesh basis. In section 3.1.1 the

main formalism of the hyperspherical harmonics method on a Lagrange mesh basis is given and explicit expressions for the system of coupling equations and three-body effective potentials depending on hyperradius are obtained. Here the asymptotic form of the effective potential is presented whose main term is of order $1/\rho^3$. Also the important part is the centrifugal term, which is of order $1/\rho^2$. For different three-body partial waves, the expansion coefficients of the effective potential of the powers of $1/\rho$ are calculated. In section 3.1.2 the three-body R-matrix approach is developed on the basis of the Bloch- Schrödinger equation. A trial wave function is expanded on the Lagrange-mesh basis in the internal region (up to 25-30 fm). The R-matrix calculated at the boundary of the internal region is then propagated with the help of the Numerov algorithm up to large distances (about 1000 fm) where the wave function is matched with its asymptotics. The latter is expressed through the Bessel functions of the first and second kinds in the case of neutral systems, and through regular and irregular Coulomb functions in the case of charged particles. The collision matrix is calculated on the basis of the propagated R-matrix. In section 3.2 of the dissertation the developed method is applied to the analysis of the three-body continuum structure of halo nuclei ${}^6\text{He}=\alpha+n+n$ and ${}^{14}\text{Be}={}^{12}\text{Be}+n+n$. For the NN-interaction the central Minnesota potential is used and for the αN -interaction the potential of Kanada et al. is used which contains a spin-orbit term and parity dependence. The potential $V_{\alpha N}$ is multiplied by factor $\lambda=1.051$ in order to reproduce the ground state energy $E({}^6\text{He})=-0.97$ MeV. For the ${}^{12}\text{Be}+n$ interaction the Woods-Saxon potential

$$V(r) = - [V_0 + V_s \cdot l \cdot s] / [1 + \exp((r-r_0)/a)] \quad (1)$$

is chosen with the parameters $V_0 = 43$ MeV, $V_s = 6$ MeV, $r_0 = 2.908$ fm, $a = 0.67$ fm. In order to reproduce the correct energy position of the ${}^{14}\text{Be}$ ground state, $E=-1.34 \pm 0.11$ MeV, two methods have been used. The first method is to multiply the potential (6) by the factor $\lambda=1.08$, the second method is to add a three-body potential

$$V_{K\gamma, K'\gamma'}(\rho) = - \delta_{K,K'} \delta_{\gamma,\gamma'} V_3 / [1 + (\rho/\rho_3)^2] \quad (2)$$

to the above two-body potential of the Woods-Saxon form, where K and K' are hypermomenta,

$\gamma=(l_x, l_y, L, S)$ and $\gamma'=(l'_x, l'_y, L', S')$ are three-body channels.

In fig. 1 the calculated phase shifts of the $\alpha+n+n$ system with $J^\pi=0^+$ are presented for the channel radius $a_0=20$ fm and $a_0=30$ fm in comparison with the propagation up to 250 fm for different three-body channels for the check of the convergence. It can be seen that the propagator is important for the channels with large values of the hypermomentum K . After the diagonalization of the collision matrix one can have the eigenphases.

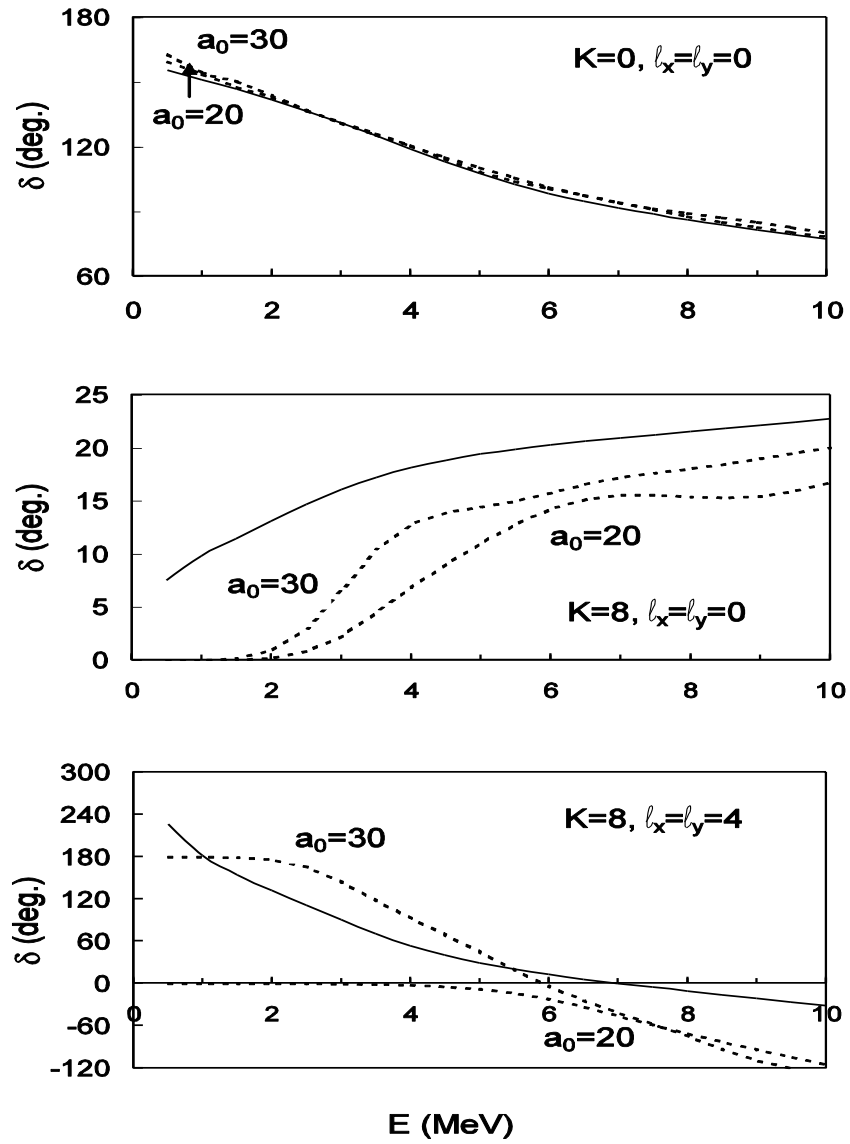


Fig. 1. Phase shifts of the $\alpha+n+n$ system with $J^\pi=0^+$ for the channel radius $a_0=20$ fm and $a_0=30$ fm (dashed lines) and with the propagation up to 250 fm (solid lines)

In fig. 2 the eigenphases of the $\alpha+n+n$ system with $J^\pi=0^+$ are presented for different values of $K_{\max}$. As can be seen from the figure, the convergence is faster for larger energy values.

In fig. 3 the eigenphases with $J^\pi=0^+, 1^-, 2^+$ of the ${}^6\text{He}$ and ${}^6\text{Be}$ nuclei are shown. For the ${}^6\text{He}$ halo nucleus one can see a narrow resonance 2^+ around 0.7 MeV, which is slightly below the experimental position 0.8 MeV. In the states 0^+ and 1^- there are broad resonances around 1.5 MeV. Close results have been obtained by M.V. Zhukov et al. and I.J. Thompson et al. In the ${}^6\text{Be}$ nucleus the ground state energy $E=1.26$ MeV with a width $\Gamma=65$ keV, that is well consistent with the experimental data $E=1.37$ MeV and $\Gamma=92\pm6$ keV.

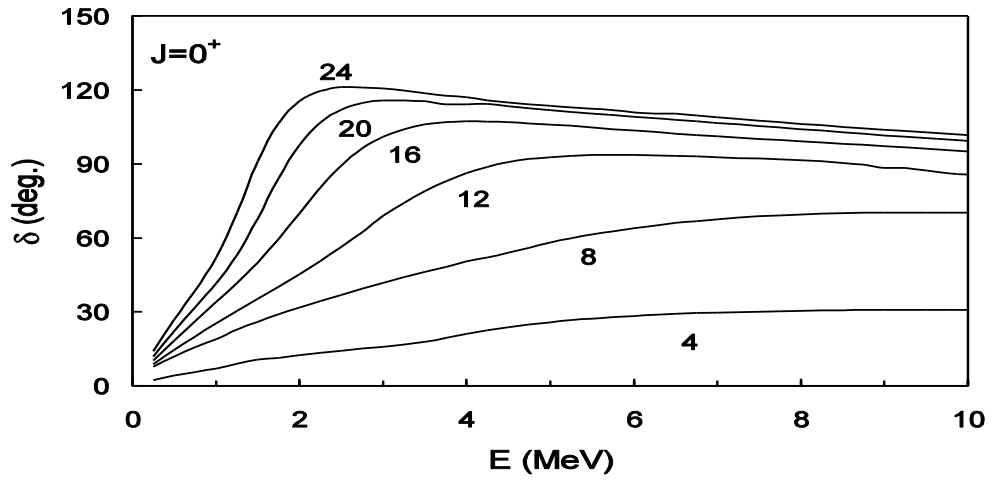


Fig. 2. Eigenphases of the $\alpha+n+n$ system with $J^\pi=0^+$ for different values of $K_{\max}$

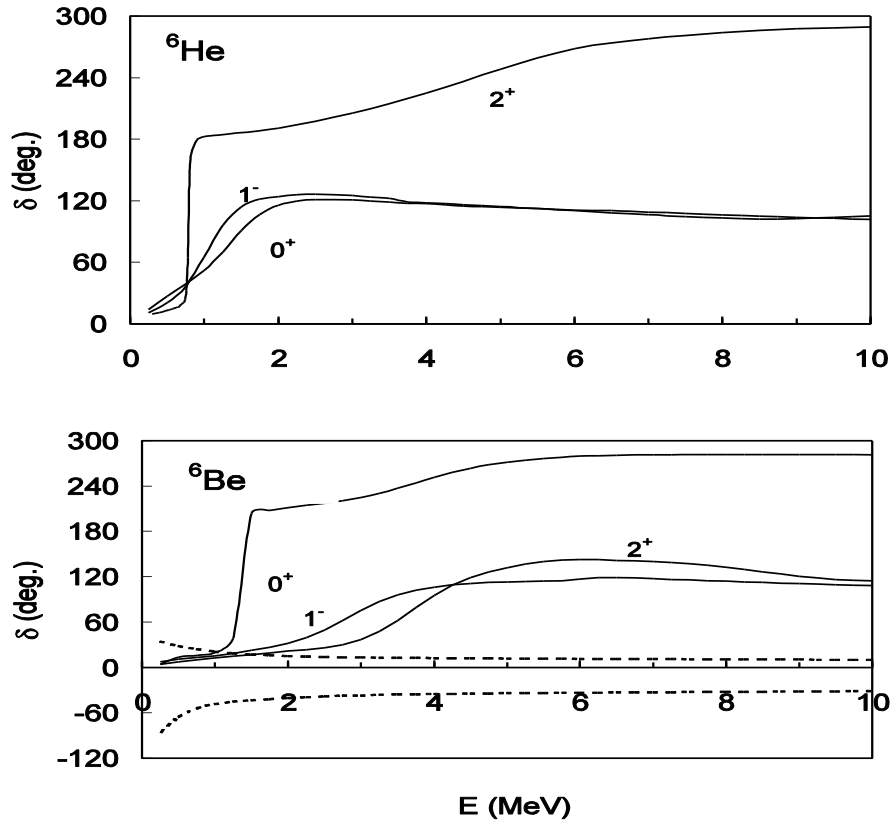


Fig. 3. Eigenphases of the ${}^6\text{He}$ and ${}^6\text{Be}$ nuclei with $J^\pi=0^+, 1^-, 2^+$

In fig. 4 the three-body eigenphases of ${}^{12}\text{Be}+n+n$ and ${}^2\text{O}+p+p$ are given for the states with $J^\pi=0^+, 1^-$ and 2^+ . From the figure one can see that in the 2^+ state of ${}^{14}\text{Be}$ there is a narrow resonance with the energy about 2 MeV which corresponds to the excitation energy $E_x=3.4$ MeV, a prediction for the experiment. This resonance has been recently confirmed in the experiment with the energy position $E_x=3.54(16)$ MeV.

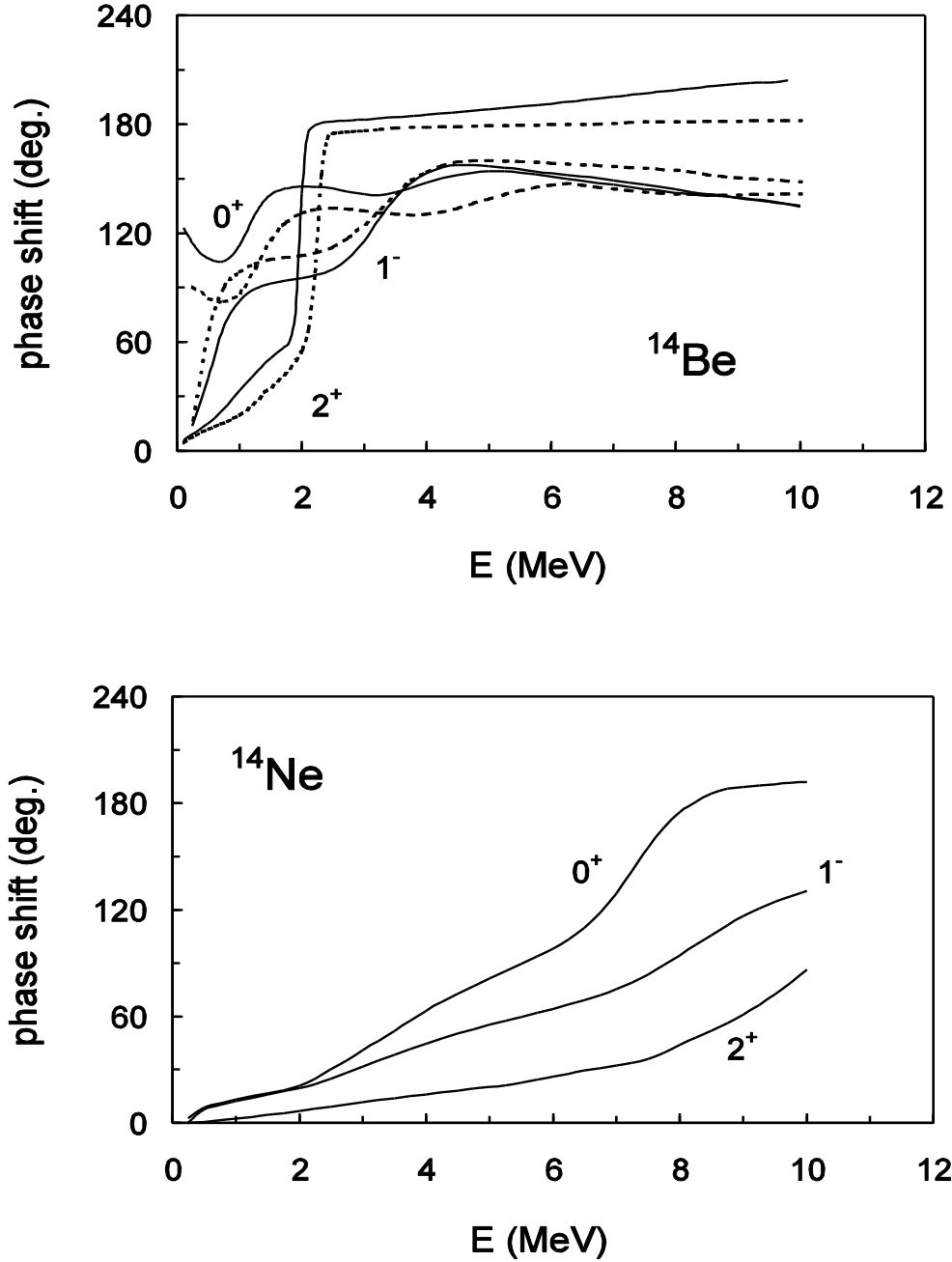


Fig. 4. Eigenphases of the three-body systems $^{12}\text{Be} + n+n$ and $^{12}\text{O} + p+p$ for the states with $J^\pi = 0^+, 1^-, 2^+$

In the fourth chapter of the dissertation a theoretical analysis of the beta-decay of the two-neutron halo nucleus $^6\text{He}(0^+)$ into the $\alpha+d$ continuum channel is performed in the three-body model. This kind of reactions is energetically possible only for the nuclei with the two-neutron separation energy less than 3 MeV. In our case this condition is fulfilled with $E_{2n}=0.95$ MeV. Maximal possible energy (Q-value) in the $\alpha+d$ centre of mass system is 2.03 MeV. Since in the exit channel the total momentum is 1, then the only possibility is the Gamow-Teller transition for which the spins of the electron and antineutrino are parallel. The total transition probability of the process is strongly suppressed $2.2 \pm 1.1 \text{ E-6 s}^{-1}$. In the section 4.1 of the dissertation a description of the theoretical model is given. As in previous

section, the three-body wave function of the ${}^6\text{He}$ nucleus is calculated in the hyperspherical harmonics method. In the section the analytical expressions are given for the Gamow-Teller matrix elements which are defined by the overlap integral of the initial and final states wave functions. In section 4.2 of the dissertation the obtained numerical results are presented. For the NN-interaction the Minnesota potential is used, while the αN -interaction is described by the potential of Kukulin et al. By analyzing the convergence of the effective integrals it is found that for the reproduction of the experimental data one has to include three-body channels with large values of the hypermomentum up to $K_{\text{max}}=24$, and the integral limit up to 30 fm. It is explicitly shown that for the reproduction of the experimental data correctly, the internal and external (halo) parts of the matrix elements for the main three-body component $K=0$ must cancel each other, and at the end this component actually does not give any contribution to the process. Dominant contributions come from the component with $K=8$, as well as from the components with $K=2$ and $K=10$. For these channels the halo parts of the matrix elements play the main role.

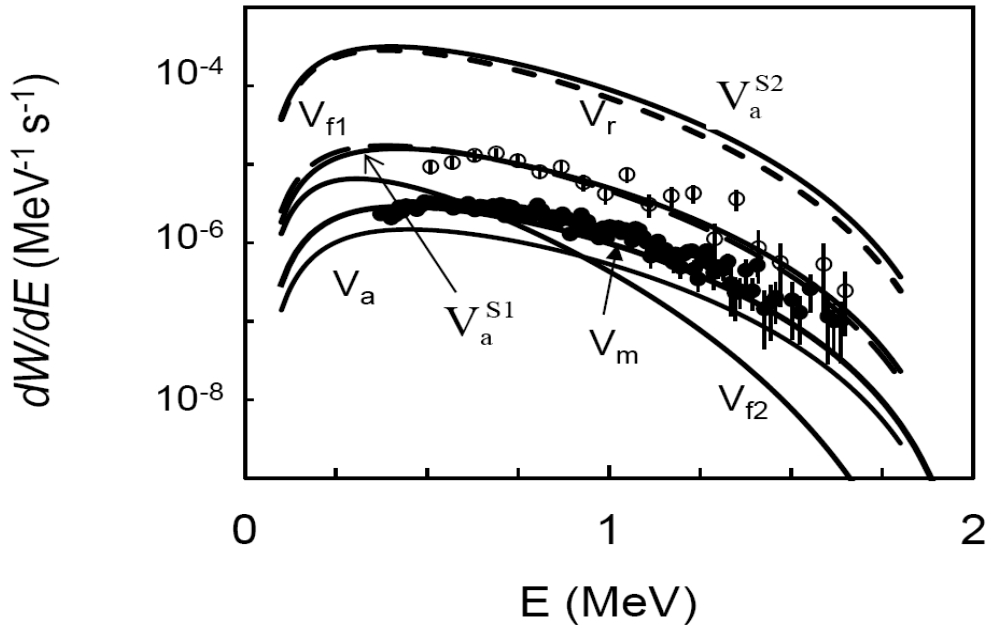


Fig. 5. Transition probabilities per time and energy units of the beta-decay of the ${}^6\text{He}(0^+)$ halo nucleus into the $\alpha+d$ continuum channel for different αd -potential models

For the αd -interaction a number of potential models (see fig. 5) are tested: a potential with a repulsive core at short distances, which describes correctly the $\alpha+d$ phase shifts in the S-wave, but does not describe the bound state (V_r in fig. 5), a deep potential of Dubovichenko V_a of a simple Gaussian form $V(r) = V_0 \exp(-\alpha r^2)$ with parameters $V_0 = -76.12$ MeV and $\alpha = 0.20 \text{ fm}^{-2}$, which reproduces the binding energy of the ${}^6\text{Li}(1^+)$ nucleus $E = 1.474$ MeV and the phase shifts, but has an additional Pauli forbidden state in the S-wave, folding potentials V_{f1} , V_{f2} , and potentials V_a^{S1} , V_a^{S2} , obtained by using the supersymmetric transformations from

the potential V_a . The potential V_{f1} describes the binding energy of the ${}^6\text{Li}$ (1^+) nucleus, and has a Pauli forbidden state, but does not describe well the phase shifts. And the potential V_{f2} , though describes well the phase shifts, but overestimates the binding energy. The potential V_a^{S1} gives the same phase shifts and physical bound state however does not contain a Pauli forbidden state, the potential V_a^{S2} reproduces the phase shifts only, but does not give any binding. From the figure one can see that the best description of the form of new experimental data for the transition probabilities of the process (filled circles) is obtained when using the deep potential of Dubovichenko V_a , though the theoretical curve is slightly below the experimental data. The success of the potential V_a is connected with the node in the S-wave of the $\alpha+d$ scattering at short distances due to the orthogonality to the Pauli forbidden state, and also with the reproducing the binding energy and the phase shifts. A small modification of the depth and width of the potential with $V_0=-79.4$ MeV and $\alpha=0.21$ fm $^{-2}$ (potential V_m in fig. 5) yields the best description of the experimental data on the ${}^6\text{He}$ halo nucleus beta-decay into the $\alpha+d$ continuum channel. Thus, the $\alpha+d$ potentials with Pauli forbidden states play a key role when describing the beta-decay process of the ${}^6\text{He}$ nucleus and its halo properties.

In the fifth chapter of the dissertation a theoretical analysis of the M1-transition of the isobar-analog state ${}^6\text{Li}(0^+)$ with the excitation energy $E_x=3.563$ MeV to the ground state ${}^6\text{Li}(1^+)$ and to the $\alpha+d$ continuum channel has been performed. In section 5.1 of the thesis a three-body model is given in details. The ground and excited states of the ${}^6\text{Li}$ nucleus are described in the three-body model $\alpha+p+n$ and their wave functions are calculated in the hyperspherical harmonics method on a Lagrange mesh basis. The explicit expression of the M1-transition operator in the Jacobi coordinates is also presented in this section, and the final analytical formulae of the matrix elements are given in the Appendix 2. In section 5.2 of the dissertation the obtained numerical results are presented for the process. For the width of the M1-transition of the isobar analog state ${}^6\text{Li}(0^+)$ to the ground state ${}^6\text{Li}(1^+)$ one has the estimation 7.49 eV which is well consistent with the experimental data 8.19 ± 0.19 eV. The theoretical value of the magnetic momentum of the ${}^6\text{Li}$ nucleus is $\mu=0.86$ in the nuclear magnetons, which slightly overestimates the experimental value 0.82. These estimations have been obtained with the wave functions which include three-body channels with a hypermomentum up to $K=20$, that provide a good convergence. For the NN-interaction the Minnesota potential is used, and the αN -interaction is described by the potential of Kukulin et al. For the description of the final continuum state the different $\alpha+d$ potentials V_a , V_{f1} , V_{f2} and V_a^{S1} from the previous chapter have been tested.

In fig. 6 the results of the theoretical calculations are presented for the differential width of the M1-transition of the isobaric analog state ${}^6\text{Li}(0^+)$ to the $\alpha+d$ continuum channel. The results for the folding potential V_{f1} , which describes the phase shifts not so well, are strongly suppressed in the energy region around 0.6 MeV. The other potentials do not show this property. The analysis of the convergence of effective integrals shows that the limit of the integrals must be at least 25-30 fm, and three-body components with $K=0$ and 2 yield the main

contribution (about 50%) to the matrix element of the transition, while the contributions of the components with large values of K are also important. It is shown that the main contribution to the M1-transition comes from the spin component. The integrated width of the transition is estimated to be 0.9 meV for the potential V_a , which is well consistent with the results of the simplified calculations of L. Grigorenko et al. It is also shown that the cancellation effects of the internal and halo components of the matrix elements for the M1-transition are not so important, as for the beta-decay of the halo nucleus ${}^6\text{He}$.

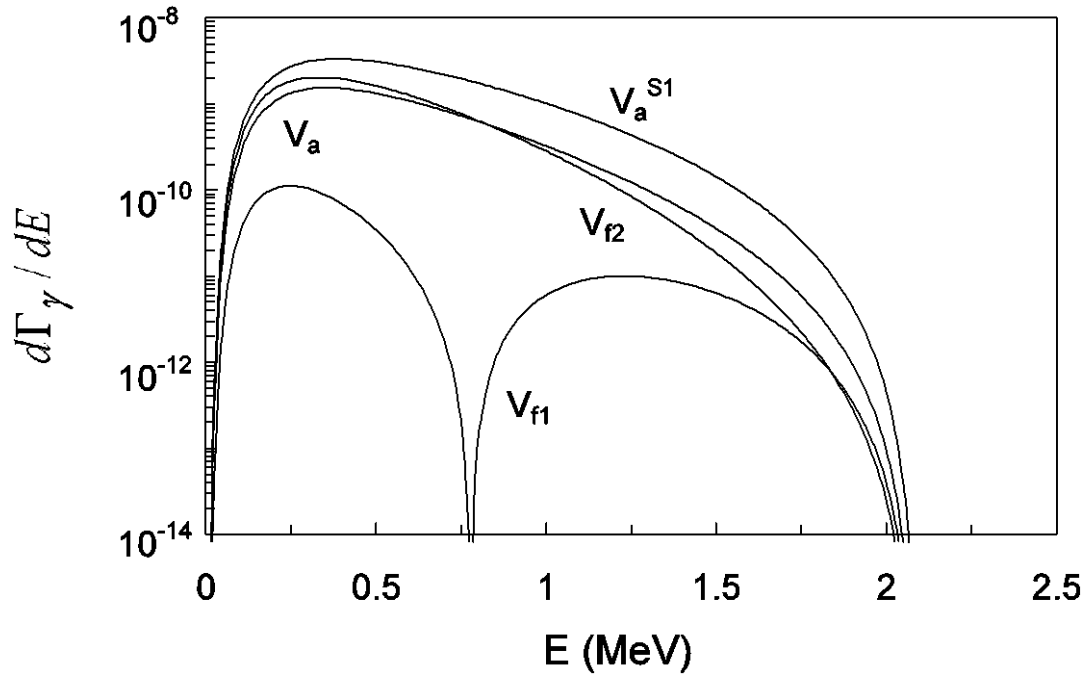


Fig. 6. Differential width of the M1-transition of the isobaric analog state ${}^6\text{Li}(0^+)$ to the $\alpha+d$ continuum channel per time and energy units

In the sixth chapter of the dissertation one deals with the theoretical analysis of the beta-decay of the two neutron halo nucleus ${}^{11}\text{Li}$ into the two-body ${}^9\text{Li}+d$ continuum channel. As before, the initial nucleus is described in the three-body model ${}^9\text{Li}+n+n$ in the hyperspherical harmonics method on a Lagrange mesh basis. The Minnesota nucleon-nucleon potential and a central ${}^9\text{Li}+n$ -potential of Thompson and Zhukov with a forbidden state in the S-wave are used, the latter reproduces the two neutron separation energy of the ${}^{11}\text{Li}$ nucleus, $S_{2n}=376$ keV. Maximal possible energy value is $E_Q=2.63$ MeV. The ${}^9\text{Li}+d$ interaction potentials should reproduce the physical bound state $1/2^-$ of the ${}^{11}\text{Be}$ nucleus with the energy $E=-17.60$ MeV, which is the excited state with the excitation energy $E_x=320$ keV. In the microscopic cluster models the system ${}^9\text{Li}+d$ has a Pauli forbidden state in the S-wave below the physical state. In the model such a state can be obtained with the help of a deep potential, as in the system $\alpha+d$. However, there are two differences. The first is that there is a resonance in the S-wave of the ${}^9\text{Li}+d$ two-body system, but its position is not known well from the experiment and lies in the region 0.2 - 1 MeV. The second difference concerns the existence of several open reaction channels below the ${}^9\text{Li}+d$ channel, for example the channels ${}^{10}\text{Be}+n$ and

$^8\text{Li}+t$. Hence, here one has a different physics. It is found that the beta-decay probabilities show a strong dependence on the position of the resonance, and potentials which do not describe the resonance in the S-wave of the $^9\text{Li}+d$ system, do not reproduce even the correct order of the beta-decay transition probabilities into the deuteron continuum channel.

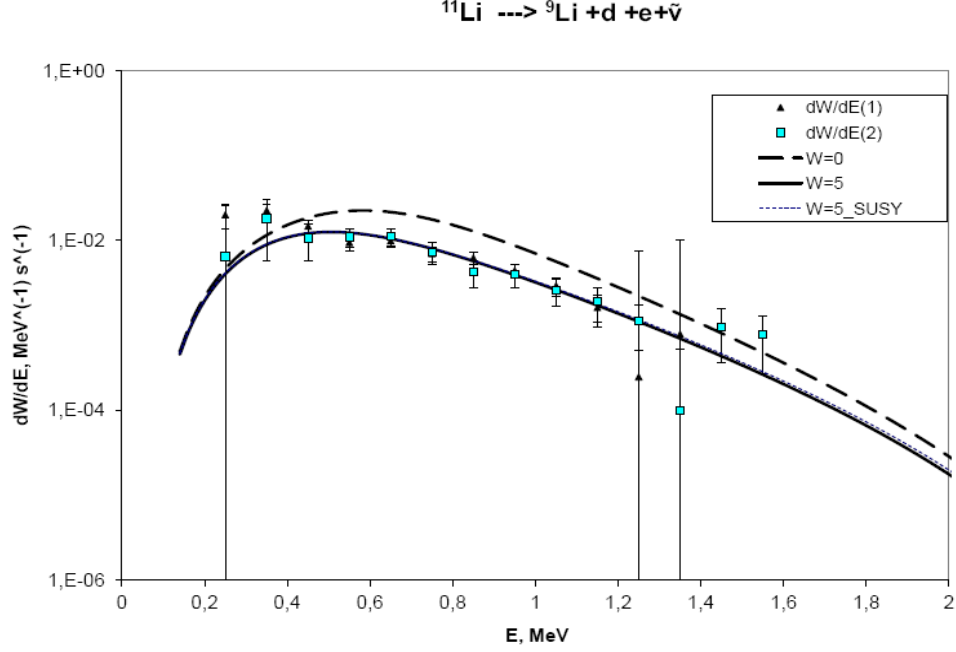


Fig. 7. Transition probabilities per time and energy units of the beta-decay of the ^{11}Li halo nucleus into the $^9\text{Li}+d$ continuum channel dW/dE , calculated with various values of the surface absorption strength W_0 (in MeV)

In the meantime, the transition probabilities do not depend on the used potential model: with a repulsive core or with a forbidden state. Due to the existence of open decay channels the absorption term is added into the $^9\text{Li}+d$ potential:

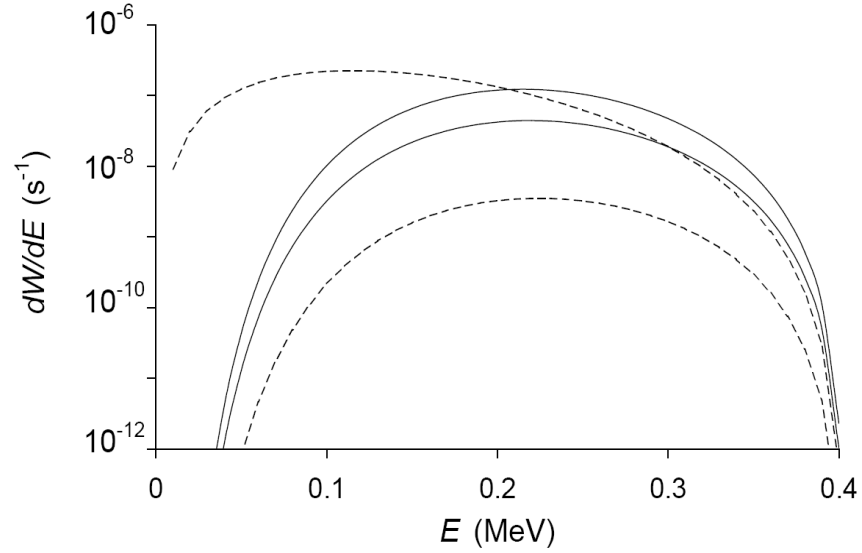
$$V(r) = -(V_0 + iW_0) \exp(-\alpha r^2). \quad (3)$$

It is found that the absorption is able to decrease essentially the beta transition probabilities. In fig. 7 the results of the theoretical analysis are shown for the beta-decay probabilities of the ^{11}Li halo nucleus into the $^9\text{Li} + d$ two-body continuum channel per time and energy units in comparison with the experimental data. The parameters of the $^9\text{Li}+d$ potential are chosen as $V_0=100.1$ MeV and $\alpha=0.17$ fm $^{-2}$, and W_0 can vary within few MeV. This potential reproduces the resonance in the S-wave around 0.7 MeV. As can be seen from the figure, the inclusion of the absorbing term into the potential with $W_0=5$ MeV leads to the best description of the experimental data. In the figure one can see also that the removing of the additional Pauli forbidden state from the $^9\text{Li}+d$ potential with the help of the supersymmetric transformations (SUSY) of the potential, actually does not affect the transition probabilities in contradiction to the case of the ^6He halo nucleus beta decay. It is also found that the halo components of the Gamow-Teller matrix

elements strongly dominate over the internal components. For the integrated transition probability the obtained theoretical estimation $7.3\text{E-}3 \text{ s}^{-1}$ is well consistent with the experimental data $(8.8\pm1.9)\text{E-}3 \text{ s}^{-1}$ for the energy cutoff $E > 0.2 \text{ MeV}$.

In the seventh chapter of the dissertation the unique beta-decay process $^{11}\text{Li} \rightarrow ^9\text{Li}+p+n+e+\tilde{\nu}$ is studied. The uniqueness of the process is that the only nucleus among the two-neutron halo nuclei is ^{11}Li , for which the energy condition of the beta-decay is fulfilled: $S_{2n} < (m_n - m_p - m_e)c^2 \approx 782 \text{ keV}$. In the case of the ^{11}Li nucleus, as was noted in the seventh chapter, this condition is satisfied with a small additional piece, $S_{2n} = 376 \pm 5 \text{ keV}$. The three-body wave function of ^{11}Li is described as a bound state $^9\text{Li}+n+n$ and calculated in the hyperspherical harmonics methods on a Lagrange mesh basis, as was done in the previous chapter with the same conditions. The final system $^9\text{Li}+p+n$ is the three-body continuum state of ^{11}Be . Calculations of its wave function are much more complicated comparing to the three-body continuum of the ^6He nucleus in several reasons. The main of them is due to the Coulomb repulsion between the core and the proton which increases the convergence radius and the number of three-body channels. Additionally, the continuum wave function must be orthogonal to several bound states wave functions, which complicates the continuum structure and the calculations. Since the estimation of the transition probability of the process is very useful for future experiments, some simplification of the model is allowed, namely the Coulomb functions are used with some modification. This modification consists of the shift of the Coulomb function to the left about 10-15 fm in order to model the wave function, corresponding to the real potential with nuclear plus Coulomb interaction terms. In fig. 8 the results of the calculations are presented for the transition probabilities of the ^{11}Li nucleus beta-decay into the three-body continuum channel per time and energy units. For the total transition probability of the beta decay the estimations $W = 3.8\text{E-}8 \text{ s}^{-1}$ and $W = 5.1\text{E-}10 \text{ s}^{-1}$ are obtained for the plane wave and for the pure Coulomb wave, respectively.

The modified Coulomb functions for the total transition probabilities give the estimation in the interval $0.6\text{E-}8 \text{ s}^{-1} < W < 1.8\text{E-}8 \text{ s}^{-1}$. This estimation even is less by the two order of magnitude than the probability of the ^6He halo nucleus beta-decay. The branching ratio, which shows, how rare is the process, is defined as $R = W t_{1/2} / \ln 2$, where $t_{1/2} \approx 8.75 \text{ ms}$ is the half-life of ^{11}Li . It is estimated between $0.8\text{E-}10$ and $2.2\text{E-}10$, which is much smaller than for the hindered deuteron decay of ^6He , $(2.6 \pm 1.3) \text{E-}6$. The reason of this smallness is the small Q value of the process $E_Q = 0.404 \text{ MeV}$, which leads to a limited phase space.



The upper dashed line corresponds to the plane wave approximation and the lower dashed line is for the pure Coulomb repulsion with the effective charge 4.83. The lower solid line corresponds to the shifted Coulomb function to the left by $a=10$ fm, and the upper solid line is for the shifted Coulomb function to the left by $a=15$ fm.

Fig. 8. Probabilities of the beta decay of the ^{11}Li halo nucleus into $^9\text{Li}+p+n$ three-body continuum channel per time and energy units

In the eighth chapter of the dissertation a theoretical analysis is given for the beta-decay processes of the one neutron halo nuclei ^{11}Be , ^{19}C , and ^{31}Ne with the neutron separation energies $S_n=501$ keV, $S_n=580\pm 90$ keV, and $S_n=0.33\pm 1.07$ MeV, respectively, into the two-body continuum channels core plus proton. It is assumed that the transition occurs in the halo parts of the nuclei. In all above cases the Fermi and Gamow-Teller transitions are possible. The energy condition is $S_n < (m_n - m_p - m_e)c^2 \approx 782$ keV, and the maximal allowed energy value in the centre of mass system of the core and proton is $E_Q = (m_n - m_p - m_e)c^2 - S_n$. Due to a large error bar for the neutron separation energy of the ^{31}Ne nucleus, the transition probability is not well defined and varies from 0 up to 10^{-6} s^{-1} . The initial ^{11}Be and ^{19}C nuclei are assumed as the S-wave states of the core plus neutron, and the ^{31}Ne nucleus is a bound P-wave state. The interactions are chosen in the form of the Woods-Saxon potentials with parameters fitted to the neutron separation energies with an additional Pauli forbidden state in every case. In fig. 9 the beta- transition probabilities per time and energy units are presented for the halo nuclei ^{11}Be , ^{19}C , and ^{31}Ne into the core plus proton continuum channels. In the calculations the neutron separation energy in the ^{31}Ne nucleus was fixed as $E=0.6$ MeV. In these conditions, the total transition probabilities are $1.5\text{E-}9 \text{ s}^{-1}$ for ^{11}Be , $2.7\text{E-}12 \text{ s}^{-1}$ for ^{19}C , and finally $3.3\text{E-}10 \text{ s}^{-1}$ for ^{31}Ne . The corresponding branching ratios are $3.0\text{E-}8$, $1.8\text{E-}13$, and $1.6\text{E-}12$ for ^{11}Be , ^{19}C , and ^{31}Ne , respectively.

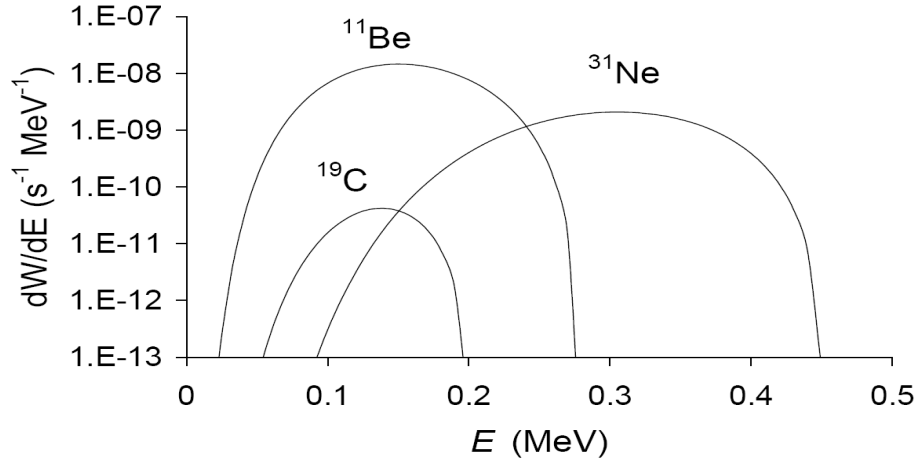


Fig. 9. Transition probabilities per time and energy units of the beta-decay processes of the halo nuclei ^{11}Be , ^{19}C , and ^{31}Ne into the core plus proton continuum channels

In appendices the analytical formulae for the M1-transition probabilities to the continuum in the three-body model and matrix elements of the M1-transition operators into the bound and continuum states have been given.

CONCLUSION

1. An extremely high sensitivity of the energies of the compact 0^+_1 and 2^+_1 states of the ^{12}C nucleus to the description of the two-body $\alpha\alpha$ Pauli forbidden states is established.

2. For the first time the R-matrix approach has been developed for the study of the three-body continuum structure of light nuclei in the frame of the hyperspherical harmonics method on a Lagrange-mesh basis in combination with the propagation technique. It is found that the R-matrix, calculated at the boundary of the internal region, must be propagated up to large distances (about 1000 fm), where the wave function is matched with its asymptotics. The method has been applied to the analysis of the three-body continuum structure of the two-neutron halo nuclei ^6He and ^{14}Be , diagonal and eigenphases of the three-body collision matrix have been calculated and a new $^{14}\text{Be}(2^+)$ resonance is predicted at $E_x=3.4$ MeV.

3. It is shown that for the reproduction of the experimental data on the delayed beta-decay of the ^6He halo nucleus into the $\alpha+d$ continuum channel, it is necessary to use microscopically found αd -potentials with a forbidden state in the S-wave, reproducing phase shifts and the ground state energy. In that case, the internal and halo components of the Gamow-Teller matrix elements almost completely cancel each other, and as a result, the transition probability is strongly reduced consistently with the experimental data.

4. The method of hyperspherical harmonics on a Lagrange mesh has been applied to the analysis of the magnetic M1-transition of the isobar-analog state $^6\text{Li}(0^+)$ to the $^6\text{Li}(1^+)$ ground state and to the $\alpha + d$ continuum channel in the

three-body formalism. The theoretical estimation for the width of the transition to the ground state 7.49 eV is well consistent with the experimental data 8.19 ± 0.19 eV. And the calculated magnetic moment of the ${}^6\text{Li}$ nucleus ($\mu = 0.86 \mu_N$) reproduced the experimental data $0.82 \mu_N$ fairly well. Theoretical estimations for the probabilities of the M1-transition per time and energy units of the isobar-analog state ${}^6\text{Li}(0+)$ to the $\alpha+d$ continuum have been obtained. The integral width of the transition 0.9 meV is well consistent with the previous simplified calculations. It is shown that the isobar-analog state ${}^6\text{Li}(0+)$ has a well developed halo structure, like the nucleus ${}^6\text{He}(0+)$.

5. The theoretical estimations for the transition probabilities per time and energy units of the beta-decay of the halo nucleus ${}^{11}\text{Li}$ to the two-body ${}^9\text{Li}+d$ continuum channel have been obtained, very consistent with new experimental data. In this case, a resonance in the S-wave of the ${}^9\text{Li}+d$ system at the energy position of about 0.7 MeV plays the main role, not depending on the used potential model: with a repulsive core or with a forbidden state. In this case, the halo components strongly dominate over the internal components. For the integral probability of the process the theoretical estimation $7.3\text{E-}3 \text{ s}^{-1}$ is within the error bar of the experimental data $(8.8 \pm 1.9)\text{E-}3 \text{ s}^{-1}$ for the energy cut-off $E > 0.2$ MeV.

6. The branching ratio for the beta delayed n-p emission by ${}^{11}\text{Li}$, a very exotic decay process, unique among nuclei with known two-neutron separation energies, has been estimated in the frame of the cluster potential model. Reasonable estimates of the branching ratio and of the energy distribution of the decays are obtained with shifted three-body Coulomb functions. The obtained branching ratio is estimated between $0.8\text{E-}10$ and $2.2\text{E-}10$, which is much smaller than for the hindered deuteron decay of ${}^6\text{He}$, $(2.6 \pm 1.3)\text{E-}6$. The reason of this smallness is the small Q-value of the process which leads to a limited phase space. The observation of this beta delayed decay mode, as expected, requires a valuable experimental effort. The total transition probabilities are estimated to be of order 10^{-8} s^{-1} .

7. At the end, the beta-decay probabilities per time and energy units of the one-neutron halo nuclei ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{19}\text{C}$ and ${}^{31}\text{Ne}$ to the two-body core+p continuum channels have been evaluated in the cluster potential model. For the total transition probability of the ${}^{11}\text{Be}$ nucleus to the ${}^{10}\text{Be}+p$ continuum channel the estimation is $1.5\text{E-}9 \text{ s}^{-1}$, of the ${}^{19}\text{C}$ nucleus to the ${}^{18}\text{C}+p$ continuum it is $2.7\text{E-}12 \text{ s}^{-1}$. The corresponding branching ratios are $3.0\text{E-}8$ for the ${}^{11}\text{Be}$ and $1.8\text{E-}13$ for the ${}^{19}\text{C}$ halo nuclei. The total transition probability of the ${}^{31}\text{Ne}$ nucleus to the ${}^{30}\text{Ne}+p$ continuum channel varies from 0 up to $1.\text{E-}6 \text{ s}^{-1}$ due to uncertainty of the separation energy. For the separation energy between 0.25 and 0.35 MeV, the total decay probability is $3.3\text{E-}10 \text{ s}^{-1}$, which leads to a branching ratio $1.6\text{E-}12$.

The **main conclusion** of the dissertation is that the potential models developed in this work can not only describe adequately the existing experimental data in the field of low-energy nuclear physics, but also are able to predict new properties of light nuclei, if the parameters of the model are chosen from the condition to be consistent with the underlying microscopic features.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Tursunov E.M. Variational calculations of the ^{12}C nucleus structure in a 3-alpha model using a deep potential with forbidden states // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. – London, 2001. – Vol.27, N 7. – P. 1381-1389.
2. Tursunov E.M., Baye D., Descouvemont P. Comparative variational studies of 0^+ states in three-alpha models // Nuclear Physics A. -Amsterdam, 2003. – Vol.723, N 3-4. – pp. 365-374.
3. Descouvemont P., Tursunov E.M., Baye D. Three-body continuum states on a Lagrange mesh // Nuclear Physics A. – Amsterdam, 2006. – Vol. 765, N 3-4. – pp. 370-389.
4. Tursunov E.M., Baye D, Descouvemont P. Analysis of the ^6He beta decay into alpha + d continuum in a three-body model // Physical Review C.-New York, 2006.- Vol. 73, N 1.- 014303 (9 p.).
5. Baye D., Tursunov E.M., Descouvemont P. ^{11}Li beta decay into ^9Li and deuteron within a three-body model // Physical Review C. – New York, 2006.- Vol.74, N 6.- 064302 (7p.)
6. Tursunov E.M., Descouvemont P., Baye D. Gamma-delayed deuteron emission of the ^6Li ($0^+; T=1$) halo state // Nuclear Physics A. – Amsterdam, 2007.- Vol. 793, N 1. – pp. 52-66.
7. Tursunov E.M., Baye D., Descouvemont P. Electromagnetic and weak processes with light halo nuclei // Uzbek Journal of Physics. – Tashkent, 2010. – Vol.12, N 4-6. – pp. 280-289.
8. Baye D., Descouvemont P., Tursunov E.M. Unique decay process: beta -delayed emission of a proton and a neutron by the ^{11}Li halo nucleus // Physical Review C. –New York, 2010. –Vol.82, N 5. – 054318 (6 p.).
9. Baye D., Tursunov E.M. Beta delayed emission of a proton by a one-neutron halo nucleus // Physical Letters B. - Amsterdam, 2011. – Vol. 696, N 5. – pp. 464 - 467.
10. Tursunov E.M., Baye D., Descouvemont P. Theoretical study of the ^{11}Li beta decay into the deuteron channel in a cluster model // International Journal of Modern Physics E. – Singapore, 2011. – Vol. 20, N 4. – pp. 803-806. (Proceedings of the 2nd Workshop on State of the Art in Nuc. Cluster Physics, SOTANCP2. - May 25-28, 2010, Brussels).

II бўлим (II часть; part II)

11. Tursunov E.M. Variational calculations of ^{12}C structure with the Buck and Ali-Bodmer alpha - alpha potentials // European Conf. on Advances in Nuclear Physics and Related Areas. - Thessaloniki, Greece, 8-12 July, 1997. - P. 194.
12. Tursunov E.M. Proton finite size effects on ^3He observables in the variational calculations with the Moscow NN- potential // Nuclear Structure Conf.-Gatlinburg Tennessee (USA), August 10-15, 1998. - P. 140.
13. Tursunov E.M. Variational calculations of the ^{12}C nucleus structure in a 3-alpha model using deep potentials with forbidden states // Inter. Conf. on Nuclear Physics: 50 Years to the Nuclear Shell Model. - 21-24 Apr, 1999, Dubna, Moscow region, 1999. – P. 263.
14. Tursunov E.M., Baye D. Descouvemont P. Coupled channel R-matrix method on a Lagrange-mesh for the halo nuclei // The 5-th Inter Conf. Modern Prob. Nuc. Phys. - Samarkand, 2003. - P. 113
15. Tursunov E.M., Baye D., Descouvemont P. Three-body systems with the Lagrange-mesh technique // Proceedings of the International Symposium “A new era of Nuclear Structure Physics, Niigata (Japan), November 19-22, 2005”. - World Scientific Publishing Co., Singapore, 2006. – P. 325-326.

16. Tursunov E.M., Baye D. Descouvemont P. Weak and EM processes with light halo nuclei // 7-th Int. Conf. Modern Problems of Nuclear Physics, 22-25 Sep., 2009, Tashkent. - P. 49
17. Tursunov E.M., Baye D. Descouvemont P. Theoretical study of the ^{11}Li beta-decay in the cluster model // 2nd Workshop on State of the Art in Nuc. Cluster Physics, SOTANCP2. - May 25-28, 2010, Brussels.- P. 82
18. Tursunov E.M. On the convergence of the many-body Pauli Projector // Cornell University Library: e-arXiv:1002.0455. - Los-Alamos, 2010. - 3 p.
19. Tursunov E.M. Analysis of the ^{11}Li halo nucleus beta decay in the cluster model // 8-th Int. Conf. Nucl. And Rad. Phys. - Sep. 20-23, 2011, Almaty. - P. 126
20. Tursunov E.M. Beta and M1-transition processes of light halo nuclei to the continuum // Int. Conf. Nucl. Science and its application. - 25-28 Sep., 2012, Samarkand. - P.66

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали таҳририятида
таҳрирдан ўтказилди (25.12.2014 йил)

Босишга рухсат этилди: 23.01.2015
Ҳажми: 4,5. Адади: 70. Буюртма: № 134
“Yadro fizikasi instituti” босмохонасида босилди.
100214, Тошкент ш., Улуғбек қўргони, ЯФИ.

