

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ, АСТРОНОМИЯ ИНСТИТУТИ,
ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.27.06.2017.FM/Т.33.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ

ТЎРАҚУЛОВ СОБИР АБДУМЎМИНОВИЧ

**КЛАСТЕР МОДЕЛИ ДОИРАСИДА ҚУЙИ ЭНЕРГИЯЛАРДА $d(\alpha, \gamma)^6\text{Li}$,
 $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$ ВА $^3\text{H}(\alpha, \gamma)^7\text{Li}$ РЕАКЦИЯЛАР АСТРОФИЗИК
S-ФАКТОРЛАРИ ВА ТЕЗЛИКЛАРИ**

01.04.08 – Атом ядроси ва элементар зарралар физикаси. Тезлаштирувчи техника

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2019

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси
автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по физико-
математическим наукам**

**Content of the dissertation abstract of the doctor of philosophy (PhD) on physical and
mathematical sciences**

Тўрақулов Собир Абдумўминович

Кластер модели доирасида қуйи энергияларда $d(\alpha, \gamma)^6\text{Li}$, $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$ ва $^3\text{H}(\alpha, \gamma)^7\text{Li}$ реакциялар астрофизик S-факторлари ва тезликлари 3

Туракулов Собир Абдумуминович

Астрофизические S-факторы и скорости реакций $d(\alpha, \gamma)^6\text{Li}$, $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$ и $^3\text{H}(\alpha, \gamma)^7\text{Li}$ при низких энергиях в рамках кластерной модели 23

Turakulov Sobir Abdumuminovich

Astrophysical S-factors and rates of the reactions $d(\alpha, \gamma)^6\text{Li}$, $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$ and $^3\text{H}(\alpha, \gamma)^7\text{Li}$ in the framework of cluster model at low energies 44

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works..... 52

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ, АСТРОНОМИЯ ИНСТИТУТИ,
ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.27.06.2017.FM/Т.33.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ

ТЎРАҚУЛОВ СОБИР АБДУМЎМИНОВИЧ

**КЛАСТЕР МОДЕЛИ ДОИРАСИДА ҚУЙИ ЭНЕРГИЯЛАРДА $d(\alpha,\gamma)^6\text{Li}$,
 $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ ВА $^3\text{H}(\alpha,\gamma)^7\text{Li}$ РЕАКЦИЯЛАР АСТРОФИЗИК
S-ФАКТОРЛАРИ ВА ТЕЗЛИКЛАРИ**

01.04.08 – Атом ядроси ва элементар зарралар физикаси. Тезлаштирувчи техника

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2019

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2018.2.PhD/FM254 рақами билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ядро физикаси институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифаси (www.inp.uz) ва «Ziynet» Ахборот-таълим порталида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Турсунов Эргаш Маҳкамович
физика-математика фанлари доктори

Расмий оппонентлар:

Миртаджиева Каромат Тахировна
физика-математика фанлари доктори, доцент

Олимов Хусниддин Қосимович
физика-математика фанлари доктори,
катта илмий ходим

Ётақчи ташкилот:

Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси
Физика-техника институти “Физика-Қуёш” илмий
ишлаб-чиқариш бирлашмаси

Диссертация химояси Ядро физикаси институти, Астрономия институти, Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2019 йил _____ соат _____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100174, Тошкент шаҳри, Улугбек қўрғони, Ядро физикаси институти. Тел. (+99871) 289-31-18; факс (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

Диссертация билан Ядро физикаси институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (_____ рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100214, Тошкент шаҳри, Улугбек қўрғони, ЯФИ. Тел. (+99871) 289-31-19).

Диссертация автореферати 2019 йил « ____ » _____ куни тарқатилди.
(2019 йил “ ____ ” _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси)

М. Ю. Ташметов
Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор

З. Каноков
Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.д., доцент

И. Нуриддинов
Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш ҳузуридаги илмий семинар раиси
ф.-м.ф.д., профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Ҳозирги вақтда $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$, $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ ва $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ радиацион қамраш реакцияларининг тажрибавий ва назарий тадқиқотлари стандарт Катта портлаш моделида космологик литий тарқалиши муаммосини ечишда ниҳоятда катта қизиқиш уйғотмоқда. Бу жараёнларни ўрганиш космология ва замонавий ядровий астрофизикада муҳим аҳамиятга эга, чунки улар Катта портлашдан кейинги бирламчи нуклеосинтезда ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ ядролари ҳосил бўлишининг асосий манбаларидир. Бундан ташқари, $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ реакцияси Қуёш қобиғи кинетикасини ўрганишда муҳимдир, модомики бу реакция Қуёшда водород ёниш pp – даврий реакциялари иккинчи ва учинчи занжирларининг бошланғич нуктаси ҳисобланади. Бошқа томондан, стандарт Қуёш моделида ${}^7\text{Be}$ ядроси нейтринолар ҳосил бўлиш жараёнларида асосий роль ўйнайди.

Бугунги кунда жаҳоннинг кўплаб тадқиқот марказларида $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$, $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ ва $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ жараёнларини ўрганиш учун қуйи астрофизик энергияларда юқори аниқликдаги ўлчашлар ўтказилмоқда. Бу реакциялар учун тўғридан-тўғри тажриба маълумотларини олиш тўқнашувчи зарядланган зарраларнинг Кулон баръери ҳисобига қийин масала ҳисобланади. Шунга қарамай, охириги йилларда Европа давлатлари ҳамкорлигидаги етакчи тажриба гуруҳлари LUNA, ERNA, ҳамда БЯТИ (Дубна, Россия) Ядро муаммолари лабораторияси бу учала муҳим жараёнлар бўйича тўғридан-тўғри тажрибалар ўтказишга эришдилар. Ушбу диссертация иши доирасида ўзаро таъсирлашиши NN -, αN -, αd -, $\alpha{}^3\text{H}$ -, $\alpha{}^3\text{He}$ -потенциалларига асосланган икки ва уч зарра моделлари ривожлантирилди. Икки зарра модели радиацион қамраш жараёнларини тавсифлашда ҳал қилувчи аҳамиятга эга бўлган тўғри асимптотикани таъминловчи юқори аниқликка эга Нумеров алгоритмига асосланган. Икки зарра моделида $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ жараёнида изоспин саралаш қондасига кўра таъқиқланган $E1$ -ўтишни ҳисобга олиш муаммоли. Шундай бўлса ҳам, илмий адабиётларда тажрибада ўлчанган аниқ массалардан фойдаланишга асосланган моделлар ишлатилади, аммо, бу моделлар изоспин ўтишларни очиқ-ойдин ҳисобга ололмайдди. Таклиф қилинаётган реалистик уч заррали модель гиперсферик гармониклардаги Лагранж-меш базисида ҳисобланган ${}^6\text{Li}$ ядросининг асосий ҳолатини ифодаловчи тўлқин функциясига асосланган. Бу модель замонавий ядровий астрофизиканинг муҳим жараёнларидан бири бўлган $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ радиацион қамраш реакциясини изоспин бўйича таъқиқланган $E1$ -ўтишини аниқ ҳисобга олган ҳолда тавсифлаш имконини бериши мумкин. Уч заррали модель доирасида ҳисоблаш услубларини ривожлантириш ядровий астрофизика жараёнларини ўрганишнинг сифат жихатидан янги босқичи ҳисобланади.

Мамлакатимизда бугунги кунда ядро физикасини ривожлантириш, хусусан, атом ядроси ва элементар заррачалар физикаси соҳасида тажрибавий ва назарий фундаментал тадқиқотларни жаҳон даражасида амалга оширишга катта эътибор қаратилмоқда. Мамлакатимиз илм-фан

ривожги ҳамда фундаментал тадқиқот натижаларини ҳаётга тадбиқ қилиш учун фундаментал тадқиқотларнинг муҳим йўналишлари Ўзбекистонни янада ривожлантириш бўйича 2017-2021 йиллардаги Ҳаракатлар стратегиясига¹ киритилган. Ушбу ишда олиб борилган тадқиқотлар, дунёда замонавий тадқиқотларнинг илғорларидан ҳисобланувчи ядровий астрофизика муаммолари, ҳамда бошқариладиган термоядро жараёнлари физикаси, жумладан ядро энергетикаси билан бевосита боғлиқ.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”ги, 2017 йил 16 февралдаги ПФ-4958-сонли “Олий ўқув юртидан кейинги таълим тизимини янада такомиллаштириш тўғрисида”ги Фармонлари, 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сонли “Фанлар академияси фаолиятини янада такомиллаштириш, илмий ишларни ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштириш бўйича чора тадбирлар тўғрисида”ги Қарорлари, ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялари ривожланишининг II. «Энергетика, энергия ва ресурс тежамкорлиги» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Ҳозирги вақтда жаҳоннинг етакчи олимлари, масалан, россиялик (L.D. Blokhintsev, G.G. Ryzhikh ва бошқалар), америкалик (A.M. Mukhamedzhanov, C. Bertulani, K.M. Nollet), белгиялик (P. Descouvemont, D. Baye), япониялик (T. Kajino ва бошқалар), қозоғистонлик (С.Б. Дубовиченко, Н.А. Буркова) ва бошқалар томонидан радиацион камраш реакциялари бўйича назарий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Бугунги кунда замонавий тажриба техникаларининг ривожланганлиги туфайли $\alpha + d \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$, $\alpha + {}^3\text{H} \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$ ва $\alpha + {}^3\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$ радиацион камраш реакцияларининг астрофизик S-факторини қуйи энергияларда тўғридан-тўғри ўлчашга эришилмоқда. Юқорида кўрсатилган учта жараёнлар бўйича ҳамкорликдаги тажриба гуруҳлари LUNA, ERNA, ҳамда БЯТИ (Дубна, Россия) Ядро муаммолари лабораторияларининг яқинда олган тажриба маълумотлари, янги маълумотларни ва енгил ядроларнинг ҳосил бўлиш механизмларини тушунтириб бера олувчи реалистик назарий моделларни ривожлантиришни талаб қилади.

Ушбу жараёнлар жаҳоннинг етакчи олимлари (A.M. Mukhamedzhanov, L.D. Blokhintsev, P. Descouvemont, C. Bertulani, T. Kajino, С.Б. Дубовиченко ва бошқалар) томонидан макроскопик моделлар асосида, ҳамда (T. Neff, K.M. Nollet, J.D. Erally, P. Navratil ва бошқалар) томонидан микроскопик яқинлашишлар доирасида ўрганилган. Ҳозирча биринчи жараён бўйича тўлиқ микроскопик ҳисоблашлар мавжуд эмас, мос равишда ${}^7\text{Be}$, ${}^7\text{Li}$ синтез

¹ 2017 йил 07 февральдаги ПФ-4947-сонли “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида” Ўзбекистон Республикаси Президентининг Фармони

жараёнларини тавсифлашда бир неча микроскопик (NCSMC, FMD) моделлар мавжуд, аммо, улар энергетик боғланишларни турли ҳил беради. Яна ушбу ҳисоблашларнинг қўлланиладиган NN-потенциаллар танловига сезгирлиги юқори. Қайси реалистик икки ва уч зарра моделлари LUNA ҳамкорлигидаги олинган тажриба маълумотларини тушунтириб бера олиши ҳақидаги савол ҳанузгача очик қолмоқда.

Шунингдек, бу муаммоларни ўзбек олимлари Р. Ярмухамедов, Б.Ф. Иргазиев ва бошқалар ўз ишларида, тўлқинлар бузилиши методи ва модификацияланган икки зарра потенциал модели доирасида тадқиқ қилганлар. Хусусан, юқорида кўрсатилган методларни ишлатган ҳолда $\alpha + {}^3\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$ ва $\alpha + {}^3\text{H} \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$ реакцияларининг тўғридан-тўғри ўлчанган тажриба маълумотлари таҳлилидан асимптотик нормировка доимийлари (АНД) ажратиб олинган ва тажрибада олиш мумкин бўлмаган ўта қуйи энергияларда назарий баҳолар олиш учун экстраполяция қилинган. Ушбу ишларда $\alpha + d \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$ жараёни икки зарра потенциал модели доирасида тадқиқ қилинган, бу ерда изоспин саралаш қоида-сига кўра таъқиқланган электр $E1$ -ўтишни ҳисобга олиш учун тўқнашувчи зарраларнинг тажрибада ўлчанган аниқ массаларидан фойдаланилади. Бу жараёнда изоспин ўтишни аниқ ҳисобга олиш учун кичик миқдорда (тахминан 0.5 %) изотриплет компонентага эга бўлган ${}^6\text{Li}$ ядросининг асосий ҳолатини ифодаловчи реалистик тўлқин функцияга асосланган уч заррали моделларни ривожлантириш мумкин. Бу кичик миқдор LUNA ҳамкорлигида олинган янги тажриба маълумотларини тавсифлаш имкониятини бериши мумкин.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ядро физикаси институти илмий-тадқиқотлар режасининг Ф2-ФА-Ф117 «Ядровий астрофизикада ядро фундаментал хусусиятларининг динамик хоссалари устида тадқиқотлар» (2012-2016) ва ОТ-Ф2-25 «Ядровий астрофизика ва адрон терапияси масалаларини ечиш учун юқори аниқликдаги уч-жисм методларини ривожлантириш» (2017-2020) илмий лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади қуйи энергияларда кечадиган $\alpha + d \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$, $\alpha + {}^3\text{H} \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$ ва $\alpha + {}^3\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$ астрофизик жараёнларда енгил ядроларнинг ҳосил бўлиши механизмларини аниқлаштириш ва реалистик кластер модели доирасида астрофизик S-факторлари, реакция тезликлари ва ${}^{6,7}\text{Li}$ нуклидларнинг бирламчи тарқалишини баҳолашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

ядровий астрофизика жараёнларида астрофизик S-факторларини (кесим) ва реакция тезликларини ҳисоблаш учун юқори аниқликдаги Нумеров алгоритмига асосланган икки заррали потенциал моделини ривожлантириш;

икки зарра моделида электр $E1$, $E2$ -ўтишлар ва магнит $M1$ -ўтишлар учун келтирилган эҳтимолликларнинг ошкор аналитик ифодаларини олиш, тўлиқ астрофизик S-фактори учун парциаль ҳиссаларни аниқлаш ва сонли ҳисоблашлар бажариш;

бирламчи нуклеосинтезда ${}^7\text{Li}$ ядроси ҳосил бўлиши учун $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ ва $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ радиацион қамраш реакциялари тезликларининг ҳиссасини баҳолаш;

икки зарра моделида $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ радиацион қамраш реакцияси $E2$ астрофизик S -факторини ҳисоблаш;

астрофизик S -факторларини (кесим) ва радиацион қамраш реакция тезликларини баҳолаш учун гиперсферик гармониклардаги Лагранж-меш базисига асосланган уч заррали потенциал моделини ривожлантириш;

уч зарра моделида электрик $E1$, $E2$ -ўтишлар учун матрица элементларининг ошкора ҳолдаги аналитик ифодаларини олиш, ривожлантирилаётган моделда электрик ўтишлар парциаль ҳиссалари учун сонли ҳисоблашлар бажариш;

уч зарра моделида $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ радиацион қамраш реакцияси тезлиги ва бирламчи нуклеосинтезда ${}^6\text{Li}$ элементи тарқалишини баҳолаш;

Тадқиқотнинг объекти сифатида ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ ва ${}^7\text{Be}$ енгил ядроларининг ҳосил бўлишида радиацион қамраш жараёнларининг астрофизик S -факторлари ва реакция тезликлари, ${}^6\text{Li}$ ва ${}^7\text{Li}$ енгил элементларнинг Катта портлашдан кейинги бирламчи нуклеосинтезда тарқалиши олинган.

Тадқиқотнинг предмети енгил ядроларнинг ядровий астрофизик реакция синтези, электромагнетик ўтишлар; енгил ядролар икки ва уч зарра структуралари, икки заррали NN -, αN -, αd -, $\alpha{}^3\text{H}$ -, $\alpha{}^3\text{He}$ - ўзаро таъсирлашиш потенциаллари деб ҳисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари. Назарий ядро физикаси ва тўғридан-тўғри ядро реакциялар назарияси усуллари, Шредингер тенгламаси ечиш учун Нумеров алгоритмига асосланган юқори аниқликдаги усуллар, уч зарра масаласини ечиш учун гиперсферик гармониклардаги Лагранж-меш усули, квант бурчак моменти назарияси аналитик усуллари, юқори аниқликка эга бўлган сонли усуллар.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

қуйи энергияларда $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ ва $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ радиацион қамраш реакциялари астрофизик S -фактори учун LUNA ҳамкорлигида олинган янги тажриба маълумотларини икки зарра моделида тавсифлаш мумкинлиги ва ${}^7\text{Be}$ ва ${}^7\text{Li}$ енгил ядролар синтез жараёнларида асосий ҳисса берувчи $E1$ -ўтиш матрица элементларининг $\alpha+{}^3\text{He}$ ва $\alpha+{}^3\text{H}$ S тўлқин потенциалларига ўта сезгирлиги кўрсатилган;

икки зарра моделида асимптотик нормировка доимийларини ҳисобга олувчи модификация қилинган потенциал асосида олинган $\alpha+d$ боғланган ва сочилиш ҳолатлари реалистик тўлқин функциялари $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ радиацион қамраш реакциясининг $E2$ астрофизик S -фактори ҳисоблаш натижаларини кўшимча асимптотикага улашларсиз яхши яқинлашишини таъминлаши кўрсатилган;

илк бор уч зарра потенциал модели доирасида қуйи энергияларда $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ астрофизик синтез реакциясини тавсифлаш учун ${}^6\text{Li}$ ядросининг асосий ҳолати тўлқин функциясининг тахминан 0.5% кичик миқдордаги изотриплет компонентаси ҳисобига изоспин бўйича таъқиқланган электр $E1$ -

ўтиши ҳиссаси муҳимлиги кўрсатилган;

$\alpha + d \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$ жараён астрофизик S-фактори ва реакция тезлиги учун LUNA ҳамкорлигида олинган тўғридан-тўғри тажриба маълумотларини яхши тавсифловчи ва Катта портлашдан кейинги ${}^6\text{Li}$ элементининг бирламчи тарқалиши учун LUNA маълумоти билан яхши мос келувчи ${}^6\text{Li}/\text{H} = (0.67 \pm 0.01) \times 10^{-14}$ назарий баҳо, ҳамда Катта портлаш стандарт модели натижаларига тўлиқ мос келувчи ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = (1.33 \pm 0.03) \times 10^{-5}$ назарий баҳо олинган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

икки зарра моделида $\alpha + {}^3\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$ ва $\alpha + {}^3\text{H} \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$ радиацион қамраш реакциялари тўлиқ астрофизик S-фактори учун электрик $E1$, $E2$ -ўтишлар ва магнит $M1$ -ўтишларнинг парциал тўлқин ҳиссалари ҳисобланган;

$\alpha + {}^3\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$ ва $\alpha + {}^3\text{H} \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$ радиацион қамрашларининг ҳисобланган реакция тезликлари асосида Катта портлашдан кейинги ${}^7\text{Li}$ элементининг бирламчи тарқалиши учун назарий баҳо ${}^7\text{Li}/\text{H} = (5.08 \pm 0.13) \times 10^{-10}$ олинган;

$\alpha + d \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$ жараён учун уч зарра модели доирасида изоспин $E1$ -ўтишни тўғри тавсифловчи гиперсферик гармониклар Лагранж-меш базисига асосланган назарий услуб ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги олинган натижаларни батафсил солиштирилганда тажриба натижалари ва бошқа муаллифлар натижалари билан мувофиқлиги, назарий ядровий астрофизика асослари ҳулосаларига мослиги, назарий физика ва квант механикаси усуллари, ҳамда юқори эффективли алгоритм ва сонли усулларнинг қўлланилишига асосланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Натижаларнинг илмий аҳамияти шундан иборатки, $\alpha + d \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$ радиацион қамраш жараёнини кичик миқдорда тахминан 0.5% изотриплет компонентага эга бўлган ${}^6\text{Li}$ ядросининг асосий ҳолатини уч заррали $\alpha + n + p$ тизим тўлқин функциясига асосланган реалистик модель доирасида ўрганишдир.

Натижаларнинг амалий аҳамияти шундан иборатки, уч зарра модель доирасида ҳисоблаш услубларини ривожлантириш ядровий астрофизика жараёнларини ўрганишнинг сифат жиҳатидан янги босқичи ҳисобланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Кластер модели доирасида қуйи энергияларда $d(\alpha, \gamma){}^6\text{Li}$, ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ ва ${}^3\text{H}(\alpha, \gamma){}^7\text{Li}$ реакциялар астрофизик S-факторлари ва тезликлари бўйича олинган натижалар асосида:

$\alpha + {}^3\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$ ва $\alpha + {}^3\text{H} \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$ радиацион қамраш реакциялари учун олинган астрофизик S-фактор натижалари етакчи хорижий илмий журналларда (Physical Review C, 99, 054618, 2019; International Journal of Modern Physics E, 42, 1930004, 2019; Indian Journal of Physics, 93, 279, 2019; Journal of Physics: Conference Series, 1154, 012013, 2019) фойдаланилган. Илмий натижаларининг қўлланилиши янги назарий усулларни ишлаб чиқиш имконини берган;

таклиф қилинган асимптотик нормировка доимийларини ҳисобга олган ҳолда модификацияланган αd -потенциали хорижлик олимлар томонидан

(Physical Review C, 96, 045807, 2017; Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 45, 085102, 2018; European Physical Journal Web of Conferences, 199, 05016, 2019) $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ радиацион қамраш реакциясини ўрганишда фойдаланилган. Илмий натижаларининг қўлланилиши астрофизик S-фактори, реакция тезлиги, ҳамда ${}^6\text{Li}$ элементининг бирламчи тарқалиши ${}^6\text{Li}/\text{H}=1.1\cdot 10^{-14}$ ни назарий баҳолаш имконини берган;

уч зарра модели доирасида $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ радиацион қамраш реакцияси учун олинган натижалар хорижлик олимлар томонидан (Physical Review C, 95, 044618, 2017; Physical Review C, 96, 045807, 2017; Physics of Atomic Nuclei, 81, 899, 2018) тўғридан-тўғри ядро қамраш жараёнларини ўрганишда фойдаланилган. Илмий натижаларининг қўлланилиши янги истиқболли босқичнинг бошланиши сифатида тан олинган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 7 та халқаро ва маҳаллий илмий-амалий анжуманларда муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 12 та илмий иш нашр қилинган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этишга тавсия этилган илмий нашрларда 5 та мақола, 4 таси хорижий журналларда.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловадан иборат. Диссертациянинг умумий ҳажми 109 бетни ташкил этади.

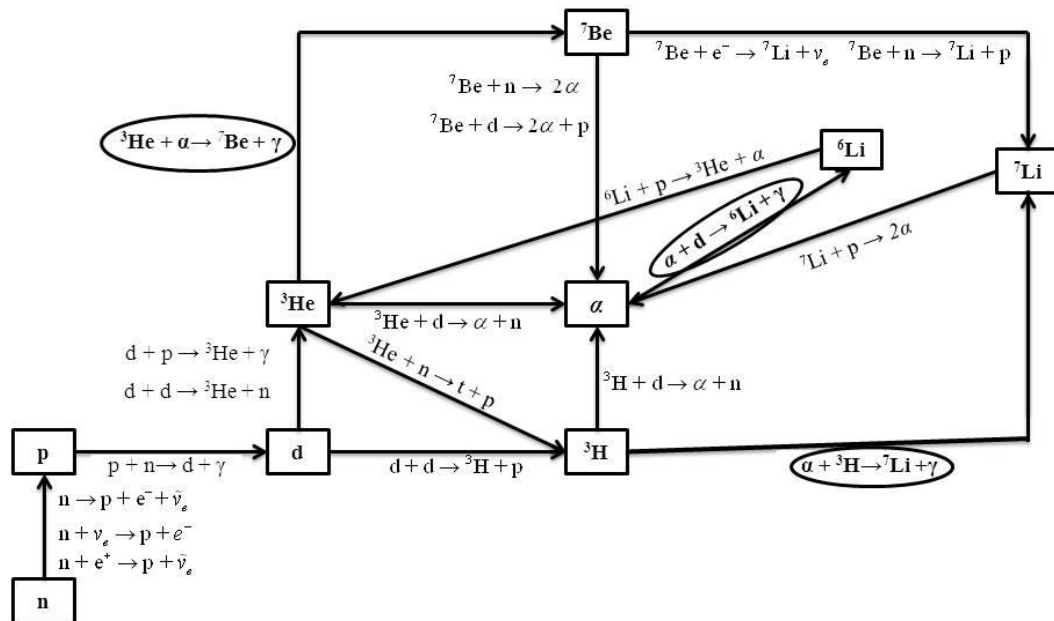
ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида мавзунинг долзарблиги ва зарурияти асосланган, мақсад ва вазифалари келтирилган, тадқиқот объекти, предмети ва усуллари кўрсатилган, тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларга боғлиқлиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги, олинган натижаларнинг ишончлилиги асосланган, илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган ҳамда нашр қилинган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича қисқача маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «**Борлиқда енгил элементларнинг тарқалиши ва литий муаммоси**» деб номланган биринчи бобида Катта портлашдан кейинги бирламчи нуклеосинтез жараёнида нуклидларнинг ҳосил бўлиши ва улар тарқалиши асосий тушунчаларининг қисқача таҳлили келтирилган. BBN назариясининг замонавий тасаввурига кўра d , ${}^3\text{He}$ ва ${}^{6,7}\text{Li}$ енгил элементлари биринчи уч дақиқа давомида бирламчи нуклеосинтез жараёнида ҳосил бўлади. Ҳозирги вақтда ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ изотопларининг тарқалиши муаммоси тадқиқоти замонавий ядровий астрофизика ва космологиянинг энг долзарб мавзуларидан бири эканлиги кўрсатилди. Ушбу ишда стандарт космологик Катта портлаш моделида бошланғич (примордиал) элементларининг тарқалишини баҳолаш учун қўлланиладиган BBN моделининг асосий параметрлари келтирилди. Литийгача бўлган астрономик кузатилиши

мумкин бўлган енгил элементларининг бошланғич тарқалишини башорат қилиш BBN моделининг асосларидан бири ҳисобланади. Бу модель d , ${}^3\text{He}$ енгил элементларининг бошланғич тарқалишини тўғри башорат қилади, бироқ литий изотоплари учун вазият умуман бошқача.

Сўнгги йилларда литий билан боғлиқ муаммоларни космология, кузатувчи астрономия ва ядровий астрофизика соҳасидаги мутахассислар тажрибавий ва назарий натижалар асосида фаол муҳокама қилишмоқда. Катта портлашдан кейинги бирламчи нуклеосинтезда литий изотопларининг тарқалиши бўйича иккита муаммо мавжуд.



1-расм. Бирламчи нуклеосинтезидаги ядро реакциялари

1-чи литий муаммоси шундан иборатки, сўнгги адабиётлар маълумотларига кўра астрономик кузатилган ${}^7\text{Li}$ нуклидлари миқдори BBN модель башорат қилганидан кўра тахминан 3-4 марта кам.

2-чи литий муаммоси икки литий изотоплари миқдорларининг муносабатига тегишли. BBN модели назарияси баҳоси ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} \sim 10^{-4}$, астрономик кузатувлар қиймати эса ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} \sim 5 \times 10^{-2}$.

Бу муаммоларни ечиш учун ҳозирги вақтда ядровий астрофизикада қуйи энергияларда асосан қуйидаги радиацион қамраш реакциялари ўрганилади: $d(\alpha, \gamma){}^6\text{Li}$, ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ ва ${}^3\text{H}(\alpha, \gamma){}^7\text{Li}$. Модомики, улар Катта портлаш модели бирламчи нуклеосинтезида ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ ядролари ҳосил бўлишининг асосий манбалари ҳисобланади (1-расм). Тажрибавий ишлар мақсади қуйи энергияларда прецизион ўлчашларга қаратилган бўлса, назарий моделлар мақсади эса қаралаётган реакцияларнинг тезликларини тўғри ҳисоблашдир. Қайд қилиш керакки, литий муаммосининг ечимида $d(\alpha, \gamma){}^6\text{Li}$, ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ ва ${}^3\text{H}(\alpha, \gamma){}^7\text{Li}$ радиацион қамраш ядро реакцияси тезликларининг астрофизик энергияларида реалистик ҳисоблашларини ўтказиш ўта муҳим.

Диссертациянинг «Икки зарра моделида ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ ва ${}^3\text{H}(\alpha, \gamma){}^7\text{Li}$ радиацион қамраш реакцияси» деб номланган иккинчи боби қуйи

энергияларда икки кўзгу радиацион қамраш $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ ва $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ жараёнларининг астрофизик S-фактори ва реакция тезликларининг назарий тадқиқотига бағишланган.

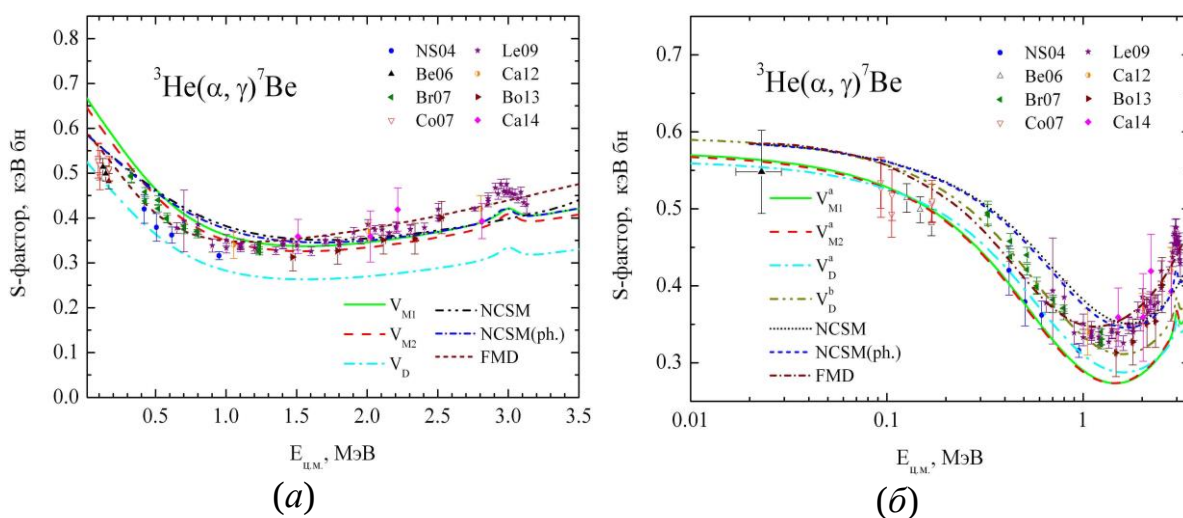
Ушбу бобда $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ ва $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ радиацион қамраш реакцияларининг астрофизик S-факторини ҳисоблашда икки зарра потенциал кластер моделини ишлатамиз. Модель қаралаётган ядро икки зарра структурасига эга деган фаразга асосланиб қурилади. Бу фаразлар кўпгина енгил ядроларнинг нуклонлар ассоциациялари (кластерлар) ҳосил қилиш юқори эҳтимолига эга деган кўп сонли тажрибавий маълумотлар далилларига асосланади.

Аслида зарядланган зарралар иштирокидаги ихтиёрий радиацион қамраш реакциясининг тажрибавий ва назарий тадқиқотларида жараённинг кесими баҳоланади. Аммо, кесимнинг қиймати энергия камайиши билан экспоненциал тез тушиб кетади ва қуйи астрофизик энергияларда кичкина бўлиб қолади, яъни бундай энергия соҳасида шундай катталиқ билан ишлаш ноқулай. Шу сабабли астрофизик S-фактор деб аталадиган, кесим билан қуйидаги муносабат билан боғланган қулайроқ катталиқ қабул қилинган (Angulo *et al.*, NPA656, 3 (1999)):

$$S(E) = \sigma(E)E \exp(2\pi\eta) \quad (1)$$

бу ерда $\sigma(E) = A(a, \gamma) V$ радиацион қамраш реакциясининг тўлиқ кесими, $\eta = Z_b Z_c e^2 \mu_{bc} / k_{bc} - a = b + c$ системаси боғланган ҳолати учун Кулон параметри.

2 расмда $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ радиацион қамраш реакциясининг астрофизик S-фактори натижалари янги тажриба маълумотлари билан таққосланган ҳолда келтирилган. 2 расмдаги астрофизик S-факторлари икки хил усулда ҳисобланган: (а) V_{M1} , V_{M2} , V_D потенциаллари билан, ва (б) V_{M1}^a , V_{M2}^a , V_D^a , V_D^b потенциаллари билан.



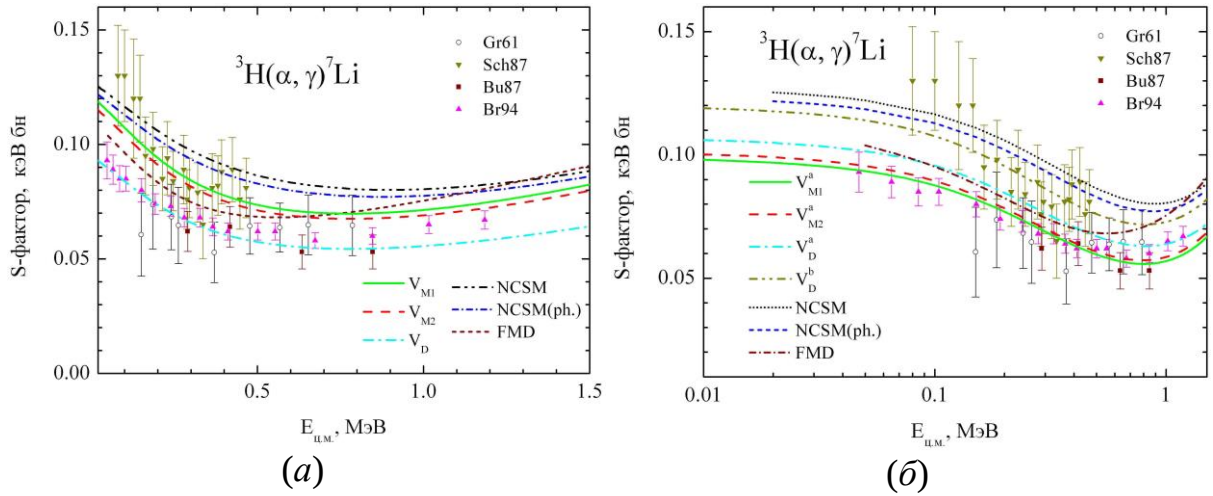
2-расм. $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ синтез жараёнининг астрофизик S-фактори тажриба маълумотлари билан таққосланган ҳолда, (а) V_{M1} , V_{M2} ва V_D потенциаллари билан ҳисобланган, (б) V_{M1}^a , V_{M2}^a , V_D^a ва V_D^b потенциаллари билан ҳисобланган

Жараёни ўрганиш учун биз аввало бошланғич потенциал сифатида Дубовиченко V_D , сўнг V_{M1} , V_{M2} модификацияланган потенциаллардан (2 (а) - расм) фойдаланамиз. Ушбу потенциаллар P -тўлқинлардаги параметрлари билан фаркланади ва ҳар ҳил АНД қийматларини беради. Асимптотик нормировка доимийси $d(\alpha, \gamma)^6\text{Li}$, ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$, ${}^3\text{H}(\alpha, \gamma)^7\text{Li}$ ва ${}^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B}$ каби ядровий астрофизик жараёнларда, айниқса қуйи энергияларда муҳим роль ўйнайди. Реалистик икки заррали потенциал куриш учун параметрларни нафақат боғланиш энергияси ва тажрибавий фаза сочилишларига, балки қўшимча равишда АНДнинг эмпирик қийматларига мослаштириш керак. Шу асосда $\alpha+{}^3\text{He}$ -система учун фазавий-эквивалент потенциаллари орасидан боғланиш энергияси ва тажрибавий фаза сочилишларини сақлаган ҳолда АНДни тўғри тавсифлайдиган модификацияланган V_{M1} , V_{M2} потенциалларини курамиз.

2(а)-расмдан кўриниб турибдики, модификацияланган V_{M1} ва V_{M2} потенциал моделлари ўрта ва қуйи энергияларда тажриба билан яхши мос келмоқда. Бироқ, ушбу потенциаллар ўта қуйи энергиялардаги LUNA ҳамкорлигининг янги тажриба маълумотларини турли энергетик боғланиш туфайли юқоридан баҳолайди. V_D модели эса астрофизик S -фактори тажриба маълумотлари учун жуда кам деб баҳоланмоқда. Сонли ҳисоблашларнинг таҳлили асосида $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ синтез жараёнида $S\rightarrow P_{3/2}$ ва $S\rightarrow P_{1/2}$ $E1$ -ўтишлар асосий роль ўйнаши аниқланди. Шунинг учун, V_{M1} , V_{M2} ва V_D потенциалларининг S тўлқин параметрларини модификациялаш (чуқурлиги ва кенглигини) ва S -фактор тажриба маълумотларига мослаштириш мумкин. Натижавий V_{M1}^a , V_{M2}^a , V_D^a ва V_D^b (2 (б) расм) потенциаллари LUNA ҳамкорлиги тажриба қийматларини ва Куёшнинг Гамов максимумида олинган S_{34} (23 ± 6 кэВ) = 0.548 ± 0.054 кэВ бн янги маълумотларни тавсифлайди. Таққослаш учун 2(а) ва 2 (б) расмларда реалистик микроскопик моделлар NCSM (J.D. Eraly *et al.*, Phys. Lett. B757, 430 (2016)) ва FMD (T. Neff Phys. Rev. Lett. 106, 042502 (2011)) натижалари ҳам келтирилган. Умуман олганда ушбу ҳисоблашлар натижалари тажриба маълумотлари билан яхши мос келади. Бироқ, ушбу моделлар иккала камраш жараёнлари учун турли ҳил энергетик боғланишлар беради.

Шундан сўнг, ${}^7\text{Be}\rightarrow\alpha+{}^3\text{He}$ ядроси учун топилган бошланғич V_D ва V_{M1} , V_{M2} потенциаллари, Кулон қисмини мослаб ўзгартирилгандан сўнг кўзгу камраш $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ жараёнини тавсифлашга қўлланилди. Ушбу потенциаллар ${}^7\text{Li}$ ядросининг боғланиш ҳолатлари $E(3/2^-) = -2.46$ МэВ ва $E(1/2^-) = -1.99$ МэВ энергияларини, ҳамда S , P , D , F - тўлқинлардаги фаза силжишларини яхши тавсифлаши аниқланди. $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ синтез реакцияси астрофизик S -фактори шу потенциаллар параметрлари билан баҳоланди. 3 (а) ва (б) расмлардан кўриниб турибдики, назарий баҳолар тажриба маълумотлари билан етарли даражада мос келмоқда. Бироқ, шуни қайд қилиш керакки, тажриба маълумотлари анча эски, шунинг учун янги ўлчашлар зарур.

Иккала кўзгу жараёнлари учун олинган астрофизик S-факторлари асосида $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ ва $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ радиацион қамрашнинг реакциялар тезликлари юлдузлар температураси соҳаларида ($10^6\text{ K}\leq T\leq 10^9\text{ K}$) ҳисобланди.



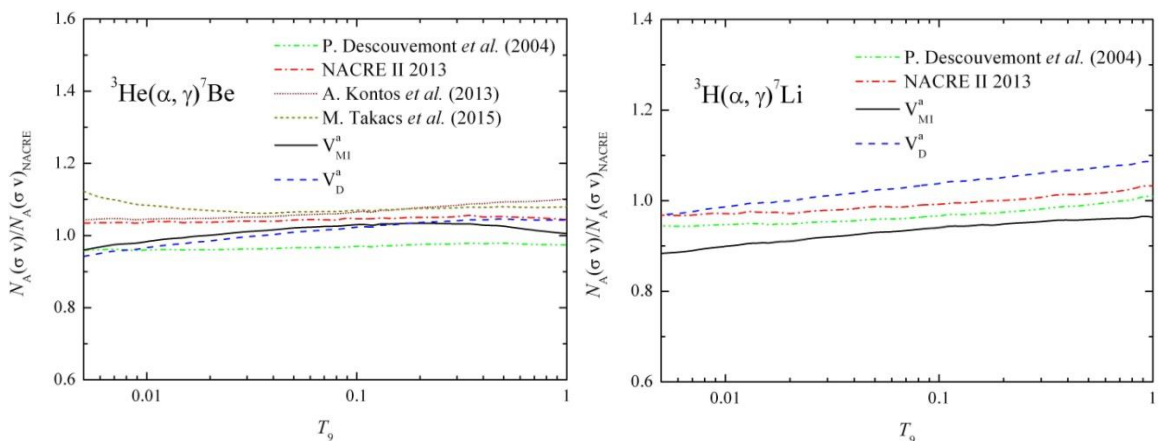
3-расм. $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ синтез жараёнининг астрофизик S-фактори тажриба маълумотлари билан таққосланган ҳолда, (a) V_{M1} , V_{M2} ва V_D потенциаллари билан ҳисобланган, (б) V_{M1}^a , V_{M2}^a , V_D^a ва V_D^b потенциаллари билан ҳисобланган

Синтез реакциясининг тезлиги қуйидаги формула асосида баҳоланади (Angulo *et al.*, NPA656, 3 (1999)):

$$N_{34}(\sigma v) = 3.7313 \times 10^{10} A^{-1/2} T_9^{-3/2} \int_0^\infty \sigma(E) E \exp(-11.605E / T_9) dE \quad (2)$$

бу ерда $A=A_1 \cdot A_2 / (A_1 + A_2)$ – кластерларнинг келтирилган масса сонлари, $T_9 - 10^9\text{ K}$ бирликда ўлчанувчи температура.

4-расмда $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ ва $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ синтезларининг реакция тезликлари V_{M1}^a ва V_D^a моделлар доирасида ҳисобланган ва NACRE 1999 тажриба маълумотларига бўлинган (нормаллаштирилган), ҳамда бошқа назарий моделлар билан таққосланган ҳолда кўрсатилган.



**4-расм. NACRE 1999 тажриба маълумотларига
нормаллаштирилган $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ ва $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ жараёнлари
учун нисбий реакция тезликлари**

Расмлардан кўриниб турибдики таклиф қилинаётган моделлар доирасидаги натижалар бошқа моделлар ҳисоблашлари билан яхши мос келмоқда.

Икки зарра потенциал модели доирасида $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ реакция тезлиги учун олинган натижаларни қўллаган ҳолда PARTHENOPE дастурлар пакети ёрдамида ${}^7\text{Li}/\text{H}$ изотопининг Катта портлашдан кейинги бирламчи тарқалиши $V_D^a {}^7\text{Li}/\text{H}=(4.92 \pm 0.13)\times 10^{-10}$ ва $V_{M1}^a {}^7\text{Li}/\text{H}=(4.81 \pm 0.12)\times 10^{-10}$ потенциаллари билан баҳоланди.

Шундан сўнг, $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ реакция тезлиги ҳисоби натижаларини термоядро жараёнлар занжирига қўйиш билан V_D^a ва V_{M1}^a потенциаллар учун мос равишда қуйидаги баҳоларни оламиз ${}^7\text{Li}/\text{H}=(5.08\pm 0.13)\times 10^{-10}$ ва ${}^7\text{Li}/\text{H}=(5.06\pm 0.13)\times 10^{-10}$. Катта портлаш нуклеосинтез дастури ёрдамида элементлар тарқалиш миқдорини ҳисоблашда киритиш параметри сифатида ишлатилган барион зичлиги $\Omega_b h^2 = 0.02229^{+0.00029}_{-0.00027}$ қиймати Планк ҳамкорлигининг 2016 йилдаги охириги маълумотларига асосланган. Нейтроннинг яшаш вақти $\tau_n = 880.3\pm 1.1$ секунд Particle Data Group 2014 ҳамкорлиги ишидан олинди.

${}^7\text{Li}/\text{H}$ изотопи тарқалиши учун олинган натижалар ${}^7\text{Li}/\text{H}=(5.08\pm 0.13)\times 10^{-10}$ мос равишда M. P. Takács *et al.*, Phys. Rev. D91, 123526 (2015) ва A. Coc *et al.*, Phys. Rev. D92, 123526 (2015) назарий ишларида келтирилган ${}^7\text{Li}/\text{H}=(5.0\pm 0.3)\times 10^{-10}$ ва ${}^7\text{Li}/\text{H}=(5.61\pm 0.26)\times 10^{-10}$ натижалар билан яхши мос келмоқда.

«Икки зарра моделида $d(\alpha,\gamma){}^6\text{Li}$ радиацион қамраш реакциясининг $E2$ S-факторини баҳолаш» деб номланган учинчи бобда икки заррали потенциал кластер модели доирасида тўғридан-тўғри $d(\alpha,\gamma){}^6\text{Li}$ ядро қамраш жараёни учун ҳисоблаш натижалари келтирилган. Яхши маълумки, ${}^6\text{Li}$ ядроси Катта портлаш натижасида



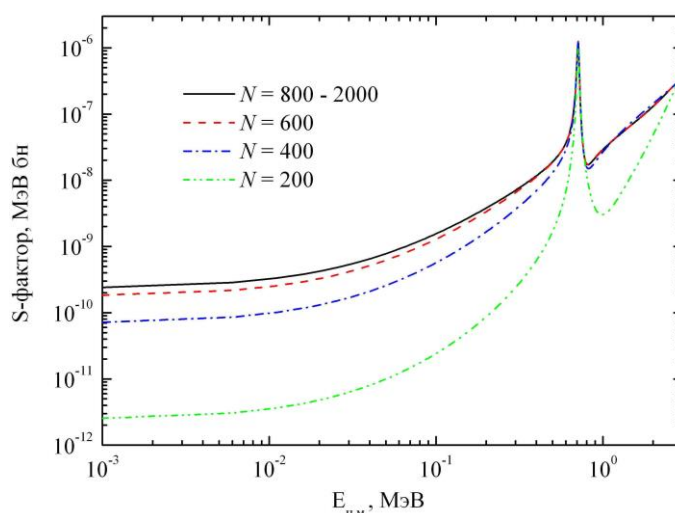
қамраш реакциясига асосан қуйи астрофизик $50\leq E\leq 400$ кэВ энергияларда ҳосил бўлган. Қайд этиш керакки, икки зарра моделида таъқиқланган $E1$ -ўтишнинг ҳиссасини тўғридан-тўғри йўл билан ҳисоблаб бўлмайди, чунки бошланғич ва охириги ҳолатлар изоспинлари ноль ва шунинг учун $\Delta T=0$. Бу муаммо нафақат αd -қамраш учун, балки $N=Z$ ядролар иштирокидаги, қайсики ҳамма заррачаларнинг изоспинлари нолга тенг бўлган $d(d,\gamma){}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}(\alpha,\gamma){}^{16}\text{O}$, ${}^{16}\text{O}(\alpha,\gamma){}^{20}\text{Ne}$, ${}^{12}\text{C}({}^{12}\text{C},\gamma){}^{24}\text{Mg}$ ва бошқа реакциялар учун ҳам мавжуд.

Шундай бўлса ҳам, илмий адабиётларда альфа заррача ва дейтроннинг тажрибада ўлчанган массаларидан фойдаланувчи «аниқ массалар рецепти» деб номланадиган услуб қўлланилади. Ушбу усул изоспин формализмига асосланмаган, шунинг учун жараённи тўлиқ тавсифлашга даъвогарлик қила олмайди. Шунга қарамай, ушбу усул кўп вақтлар давомида ўрганилаётган

$d(\alpha, \gamma)^6\text{Li}$ жараёнини тавсифлаш учун қўлланилиб келинмоқда. Энди саволни бошқача қўйсак: агар изоспин формализмида ишласак натижа қандай бўлади? Бу саволга жавоб топиш учун бу бобда икки зарра моделида $d(\alpha, \gamma)^6\text{Li}$ радиацион қамраш реакциясининг фақат $E2$ S -факторини баҳолаймиз, $E1$ S -фактори эса уч жисм модели доирасида кейинги бобда ҳисобланади.

$M1$ -ўтишга келадиган бўлсак, унинг ҳиссаси, умуман олганда, $\alpha + d \rightarrow ^6\text{Li} + \gamma$ қамраш реакцияси учун 3S_1 тўлқинда боғланган ва сочилиш ҳолатлари тўлқин функцияларининг ортогоналлигига кўра нолга тенг.

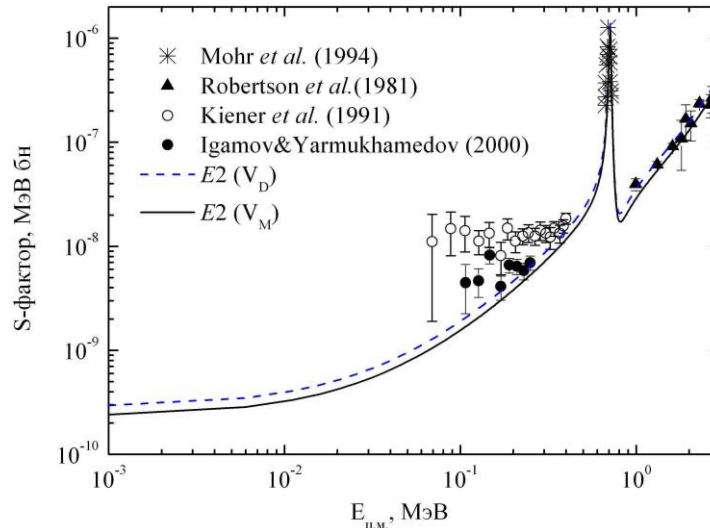
Бу бобда $\alpha + d \rightarrow ^6\text{Li} + \gamma$ жараёни S -факторига электрик квадруполь ўтишнинг ҳиссаси 3S_1 , 3P_0 , 3P_1 , 3P_2 , 3D_1 , 3D_2 , 3D_3 -парциал тўлқинларда фаза силжишларини, ҳамда S тўлқинда боғланган ҳолат энергияси ва АНДни тўғри тавсифловчи оддий Гаусс кўринишидаги αd -потенциал билан ҳисобланди. Бунда биз С.Б. Дубовиченко (PHAN73, 1526 (2010)) ишидан олинган αd -потенциалига асосланамиз, лекин тўлқин функцияларини ҳисоблаш учун $O(h^6)$ даражадаги аниқликка эга бўлган Нумеров алгоритмини қўллаймиз.



5-расм. $d(\alpha, \gamma)^6\text{Li}$ реакцияси S -факторига V_M потенциали билан ҳисобланган $E2$ ўтиш ҳиссасининг N тугун нуқталарининг турли ҳил сон қийматларида яқинлашиши

Бундай юқори аниқлик ҳар бир парциал тўлқинда маълум асимптотика билан жуда яхши мос келувчи тўлқин функцияларини олиш имконини беради. Қуйида биз ядронинг боғланиш энергиясини тўғри тикловчи ва фаза силжишларини эски тажриба маълумотларидан кўра янгилари билан яхшироқ мос келувчи, ҳамда АНДни тўғри тавсифловчи S тўлқин потенциалини модификация қилиш мумкинлигини кўрсатамиз. 5-расмда $d(\alpha, \gamma)^6\text{Li}$ реакцияси S -фактори учун V_M потенциали билан ҳисобланган $E2$ ўтишлар ҳиссалари назарий натижаларнинг яқинлашишини яққол намоиши учун кенг энергия оралиғида тугун нуқталарининг турли ҳил сон қийматларида $N = 200, 400, 600, 800-2000$ кўрсатилган. Интеграллаш қадами $h=0.05$ фм олингани туфайли интеграл чегаралари мос равишда 10, 20, 30, 40-100 фмларга тенг. Расмдан кўриниб турибдики, тўлиқ яқинлашишга эришиш

учун интеграл чегарасини 40 фмдан кам олмаслик зарур. 6-расмда $\alpha+d \rightarrow {}^6\text{Li}+\gamma$ синтез реакциясининг V_D ва V_M потенциаллари билан ҳисобланган астрофизик S-фактори учун $E2$ ўтиш ҳиссаси тажриба маълумотлари билан таққосланган ҳолда кўрсатилган.



6-расм. $\alpha+d \rightarrow {}^6\text{Li}+\gamma$ синтез реакциясининг V_D ва V_M потенциаллари билан ҳисобланган тажриба маълумотлари билан таққосланган $E2$ астрофизик S-фактори

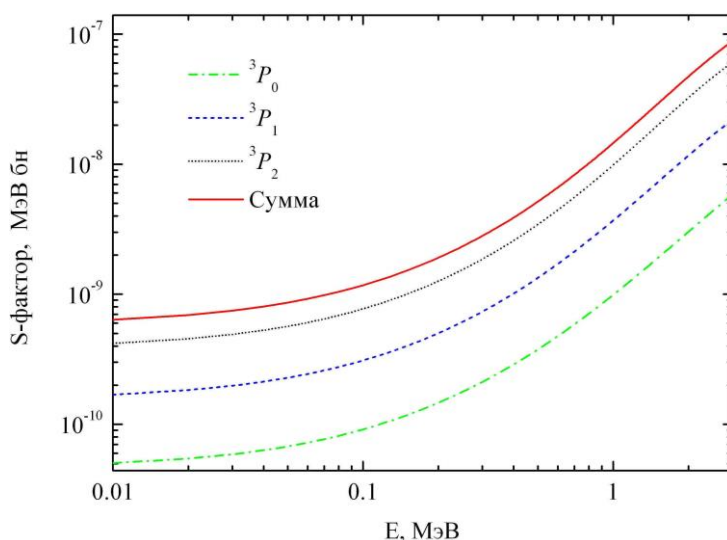
Тўртинчи «Уч зарра моделида $\alpha+d \rightarrow {}^6\text{Li}+\gamma$ синтез реакцияси астрофизик S-фактори, реакция тезлиги ва ${}^6\text{Li}$ элементининг тарқалишларининг назарий таҳлили» бобда $\alpha+d \rightarrow {}^6\text{Li}+\gamma$ синтез реакциясининг астрофизик S-фактори ва реакция тезлиги, ҳамда ${}^6\text{Li}$ элементининг бошланғич тарқалиши учун уч заррали моделдаги ҳисоблаш натижалари келтирилган. Гиперсферик гармониклардаги Лагранж-меш усулига (P. Descouvemont, D. Baye PRC67, 044309 (2003)) асосланган уч заррали формализм ифодаланган. ${}^6\text{Li}=\alpha+n+p$ ядросининг уч заррали тўлқин функцияси чамаси 0.5 % изотриплет ($T=1$) компонентага эга. Бундан олдинги бобда таъкидланганидек, икки зарра моделида таъқиқланган $E1$ -ўтишни изоспин формализмини ҳисобга олган ҳолда баҳолаб бўлмайди. Шунинг учун бу жараённи ўрганиш учун $E1$ -ўтиш ҳиссасини ҳисобга олувчи уч зарра формализмини ривожлантириш реалистик ва ғоят муҳим ҳисобланади. Айниқса, бу ўтиш кичик энергияларда жараёнга асосий ҳисса бериши кутилатганда.

Бу жараён резонанс энергия $E(3^+)=0.711$ МэВ атрофида ва юқори энергияларда тажрибавий ўлчашлар P. Mohr *et al.*, Phys. Rev. C50, 1543 (1994); R.G.H. Robertson *et al.*, Phys. Rev. Lett. 47, 1867 (1981) ишларида етарли даражада таҳлил қилинган. Бироқ, анча қуйи энергияларда қамраш жараёни кесими маълумотларини тажрибавий йўл билан олиш итаришувчи Кулон ўзаро таъсирлашувчи зарядланган заррачалар ҳисобига J. Kiener *et al.*, Phys. Rev. C44, 2195 (1991); F. Hammachi *et al.*, Phys. Rev. C82, 065803 (2010)

кийин масала ҳисобланади. Шундай бўлса ҳам, охирги йилларда LUNA ҳамкорлигидаги тажриба гуруҳи ниҳоят муваффақиятга эришди. 2014 йили илк бор иккита $E=94$ кэВ ва $E=134$ кэВ (M. Anders *et al.*, Phys. Rev. Lett. 113, 042501 (2014)) энергияларда астрофизик S-факторни тўғридан-тўғри усулда ўлчашга эришилди. Иккинчи марта 2017 йилда бира тўла тўртта астрофизик муҳим $E=80, 93, 120$ ва 133 кэВ (D. Trezzi *et al.*, Astroparticle Physics 89, 57, (2017)) энергияларда ўлчанди. Қуйида ўрганилаётган жараённинг янги олинган тажрибавий маълумотларини тавсифлаш учун гиперсферик гармониклардаги Лагранж-меш усулига асосланган уч зарра моделини қўллаймиз.

${}^6\text{Li}$ ядросининг уч заррали тўлқин функцияси Ворончев (Модель А) ва Канада (Модель Б) $\alpha+N$ потенциаллари асосида ҳисобланди. Икки нуклон ($p+n$) кириш каналида дейтрон боғланиш энергиясини $E_{\text{боғ}}=-2.20$ МэВ тавсифловчи марказий Миннесота потенциали қўлланди. $E1$ - ва $E2$ -ўтишлар учун сонли натижалар ва мос равишда астрофизик S-фактори, реакция тезлиги ва ${}^6\text{Li}$ элементининг тарқалиши учун назарий баҳолар олинди. ${}^6\text{Li}$ ядроси асосий ҳолат тўлқин функциясида кичик миқдорда (тахминан 0.5%) изотриплет ($T_f=1$) компонентага эга бўлиши $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ жараёнини қуйи астрофизик энергияларда тавсифлашда муҳим роль ўйнаши кўрсатилди.

7-расмда уч зарра моделида Ворончев $\alpha+N$ потенциали билан ҳисобланган ${}^6\text{Li}$ ядроси тўлқин функцияси билан бошланғич альфа-дейтрон 3P_0 , 3P_1 , 3P_2 парциал тўлқинлари учун олинган $E1$ астрофизик S-фактори баҳолари келтирилган. Ушбу тўлқин функция норма квадрати $5.3\cdot 10^{-3}$ тенг бўлган изотриплет компонентага эга.



7-расм. Парциал $E1$ астрофизик S-факторлари

Бошқа томондан, $E2$ S-фактор S ва D тўлқинларда дейтрон ва ${}^6\text{Li}$ ядроси тўлқин функцияларининг қоплашув интегрالي асимптотикасига кучли боғланган. Бироқ, уч заррали гиперсферик тўлқин функцияси асимптотикани тўғри бермайди. Асимптотикани ички ва асимптотик соҳалари чегараси бўлмиш 5-10 фм масофада тўғирлаш мумкин. Келтирилган матрица

элементида S ва D тўлқинлардаги $\alpha+d$ нисбий ҳаракат қоплашув интегралли ${}^6\text{Li}$ ядросининг уч заррали тўлқин функцияси ва дейтрон тўлқин функциялари ёрдамида ифодаланади:

$$I_L(R) = \left\langle \Psi_d(\vec{r}) Y_L(\vec{R}) \mid \Psi_{{}^6\text{Li}}(\vec{R}, \vec{r}) \right\rangle_{(\vec{r}, \vec{R})}, \quad (4)$$

Бу ерда интеграл R ўзгарувчининг бурчак қисми ва r бўйича олинади. Зарядланган зарралар системаси учун қоплашув интегралли асимптотикаси узоқ масофаларда Уиттекер функцияси билан аниқланади:

$$I_L(R) \xrightarrow{R \rightarrow \infty} C_{\alpha d}^L W_{-\eta_{\alpha d}, L+1/2}(2k_{\alpha d} R) / R \quad (5)$$

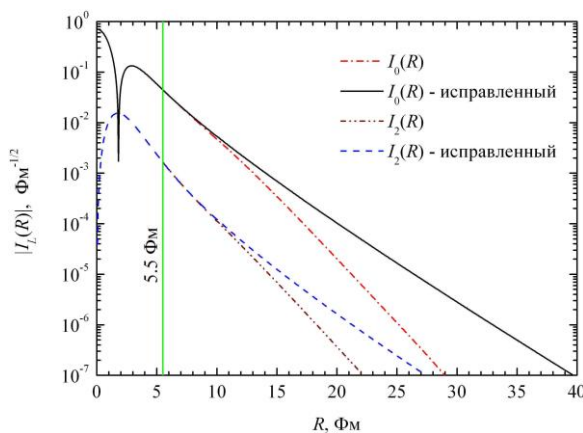
Қайд қилиб ўтамизки, АНД қуйи энергияларда кечувчи ядровий астрофизик жараёнларни тавсифлашда муҳим роль ўйнайди ва узоқ масофаларда αd -системаси нисбий ҳаракати тўлқин функциясининг асимптотикасини характерлайди.

1-жадвалда (4) ва (5) формулалар асосида уч заррали тўлқин функцияни қўллаган ҳолда S ва D тўлқинларда ${}^6\text{Li} \rightarrow \alpha + d$ конфигурацияси учун ҳисобланган АНД қийматлари келтирилган. Жадвалдан (5) формула бўйича топилган АНД қийматларининг $R_0 = 4-10$ фм масофада барқарорлигини кўриш мумкин.

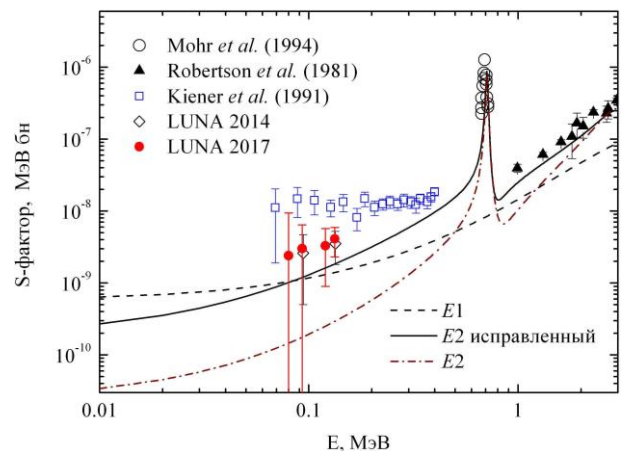
1-жадвал

Уч зарра моделида ${}^6\text{Li} \rightarrow \alpha + d$ учун ҳисобланган $C_{\alpha d}$ (фм $^{-1/2}$) АНД қийматлари

R_0 , фм		4	5	5.5	6	7	8	9	10
$L=0$	Модель А	1.944	2.100	2.116	2.115	2.087	2.038	1.965	1.863
	Модель Б	1.932	2.043	2.051	2.046	2.017	1.970	1.900	1.801
$L=2$	Модель А (x10 $^{-2}$)	1.932	2.124	2.159	2.172	2.168	2.137	2.080	1.991
	Модель Б (x10 $^{-2}$)	1.988	2.152	2.179	2.188	2.180	2.148	2.091	2.001



8-расм. ${}^6\text{Li}$ ядроси ва дейтрон тўлқин функциялари қоплаш интеграллари

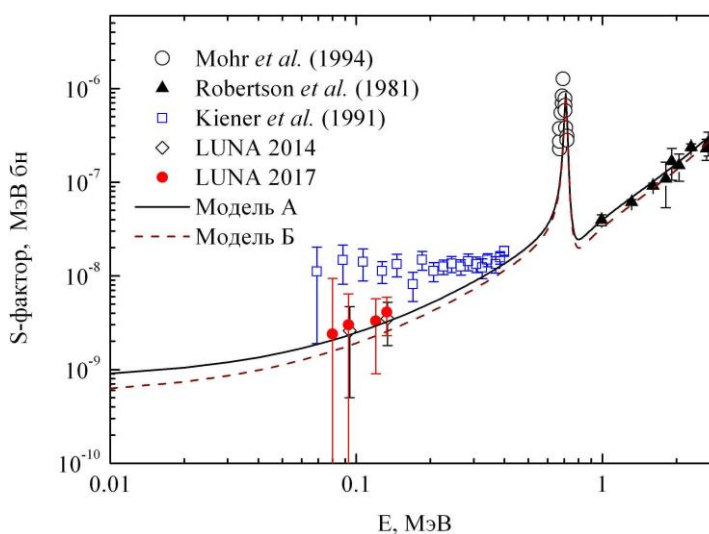


9-расм. Тажириба маълумотлари билан биргаликда $E1$ ва $E2$ S-факторларини таққослаш

αd -системаси нисбий ҳаракати тўлқин функциясининг асимптотикасини тўғирлаш учун ички ва асимптотик соҳалар чегараси бўлган $R_0=5.5$ фмга мос энг мақбул $C_{ad}=2.116$ фм $^{-1/2}$ ни танлаган ҳолда (5) формулани қўлаймиз (8-расм). 9 расмда S ва D тўлқинлардаги қоплашув интеграллари 5.5 фм масофада (5) формуладаги мос асимптотик кўринишлари билан алмаштирилган ҳолда келтирилган. Расмдан кўриниб турибдики синтез жараёнини тавсифлаш учун муҳим ҳисобланган қоплашув интеграллари асимптотикаси сезиларли даражада яхшиланган.

10-расмда $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ синтез реакцияси астрофизик S -фактори учун Ворончев (Модель А) ва Канада (Модель Б) $\alpha+N$ потенциаллари билан ҳисобланган назарий баҳолар бир қанча тадқиқот гуруҳлари тажриба маълумотлари билан таққослаган ҳолда келтирилган. Қайд қилиб ўтамиз, Канада потенциали билан ҳисобланган ${}^6\text{Li}$ ядросининг тўлқин функцияси норма квадрати $4.19\cdot 10^{-3}$ тенг бўлган изотриплет компонентага эга, яъни Ворончев потенциали ҳолидан ($5.30\cdot 10^{-3}$) бир мунча кичик.

Айнан шунинг учун қуйи энергияларда бу икки потенциаллар учун ҳисобланган S -факторлар қийматлари сезиларли фарқ қилмоқда.

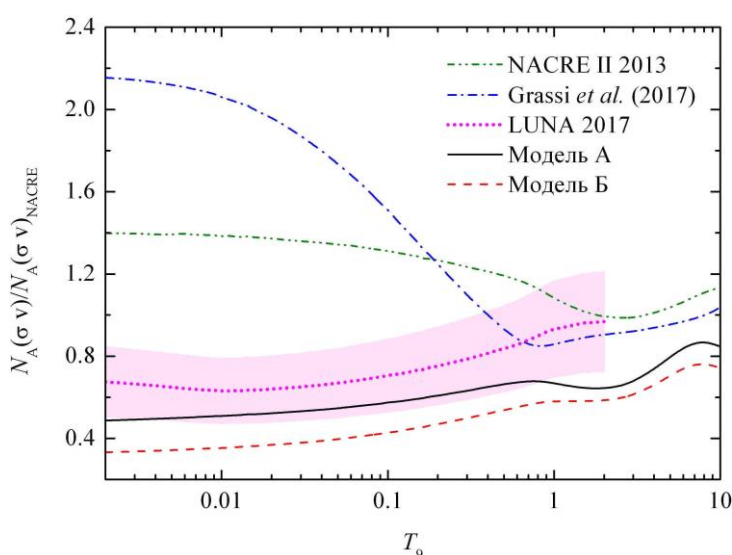


10-расм. $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ жараёни учун тажриба маълумотлари билан таққослаган ҳолда Ворончев (Модель А) ва Канада (Модель Б) $\alpha+N$ потенциаллари билан уч заррали моделда ҳисобланган астрофизик S -фактори

$\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ радиацион камраш реакцияси бирламчи нуклеосинтез жараёнида ${}^6\text{Li}$ изотопи ҳосил бўлишида тўғридан-тўғри синтез механизми сифатида ниҳоятда катта қизиқиш уйғотади. Уч заррали А ва Б моделлар доирасида $10^6 \text{ K} \leq T \leq 10^{10} \text{ K}$ температура соҳасида $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ синтез жараёнининг реакция тезлиги (2) ифода асосида ҳисобланди. 11-расмда $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ синтези реакция тезликлари А ва Б Моделлар доирасида ҳисобланган ва NACRE 1999 тажриба маълумотларига бўлинган (нормаллаштирилган), ҳамда NACRE 2013 маълумотлари ва LUNA 2017

хамкорлиги янги маълумотлари, яна A. Grassi *et al.*, Phys. Rev. C96, 045807 (2017) ишидан олинган назарий чизиқлар билан таққосланган ҳолда кўрсатилган. Расмлардан кўриниб турибдики, Модел А доирасидаги натижалар энг аниқ ҳисобланган LUNA 2017 ҳамкорлиги чизиқлари билан тажрибавий хатолик доирасида яхши мос келмоқда. Бунда А ва Б Моделлар чизиқ формалари LUNA 2017 чизиғи билан мос келмоқда, Модел А эса LUNA 2017 ҳамкорлиги маълумотлари абсолют қийматларини яхши тавсифламоқда.

Шундан сўнг, $\alpha+d \rightarrow {}^6\text{Li}+\gamma$ синтезнинг ҳисобланган реакция тезлиги асосида PARTHENOPE ҳаммабоп дастурлар пакети ёрдамида ${}^6\text{Li}$ элементининг бирламчи нуклеосинтезда тарқалиши баҳоланди. ${}^6\text{Li}/\text{H}$ катталиқ учун А ва Б Моделлар доирасида мос равишда $(0.67 \pm 0.01) \times 10^{-14}$ ва $(0.50 \pm 0.01) \times 10^{-14}$ баҳолар олинди.



11-расм. NACRE 1999 тажриба маълумотларига нормаллаштирилган $\alpha+d \rightarrow {}^6\text{Li}+\gamma$ жараёни нисбий реакция тезликлари

Бирламчи нулеосинтез жараёнида ${}^6\text{Li}$ изотопи бошланғич тарқалиши учун олинган ${}^6\text{Li}/\text{H}=(0.67 \pm 0.01) \times 10^{-14}$ натижа LUNA 2017 ҳамкорлиги янги маълумотлари билан ${}^6\text{Li}/\text{H}=(0.80 \pm 0.18) \times 10^{-14}$ тажрибавий хатолик доирасида яхши мос келмоқда.

ХУЛОСА

“Кластер модели доирасида куйи энергияларда $d(\alpha,\gamma){}^6\text{Li}$, ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ ва ${}^3\text{H}(\alpha,\gamma){}^7\text{Li}$ реакциялар астрофизик S-факторлари ва тезликлари” мавзусидаги физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси бўйича ўтказилган тадқиқотлар асосида куйидагиларни хулоса қилиш мумкин:

1. $\alpha+{}^3\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be}+\gamma$ ва $\alpha+{}^3\text{H} \rightarrow {}^7\text{Li}+\gamma$ жараёнлар учун астрофизик S-факторга бошланғич S тўлқиндан охириги P-тўлқинга E1-ўтиш асосий ҳисса бериши кўрсатилди. Ушбу асосда Гамов энергиясида S-фактор учун нейтринолар

осцилляцияси кузатуви ва LUNA ҳамкорлигидаги тўғридан-тўғри ўлчашларидан олинган янги маълумотларни тавсифлаш имконияти борлиги кўрсатилди. Шунингдек, $\alpha + {}^3\text{H} \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$ синтез реакцияси тажриба маълумотлари кўзгу ядроси учун қурилган потенциал ёрдамида яхши тафсифланиши кўрсатилди.

2. $\alpha + {}^3\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$ ва $\alpha + {}^3\text{H} \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$ радиацион қамраш реакцияси учун ҳисобланган астрофизик S-фактор асосида юлдузлар температураси ($10^6 \text{ K} \leq T \leq 10^9 \text{ K}$) интервалида реакция тезликлари баҳоланди. Ҳисобланган реакция тезликлари ёрдамида ${}^7\text{Li}$ изотопининг бирламчи нуклеосинтезда тарқалиши учун LUNA ҳамкорлигида олинган янги ${}^7\text{Li}/\text{H} = (5.0 \pm 0.3) \times 10^{-10}$ натижага мос келувчи назарий баҳо ${}^7\text{Li}/\text{H} = (5.08 \pm 0.13) \times 10^{-10}$ олинди.

3. Икки зарра модели асосида $d(\alpha, \gamma){}^6\text{Li}$ астрофизик S-фактори электрик квадруполь ўтиши ${}^3\text{S}_1$, ${}^3\text{P}_0$, ${}^3\text{P}_1$, ${}^3\text{P}_2$, ${}^3\text{D}_1$, ${}^3\text{D}_2$, ${}^3\text{D}_3$ -парциал тўлқинларда фаза силжишларини, ҳамда S тўлқинда боғланган ҳолат боғланиш энергияси ва АНДни тўғри тавсифловчи оддий Гаусс кўринишидаги αd -потенциал билан ҳисобланди. ${}^6\text{Li}$ ядросининг боғланиш энергиясини сақлаган ҳолда Дубовиченко ишидаги αd -потенциалини S тўлқинда модификациялаш орқали фаза силжиши ва АНДни яхши тавсифлашга эришилди. Тўлқин функцияларни ҳисоблашда юқори аниқликка эга ва ҳар бир парциал тўлқинда тўлқин функциянинг асимптотикасини тўғри тавсифловчи Нумеров алгоритми қўлланди. Астрофизик S-фактори E2-ўтиш ҳиссасининг интеграллаш чегарасини 40 фмгача оширилганда яқинлашишга эришиши кўрсатилди.

4. $\alpha + d \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$ астрофизик S-фактори ва реакция тезлиги, ҳамда ${}^6\text{Li}$ элементининг тарқалиши гиперсферик гармониклардаги Лагранж-меш усулига асосланган уч зарра модели доирасида ҳисобланди. E2-ўтиш S ва D тўлқинларда дейтрон ва ${}^6\text{Li}$ ядроси тўлқин функцияларининг қоплашув интегралли асимптотикасини 5.5 фм масофада тўғирланиши ёрдамида ҳисобланди. Парциал E1- ва E2-ўтишлар учун сонли ҳисоблашларнинг яхши яқинлашиши кўрсатилди.

5. ${}^6\text{Li}$ ядроси асосий ҳолат тўлқин функциясининг кичик микдорда, тахминан 0.5% изотриплет компонентага эга бўлиши $\alpha + d \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$ жараёнини қуйи астрофизик энергияларда тавсифлашда муҳим роль ўйнаши кўрсатилди. Илк бор $\alpha + d \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$ синтез реакция тезлиги LUNA ҳамкорлигининг янги тажриба маълумотларини ишончли уч зарра моделида изоспин E1-ўтиши билан яхши тасвирлаши кўрсатилди. ${}^6\text{Li}$ изотопининг бирламчи нуклеосинтездаги бошланғич тарқалиши учун олинган ${}^6\text{Li}/\text{H} = (0.67 \pm 0.01) \times 10^{-14}$ натижа LUNA ҳамкорлиги янги маълумотлари ${}^6\text{Li}/\text{H} = (0.80 \pm 0.18) \times 10^{-14}$ билан тажрибавий хатолик доирасида яхши мос келади.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2017.FM/Т.33.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ПРИ ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ,
АСТРОНОМИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ,
НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА**

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

ТУРАКУЛОВ СОБИР АБДУМУМИНОВИЧ

**АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ S-ФАКТОРЫ И СКОРОСТИ РЕАКЦИЙ
 $d(\alpha, \gamma)^6\text{Li}$, $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$ И $^3\text{H}(\alpha, \gamma)^7\text{Li}$ ПРИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ В
РАМКАХ КЛАСТЕРНОЙ МОДЕЛИ**

**01.04.08 – Физика атомного ядра и элементарных частиц.
Ускорительная техника**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ
ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD) ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент – 2019

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистана за номером B2018.2.PhD/FM254

Диссертация выполнена в Институте ядерной физики Академии наук Республики Узбекистана.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.inp.uz) и на Информационно-образовательном портале “Ziyonet” (www.ziyonet.uz).

Научный руководитель:

Турсунов Эргаш Махкамovich
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты:

Миртаджиева Каромат Тахировна
доктор физико-математических наук,
доцент

Олимов Хусниддин Қосимович
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Ведущая организация:

Физико-технический институт Научно-производственное объединение “Физика-Солнце” Академии наук Республики Узбекистан

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2019 г. в _____ часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики, Астрономическом институте, Национальном университете Узбекистана (100124, г. Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ; тел. (+99871) 289-31-18; факс (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

С докторской диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (регистрационный номер _____). (100124, г. Ташкент, поселок Улугбек, ИЯФ; тел. (+99871) 289-31-19).

Автореферат диссертации разослан «_____» _____ 2019 г.
(Реестр протокола рассылки № _____ от _____ 2019 г.)

М. Ю. Ташметов
председатель Научного совета по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

З. Каноков
ученый секретарь Научного совета
по присуждению ученых степеней,
д. ф.-м. н., доцент

И. Нуриддинов
председатель научного семинара при Научном совете
по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время экспериментальные и теоретические исследования процессов прямого ядерного захвата $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$, $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ и $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ представляют исключительный интерес для решения космологической проблемы распространения лития в теории стандартной модели Вселенной. Изучение этих реакций имеют важное значение для современной ядерной астрофизики и космологии, поскольку они являются основными источниками образования ядер ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ при первичном нуклеосинтезе после Большого Взрыва. Процесс $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ дополнительно важен для изучения кинетики солнечного кора, поскольку он является отправной точкой для второй и третьей цепей пр-цикла водородного горения на Солнце. С другой стороны, ядро ${}^7\text{Be}$ играет доминантную роль в процессах образования нейтрино в стандартной солнечной модели.

На сегодняшний день в исследовательских во многих научных центрах проводятся прецизионные измерения процессов $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$, $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ и $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ при низких астрофизических энергиях. Получение прямых экспериментальных данных о сечениях радиационного захвата в этих реакциях является сложной задачей из-за кулоновского барьера сталкивающихся заряженных частиц. Несмотря на это, в последние годы ведущим экспериментальным коллаборационным группам европейских стран LUNA, ERNA, а также Лаборатория ядерных проблем (ЛЯП) в ОИЯИ (Дубна, Россия) удалось провести прямые экспериментальные измерения по этим трем важным реакциям. В рамках данной диссертационной работы развиваются двухчастичная и трехчастичная модели, основанные на NN-, αN , αd -, $\alpha{}^3\text{H}$ -, $\alpha{}^3\text{He}$ - потенциалах взаимодействия. Двухчастичная модель основывается на высокоэффективном алгоритме Нумерова, который обеспечивает правильную асимптотику, что имеет ключевое значение для описания процесса радиационного захвата. В двухчастичной модели проблематично учесть запрещенный по изоспину $E1$ -переход в $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ процессе. Тем не менее, в научной литературе используются модели, основанные на точных экспериментально измеренных массах частиц, однако они не могут непосредственно учитывать изоспиновые переходы. Реалистическая трехчастичная модель основана на волновой функции конечного состояния ядра ${}^6\text{Li}$, рассчитанной методом гиперсферических гармоник на Лагранж-меш базисе. Эта модель позволит описать один из важнейших процессов современной ядерной астрофизики радиационного захвата $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ с явным учетом вклада запрещенного $E1$ -перехода. Развитие методов расчета в рамках трехчастичного подхода является качественно новым этапом в изучении ядерно-астрофизических процессов.

В нашей Республике уделяется большое внимание развитию ядерной физики, в частности, экспериментальным и теоретическим работам в области физики атомного ядра и элементарных частиц, а также проведению фундаментальных исследований в этом направлении на мировом уровне.

Направления этих фундаментальных исследований, имеющих большое значение для развития науки нашей страны и её дальнейшего практического применения, отражены в Стратегии¹ действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 гг. Выполненные в данной работе исследования непосредственно связаны с проблемами ядерной астрофизики и физики управляемых термоядерных процессов, в том числе ядерной энергетики, что является передним краем современных исследований в мире.

Данная научно-исследовательская работа соответствует задачам, утвержденным в государственных нормативных документах, Указах Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 гг.», № УП-4958 от 16 февраля 2017 года «О дальнейшем совершенствовании системы послевузовского образования», в Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-2789 от 17 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности».

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий в Республике Узбекистан II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

Степень изученности проблемы. К настоящему времени ведущими учеными мира, например, российскими (L.D. Blokhintsev, G.G. Ryzhikh и др.), американскими (A.M. Mukhamedzhanov, C. Bertulani, K.M. Nollet и др.), бельгийскими (P. Descouvemont, D. Baye и др.), японскими (T. Kajino и др.), казахскими (С.Б. Дубовиченко, Н.А. Буркова и др.) и другими учеными ведутся теоретические исследования реакций радиационного захвата. На сегодняшний день благодаря развитию современной экспериментальной техники удастся провести прямые измерения астрофизического S-фактора реакций радиационного захвата $\alpha + d \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$, $\alpha + {}^3\text{H} \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$ и $\alpha + {}^3\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$ при низких астрофизических энергиях. Недавно полученные экспериментальные данные коллаборации LUNA, ERNA, а также ЛЯП в ОИЯИ (Дубна, Россия) по трем вышеуказанным процессам требуют развивать реалистические модели, которые могут объяснить новые данные и механизмы образования легких ядер.

Эти процессы изучены в мире, как на основе макроскопических моделей (A.M. Mukhamedzhanov, L.D. Blokhintsev, P. Descouvemont, C. Bertulani, T. Kajino, С.Б. Дубовиченко и др.) так и в рамках микроскопических (T. Neff, K.M. Nollet, J.D. Eraly, P. Navratil и др.) приближений. По первому процессу пока отсутствуют полные микроскопические расчеты, а по процессам синтеза ядер ${}^7\text{Be}$, ${}^7\text{Li}$ имеются несколько микроскопических моделей (NCSMC, FMD), описывающих соответствующие процессы, которые, однако, дают

¹ Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 г.

различные энергетические зависимости. Эти расчеты также сильно чувствительны к выбору используемых NN-потенциалов. Вопрос, какие могут быть получены теоретические оценки в реалистических двухчастичных и трехчастичных моделях, которые могут объяснить данные LUNA коллаборации, пока остается открытым.

Кроме того, эти проблемы исследованы в работах узбекских ученых Р. Ярмухамедова, Б.Ф. Иргазиева и др., в которых эти процессы изучаются в рамках модифицированной двухчастичной потенциальной модели и в методе искаженных волн. В частности, используя вышеуказанные методы из анализа прямых экспериментальных данных реакций $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ и $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$, извлекаются асимптотические нормировочные коэффициенты (АНК) и экстраполируются для получения теоретических оценок при сверхнизких экспериментально недоступных энергиях. В этих работах процесс $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ исследован в рамках двухчастичной потенциальной модели, которая использует точные экспериментальные массы сталкивающихся частиц для учета вклада электрического $E1$ -перехода, запрещенного по правилу отбора изоспина. Для явного учета изоспинового перехода в этом процессе надо развивать трехчастичную модель, основанную на реалистическую волновую функцию конечного ядра ${}^6\text{Li}$, имеющего малую долю (около 0.5%) изотриплетной компоненты. Есть надежда, что эта компонента позволит описать новые экспериментальные данные LUNA коллаборации с хорошей точностью.

Связь темы диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках научно-исследовательских проектов Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан по темам: Ф2-ФА-Ф117 «Исследования динамических свойств фундаментальных характеристик ядер для ядерной астрофизики» (2012-2016) и ОТ-Ф2-25 «Развитие прецизионных трехчастичных методов для решения задач ядерной астрофизики и адронной терапии» (2017-2020).

Целью исследования является выяснение механизмов образования легких ядер в астрофизических процессах $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$, $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ и $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ при низких энергиях и оценка астрофизических S-факторов, скоростей реакций и первичной распространенности нуклидов ${}^{6,7}\text{Li}$ в реалистической кластерной модели.

Задачи исследования:

развивать двухчастичную потенциальную модель для расчета астрофизических S-факторов (сечений) и скоростей ядерно-астрофизических процессов, основанную на высокоэффективном алгоритме Нумерова;

получить явные аналитические выражения для приведенных вероятностей электрических $E1$, $E2$ -переходов и магнитного $M1$ -перехода в двухчастичной модели, выполнить численные расчеты и определить парциальные вклады для полного астрофизического S-фактора;

оценить вклад скорости реакции радиационного захвата $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ и $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ для формирования элемента ${}^7\text{Li}$ при первичном нуклеосинтезе; вычислить астрофизический $E2$ S-фактор реакции радиационного захвата $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ в двухчастичной модели;

развивать трехчастичную потенциальную модель, основанную на методе гиперсферических гармоник на Лагранж-меш базисе для оценки астрофизических S-факторов (сечений) и скоростей реакций радиационного захвата;

получить в явном виде аналитические выражения матричных элементов $E1$ - и $E2$ - электрических переходов в трехчастичной модели; выполнить численные расчеты для парциальных вкладов электрических переходов в развиваемой модели;

оценить скорости реакции радиационного захвата $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ в модели трех тел и распространенности элемента ${}^6\text{Li}$ при первичном нуклеосинтезе.

Объектом исследования являются астрофизические S-факторы и скорости реакций образования легких ядер ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ и ${}^7\text{Be}$ в процессах радиационного захвата; первичная распространенность легких элементов ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ после Большого Взрыва.

Предметом исследования являются ядерные астрофизические реакции синтеза легких ядер, электромагнитные переходы; двухчастичная и трехчастичная структура легких ядер, двухчастичные NN-, αN -, αd -, $\alpha{}^3\text{H}$ -, $\alpha{}^3\text{He}$ - потенциалы взаимодействия.

Методы исследования. Методы теоретической ядерной физики и теории прямых ядерных реакций, высокоэффективные методы решения уравнения Шредингера для двух тел на основе алгоритма Нумерова, метод гиперсферических гармоник на Лагранж-меш базисе для решения задачи трех тел, аналитические методы квантовой теории углового момента, численные методы, обладающие высокой точностью.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

показаны возможность описания в двухчастичной модели новых экспериментальных данных LUNA коллаборации для астрофизического S-фактора реакций радиационного захвата $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ и $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ при низких энергиях, а также сверхчувствительность матричных элементов $E1$ -перехода, который дает основной вклад в процессы синтеза легких ядер ${}^7\text{Be}$ и ${}^7\text{Li}$, к S-волновым $\alpha+{}^3\text{He}$ и $\alpha+{}^3\text{H}$ потенциалам;

показано, что реалистические волновые функции $\alpha+d$ связанного состояния на основе предложенного модифицированного потенциала с учетом асимптотического нормировочного коэффициента и состояний рассеяния без дополнительной сшивки с асимптотикой могут обеспечить хорошую сходимость результатов для $E2$ астрофизического S-фактора реакции синтеза $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ в модели двух тел;

впервые в рамках трехчастичной модели показан определяющий вклад запрещенного по изоспину $E1$ -перехода в описании астрофизической реакции синтеза $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ при низких энергиях благодаря наличию малой

изотриплетной компоненты около 0.5% в волновой функции конечного ядра ${}^6\text{Li}$;

получено хорошее описание прямых экспериментальных данных LUNA коллаборации для астрофизического S-фактора и скорости реакции $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$, а также хорошее согласие теоретической оценки для первичной распространенности элемента ${}^6\text{Li}$ после Большого Взрыва ${}^6\text{Li}/\text{H}=(0.67\pm0.01)\times10^{-14}$ с новыми данными LUNA коллаборации, и полное соответствие теоретической оценки отношения ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}=(1.33\pm0.03)\times10^{-5}$ результатам Стандартной модели Большого Взрыва.

Практические результаты исследования заключается в следующем:

вычислены вклады парциальных волн для электрических $E1$ -, $E2$ - и магнитного $M1$ -переходов в суммарный астрофизический S-фактор для реакций радиационного захвата $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ и $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ в модели двух тел;

получены теоретические оценки для начальной распространенности элемента ${}^7\text{Li}$ после Большого Взрыва на основе рассчитанной скорости реакций радиационного захвата $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ и $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ в модели двух тел: ${}^7\text{Li}/\text{H}=(5.08\pm0.13)\times10^{-10}$;

разработан теоретический подход в рамках модели трех тел, основанной на гиперсферическом Лагранж-меш методе, корректно описывающий изоспиновый $E1$ -переход для процесса $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$.

Достоверность результатов исследования обоснована использованием методов квантовой механики и теоретической физики, а также высокоэффективных численных методов и алгоритмов, подробной проверкой согласованности полученных результатов с экспериментальными данными и результатами других авторов, соответствием выводов основным положениям теории ядерной астрофизики.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов заключается в изучении радиационного захвата $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ в рамках наиболее реалистического подхода, основанного на трехчастичной $\alpha+n+p$ волновой функции конечного ядра ${}^6\text{Li}$, имеющей малую изотриплетную компоненту около 0.5%.

Практическая значимость полученных результатов заключается в развитии методов расчета в рамках трехчастичного подхода, который является качественно новым этапом в изучении ядерно-астрофизических процессов.

Внедрения результатов исследования. На основе полученных результатов по исследованию процессов радиационного захвата $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$, $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ и $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$:

показанная возможность описания в двухчастичной модели новых экспериментальных данных для астрофизического S-фактора реакций радиационного захвата $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ и $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ была использована зарубежными учеными (Physical Review C, 99, 054618, 2019; International Journal of Modern Physics E, 42, 1930004, 2019; Indian Journal of Physics, 93, 279, 2019; Journal of Physics: Conference Series, 1154, 012013, 2019) при

изучении реакций радиационного захвата. Использование научных результатов позволило разработать новые теоретические методы для анализа этих процессов;

предложенный модифицированный αd -потенциал с учетом асимптотического нормировочного коэффициента использован при изучении реакции радиационного захвата $\alpha + d \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$ международными исследователями (ссылки в зарубежных научных журналах Physical Review C, 96, 045807, 2017; Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 45, 085102, 2018; European Physical Journal Web of Conferences, 199, 05016, 2019). Использование полученных результатов позволило теоретически оценить астрофизический S-фактор, скорость реакции, а также начальную распространенность ${}^6\text{Li}/\text{H} = 1.1 \cdot 10^{-14}$ при первичном нуклеосинтезе;

полученные результаты в рамках трёхчастичной модели для реакции радиационного захвата $\alpha + d \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$ признаны международными исследователями (ссылки в зарубежных научных журналах Physical Review C, 95, 044618, 2017; Physical Review C, 96, 045807, 2017; Physics of Atomic Nuclei, 81, 899, 2018) как перспективный новый этап в изучении прямых ядерных процессов захвата на основе трехчастичной модели.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы докладывались на 7 международных и республиканских научных конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, 5 научных статей в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, из них 4 в зарубежных научных журналах.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 109 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** представлены 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, дана 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 диссертации «**Распространенность легких элементов во Вселенной и проблемы лития**» приводится краткий обзор основных понятий образования нуклидов и их распространенности в процессах первичного нуклеосинтеза после Большого взрыва. Согласно современным представлениям в теории BBN легкие элементы d, ${}^3,4\text{He}$ и ${}^6,7\text{Li}$ образуются в

течение первых трех минут в ходе первичного нуклеосинтеза. Указано, что в настоящее время исследование проблемы распространенности изотопов ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ является одной из самых актуальных темой современной ядерной астрофизики и космологии. Приведены основные параметры BBN модели, используемые в данной работе для оценки начальной (примордиальной) распространенности легких элементов в космологической стандартной модели Большого взрыва. Одной из основ BBN модели является предсказание начальной распространенности астрономических наблюдаемых легких элементов до лития. Эта модель правильно предсказывает распространенности первоначальных легких элементов d , ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, но в случае изотопов лития ситуация совсем другая.

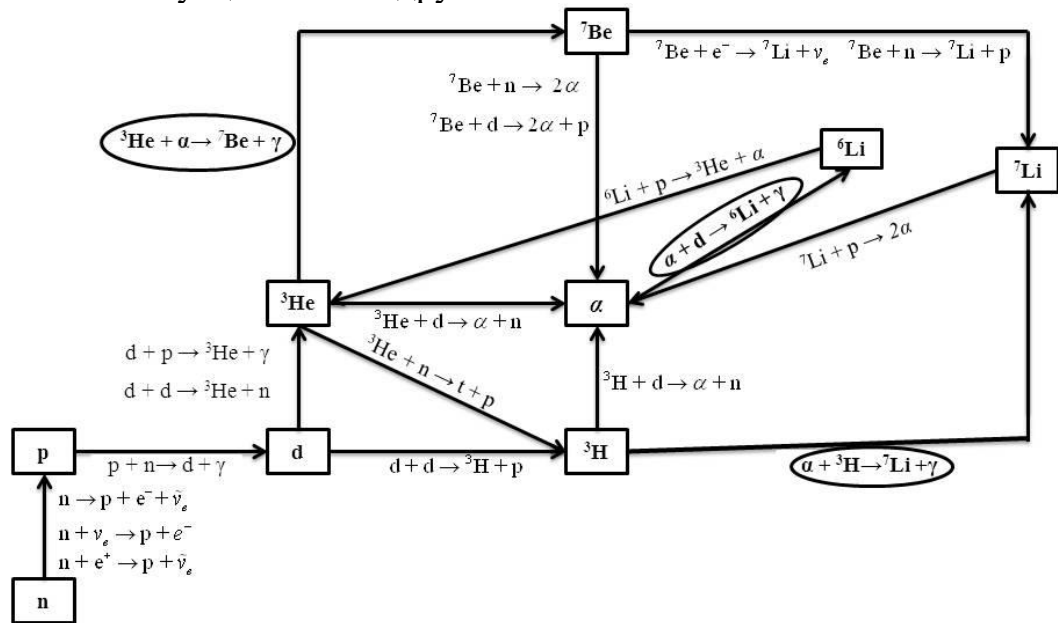


Рис. 1. Ядерные реакции при первичном нуклеосинтезе

В последние годы специалисты в области космологии, наблюдательной астрономии и ядерной астрофизики на основе экспериментальных и теоретических результатов активно обсуждают проблемы лития. Существуют две проблемы по распространенности изотопов лития при первичном нуклеосинтезе после Большого Взрыва.

1-я литиевая проблема состоит в том, что согласно последним литературным данным, астрономически наблюдаемых нуклидов ${}^7\text{Li}$ было обнаружено приблизительно в 3-4 раз меньше, чем было предсказано BBN моделью.

2-я литиевая проблема касается на отношения двух изотопов лития. Теоретическая оценка BBN модели ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} \sim 10^{-4}$, а астрономически наблюдаемое значение ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} \sim 5 \times 10^{-2}$.

Для решения этих проблем в настоящее время в ядерной астрофизике в основном изучаются следующие реакции радиационного захвата: $d(\alpha, \gamma){}^6\text{Li}$, ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ и ${}^3\text{H}(\alpha, \gamma){}^7\text{Li}$ при астрофизических энергиях. Поскольку, они являются основными источниками (Рис. 1) образования ядер ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ при первичном нуклеосинтезе после Большого Взрыва. Экспериментальные

работы нацелены на проведение прецизионных измерений при низких энергиях, тогда как теоретические модели имеют цель корректно рассчитать скорости рассматриваемых реакций. Отметим, что для решения проблемы лития крайне важно провести реалистические расчеты скоростей ядерных реакций радиационного захвата $d(\alpha,\gamma)^6\text{Li}$, $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ и $^3\text{H}(\alpha,\gamma)^7\text{Li}$ при астрофизических энергиях.

Вторая глава «Реакции радиационного захвата $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ и $^3\text{H}(\alpha,\gamma)^7\text{Li}$ в двухчастичной модели» посвящена теоретическим исследованиям астрофизического S-фактора и скоростей реакций двух зеркальных процессов радиационного захвата $\alpha+^3\text{He}\rightarrow^7\text{Be}+\gamma$ и $\alpha+^3\text{H}\rightarrow^7\text{Li}+\gamma$ при низких энергиях.

В данной главе для расчета астрофизического S-фактора реакций радиационного захвата $\alpha+^3\text{He}\rightarrow^7\text{Be}+\gamma$ и $\alpha+^3\text{H}\rightarrow^7\text{Li}+\gamma$ используем двухчастичную потенциальную кластерную модель. Модель строится на основе предположения, что рассматриваемые ядра имеют двухкластерную структуру. Эти предположения обуславливаются подтверждённым из многочисленных экспериментальных данных фактом, что для многих легких ядер имеется высокая вероятность образования нуклонных ассоциаций (кластеров).

Фактически в любой реакции радиационного захвата с участием заряженных частиц в экспериментальных и теоретических исследованиях оценивается сечение процесса. Но значения сечений захвата экспоненциально быстро падают с уменьшением энергии и становятся малыми при низких астрофизических энергиях, т.е. в данном диапазоне энергий работать с такими величинами не очень удобно. По этой причине принято более удобная величина, так называемый астрофизический S-фактор, который связан с сечением следующим соотношением (Angulo *et al.*, NPA656, 3 (1999)):

$$S(E) = \sigma(E)E \exp(2\pi\eta) \quad (1)$$

где $\sigma(E)$ —полное сечение реакции радиационного захвата $A(a,\gamma)B$, $\eta = Z_b Z_c e^2 \mu_{bc} / k_{bc}$ —кулоновский параметр для связанного состояния системы $a=b+c$.

На рисунке 2 представлены результаты астрофизического S-фактора реакция радиационного захвата $\alpha+^3\text{He}\rightarrow^7\text{Be}+\gamma$ в сравнении с имеющимися новыми экспериментальными данными. На рисунке 2 астрофизические S-факторы рассчитаны двумя способами: (а) с потенциалами V_{M1} , V_{M2} , V_D , и (б) с потенциалами V_{M1}^a , V_{M2}^a , V_D^a , V_D^b . Для изучения процесса сначала мы используем в качестве исходного потенциал Дубовиченко V_D , затем модифицированные нами потенциалы V_{M1} , V_{M2} (рис.2 (а)). Эти потенциалы различаются параметрами в Р-волнах и дают различные значения АНК. Асимптотические нормировочные коэффициенты играют важную роль в ядерно-астрофизических процессах, таких как $d(\alpha,\gamma)^6\text{Li}$, $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$, $^3\text{H}(\alpha,\gamma)^7\text{Li}$ и $^7\text{Be}(p,\gamma)^8\text{B}$, особенно, при низких энергиях. Для построения более

реалистического двухчастичного потенциала параметры должны быть подогнаны не только к энергиям связи и экспериментальным фазам рассеяния, а ещё дополнительно к эмпирическим значениям АНК. Исходя из этого, среди фазово-эквивалентных потенциалов для $\alpha+{}^3\text{He}$ -системы строим модифицированные потенциалы V_{M1} , V_{M2} с учетом АНК, сохраняя при этом энергии связи и экспериментальные фазы рассеяния.

Как видно из рисунка 2(а), наши модифицированные потенциальные модели V_{M1} и V_{M2} хорошо согласуются с экспериментом при средних и низких энергиях. Однако эти потенциалы переоценивают новые экспериментальные данные LUNA коллаборации при сверхнизких энергиях из-за различной энергетической зависимости. А модель V_D сильно

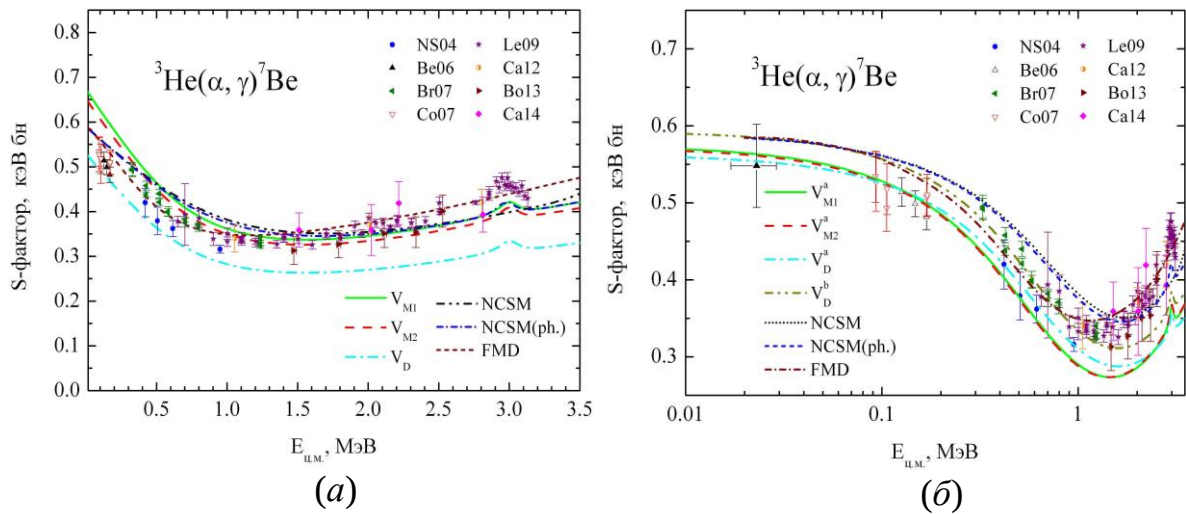


Рис. 2. Астрофизический S-фактор процесса синтеза $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ в сравнении с экспериментальными данными, (а) рассчитанный с потенциалами V_{M1} V_{M2} и V_D , (б) рассчитанный с потенциалами V_{M1}^a , V_{M2}^a , V_D^a и V_D^b

Как видно из рисунка 2(а), наши модифицированные потенциальные модели V_{M1} и V_{M2} хорошо согласуются с экспериментом при средних и низких энергиях. Однако эти потенциалы переоценивают новые экспериментальные данные LUNA коллаборации при сверхнизких энергиях из-за различной энергетической зависимости. А модель V_D сильно недооценивает экспериментальные данные для астрофизического S-фактора. На основе анализа численных расчетов установлено, что $E1$ -переходы $S\rightarrow P_{3/2}$ и $S\rightarrow P_{1/2}$ играют главную роль в процессе синтеза $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$. Поэтому, S -волновые параметры (глубина и ширина) потенциалов V_{M1} , V_{M2} и V_D могут быть модифицированы и подогнаны к экспериментальным данным S-фактора. Результирующие V_{M1}^a , V_{M2}^a , V_D^a и V_D^b (рис. 2 (б)) потенциалы воспроизводят экспериментальные значения астрофизического S-фактора LUNA коллаборации и новые данные в солнечном Гамовском максимуме $S_{34}(23 \pm 6 \text{ кэВ}) = 0.548 \pm 0.054 \text{ кэВ бн}$. Для сравнения, на рисунках 2(а) и 2 (б) также приведены результаты наиболее реалистических микроскопических

моделей NCSM (J.D. Eraly *et al.*, Phys. Lett. B757, 430 (2016)) и FMD (T. Neff Phys. Rev. Lett. 106, 042502 (2011)). Результаты этих расчетов в целом хорошо согласуются с экспериментальными данными. Однако эти модели дают различные энергетические зависимости для обоих процессов захвата.

Далее, найденные нами потенциалы V_{M1} , V_{M2} и исходный V_D для ядра ${}^7\text{Be} \rightarrow \alpha + {}^3\text{He}$, после соответствующей модификации кулоновской части, применены к описанию зеркального процесса захвата $\alpha + {}^3\text{H} \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$. Нами установлено, что эти потенциалы хорошо воспроизводят энергии связанных состояний $E(3/2^-) = -2.46$ МэВ и $E(1/2^-) = -1.99$ МэВ ядра ${}^7\text{Li}$, а также фазовые сдвиги в S , P , D , F - волнах. Астрофизический S -фактор реакции синтеза $\alpha + {}^3\text{H} \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$ оценен с теми же параметрами потенциалов. Как видно из рисунков 3 (а) и (б), согласие теоретических оценок с экспериментальными данными достаточно хорошее. Однако надо заметить, что экспериментальные данные довольно стары, поэтому необходимы новые эксперименты.

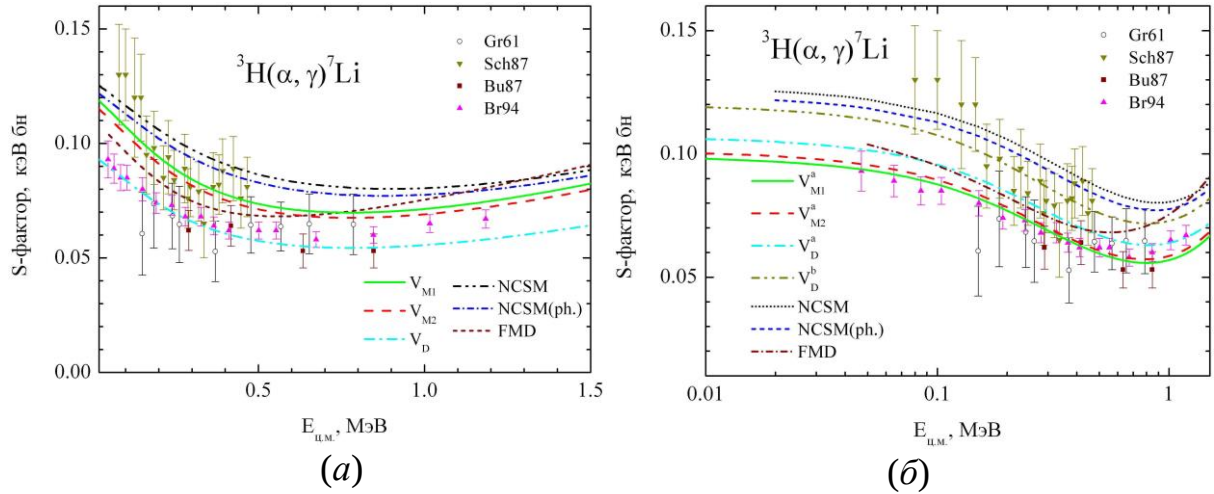


Рис. 3. Астрофизический S -фактор процесса синтеза $\alpha + {}^3\text{H} \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$ в сравнении с экспериментальными данными, (а) рассчитанный с потенциалами V_{M1} , V_{M2} и V_D , (б) рассчитанный с потенциалами V_{M1}^a , V_{M2}^a , V_D^a и V_D^b

На основе полученного астрофизического S -фактора для обоих зеркальных процессов вычислены скорости реакций радиационного захвата $\alpha + {}^3\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$ и $\alpha + {}^3\text{H} \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$ при звездном температурном интервале ($10^6 \text{ K} \leq T \leq 10^9 \text{ K}$). Скорость реакции синтеза оценивается на основе следующей формулы (Angulo *et al.*, NPA656, 3 (1999)):

$$N_{34}(\sigma v) = 3.7313 \times 10^{10} A^{-1/2} T_9^{-3/2} \int_0^\infty \sigma(E) E \exp(-11.605E / T_9) dE \quad (2)$$

где $A = A_1 \cdot A_2 / (A_1 + A_2)$ – приведенные массовые числа кластеров, T_9 – температура, измеренная в единицах 10^9 K .

На рис. 4 показаны рассчитанные нами в рамках моделей V_{M1}^a и V_D^a скорости реакции синтеза $\alpha + {}^3\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$ и $\alpha + {}^3\text{H} \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$, разделенные (нормированные) на экспериментальных данных NACRE 1999 в сравнении с другими теоретическими моделями. Как видно из рисунков, результаты в

рамках предложенной нами модели хорошо согласуются с другими модельными расчетами.

Используя полученные результаты для скорости реакции $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ в рамках двухчастичной потенциальной модели, нами оценена начальная распространенность изотопа ${}^7\text{Li}/\text{H}$ после Большого Взрыва с помощью общедоступного программного пакета PARTHENOPE с потенциалами V_{M1}^a : ${}^7\text{Li}/\text{H} = (4.81 \pm 0.12) \times 10^{-10}$ и V_{D}^a : ${}^7\text{Li}/\text{H} = (4.92 \pm 0.13) \times 10^{-10}$.

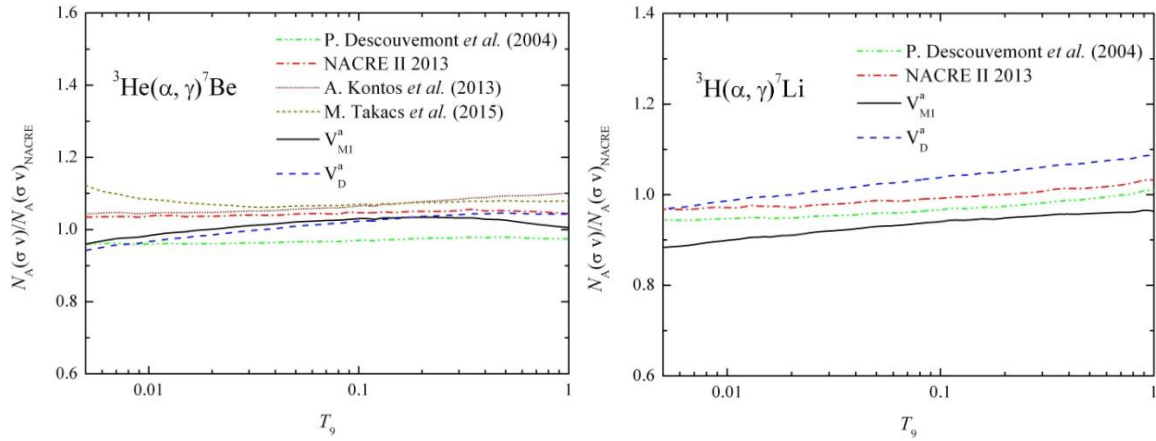


Рис. 4. Относительная скорость реакции для процессов $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ и $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$, нормированные на экспериментальных данных NACRE 1999

Далее, вставляя результаты расчета скорости реакции $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ в цепочку термоядерных процессов, получим следующие оценки: ${}^7\text{Li}/\text{H}=(5.06\pm 0.13)\times 10^{-10}$ и ${}^7\text{Li}/\text{H}=(5.08\pm 0.13)\times 10^{-10}$ для потенциалов V_{M1}^a и V_{D}^a , соответственно. При вычислении распространенности с помощью программы нуклеосинтеза Большого Взрыва в качестве входного параметра было использовано значение барионной плотности из последних данных Планк коллаборации 2016 $\Omega_b h^2 = 0.02229^{+0.00029}_{-0.00027}$. Время жизни нейтрона $\tau_n = 880.3 \pm 1.1$ секунд получено из работы коллаборации Particle Data Group 2014.

Полученные результаты для распространенности изотопа ${}^7\text{Li}/\text{H} = (5.08 \pm 0.13) \times 10^{-10}$ хорошо согласуются с результатами ${}^7\text{Li}/\text{H} = (5.0 \pm 0.3) \times 10^{-10}$ и ${}^7\text{Li}/\text{H} = (5.61 \pm 0.26) \times 10^{-10}$, приведенными в теоретических работах М. Р. Takács *et al.*, Phys. Rev. D91, 123526 (2015) и А. Сос *et al.*, Phys. Rev. D92, 123526 (2015), соответственно.

В третьей главе «Оценка $E2$ S – фактора реакции радиационного захвата $d(\alpha, \gamma){}^6\text{Li}$ в двухчастичной потенциальной модели» приведены результаты расчета для прямого ядерного захвата $d(\alpha, \gamma){}^6\text{Li}$ в рамках двухчастичной потенциальной кластерной модели. Хорошо известно, что ядра ${}^6\text{Li}$ образовались главным образом в результате Большого Взрыва посредством реакции захвата



при низких астрофизических энергиях $50 \leq E \leq 400$ кэВ. Надо отметить, в двухчастичной модели вклад запрещенного $E1$ -перехода нельзя вычислить прямым путем, поскольку начальное и конечное состояния имеют нулевой изоспин, и поэтому $\Delta T = 0$. Эта проблема возникает не только для αd -захвата, но и также для других реакций с участием ядер $N=Z$, в которых изоспины всех частиц равны нулю: $d(d, \gamma)^4\text{He}$, $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$, $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$, $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, \gamma)^{24}\text{Mg}$ и др.

Тем не менее, в научной литературе применяется так называемый «рецепт точной массы», который использует точные значения экспериментальных масс альфа частицы и дейтрона. Он не основан на изоспиновом формализме, поэтому не может претендовать на полноту описания процесса. Несмотря на это, метод в течение большого периода времени применялся для описания изучаемого процесса $d(\alpha, \gamma)^6\text{Li}$. Теперь, вопрос стоит по другому: что получится, если работать в изоспиновом формализме. Поэтому, в этой главе мы оцениваем только вклад $E2$ -перехода в астрофизический S -фактор реакции захвата $\alpha + d \rightarrow ^6\text{Li} + \gamma$ в рамках двухчастичной потенциальной модели.

Что касается $M1$ -перехода для реакции захвата $\alpha + d \rightarrow ^6\text{Li} + \gamma$, его вклад в целом равен нулю из-за ортогональности волновых функций связанного состояния и состояния рассеяния в 3S_1 -волне.

В этой главе вклад электрического квадрупольного перехода в астрофизический S -фактор процесса $\alpha + d \rightarrow ^6\text{Li} + \gamma$ вычислен на основе αd -потенциалов простой гауссовой формы, правильно описывающих фазовые сдвиги в 3S_1 , 3P_0 , 3P_1 , 3P_2 , 3D_1 , 3D_2 , 3D_3 -парциальных волнах, а также энергию связи и АНК связанного состояния в S -волне. Мы будем основываться на αd -потенциалах из работы С.Б. Дубовиченко (PHAN73, 1526 (2010)), но для расчета волновой функции используем алгоритм Нумерова, погрешность которого имеет порядок $O(h^6)$. Такая высокая точность позволяет получить волновые функции, которые прекрасно согласуются с известной асимптотикой в каждой парциальной волне.

Далее мы покажем, что потенциал в S -волне можно модифицировать так, чтобы он правильно воспроизводил АНК, при этом энергия связи ядра воспроизводилась бы, как и раньше, а качество описания экспериментальных фазовых сдвигов лучше согласовывалось с более новыми данными, по сравнению со старыми.

Для наглядной демонстрации сходимости теоретических результатов на рис. 5 показан вклады $E2$ переходов в S -фактор для реакции $d(\alpha, \gamma)^6\text{Li}$, рассчитанные с потенциалом V_M при различных значениях числа узловых точек $N = 200, 400, 600, 800-2000$ в широком интервале энергии. Поскольку шаг сетки фиксирован, $h=0.05$ фм, границы интеграла соответственно равны 10, 20, 30, 40-100 фм. Из рисунка видно, что для достижения полной сходимости границу интеграла необходимо брать не меньше 40 фм.

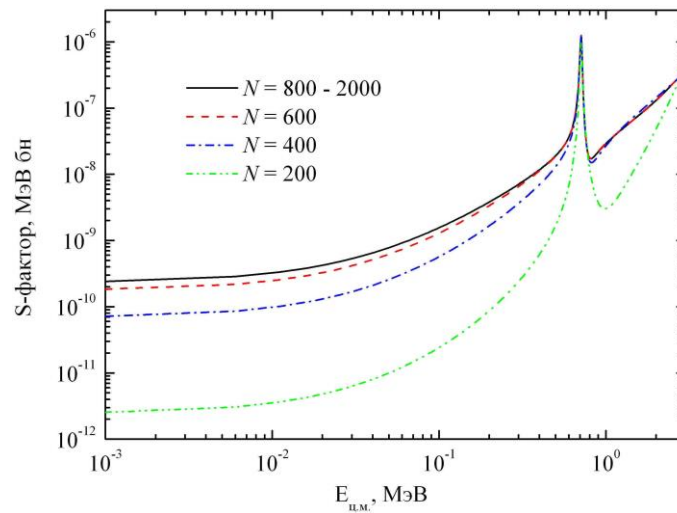


Рис. 5. Сходимость вклада $E2$ перехода в S -фактор реакции $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$, рассчитанные с потенциалом V_M при различных значениях числа узловых точек N

На рис. 6 показан вклад $E2$ -перехода в астрофизический S -фактор для реакции синтеза $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$, рассчитанный с потенциалами V_M и V_D в сравнении с экспериментальными данными.

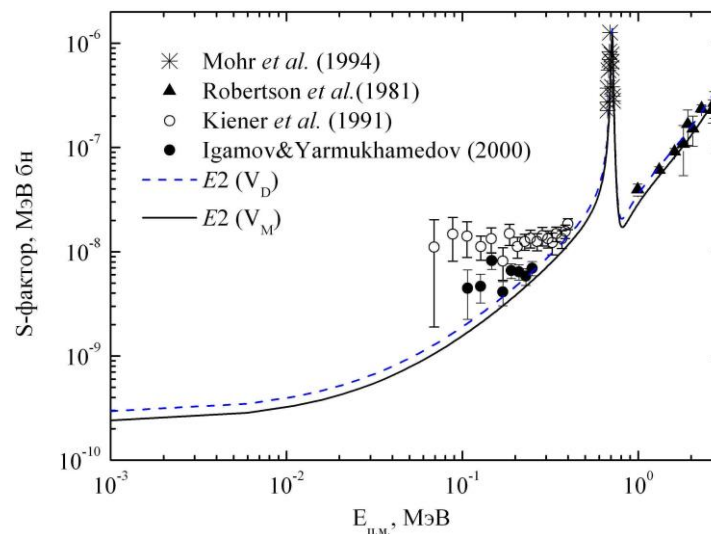


Рис. 6. Вклад $E2$ перехода в астрофизический S -фактор для реакции синтеза $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$, рассчитанный с потенциалами V_D и V_M в сравнении с экспериментальными данными

В четвертой главе «Теоретический анализ астрофизического S -фактора, скорости реакции синтеза $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ и распространенности элемента ${}^6\text{Li}$ в модели трех тел» приведены результаты расчетов астрофизического S -фактора и скорости реакции $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$, а также начальной распространенности элемента ${}^6\text{Li}$ в модели трех тел. Изложен трехчастичный формализм, основанный на методе гиперсферических гармоник на Лагранж-меш базисе (P. Descouvemont, D. Baye PRC67, 044309

(2003)). Трехчастичная волновая функция ядра ${}^6\text{Li} = \alpha + n + p$ имеет около 0.5 % изотриплетной ($T=1$) компоненты. Как было указано в предыдущей главе, запрещенный $E1$ -переход в двухчастичной модели нельзя оценить с учетом изоспинового формализма. Поэтому развитие трехчастичного формализма с учетом вклада $E1$ -перехода является наиболее важным и реалистическим для изучения данного процесса. Тем более ожидается, что этот переход доминирует при малых энергиях.

Экспериментальные измерения этого процесса при энергиях выше и около резонансной энергии $E(3^+) = 0.711$ МэВ достаточно хорошо проанализированы в работах P. Mohr *et al.*, Phys. Rev. C50, 1543 (1994); R.G.H. Robertson *et al.*, Phys. Rev. Lett. 47, 1867 (1981). Но при более низких энергиях получение информации о сечении процесса захвата экспериментальным путем является сложной задачей J. Kiener *et al.*, Phys. Rev. C44, 2195 (1991); F. Hammachi *et al.*, Phys. Rev. C82, 065803 (2010) из-за кулоновского отталкивания взаимодействующих заряженных частиц. Тем не менее, в последние годы экспериментальная группа LUNA коллаборации наконец добилась успеха. В 2014 году впервые ей удалось измерить прямым методом астрофизический S-фактор при двух энергиях $E=94$ кэВ и $E=134$ кэВ (M. Anders *et al.*, Phys. Rev. Lett. 113, 042501 (2014)). Второй раз в 2017 году измерения были проведены сразу в четырех астрофизически важных энергиях $E=80, 93, 120$ и 133 кэВ (D. Trezzi *et al.*, Astroparticle Physics 89, 57, (2017)) в системе центра масс. Далее мы используем развитую нами трехчастичную модель на основе метода гиперсферических гармоник на Лагранж-меш базисе, чтобы описать полученные новые экспериментальные данные изучаемого процесса.

Трехчастичная волновая функция ядра ${}^6\text{Li}$ была рассчитана на основе $\alpha + N$ потенциалов Ворончева (Модель А) и Канады (Модель Б). Во входном двухнуклонном канале ($p+n$) был использован центральный потенциал Миннесоты, который воспроизводит энергию связи дейтрона $E_{\text{св}} = -2.20$ МэВ. Получены численные результаты для $E1$ - и $E2$ -переходов и соответствующие оценки для астрофизического S-фактора, скорости реакции и распространенности элемента ${}^6\text{Li}$. Показано, что небольшая (около 0.5 %) изотриплетная ($T=1$) компонента конечной волновой функции ядра ${}^6\text{Li}$ играет ключевую роль для описания процесса при низких астрофизических энергиях.

На рисунке 7 приведены полученные оценки для $E1$ астрофизического S-фактора для начальных альфа-дейтронных парциальных волн ${}^3P_0, {}^3P_1, {}^3P_2$ в трехчастичной модели с волновой функцией ядра ${}^6\text{Li}$, рассчитанной с $\alpha + N$ потенциалом Ворончева и др. Эта волновая функция имеет изотриплетную компоненту, норма квадрата которой равна $5.3 \cdot 10^{-3}$.

С другой стороны, $E2$ S-фактор сильно зависит от асимптотики интеграла перекрывания волновых функций ядер дейтрона и ${}^6\text{Li}$ в S- и D-волнах. Однако трехчастичная гиперсферическая волновая функция не дает правильную асимптотику. Асимптотику можно исправить на расстоянии 5-10 фм, которое является границей внутренней и асимптотической областей.

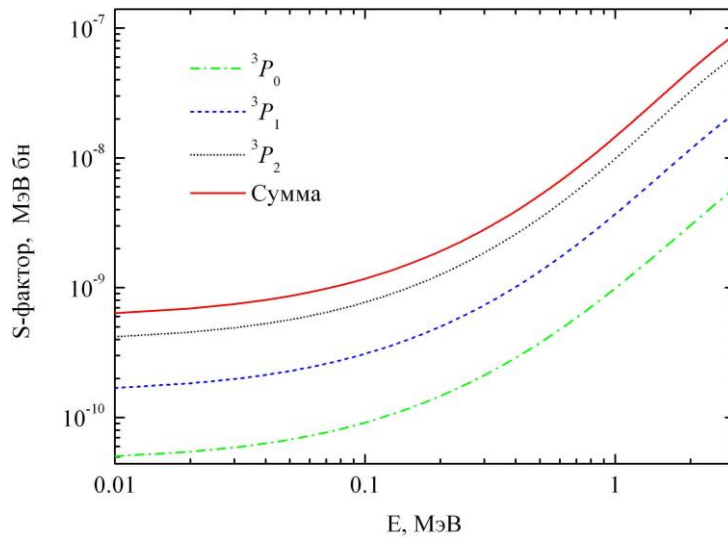


Рис. 7. Парциальные $E1$ астрофизические S -факторы

В приведенном матричном элементе интеграл перекрытия относительного движения $\alpha+d$ в S - и D -волнах выражается с помощью волновой функции дейтрона и трехчастичной волновой функции ядра ${}^6\text{Li}$ в гиперсферическом базисе:

$$I_L(R) = \langle \Psi_d(\vec{r}) Y_L(\hat{R}) | \Psi_{{}^6\text{Li}}(\vec{R}, \vec{r}) \rangle_{(\vec{r}, \hat{R})}, \quad (4)$$

где интеграл берется по $\vec{r}$ и по угловой части переменной $\vec{R}$. Для системы заряженных частиц асимптотика интеграла перекрытия на больших расстояниях определяется функцией Уиттекера:

$$I_L(R) \xrightarrow{R \rightarrow \infty} C_{ad}^L W_{-\eta_{ad}, L+1/2}(2k_{ad} R) / R \quad (5)$$

Отметим, что АНК играет ключевую роль в ядерно-астрофизических процессах, протекающих при низких энергиях, и он характеризует хвост волновой функции относительного движения αd -системы на больших расстояниях.

В таблице 1 приведены рассчитанные нами значения АНК для ${}^6\text{Li} \rightarrow \alpha+d$ конфигурации в S - и D -волнах на основе формул (4) и (5) с использованием трехчастичной волновой функции. Из таблицы можно увидеть стабильность значений АНК, найденных по формуле (5) на расстояниях $R_0 = 4\text{--}10$ фм.

Таблица 1
Значения АНК C_{ad} (фм $^{-1/2}$) для ${}^6\text{Li} \rightarrow \alpha+d$, рассчитанные в модели трех тел

R_0 , фм		4	5	5.5	6	7	8	9	10
$L=0$	Модель А	1.944	2.100	2.116	2.115	2.087	2.038	1.965	1.863
	Модель Б	1.932	2.043	2.051	2.046	2.017	1.970	1.900	1.801
$L=2$	Модель А ($\times 10^{-2}$)	1.932	2.124	2.159	2.172	2.168	2.137	2.080	1.991
	Модель Б ($\times 10^{-2}$)	1.988	2.152	2.179	2.188	2.180	2.148	2.091	2.001

Для исправления асимптотики волновой функции относительного движения $\alpha+d$ -системы используем формулу (5) выбирая оптимальное значение АНК $C_{ad}=2.116 \text{ фм}^{-1/2}$, соответствующего $R_0=5.5 \text{ фм}$, которое является границей внутренней и асимптотической областей (рис. 8). На рисунке 9 приведены интегралы перекрывания в S - и D -волнах, исправленные на расстоянии 5.5 фм с помощью замены интегралов перекрывания на соответствующие асимптотические виды по формуле (5). Как видно из рисунка, асимптотика интеграла перекрывания существенно улучшается, что является важным для описания процесса синтеза.

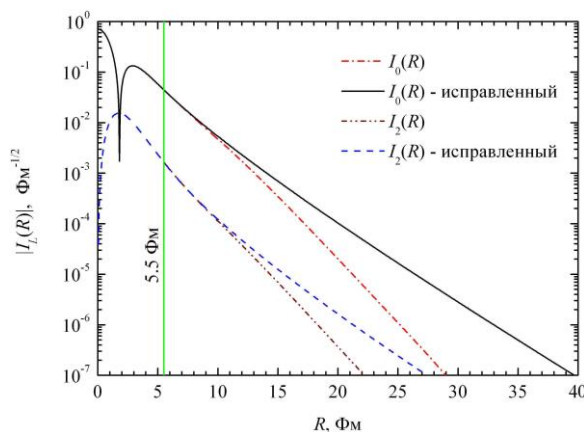


Рис. 8. Интегралы перекрывания волновых функций ядер ${}^6\text{Li}$ и дейтрона

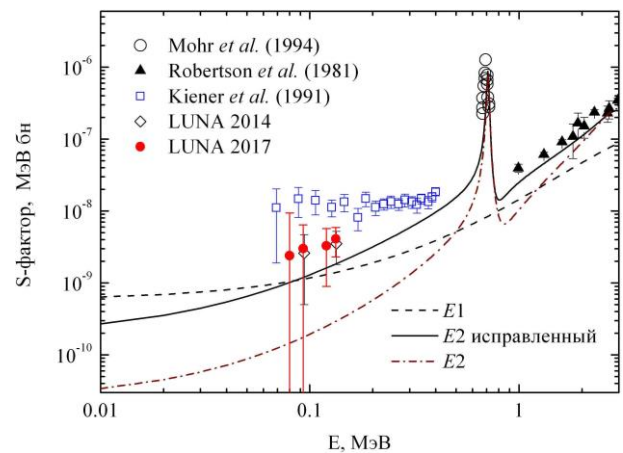


Рис. 9. Сравнение $E1$ и $E2$ S-факторов с экспериментальными данными

На рис.10 представлены теоретические оценки для астрофизического S-фактора реакции синтеза $\alpha+d \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$ в трехчастичной модели с волновой функцией ядра ${}^6\text{Li}$, рассчитанной с $\alpha+N$ потенциалом Ворончева и др. (Модель А) и с потенциалом Канада и др. (Модель Б) в сравнении с экспериментальными данными нескольких исследовательских групп.

Отметим, что волновая функция ядра ${}^6\text{Li}$, рассчитанная с потенциалом Канады имеет изотриплетную компоненту, норма квадрата которой равна $4.19 \cdot 10^{-3}$, то есть меньше, чем в случае с потенциалом Ворончева и др. Именно поэтому рассчитанные значения S-фактора при малых энергиях существенно отличаются для двух этих потенциалов.

Реакция радиационного захвата $\alpha+d \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$ представляет исключительный интерес как прямого синтеза образования изотопа ${}^6\text{Li}$ при первичном нуклеосинтезе. Скорости реакции процесса синтеза $\alpha+d \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$ рассчитаны на основе выражения (2) в рамках трехчастичных Моделей А и Б в температурном интервале $10^6 \text{ K} \leq T \leq 10^{10} \text{ K}$.

На рис. 11 показаны рассчитанные нами в рамках Моделей А и Б скорости реакции синтеза $\alpha+d \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$, разделенные (нормированные) на экспериментальных данных NACRE 1999 в сравнении с данными NACRE 2013, и с новыми данными LUNA 2017 коллаборации, а также с

теоретической кривой из работы A. Grassi *et al.*, Phys. Rev. C96, 045807 (2017).

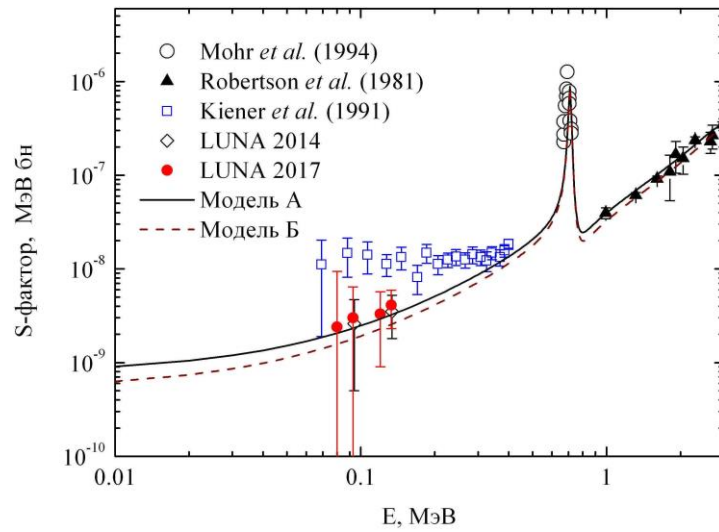


Рис. 10. Астрофизический S-фактор для процесса $\alpha+d \rightarrow {}^6\text{Li}+\gamma$ в модели трех тел, рассчитанный с $\alpha+N$ потенциалами Ворончева и др. (Модель А) и Канады (Модель Б) в сравнении с экспериментальными данными

Как видно из рисунка, наши результаты в рамках Модели А хорошо согласуются с кривой LUNA 2017 коллаборации в пределах экспериментальных погрешностей, которые являются наиболее точными. При этом форма кривых в Моделях А и Б совпадает с кривой LUNA 2017, а абсолютные значения данных LUNA 2017 коллаборации хорошо воспроизводятся в Модели А.

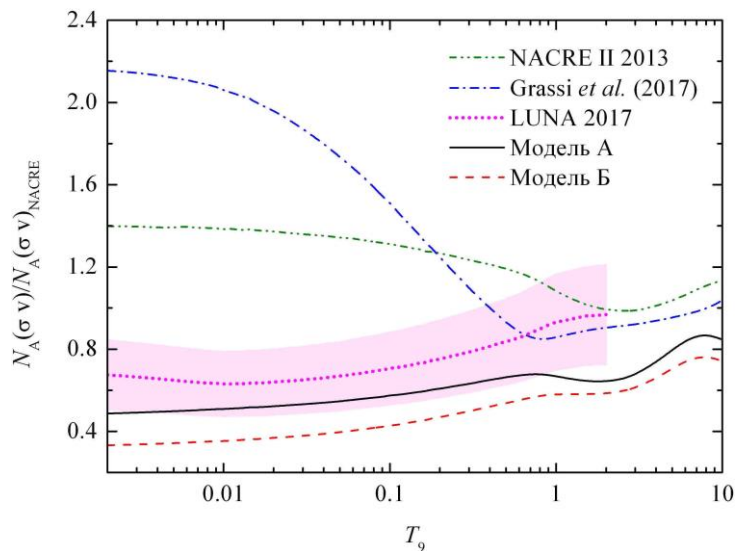


Рис. 11. Относительная скорость реакции для процесса $\alpha+d \rightarrow {}^6\text{Li}+\gamma$, нормированные на экспериментальных данных NACRE 1999

Далее, на основе рассчитанных нами скоростей реакции синтеза $\alpha+d \rightarrow {}^6\text{Li}+\gamma$, оценены распространенности элемента ${}^6\text{Li}$ при первичном

нуклеосинтезе с помощью программного пакета PARTHENOPE. Для величины ${}^6\text{Li}/\text{H}$ в рамках Моделей А и Б получены оценки $(0.67 \pm 0.01) \times 10^{-14}$ и $(0.50 \pm 0.01) \times 10^{-14}$, соответственно.

Полученный нами результат для начальной распространенности изотопа ${}^6\text{Li}/\text{H} = (0.67 \pm 0.01) \times 10^{-14}$ в процессе первичного нуклеосинтеза хорошо согласуется с новыми данными LUNA коллаборации ${}^6\text{Li}/\text{H} = (0.80 \pm 0.18) \times 10^{-14}$ в пределах экспериментальных погрешностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам на тему «Астрофизические S-факторы и скорости реакций $d(\alpha, \gamma){}^6\text{Li}$, ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ и ${}^3\text{H}(\alpha, \gamma){}^7\text{Li}$ при низких энергиях в рамках кластерной модели» можно сделать следующие выводы:

1. Показано, что $E1$ -переход из начальной S-волны в конечную P-волну для процессов $\alpha + {}^3\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$ и $\alpha + {}^3\text{H} \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$ дает доминантный вклад в астрофизический S-фактор. На этой основе показано, что есть возможность описания новых данных для S-фактора в Гамовском пике, полученных из наблюдения нейтринных осцилляций и данных прямых измерений LUNA коллаборации. Также показано, что экспериментальные данные по реакции синтеза $\alpha + {}^3\text{H} \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$ могут быть хорошо описаны с помощью тех же потенциалов, которые были построены для зеркального ядра.

2. На основе вычисленных значений астрофизического S-фактора оценены скорости реакции радиационного захвата $\alpha + {}^3\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$ и $\alpha + {}^3\text{H} \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$ в звездном температурном интервале. С помощью рассчитанных скоростей реакций получены теоретические оценки для начальной распространенности изотопа ${}^7\text{Li}/\text{H} = (5.08 \pm 0.13) \times 10^{-10}$ при первичном нуклеосинтезе, хорошо согласующиеся с новыми данными LUNA коллаборации ${}^7\text{Li}/\text{H} = (5.0 \pm 0.3) \times 10^{-10}$.

3. Электрический квадрупольный переход астрофизического S-фактора $d(\alpha, \gamma){}^6\text{Li}$ рассчитан на основе двухчастичной модели с αd -потенциалами простой Гауссовой формы, правильно описывающей фазовые сдвиги в 3S_1 , 3P_0 , 3P_1 , 3P_2 , 3D_1 , 3D_2 , 3D_3 -парциальных волнах, а также энергию связи и АНК связанного состояния в S-волне. Модификацией S-волнового α - d потенциала из работы Дубовиченко получено лучшее описание фазовых сдвигов и АНК, при этом воспроизведение энергии связи ядра ${}^6\text{Li}$ сохранено. Для расчета волновых функций был использован алгоритм Нумерова, который имеет высокую точность и обеспечивает правильную асимптотику волновой функции в каждой парциальной волне. Показано, что хорошая сходимость оценок вклада $E2$ -перехода в астрофизический S-фактор достигается при увеличении границы интегрирования вплоть до 40 фм.

4. Астрофизический S-фактор и скорость реакции $\alpha + d \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$, а также распространенность элемента ${}^6\text{Li}$ рассчитаны в рамках модели трех тел, основанной на методе гиперсферических гармоник на Лагранж-меш базисе.

$E2$ -переход рассчитан с помощью исправленной на расстоянии 5.5 фм асимптотики интеграла перекрывания волновых функций дейтрона и ядра ${}^6\text{Li}$ в S и D волнах. Показана хорошая сходимость численных результатов для парциальных $E1$ - и $E2$ -переходов в конечное трехчастичное состояние.

5. Показано, что изотриплетная компонента около 0.5 % конечной волновой функции ядра ${}^6\text{Li}$ играет ключевую роль для описания процесса при низких астрофизических энергиях. Впервые показано, что новые экспериментальные данные LUNA коллаборации для скорости реакции синтеза $\alpha + d \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$ хорошо воспроизводятся в надежной трехчастичной модели с изоспиновым $E1$ -переходом. Полученные нами результат для начальной распространенности изотопа ${}^6\text{Li}/\text{H} = (0.67 \pm 0.01) \times 10^{-14}$ при первичном нуклеосинтезе хорошо согласуется с новыми данными LUNA коллаборации ${}^6\text{Li}/\text{H} = (0.80 \pm 0.18) \times 10^{-14}$ в пределах экспериментальных погрешностей.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSC.27.06.2017.FM/T.33.01 ON AWARD OF
SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS,
ASTRONOMICAL INSTITUTE, NATIONAL UNIVERSITY OF
UZBEKISTAN**

INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS

TURAKULOV SOBIR ABDUMUMINOVICH

**ASTROPHYSICAL S-FACTORS AND RATES OF THE REACTIONS
 $d(\alpha,\gamma)^6\text{Li}$, $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ AND $^3\text{H}(\alpha,\gamma)^7\text{Li}$ IN THE FRAMEWORK OF
CLUSTER MODEL AT LOW ENERGIES**

01.04.08 – Atomic nucleus and elementary particle physics. Accelerator facility

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD)
ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

Tashkent – 2019

The theme of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under No. B2018.2.PhD/FM254.

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at www.inp.uz and on the website of “Ziyonet” informational and educational portal at www.ziyonet.uz.

Scientific consultant:

Tursunov Ergash Makhkamovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Official opponents:

Mirtadjieva Karamat Takhirovna
Doctor of Physical and Mathematical sciences

Olimov Khusniddin Kosimovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Leading organization:

**Physical-Technical Institute of the Academy of Sciences
of the Republic of Uzbekistan**

The defense of the dissertation will be held on “___” _____ 2019, at ___ at the meeting of the Scientific Council No. DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics, Astronomical Institute, National University of Uzbekistan (Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. tel. (+99871) 289-31-41, fax (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through in the Information Resource Centre of the Institute of Nuclear Physics (registered under No.____) Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. tel. (+99871) 289-31-19.

The abstract of dissertation was distributed on “___” _____ 2019.
(Registry record No. ____ dated “___” _____ 2019.)

M.Yu. Tashmetov

Chairman of the Scientific Council for Awarding
Doctor of physical and mathematical sciences, Professor

Z. Kanokov

Scientific Secretary of the Scientific Council for Awarding
Doctor of physical and mathematical sciences, docent

I. Nuritdinov

Chairman of the Scientific Seminar of the Scientific
Council on Award of Scientific Degrees,
Doctor of physical and mathematical sciences, Professor

INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

Topicality and relevance of the theme of the dissertation. Nowadays experimental and theoretical studies of the direct nuclear processes $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$, $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ and $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ are of exceptional interest for solving the cosmological problem of lithium abundance in the theory of the standard model of the Universe. The study of these reactions are important for modern nuclear astrophysics and cosmology, since they are the main sources of the formation of ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ nuclei in primordial nucleosynthesis after the Big Bang. The process $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ is additionally important for studying kinetics of the solar crust, since it is the starting point for the second and third chains of the pp-cycle hydrogen burning on the Sun. On the other hand, the ${}^7\text{Be}$ nucleus plays the dominant role in the neutrino formation processes in the standard solar model.

Presently precision measurements of the processes $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$, $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ and $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ at low astrophysical energies are being carried out at research centers around the world. Obtaining direct experimental data from these reactions is difficult due to the Coulomb barrier of colliding charged particles. However, in recent years, the leading experimental collaboration groups of European countries LUNA, ERNA, and the Laboratory of nuclear problem (LNP) at JINR (Dubna, Russia) have been able to carry out direct experimental measurements on these three important processes. In the framework of this dissertation work, two-body and three-body models are developed based on the NN-, αN -, αd -, $\alpha{}^3\text{H}$ -, $\alpha{}^3\text{He}$ -interaction potentials. The two-body model is based on the highly efficient Numerov algorithm. It provides correct asymptotics which is of key importance for the description of the radiative capture process. In the two-body model, it is problematic to take into account the isospin-forbidden $E1$ transition in the $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ process. However, in the scientific literature, models based on exact experimentally measured particle masses are used, but they cannot directly account for isospin transitions. The realistic three-body model is based on the wave function of the final state of the ${}^6\text{Li}$ nucleus, calculated by the hyperspherical harmonics method on the Lagrange-mesh basis. This model allows one to correctly describe the important process of modern nuclear astrophysics of radiation capture $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$, taking into account the contribution of the forbidden $E1$ transition. The development of calculation methods in the framework of the three-body approach is a qualitatively new stage in the study of nuclear-astrophysical processes.

Today in our Republic, much attention is paid to the development of nuclear physics, in particular, experimental and theoretical research works in the field of atomic nucleus and elementary particle physics, as well as fundamental research in this direction at the world level. The directions of these fundamental research, which are of great importance for the progress of science and its further application in practice in our country, are reflected in the Strategy³ for Further Development of

³ Decree of the President of the Republic of Uzbekistan “On the Strategy for the Further Development of the Republic of Uzbekistan” No. 4947 of 07 February 2017

the Republic of Uzbekistan for 2017-2021. The performed researches in this work are directly related to the problems of nuclear astrophysics and the physics of controlled thermonuclear processes, including nuclear power, which is the leading edge of modern researches in the world. The present investigation complies with tasks stipulated in Government regulatory documents and Decree of the President of the Republic of Uzbekistan UP-4947 “On Strategy of Actions for Further Development of the Republic of Uzbekistan for 2017-2021” dated of 2 February 2017, UP-4958 “On further improvement of postgraduate education” dated of 16 February 2017, in the Resolutions of the President of the Republic of Uzbekistan PP-2789 “On measures for further improvement of activities of the Academy of Sciences, organization, management and financing of research” dated of 17 February 2017.

Relevance of the research to the priority areas of science and technology development of the Republic of Uzbekistan. The dissertation research was conducted in accordance with the priority direction of development of science and technology in the Republic of Uzbekistan: II. “Energetics, energy and resource efficiency”.

Degree of study of the problem. As of today, leading scientists of the world, for example, Russian scientists (L.D. Blokhintsev, G.G. Ryzhikh, etc.), American scientists (A.M. Mukhamedzhanov, C. Bertulani, K.M. Nollet, etc.), Belgian scientists (P. Descouvemont, D. Baye, etc.), Japanese scientists (T. Kajino, and others), Kazakh scientists (S. B. Dubovichenko, N. A. Burkova, etc.) and others are conducting theoretical studies of the reactions of radiation capture. At present, thanks to the development of modern experimental technology, it is possible to make direct measurements of the astrophysical S-factor of the radiation capture reactions $\alpha + d \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$, $\alpha + {}^3\text{H} \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$ and $\alpha + {}^3\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$ at low astrophysical energies. Recently obtained experimental data from the LUNA, ERNA, and LNP at JINR (Dubna, Russia) on the above three processes require the development of realistic models that can explain the new data and mechanisms for the formation of light nuclei.

These processes have been studied in the world, both on the basis of macroscopic models (A.M. Mukhamedzhanov, L.D. Blokhintsev, P. Descouvemont, C. Bertulani, T. Kajino, S. B. Dubovichenko and others) and in the framework of microscopic (T. Neff, K.M. Nollet, J.D. Eraly, P. Navratil and others) approximations. For the first process, there are still no complete microscopic calculations, but several microscopic models (NCSMC, FMD) have been applied for the synthesis of ${}^7\text{Be}$, ${}^7\text{Li}$ nuclei, which describe the corresponding processes. However, they give different energy dependencies. These calculations are also highly sensitive to the choice of the used NN potentials. A question, what theoretical estimates can be obtained in realistic two-body and three-body models that can explain the LUNA data, remains open.

In addition, these problems are studied in the research works of Uzbek scientists R.Yarmukhamedov, B.F. Irgaziev and others in the framework of a modified two-body potential model and in the distorted wave Born approximation

method. In particular, using the above methods from analyzing direct experimental data for the $\alpha+^3\text{He}\rightarrow^7\text{Be}+\gamma$ and $\alpha+^3\text{H}\rightarrow^7\text{Li}+\gamma$ reactions, asymptotic normalization coefficients (ANC) are extracted and extrapolated to obtain theoretical estimates at extremely low experimentally inaccessible energies. In these studies, the $\alpha+d\rightarrow^6\text{Li}+\gamma$ process was investigated within the framework of a two-body potential model, which uses exact experimental masses of colliding particles to take into account the contribution of the $E1$ -transition forbidden by the isospin selection rule. To accurately account for the isospin transition in this process, it is necessary to develop three-body models based on the realistic wave function of the final ^6Li nucleus, which has a small fraction (about 0.5%) of the isotriplet component. There is a hope that this small component allows one to describe the new experimental data of the LUNA collaboration with a good accuracy.

Connection of dissertational research with the plans of scientific research works of the scientific research institution, where the dissertation was conducted. The dissertation work was carried out within the framework of research projects at the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan on the following topics: F2- FA-F117 “Investigations of the dynamic properties of the fundamental characteristics of nuclei for nuclear astrophysics” (2012-2016) and OT-F2-25 “Development of precise three-body methods for solving problems of nuclear astrophysics and hadron therapy” (2017-2020).

The aim of the research is to establish mechanisms of formation of light nuclei in astrophysical processes $\alpha+d\rightarrow^6\text{Li}+\gamma$, $\alpha+^3\text{H}\rightarrow^7\text{Li}+\gamma$ and $\alpha+^3\text{He}\rightarrow^7\text{Be}+\gamma$ at low energies and to estimate astrophysical S-factors, reaction rates and primordial abundances of nuclides $^6,^7\text{Li}$ in realistic cluster models.

The tasks of the research:

- to develop a two-body potential model for calculating astrophysical S-factors (cross sections) and rates of nuclear-astrophysical processes based on the highly efficient Numerov algorithm;

- to obtain explicit analytical expressions for the reduced probabilities of the $E1$ -, $E2$ - electric transitions and the magnetic $M1$ - transition in the two-body model, to perform numerical calculations and to determine the partial contributions for the full astrophysical S-factor;

- to estimate the contribution of the rate of the radiative capture reactions $\alpha+^3\text{H}\rightarrow^7\text{Li}+\gamma$ and $\alpha+^3\text{He}\rightarrow^7\text{Be}+\gamma$ to form the ^7Li element during primordial nucleosynthesis;

- to calculate the astrophysical $E2$ S factor of the radiative capture reaction $\alpha+d\rightarrow^6\text{Li}+\gamma$ in the two-body model;

- to develop three-body potential model based on the hyperspherical Lagrange-mesh method for estimating astrophysical S-factors (cross sections) and reaction rates of radiative capture;

- to obtain explicit analytical expressions for the matrix elements of the $E1$ and $E2$ electric transitions in the three-body model; to perform numerical calculations for the partial contributions of electrical transitions in the developed model;

to estimate the rate of the radiative capture reaction $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ in the three-body model and the abundance of the element ${}^6\text{Li}$ during the primordial nucleosynthesis.

The objects of the research are the astrophysical S-factors and reaction rates of formation of ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ and ${}^7\text{Be}$ light nuclei in the radiation capture processes; primordial abundances of light elements ${}^6\text{Li}$ and ${}^7\text{Li}$ after the Big Bang.

The subjects of the research are the nuclear astrophysical reactions of light nuclei synthesis, electromagnetic transitions; two-body and three-body structure of light nuclei, two-body NN-, αN -, αd -, $\alpha{}^3\text{H}$ -, $\alpha{}^3\text{He}$ - interaction potentials.

The methods of the research. Methods of theoretical nuclear physics and of the direct nuclear reactions theory, highly efficient methods for solving the Schrödinger equation based on the Numerov algorithm, the method of hyperspherical harmonics on Lagrange mesh basis for solving three-body problems, analytical methods of the quantum theory of angular momentum, numerical methods with a high accuracy.

The scientific novelty of the research is as follows:

it was shown that new experimental data of the LUNA collaboration for the astrophysical S-factor of the radiative capture reactions $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ and $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ at low energies can be described in a two-body model, as well as is shown hypersensitivity of the matrix elements of the $E1$ transition to the S-wave $\alpha+{}^3\text{He}$ and $\alpha+{}^3\text{H}$ potentials, which makes the main contribution to the synthesis of light nuclei ${}^7\text{Be}$ and ${}^7\text{Li}$;

it was shown that realistic wave functions of the $\alpha+d$ bound state based on the proposed modified potential, taking into account the ANC and scattering states without additional matching with asymptotics can provide a good convergence of results for the $E2$ astrophysical S-factor of the $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ synthesis reaction in the two-body model;

for the first time, within three-body model it was shown that a contribution of the isospin forbidden $E1$ transition is the most important part for describing the astrophysical synthesis reaction $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ at low energies due to the presence of a small isotriplet component of about 0.5% in the wave function of the final ${}^6\text{Li}$ nucleus.

a good description was obtained of the direct experimental data of the LUNA Collaboration for the astrophysical S-factor and reaction rate, as well as a good agreement of the theoretical estimate for the primordial abundance of the ${}^6\text{Li}$ element after the Big Bang ${}^6\text{Li}/\text{H}=(0.67\pm0.01)\times10^{-14}$ with the new data of the LUNA Collaboration, and fully consistent with the theoretical estimate of the ratio ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}=(1.33\pm0.03)\times10^{-5}$ of the results of the Standard Big Bang model.

Practical results of the research consist of the following:

the contributions of the partial waves for the electric $E1$ -, $E2$ - and magnetic $M1$ -transitions to the total astrophysical S-factor for the radiative capture reactions $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ and $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ in the two-body model are calculated;

theoretical estimates were obtained for the primordial abundance of the ${}^7\text{Li}$ element after the Big Bang based on the calculated rate of radiative capture

reactions $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ and $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ in the two-body model: ${}^7\text{Li}/\text{H}=(5.08\pm0.13)\times10^{-10}$;

a theoretical approach is developed in the framework of the three-body model based on the hyperspherical Lagrange-mesh method, correctly describing the isospin $E1$ transition for the process $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$.

The reliability of the research results are justified by using methods of quantum mechanics and theoretical physics, as well as highly efficient numerical methods and algorithms, detailed verification of the consistency of obtained results with experimental data and results of other authors, the correspondence of the conclusions to the basic provisions of the theory of nuclear astrophysics.

Scientific and practical significance of the research results. Scientific significance of the obtained results in this work is in studying the radiative capture process $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ within the framework of the realistic approach based on the three-body $\alpha+n+p$ wave function of the final ${}^6\text{Li}$ nucleus, which has a small isotriplet component of about 0.5%.

The practical significance of the results obtained in this work is the development of calculation methods in the framework of the three-body approach, which is a qualitatively new stage in the study of nuclear astrophysics processes.

Implementation of the research results. Based on the obtained results on the study of the radiative capture processes of $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$, $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ and $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$:

the demonstrated ability to describe in the two-particle model experimental data for the astrophysical S-factor of the radiative capture reactions $\alpha+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{Li}+\gamma$ and $\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma$ were used by foreign scientists (Physical Review C, 99, 054618, 2019; International Journal of Modern Physics E, 42, 1930004, 2019; Indian Journal of Physics, 93, 279, 2019; Journal of Physics: Conference Series, 1154, 012013, 2019) in studies of radiative capture reactions. The use of scientific results allowed developing new theoretical methods for the analysis of these processes;

The modified αd potential proposed by us, which reproduce the ANC value, was used to study the radiation capture process $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ by international researchers (citations in foreign scientific journals Physical Review C, 96, 045807, 2017; Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 45, 085102, 2018; European Physical Journal Web of Conferences, 199, 05016, 2019). The use of the obtained results allowed to theoretically estimate the astrophysical S-factor, the reaction rate, as well as the initial abundance ${}^6\text{Li}/\text{H}=1.1\cdot10^{-14}$ during the primordial nucleosynthesis;

the results obtained in the framework of the three-body model for the radiative capture reaction $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ are recognized by international researchers (see references in foreign scientific journals Physical Review C, 95, 044618, 2017; Physical Review C, 96, 045807, 2017; Physics of Atomic Nuclei, 81, 899, 2018) as a new stage in the study of direct nuclear capture processes based on a three-body model.

Approbation of research results. The main results of the dissertation were reported at 7 international and local scientific conferences.

Publication of the research results. 12 scientific works were published on the dissertation topic, 5 scientific articles (4 of them in international scientific journals) are in the issues recommended by the Supreme Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publication of the main scientific results of doctoral dissertations.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, list of references and appendix. The volume of the dissertation is 109 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Tursunov E. M., Turakulov S. A., Descouvemont P. Theoretical analysis of the astrophysical S-factor for the $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li} + \gamma$ capture reaction in the two-body model // Physics of Atomic Nuclei. – Pleiades Publishing (USA), 2015. – Vol. 78, N 2. – pp. 193-200 (№4. Journal Citation Reports; IF=0.524)

2. Tursunov E. M., Kadyrov A.S., Turakulov S. A., Bray I. Theoretical study of the $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ astrophysical capture process in a three-body model // Physical Review C. – American Physical Society (USA), 2016. –Vol. 94. – id.015801. – 7 p. (№4. Journal Citation Reports; IF=3.304)

3. Tursunov E.M., Turakulov S.A., Kadyrov A.S. Astrophysical ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ and ${}^3\text{H}(\alpha,\gamma){}^7\text{Li}$ direct capture reactions in a potential model approach // Physical Review C. – American Physical Society (USA), 2018. –Vol. 97. – id.035802. – 9 p. (№4. Journal Citation Reports; IF=3.304).

4. Tursunov E.M., Turakulov S.A., Kadyrov A.S., Bray I. Theoretical study of the direct $\alpha+d\rightarrow{}^6\text{Li}+\gamma$ astrophysical capture process in a three-body model II. Reaction rates and primordial abundance // Physical Review C. – American Physical Society (USA), 2018. –Vol. 98. – id.055803. – 9 p. (№4. Journal Citation Reports; IF=3.304).

5. Туракулов С.А., Абдуллаев К.З. Оценка асимптотических нормировочных коэффициентов для ${}^4\text{He}+{}^3\text{He}$ из анализа данных по упругому рассеянию на основе метода эффективного радиуса // Вестник Национального университета Узбекистана. – Ташкент (Узбекистан), 2018. – том.1 – № 1. – с.83-88 (№8 01.00.00.)

II бўлим (II часть; part II)

6. Туракулов С.А., Рахимов А.М. Разность масс нейтрона и протона с учетом нарушения изоспиновой симметрии в ядерной материи // II Республиканская конференция молодых физиков Узбекистана «Ядерная физика и ядерные технологии» 25-26 ноября 2008. – Ташкент, 2008. – с.7-9

7. Туракулов С.А. Дисперсионная периферийная модель для обменного ${}^6\text{Li}(\alpha,{}^6\text{Li})\alpha$ рассеяния с учетом механизмов передачи дейтрона и (n-p) пары // III Республиканская конференция молодых физиков Узбекистана «Ядерная физика и ядерные технологии» 1-2 декабря 2010. – Ташкент, 2010 – с.69-74

8. Турсунов Э.М., Туракулов С.А. Теоретическая оценка астрофизического S-фактора в кластерной модели двух тел для реакции $d(\alpha,\gamma){}^6\text{Li}$ при сверхнизких энергиях // Ядерная и радиационная физика: 9

Международная конференция 24-27 сентября 2013. – Алматы (Казахстан), 2013. – с.157-158

9. Турсунов Э.М., Туракулов С.А. Астрофизический S-фактор и скорость реакции радиационного захвата $d(\alpha,\gamma)^6\text{Li}$ в двухчастичной модели // IV Республиканская конференция молодых физиков Узбекистана «Ядерная физика и ядерные технологии» 2-3 декабря 2014. – Ташкент, 2014 – С.11-13

10. Турсунов Э.М., Туракулов С.А., Кудратов Х.Н. Астрофизический S-фактор радиационного захвата $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ и $^3\text{H}(\alpha,\gamma)^7\text{Li}$ в двухчастичной модели // Международный научный форум «Ядерная наука и технологии», посвященный 60-летию Института ядерной физики, 12-15 сентября 2017. – Алматы (Казахстан), 2017 – с.155-156

11. Tursunov E. M., Baye D., Turakulov S. A. Astrophysical S-factor of the direct $d(\alpha,\gamma)^6\text{Li}$ capture reaction in a three-body model // International Conference on Few-Body Problems in Physics July 9-13 2018. – Caen (France), 2018 – p.202

12. Туракулов С.А. Скорость реакции радиационного захвата $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ и $^3\text{H}(\alpha,\gamma)^7\text{Li}$ в двухчастичной потенциальной модели // V Республиканская конференция молодых физиков Узбекистана «Ядерная физика и ядерные технологии» 4-5 декабря 2018. – Ташкент, 2018 – с.17-19

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилиб, унинг ўзбек, рус тилларидаги матнлари ўзаро мувофиқлаштирилди (21.06.2019 йил).