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

ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ

ҚУРБОНОВ АНВАР РАЗЗАҚОВИЧ

3.25 А ГэВ/с ИМПУЛЬСЛИ ^{16}Op-ТЎҚНАШУВЛАРИДА КЎП НУКЛОНЛИ ТИЗИМЛАР ВА ЯДРОЛАР ҲОСИЛ БЎЛИШИ

01.04.08 – Атом ядроси ва элементар заррачалар физикаси. Тезлаштирувчи техника

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент − 2019

УДК 539.172.12

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

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

Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD) on physical-mathematical sciences

Қурбонов Анвар Раззақович
3.25 А ГэВ/с импульсли ^{16}Op-тўқнашувларида кўпнуклонли тизимлар ва ядролар ҳосил бўлиши…… 3

Курбонов Анвар Раззакович
Образование многонуклонных систем и ядер в ^{16}Op-соударениях при импульсе 3.25 А ГэВ/с..... 23

Qurbonov Anvar Razzaqovich
Formation of multinucleons systems and nuclei in ^{16}Op- collisions at the momentum 3.25 A GeV/c…… 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/T.33.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ

ҚУРБОНОВ АНВАР РАЗЗАҚОВИЧ

3.25 А ГэВ/с ИМПУЛЬСЛИ ^{16}Op-ТЎҚНАШУВЛАРИДА КЎП НУКЛОНЛИ ТИЗИМЛАР ВА ЯДРОЛАР ҲОСИЛ БЎЛИШИ

01.04.08 – Атом ядроси ва элементар заррачалар 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 Махкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2017.1.PhD/FM27 рақам билан рўйҳатга олинган.

Диссертация Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Физика-техника институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)). Илмий кенгаш веб-сахифасида (www.inp.uz) ва "Ziyonet" Ахборот-таълим порталида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:	**Олимов Қосим** физика-математика фанлари доктори, профессор
Расмий оппонентлар:	**Мўминов Толиб Мусаевич** физика-математика фанлари доктори, профессор, академик
	Бозоров Эркин Хожиевич физика-математика фанлари доктори, профессор
Етакчи ташкилот:	**Самарқанд давлат университети**

Диссертация ҳимояси 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 ш., Улуғбек 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 рўйҳатга олинган). ((Манзил: 100174, Тошкент ш., Улуғбек 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

Э.М. Турсунов
Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш илмий котиби, ф-м.ф.д.,
катта илмий ходим

И. Нуритдинов
Илмий даржалар берувчи илмий
кенгаш ҳузуридаги илмий семинар раиси
ф-м.ф.д., профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертацияси мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Бугунги кунда жаҳонда релятивистик ядроларнинг парчаланиши ва кўпламчи зарралар туғилиш жараёнининг экспериментал тадқиқ қилиниши юқори энергиялар физикаси ва релятивистик ядро физикасининг фундаментал масалаларини ҳал қилишда катта аҳамиятга эга. Ядро тузилиши ва унинг реакциялар охирги маҳсулига таъсири, шунингдек ядро фрагментлари ҳосил бўлишида заряд алмашинув жараёнларининг роли ҳақидаги муҳим маълумот манбаларидан бири релятивистик ядроларнинг нуклонлар ва ядролар билан яриминклюзив ва эксклюзив реакцияларга максимал яқинлашган каналлар учун тўқнашувларни тадқиқ қилиш заруратини кўрсатади. Шу сабабли кучли магнит майдонида жойлаштирилган пуфакчали камералар ёрдамида релятивистик ядроларнинг бўлинишини тадқиқ қилиш долзарб мавзуларидан бири ҳисобланади.

Бугунги кунда жаҳонда релятивистик ядроларнинг бўлиниш тадқиқотлари турли халқаро илмий марказларда амалга оширилади, хусусан нишон ва снаряднинг парчаланиши соҳасида чегара парчаланиш гипотезаси бажарилиши аниқланган, ҳамда ядроларнинг бўлиниш жараёнининг стохастик характерига эга бўлиши кўрсатилган. 2004 йилдан бошлаб “Беккерель" ҳамкорлик доирасида ядро эмульсияси усули ёрдамида масса сонлари A = 3-14 бўлган енгил ядроларнинг кластер тизимини жадал ўрганиш амалга оширилмоқда. Хусусан, паст даражали қўзғатилган ҳолатдаги енгил ядроларда якуний реакция маҳсулотларининг чиқиш эҳтимоллигига ва таркибига таъсир қиладиган фақатгина α-кластер структураси эмас, балки α+h, α+t, α+d ва шуларга ўхшаш кластерли тузилмалар ҳам намоён бўлиши аниқланди.

Мамлакатимизда бугунги кунда релятивистик кислород ядроларнинг протон билан тўқнашувларида кўп нуклонли тизимлар ва ядроларнинг ҳосил бўлиш жараёнлари бўйича изланишларга оид фундаментал тадқиқотларга катта эътибор берилмоқда. 2017–2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегиясида[1] мамлакатимизда илм-фан ривожи, фундаментал тадқиқотларнинг муҳим йўналишлари, фундаментал тадқиқотлар натижаларини ҳаётга тадбиқ қилиш йўллари акс эттирилган. 6 ва 7 нуклонли тизимлар ва ядроларни ҳосил бўлиш жараёнларни ўрганиш, 6 ва 7 нуклонли тизимлар ва ядролар ҳосил бўлувчи инклюзив ва яриминклюзив реакцияларнинг чиқиш кесимини аниқлаш, ^{3}He ва ^{3}H ядролар ҳамда бошқа енгил ядролар – дейтронлар ва α-зарралар ҳосил бўлиш “кўзгу” каналларини қиёсий таҳлил қилиш, α-зарралар ва дейтронлар чиқишидаги боғлиқликни тадқиқ қилиш, реакция маҳсулотлари таркиби ва чиқишига заряд алмашинув жараёнлари таъсири ҳақида маълумотлар олиш ҳам шу йўналишдаги муҳим қадамлардан бири ҳисобланади.

[1] Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги № ПФ-4947 сон Фармони «2017–2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича Ҳаракатлар стратегияси»

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2013 йил 1 мартдаги ПҚ-4512-сон “Муқобил энергия манбаларини янада ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги, 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон “Фанлар академияси фаолияти, илмий-тадқиқот ишларини тадқиқ этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора тадбирлари тўғрисида”ги Қарорларида, 2017 йил 7 февралдаги ПҚ-4947-сон “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси 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 ривожланиши устивор йуналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот Ўзбекистон Республикаси фан ва технологияларни ривожланишнинг II. “Энергетика, энергия ва ресурс тежамкорлиги” устивор йўналиши доирасида бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Ҳозирги вақтда жахоннинг етакчи олимлари, масалан, россиялик (Зарубин П.И., Русакова В., Пересадько Н.Г., Артеменков Д.А. ва бошқалар), америкалик (Heckman H.H., Greiner D.E., Lindstrom P.J.) ва бошқалар томонидан релятивистик ядроларнинг адронлар ва ядролар билан ўзаро таъсирлашувларида парчаланиши ва кўпламчи зарралар туғилиш жараёнлари бўйича эксперименталь ва назарий тадқиқотлар олиб борилмоқда.

Масалан, россиялик олимлар фотоэмульсия ядроларининг енгил ядролар билан периферик тўқнашувлар асосида кластер тизимини жадаллик билан тадқиқ қилишмоқда. Аммо улар, ядро парчаланиш механизмларни аниқлаш ва ядро парчаланиш натижасида ҳосил бўлиши мумкин бўлган барча изотоплар ҳосил бўлиш кесимларини аниқлай олмадилар. Америкалик олимлар электрон усулда фрагментларнинг кичик учиб чиқиш бурчаги остида юқори энергияли темир ядролари билан тўқнашувлар натижасида ^{12}C ва ^{16}O енгил ядроларнинг турли изотоплари ҳосил бўлишини тадқиқ қилишган. Фрагментлар учиб чиқиш бурчагини қамраб олиш чегараланган бўлганлиги учун ушбу изотопларнинг тўлиқ чиқиш кесимини аниқлаш ва уларнинг ҳосил бўлиш механизмларини етарли ишончли даражада аниқлашга имконият бўлмаган.

Бундан ташқари, ўзбекистонлик олимлар (Олимов Қ., Бозоров Э.Х. ва Ўсаров А.А.)нинг диссертация ишлари натижалари тадқиқ қилинаётган муаммоларга нисбатан яқинроқ бўлиб, шу ишларда 3.25 *A* ГэВ/с импульсли кислород ядросининг протонлар билан ўзаро таъсирлашувида парчаланиш жараёни умумий характеристикалари олинган, жумладан: бир ва кўп зарядли фрагментлар кўпламчилиги текширилган; енгил фрагментлар ва бир зарядли зарралар ҳосил бўлишидаги боғлиқлик текширилган; кислород ядроси парчаланишида топологик каналлар кесими аниқланган; α-зарралар ҳосил бўлиш кесимида ^{8}Be ва ^{9}B ностабил ядролар ҳамда қўзғатилган ^{12}C* ядроси миқдорий улуши аниқланган; A=1 дан A=16 гача масса сонли фрагментлар ҳосил бўлиш кесими аниқланган; ^{3}He ва ^{3}H енгил кўзгу ядролар ҳосил

бўлиши қиёсий таҳлили келтирилган ва уларнинг ҳосил бўлиши кинематик шартлари яқинлигида юз бериши ва ҳосил бўлиши жараёнларида протон-нишон заряди қатнашмаслиги кўрсатилган. Бошқача айтганда, бу диссертация ишларида, асосан, инклюзив ^{16}Ор-реакциялари тадқиқ қилинган.

Кислород ядроси парчаланишида кўп нуклонли тизим ва ядролар яриминклюзив каналлари тадқиқ қилинмаган, 6 ва 7 нуклонли тизимлар ва ядролар ҳосил бўлиш каналларининг характеристикаларини қиёсий таҳлили бажарилмаган; кўпнуклонли тизим ва ядроларга парчаланиш жараёнида кислород ядроси ва нишон-протон орасида заряд алмашинув муҳимлиги текширилмаган; кислород ядронинг кўп нуклонли тизим ва ядроларга парчаланиш каналларида A≤3 ли енгил фрагментлар ассоциатив кўпламчилиги текширилмаган.

Диссертация мавзусининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассаси илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси “Физика-Қуёш” ИИЧБ Физика-техника институти илмий-тадқиқотлар режасининг Ф2-Ф029 “Юқори энергияли адрон- ва ядроларнинг ядролар билан ўзаро таъсирлашувида ядро материяси тузилиши ва коллектив эффектларини тадқиқ қилиш” (2007-2011), Ф2-Ф-0-42438 “Юқори энергияларда адрон- ва ядроларни ядролар билан тўқнашувларида кўп заррали ҳолатларни тадқиқ қилиш” (2012-2016) ва 04-10 “3.25 А ГэВ/с импульсли ^{16}Ор-тўқнашувларда зарядланган пионлар ва протон(нейтрон) ортиқча ядроларни ҳосил бўлиш жараёнларини биргаликда тадқиқ қилиш”(2011-2012) илмий лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади 3.25 А ГэВ/с импульсли ^{16}Ор-тўқнашувларида A ≤ 7 масса сонли кўп нуклонли тизимлар ва ядролар ҳосил бўлиши, кислород ядроси структураси ва заряд алмашинув жараёнларининг ^{16}Ор-реакциялар охирги маҳсули таркиби ва чиқишига таъсири қонуниятларини ўрганишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

импульснинг 1.25 – 1.75 ГэВ/с оралиғида визуал фарқланмайдиган протонлар ва мусбат зарядланган пионлар ажралишининг янги усулини ишлаб чиқиш ва синовдан ўтказиш;

бу тўқнашувларда 6 ва 7 нуклонли тизимлар ва ядролар ҳосил бўлиш асосий қонуниятларини тадқиқ қилиш;

масса сони A ≤ 4 бўлган турлича зарралар ва фрагментлар ўртача кўпламчилик ва кинематик характеристикаларини, 6 ва 7 нуклонли тизимлар ва ядроларнинг биргаликда ҳосил бўлишини ўрганиш;

^{3}He, ^{3}H, ^{7}Li, ^{7}Be енгил “кўзгу” ядроларнинг хоссалари ва ҳосил бўлиш механизмлари ва уларнинг турли сондаги дейтрон ва α-зарралар ҳосил бўлишига боғлиқлигини ўрганиш;

кислород ядросининг парчаланиш жараёнида α-кластер тузилишининг ролини аниқлаш мақсадида тажриба натижаларини каскадли парчаланиш ҳамда буғланиш модели (КПБМ) асосида қиёсий таҳлилни бажариш.

Тадқиқотнинг объекти 3.25 А ГэВ/с импульсли кислород ядросининг протон билан ўзаро таъсирлашувида парчаланиш жараёнларидан иборат.

Тадқиқотнинг предмети 3.25 А ГэВ/с импульсли ^{16}Op-реакцияларида ҳосил бўладиган кўпнуклонли тизим ва ядро ҳисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари: 3.25 А ГэВ/с импульсли ^{16}Op-тўқнашувларида кўп нуклонли тизимлар ва ядроларнинг ҳосил бўлишини таҳлил қилиш учун математик статистика ва Монте-Карло моделлаштириш усуллари, инклюзив ва яриминклюзив ёндашув моделлари.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

«кўзгу» ^{7}Li ва ^{7}Be ядролар ҳосил бўлишининг инклюзив кўндаланг кесимлари бир-бирига мос келиб, улар орасидаги заряд фарқи 6 ва 7 нуклонли тизимлардаги каби қўшимча равишда протонлар ҳосил бўлиши билан компенсация қилиниши аниқланган, яриминклюзив реакцияларда «кўзгу» ^{7}Li ва ^{7}Be ҳосил бўлиши билан бирга кузатиладиган A = 2–4 ли ядролар нуклонлари ўртача кўпламчилиги ҳамда ушбу ядролар кинематик характеристикалари ўртача қийматларининг мос келиши, бу ядролар шаклланиш кинематик шароитларининг яқинлиги ва снаряд ядроси парчаланиш даражаси бир хиллиги кўрсатилган;

3.25 А ГэВ/c импульсли ^{16}Op-тўқнашувларда 6 ва 7 нуклонли тизим ва ядролар ҳосил бўлишининг яриминклюзив кесимлари биринчи марта олинган, кислород ядроси α-кластерли тузилишининг $A \leq 7$ масса сонли охирги кўпнуклонли ядролар шаклланиши ҳамда электр ва барион зарядлар сақланиш қонунларидаги муҳим ролини кўрсатувчи тасдиқ олинган;

протон ва нейтрон фрагментлари ўртача кўпламчилиги ассоциацияланган дейтронлар сонига боғлиқ эмаслиги ва дейтронларнинг салмоқли қисми кислород ядроси таркибидаги α-кластерларнинг бўлиниши ҳисобига ҳосил бўлиши аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

каскадли парчаланиш ҳамда буғланиш модели 6 ва 7 нуклонли тизим ва ядролар ҳосил бўлиши кўндаланг кесимларини тушунтира олмаслиги кўрсатилган;

ҳамроҳ зарраларнинг ўртача кўпламчилиги асосан охирги кўпнуклонли ҳолатлар йиғинди масса сони ва заряди билан аниқланиб, ягона ядроми ёки айнан ўша А йиғинди масса сонли икки ёки уч ядроларнинг боғланган, резонансли ёки континиум ҳолатли эканлигига боғлиқ эмаслиги кўрсатилган;

6 ва 7 нуклонли тизим ва ядролар ҳосил бўлиш каналида нейтрон-фрагментларнинг ўртача кўпламчилиги биринчи марта аниқланган ва улар протон-нишон зарядининг парчаланувчи ядро нейтронига узатилиши ва нуклонларнинг ноэластик қайта зарядланиш жараёнларини ҳисобга олганда протон фрагментлар кўпламчилиги билан мос келиши кўрсатилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Эксперимент материал статистикаси етарлича катта (> 10 000) ҳодисаларга асосланади, зарралар ва фрагментларни масса бўйича ажратишда зарядларни юқори аниқликда аниқлаш, шунингдек уларнинг импульсларини ва бурчакларини юқори аниқлик билан ўлчаш, экспериментал маълумотларни таҳлил қилишда

умумий қабул қилинган статистик усуллардан фойдаланиш, ҳамда натижаларни таҳлил қилишда инклюзив ва эксклюзив ёндашувлардан фойдаланиш, ядронинг парчаланиши бўйича олинган эксперимент маълумотлари бошқа тажриба натижалари ва назарий ишларнинг асосий хулосалари билан ўзаро боғланганлиги натижаларнинг ишончлилигини таъминлайди.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти кўпнуклонли тизим ва енгил ядролар шаклланиш механизмлари ва уларнинг асосий хоссалари тўғрисида кенг физик маълумот бериш ва янги модел, назарий ёндашувлар яратишда эътиборга олиниши зарур бўлган ядролар парчаланишининг реал холатига яқинроқ кўринишларини яратишга қаратилган. Кўпнуклонли тизим ва “кўзгу” (^{3}H ва ^{3}He, ^{7}Li ва ^{7}Be) ядролар ҳосил бўлишини тадқиқ қилишнинг кенг кўламли маълумотлари ва тадбиқ қилинган усуллари юқори энергияларда ядролар парчаланиш жараёнларини ўрганиш бўйича бошқа тажрибаларда кенг қўлланилиши мумкин.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти юқори энергияли енгил ядроларнинг ўзаро таъсирлашувлари маълумотлар базасини тўлдириш, иккиламчи кўпнуклонли тизимлар ва енгил “кўзгу” ^{3}H ва ^{3}He ҳамда ^{7}Li ва ^{7}Be ядроларининг шаклланиши учун кесимларни аниқлаш, шунингдек, дейтронларни ҳосил бўлиш механизмлари, парчаланишнинг мавжуд назарий моделларини такомиллаштириш ва иккиламчи зарралар ҳосил бўлиш жараёнларининг янги назарий моделларни яратиш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларнинг жорий қилиниши. 3.25 А ГэВ/с импульсли ^{16}Ор-тўқнашувларида кўпнуклонли тизимлар ва ядролар ҳосил бўлиши бўйича олинган натижалар асосида:

импульслари 3.25 А ГэВ/с бўлган ^{16}Ор-тўқнашувларида “кўзгу” бўлган ^{3}H ва ^{3}He, ^{7}Li ва ^{7}Be ҳамда 6 ва 7 кўпнуклонли тизим ва ядроларнинг ҳосил бўлиш кесими бўйича экспериментал маълумотлар, қайта ишлаш жараёнида олинган натижалар таҳлили Қозоғистон Республикаси фан ва таълим Вазирлиги Физика-техника институти космик нурлар лабораториясида 2018 йилнинг 30 март куни тузилган 304-рақамли “Тянь-Шань тоғининг юқори қисмида жойлашган илмий станцияда физика, космик нурлар астрофизикаси бўйича олиб борилаётган фундаментал тадқиқотлар истиқболлари” илмий шартнома натижаларини тушунтиришда қўлланилган. (Қозоғистон Республикаси фан ва таълим Вазирлиги Физика–техника институти 2018 йил 6 июлдаги маълумотномаси). Илмий натижаларининг қўлланилиши космик нурлар астрофизикаси бўйича олинган натижалар таҳлили ва α-зарралар (ўзаро таъсирлашувчи ядроларнинг α-кластерли структурасини тадқиқ қилиш) ҳосил бўлиш кесимига боғлиқ равишда уларнинг яриминклюзив ва инклюзив улушини баҳолаш имконини берган;

3.25 А ГэВ/с импульсли ^{16}Ор-тўқнашувларда 6 ва 7 нуклонли тизим ва ядроларнинг ҳосил бўлиш яриминклюзив кесимларни ҳисоблаш бўйича натижалари Юқори энергиялар физикаси лабораториясининг Нуклотронида бажарилаётган «Беккерель» дастури доирасида ядро фотоэмульсиясини

нурлантириш учун қисқа яшовчи фрагментлар оқимини ҳосил қилиш натижаларини тушунтиришда қўлланилган (Бирлашган ядро тадқиқотлари институтининг 010-43/472-сонли 2018 йил 29 октябрдаги хати). Илмий натижаларининг қўлланилиши, яъни фрагментацияланиш ҳақидаги маълумотлар қурилаётган НИКА коллайдерида режалаштирилаётган тадқиқотлар учун Монте-Карло моделлаштирилган ҳодисалар фрагментация бўйича натижаларида дастлабки маълумот сифатида ишлатиш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 5 та халқаро ва 5 та республика миқёсидаги илмий амалий анжуманларда муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларнинг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 19 та илмий иш чоп этилган, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг фалсафа докторлик (PhD) диссертациялари асосий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 9 та мақола нашр этилган, шулардан 4 таси хорижий илмий журналларда.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш қисми, тўрт боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертация ҳажми 115 бетни ташкил қилади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объект ва предмети тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланиши устивор йуналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгиликлари ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг **“Ядроларнинг парчаланишини назарий ва экспериментал тадқиқ қилиш ҳолатининг қисқача талқини”** деб номланган биринчи бобида ўрта ва юқори энергияларда адрон-ядро тўқнашишларида турли ядроларнинг парчаланиши ва кластерланиши бўйича тажриба натижалари ва мавжуд назарий ёндашувларнинг талқини, ядролар ички тузилиши бўйича тадқиқот натижалари ҳамда хулосалар келтирилган.

Диссертациянинг **“Эксперимент услубияти”** деб номланган иккинчи бобида тажриба натижаларини олиш услуби атрофлича тавсифланган, бирламчи ядро дастаси ва 1 метрли водородли пуфакчали камера (ВПК) асосий характеристикалари берилган, импульс ва бурчакларни ўлчаш хатоликлари, экспериментал материаллар статистикаси, ноэластик кесими, фрагментларнинг масса сонлари бўйича тақсимотлари, изотоплар таркиби ва 3.25 А ГэВ/с импульсли ^{16}Op-тўқнашувларида $1 \leq Z_{fr} \leq 4$ зарядли фрагментлар ҳосил бўлиши инклюзив кесимлари келтирилган. Массалари бўйича фрагментларни идентификация қилиш учун лаборатория координаталар системасида қуйидаги импульс оралиқлари қабул қилинган: $1.75 < p < 4.75$ ГэВ/*с* оралиқдаги бир зарядли фрагментлар протонлар ҳисобланади, $p = 4.75–7.75$ ГэВ/*с* оралиқдагилар ^{2}H га ва $p > 7.75$ ГэВ/*с* оралиқдагилар ^{3}H ядросига тегишли. $p < 10.75$ ГэВ/*с* оралиқдаги икки зарядли фрагментлар ^{3}He га тегишли, $p > 10.75$ ГэВ/*с* оралиқдагилар эса – ^{4}He га тегишли. $p < 21.25$ ГэВ/*с* импульсли уч зарядли фрагментлар ^{6}Li ядросига тегишли, $21.25 < p < 24.5$ ГэВ/*с* оралиқдагилар ^{7}Li га, $p < 24.75$ ГэВ/*с* импульсли тўрт зарядли фрагментлар ^{7}Be га, $p \geq 24.5$ ГэВ/с оралиқдагилар эса ^{8}Be ядросига тегишли. Импульс спектрида $p \geq 24.5$ ГэВ/с импульсга эга ^{8}Be ядролари мавжуд эмас.

Диссертациянинг **“3.25 *А* ГэВ/с импульсли ^{16}O*p*–ўзаро таъсирлашувларида масса сони 6–7 бўлган кўпнуклонли тизимлар ва ядроларнинг ҳосил бўлиши”** деб номланган учинчи бобида 3.25 *А* ГэВ/*с* импульсли ^{16}O*p*-тўқнашувларида 6 ва 7 нуклонли тизим ва «кўзгу» ядролар ^{7}Li ва ^{7}Be ҳосил бўлиши бўйича олинган асосий натижалар баён қилинган. Уларнинг ўртача кўпламчилиги аниқланган ва кўпнуклонли тизимлар чиқиш кесими топилган. Бир ва икки зарядли ҳамроҳ зарралар кўпламчилиги ва характеристикалари таҳлил қилинган. Кислород ядросининг α-кластерли структураси ролини аниқлаш учун эксперимент маълумотларни каскадли парчаланиш ҳамда буғланиш модели (КПБМ) асосида таққослаш бажарилган.

Каскадли парчаланиш ҳамда буғланиш модели бўйича ҳисобланган 6 ва 7 нуклонли тизимлар ва ядролар ҳосил бўлиш кўндаланг кесимлари 29.98 ± 0.67 мбн ва 34.27 ± 0.72 мбн га тенг, уларнинг экспериментал қийматлари мос равишда 42.18 ± 1.34 мбн ва 39.55 ± 1.30 мбн га тенг. Бу кесимлардаги фарқ каскадли парчаланиш ҳамда буғланиш моделида 6 ҳамда 7 нуклонли тизимлар ва ядролар ҳосил бўлиши экспериментга нисбатан етарли даражада баҳоланмаслигини кўрсатади. Шундай баҳоланмаслик КПБМда бошланғич ядронинг кучли парчаланишига олиб келадиган ички ядровий каскадли жараёнларнинг ривожланиши даражаси юқорилиги билан боғлиқлигидан дарак беради.

3.1. бўлимда қуйидаги яриминклюзив реакцияларда кўпнуклонли тизимлар ва ядролар ҳосил бўлиши бўйича натижалар келтирилган:

6 нуклонли тизимлар:

$^{16}O + p \rightarrow {}^{6}Li + X,$ (1)

$^{16}O + p \rightarrow {}^{4}He + {}^{2}H + X,$ (2)

$^{16}O + p \rightarrow {}^{3}He + {}^{3}H + X,$ (3)

$^{16}O + p \rightarrow {}^{3}He + {}^{3}He + X,$ (4)

$^{16}O + p \rightarrow {}^{3}H + {}^{3}H + X,$ (5)

$^{16}O + p \rightarrow {}^{2}H + {}^{2}H + {}^{2}H + X,$ (6)

7 нуклонли тизимлар:

$^{16}O + p \rightarrow {}^{7}Li + X,$ (7)

$^{16}O + p \rightarrow {}^{7}Be + X,$ (8)

$^{16}O + p \rightarrow {}^{4}He + {}^{3}He + X,$ (9)

$^{16}O + p \rightarrow {}^{4}He + {}^{3}H + X,$ (10)

$^{16}O + p \rightarrow {}^{3}He + {}^{2}H + {}^{2}H + X,$ (11)

$^{16}O + p \rightarrow {}^{3}H + {}^{2}H + {}^{2}H + X$ (12)

X-сифатида $A \leq 3$ масса сонли бир ёки икки зарядли фрагмент, тепки протон ёки пион бўлиши мумкин, яъни $A \geq 4$ масса сонли ҳамроҳ ядролар туғиладиган тизимлар ҳосил бўлиши мумкин бўлган бошқа каналлар муҳокама қилинмаган.

1- ва 2-жадвалларда йиғинди заряд (Q) ва кўндаланг кесими ($\boldsymbol{\sigma_y}$) мос равишда (1-6) реакциялар учун 6 нуклонли тизим ва ядро ҳосил бўлиши, шунингдек, (7-12) реакциялар учун эса 7 нуклонли тизим ва ядролар ҳосил бўлиши каскадли парчаланиш ҳамда буғланиш модели маълумотлари билан таққосланган ҳолда келтирилган.

1-жадвал

Тизимлар типи	Реакция тартиб рақами	Йиғинди заряд, Q	Реакциялар кесими σ_y, мбн	
			Эксп.	КПБМ
^{6}Li	1	3	3.67±0.36	7.00±0.33
$^{4}He + {}^{2}H$	2	3	23.83±1.03	12.22±0.44
$^{3}He + {}^{3}H$	3	3	5.55±0.48	2.93±0.21
$^{3}He + {}^{3}He$	4	4	3.67±0.39	4.11±0.25
$^{3}H + {}^{3}H$	5	2	2.64±0.36	2.53±0.20
$^{2}H + {}^{2}H + {}^{2}H$	6	3	2.81±0.37	1.20±0.13

1- ва 2-жадвалларидан кўринадики, 6 ва 7 нуклонли тизимларда максимал кесим ^{4}He ядролар ҳосил бўлувчи реакцияларда кузатилади. 6 нуклонли тизим учун экспериментда α-зарралар ҳосил бўлиши кесими 23.83 ± 1.03 мбн

ни ташкил қилади, 7 нуклонлилар учун эса 26.99 ± 1.15 мбн. Мос равишда каскадли парчаланиш ҳамда буғланиш моделида ҳисобланган катталиклар 12.22 ± 0.44 мбн ва 14.14 ± 0.49 мбн ни ташкил қилади, яъни экспериментдагидан ўртача 1.93 марта кичик. Бу ҳолат каскадли парчаланиш ҳамда буғланиш моделида ҳисобга олинмайдиган парчаланадиган кислород ядроси α-кластерли структурасининг намоён бўлишидан гувоҳлик беради. Ҳақиқатан, эксперимент ва каскадли парчаланиш ҳамда буғланиш моделида 6 нуклонли тизим чиқиш кесимларидаги асосий фарқ айнан α-зарралар чиқиш каналида кузатилади. Қолган реакцияларнинг чиқиш кесимлари йиғиндиси эса экспериментда 18.87 ± 0.85 мбн ни ва каскадли парчаланиш ҳамда буғланиш моделида 17.77 ± 0.65 мбн ни ташкил қилиб, амалда бир-бирига мос келади.

6 нуклонли тизимлар ҳосил бўлишнинг эксперимент ва ҳисобдаги кесимлари мос келиши фақат айнан ўхшаш иккиламчи ядролар (^{3}He + ^{3}He) ва (^{3}H + ^{3}H) учун ўринли эканлигини кузатиш мумкин. ^{4}He + ^{2}H тизим ва ^{6}Li ядроси ҳосил бўлиши кесимини таққослаш қизиқарли. Экспериментда бу муносабат 6.5 ни ташкил қилади, бу ҳолда моделда у мос равишда 1.7 га тенг. Агар ^{6}Li ядросининг ҳосил бўлиши ^{4}He ва ^{2}H ядролар қўшилиши ҳисобига юз берса, у ҳолда коалесценция модели доирасида бундай устунликни зарурий нисбий импульсларнинг кичкина бўлишлиги ҳамда ^{4}He ва ^{2}H ядроларнинг фазовий яқинлиги каби факторлар билан тушунтириш мумкин. Худди шундай мулоҳазани ^{7}Li ядроси ва ^{4}He + ^{3}H тизимга, шунингдек, ^{7}Be ядроси ва ^{4}He + ^{3}He тизими чиқиш кесимлари ўзаро нисбати учун ҳам келтириш мумкин. Бундан ташқари моделда ^{4}He+^{3}He ва ^{4}He+^{3}H чиқиш кесимларида фарқ кузатилади, биринчи тизим чиқиш кесими охиргисига нисбатан 1.3 марта катта. Бу, шу билан боғлиқки, моделда енгил «кўзгу» ядролар ҳосил бўлишида протонлари ортиқча бўлган ядроларнинг кесими протон-нишон заряди ҳисобига нейтронлари ортиқча ядролар кесимига нисбатан юқорилиги келиб чиқади.

2-жадвал

Тизимлар типи	Реакция тартиб рақами	Йиғинди заряд, Q	Реакциялар кесими σ_y, мбн	
			Эксп.	КПБМ
^{7}Li	7	3	2.72±0.31	6.36±0.31
^{7}Be	8	4	3.43±0.39	10.65±0.41
^{4}He + ^{3}He	9	4	13.77±0.26	7.88±0.35
^{4}He + ^{3}H	10	3	13.22±0.75	6.26±0.31
^{3}He + ^{2}H + ^{2}H	11	4	3.21±0.37	1.69±0.16
^{3}H + ^{2}H + ^{2}H	12	3	3.21±0.40	1.43±0.15

Охирги ҳолатда, кўринишидан, *A*=3 масса сонли енгил “кўзгу” ядроларнинг айнан ўхшаш шаклланиш механизмлари билан боғлиқ йиғинди зарядлари фарқланувчи 6 нуклонли тизимлар ^{6}Li ва ^{3}He + ^{3}He, шунингдек 7 нуклонли тизимлар ^{4}He + ^{3}He ва ^{4}He + ^{3}H эксперименталь чиқиш кесимлари

мос келишига эътибор қаратилиши лозим. Енгил парчаланувчи ядролар α-кластерли тузилишини ҳисобга олиш зарурияти каскадли парчаланиш ҳамда буғланиш моделида ^{6}Li, ^{7}Li ва ^{7}Be ядроларнинг чиқиш кесимлари экспериментга қараганда сезиларли юқори бўлишидан келиб чиқади.

Ҳамроҳ зарралар ўртача кўпламчилиги таҳлили (3- ва 4-жадвалларга қаранг) 6 нуклонли тизимлар учун энг юқори протонлар кўпламчилиги ^{2}H+^{2}H+^{2}H ядро структурасининг максимал емирилиш каналида ва ^{2}H+^{2}H+^{3}H – 7 нуклонли тизимлар учун эса ^{3}H+^{3}H – минимал йиғинди зарядлар (2) каналида кузатилишини кўрсатади. ^{3}He+^{3}He 6 нуклонли тизим ва ^{6}Li ядроси учун зарядлар орасидаги фарқ литий-6 ядроси ҳосил бўлган каналда протонлар ўртача кўпламчилигининг 0.9га кўплиги билан компенсацияланади.

Бир хил йиғинди зарядли (4) ^{7}Be ядроси ҳамда 7 нуклонли тизимлар ^{4}He+^{3}He ва ^{2}H+^{2}H+^{3}He учун протонлар ўртача кўпламчилиги статистик хатоликлар чегарасида мос келади. Биринчи икки канал учун статистик хатоликлар чегарасида ^{2}H, ^{3}H ва ^{3}He ядролари кўпламчиликлари мос келади. Каскадли парчаланиш ҳамда буғланиш моделида айнан шундай эффектлар кузатилмайди. Бир хил йиғинди зарядли (3) ^{7}Li ядроси ҳамда 7 нуклонли тизим ^{4}He+^{3}H учун статистик хатоликлар оралиғида барча ҳамроҳ зарралар ўртача кўпламчилиги мос келади.

3-жадвал

6 нуклонли тизимлар билан биргаликда ҳосил бўлувчи енгил фрагментлар ва p_{rec} тепки протонлар ўртача кўпламчилиги ва тизимлар йиғинди заряди (Q).

Тизимлар типи	Q	Маълумот манбаи	Ҳамроҳ зарралар				
			^{1}H	^{2}H	^{3}H	^{3}He	p_{rec}
^{6}Li	3	Эксп.	3.42±0.12	0.74±0.08	0.28±0.05	0.32±0.05	0.49±0.05
		КПБМ	3.38±0.06	0.74±0.03	0.31±0.03	0.44±0.03	0.50±0.03
^{4}He + ^{2}H	3	Эксп.	3.02±0.05	0.83±0.03	0.34±0.02	0.32±0.02	0.53±0.02
		КПБМ	3.53±0.05	0.47±0.02	0.21±0.01	0.27±0.01	0.52±0.02
^{3}He + ^{3}H	3	Эксп.	3.36±0.10	0.63±0.05	0.30±0.04	0.39±0.05	0.51±0.04
		КПБМ	3.62±0.10	0.54±0.04	0.23±0.03	0.32±0.03	0.49±0.04
^{3}He + ^{3}He	4	Эксп.	2.50±0.13	0.71±0.08	0.32±0.04	0.31±0.04	0.48±0.04
		КПБМ	3.22±0.09	0.49±0.03	0.13±0.02	0.36±0.03	0.48±0.03
^{3}H + ^{3}H	2	Эксп.	3.84±0.18	0.85±0.10	0.23±0.05	0.36±0.05	0.60±0.05
		КПБМ	4.12±0.10	0.66±0.05	0.27±0.03	0.15±0.03	0.56±0.04
^{2}H + ^{2}H + ^{2}H	3	Эксп.	3.69±0.14	0.67±0.07	0.32±0.05	0.23±0.05	0.49±0.05
		КПБМ	3.98±0.15	0.31±0.05	0.33±0.05	0.25±0.05	0.41±0.06

Шунингдек, ^{6}Li ва ^{7}Li ядролари ҳосил бўлишида ҳамроҳ зарраларнинг экспериментал ўртача кўпламчилиги мос келишини кўриш ҳам қизиқарли, яъни ^{7}Li ядроси таркибидаги ортиқча нейтрон ўртача кўпламчиликлар катталикларига таъсир кўрсатмайди.

^{2}H ядроси ҳосил бўлиши экспериментал ўртача кўпламчиликлари билан КПБМ ҳисобларининг қиёси шуни кўрсатадики, дейтронлар кислород ядроси α-кластерлари емирилишидан ҳосил бўлишининг мумкин бўлган каналларини кўрсатган ҳолда, экспериментда 6-нуклонли тизимлар учун ҳам 7-нуклонлилар учун ҳам систематик равишда ошади.

^{3}H ядроси ҳосил бўлиш ҳоллари учун худди шундай таққослаш ^{4}He+^{2}H, ^{3}He+^{3}H ва ^{3}He+^{3}He, шунингдек, ^{7}Be, ^{4}He+^{3}He, ^{4}He+^{3}H ва ^{2}H+^{2}H+^{3}He тизимлар учун эксперимент қийматлари ҳисоб қийматларидан юқори эканлигини кўрсатади. ^{3}He ядроси экспериментал ўртача кўпламчилигининг ҳисобдагидан сезиларли фарқи ^{6}Li ядроси ҳамда ^{3}He+^{3}H, ^{3}He+^{3}He ва ^{3}H+^{3}H тизимлар ҳосил бўлиш каналларида кузатилади.

4-жадвал

7 нуклонли тизимлар билан биргаликда ҳосил бўлувчи енгил фрагментлар ва p_{rec} тепки протонлар ўртача кўпламчилиги ва тизимлар йиғинди заряди (Q).

Тизимлар типи	Q	Маълумот манбаи	Ҳамроҳ зарралар				
			^{1}H	^{2}H	^{3}H	^{3}He	p_{rec}
^{7}Li	3	Эксп.	3.34±0.14	0.77±0.09	0.27±0.05	0.28±0.05	0.58±0.05
		КПБМ	3.30±0.06	0.69±0.04	0.35±0.03	0.30±0.03	0.53±0.02
^{7}Be	4	Эксп.	2.76±0.14	0.71±0.07	0.28±0.05	0.33±0.05	0.53±0.05
		КПБМ	2.80±0.04	0.60±0.03	0.19±0.02	0.48±0.02	0.48±0.02
^{4}He + ^{3}He	4	Эксп.	2.71±0.06	0.68±0.04	0.27±0.02	0.37±0.03	0.51±0.02
		КПБМ	3.33±0.05	0.45±0.02	0.15±0.02	0.34±0.02	0.45±0.02
^{4}He + ^{3}H	3	Эксп.	3.32±0.07	0.76±0.04	0.30±0.02	0.30±0.02	0.57±0.02
		КПБМ	3.80±0.05	0.45±0.03	0.26±0.03	0.20±0.02	0.53±0.02
^{3}He + ^{2}H + ^{2}H	4	Эксп.	2.76±0.15	0.44±0.06	0.23±0.05	0.37±0.05	0.42±0.05
		КПБМ	3.54±0.08	0.31±0.05	0.16±0.03	0.37±0.04	0.42±0.03
^{3}H + ^{2}H + ^{2}H	3	Эксп.	3.69±0.13	0.58±0.07	0.25±0.04	0.24±0.05	0.51±0.05
		КПБМ	3.90±0.08	0.40±0.04	0.39±0.04	0.17±0.03	0.52±0.03

Экспериментда тепки протонлар ўртача кўпламчилиги 6 нуклонли тизимлар учун 0.52 ± 0.02 ни, 7 нуклонли тизимлар учун 0.53 ± 0.02 ни ташкил қилади. КПБМ да мос катталиклар 0.50 ± 0.01 ва 0.49 ± 0.01 ни ташкил қилади, бу эса статистик хатоликлар чегарасида эксперимент қийматларига мос келади.

3.2 бўлимда 3.25 *A* ГэВ/*c* импульсли ^{16}O*p*-тўқнашувларида ^{7}Be ва ^{7}Li “кўзгу” ядроларнинг чиқиш каналлари характеристикаларини ўрганиш бўйича эксперимент натижалари келтирилган, яъни қуйидаги инклюзив реакциялар муҳокама қилинган:

$$^{16}\mathrm{O} + p \rightarrow {}^{7}\mathrm{Li} + \mathrm{x} \qquad (13) \qquad\qquad {}^{16}\mathrm{O} + p \rightarrow {}^{7}\mathrm{Be} + \mathrm{x} \qquad (14)$$

Бу ерда **x** – ҳосил бўлиши барион ва электр зарядлар сақланиш қонунларига бўйсунадиган ихтиёрий фрагмент ва зарраларни билдиради. “Кўзгу” ядролар

чиқувчи ҳодисалар сони N(^{7}Be) = 155 (14-реакция) ва N(^{7}Li) = 160 (13-реакция) бир-бирига яқинлиги аниқланди. Литий ва бериллий ядро изотопларининг биргаликда ҳосил бўлиши жами 16 та ҳодисада кузатилади. Шулардан фақат биттасида ^{7}Be ва ^{7}Li “кўзгу” ядроларнинг бир вақтда чиқиши кузатилади. Зарралар ва фрагментлар характеристикалари, биргаликда чиқувчи ^{7}Be ва ^{7}Li “кўзгу” ядроларнинг таққослама таҳлили учун A = 7 масса сонли битта 3 ёки 4 зарядли фрагментлар ҳосил бўладиган, яъни топологиялари (3), (32) ва (322), шунингдек (4), (42) ва (422) бўлган ҳодисалар қараб чиқилди. Бу ерда қавс ичида кўпзарядли ($Z \geq 2$) фрагментлар заряди ҳамда сони кўрсатилган. “Кўзгу” ядролар чиқувчи топологиялари бундан кейин “кўзгу” топологик каналлар деб номланади. ^{7}Li ва ^{7}Be ядролар ҳосил бўлувчи ҳодисалар учун зарядланган зарралар ва фрагментларнинг ўртача кўпламчилиги, ядро фрагментлари ўртача кўпламчилиги, шунингдек протон-фрагментлар ва зарядланган пионлар йиғинди заряди (Q) 5-жадвалда келтирилган.

5-жадвал

^{7}Li ва ^{7}Be ядролари чиқиш каналларида фрагментлар ўртача кўпламчилиги, ҳамда протон-фрагментлар ва зарядланган пионлар йиғинди заряди

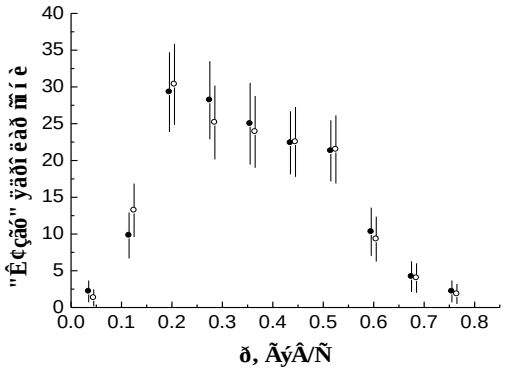
Зарралар ва ядролар типи	^{7}Li	^{7}Be	Зарралар ва ядролар типи	^{7}Li	^{7}Be
Жами фрагментлар	4.45 ± 0.10	3.81 ± 0.11	^{4}He	0.63 ± 0.05	0.61 ± 0.05
^{1}H	3.00 ± 0.11	2.29 ± 0.12	Тепки протон	0.59 ± 0.05	0.55 ± 0.04
^{2}H	0.52 ± 0.05	0.53 ± 0.05	π^-	0.33 ± 0.04	0.44 ± 0.05
^{3}H	0.17 ± 0.03	0.20 ± 0.03	π^+	0.64 ± 0.05	0.42 ± 0.05
^{3}He	0.13 ± 0.03	0.18 ± 0.03	Q(^{1}H+ π^++ π^-)	3.31±0.12	2.27±0.13

Жадвалдан кўринадики, масса сонлари $2 \leq A \leq 4$ бўлган фрагментларнинг ўртача кўпламчилиги 7 нуклонли “кўзгу” ядролар ҳосил бўлишининг иккала канали учун статистик хатоликлар чегарасида мос келади. Бу ҳолат натижасида протон-фрагментлар ва зарядланган зарралар йиғинди зарядидаги фарқ иккала канал учун ҳам амалда 1 га тенг. Икки зарядли фрагментлар кўпламчилиги ва уларнинг ўртача қийматлари (0.75 ± 0.05 ва 0.74 ± 0.05, мос равишда ^{7}Li ва ^{7}Be учун) тақсимоти иккала “кўзгу” ядро учун ҳам мос келади. Шунингдек ^{7}Li ва ^{7}Be ядролари ҳосил бўлиш каналларида тепки протонларнинг ўртача кўпламчилиги ҳам мос келиши кузатилади. Бу ҳол ^{7}Li ва ^{7}Be ядролар шаклланиш кинематик шароитларининг яқинлигини ва снаряд парчаланиш даражасининг бир хиллигини кўрсатади.

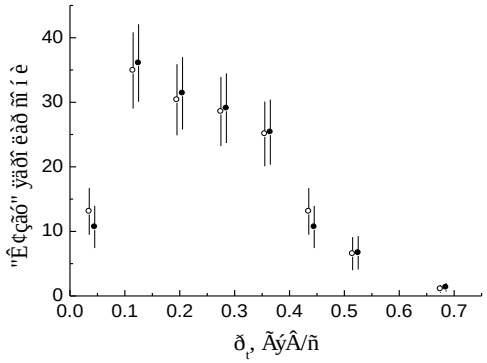
Статистик хатоликлар чегарасида ^{7}Li ва ^{7}Be “кўзгу” ядроларнинг тақсимоти кислород ядросининг тинч ҳолатдаги тўлиқ импульси бўйича (1-расм) тақсимотлари бир бирига мос келган ҳолда уларнинг ўртача қийматлари 350 ± 13 МэВ/с ва 354 ± 13 МэВ/с ни ташкил қилади. Шунингдек қаралаётган “кўзгу” ядролар кўндаланг импульс бўйича тақсимотлари (2-расм) бир бирига мос келиб, уларнинг ўртача қиймати статистик хатоликлар чегарасида мос келади (^{7}Li ва ^{7}Be учун 251 ± 11 МэВ/с ва 253 ± 11 МэВ/с). Бу

“кўзгу” ядроларнинг тўлиқ ва кўндаланг импульслари бўйича тақсимотлари мос келишидан уларнинг чиқиш бурчакларининг ўртача қийматлари амалда бир хиллиги, лаборатория системасида ^{7}Li ва ^{7}Be ядролар учун (мос равишда 0.63 ± 0.03° ва 0.64 ± 0.03°) тенглиги келиб чиқади. Шунингдек, 5-жадвалдан ^{7}Li ва ^{7}Be ядролари чиқиш каналларида жами фрагментлар ўртача кўпламчиликлари фарқи Δn_f = 0.64 ± 0.15 га тенглиги кўринади. Бунда ^{2}H, ^{3}H, ^{3}He ва ^{4}He ядролар ўртача кўпламчилиги “кўзгули” каналларда мос келади. Бу Δn_f фарқ статистик хатоликлар чегарасида протон-фрагментларнинг ўртача кўпламчиликлари фарқи Δn_p билан мос келишини билдиради. 5-жадвалдан у 0.71 ± 0.15 га тенг, Δn_f катталикка яқинлиги кўриниб турибди. Шундай қилиб, хулоса қилиш мумкинки, қаралаётган “кўзгу” ядролар зарядларидаги фарқ асосан ^{7}Li ядроси чиқиш каналларида қўшимча протон-фрагментлар ҳосил бўлиши билан тўлдирилади. Бунинг ҳисобига протон-нишон билан протонларнинг ўзаро таъсирлашувида нейтронлари ортиқча бўлган ^{7}Li ядросининг ҳосил бўлиши ёки протон-нишон билан нейтронларнинг ўзаро таъсирлашувида протонлари ортиқча бўлган ^{7}Be ядроларининг ҳосил бўлиши имкониятлари юқори бўлади. Бундан ^{7}Li ва ^{7}Be “кўзгу” ядролар ҳосил бўлиши билан боғлиқ бўлган π^-- ва π^+-мезонлар ўртача кўпламчилигидаги фарқ келиб чиқади.

^{7}Li ва ^{7}Be “кўзгу” ядролар чиқиш ҳодисаларидаги кўпнуклонли фрагментлар ($2 \le A \le 4$) ўртача кўпламчилигидаги мослик бундай ядроларнинг (A=7) шаклланишида иккита α-кластерлардан биридан уриб чиқарилган нуклонларнинг иштирок этмаслигини билдиради.



1-расм. Тинч ҳолатдаги кислород ядросида ^{7}Li (○) ва ^{7}Be(●) ядроси импульс тақсимоти



2-расм. ^{7}Li (○) ва ^{7}Be(●) “кўзгу” ядролар кўндаланг импульс тақсимоти

^{7}Li ядросининг чиқиш каналидаги π^+-мезонларнинг ўртача кўпламчилиги ^{7}Be ядросининг ҳосил бўлиш каналига нисбатан 0.22 ± 0.07 миқдорга катта эканлигини таъкидлаш қизиқдир. Бу шуни тасдиқлайдики, ортиқча нейтронга эга бўлган ^{7}Li ядросининг шаклланиши нишон-протоннинг кислород ядроси протони билан тўқнашиши натижасида кўпроқ юз беради. ^{7}Be ядроси чиқиш каналида π^--мезонларнинг ўртача кўпламчилиги ^{7}Li чиқиш каналига нисбатан кўпроқ эканлиги улардан биринчисининг ҳосил бўлиши нишон-протоннинг кислород ядроси нейтрони

билан ўзаро таъсирлашуви натижасида юз беришини кўрсатади. Статистик хатоликлар оралиғида ^{7}Be ҳосил бўлиш каналида $<n_{\pi+}>$ ва $<n_{\pi-}>$ ўртача кўпламчиликларнинг мос келиши нишон-протонларнинг қайта ноэластик зарядланиш ($p \rightarrow n + \pi^{+}$) ҳиссаси орқали қўшимча π^{+}-мезонлар ҳосил бўлишидан юзага келган. Бу фаразни текшириш учун протон-нишон сақланган ҳодисаларда (6-жадвалга қаранг), яъни қуйидаги яриминклюзив реакцияларда зарядланган пионлар ўртача кўпламчилигини кўриб чиқилди:

$$^{16}\mathrm{O} + p \rightarrow {}^{7}\mathrm{Li} + p_{\mathrm{rec}} + X, \qquad (13') \qquad\qquad ^{16}\mathrm{O} + p \rightarrow {}^{7}\mathrm{Be} + p_{\mathrm{rec}} + X. \qquad (14')$$

6-жадвалдан кўринадики, (13′) реакцияда π^{+}-мезонларнинг ўртача кўпламчилиги π^{-}-мезонлар ўртача кўпламчилигидан 0.10 ± 0.07 га катта, (14′) реакцияда эса, аксинча, π^{-}-мезонлар ўртача кўпламчилиги π^{+}-мезонларнинг ўртача кўпламчилигидан худди шу миқдорга (0.10 ± 0.07) катта.

6-жадвал

(13′) ва (14′) реакцияларда зарядланган пионлар ўртача кўпламчилиги

Реакция	Заррачалар типи		
	π^{+}	π^{-}	$\pi^{+} + \pi^{-}$
(13′)	0.41±0.06	0.31±0.05	0.72±0.07
(14′)	0.34±0.05	0.44±0.06	0.78±0.07

Шунингдек 6-жадвалдан статистик хатоликлар оралиғида (13′) ва (14′) реакциялар учун зарядланган пионларнинг ўртача кўпламчиликлари йиғиндиси мос келиши кўринади. 5 ва 6 жадваллардан статистик хатоликлар оралиғида мос реакцияларда ((13), (13′) ва (14), (14′)) манфий пионлар ўртача кўпламчилиги ҳодисаларда тепки-протонлар мавжуд ёки йўқлигига боғлиқ эмас. Бу нишон-протон ва снаряд орасида заряд алмашинув жараёни манфий пионлар ҳосил бўлишида ҳеч қанақа рол ўйнамаслигини кўрсатади. Кислород-16 ядроси бир хил сондаги протон ва нейтронлардан ташкил топганлиги билан боғлиқ равишда, (13′) ва (14′) реакциялар бўйича π^{+}-мезонлар ўртача кўпламчиликлари йиғиндиси бу реакциялар бўйича π^{-}-мезонлар ўртача кўпламчиликлари йиғиндиси билан мос келиши лозим. 6-жадвалда кўриниб турганидек, кўпламчиликлар амалда бир-бирига мос келади (0.75 ± 0.07), шунингдек, ўрганилган импульс 1.25-1.75 ГэВ/с оралиғида бўлган π^{+}-мезонларни идентификация қилиш усули тўғрилигини кўрсатади.

Албатта, дастлабки ядро парчаланиш жараёни масса сонлари $2 \leq A \leq 4$ бўлган ядролар шаклланишининг ягона йўли ҳисобланмайди, улар каскадли нуклонлар ёки камнуклонли ассоциациялар қўшилиши ҳисобига ҳам ҳосил бўлиши мумкин. Бироқ коалесценция механизми бир-биридан катта бўлмаган ($R \sim 1$ Фм) масофада ва импульслар фарқи нисбатан кичик нуклонлар ва камнуклонли ассоциациялар топилишининг кам эҳтимоллиги ҳисобига унинг аҳамияти сезиларли пасайган. Ҳақиқатдан, коалесценция модели бўйича ҳисобланган камнуклонли ядролар ҳосил бўлиш эҳтимоллиги

ядролар қиёсий чиқиши учун қуйидаги қийматларни беради: ^{2}H – 11,3%, ^{3}H ва ^{3}He – 7.5%, ^{4}He – 1.8%.

Диссертациянинг **“Кислород ядросининг A≤4 масса сонли енгил фрагментларга парчаланиши”** деб номланган тўртинчи бобида кислород ядроси α-кластерли тузилишининг намоён бўлиш эффектларини чуқурроқ ўрганиш мақсадида, 3.25 *A* ГэВ/*c* импульсли ^{16}O*p*-тўқнашувларида ^{4}He ва ^{2}H ядролар сони билан боғлиқ ^{3}H ва ^{3}He “кўзгу” ядролар ҳосил бўлиш жараёнлари қиёсий таҳлили натижалари келтирилган [112; С.268-271. 115; С34-37. 116; С.28-29.].

Ушбу бўлимда (1), (2), (22), (222) ва (2222) топологияларида ^{3}H ва ^{3}He “кўзгу” ядролар, дейтронлар ҳамда альфа зарралар ҳосил бўлиши ўзаро боғлиқлиги ўрганилди. Бошқача қилиб айтганда, бу ядролар ҳосил бўлиши қуйидаги яриминклюзив реакцияларда қараб чиқилди:

$^{16}O + p \rightarrow {}^{3}He + k^{2}H + X$ (15) $^{16}O + p \rightarrow {}^{3}H + k^{2}H + X,$ (15´)

$^{16}O + p \rightarrow {}^{3}He + {}^{4}He + k^{2}H + X$ (16) $^{16}O + p \rightarrow {}^{3}H + {}^{4}He + k^{2}H + X,$ (16´)

$^{16}O + p \rightarrow {}^{3}He + 2{}^{4}He + k^{2}H + X,$ (17) $^{16}O + p \rightarrow {}^{3}H + 2{}^{4}He + k^{2}H + X,$ (17´)

$^{16}O + p \rightarrow {}^{3}He + 3{}^{4}He + k^{2}H + X,$ (18) $^{16}O + p \rightarrow {}^{3}H + 3{}^{4}He + k^{2}H + X,$ (18´)

яъни ^{3}He ва ^{3}H енгил “кўзгу” ядролар ҳосил бўлиши биргаликда ҳосил бўлган альфа зарра ва дейтронлар сони билан боғлиқликда ўрганилди. Дейтронлар сони k барион ва электр зарядлари сақланиш қонунларига мос равишда 0 дан 7 гача ўзгариши мумкин (аммо экспериментда 4 тагача дейтрон ҳосил бўлиши кузатилди), X сифатида протонлар, кислород ядросининг нейтрон-фрагментлари, ҳамда тепки протонлар ёки пионлар бўлиши мумкин. Шундай қилиб, ҳосил бўлиши кузатилаётган “кўзгу” ^{3}He ва ^{3}H ядролар билан ҳамроҳ зарралар сонига $z > 2$ ва $A > 4$ ли кўп зарядли фрагментлар кирмайди, яъни (15) ва (15´) реакциялар кислород ядросининг тўлиқ бўлинишига тааллуқлидир. Юқорида қаралган реакциялардан кўринадики, кўпнуклонли фрагментларда нуклонлар миқдори бир хил, йиғинди электр зарядлари бир бирликка фарқланувчи (15) ва (15´), (16) ва (16´) ва бошқа каналлар характеристикалари жуфт ҳолда солиштирилади.

Қаралаётган (15−18) ва (15´−18´) реакциялардаги ҳодисаларнинг умумий сони 730 тага тенг бўлди. ^{3}He ядроси ҳосил бўлиши билан кузатиладиган (15−18) реакцияларида ҳодисаларнинг тўлиқ сони 364 тага тенг бўлиб, бу (15´−18´) реакцияларида ^{3}H ҳосил бўлувчи ҳодисалар сони 366 га мос келади. Кучли таъсирлашувдаги изотопик инвариантликка асосан бундай мос келишликни (15´−18´) реакцияларда нишон сифатида протон ўрнида нейтрон бўлганда кутиш мумкин эди. Шу туфайли олинган натижалар нотривиал ҳисобланади ва (15−18) ва (15´−18´) реакциялар амалга ошиши кислород ядроси уйғонган ҳолатининг бирламчи нуклон турига (зарядига) боғлиқ эмаслигини кўрсатади. Бу нишон протон ўз зарядини ядро ёки кўпнуклонли фрагментларга бермаган ҳолида мумкин бўлади.

7-жадвалда (15-18) ва (15′-18′) реакциялардаги масса сонлари $1 \leq A \leq 2$ фрагментлар, тепки протонлар ва зарядли пионлар ўртача кўпламчилиги иштирокчи дейтронларнинг иҳтиёрий сонлари учун келтирилган.

7-жадвалдан кўриниб турибдики, турли хил сондаги ассоциацияланган n_α альфа заррали (15−18) ва (15′−18′) реакцияларда ҳодисалар сони статистик хатоликлар чегарасида жуфт-жуфт мос келади. Барион заряди сақланиши туфайли бундай мослик ^{4}He ядросидаги протон ва нейтронлар умумий сонининг бир хиллигига асосланади, унинг ҳосил бўлиши ^{3}He и ^{3}H “кўзгу” ядролар чиқиш эҳтимолиятига бир хил таъсир кўрсатади.

7-жадвал

(15−18) ва (15′−18′) реакциялардаги $\langle n_p \rangle$ протон-фрагментлар, $\langle n_d \rangle$ дейтронлар, $\langle n_n \rangle$ нейтронлар, $\langle n(p_{rec}) \rangle$ тепки протонлар, $\langle n(\pi^-) \rangle$ π^--мезонлар ва $\langle n(\pi^+) \rangle$ π^+-мезонларнинг ўртача кўпламчиликлари

n_α	Реакция	$N_{ҳод}$	Зарралар ва фрагментлар ўртача кўпламчилиги					
			$\langle n_p \rangle$	$\langle n_d \rangle$	$\langle n_n \rangle$	$\langle n(p_{rec}) \rangle$	$\langle n(\pi^-) \rangle$	$\langle n(\pi^+) \rangle$
0	15	64	4.65±0.17	1.83±0.17	4.69±0.24	0.45±0.05	0.48±0.07	0.59±0.08
1	16	151	3.47±0.11	1.10±0.08	3.33±0.15	0.52±0.04	0.63±0.05	0.56±0.05
2	17	132	1.81±0.08	0.42±0.04	2.35±0.12	0.64±0.04	0.49±0.05	0.54±0.05
3	18	17	0.30±0.11	0	0.70±0.14	0.72±0.12	0.24±0.10	0.24±0.10
0	15′	60	5.16±0.15	1.81±0.13	4.22±0.21	0.51±0.05	0.33±0.06	0.79±0.06
1	16′	153	3.87±0.09	1.10±0.07	2.93±0.13	0.58±0.04	0.37±0.04	0.70±0.06
2	17′	132	2.49±0.07	0.45±0.05	1.61±0.10	0.73±0.04	0.24±0.03	0.45±0.05
3	18′	21	0.84±0.15	0	0.16±0.21	0.78±0.15	0.27±0.09	0.61±0.12

(15′−18′) реакцияларида барион ва электр зарядлари сақланиш қонунларига асосан турли хилдаги заряд алмашинуви жараёнлари ($p \to n\pi^+$, $n \to p\pi^-$ ва $np \to pn$) бўлмаган ҳолатда дейтрон ва протонлар йиғинди ўртача кўпламчилиги (15-18) реакциялардагига нисбатан биттага кўп бўлиши керак. (15-18) реакциялар бўйича олинган дейтронларнинг ўртача кўпламчилиги 0.93 ± 0.04 ни, (15′−18′) реакциялар бўйича эса 0.92 ± 0.04 ни ташкил қилади. (15−18) ва (15′−18′) реакцияларда дейтронлар сони мос тушишини қуйидагича талқин қилиш мумкин. Дейтронлар ҳосил бўлиш эҳтимоллиги протон-нейтрон жуфтлигига пропорционаллиги туфайли дейтронлар чиқишига ядродаги протон ёки нейтрон ортиқчалиги бир хил таъсир кўрсатади. $\langle n_d \rangle$ нинг ассоциацияланган α-зарралар сонига қараб камайиши барион заряди сақланиш қонунига асосланади. (18) ва (18′) реакцияларда дейтронлар чиқиши кузатилмайди. Бу қаралаётган таъсирлашув энергиясида (18) реакцияда нишон протони томонидан нейтрон қамраб олиниши эҳтимолиятининг жуда кичиклигини кўрсатади. (18′) реакцияда дейтрон ҳосил бўлиши эркин нейтронларнинг йўқлиги туфайли юз бермайди. Кислород таркибидаги 8 та нейтроннинг барчаси кўпнуклонли фрагментлар таркибида боғланган ҳолатда бўлади.

Мос равишда 0.63 ± 0.02 ва 0.56 ± 0.02 ларни ташкил қилган ҳолда тепки протонлар $<n(p_{rec})>$ ўртача кўпламчилиги (15′−18′) реакцияда (15-18) реакцияга қараганда кўпрок. Бу фарқ эса нишон протони ва кислород ядроси нейтрони ўртасидаги заряд алмашинуви ($np \rightarrow pn$) жараёнига асосланади.

^{3}He ва ^{3}H ядролари билан биргаликда ҳосил бўлувчи нуклон фрагментларининг ўртача кўпламчилиги статистик хатоликлар чегарасида бир-бирига яқин бўлиб, мос равишда 6.00 ± 0.06 ва 5.93 ± 0.06 ларни ташкил қилади. Бу қаралаётган (15−18) ва (15′−18′) реакцияларида ҳодисалар сони ва дейтронлар ўртача кўпламчилигининг жуфт-жуфт ҳолда мос келиши натижаси ҳисобланади (7-жадвалга қаранг).

Бундан ташқари қаралаётган турли хил дейтронли реакцияларда ^{3}He ва ^{3}H “кўзгу” ядролар нисбий чиқишининг жуфт-жуфт мос келиши кузатилди, яъни қаралаётган “кўзгу” ядроларнинг яриминклюзив парциал чиқиш кесими бир хил. Шунингдек, дейтрон сонига боғлиқ равишда (15−18) ва (15′−18′) реакциялари йиғинди ансамбллари характеристикалари бўйича солиштирма таҳлили бажарилди. 8-жадвалда (15−18) ва (15′−18′) реакциялар йиғинди ансамбларида иштирок этувчи дейтронлар сонига боғлиқ равишда протонлар, нейтрон фрагментлар ва зарядли пионларнинг статистик таъминланган каналларда ўртача кўпламчиликлари ҳақидаги маълумотлар келтирилган.

8-жадвал

(4.1−4.4) ва (4.1′−4.4′) реакциялар йиғинди ансамбларида биттадан ^{3}H ва ^{3}He “кўзгу” ядролар чиқиш каналлари билан боғланган дейтронлар сонига (n_d) боғлиқ α-зарралар ($<n_\alpha>$), протонлар ($<n_p>$), нейтрон-фрагментлар ($<n_n>$), π^--мезонлар ($<n(\pi^-)>$) ва π^+-мезонлар ($<n(\pi^+)>$) ўртача кўпламчилиги.

Дейтронлар сони, n_d	Ўртача кўпламчилик				
	$<n_\alpha>$	$<n_p>$	$<n_n>$	$<n(\pi^-)>$	$<n(\pi^+)>$
(15−18) реакциялар					
0	1.72 ± 0.13	2.84 ± 0.14	3.29 ± 0.20	0.57 ± 0.04	0.58 ± 0.05
1	1.17 ± 0.10	2.96 ± 0.10	3.38 ± 0.14	0.52 ± 0.05	0.50 ± 0.04
2	0.70 ± 0.15	3.14 ± 0.17	3.05 ± 0.23	0.20 ± 0.09	0.21 ± 0.10
(15′−18′) реакциялар					
0	1.76 ± 0.13	3.32 ± 0.14	2.64 ± 0.20	0.29 ± 0.05	0.58 ± 0.05
1	1.19 ± 0.10	3.50 ± 0.11	2.72 ± 0.15	0.31 ± 0.04	0.59 ± 0.05
2	0.73 ± 0.17	3.53 ± 0.19	2.54 ± 0.27	0.18 ± 0.10	0.40 ± 0.10

8-жадвалдан кўриниб турибдики, α-зарралар ўртача кўпламчилиги (15−18) ва (15′−18′) реакциялари йиғинди ансамбларида жуфт-жуфт мос келиб, ўртача 0.5 га камаяди. Бу дейтрон ва α-кластердаги нуклонлари сони муносабатига тенг бўлади. α-зарралар ўртача кўпламчилигининг дейтронлар сонига боғлиқлиги

$$<n_\alpha> = a + b*n_d$$

муносабат орқали аппроксимация қилинганда параметрлар қиймати қуйидагича бўлди: a=1.69±0.03, b=-0.51±0.03 (15−18) реакциялар учун ва

a=1.74±0.04, b=-0.52±0.03 (15′−18′) реакциялар учун. Шундай қилиб b нинг қиймати қаралаётган реакциялар учун мос ва 0.5 га яқин бўлади.

Реакцияларнинг иккала гуруҳида ҳам протонлар ва нейтронларнинг ўртача кўпламчилиги статистик хатоликлар оралиғида ассоциацияланган дейтронлар сонига боғлиқ эмас. Бунга сабаб дейтронлар сони билан α-зарралар ўртача кўпламчилиги чизиқли камайишидир. $<n_\alpha>$ нинг n_d дан чизиқли боғланишининг мавжудлиги дейтронларнинг сезиларли қисмининг кислород ядроси α-кластерлари бўлинишидан ҳосил бўлишини кўрсатади. Шундай қилиб, $<n_\alpha>$ нинг n_d га боғлиқлик характери улардан нуклонлар ўртача кўпламчилигига боғлиқ эмаслиги билан биргаликда қараб ^{16}O ядроси ўзида α-кластерли тузилишни юқори энергияларда намоён қилишлиги ҳисобига айтиш мумкин.

π^-- ва π^+-мезонларнинг ўртача кўпламчилиги (15−18) реакцияларнинг йиғинди ансамблларида жуфт-жуфт мос келади, бу қўшимча равишда нишон протонларининг ядро нейтронлари билан кўпроқ таъсирлашувини кўрсатади. (15′−18′) реакцияларда эса π^-- ва π^+-мезонлар ўртача кўпламчилиги икки марта фарқ қилиб, бу нишон ва снаряд протонлари заряд алмашинувининг афзаллигидан дарак беради.

Учта ^2H, ^3H, ^3He фрагментларнинг биргаликда ҳосил бўлиши таҳлили баъзасида ^3H ва ^3He ядролар ҳосил бўлувчи иккита турли хил α-кластердан уриб чиқарилган протон ва нейтронларнинг бирлашишидан дейтронлар шаклланмаслигини кўрсатди.

ХУЛОСА

«3.25 А ГэВ/с импульсли ^{16}Op-тўқнашувларида кўпнуклонли тизимлар ва ядролар ҳосил бўлиши» мавзусидаги физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси бўйича ўтказилган тадқиқотлар асосида куйидагиларни хулоса қилиш мумкин:

1. Илк бор 6 ва 7 нуклонли тизим ва ядролар ҳосил бўлиши яриминклюзив кўндаланг кесимлари аниқланди. Масса сонлари $A \leq 7$ иккиламчи кўпнуклонли ядроларнинг шаклланишида кислород ядроси α-кластерли структурасининг ҳамда электр ва барион зарядлари сақланиш қонунларининг етарли даражада роли ҳақида кўрсатма олинди. Бу бир қанча фактлар орқали ўз тасдиғини топиб, шу жумладан, α-зарралар ҳосил бўлиши билан кузатиладиган 6 ва 7 нуклонли тизимлар каналлари кўндаланг кесимларининг α-зарралар ҳосил бўлмайдиган каналлар кесимларига нисбатан сезиларли даражада юқорилигини кўрсатиш мумкин.

2. 6 ва 7 нуклонли тизимлар ва ядролар ҳосил бўлиши билан кузатиладиган зарралар характеристикалари асосан кўп нуклонли ҳолат заряди ва йиғинди масса сони орқали аниқланади ва бу ягона ядроми ёки айнан ўша йиғинди масса сонли (А) икки ёки уч ядроларнинг боғланган, резонансли ёки континиум ҳолатли эканлигига боғлиқ эмаслиги кўрсатилган.

3. Экспериментда олинган маълумотлар КПБМ натижалари билан систематик солиштирилиб, моделнинг 6 ва 7 нуклонли тизим ва ядролар

ҳосил бўлиши кўндаланг кесимларини тушунтира олмаслиги кўрсатилди. КПБМда протони ортиқча тизим ва ядроларнинг улуши нейтрони ортиқча ядролар ҳосил бўлиши кўндаланг кесимларидан юқори бўлиб, бу нишон протони зарядининг кўпнуклонли тизим ва ядроларнинг шаклланиш жараёнида иштирок этишига асосланади.

4. «Кўзгу» ^{7}Li ва ^{7}Be ядролар ҳосил бўлишининг инклюзив кўндаланг кесимлари бир-бирига мос келади. Бу ядролардаги 6 ва 7 нуклонли тизимлардаги каби зарядлар орасидаги фарқ асосан қўшимча равишда протонлар ҳосил бўлиши билан компенсация қилинади. Нишон протоннинг заряди масса сони $2 \leq A \leq 4$ ядроларга узатилмайди. Нишон протон зарядининг фрагмент ядроси нейтронига берилиши ва нуклонларнинг ноэластик заряд алмашинуви жараёнларини ҳисобга олган ҳолда нейтрон фрагментлари ўртача кўпламчилигига протон-фрагментлари ўртача кўпламчилиги мос келади.

5. «Кўзгу» ^{7}Li ва ^{7}Be ядролар ҳосил бўлувчи каналларда протон ва нейтрон фрагментлар ва масса сонлари $2 \leq A \leq 4$ ядролар йиғинди ўртача кўпламчилиги ҳамда ушбу ядролар кинематик характеристикалари ўртача қийматларининг мос келиши бу ядролар шаклланиш кинематик шароитлари яқинлиги ва снаряд ядроси парчаланиш даражаси бир хиллиги ҳақида хулоса қилиш имконини беради.

6. Реакцияларда протони ортиқча ҳамда нейтрони ортиқча ядроларнинг чиқиши пионлар заряди билан боғлиқ бўлганлигига қарамасдан, масса сонлари $2 \leq A \leq 3$ ҳамроҳ фрагментларнинг боғланган нуклонлар ўртача сони унга боғлиқ эмас. Зарядланган пионлар ўртача кўпламчилиги тадқиқ қилинган кўпнуклонли тизимлар турига ҳам боғлиқ эмаслиги аниқланди.

7. ^{4}He ва ^{2}H ядроларининг сони турли хил бўлган каналларда енгил «кўзгу» ядролар (^{3}H ва ^{3}He) ҳосил бўлиши билан кузатиладиган ҳодисалар сони жуфт-жуфт мос келиши кўрсатилди. Протон ва нейтрон фрагментлари ўртача кўпламчилиги ассоциацияланган дейтронлар сонига боғлиқ эмаслиги кузатилди. Бундан эса ушбу каналларда кислород ядроси таркибидаги α-кластерлар бўлиниши ҳисобига дейтронларнинг салмоқли қисми ҳосил бўлиши ҳақида хулоса келиб чиқади.

8. ^{3}He (^{3}H) “кўзгу” ядролар ҳосил бўлиши асосан кислород ядроси α-кластеридан битта n (p) уриб чиқарилиши ҳисобига содир бўлиши мумкинлиги кўрсатилди.

НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЁНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ, АСТРОНОМИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ И НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА ИМЕНИ МИРЗО УЛУГБЕКА

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

КУРБАНОВ АНВАР РАЗЗАКОВИЧ

ОБРАЗОВАНИЕ МНОГОНУКЛОННЫХ СИСТЕМ И ЯДЕР В ^{16}Op-СОУДАРЕНИЯХ ПРИ 3.25 А ГэВ/С

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 Узбекистан за № B2017.1.PhD/FM27.

Диссертация выполнена в Физико-техническом институте АН РУз.

Автореферат диссертации на трёх 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: **Олимов Косим,**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Муминов Толиб Мусаевич,**
доктор физико-математических наук, профессор, академик

Базаров Эркин Ходжиевич,
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: **Самаркандский государственный университет**

Защита диссертации состоится “___”_____ 2019 года в ___ часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики, Астрономическом институте, Национальном университете Узбекистана (Адрес: 100174, 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_____). (100214, г. Ташкент, поселок Улугбек, ИЯФ; тел. (+99871) 289–31–18).

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

Э.М. Турсунов
ученый секретарь Научного совета
по присуждению ученых степеней,
д.ф-м.н., старший научный сотрудник

И. Нуритдинов
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 диссертация. В настоящее время экспериментальные исследования процессов множественной генерации частиц и фрагментации релятивистских ядер чрезвычайно важны для решения фундаментальных вопросов физики высоких энергий и релятивистской ядерной физики. Одним из важнейших источников информации о структуре ядер и ее влиянии на состав конечных продуктов реакций, а также роли зарядовообменных процессов при фрагментации ядер является исследование соударений релятивистских ядер с нуклонами и ядрами в полуинклюзивных и максимально приближенных к эксклюзивным реакциях. Поэтому одной из наиболее актуальных тем является изучение распада релятивистских ядер с помощью пузырьковых камер, экспонируемых в сильное магнитное поле.

На сегодняшний день в исследовательских центрах по всему миру проводятся исследования процессов фрагментации релятивистских ядер, в частности установлено выполнение гипотезы предельной фрагментации в областях фрагментации снаряда и мишени, показано, что процесс фрагментации ядер имеет стохастический характер, установлена независимость сечения выхода и формы распределений фрагментов промежуточных масс по заряду для ядра с определенным массовым числом от первичной энергии, обнаружен выход на плато сечения возбуждения легких фрагментов в области первичных энергий $E_0 \approx 2-3$ ГэВ на нуклон (Физический институт Российской академии наук, Москва, Россия, Физико-технический институт академии наук Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан). В рамках Сотрудничества «Беккерель» (ЛВЭ, ОИЯИ, Дубна, Россия) начиная с 2004 года ведутся интенсивные исследования кластерной структуры легких ядер с массовыми числами A = 3–14 методом ядерной фотоэмульсии. Им в частности установлено, что в легких ядрах при малых уровнях их возбуждения могут проявляться не только α-кластерные, но и α+h, α+t, α+d и тому подобные кластерные структуры, которые в итоге определяют состав и вероятности выхода конечных продуктов реакции.

На сегодняшний день в нашей стране уделяется большое внимание фундаментальным исследованиям по изучению процессов образования многочастичных систем и ядер в столкновениях релятивистских ядер кислорода с протонами. Для дальнейшего развития Республики Узбекистан в Стратегии действий[1] на период 2017–2021 гг. отражены меры по развитию науки, поддержке приоритетных направлений фундаментальных исследований и внедрению в практику результатов фундаментальных исследований, изучение процессов образования шести- и семинуклонных систем и ядер, определение сечения выхода инклюзивных и полуинклюзивных реакций с образованием 6- и 7-нуклонных систем и ядер,

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

сравнительный анализ выходных «зеркальных» каналов с образованием ядер ^{3}He и ^{3}H, а также других легких ядер – дейтронов и α-частиц; получение информации о влиянии зарядообменных процессов на состав и выходы продуктов реакции, исследование корреляции выхода α-частиц и дейтронов.

Данная научно-исследовательская работа соответствует задачам, утвержденным в государственных нормативных документах, Указах Президента Республики Узбекистан № УП-4512 от 1 марта 2013 года «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии», № УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» и Постановлении Президента № ПП-2789 от 18 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. Исследовательская работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан – «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

Степень изученности проблемы. К настоящему времени ведущими учеными мира, например, российскими (П.И. Зарубин, В. Русакова, Н.Г., Пересадько Д.А. Артеменков и др.), американскими (H.H. Heckman, D.E. Greiner, P.J. Lindstrom) и другими учеными выполнен большой объём экспериментальных и теоретических исследований процессов множественной генерации частиц и фрагментации релятивистских ядер во взаимодействиях с адронами и ядрами, хотя некоторые важные проблемы остаются пока нерешёнными.

Например, российскими учеными интенсивно ведутся исследования кластерной структуры легких ядер в их периферических соударениях с ядрами фотоэмульсии. Но им не удалось определить сечения образования всех возможных изотопов, образующихся при фрагментации ядер и установить механизмы их фрагментации. Американские ученые проводили исследования образования различных изотопов легких ядер ^{12}C и ^{16}O в соударениях с ядрами железа при высоких энергиях электронным методом под малыми углами вылета фрагментов. Ограниченность охвата угла вылета фрагментов не позволила им определить полные сечения выхода этих изотопов и более надежно установить механизмы их образования.

Кроме того, наиболее близкими к исследуемой проблеме являются результаты диссертационных работ узбекских ученых К. Олимова, Э.Х. Базарова и А.А. Усарова, в которых даны общие характеристики процесса фрагментации ядер кислорода во взаимодействиях с протонами при 3.25 *A* ГэВ/с, в частности изучены множественности одно- и многозарядных фрагментов; исследованы корреляции в образовании однозарядных частиц и легких фрагментов; определены сечения топологических каналов развала ядер кислорода, установлены количественные вклады нестабильных ядер ^{8}Be и ^{9}B, а также возбужденного ядра ^{12}C* в сечение образования α-частиц; определены сечения образования фрагментов с массовыми числами от A=1

до A=16; проведен сравнительный анализ образования легких зеркальных ядер ^{3}He и ^{3}H; показано, что их образование происходит при близких кинематических условиях и в процессах их образования заряд протона-мишени не участвует. Другими словами, в этих диссертационных работах, в основном, были исследованы инклюзивные ^{16}Op-реакции. Однако, в них не исследованы полуинклюзивные каналы развала ядер кислорода на многонуклонные системы и ядра, не проводился сравнительный анализ характеристик каналов образования 6- и 7-нуклонных систем и ядер; не изучена роль зарядообменных процессов между протоном-мишенью и ядром кислорода в процессе его фрагментации на многонуклонные системы и ядра. Не изучены ассоциативные множественности легких фрагментов с A≤3 в каналах развала ядер кислорода на многонуклонные системы и ядра.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках научных проектов Физико-технического института НПО «Физика-Солнце» Ф2-Ф029 «Исследование структуры ядерной материи и коллективных эффектов во взаимодействиях адронов и ядер с ядрами при высоких энергиях» (2007−2011), Ф2-Ф-0-42438 «Исследование многочастичных состояний во взаимодействиях адронов и ядер с ядрами при высоких энергиях» (2012−2016) и 04-10 «Совместное исследование процессов рождения заряженных пионов и образования протоно(нейтроно)-избыточных ядер и систем в ^{16}Op-соударениях при 3.25 A ГэВ/с» (2011–2012).

Целью исследования является установление закономерностей образования многонуклонных систем и ядер с массовыми числами A ≤ 7, влияния исходной структуры ядра кислорода и зарядообменных процессов на состав и выходы конечных продуктов в ^{16}Op-соударениях при 3.25 A ГэВ/с.

Задачи исследования:

разработать и апробировать новый метод разделения протонов и положительно заряженных пионов, визуально не различимых в области импульсов 1.25–1.75 ГэВ/с, а также методику учета поправок на потерю различных типов частиц и фрагментов;

исследовать основные закономерности образования 6- и 7-нуклонных систем и ядер;

изучить средние множественности и кинематические характеристики различных частиц (протонов отдачи, нейтронов фрагментови заряженных пионов) и фрагментов с A ≤ 4, сопровождающих образование 6- и 7-нуклонных систем и ядер;

изучить особенности и механизмы образования лёгких зеркальных ядер ^{3}He, ^{3}H, ^{7}Li, ^{7}Be и их корреляции с образованием различного числа дейтронов и α-частиц;

выполнить сравнительный анализ экспериментальных результатов и предсказаний каскадно-фрагментационной испарительной модели для

выявления и установления роли α-кластерной структуры ядра кислорода в процессах его фрагментации.

Объектом исследования являются процессы фрагментации, происходящие при столкновениях ядер кислорода с протонами при импульсе 3.25А ГэВ/с.

Предметом исследования являются многонуклонные системы и ядра, образующиеся во взаимодействиях ядер кислорода с протонами при 3.25 А ГэВ/с.

Методы исследования. Для решения поставленных задач по анализу образования многонуклонных систем и ядер в ^{16}Op-соударениях при 3.25 А ГэВ/с использован инклюзивный и полуинклюзивный подход с применением математической статистики и методов монте-карловского моделирования.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

на основе совпадения средних множественностей нуклонов и ядер сопровождения с A = 2-4 в полуинклюзивных реакциях с образованием зеркальных ядер ^{7}Li и ^{7}Be, а также средних значений кинематических характеристик этих ядер и частиц сопровождения сделан вывод о близости кинематических условий формирования этих зеркальных ядер и одинаковой степени дезинтеграции ядра-снаряда, подтверждено совпадение инклюзивных сечений образования зеркальных ядер ^{7}Li и ^{7}Be и обнаружено, что разность в зарядах этих ядер, как и в случае образования 6- и 7-нуклонных систем, в основном компенсируется дополнительным образованием протонов;

впервые определены полуинклюзивные сечения образования 6- и 7-нуклонных систем и ядер в ^{16}Op-соударениях при 3.25 А ГэВ/с. Получено указание на существенную роль α-кластерной структуры ядра кислорода в формировании конечных многонуклонных ядер с $A \leq 7$ и законов сохранения электрического и барионного зарядов, что подтверждается рядом фактов, в числе которых существенное превышение сечений каналов 6- и 7-нуклонных систем с образованием α-частиц над сечениями каналов без их образования.

впервые установлена независимость средних множественностей протонов- и нейтронов-фрагментов от числа ассоциированных дейтронов, указывающая на то, что основным механизмом образования дейтронов в рассматриваемых каналах является разрушение α-кластеров ядра кислорода.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

установлено, что средние множественности сопровождающих частиц определяются в основном суммарным массовым числом и зарядом конечного многонуклонного состояния и не зависят от того, является ли оно единым ядром или связанным, резонансным или континуум состоянием двух или трёх ядер с тем же суммарным массовым числом А;

показано, что каскадно-фрагментационная испарительная модель недооценивает поперечные сечения образования как 6-, так и 7-нуклонных систем и ядер;

впервые определены средние множественности нейтронов фрагментов в каналах с образованием 6- и 7-нуклонных систем и ядер и установлено, что

они находятся в разумном согласии с множественностями протонов-фрагментов с учетом передачи заряда протона-мишени нейтронам фрагментирующего ядра и процессов неупругой перезарядки нуклонов.

Достоверность результатов исследований обосновывается достаточно большой (>10000 событий) статистикой экспериментального материала, более точным определением заряда и идентификацией частиц и фрагментов по массе, а также измерением их импульсов и углов с высокой точностью; применением общепринятых статистических методов обработки и анализа экспериментальных данных, а также использованием как инклюзивного, так и эксклюзивного подходов к интерпретации результатов; соответствием полученных экспериментальных данных с результатами других экспериментов и основными выводами теоретических работ по проблеме фрагментации ядер.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования заключается в том, что полученные в исследовании результаты дают обширный физический материал об особенностях и механизмах формирования многонуклонных систем и легких ядер и способствуют построению более реалистической картины фрагментации ядер с учётом их исходной структуры, которую необходимо учитывать при разработке новых теоретических подходов и моделей. Количественная информация и апробированные методы исследования образования многонуклонных систем и зеркальных ядер (^{3}H и ^{3}He, ^{7}Li и ^{7}Be), а также способ получения информации о нейтронах-фрагментах могут найти широкое применение в других экспериментах по изучению процессов фрагментации ядер при высоких энергиях.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что полученные результаты позволяют пополнить банк данных по взаимодействиям легких ядер при высоких энергиях, определить сечения образования вторичных многонуклонных систем и лёгких зеркальных ядер ^{3}H и ^{3}He, ^{7}Li и ^{7}Be, а также механизмы образования дейтронов, улучшить существующие теоретические модели фрагментации и создать новые теоретические модели образования вторичных частиц.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов по образованию многонуклонных систем и ядер в ^{16}Op-взаимодействиях при импульсе 3.25 А ГэВ/с подтверждается, что:

результаты, полученные в ходе обработки и анализа экспериментальных данных по сечениям образования зеркальных ядер ^{3}H и ^{3}He, ^{7}Li и ^{7}Be, 6- и 7-нуклонных систем и ядер в ^{16}Op-соударениях при 3.25 А ГэВ/с (исследование α-кластерной структуры взаимодействующих ядер), использованы при интерпретации экспериментальных данных в рамках выполнения научного Договора № 304 от 30 марта 2018 года на тему «Перспективные фундаментальные исследования по физике, астрофизике космических лучей на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции», в Лаборатории физики космических лучей Физико-технического института Министерства образования и науки Республики Казахстан (Справка Физико-технического

института Министерства образования и науки Республики Казахстан, 06.07.2018). Использование этих научных результатов позволило провести анализ данных, полученных в рамках астрофизических исследований космических лучей, а также оценить сечение выхода α-частиц (исследовать α-кластерную структуру взаимодействующих ядер) и соответственно их вклад в полуинклюзивные и инклюзивные сечения образования;

результаты расчетов инклюзивных и полуинклюзивных сечений образования 6- и 7-нуклонных систем и ядер в ^{16}Op-соударениях при 3.25 А ГэВ/с были использованы при формировании пучков короткоживущих фрагментов для облучения ядерной фотоэмульсии в рамках программы «Беккерель» на Нуклотроне ЛФВЭ (Письмо ОИЯИ №010-43/472, 29.10.2018). Научные результаты, т.е. данные по фрагментации, использовались как входные при генерации моделированных монте-карловских событий фрагментации для планируемых экспериментов на сооружаемом коллайдере НИКА.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы обсуждены на 5 международных и 5 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 19 научных работ, в том числе 9 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ, из них 4 – в зарубежных журналах.

Структура и объём диссертация. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Текст диссертации изложен на 115 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность проведённых исследований, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, показана степень изученности проблемы, сформулированы её цель и задача, выявлены объекты, предметы и методы исследования, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объёме и структуре диссертации.

В первой главе **«Краткий обзор состояния теоретических и экспериментальных исследований фрагментации ядер»** приведён литературный обзор известных теоретических и экспериментальных работ по процессам фрагментации и кластеризации в адрон- и ядро-ядерных соударениях при высоких энергиях и по исследованию в них роли внутриядерной структуры. В главе делается вывод об актуальности исследований процессов фрагментации релятивистских ядер для изучения образования многонуклонных систем и ядер совместно с процессом множественной генерации частиц, что может послужить основой для развития более реалистичных теоретических подходов к ядерным реакциям.

Во второй главе **«Методика эксперимента»** детально описана методика получения экспериментальных данных, даны основные характеристики первичного пучка и 1-метровой водородной пузырьковой камеры (ВПК), приведены погрешности импульсных и угловых измерений, статистика экспериментального материала, неупругие сечения, процедура разделения фрагментов по массовому числу, изотопный состав и инклюзивные сечения образования фрагментов с зарядами $1 \leq Z_{fr} \leq 4$ в ^{16}Op-соударениях при 3.25 А ГэВ/с.

Для идентификации фрагментов по массе были введены следующие интервалы импульса в лабораторной системе координат: однозарядные фрагменты с $1.75 < p < 4.75$ ГэВ/*c* считались протонами, с $4.75 < p < 7.75$ ГэВ/*c* относились к ^{2}H и с $p > 7.75$ ГэВ/*c* – к ядрам ^{3}H. Двухзарядные фрагменты с $p < 10.75$ ГэВ/*c* относились к ^{3}He, а с $p > 10.75$ ГэВ/*c* – к ^{4}He. Трехзарядные фрагменты с импульсами $p < 21.25$ ГэВ/*c* относились к ядрам ^{6}Li, с $21.25 < p < 24.5$ ГэВ/*c* – к ^{7}Li, а с $p \geq 24.5$ ГэВ/с – к ^{8}Li. Четырехзарядные фрагменты с импульсами $p < 25.75$ ГэВ/*c* относились к ядрам ^{7}Be, так как стабильное ядро ^{8}Be отсутствует среди изотопов ядра бериллия, начало импульсного спектра которого могло бы перекрываться с «хвостом» импульсного спектра ядра ^{7}Be.

В данном эксперименте протоны и π^{+}-мезоны визуально эффективно идентифицируются в области импульсов $p < 1.25$ ГэВ/*c*. В настоящей работе впервые выполнено разделение протонов и π^{+}-мезонов и учтен вклад протонов в области импульсов $1.25 < p < 1.75$ ГэВ/*c*. Данная методика основана на предположении о тождественности механизмов образования быстрых отрицательно и положительно заряженных пионов, так как

исходное число протонов и нейтронов ядра кислорода одинаково. Таким образом, в экспериментальных данных средние множественности протонов фрагментов и протонов-отдачи приведены с учетом полученной величины вклада протонов в области $1.25 < p < 1.75$ ГэВ/*c*.

В третьей главе **«Образование многонуклонных систем и ядер с массовыми числами 6–7 в ^{16}O*p*-взаимодействиях при импульсе 3.25 *A* ГэВ/с»** изложены основные полученные результаты по формированию 6- и 7-нуклонных систем и зеркальных ядер ^{7}Li и ^{7}Be в ^{16}O*p*-соударениях при 3.25 *A* ГэВ/*c*. Получены их средние множественности и определены сечения выхода многонуклонных систем. Проанализированы множественности одно- и двухзарядных частиц сопровождения и их характеристики. Приведены результаты систематического сопоставления экспериментальных данных с предсказаниями каскадно-фрагментационной испарительной модели.

В разделе 3.1. приведены результаты по образованию многонуклонных систем и ядер в следующих полуинклюзивных реакциях:

6-нуклонные системы:

$^{16}O + p \rightarrow {}^{6}Li + X,$ (1)

$^{16}O + p \rightarrow {}^{4}He + {}^{2}H + X,$ (2)

$^{16}O + p \rightarrow {}^{3}He + {}^{3}H + X,$ (3)

$^{16}O + p \rightarrow {}^{3}He + {}^{3}He + X,$ (4)

$^{16}O + p \rightarrow {}^{3}H + {}^{3}H + X,$ (5)

$^{16}O + p \rightarrow {}^{2}H + {}^{2}H + {}^{2}H + X,$ (6)

7-нуклонные системы:

$^{16}O + p \rightarrow {}^{7}Li + X,$ (7)

$^{16}O + p \rightarrow {}^{7}Be + X,$ (8)

$^{16}O + p \rightarrow {}^{4}He + {}^{3}He + X,$ (9)

$^{16}O + p \rightarrow {}^{4}He + {}^{3}H + X,$ (10)

$^{16}O + p \rightarrow {}^{3}He + {}^{2}H + {}^{2}H + X,$ (11)

$^{16}O + p \rightarrow {}^{3}H + {}^{2}H + {}^{2}H + X$ (12)

В качестве X может быть одно- или двухзарядный фрагмент с $A \leq 3$, протон-отдачи или пион, т.е. другие возможные каналы образования рассматриваемых систем с рождением ядер сопровождения массы $A \geq 4$ не рассматривались.

Сечения выхода 6- и 7-нуклонных систем, рассчитанные по КФИМ, оказались равными 29.98 ± 0.67 мбн и 34.27 ± 0.72 мбн, тогда как их экспериментальные значения соответственно равны 42.18 ± 1.34 мбн и 39.55 ± 1.30 мбн. Эти различия в сечениях указывают на недооценку в КФИМ образования как 6-, так и 7-нуклонных систем относительно экспериментальных данных, связанную, по-видимому, с более высокой степенью развития внутриядерных каскадных процессов в КФИМ и приводящую к более сильному разрушению исходного ядра.

В табл. 1 и 2 приведены суммарный заряд (Q) и сечения выхода (σ_y) соответственно для реакций (1−6) с образованием 6-нуклонных систем и ядер, а также для реакций (7−12) с образованием 7-нуклонных систем и ядер в сравнении с предсказаниями КФИМ.

Из данных табл. 1 и 2 видно, что максимальные сечения как 6-, так и 7-нуклонных систем наблюдаются в реакциях с образованием ядер ^{4}He. Так, для 6-нуклонной системы сечение выхода α-частицы в эксперименте составляет 23.83 ± 1.03 мбн, а для 7-нуклонной – 26.99 ± 1.15 мбн. Соответствующие величины, рассчитанные по КФИМ, составляют 12.22 ±

0.44 мбн и 14.14 ± 0.49 мбн, т.е. в среднем в 1.93 раза меньше, чем в эксперименте. Это обстоятельство, по нашему мнению, свидетельствует о проявлении α-кластерной структуры фрагментирующего ядра кислорода, не учитываемой в КФИМ.

Таблица 1

Суммарный заряд (Q) и сечения выхода (σ_y) реакций (1−6)

Тип системы	Порядковый номер реакции	Суммарный заряд, Q	Сечение реакции σ_y, мбн	
			Эксп.	КФИМ
^{6}Li	1	3	3.67±0.36	7.00±0.33
^{4}He + ^{2}H	2	3	23.83±1.03	12.22±0.44
^{3}He + ^{3}H	3	3	5.55±0.48	2.93±0.21
^{3}He + ^{3}He	4	4	3.67±0.39	4.11±0.25
^{3}H + ^{3}H	5	2	2.64±0.36	2.53±0.20
^{2}H + ^{2}H + ^{2}H	6	3	2.81±0.37	1.20±0.13

Действительно, основное расхождение в сечениях выхода 6-нуклонных систем в эксперименте и КФИМ наблюдается именно в канале с выходом α-частиц, а суммарные сечения выхода остальных реакций, составляя 18.87 ± 0.85 мбн в эксперименте и 17.77 ± 0.65 мбн в КФИМ, практически совпадают друг с другом.

Отметим, что совпадение экспериментальных и расчетных сечений образования 6-нуклонных систем имеет место только для идентичных вторичных ядер (^{3}He + ^{3}He) и (^{3}H + ^{3}H).

Таблица 2

Суммарный заряд (Q) и сечения выхода (σ_y) реакций (7−12)

Тип системы	Порядковый номер реакции	Суммарный заряд, Q	Сечение реакции σ_y, мбн	
			Эксп.	КФИМ
^{7}Li	7	3	2.72±0.31	6.36±0.31
^{7}Be	8	4	3.23±0.39	10.65±0.41
^{4}He + ^{3}He	9	4	13.77±0.26	7.88±0.35
^{4}He + ^{3}H	10	3	13.22±0.75	6.26±0.31
^{3}He + ^{2}H + ^{2}H	11	4	3.21±0.37	1.69±0.16
^{3}H + ^{2}H + ^{2}H	12	3	3.21±0.40	1.43±0.15

Интересно сопоставить сечения выхода системы ^{4}He + ^{2}H и ядер ^{6}Li. На эксперименте это отношение составляет 6.5, тогда как в модели оно соответственно равно 1.7. Если предположить, что образование ядер ^{6}Li происходит за счет слияния ядер ^{4}He и ^{2}H, тогда в рамках модели коалесценции такое подавление можно объяснить такими факторами, как необходимость малости относительных импульсов и пространственная близость ядер ^{4}He и ^{2}H. Аналогичные соображения можно привести относительно соотношений сечений выхода ядер ^{7}Li и системы ^{4}He + ^{3}H, а

также ядер ^{7}Be и системы ^{4}He + ^{3}He. В КФИМ максимальное сечение выхода имеет канал с образованием ядра ^{7}Be. Кроме того, в модели наблюдается различие в сечениях выхода систем ^{4}He+^{3}He и ^{4}He+^{3}H, причем первая система имеет сечение выхода в 1.3 раза больше, чем последняя. Это, по-видимому, связано с тем, что в модели заряд протона-мишени участвует в формировании лёгких зеркальных ядер, приводя к увеличению сечения выхода протоно-избыточных ядер по сравнению с нейтроно-избыточными.

Отметим совпадение экспериментальных сечений выхода 6-нуклонных систем – ^{6}Li и ^{3}He + ^{3}He, а также 7 нуклонных систем – ^{4}He + ^{3}He и ^{4}He + ^{3}H , отличающихся суммарным зарядом, что в последнем случае, по-видимому, связано с идентичностью механизмов формирования лёгких зеркальных ядер с A = 3.

Наибольшая средняя множественность протонов (см. табл. 3, 4) для 6-нуклонной системы наблюдается в канале с максимальным разрушением исходной структуры – ^{2}H+^{2}H+^{2}H и в канале с минимальным суммарным зарядом (2) – ^{3}H+^{3}H, а для 7-нуклонной системы – ^{2}H+^{2}H+^{3}H.

Таблица 3

Средние множественности легких фрагментов и протонов-отдачи p_{rec}, сопутствующих образованию 6-нуклонной системы, и суммарный заряд (Q) системы

Тип системы	Q	Источник данных	Частицы сопровождения				
			^{1}H	^{2}H	^{3}H	^{3}He	p_{rec}
^{6}Li	3	Эксп.	3.42±0.12	0.74±0.08	0.28±0.05	0.32±0.05	0.49±0.05
		КФИМ	3.38±0.06	0.74±0.03	0.31±0.03	0.44±0.03	0.50±0.03
^{4}He + ^{2}H	3	Эксп.	3.02±0.05	0.83±0.03	0.34±0.02	0.32±0.02	0.53±0.02
		КФИМ	3.53±0.05	0.47±0.02	0.21±0.01	0.27±0.01	0.52±0.02
^{3}He + ^{3}H	3	Эксп.	3.36±0.10	0.63±0.05	0.30±0.04	0.39±0.05	0.51±0.04
		КФИМ	3.62±0.10	0.54±0.04	0.23±0.03	0.32±0.03	0.49±0.04
^{3}He + ^{3}He	4	Эксп.	2.50±0.13	0.71±0.08	0.32±0.04	0.31±0.04	0.48±0.04
		КФИМ	3.22±0.09	0.49±0.03	0.13±0.02	0.36±0.03	0.48±0.03
^{3}H + ^{3}H	2	Эксп.	3.84±0.18	0.85±0.10	0.23±0.05	0.36±0.05	0.60±0.05
		КФИМ	4.12±0.10	0.66±0.05	0.27±0.03	0.15±0.03	0.56±0.04
^{2}H + ^{2}H + ^{2}H	3	Эксп.	3.69±0.14	0.67±0.07	0.32±0.05	0.23±0.05	0.49±0.05
		КФИМ	3.98±0.15	0.31±0.05	0.33±0.05	0.25±0.05	0.41±0.06

Для 6-нуклонных систем – ^{3}He+^{3}He и ядра ^{6}Li – средние множественности протонов отличаются на 0.9, указывая на компенсацию разности зарядов этих систем дополнительным образованием протонов, так как средние множественности других частиц сопровождения близки друг другу. Для 7-нуклонных систем с одинаковым суммарным зарядом (4) – ^{7}Be, ^{4}He+^{3}He и ^{2}H+^{2}H+^{3}He – средние множественности протонов в пределах статистических погрешностей также совпадают. Для первых двух каналов в

пределах статистических погрешностей совпадают также множественности ^{2}H, ^{3}H и ^{3}He. Отметим, что в КФИМ аналогичных эффектов не наблюдается.

Для 7-нуклонных систем с одинаковым суммарным зарядом 3 – ядра ^{7}Li и системы ^{4}He+^{3}H – в пределах статистических погрешностей совпадают средние множественности всех частиц сопровождения. Интересно также отметить совпадение экспериментальных средних множественностей частиц сопровождения при образовании ядер ^{6}Li и ^{7}Li, т.е. лишний нейтрон в последнем ядре не влияет на величину средней множественности.

Сравнение экспериментальных средних множественностей образования ядер ^{2}H с расчетом по КФИМ показывает, что они систематически превышают модельные как для 6-нуклонных, так и 7-нуклонных систем, указывая на возможный канал образования дейтронов от распада α-кластеров исходного ядра. Аналогичное сопоставление для случая образования ядер ^{3}H показало, что превышение экспериментальных значений над расчетными значениями имеет место для систем ^{4}He+^{2}H, ^{3}He+^{3}H и ^{3}He+^{3}He, а также ^{7}Be, ^{4}He+^{3}He, ^{4}He+^{3}H и ^{2}H+^{2}H+^{3}He. Существенное отличие экспериментальных средних множественностей ядер ^{3}He от расчетных наблюдается в каналах с образованием ^{6}Li, ^{3}He+^{3}H, ^{3}He+^{3}He и ^{3}H+^{3}H.

Таблица 4

Средние множественности легких фрагментов и протонов-отдачи, сопутствующих образованию 7-нуклонной системы, и суммарный заряд (Q) системы

Тип системы	Q	Источник данных	Частицы сопровождения				
			^{1}H	^{2}H	^{3}H	^{3}He	p_{rec}
^{7}Li	3	Эксп.	3.34±0.14	0.77±0.09	0.27±0.05	0.28±0.05	0.58±0.05
		КФИМ	3.30±0.06	0.69±0.04	0.35±0.03	0.30±0.03	0.53±0.02
^{7}Be	4	Эксп.	2.76±0.14	0.71±0.07	0.28±0.05	0.33±0.05	0.53±0.05
		КФИМ	2.80±0.04	0.60±0.03	0.19±0.02	0.48±0.02	0.48±0.02
^{4}He + ^{3}He	4	Эксп.	2.71±0.06	0.68±0.04	0.27±0.02	0.37±0.03	0.51±0.02
		КФИМ	3.33±0.05	0.45±0.02	0.15±0.02	0.34±0.02	0.45±0.02
^{4}He + ^{3}H	3	Эксп.	3.32±0.07	0.76±0.04	0.30±0.02	0.30±0.02	0.57±0.02
		КФИМ	3.80±0.05	0.45±0.03	0.26±0.03	0.20±0.02	0.53±0.02
^{3}He + ^{2}H + ^{2}H	4	Эксп.	2.76±0.15	0.44±0.06	0.23±0.05	0.37±0.05	0.42±0.05
		КФИМ	3.54±0.08	0.31±0.05	0.16±0.03	0.37±0.04	0.42±0.03
^{3}H + ^{2}H + ^{2}H	3	Эксп.	3.69±0.13	0.58±0.07	0.25±0.04	0.24±0.05	0.51±0.05
		КФИМ	3.90±0.08	0.40±0.04	0.39±0.04	0.17±0.03	0.52±0.03

Средняя множественность протонов-отдачи в эксперименте составляет 0.52 ± 0.02 для 6-нуклонных систем и 0.53 ± 0.02 для 7-нуклонных. В КФИМ соответствующие величины составляют 0.50 ± 0.01 и 0.49 ± 0.01, что в пределах статистических погрешностей совпадает с экспериментальными значениями.

В разделе 3.2 представлены экспериментальные результаты по изучению характеристик каналов с выходом зеркальных ядер ^{7}Be и ^{7}Li в ^{16}O*p*-соударениях при 3.25 *A* ГэВ/*c*, т.е. рассмотрены инклюзивные реакции:

$$^{16}\mathrm{O} + p \rightarrow {}^7\mathrm{Li} + \mathrm{x}, \quad (13)$$
$$^{16}\mathrm{O} + p \rightarrow {}^7\mathrm{Be} + \mathrm{x}, \quad (14)$$

Здесь x означает любые фрагменты и частицы, образование которых разрешено законами сохранения барионного и электрического зарядов.

Числа событий с выходом зеркальных ядер N(^{7}Be) = 155 (реакция 14) и N(^{7}Li) = 160 (реакция 13) оказались очень близкими. Отметим, что совместное образование изотопов ядер лития и бериллия обнаружено всего в 16 событиях, причем только в одном из них наблюдается одновременный выход зеркальных ядер ^{7}Be и ^{7}Li.

Для сравнительного анализа характеристик частиц и фрагментов, сопутствующих выходу зеркальных ядер ^{7}Be и ^{7}Li, рассматривались события, в которых образуется один трех- или четырехзарядный фрагмент с массовым числом A = 7, т.е. топологии (3), (32) и (322), а также (4), (42) и (422). Здесь в скобках указаны заряды многозарядных ($Z \geq 2$) фрагментов. Топологии с выходом зеркальных ядер далее будут именоваться зеркальными топологическими каналами.

Значения средних множественностей заряженных частиц и фрагментов, суммарная множественность фрагментов ядра, а также суммарный заряд протонов-фрагментов и заряженных пионов (Q), сопутствующих выходу ядер ^{7}Li и ^{7}Be, представлены в табл. 5.

Таблица 5

Средние множественности частиц и фрагментов в каналах с выходом ядер ^{7}Li и ^{7}Be и суммарный заряд протонов фрагментов и заряженных пионов

Тип частицы или ядра	^{7}Li	^{7}Be	Тип частицы или ядра	^{7}Li	^{7}Be
Все фрагменты	4.45 ± 0.10	3.81 ± 0.11	^{4}He	0.63 ± 0.05	
^{1}H	3.00 ± 0.11	2.29 ± 0.12	p_{rec}	0.59 ± 0.05	0.55 ± 0.04
^{2}H	0.52 ± 0.05	0.53 ± 0.05	π^-	0.33 ± 0.04	0.44 ± 0.05
^{3}H	0.17 ± 0.03	0.20 ± 0.03	π^+	0.64 ± 0.05	0.42 ± 0.05
^{3}He	0.13 ± 0.03	0.18 ± 0.03	Q(^{1}H+ π^++ π^-)	3.31±0.12	2.27±0.13

Видно, что средние множественности фрагментов сопровождения с $2 \leq A \leq 4$ совпадают в пределах статистических погрешностей для обоих каналов образования 7-нуклонных зеркальных ядер. Следствием этого обстоятельства является то, что разность суммарных зарядов протонов-фрагментов и заряженных частиц для обоих каналов практически равна единице. Распределения по множественности двухзарядных фрагментов и их средние значения (0.75 ± 0.05 и 0.74 ± 0.05 соответственно для ^{7}Li и ^{7}Be)

совпадают для обоих зеркальных ядер. Отметим также совпадение средних множественностей протонов-отдачи в каналах с образованием ядер ^{7}Li и ^{7}Be. Эти обстоятельства свидетельствуют о близости физических условий формирования ядер ^{7}Li и ^{7}Be, и указывают на одинаковую степень дезинтеграции ядра-снаряда.

В пределах статистических погрешностей совпадают распределения зеркальных ядер ^{7}Li и ^{7}Be по полному импульсу (рис. 1) в системе покоя ядра кислорода, составляя в среднем соответственно 350 ± 13 МэВ/с и 354 ± 13 МэВ/с.

К тому же распределения (рис. 2) и средние значения поперечных импульсов рассматриваемых зеркальных ядер оказались совпадающими и для ^{7}Li и ^{7}Be составили 251 ± 11 МэВ/с и 253 ± 11 МэВ/с, соответственно. Из совпадения распределений по полному и поперечному импульсам этих зеркальных ядер следует практическая одинаковость средних значений их углов вылета, которые для ядер ^{7}Li и ^{7}Be в лабораторной системе оказались равными 0.63 ± 0.03 и 0.64 ± 0.03, соответственно. Из табл. 5 видно также, что разность средних множественностей фрагментов в каналах с выходом ядер ^{7}Li и с выходом ^{7}Be равна Δn_f = 0.64 ± 0.15. При этом средние множественности ядер ^{2}H, ^{3}H, ^{3}He и ^{4}He в зеркальных каналах совпадают. Это означает, что разность Δn_f в пределах статистических погрешностей должна совпадать с разностью средних множественностей протонов фрагментов Δn_p. Как видно из табл. 5, она равна 0.71 ± 0.15, что близко к величине Δn_f. Таким образом, можно заключить, что разница в зарядах рассматриваемых зеркальных ядер в основном компенсируется дополнительным образованием протонов-фрагментов в каналах с выходом ядер ^{7}Li. В пользу этого свидетельствует также различие в средних множественностях π^-- и π^+-мезонов, ассоциированных с образованием зеркальных ядер ^{7}Li и ^{7}Be, указывающее на преимущественное образование нейтроно-избыточного ядра ^{7}Li при взаимодействии протона-мишени с протоном или протоно-избыточного ядра ^{7}Be при взаимодействии протона-мишени с нейтроном налетающего ядра кислорода.

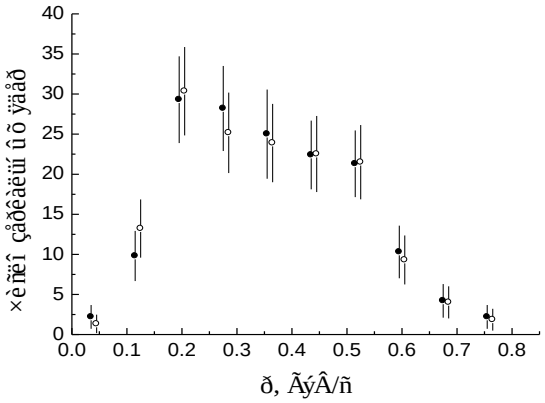


Рис. 1. Импульсные распределения ядер^{7}Li (○) и ^{7}Be(●) в системе покоя ядра кислорода

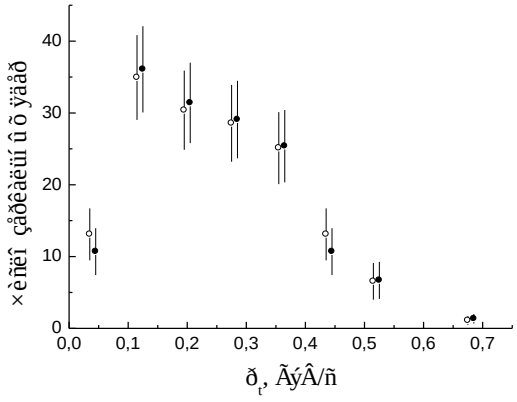


Рис. 2. Распределения зеркальных ядер ^{7}Li (○) и ^{7}Be(●) по поперечному импульсу

Совпадение средних множественностей многонуклонных фрагментов (A = 2−4) в событиях с выходом зеркальных ядер ^{7}Li и ^{7}Be означает, что в формировании таких ядер не участвуют нуклоны, выбитые из одного из двух α-кластеров, из которых могли бы образоваться рассматриваемые зеркальные ядра с массовыми числами A=7.

Интересно отметить превышение средней множественности π^+-мезонов на величину 0.22 ± 0.07 в канале с выходом ядра ^{7}Li в сравнении с каналом образования ядра ^{7}Be. Это подтверждает то обстоятельство, что формирование нейтроно-избыточного зеркального ядра ^{7}Li происходит преимущественно при взаимодействии протона-мишени с протоном ядра кислорода. Превышение средней множественности π^--мезонов в канале с выходом ядра ^{7}Be по сравнению с каналом выхода ^{7}Li также указывает на то, что образование первого из них преимущественно происходит в результате взаимодействия протона-мишени с нейтроном ядра кислорода. Совпадение в пределах статистических погрешностей средних множественностей $\langle n_{\pi^+}\rangle$ и $\langle n_{\pi^-}\rangle$ в канале с образованием ^{7}Be, по-видимому, обусловлено дополнительным вкладом положительно заряженных пионов от перезарядки протона-мишени в нейтрон и π^+-мезон. Для проверки этого предположения были рассмотрены средние множественности заряженных пионов в событиях с однозначно идентифицированным протоном-мишенью (см. табл. 6), т.е. в полуинклюзивных реакциях:

$$^{16}\mathrm{O} + p \rightarrow {}^7\mathrm{Li} + p_{\mathrm{rec}} + X, \qquad (13')$$

$$^{16}\mathrm{O} + p \rightarrow {}^7\mathrm{Be} + p_{\mathrm{rec}} + X. \qquad (14')$$

Как видно из табл. 6, в реакции (13′) средняя множественность π^+-мезонов на величину 0.10 ± 0.07 больше, чем средняя множественность π^--мезонов, а в реакции (14′), наоборот, средняя множественность π^--мезонов на такую же величину (0.10 ± 0.07) больше, чем средняя множественность π^+-мезонов.

Таблица 6

Средние множественности заряженных пионов в реакциях (13′) и (14′)

Реакция	Тип частицы		
	π^+	π^-	$\pi^+ + \pi^-$
(13′)	0.41±0.06	0.31±0.05	0.72±0.07
(14′)	0.34±0.05	0.44±0.06	0.78±0.07

Из табл. 6 также видно, что в пределах статистических погрешностей совпадают суммарные средние множественности заряженных пионов для реакций (13′) и (14′). Из табл. 5 и 6 видно, что в пределах статистических погрешностей средняя множественность отрицательных пионов в соответствующих реакциях ((13), (13′) и (14), (14′)) не зависит от наличия или отсутствия в событии протона-отдачи. Это указывает на то, что зарядообменные процессы между протоном-мишенью и снарядом не играют никакой роли в образовании отрицательных пионов. Так как ядро кислорода-

16 содержит одинаковое количество протонов и нейтронов, суммарная средняя множественность π^+-мезонов по реакциям (13′) и (14′) должна совпадать с суммарной средней множественностью π^--мезонов по этим же реакциям. Как видно из табл. 6, эти множественности практически совпадают друг с другом (0.75 ± 0.07), что также указывает на корректность нашей процедуры идентификации быстрых π^+-мезонов.

Конечно, процесс разрушения исходного ядра не является единственным способом формирования ядер с A = 2–4, так как они могут быть образованы и за счет слияния каскадных нуклонов или малонуклонных ассоциаций. Однако механизм коалесценции оказывается существенно подавленным (особенно для ядер ^{4}He) в связи с маловероятностью нахождения нуклонов или малонуклонных ассоциаций на небольших (R ~ 1 Фм) расстояниях друг от друга и с малыми относительными импульсами. Действительно, расчеты вероятностей образования малонуклонных ядер по модели коалесценции дают следующие значения для сравнительных выходов ядер: ^{2}H – 11,3%, ^{3}H и ^{3}He – 7.5%, а для ^{4}He – 1.8%.

В четвертой главе **«Развал ядра кислорода на легкие фрагменты с массовыми числами A≤4»** приводятся результаты анализа образования зеркальных ядер ^{3}He и ^{3}H в полуинклюзивных реакциях с выходом различного числа α-частиц и дейтронов. Для более углубленного изучения эффектов проявления α-кластерной структуры ядра кислорода представлены результаты сравнительного анализа процессов образования зеркальных ядер ^{3}H и ^{3}He в ^{16}Op-соударениях при 3.25 A ГэВ/c в зависимости от числа ядер ^{4}He и ^{2}H [112, с. 286–289; 115, с. 34–37; 116, с. 28-29].

Были изучены взаимозависимости выходов зеркальных ядер ^{3}H и ^{3}He, дейтронов, а также α-частиц в топологиях конечных состояний (1), (2), (22), (222) и (2222). Иначе говоря, рассмотрено образование этих ядер в полуинклюзивных реакциях:

$^{16}O + p \rightarrow {}^3He + k\,{}^2H + X$	(15)	$^{16}O + p \rightarrow {}^3H + k\,{}^2H + X,$	(15′)
$^{16}O + p \rightarrow {}^3He + {}^4He + k\,{}^2H + X$	(16)	$^{16}O + p \rightarrow {}^3H + {}^4He + k\,{}^2H + X,$	(16′)
$^{16}O + p \rightarrow {}^3He + 2\,{}^4He + k\,{}^2H + X,$	(17)	$^{16}O + p \rightarrow {}^3H + 2\,{}^4He + k\,{}^2H + X,$	(17′)
$^{16}O + p \rightarrow {}^3He + 3\,{}^4He + k\,{}^2H + X,$	(18)	$^{16}O + p \rightarrow {}^3H + 3\,{}^4He + k\,{}^2H + X,$	(18′)

т.е. изучено образование легких зеркальных ядер ^{3}He и ^{3}H в зависимости от числа ассоциированных α-частиц и дейтронов. Число дейтронов k в соответствии с законами сохранения барионного и электрического зарядов может изменяться от 0 до 7 (однако в эксперименте наблюдаются события с образованием до 4 дейтронов), а в качестве X могут быть протоны- и нейтроны-фрагменты ядра кислорода, а также протон-отдачи или пионы. Таким образом, в число сопровождающих образование зеркальных ядер ^{3}He и ^{3}H частиц не входят многозарядные фрагменты с $z > 2$ и $A > 4$, т.е. реакции (15) и (15′) относятся к практически полному развалу ядра кислорода.

Суммарное число событий в рассматриваемых реакциях (15−18) и (15′−18′) оказалось равным 730. Полное число событий в реакциях (15−18) с образованием ядра ^{3}He оказалось равным 364, что практически совпадает с

числом событий в реакциях (15′−18′) с рождением ядра ^{3}H – 366. Согласно изотопической инвариантности сильных взаимодействий такое совпадение можно было бы ожидать в случае, если бы в реакциях (15′−18′) в качестве мишени вместо протона был бы нейтрон. По этой причине полученный результат является нетривиальным и указывает на независимость способа реализации реакций (15−18) и (15′−18′) от типа (заряда) возбуждающего ядро кислорода нуклона. Это было бы возможно в случае, когда протон-мишень не передает заряд ядру или многонуклонным фрагментам.

В табл. 7 приведены средние множественности фрагментов с A=1−2, протонов-отдачи и заряженных пионов в реакциях (15–18) и (15′–18′) при произвольном числе участвующих дейтронов.

Как видно из табл. 7, в пределах статистических погрешностей числа событий в реакциях (15−18) и (15′−18′) с различным числом ассоциированных α-частиц n_α попарно совпадают. Из-за сохранения барионного заряда такое совпадение, по-видимому, обусловлено тем, что из-за равного количества нейтронов и протонов в ядре ^{4}He его образование одинаково сказывается на вероятностях выходов зеркальных ядер ^{3}He и ^{3}H.

Из-за действия законов сохранения электрического и барионного зарядов в реакциях (15′−18′) суммарные средние множественности дейтронов и протонов фрагментов должны быть на единицу больше, чем в реакциях (15−18), в случае отсутствия различных зарядообменных процессов ($p \to n\pi^+$, $n \to p\pi^-$ и $np \to pn$). Усредненные по реакциям (15−18) средние множественности дейтронов составляют 0.93 ± 0.04, а по реакциям (15′−18′) – 0.92 ± 0.04. Совпадение средних множественностей дейтронов в реакциях (15−18) и (15′−18′) можно интерпретировать следующим образом. Так как вероятность образования дейтрона пропорциональна числу протон-нейтронных пар, то протоно-избыточность или нейтроно-избыточность сопутствующего ядра одинаково влияют на выход дейтронов. Убывание $\langle n_d \rangle$ с числом ассоциированных α-частиц обусловлено законом сохранения барионного заряда. Выхода дейтронов в реакциях (18) и (18′) не наблюдается. Это указывает на очень низкую вероятность реализации процесса подхвата протоном-мишенью нейтрона ядра кислорода в реакции (18) при рассматриваемой в данной работе энергии соударения. В реакции (18′) образования дейтрона не происходит из-за отсутствия свободного нейтрона, так как все 8 нейтронов исходного ядра кислорода связаны в многонуклонных фрагментах.

В реакциях (15′−18′) средняя множественность протонов-отдачи $\langle n(p_{rec}) \rangle$ больше, чем в реакциях (15−18), составляя соответственно 0.63 ± 0.02 и 0.56 ± 0.02. Такое различие также обусловлено зарядообменным процессом между протоном-мишенью и нейтроном ядра кислорода ($np \to pn$).

Эти обстоятельства в совокупности подтверждают высказанное выше предположение о том, что образование ядер ^{3}He (^{3}H) преимущественно происходит за счет выбивания одного нейтрона (протона) α-кластера ядра кислорода.

Средние множественности нуклонов-фрагментов в событиях с образованием ядер ^{3}He и ^{3}H в пределах статистических погрешностей совпадают, составляя соответственно 6.00 ± 0.06 и 5.93 ± 0.06. Этот факт является следствием попарного совпадения количества событий и средних множественностей дейтронов в рассматриваемых реакциях (15−18) и (15′−18′) (см. табл. 7).

Таблица 7

Средние множественности протонов фрагментов $<n_p>$, дейтронов $<n_d>$, нейтронов $<n_n>$, протонов-отдачи $<n(p_{rec})>$, π^--мезонов $<n(\pi^-)>$ и π^+-мезонов $<n(\pi^+)>$ в реакциях (15−18) и (15′−18′)

n_α	Реакция	$N_{соб}$	Средняя множественность частиц и фрагментов					
			$<n_p>$	$<n_d>$	$<n_n>$	$<n(p_{rec})>$	$<n(\pi^-)>$	$<n(\pi^+)>$
0	15	64	4.65±0.17	1.83±0.17	4.69±0.24	0.45±0.05	0.48±0.07	0.59±0.08
1	16	151	3.47±0.11	1.10±0.08	3.33±0.15	0.52±0.04	0.63±0.05	0.56±0.05
2	17	132	1.81±0.08	0.42±0.04	2.35±0.12	0.64±0.04	0.49±0.05	0.54±0.05
3	18	17	0.30±0.11	0	0.70±0.14	0.72±0.12	0.24±0.10	0.24±0.10
0	15′	60	5.16±0.15	1.81±0.13	4.22±0.21	0.51±0.05	0.33±0.06	0.79±0.06
1	16′	153	3.87±0.09	1.10±0.07	2.93±0.13	0.58±0.04	0.37±0.04	0.70±0.06
2	17′	132	2.49±0.07	0.45±0.05	1.61±0.10	0.73±0.04	0.24±0.03	0.45±0.05
3	18′	21	0.84±0.15	0	0.16±0.21	0.78±0.15	0.27±0.09	0.61±0.12

Также было обнаружено попарное совпадение относительных выходов зеркальных ядер ^{3}He и ^{3}H в рассматриваемых реакциях с разным числом дейтронов, т.е. полуинклюзивные парциальные сечения выхода рассматриваемых зеркальных ядер одинаковы. Кроме того, был выполнен сравнительный анализ характеристик по суммарным ансамблям реакций (15−18) и (15′−18′) при фиксированном числе дейтронов. В табл. 8 представлены данные о средних множественностях протонов- и нейтронов-фрагментов и заряженных пионов в зависимости от числа сопутствующих дейтронов в суммарных ансамблях реакций (15−18) и (15′−18′) в статистически обеспеченных каналах.

Из табл. 8 видно, что средние множественности α-частиц, попарно совпадая в суммарных ансамблях реакций (15−18) и (15′−18′), уменьшаются в среднем на 0.5 – отношение числа нуклонов в дейтроне и α-кластере − при увеличении числа дейтронов на единицу. Аппроксимация зависимости средней множественности α-частиц от числа дейтронов соотношением

$$<n_\alpha> = a + b*n_d$$

дала значения параметров a=1.69±0.03, b=-0.51±0.03 для реакций (15−18) и a=1.74±0.04, b=-0.52±0.03 для реакций (15′−18′). Таким образом, значения величины b совпадают для рассматриваемых реакций и оказались близкими к -0.5.

Средние множественности протонов- и нейтронов-фрагментов в обеих группах реакций в пределах статистических погрешностей не зависят от числа ассоциированных дейтронов, причиной чего, по-видимому, является линейное уменьшение средних множественностей α-частиц с числом дейтронов. Существование линейной зависимости $<n_\alpha>$ от n_d указывает, по-видимому, на то, что значительная часть дейтронов образуется в результате разрушения α-кластеров ядра кислорода.

Таблица 8

Средние множественности α-частиц ($<n_\alpha>$), протонов-фрагментов ($<n_p>$) и нейтронов-фрагментов ($<n_n>$), π^--мезонов ($<n(\pi^-)>$) и π^+-мезонов ($<n(\pi^+)>$) в каналах с выходом одного из зеркальных ядер ^{3}H и ^{3}He в зависимости от числа ассоциированных дейтронов (n_d) в суммарных ансамблях реакций (4.1−4.4) и (4.1′−4.4′)

Число дейтронов, n_d	Средняя множественность				
	$<n_\alpha>$	$<n_p>$	$<n_n>$	$<n(\pi^-)>$	$<n(\pi^+)>$
Реакции (15−18)					
0	1.72 ± 0.13	2.84 ± 0.14	3.29 ± 0.20	0.57 ± 0.04	0.58 ± 0.05
1	1.17 ± 0.10	2.96 ± 0.10	3.38 ± 0.14	0.52 ± 0.05	0.50 ± 0.04
2	0.70 ± 0.15	3.14 ± 0.17	3.05 ± 0.23	0.20 ± 0.09	0.21 ± 0.10
Реакции (15′−18′)					
0	1.76 ± 0.13	3.32 ± 0.14	2.64 ± 0.20	0.29 ± 0.05	0.58 ± 0.05
1	1.19 ± 0.10	3.50 ± 0.11	2.72 ± 0.15	0.31 ± 0.04	0.59 ± 0.05
2	0.73 ± 0.17	3.53 ± 0.19	2.54 ± 0.27	0.18 ± 0.10	0.40 ± 0.10

Средние множественности π^-- и π^+-мезонов в суммарных ансамблях реакций (15−18) попарно совпадают, что дополнительно указывает на преимущественное взаимодействие протона-мишени с нейтроном ядра, в котором ожидается зарядовая симметрия образования π^-- и π^+-мезонов в процессах перезарядки протона и нейтрона. В реакциях же (15′−18′) средние множественности π^-- и π^+-мезонов различаются почти вдвое, что свидетельствует о преимущественной реализации перезарядки протонов мишени и снаряда.

Анализ совместного образования трех фрагментов – ^{2}H, ^{3}H, ^{3}He – показал, что дейтрон не формируется из протона и нейтрона двух разных α-кластеров, на базе которых образовались ядра ^{3}H и ^{3}He.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований, проведенных по теме диссертации «Образование многонуклонных систем и ядер в ^{16}Op-соударениях при импульсе 3.25 А ГэВ/с», представлены следующие выводы:

1. Впервые определены полуинклюзивные сечения образования 6- и 7-нуклонных систем и ядер. Получено указание на существенную роль α-кластерной структуры ядра кислорода в формировании конечных многонуклонных ядер с $A \leq 7$ и законов сохранения электрического и

барионного зарядов, что подтверждается рядом фактов, в числе которых существенное превышение сечений каналов 6- и 7-нуклонных систем с образованием α-частиц над сечениями каналов без их образования.

2. Установлено, что средние множественности частиц, сопровождающих образование 6- и 7-нуклонных систем и ядер, коррелированы с суммарным массовым числом и зарядом конечного многонуклонного состояния и не зависят от того, является ли оно единым ядром или связанным, резонансным или континуум состоянием двух или трех ядер с тем же суммарным массовым числом А.

3. Выполнено систематическое сопоставление экспериментальных данных с предсказаниями КФИМ и показано, что модель недооценивает сечения образования как 6-, так и 7-нуклонных систем и ядер. В КФИМ образование протоно-избыточных систем и ядер преобладает над сечением выхода нейтроно-избыточных, что обусловлено участием заряда протона-мишени в процессах формирования многонуклонных систем и ядер.

4. Инклюзивные сечения образования зеркальных ядер ^{7}Li и ^{7}Be совпадают. Различие в зарядах этих ядер, как и в случае образования 6- и 7-нуклонных систем, в основном компенсируется дополнительным образованием протонов. Заряд протона-мишени практически не передается ядрам сопровождения с массовыми числами $2 \leq A \leq 4$. Средние множественности нейтронов-фрагментов находятся в разумном согласии с множественностями протонов-фрагментов с учетом передачи заряда протона-мишени нейтронам фрагментирующего ядра и процессов неупругой перезарядки нуклонов.

5. Совпадение суммарных средних множественностей протонов- и нейтронов-фрагментов и ядер сопровождения с $2 \leq A \leq 4$ в каналах образования зеркальных ядер ^{7}Li и ^{7}Be, а также средних значений кинематических характеристик этих ядер позволяет сделать вывод о близости кинематических условий формирования этих зеркальных ядер и одинаковой степени дезинтеграции ядра-снаряда.

6. Хотя выход протоно-избыточных или нейтроно-избыточных ядер коррелирован с зарядом пиона в реакции, однако среднее число связанных нуклонов во фрагментах сопровождения с А=2-3 от него не зависит. Средние множественности заряженных пионов также не зависят от типа рассмотренных многонуклонных систем.

7. В каналах с различным числом ядер ^{4}He и ^{2}H установлено попарное совпадение числа событий (полуинклюзивных сечений) с образованием лёгких зеркальных ядер (^{3}H и ^{3}He). В этих же каналах также установлена независимость средних множественностей протонов- и нейтронов-фрагментов от числа ассоциированных дейтронов, указывающая на то, что значительная часть дейтронов в рассматриваемых каналах образуется за счет разрушения α-кластеров ядра кислорода.

8. Показано, что образование зеркальных ядер ^{3}He (^{3}H) преимущественно происходит за счет выбивания одного нейтрона (протона) α-кластера ядра кислорода.

SCIENTIFIC COUNCIL DSc27.06.2017.FM/T.33.01 ON AWARD OF SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS, ASTRONOMICAL INSTITUTE, NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN

PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE

KURBANOV ANVAR RAZZAKOVICH

FORMATION OF MULTINUCLEON SYSTEMS AND NUCLEI IN ^{16}Op COLLISIONS AT THE MOMENTUM 3.25 A GeV/c

01.04.08 -Physics of atomic nucleus and elementary particles. Accelerator technique

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 scienses was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under № B2017.1.PhD/FM27

The thesis was carried out at the Physical-Technical Institute of the Academy of Sciences of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resumed version)) languages on the website of the Scientific Council at www.inp.uz and on the website of "Ziyonet" information and educational portal at www.ziyonet.uz.

Scientific adviser:	**Kosim Olimov** Doctor of physical and mathematical sciences, professor
Official opponents:	**Muminov Tolib Musaevich** Doctor of physical and mathematical sciences, professor, academician
	Bazarov Erkin Xodjievich Doctor of physical and mathematical sciences, professor
Leading organization:	**Samarkand State University**

Defense of the dissertation will be held on "____" _____ 2019 at ____ at the meeting of the Scientific Council DSc27.06.2017.FM/T33.01 at the Institute of Nuclear Physics, Astronomical Institute, National University of Uzbekistan (Address: Institute of Nuclear Physics, Ulugbek settlement, 100214 Tashkent city. tel:(+99871)289-31-41, fax:(+99871) 289-31-50, e-mail: info@inp.uz).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through in the Information Resource Center of the Institute of Nuclear Physics (registered under #____ Address: INP, Ulugbek settlement, 100214 Tashkent city. tel: (+99871)289-31-19.

Abstract of dissertation was distributed on "____" _____ 2019
(Registry report №____ dated «___» _____ 2019)

M.Yu. Toshmetov
Chairman of the Scientific Council for Awarding
Doctor of physical and mathematical sciences, Professor

E.M. Tursunov
Scientific secretary of the scientific council for awarding
Doctor of physical and mathematical sciences

I.Nuritdinov
Chairman of the Scientific Seminar of the Scientific
Council Award of Scientific Degress
Doctor of physical and mathematical sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

Topicality and demand of the theme of dissertation. At present, experimental studies of the multiple generation of particles and relativistic nuclear fragmentation processes are extremely important for solving fundamental problems of high-energy physics and relativistic nuclear physics. One of the most important sources of information about the structure of nuclei and its influence on the composition of the final reaction products, as well as the role of charge exchange processes in nuclear fragmentation, is the study of relativistic nuclei collisions with nucleons and nuclei in semi-inclusive reactions and reactions that are as close as possible to exclusive (in 4π-geometry environment with full identification of fragments and measurement of their momenta and emission angles). Such requirements for experimental data most fully correspond to experiments performed using bubble chambers exposed in strong magnetic fields in beams of relativistic nuclei.

At present, fragmentation of relativistic nuclei is studied in the research centers worldwide. In particular, limiting fragmentation hypothesis has been established for projectile and target fragmentation regions; it has been shown that nuclear fragmentation process has a stochastic nature, it has been established that the yield cross sections and intermediate mass fragments charge distribution pattern for nucleus with a certain mass number are independent of initial energy; the plateau in excitation cross-section for light fragments has been observed in the region of initial energies of $E_0 \approx 2-3$ GeV per nucleon (Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, Physical-Technical Institute of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan). In the framework of the “Becquerel” Collaboration (LHE, JINR, Dubna, Russia), beginning from 2004, intensive studies of the cluster structure in light nuclei with mass numbers A = 3–14 have been carried out using the nuclear photo emulsion method. In particular, it has been found that in light nuclei at small levels of excitation, not only α-cluster, but also α + h, α + t, α + d, and similar cluster structures can manifest themselves, which ultimately determine the composition and yield probabilities of final reaction products.

Today in our country, much attention is paid to fundamental research on the processes of multiparticle systems and nuclei formation in collisions of relativistic oxygen nuclei with protons. For the further development of the Republic of Uzbekistan, in the strategy of actions[1] for the period of 2017–2021 reflects measures to develop science, support priority areas of basic research, and implement the results of basic research. At present, the following studies on relativistic oxygen nuclei fragmentation processes in collisions with protons at 3.25 A GeV/c are being conducted: studies of six- and seven-nucleon systems and nuclei production, determination of the yield cross section of inclusive and semi-inclusive reactions with production of 6 and 7 nucleon systems and nuclei,

[1] 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

comparative analysis of output “mirror” channels with production of ^{3}He and ^{3}H nuclei, as well as other light nuclei - deuterons and α-particles; obtaining information on the effect of charge exchange processes on composition and yields of reaction products, study of the α-particles and deuterons yield correlation.

This research work complies with the objectives approved in the State regulatory documents, Decrees of the President of the Republic of Uzbekistan UP-4512 “On measures for the further development of alternative energy sources” dated March 1, 2013, UP-4947 “On the Strategy of Actions for further development of the Republic Uzbekistan” dated February 2, 2017, and Presidential Decree PP-2789 “On measures of further improvement of the Academy of Sciences activities, organization, management and financing of research activities” dated February 18, 2017.

Conformity of research to priority directions of development of science and technologies of the Republic of Uzbekistan. The research work has been performed in accordance with the Republic of Uzbekistan priority directions of science and technology development: II “Power, energy and resource saving”.

Degree of study of the problem. As of today, leading scientists worldwide, e.g. Russian scientists (Zarubin P.I., Rusakova V., Peresadko N.G., Artemenkov D.A. and others), American scientists (Heckman H.H., Greiner D.E., Lindstrom P.J., and others) as well as researchers from other countries carry out intensive experimental and theoretical studies of multiple particle generation and relativistic nuclei fragmentation processes in interactions with hadrons and nuclei.

For example, the Russian scientists intensively study cluster structure of light nuclei by means of their peripheral collisions with photo-emulsion nuclei. But they did not manage to determine the production cross-sections for all possible isotopes produced as a result of nuclear fragmentation and to establish the nuclear fragmentation mechanisms.

American scientists studied production of various isotopes of light nuclei ^{12}C and ^{16}O in collisions with iron nuclei at high energies by means of the electronic method at small angles of fragments emission. The limited coverage of the fragments emission angles did not allow them to determine the total production cross-sections for these isotopes and more reliably establish their production mechanisms.

Moreover, the closest to the studied problem are the results described in the dissertations of Uzbek scientists (Olimov K., Bazarov E.H. and Usarov A.A.) in which general characteristics of oxygen nuclei fragmentation in interactions with protons at 3.25 A GeV/c were obtained, in particular: multiplicities of singly and multiply charged fragments were studied; correlations in production of singly charged particles and light fragments were studied; cross-sections of topological channels for oxygen nuclei breakdown were determined; quantitative contributions of unstable ^{8}Be and ^{9}B nuclei as well as excited $^{12}C^{*}$ nucleus to the α-particles production cross-section were determined; production cross-sections for fragments with mass numbers from A = 1 to A = 16 were determined; comparative analysis of light mirror nuclei ^{3}He and ^{3}H production was carried out and it was demonstrated that their production occurred under close kinematic conditions and

charge of proton-target was not involved in the processes of their production. In other words, inclusive ^{16}Op-reactions were mainly investigated in these dissertations. The semi-inclusive channels of the oxygen nuclei breakdown into multi-nucleon systems and nuclei were not studied, comparative analysis of characteristics of 6 and 7-nucleon systems and nuclei production channels was not carried out; the role of charge-exchange between target proton and oxygen nucleus in its fragmentation into multi-nucleon systems and nuclei was not studied; the associated multiplicities of light fragments with A≤3 in the channels of oxygen nuclei breakdown into multi-nucleon systems and nuclei was not studied.

Connection of dissertational research with the plans of scientific-research works of the scientific research institution, where the dissertation was conducted. The dissertation research was carried out at the Physical Technical Institute SPA "Physics-Sun" of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan in 2007–2016 in the framework of the Institute's research plan by means of the research projects: F2-F029 "Study of structure of nuclear matter and collective effects in interactions of hadrons and nuclei with nuclei at high energies" (2007–2011); F2–F-0-42438 "Investigation of multiparticle states in interactions of hadrons and nuclei with nuclei at high energies" (2012–2016) and 04-10 "Joint study of the charged pions generation and proton (neutron) abundant nuclei and systems production processes in ^{16}Op-collisions at 3.25 A GeV/c" (2011-2012).

The aim of research work is to establish regularities in production of multi-nucleon systems and nuclei with A ≤ 7, to indentify effect of initial structure of oxygen nucleus and charge exchange processes on composition and yields of final products of the ^{16}Op-reaction at 3.25 A GeV/c.

The tasks of research work:

to develop and test a new method for separating protons and positively charged pions that are not visually distinguishable in the momentum range of 1.25 - 1.75 GeV/c, as well as a method for taking into account corrections for the loss of various types of particles and fragments;

to explore the basic regularities of 6 and 7-nucleon systems and nuclei production;

to study the mean multiplicities and kinematic characteristics of various particles (recoil protons, neutron-fragments and charged pions) and fragments with A ≤ 4, accompanying production of 6 and 7-nucleon systems and nuclei;

to study characteristics and mechanisms of light mirror nuclei ^{3}He, ^{3}H, ^{7}Li, ^{7}Be production and their correlation with production of different numbers of deuterons and α-particles;

to perform comparative analysis of the experimental results and predictions of the cascade-fragmentation evaporation model in order to identify and establish the role of α-cluster structure of oxygen nucleus in its fragmentation processes.

The object of the research are fragmentation processes taking place in oxygen nuclei collisions with protons at the momentum of 3.25A GeV/c.

Subject of research are multi-nucleon systems and nuclei formed in the interactions of oxygen nuclei with protons at 3.25 A GeV/c.

Methods of research. In order to solve the problems posed on analysis of the multi-nucleon systems and nuclei production in ^{16}Op collisions at 3.25 A GeV/c, inclusive and semi-inclusive approach was used by applying mathematical statistics and Monte-Carlo simulation methods.

Scientific novelty of the research work.

for the first time, inclusive and semi-inclusive cross-sections of 6 - and 7-nucleon systems and nuclei were determined in ^{16}Op collisions at the momentum of 3.25 A GeV/c;

it was demonstrated that average multiplicities of the accompanying particles were mainly determined via the total mass number and charge in multi-nucleon final state, and did not depend if it was one single nucleus or composition of two or three nuclei with the same total mass number A;

systematic comparison was made with predictions of the cascade-fragmentation evaporation model (CFEM) with the experimental data. It was shown that CFEM underestimated formation of both 6 and 7-nucleon systems and nuclei. In CFEM, formation of proton-abundant systems and nuclei prevailed over the neutron-abundant yield cross-section;

based on coincidence of the average multiplicities of nucleons (total average multiplicity of proton- and neutron-fragments) and accompanying nuclei with A = 2–4 in semi-inclusive reactions with formation of mirror nuclei ^{7}Li and 7Be, as well as average values of kinematic characteristics of these nuclei and accompanying particles the conclusion was drawn about similarity of kinematic conditions of these mirror nuclei production and identical degree of the projectile-nucleus disintegration;

for the first time, independence of average multiplicities of proton- and neutron-fragments from the number of associated deuterons was established, indicating that the main mechanism of deuteron production in the channels under consideration was destruction of α-clusters of the oxygen nucleus.

Practical results of the investigation are as follows:

An indication was obtained pointing on the important role of α-cluster structure of the oxygen nucleus in production of these final state multi-nucleon nuclei with $A \leq 7$ as well as electric charge and baryon charge conservation laws;

coincidence of inclusive cross-sections of mirror nuclei ^{7}Li and ^{7}Be production was confirmed. It was found that difference in charges of these nuclei, similarly to the case of 6 and 7-nucleon systems production, was mainly compensated by additional production of protons. Charge of target-proton was practically not transferred to accompanying nuclei with mass numbers A = 2–4;

for the first time, the mean multiplicities of neutron fragments in channels with 6 and 7-nucleon systems and nuclei production were determined and it was found that they are in a reasonable agreement with the multiplicities of proton-fragments with taking into account the processes of charge transfer from the proton-target to the neutrons of the fragmenting nucleus and the processes of inelastic charge-exchange of nucleons.

Reliability of the obtained results can be supported by a sufficiently large (> 10,000 events) statistics of experimental material, more accurate determination

of charge and identification of particles and fragments by mass, as well as measurement of their momenta and angles with high accuracy; use of internationally applied statistical methods for processing and analyzing experimental data, as well as use of both inclusive and exclusive approaches to the results interpretation; compliance of the obtained experimental data with the results of other experiments and the main conclusions of theoretical works dedicated to the nuclear fragmentation.

Scientific and practical significance of the results of research. Scientific significance of the results obtained in the research provide extensive physical material on characteristics and mechanisms of multi-nucleon systems and light nuclei production, and contributes to the development of a more realistic picture of fragmentation of nuclei with regard to their initial structure, which must be taken into account when new theoretical approaches and models are being developed. Quantitative information and proven methods for studying production of multi-nucleon systems and mirror nuclei (^{3}H and ^{3}He, ^{7}Li and ^{7}Be), as well as a method of obtaining information about neutron-fragments can be widely used in other experiments aimed to study nuclear fragmentation at high energies.

Practical significance of results obtained in the investigation consists in the fact that the results allow replenishment of the data bank on the light nuclei interactions at high energies, determination of cross-sections for the secondary multi-nucleon systems and light mirror nuclei ^{3}H and ^{3}He and ^{7}Li and ^{7}Be production, as well as mechanisms for the deuteron production, improvement of the existing theoretical models of fragmentation and creation of new theoretical models of the secondary particles production.

Application of the research results. Based on the obtained results on production of multi-nucleon systems and nuclei in ^{16}Op-interactions at 3.25 A GeV/c, it can be proved that:

the results obtained during processing and analysis of experimental data on the cross-sections for production of mirror nuclei ^{3}H and ^{3}He, ^{7}Li and ^{7}Be, 6 and 7-nucleon systems and nuclei in ^{16}Op collisions at 3.25 GeV/c (study of α-cluster structure of interacting nuclei) have been used in implementation of the Research Agreement #304 dated of March 30, 2018 on “Promising basic research in physics, cosmic rays astrophysics at the Tien-Shan High-Altitude Research Station” in the Laboratory of Cosmic Ray Physics of Physical-Technical Institute of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (certificate received from Physical-Technical Institute of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan, 06.07.2018). Application of these scientific results allowed one to analyze data obtained in the framework of the cosmic ray astrophysics studies, as well as to estimate α-particle production cross-section (to study α-cluster structure of interacting particles) and, correspondingly, their contribution to semi-inclusive and inclusive cross-sections;

the results on inclusive and semi-inclusive cross-sections for 6 and 7-nucleon systems and nuclei production in ^{16}Op-collisions at 3.25 A GeV/c were used in generation of short-lived fragment beams used for irradiation of nuclear photo-emulsion stacks in the framework of the “Becquerel” program at the HEP

Laboratory Nuclotron accelerator (JINR Letter 010-43/472, 10.29.2018). Scientific data, i.e. fragmentation data, were used as input for the Monte Carlo simulation of planned experiments at the NIKA collider under construction.

Approbation of the work. The main results of the dissertation were presented and discussed at 5 international and 5 republican scientific conferences.

Publication of the results. On the topic of the dissertation 19 scientific publications were published, including 9 papers in scientific journals recommended by the Supreme Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publication of the main scientific results of dissertation works.

The structure and volume of the thesis. The dissertation consists of introduction, 4 chapters, conclusion and list of used references. Text of the dissertation is printed on 115 pages.

ЭЪЛОН КИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; Part I)

1. Олимов К., Курбанов А., Лутпуллаев С.Л., Олимов Х.К., Петров В.И., Юлдашев А.А., Глаголев В.В., Шеркулов У.Д. Образование многонуклонных систем и ядер с массовыми числами 6 и 7 в ^{16}Op-соударениях при импульсе 3.25 ГэВ/*с* на нуклон // Ядерная физика. – Москва, 2009. – Т.72, №4. – С. 636–639 (№1. Web of Science; IF=0.407).

2. Olimov K., Glagolov V.V., Lutpullaev S.L., Kurbanov A., Olimov A.K., Petrov V.I. and Yuldashev A.A.. Production of mirror nuclei ^{7}Li and ^{7}Be in ^{16}Op interactions at a momentum of 3.25 GeV/c per nucleon // Physics of atomic nuclei. - Pleiades Publishing (USA), 2011. – Vol. 74, N2. – pp. 268-271 (№1. Web of Science; IF=0,411).

3. Олимов К., Лутпуллаев С.Л., Гулямов К.Г., Курбанов А., Олимов А.К., Петров В.И., Юлдашев А.А., Образование фрагментов с массовыми числами A≤4 во взаимодействиях ядер кислорода с протонами при импульсе 3.25 А ГэВ/с // Доклады Академии наук РУз. – Ташкент, 2011.– №1. – С. 35–-37 (01.00.00. №7).

4. Олимов К., Глаголев В. В., Гуламов К. Г., Курбанов А., Лутпуллаев С. Л., Олимов А.К., Петров В. И., Юлдашев А.А. Развал ядра кислорода на легкие фрагменты с массовыми числами A≤ 4 в ^{16}O*p*-взаимодействиях при 3.25 *A* ГэВ/*с* // Ядерная физика. – Москва, 2012. – Т.75, №4. – С. 432–437 (№1. Web of Science; IF=0.407).

5. Олимов К., Гуламов К. Г., Курбанов А., Лутпуллаев С. Л., Петров В.И., Юлдашев А.А. Корреляция выхода легких зеркальных ядер ^{3}He и ^{3}H и дейтронов в ^{16}Op-соударениях при импульсе 3.25 А ГэВ/*с* // Доклады Академии наук РУз. – Ташкент, 2012. – №1. – С. 34–36 (01.00.00. №7).

6. Олимов К., Курбанов А., Лутпуллаев С. Л., Олимов А.К., Петров В.И., Юлдашев А.А., Юлдашев Б.С. Образование зеркальных семинуклонных систем и ядер в ^{16}O*p*-соударениях при 3.25 *A* ГэВ/*с* // Доклады Академии наук РУз. – Ташкент, 2013. – №1. – С. 28-29 (01.00.00. №7).

7. Olimov K., Glagolov V.V., Gulamov K.G., Kurbanov A., Lutpullaev S.L., Olimov A.K., Petrov V.I. and Yuldashev A.A., Formation of six-nucleon sistems and nuclei in ^{16}Op collisions at a momentum of 3.25 GeV/c per nucleon, // Physics of atomic nuclei. - Pleiades Publishing (USA), 2014. – Vol. 77, №3. – pp. 325-329 (№1. Web of Science; IF=0,411).

8. Олимов К., Курбанов А., Лутпуллаев С.Л., Олимов А.К., Петров В.И., Юлдашев А.А., Юлдашев Б.С. Сравнительный анализ образования многонуклонных систем и ядер с участием зеркальных ядер ^{3}He и ^{3}H в ^{16}O*p*-взаимодействиях при 3.25 *A* ГэВ/*с* // Доклады Академии наук РУз. – Ташкент, 2014. – №3. – С. 34–37 (01.00.00. №7).

9. Юлдашев Б.С., Олимов К., Тожимаматов Ш.Д., Турдиев Б.Р., Мамасолиев М.Ш., Дусмурадов Э.Э., Курбонов А.Р., Файзиев Т.Б., Абдиев

Б.Ш., Тургунов А.Р. Процессы образования ядер ^{7}Be и системы (α+^{3}He) в каналах с выходом α-частиц в ^{16}Op-взаимодействиях при 3.25 A ГэВ/с // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2018. –Т. 20, № 5, – С. 283–286 (01.00.00.№5).

II бўлим (II часть; Part II)

10. Олимов Х.К., Саттаров А., Курбанов А. Кореляционные эффекты в образовании стабильных изотопов с числом нуклонов 2-7 в ^{16}O*p*-взаимодействиях при импульсе 3.25 ГэВ/*c* на нуклон // «Табиий фанларнинг долзарб муаммолари» республика ёш олимлар илмий амалий анжумани материаллари тўплами. – Самарқанд, 2008 – б. 92-93.

11. Олимов К., Лутпуллаев С.Л., Курбанов А., Олимов А.К., Петров В. И., Юлдашев А.А. Развал ядер ^{16}O с импульсом 3.25 *A* ГэВ/*c* во взаимодействиях с протонами на легкие фрагменты с A=3 и 4 // «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» / Сб. трудов конференции, посвященной 80-летию академика М.С. Саидова. 24-25 ноября 2010 г. – Ташкент, 2010. – С. 35-36.

12. Олимов К., Курбанов А., Лутпуллаев С.Л., Петров В.И., Юлдашев А.А. Average multiplicities of fragments with A≤3, associated with formation of 6 and 7-nucleon systems and nuclei in ^{16}O*p*-collisions at 3.25 *A* GeV/*c* // International Conference “Nuclear science and its application”, September 25-29, 2012, – Tashkent, 2012. – pp.118-120.

13. Олимов К., Курбанов А., Лутпуллаев С.Л., Петров В.И., Юлдашев А.А. Cross-sections of semi-inclusive channels with formation of 6 and 7-nucleon systems and nuclei in ^{16}O*p*-reactions at 3.25 *A* GeV/*c* //International Conference, “Nuclear science and its application” September 25-29, 2012. – Tashkent, 2012.– pp.129-131

14. Олимов К., Курбанов А., Лутпуллаев С.Л., Петров В.И., Юлдашев А.А. Correlations of yield of α–particles, deuterons and light fragments with mass numbers A≤4in ^{16}O*p*-reactions at 3.25 *A* GeV/*c*//International Conference, “Nuclear science and its application” September 25-29, 2012,– Tashkent,2012. - pp. 140-141

15. Олимов К., Курбанов А., Лутпуллаев С.Л., Олимов А.К., Петров В.И., ЮлдашевА.А. Образование шестинуклонных систем и ядер в ^{16}O*p*-соударениях при 3.25 *A* ГэВ/*c* // 9-я международная конференция «Ядерная и радиационная физика». – Алматы (Казахстан), 2013. – С. 143–145.

16. Олимов К., Курбанов А., Петров В. И., Юлдашев А.А. Образование шестинуклонных систем и ядер в ^{16}O*p*-соударениях при 3.25 *A* ГэВ/*c* // «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» / Сб. трудов международной конференции, посвященной 70-летию ФТИ НПО «Физика-Солнце» 14-15 ноября 2013 г – Ташкент, 2013.– С. 20–22.

17. Курбанов А., Петров В.И., Юлдашев А.А. Образование семинуклонных систем и ядер в ^{16}O*p*-соударениях при 3.25 *A* ГэВ/*c* // «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» / Сб. трудов международной конференции, посвященной 70-летию ФТИ НПО «Физика-Солнце» 14-15 ноября 2013 г – Ташкент, 2013. – С. 22-23.

18. Олимов К., Курбанов А.Р., Петров В. И., Юлдашев А.А. Сравнительный анализ каналов инклюзивного образования ядер дейтрона и трития в ^{16}Op-соударениях при 3.25A ГэВ/с // «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» / Сб. трудов международной конференции, посвященной 100-летию академика С.А. Азимова, 6-7 ноября 2014 г. – Ташкент, 2014. – С. 18-19.

19. Olimov K., Kurbanov A.R., Shukurov A.Kh. Charged pions and light fragments production in ^{16}O*p*-collisions at 3.25 A GeV/c// International Symposium “New tendencies of developing fundamental and applied Physics: Problems, Achievements, Prospectives”, 10-11 November 2016. – Tashkent, 2016. – p. 61-62.

Талабгор А.Р.Курбанов

Илмий раҳбар К.Олимов