

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

---

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ**

**БОЗОРОВ ЭРКИН ҲОЖИЕВИЧ**

**3.25 А ГэВ/с ИМПУЛЬСЛИ КИСЛОРОД ЯДРОЛАРИНИНГ  
ПРОТОНЛАР БИЛАН ЎЗARO ТАЪСИРЛАРИДА ПАРЧАЛАНИШ  
ЖАРАЁНЛАРИ ВА 3-300 ГэВ ЭНЕРГИЯЛИ  $\pi^-$ ,  $p$ ,  $\alpha$ ,  $C(C)$ - ВА  $p(^{16}O, ^{20}Ne)$ -  
ТЎҚНАШУВЛАРИДА ПРОТОНЛАР ҲОСИЛ БЎЛИШ  
МЕХАНИЗМЛАРИ**

**01.04.08 – АТОМ ЯДРОСИ ВА ЭЛЕМЕНТАР ЗАРРАЧАЛАР ФИЗИКАСИ.  
ТЕЗЛАШТИРУВЧИ ТЕХНИКА  
(физика-математика фанлари)**

**ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2015**

**Докторлик диссертацияси автореферерати мундарижаси**  
**Оглавление автореферата докторской диссертации**  
**Content of the abstract of doctoral dissertation**

Бозоров Эркин Хожиевич

3.25 А ГэВ/с импульсли кислород ядроларининг протонлар билан ўзаро таъсирларида парчаланиш жараёнлари ва 3–300 ГэВ энергияли  $\pi^-$ ,  $p$ ,  $\alpha$ ,  $C(C)$ - ва  $p(^{16}O, ^{20}Ne)$ -тўқнашувларида протонлар ҳосил бўлиш механизмлари..... 3

Базаров Эркин Ходжиевич

Процессы фрагментации ядер кислорода во взаимодействиях с протонами при 3.25 А ГэВ/с и механизмы образования протонов в  $\pi^-$ ,  $p$ ,  $\alpha$ ,  $C(C)$ - и  $p(^{16}O, ^{20}Ne)$ -соударениях при 3–300 ГэВ..... 31

Vozorov Erkin

The fragmentation of oxygen nuclei in interactions with protons at 3.25 GeV/c and mechanisms of formation of protons in  $\pi^-$ ,  $p$ ,  $\alpha$ ,  $C(C)$ - and  $p(^{16}O, ^{20}Ne)$ -collisions at 3–300 GeV)..... 59

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ  
 List of published works..... 83

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

---

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ**

**БОЗОРОВ ЭРКИН ҲОЖИЕВИЧ**

**3.25 А ГэВ/с ИМПУЛЬСЛИ КИСЛОРОД ЯДРОЛАРИНИНГ  
ПРОТОНЛАР БИЛАН ЎЗARO ТАЪСИРЛАРИДА ПАРЧАЛАНИШ  
ЖАРАЁНЛАРИ ВА 3–300 ГэВ ЭНЕРГИЯЛИ  $\pi^-$ ,  $p$ ,  $\alpha$ ,  $C(C)$  - ВА  $p(^{16}O, ^{20}Ne)$  -  
ТЎҚНАШУВЛАРИДА ПРОТОНЛАР ҲОСИЛ БЎЛИШ  
МЕХАНИЗМЛАРИ**

**01.04.08 – АТОМ ЯДРОСИ ВА ЭЛЕМЕНТАР ЗАРРАЧАЛАР ФИЗИКАСИ.  
ТЕЗЛАШТИРУВЧИ ТЕХНИКА  
(физика-математика фанлари)**

**ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2015**

**Докторлик диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида 30.09.2014/В2014.5.FM156 рақами билан рўйхатга олинган.**

Докторлик диссертацияси “Физика-Куёш” илмий ишлаб-чиқариш бирлашмаси Физика-техника институти ва Ядро физикаси институтида бажарилган.

Докторлик диссертациясининг тўлиқ матни Ядро физикаси институти ва Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги 16.07.2013.FM.11.01 рақамли Илмий кенгаш веб-саҳифасида [www.inp.uz](http://www.inp.uz) манзилига жойлаштирилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз) веб-саҳифада [www.inp.uz](http://www.inp.uz) манзилига ҳамда ZIYONET ахборот-таълим порталида [www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz) манзилига жойлаштирилган.

**Илмий маслаҳатчи:**

**Юлдашев Бехзод Садиқович**

физика-математика фанлари доктори, профессор,  
Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси  
академиги

**Расмий оппонентлар:**

**Ледницки Рихард**

физика-математика фанлари доктори, профессор

**Буртебаев Насурлла**

физика-математика фанлари доктори, профессор

**Артемов Сергей Викторович**

физика-математика фанлари доктори

**Етакчи ташкилот:**

**Ўзбекистон Миллий университети қошидаги  
Амалий физика илмий текшириш институти**

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

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

Диссертация автореферати 2015 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ да тарқатилди  
(2015 йил “\_\_\_” \_\_\_\_\_ даги \_\_\_\_\_ рақамли реестр баённомаси).

**У. С. Салихбаев**

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

**Р. Ярмухамедов**

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

**И. Хидиров**

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

## ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АННОТАЦИЯСИ

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти.** Релятивистик ядро физикаси соҳасидаги фундаментал муаммолардан бири релятивистик ядроларнинг адронлар ва ядролар билан тўқнашувларида парчланиш қонуниятларини аниқлашдан иборат. Бунда релятивистик ядроларнинг адронлар ва ядролар билан тўқнашувларининг парчланиш жараёнларини экспериментал ва феноменологик тадқиқ қилиш муҳим рол ўйнайди, чунки у парчаланувчи ядролар (хусусан, енгил) кластерли структураси, унинг парчалар ҳосил бўлишининг кўндаланг кесими ва парчалар таркибига таъсири, ҳамда парчалар ҳосил бўлишида ҳар хил механизмларнинг улушлари ҳақида муҳим маълумотлар олиш имконини беради. Тўқнашув энергиялари бир неча ГэВ/нуклон бўлганда парчланиш жараёни устувор бўлиб, унинг улуши реакция тўлиқ кўндаланг кесимининг 80 фоизини ташкил қилади. “Жуфт-жуфт” релятивистик ядроларнинг ( $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  ва  $^{20}\text{Ne}$ ) адронлар ва ядролар билан тўқнашувларидаги парчланиш жараёнларини ўрганиш муҳим аҳамиятга эга, чунки бундай ядроларда  $\alpha$ -кластерли структура ҳосил бўлиш устуворлиги кутилади.

Ҳозирга қадар  $\alpha$ -кластерли структура стационар равишда мавжудми, ёки у парчаланувчи ядролар маълум даражада уйғонганда пайдо бўладими, деган саволга жавоб йўқ. Парчаланувчи ядро  $\alpha$ -кластерли структурасини ўрганишнинг самарали усулларида бири  $\alpha$ -зарралар ҳосил бўлишини ядро-снаряднинг турли даражада уйғонишларида тадқиқ қилишдан иборат.

Адронларнинг кварк-партон структурасига асосланган қатор моделлар башоратига асосан, ядроларда ўзаро кучли боғланган камнуклонли бирикмалар ва кўпбарионли ҳолатлар мавжудлигини аниқлаш муҳим аҳамият касб этади. Бу масаланинг ечими бевосита эркин нуклонлар тўқнашувида кинематик тақиқланган соҳада ҳосил бўлувчи зарраларнинг характеристикаларини юқори энергияли адронлар ва ядроларнинг ядролар билан тўқнашувларида тизимли экспериментал тадқиқ қилиш билан боғлиқ.

Юқорида баён қилинганлардан, катта статистик материалларда ядролар парчланишини барча парчалари, ҳамда иккиламчи зарралари тўлиқ идентификация қилинган, уларнинг кинематик характеристикалари катта аниқликда ўлчанган ва аниқланган ҳолатда, тўқнашувчи ядролар масса сонининг ҳамда тўқнашув энергияларининг катта диапазонида комплекс экспериментал тадқиқ қилишнинг долзарблиги келиб чиқади. Бу эса ядро парчланишининг янги қонуниятларини аниқлаштириш имконини беради.

Назарий моделларни қайта ишлаб чиқиш, уларни ҳамда парчланиш жараёнларини тафсирлашга ёндашувларни синовдан ўтказиш, космик нурларнинг атмосфера ядролари билан ўзаро таъсирларини моделлаштириш, ядролар парчланишида ҳосил бўлувчи барча изотопларнинг кўндаланг кесимлари тўғрисида катта аниқликка эга бўлган маълумотлар олиш заруриятини келтириб чиқаради. Бундан ташқари релятивистик ядроларнинг водород билан тўқнашувларида ҳосил бўлувчи енгил парчалар – протонлар, дейтронлар, тритий ҳамда гелий-3 ядроларининг ўртача кўпламчилиги

(инклюзив кўндаланг кесимлари) ҳақидаги экспериментал маълумотлар астрофизиканинг энг муҳим муаммоларидан бири – зарралар оқимининг юлдузлараро муҳитдан ўтишини ҳал қилиш учун ўта зарурлиги келиб чиқади.

**Тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялар тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги.** Диссертация иши 2000-2011 йиллардаги «Физика, астрономия, энергетика ва машинасозлик» Ўзбекистон Республикасида фан ва технологияларни ривожлантиришнинг устувор йўналишига мос равишда бажарилди.

**Диссертация мавзуси бўйича халқаро илмий тадқиқотлар шарҳи.** Релятивистик энгил ядроларнинг парчаланish жараёнлари, протонлар, шу жумладан, кумулятив протонлар ҳамда энгил фрагментлар ҳосил бўлиш механизмлари тадқиқотлари Бирлашган ядро тадқиқотлари институтида, Россия Фанлар академиясининг П.Н. Лебедев номидаги Физика ҳамда В.Г. Хлопин номидаги Радий институтларида (Россия), Калифорния университети Лоуренц-Беркли лабораториясида (АҚШ), Словакия Фанлар академиясининг Экспериментал физика институтида (Словакия), Германиянинг тадқиқотлар ва технологиялар Федерал вазирлигида (Германия), Лунд университетида (Швеция) ва EMU01 ҳамда EMU02 Халқаро ҳамкорликлар таркибига кирувчи бошқа илмий марказларда олиб борилмоқда.

Бирлашган ядро тадқиқотлари институти Юқори энергиялар лабораторияси Нуклотрони базасида ташкил топган BECQUEREL Халқаро ҳамкорлик томонидан энгил ядролар ( $A=6-12$ ) ва улар изотопларининг кластерли структуралари топилиб, уларнинг таркиби парчаланувчи ядро масса сонига ва ундаги протон ва нейтронлар сонининг жуфт ёки тоқлигига боғлиқ эканлиги аниқланган. АҚШ Калифорния университети қошидаги Лоуренц-Беркли лабораторияси олимлари томонидан юқори энергияли энгил  $\alpha$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$  ва  $^{16}\text{O}$  ядроларнинг энгил ва оғир ядролар билан тўқнашувларида ҳосил бўлувчи ва чиқиш бурчаклари  $0.72^\circ$  дан кичик бўлган барча изотопларнинг кўндаланг кесимлари топилди. EMU01 ва EMU02 Халқаро ҳамкорликлар томонидан “чегаравий парчаланish башорати” текширилди, ядро материясида “суюқ-газ” фазавий ўтиш мумкин бўлган энергия зичлигининг критик қиймати баҳоланган.

Халқаро илмий тадқиқотлар бўйича шарҳ, релятивистик ядролар физикаси соҳасидаги энг муҳим дунёвий устувор йўналишлар: “Ядролар парчаланishининг умумий қонуниятларини топиш”; “ядровий тўқнашувларда протонлар ҳосил бўлиш механизмларини аниқлаш”га доир жуда кам экспериментал маълумотлар олинганлигини кўрсатади. Хусусан: ядровий тўқнашувларда ҳосил бўлувчи турғун ва нотурғун изотопларнинг кўндаланг кесимлари аниқланмаган, оралиқ нотурғун ядроларнинг  $\alpha$ -зарралар ҳосил бўлишига қўшган ҳиссалари топилмаган. Бундан ташқари, ядро структуравий (кластерли) тузилишининг изотоплар ҳосил бўлиши эҳтимоллигига ва уларнинг таркибига қандай таъсир этиши тадқиқ қилинмаган, протонлар ҳосил бўлиши асосий механизмларининг улушлари топилмаган, шу

жумладан, кумулятив протонлар ҳосил бўлишининг (генезиси) табиати аниқланмаган.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Ҳозирги пайтда дунёнинг етакчи олимлари томонидан релятивистик ядроларнинг адронлар ва ядролар билан ўзаро таъсирида кўпламчи зарралар туғилиши ҳамда ядроларнинг парчаланиш жараёнларини экспериментал ва назарий тадқиқотлари бўйича катта ҳажмда маълумот мавжуд. Аммо диссертацияда тадқиқ қилинаётган муаммо бўйича қуйидаги экспериментал ишлар бажарилган.

Азимов С.А., Юлдашев Б.С., Лутпуллаев С.Л. ҳамда швед олимлари (Andersson B., Otterlund I. ва Stenlund E.)нинг ишларида юқори энергияли адронларнинг ядролар билан тўқнашувларида протонлар ҳосил бўлиш жараёнлари ўрганилган. Аммо олинган натижалар протонлар ҳосил бўлишини чуқур тадқиқ қилиш ва ҳосил бўлиш механизмларини ўрганишга имкон бермаган.

Россия олимлари (Зарубин П.И., Русакова В., Пересадько Н.Г., Артеменков Д.А. ва бошқалар) томонидан енгил ядроларнинг фотоэмульсия ядролари билан периферик тўқнашувларида уларнинг кластерлик тузилишлари жадал суъратларда тадқиқ қилинмоқда. Аммо уларда парчалар ҳосил бўлиш кўндаланг кесимларини аниқлаш ҳамда ядроларнинг парчаланиш механизмларини ўрганишга имкон бўлмаган.

Америкалик олимлар (Heckman H.H., Greiner D.E., Lindstrom P.J. ва бошқалар) томонидан электрон усулда релятивистик  $\alpha$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$  ва  $^{16}\text{O}$  ядроларнинг  $^9\text{Be}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{108}\text{Ag}$  ва  $^{207}\text{Pb}$  ва  $^{16}\text{O}$  ядролари билан тўқнашувларида кичик бурчак остида чиқувчи парчаларнинг ҳар хил изотоплари ўрганилган. Қайд қилинувчи парчалар чиқиш бурчагининг чегаранланганлиги бу изотоплар чиқишининг тўлиқ кўндаланг кесимини топиш ҳамда улар ҳосил бўлишининг универсал механизмларини аниқлаш имконини бермаган.

Юқори энергияли адронлар ва ядроларнинг ядролар билан тўқнашувларида кумулятив протонлар ҳосил бўлиши Россия олимлари Лексин Г.А., Баюков Ю.А., Любимов В.Б., Армутлийский Д., Балдин А.М. ва бошқалар томонидан тадқиқ қилинди. Аммо экспериментал натижаларнинг бир тизимга келтирилмаганлиги ва уларнинг камлиги кумулятив протонлар ҳосил бўлиш механизмларини аниқлаш имконини бермаган. Шундай қилиб, юқори энергияли адрон-ядро тўқнашувларида кумулятив протонлар ҳосил бўлиш муаммоси ечилмай қолган.

Олимов Қ. нинг докторлик диссертацияси мазкур ишда ҳал қилинган муаммога анча яқиндир. Бунда  $3.25 \text{ A}$  ГэВ/с импульсли кислород ядроларининг протонлар билан ўзаро тўқнашувларида парчаланиши бўйича умумий маълумотлар олинган; бир ва кўпзарядли парчалар, уларни масса бўйича ажратмаган ҳолда, кўпламчилиги ўрганилган; кислород ядроларининг топологик каналларга емирилиш кўндаланг кесимлари аниқланган; экспериментда кузатилган жуфт  $\alpha$ -заррачалар чиқишидаги кичик бурчакли боғланишлар нотурғун  $^8\text{Be}$  ва  $^9\text{B}$  ядроларнинг туғилиши ва емирилиши оқибатида бўлиши мумкинлиги тўғрисида кўрсатма олинган, аммо уларнинг

$\alpha$ -зарралар ҳосил бўлишига қўшган ҳиссалари миқдорий жиҳатдан аниқланмаган; заряди 1 дан 7 гача бўлган парчаларнинг изотопик таркиби аниқланган, аммо уларнинг ҳосил бўлиш кўндаланг кесимлари топилмаган. 3.25 А ГэВ/с импульсли  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида протонлар, шу жумладан, кумулятив протонлар ва бошқа енгил парчалар ҳосил бўлиши тадқиқ қилинмаган. Кислород ядроларининг протонлар билан периферик тўқнашувларида емирилиши тадқиқ қилинмаган.

**Диссертация тадқиқотининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация иши 2000–2002 йилларда фундаментал тадқиқотлар Давлат илмий-техника дастурларига кирувчи 2Ф-1.2.1 рақамли “Релятивистик кислород ядросининг нуклонлар билан таъсирлашишидаги парчаланиш механизмларини ўрганиш” лойиҳаси; 2003–2007 йилларда Ф-2.1.26 рақамли “Юқори энергияли адрон ва ядроларнинг ядролар билан таъсирлашишида заррачаларнинг кўплаб ҳосил бўлиши, парчаланиши ҳамда ядро материяси ҳолатини ўрганиш” лойиҳаси; 2007–2011 йилларда Ф2-Ф029 рақамли “Юқори энергияли адрон ва ядроларнинг ядролар билан тўқнашишида ядро материяси структурасини ва коллектив эффектларни ўрганиш” лойиҳаларига мос равишда бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** 3.25 А ГэВ/с импульсли кислород ядроларининг протонлар билан ўзаро таъсирлашишларидаги парчаланиш жараёнлари ҳақида етарлича тўлиқ экспериментал маълумотлар олиш ҳамда 3-300 ГэВ энергия оралиқларидаги  $\pi^-$ ,  $p$ ,  $\alpha$ ,  $C(C)$ - ва  $p(^{16}\text{O}, ^{20}\text{Ne})$ -тўқнашувларида протонлар, шу жумладан, кумулятив протонлар ҳосил бўлишининг асосий механизмларини аниқлашдан иборат.

Мақсадга эришиш учун қуйидаги **тадқиқот вазифалари** қўйилган: протонлар ва  $\pi^+$ -мезонларнинг кўпламчилиги ҳамда кинематик хараakterистикалари тўғрисида ўта аниқ маълумотлар олиш мақсадида уларни идентификация қилиш услубини мукаммаллаштириш;

2 м пропанли пуфакчали камера суюқлигида қисқа югуриш йўлига ( $L < 4$  см) эга бўлган турли зарралар йўқотилишини ҳисобга олиш;

4.2 и 9.9 ГэВ/с импульсли  $p(C_3H_8)$ -, 40 ГэВ/с импульсли  $\pi^-(C_3H_8)$ -, 300 ГэВ/с импульсли  $p(NeH_2)$ -тўқнашувлар ҳамда 4.2 А ГэВ/с импульсли  $\alpha(C_3H_8)$ - и  $C(C_3H_8)$ -тўқнашувларидан маълум турдаги ядровий тўқнашувларни ажратиш;

$\pi^-$ ,  $p$ ,  $\alpha$ ,  $C(C)$ - ва  $p(^{16}\text{O}, ^{20}\text{Ne})$ -тўқнашувларида ҳосил бўлувчи протон-парчаларнинг кўпламчиликларини ва импульс тақсимотларини таҳлил қилиш ҳамда протонлар ҳосил бўлишининг асосий механизмлари улушларини аниқлаш;

3.25 А ГэВ/с импульсли  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида масса сонлари  $A=2$  ва 4 га тенг бўлган енгил ядроларни тадқиқ қилиш ва уларнинг ҳосил бўлиш қонуниятларини аниқлаш;

3.25 А ГэВ/с импульсли  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида  $\alpha$ -заррачалар ҳосил бўлишининг асосий механизмлари ва қонуниятларини ўрганиш, гелий-4 ядроси ҳосил бўлишида нотурғун  $^8\text{Be}$  ва  $^9\text{Be}$  ядроларининг ҳамда уйғотилган



углерод-12 ядроларининг ҳиссаларини ҳисоблаш имконини берувчи феноменологик моделларни яратиш;

3.25 А ГэВ/с импульсли  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида заряди 1–8 бўлган турғун ва нотурғун изотопларнинг ҳосил бўлиш кўндаланг кесимларини аниқлаш;

ядроларда ўзаро кучли боғланган камнуклонли бирикмалар ва кўпбарионли ҳолатлар мавжудлигини аниқлаш мақсадида юқори энергияли  $\pi^-$ -мезонлар, протонлар ва  $^4\text{He}$  ҳамда  $^{12}\text{C}$  ядроларининг углерод ядролари билан протонларнинг кислород ва неон ядролари билан тўқнашувларида кумулятив протонлар ҳосил бўлишини ҳар томонлама тадқиқ қилиш.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида юқори энергияли адрон ва ядролар келтириб чиқарган ядровий жараёнлар олинган.

**Тадқиқотнинг предмети** – ядроларнинг парчаланиш жараёнлари, протонлар ҳосил бўлиши, шу жумладан, кумулятив протонлар ҳосил бўлиши.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Юқори энергияли ядролар парчаланиши ва зарралар ҳосил бўлишига инклюзив ёндашишда математик статистика усуллари ҳамда кучли магнит майдонига жойлаштирилган пуфакчали камерани релятивистик ядро ва адронлар билан нурлантирилганда олинган ахборотларни қайта ишлашга асосланган эксперимент методикаси.

**Диссертация тадқиқотининг илмий янгилиги** илк бор олинган кўйидаги натижалардан иборат:

заряди  $Z=1-8$  бўлган турғун ва нотурғун изотопларнинг кўндаланг кесимлари 3.25 А ГэВ/с импульсли  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида ўта юқори аниқликда топилган ва статистик хатоликлар чегарасида кўзгу ядроларининг кўндаланг кесимлари бир-бирига мос келиши исботланган;

протонлар ҳосил бўлишининг асосий механизмлари (буғланиш механизми, уйғотилган қолдиқ ядронинг ферми-емирилиш механизми ва каскад жараёнида протонларнинг тўғридан-тўғри уриб чиқариш механизми) ҳиссалари 40 ГэВ/с импульсли  $\pi^-$ -, 300 ГэВ/с импульсли  $p^{20}\text{Ne}$ - ва 3.25 А ГэВ/с импульсли  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида ярим эмпирик усули билан баҳоланган. Ушбу улушлар парчаланувчи енгил ядронинг энергияси ва масса сонига боғлиқ эмаслиги ва уларнинг бирламчи зарралар (пион ёки протон) турига боғлиқлиги топилган;

$\pi^-$  (40 ГэВ/с)-,  $p^{20}\text{Ne}$  (300 ГэВ/с) - ва  $^{16}\text{O}$  (3.25 А ГэВ/с)-тўқнашувларида тез протонлар ( $p > 0.25$  ГэВ/с) ҳосил бўлиш механизмлари бирламчи энергияга, бирламчи зарранинг ва парчаланувчи енгил ядронинг турига ҳамда ядронинг уйғониш даражасига боғлиқ эмаслиги исботланган;

3.25 А ГэВ/с импульсли  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида дейтронлар ҳосил бўлишининг асосий механизмлари – каскад нуклонларининг бирлашув механизми, нисбатан тез енгил парчаларнинг емирилиши ва дейтронларни кислород ядроси таркибидан тўғридан-тўғри квазиэластик уриб чиқарилиши аниқланган;

оралиқ ҳолатлардаги  $^8\text{Be}$ ,  $^9\text{B}$   $^{12}\text{C}^*$  ядроларнинг 3.25 А ГэВ/с импульсли  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида ҳосил бўлиш кўндаланг кесимлари аниқланган ва уларнинг нотурғун ядролар  $^5\text{He}$  ва  $^5\text{Li}$  билан биргаликда  $\alpha$ -зарралар ҳосил бўлиши кўндаланг кесимига қўшган ҳиссалари топилган; уйғотилган  $^{12}\text{C}^*$

ядролари емирилишининг  $3\alpha$ -зарра ҳосил бўлиш каналига қўшган ҳиссаси  $38\pm 3\%$  эканлиги топилган;

кумулятив протонлар бирламчи зарраларнинг ядронинг асосий ҳолатида нуклонлар зичлиги флуктуацияси туфайли содир бўлувчи кўпнуклонли бирлашмалар (флуктонлар) билан ўзаро таъсирлашуви натижасида ҳосил бўлиши  $^{16}\text{O}(3.25 \text{ A ГэВ/с})$ -,  $p^{12}\text{C}(4.2 \text{ ва } 9.9 \text{ ГэВ/с})$ -,  $\pi^{-12}\text{C}(40 \text{ ГэВ/с})$ -,  $p^{20}\text{Ne}(300 \text{ ГэВ/с})$ -,  $\alpha^{12}\text{C}(4.2 \text{ A ГэВ/с})$ - ва  $\text{C}^{12}\text{C}(4.2 \text{ A ГэВ/с})$ -тўқнашувларида топилган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари**  $3.25 \text{ A ГэВ/с}$  импульсли кислород ядросининг протонлар билан тўқнашувларида ҳосил бўлувчи турғун ва нотурғун ядроларнинг кўндаланг кесимлари, ҳар хил нотурғун ядролар емирилишининг  $\alpha$ -зарралар пайдо бўлишига қўшган ҳиссалари ва юқори энергияли адронлар ва ядроларнинг ядролар билан тўқнашувларида ҳосил бўлувчи протонларнинг асосий ҳиссаларидан ташкил топган ноёб банк маълумотлари тўпланганидан; экспериментал маълумотлар ядролар парчаланишини тавсифловчи назарий моделларни ва ёндашувларни яратишда ҳамда бирламчи космик нурларнинг атмосфера ядролари билан ўзаро таъсирларини моделлаштиришда қўлланилиши мумкинлигидан; релятивистик кислород ядроларининг водород билан тўқнашувларида ҳосил бўлувчи енгил парчалар – протонлар, дейтронлар, тритий ҳамда гелий-3 ядроларининг ҳар хил характеристикалари тўғрисидаги экспериментал маълумотлар астрофизиканинг энг муҳим муаммоларидан бири – зарралар оқимининг юлдузлараро муҳитдан ўтишини ҳал қилишда қўлланилиши мумкинлигидан иборат.

**Олинган натижаларнинг ишончлилиги**, энг аввало, катта статистикадан иборат экспериментал материалга ( $>93000$  ходисалар), зарралар ва парчалар заряди ҳамда массаларини аниқ қайд қилишга, уларнинг чиқиш бурчаклари ва импульсларини етарли даражада аниқ ўлчашга; натижаларни интерпретация қилишда кенг қўлланилаётган инклюзив ёндашувга ҳамда эксперимент натижаларини қайта ишлаш ва таҳлиliga математик статистика усулларини қўллашга; олинган натижаларнинг бошқа экспериментлар маълумотлари билан мос келишига, кўпламчилик жараёнлари ва ядролар парчаланишига бағишланган назарий ишлар асосий низомларига ҳар жиҳатдан мос келишига асосланган.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Диссертация ишида олинган экспериментал маълумотлар ядровий маълумотлар дунёвий банкини яратишда, юқори энергияли адрон ва ядро-ядро тўқнашувларида ядролар парчаланиши муаммоларига бағишланган назарий моделларни ҳамда ёндашувларни синовдан ўтказиш учун зарур ҳамда ионли тезлатгичларда янги экспериментлар ўтказишда ва уларни режалашда қўлланилиши мумкин.

Кислород ядроси парчаланишида ҳосил бўлувчи турғун ва нотурғун ядролар кўндаланг кесимлари тўғрисидаги маълумотлар эса космофизик ва космокимё тадқиқотларда қўлланилиши мумкин.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Нотурғун  $^8\text{Be}$  ва  $^9\text{B}$  ядроларининг экспериментда топилган кўндаланг кесимлари ва мазкур ядроларнинг  $\alpha$ -зарралари ҳосил бўлишига қўшган ҳиссаларини аниқлаш усули энгил ядроларнинг фотоэмульсия ядролари билан периферик тўқнашувларида уларнинг кластер тузилишини тадқиқ қилувчи BESQUEREL (2009-2011) Халқаро ҳамкорлик дастури доирасида Бирлашган ядро тадқиқотлари институтининг (Дубна ш., Россия) нуклотронида ўтказилган экспериментни режалаштиришда ва моделлаштиришда қўлланилган (2009–2011, 02-1-1087-рақамли дастур) (Бирлашган ядро тадқиқотлари институтининг 2015 йил 6 февралдаги 100-25/19-рақамли ва Ўзбекистон Республикаси Фанлар академиясининг 2015 йил 9 мартдаги 2/1255-289-рақамли хатлари).

**Ишнинг апробацияси.** Тадқиқотнинг асосий натижалари 10 та илмий анжуманлар, шундан, 6 та Халқаро, хусусан, «Ядро физикасининг ҳозирги замон муаммолари» V Халқаро анжумани (Самарқанд, 2003), «Ядро фани ва унинг татбиқи» III Евроосиё анжумани (Тошкент, 2004), «Ядро фани ва унинг татбиқи»га бағишланган халқаро анжумани (Самарқанд, 2012), «Юқори энергиялар физикаси, ядро физикаси ва тезлатгичлар» XII конференцияси (Харьков, 2014), «Ядро физикаси, атом энергетикаси ва ядровий технологияларнинг фундаментал муаммолари»га бағишланган 64-Халқаро анжумани (Минск, 2014), юқори энергиялар физикаси муаммоларига бағишланган XXII Халқаро Балдин семинари (Дубна, 2014); ҳамда 4 та Республика «Физиканинг фундаментал ва амалий муаммолари» (Тошкент, 2004, 2006, 2013), «Ўзбекистонда физика» (2005, Тошкент) илмий анжуманларда апробациядан ўтказилган.

Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси «Физика-Қуёш» илмий ишлаб чиқариш бирлашмаси Физика-техника институтининг илмий семинарларида (2008, 2009), Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ядро физикаси институтининг илмий семинарларида (2012, 2014), Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси «Физика-Қуёш» илмий ишлаб чиқариш бирлашмаси Физика-техника институти ва Ядро физикаси институтларининг бирлашган илмий семинарларида (2012, 2015), Ўзбекистон Миллий университети қошидаги Амалий физика илмий текшириш институтининг илмий семинарида (2014) апробациядан ўтган.

**Натижаларнинг эълон қилиниши.** Диссертация иши бўйича 34 та илмий иш эълон қилинган, жумладан 18 та мақола хорижий ва миллий журналларида, илмий ишлар тўпламларида 2 таси мақола ва 11 таси тезислар кўринишида, 3 та препринт.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация кириш, беш боб, хулоса ва 155 номдаги фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан, шунингдек, 2 та илова ва 182 саҳифа асосий матн, 34 та расм ва 16 та жадвалдан иборат.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Диссертациянинг кириш қисмида охириги йилларда юқори энергияли адрон- ва ядро-ядро тўқнашувларида кўпламчилик жараёнлари ҳамда ядроларнинг парчаланишига оид олинган асосий натижаларнинг қисқача таҳлили ҳамда диссертация мақсади ва вазифалари баён қилинган.

Диссертациянинг **биринчи бобида** бир метрлик водородли пуфакчали камеранинг асосий тавсифи, бирламчи ядролар дастаси ҳамда суратли ахборотлар услуби тўғрисида қисқача маълумотлар келтирилган. Шу билан бирга, 2 метрлик пропанли ва 30 дюймли водород-неонли пуфакчали камераларда олинган тажриба материалларининг қисқача тавсифи ҳам келтирилган.

1-жадвалда тадқиқ қилинадиган тўқнашувлар, бирламчи импульс қийматлари ва ҳодисаларнинг сони келтирилган.

### 1-жадвал

#### Экспериментал материаллар тўғрисида маълумотлар

Тўқнашувлар тури	$P_0$ , А ГэВ/с	Ҳодисалар сони
$^{16}\text{O}p$	3.25	13500
$\pi^{-12}\text{C}$	40.0	16657
$p^{12}\text{C}$	4.2	6901
$p^{12}\text{C}$	9.9	18325
$^4\text{He}^{12}\text{C}$	4.2	12326
$^{12}\text{C}^{12}\text{C}$	4.2	20530
$p^{20}\text{Ne}$	300	5000
Тўқнашувларнинг умумий сони		<b>93239</b>

Диссертациянинг **иккинчи бобида** 3.25 А ГэВ/с импульсли  $^{16}\text{O}p$ -, 4.2 ва 9.9 ГэВ/с импульсли  $p\text{C}$ -, 4.2 А ГэВ/с импульсли  $\alpha\text{C}$ - ва  $\text{CC}$ -тўқнашувларида протонлар ҳосил бўлишини (В.В. Глаголев, Қ. Олимов, С.Л. Лутпуллаев, А. А. Йўлдошев, Б.С. Йўлдошев ва бошқа муаллифлар билан биргаликда) тизимли тадқиқ қилинганлиги келтирилган.

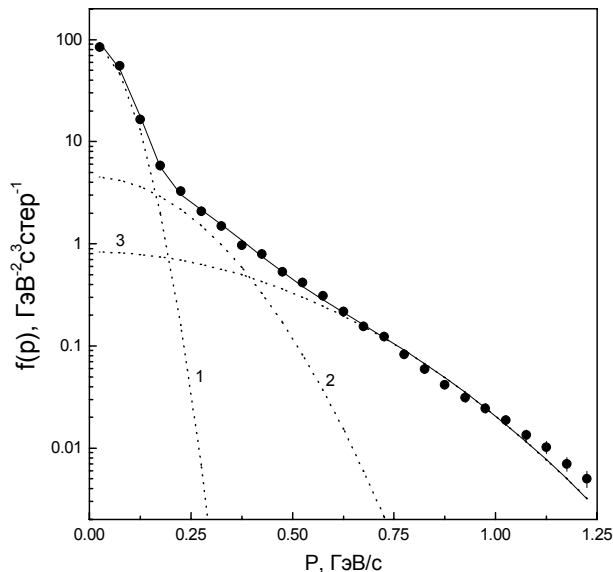
Протонлар ҳосил бўлишининг нормировка қилинган инвариант дифференциал кесимининг импульс бўйича тақсимотини таҳлил қилиш шуни кўрсатдики, ушбу тақсимотни учта гаусс функцияси йиғиндиси кўринишида қониқарли тавсифлаш мумкин.

$$f(p) = a_1 \exp(-b_1 p^2) + a_2 \exp(-b_2 p^2) + a_3 \exp(-b_3 p^2). \quad (1)$$

Бу ерда  $a_i$  – ва  $b_i$  – яқинлашиш параметрлари (энг кичик квадратлар усули ёрдамида топилади).

1-расмда, мисол тариқасида, 3.25 А ГэВ/с импульсли  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида протонлар ҳосил бўлишининг нормировка қилинган инвариант дифференциал кесимининг импульс бўйича тақсимоти кислород ядросининг тинч ҳолат системасида ҳамда (1) – ифодадаги ҳар бир қўшилувчи ҳаднинг ҳиссаси кўрсатилган (1, 2, 3 – пунктирли эгри чизиклар).

Расмдаги узлуксиз чизик протонларнинг “буғланиш” (1-эгри чизик), “ферми-емирилиш” (2-эгри чизик), протонларнинг нишон ядро ёки иккиламчи зарралар томонидан тўғридан-тўғри уриб чиқарилиш (3-эгри чизик) механизмларининг йиғиндисини ифодалайди. Ушбу механизмларнинг ҳиссалари мос равишда  $(27.4 \pm 0.5)\%$ ,  $(32.0 \pm 0.6)\%$ ,  $(40.6 \pm 0.7)\%$  га тенг.



Узлуксиз эгри чизик (1) – ифодадаги 3та ҳаднинг, яъни «буғланиш» механизми (1-пунктир чизик), ферми-емирилиш механизми (2-пунктир чизик) ва протон-нишон ёки иккиламчи заррачалар уриб чиқариш механизмлари (3-пунктир чизик) йиғиндисидан иборат

**1-расм. 3.25 А ГэВ/с импульсли  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида кислород ядросининг тинч ҳолат санок системасидаги протонларнинг импульс бўйича инвариант структуравий функцияси тақсимоти**

2-жадвалда 3.25 А ГэВ/с импульсли  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида протонлар ҳосил бўлишининг нормировка қилинган инвариант дифференциал кесимининг импульс бўйича тақсимоти кислород ядросининг тинч ҳолат системасида ҳамда 300 ГэВ/с импульсли  $p^{20}\text{Ne}$ -тўқнашишларида ҳосил бўлувчи протонларнинг шу турдаги тақсимотига (1) – ифода орқали яқинлашиш натижасида параметрларнинг аниқланган қийматлари келтирилган. 2-жадвалдан кўришиб турибдики:

–  $b_1$  параметрнинг қиймати  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида  $p^{20}\text{Ne}$ -ўзаро таъсирларига нисбатан етарли даражада катта, бу параметрнинг физик маъноси импульс тақсимоти дисперсиясига тескари пропорционал бўлганлиги учун  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида импульс тақсимотининг (1) – ифодага тўғри келувчи қисми анча тор эканлигини билдиради. Икки хил тўқнашувлардаги

фарқ водородли ва неонли пуфакчали камераларда секин протонларни қайд қилиш аниқлиги билан боғлиқ;

–  $b_1$  параметрнинг қиймати орқа яримсферага учувчи протонлар учун олдиға учувчиларникиға нисбатан  $\approx 1.3$  марта катта.  $b_1$  параметрнинг топилган қийматининг ҳақиқатға яқинлиги (1) – ифодадаги биринчи ҳад қиймати импульснинг  $p \approx 25$  МэВ/с дан  $p \approx 250$  МэВ/с гача ўзгарганида (буғланувчи протонлар соҳаси) 4 даражаға камайишидан иборат;

–  $b_2$  параметрнинг қиймати олди яримсферага учувчи протонлар учун  $^{16}\text{Oр-}$  ва  $p^{20}\text{Ne-}$ тўқнашишларида хатоликлар чегарасида бир хилдир;

–  $b_3$  параметрнинг қиймати олди яримсферага учувчи протонлар учун  $^{16}\text{Oр-}$  ва  $p^{20}\text{Ne-}$ тўқнашишларида хатоликлар чегарасида бир хилдир.

4.2 ГэВ/с ли  $p^{12}\text{C-}$ таъсирлашувларда ҳосил бўлган олди сферага учувчи протонлар учун топилган  $b_2$  қиялик параметри қиймати  $^{16}\text{Oр-}$  ва  $p^{20}\text{Ne-}$ таъсирлашида олинган қийматлари билан хатоликлар чегарасида мос келади.

## 2-жадвал

### 3.25 А ГэВ/с импульсли $^{16}\text{Oр-}$ , 300 ГэВ/с импульсли $p^{20}\text{Ne}$

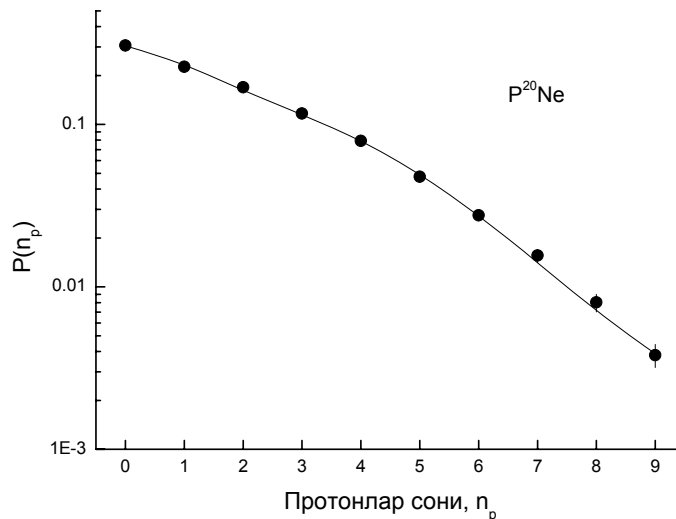
тўқнашувларида протонлар ҳосил бўлишининг нормировка қилинган инвариант дифференциал кесимининг импульс бўйича тақсимотиға (1) – ифода орқали яқинлашиш натижасида параметрларнинг аниқланган қийматлари

Пара- метрлар	Ўзаротаъсир тури				
	$^{16}\text{Oр}$			$p^{20}\text{Ne}$	
	Ҳамма протонлар	Олдиға учувчи	Орқаға учувчи	Ҳамма протонлар	Олдиға учувчи
$a_1$	94.46±3.47	45.29±2.17	49.45±2.88	50.11±2.44	20.53±1.63
$b_1$	126.1±3.8	111.9±4.1	149.7±8.4	56.66±2.61	49.19±4.29
$a_2$	4.55±0.30	1.80±0.13	3.22±0.46	4.21±0.42	1.93±0.43
$b_2$	14.57±0.91	9.83±0.99	24.34±3.91	10.39±0.92	10.19±2.41
$a_3$	0.84±0.07	0.56±0.09	0.54±0.24	0.65±0.11	0.77±0.15
$b_3$	3.71±0.12	3.28±0.19	8.78±1.23	3.12±0.18	3.30±0.19
$\chi^2/\text{э.д.с.}$	1.35	1.12	0.72	1.41	1.01

Шундай қилиб, тез протонлар, айниқса, олдинги сферага учувчиларининг ҳосил бўлиш механизмлари универсал характерға эға бўлиб, дастлабки энергия ва парчаланувчи енгил ядро типига боғлиқ эмас, деган хулоса чиқариш мумкин.

Биз илк бор феноменологик модель ёрдамида 40 ГэВ/с ли  $\pi^{-12}\text{C-}$  ва 300 ГэВ/с ли  $p^{20}\text{Ne-}$ таъсирлашувларида протонларнинг кўпламчилик бўйича тақсимотини (В.В. Глаголев, Қ. Олимов, С.Л. Лутпуллаев ва бошқа муаллифлар билан биргаликда) коникарли даражада тавсифладик. Ушбу

моделда протонлар ҳосил бўлишининг асосий механизмлари қуйидагилардан иборат: 1) – учиб келувчи зарра томонидан ядро ички нуклонларида кўп каррали сочилишлари натижасида протонларнинг тўғридан-тўғри уриб чиқарилиши; 2) – ядро ички тўқнашишларидан кейин ҳосил бўлган қўзғалган қолдиқ ядронинг емирилиши (ферми-емирилиш); 3) – дастлабки ядроларнинг периферик тўқнашишлардан кейин ёки қўзғалган қолдиқ ядронинг емирилишидан ҳосил бўлган кўпнуклонли парчаларнинг емирилиши, “буғланиш”.



**2-расм. 300 ГэВ/с импульсли  $p^{20}\text{Ne}$ -тўқнашувларида протонларнинг кўпламчилиги бўйича тақсимоти (●) ва феноменологик модель башорати (узлуксиз чизик)**

2-расмда мисол тариқасида 300 ГэВ/с импульсли  $p^{20}\text{Ne}$ -тўқнашувларида ҳосил бўлган протонларнинг кўпламчилиги бўйича тақсимоти келтирилган. Феноменологик модель бўйича ҳисоб узлуксиз эгри чизик билан кўрсатилган. 2-расмдан кўришиб турганидек, модель ушбу тақсимотни етарли даражада яхши тавсифлайди (7 та эркинлик даражаси учун  $\chi^2 = 3.8$  га тенг).

3-жадвалда 3.25 А ГэВ/с ли  $^{16}\text{O}p$ - ва 300 ГэВ/с ли  $p^{20}\text{Ne}$ - ҳамда 40 ГэВ/с ли  $\pi^-C$ -тўқнашувларида ҳосил бўлган протонлар (тажрибада секин ва тез протонлар «йўқотилиши»ни ҳисобга олган ҳолда) асосий механизмларининг улушлари бўйича ҳисоблаш натижалари келтирилган.

3-жадвалдан кўришиб турибдики,  $^{16}\text{O}p$ - ва  $p^{20}\text{Ne}$ -тўқнашувларида протонлар ҳосил бўлиш механизмларининг улушлари бирламчи энергияга ва парчаланувчи ядро массаларига боғлиқ эмас. Ушбу катталиклар учун  $\pi^-^{12}\text{C}$ -тўқнашувларида кузатилаётган фарқлар  $\pi^-N$ -ўзаро таъсир кўндаланг кесимининг  $pN$ -тўқнашувлари кўндаланг кесимидан кичиклигидан келиб чиққан дейиш мумкин.

**Юқори энергияли  $\pi^{-12}\text{C}$ -,  $^{16}\text{O}$ p- ва  $p^{20}\text{Ne}$ -тўқнашувларида  
протонлар ҳосил бўлиш механизмларининг улушлари**

Механизмлар	Ўзаро таъсир турлари		
	$\pi^{-12}\text{C}$	$p^{16}\text{O}$	$p^{20}\text{Ne}$
Буғланиш	$0.22 \pm 0.01$	$0.27 \pm 0.01$	$0.28 \pm 0.01$
Ферми-емирилиш	$0.43 \pm 0.02$	$0.32 \pm 0.01$	$0.31 \pm 0.01$
Уриб чиқариш	$0.35 \pm 0.02$	$0.41 \pm 0.02$	$0.41 \pm 0.02$

Хулоса қилиб айтганда, протонлар ҳосил бўлиш механизмларининг ҳиссалари энгил парчаланувчи ядронинг энергияси ва масса сонига боғлиқ эмас (пион ёки протон).

Диссертациянинг учинчи бобида 3.25 А ГэВ/с импульсли  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида дейтронлар, тритий ва гелий-3 ядролари ҳосил бўлиши ва уларнинг бошқа турдаги зарралар ва ядролар ҳосил бўлиши билан боғлиқлигига оид тажриба (В.В. Глаголев, Қ. Олимов, С.Л. Лутпуллаев, А. А. Йўлдошев, Б.С. Йўлдошев ва бошқа муаллифлар билан биргаликда олинган) маълумотлари келтирилган.

**Экспериментда ва КПБМ ҳисобларида энгил парчалар  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$  ва  $^3\text{He}$   
нинг ўртача кўпламчилиги  $\langle n_f \rangle$  ва ҳосил бўлишининг инклюзив  
кўндаланг кесими  $\sigma_{in}$  (мбн)**

Парчалар тури	$^1\text{H}$	$^2\text{H}$	$^3\text{H}$	$^3\text{He}$
$\langle n_f \rangle$ (экспер.)	$1.78 \pm 0.02$	$0.331 \pm 0.007$	$0.141 \pm 0.005$	$0.142 \pm 0.005$
$\langle n_f \rangle$ (КПБМ)	$1.75 \pm 0.01$	$0.249 \pm 0.003$	$0.108 \pm 0.001$	$0.152 \pm 0.002$
$\sigma_{in}$ (экспер)	$594.5 \pm 5.5$	$110.6 \pm 2.3$	$47.1 \pm 1.6$	$47.4 \pm 1.6$
$\sigma_{in}$ (КПБМ)	$584.5 \pm 2.2$	$83.2 \pm 1.2$	$36.1 \pm 0.7$	$50.8 \pm 0.8$

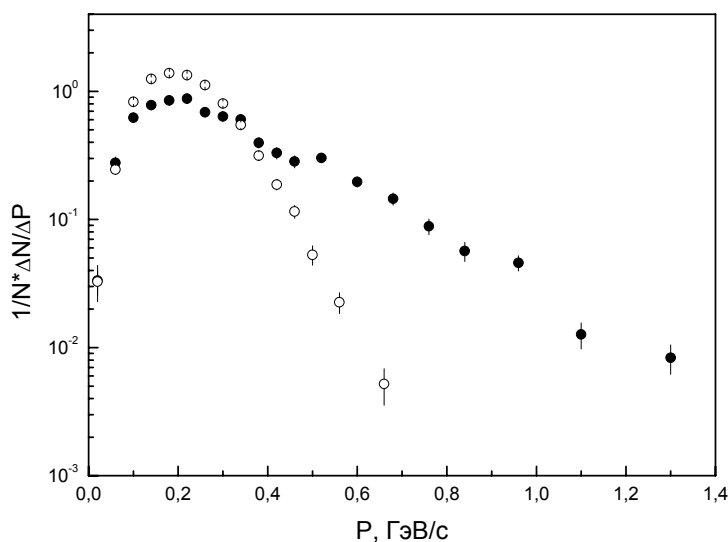
4-жадвалда масса сонлари  $A \leq 3$  бўлган энгил парчаларнинг экспериментал ўртача сони ва инклюзив кўндаланг кесимлари ҳамда каскадли парчалануш ва буғланиш моделининг (КПБМ) башорати келтирилган. Жадвалдан дейтронлар ҳосил бўлишининг инклюзив кўндаланг кесими протонлар ҳосил бўлиш кесимининг 20% ни ташкил қилиши, кўзгу ядролар  $^3\text{H}$  ва  $^3\text{He}$  ҳосил бўлиш кесимидан 2.4 марта кўплигини кўриш мумкин. КПБМ модели бўйича ҳисобланган  $^3\text{H}$  ва  $^3\text{He}$  ядроларининг ўртача кўпламчилиги тажриба қийматидан  $\approx 1.4$  марта кичик.

Шундай қилиб, КПБМ аксиоматикасида асос қилинган  $^2\text{H}$  ва  $^3\text{H}$  ядролари ҳосил бўлиш механизмлари, тажрибада олинган натижаларни тушунтириш учун етарли эмас.



Кислород ядроси тинч ҳолат системасида (3-расм) дейтронларнинг тўлиқ импульс бўйича экспериментда олинган тақсимотининг  $p = 0.40\text{--}0.55$  ГэВ/с импульс соҳасида КПБМ ҳисобларида мавжуд бўлмаган «елка» кузатилади.

Иккала тақсимотларни таққослашдан кўришиб турибдики, импульснинг  $0.10 < p < 0.35$  ГэВ/с соҳасида КПБМ бўйича дейтронлар кўп ҳосил бўлади,  $p > 0.4$  ГэВ/с да эса анча кам дейтронлар кузатилади. Бу фарқлар, моделда тез каскадли нуклонларнинг ўзаро бирикиш механизмини ҳисобга олмаслик билан боғлиқ бўлса керак.



Белгилар: ● – тажриба, ○ – КПБМ башорати

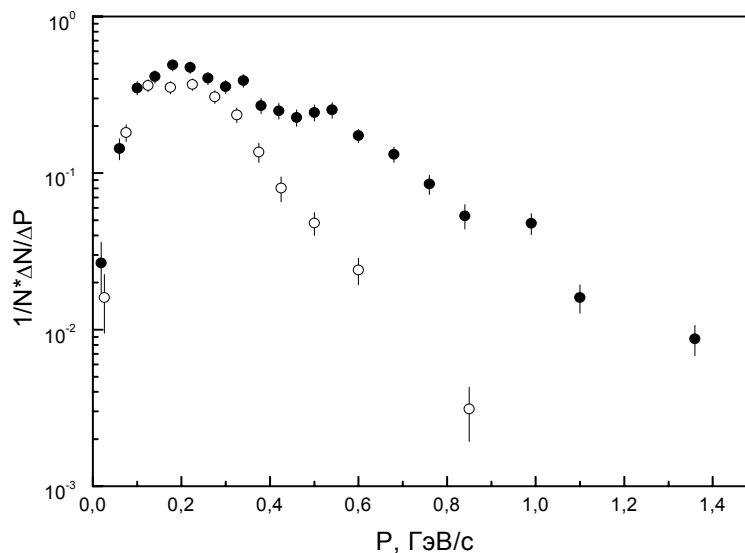
### 3-расм. Кислород ядроси тинч ҳолат санок системасида дейтронларнинг импульс бўйича тақсимоти

Дейтронлар импульс тақсимотининг  $p = 0.40\text{--}0.55$  ГэВ/с соҳасида «елка» ҳосил бўлиш сабабини аниқлаш мақсадида улар импульс тақсимотини кислород тинч ҳолат системасида орқага ва олдига учувчи дейтронлар учун алоҳида кўриб чиқилди (4-расм).

Кўришиб турибдики, (4-расм) орқага чиқувчи дейтронлар импульс тақсимоти силлиқ, унда ҳеч қандай монотонликдан четлашиш кузатилмайди. Олдига учувчи дейтронлар спектрида  $p = 0.40\text{--}0.55$  ГэВ/с да «елка» янада яққол кўзга ташланади ва тақсимотнинг ўзи анчагина «қаттиқ». Қолаверса, ўртача импульслари бир биридан фарқ қилувчи икки ёки уч механизмлардан ҳосил бўлган дейтронларнинг тақсимотлари бири-бири билан кўшилиб кетган. Балки бу эффект орқага ва олдига учувчи протонлар ҳосил бўлиш механизмларининг бир-биридан фарқланиши билан боғлиқдир. Орқага учувчи дейтронлар, асосан, «буғланиш» механизми ва ферми-емирилиш механизмлари орқали амалга ошади. Олдига учувчи дейтронлар ҳосил бўлишида юқорида кўрсатилган механизмлардан ташқари, нисбатан тез учувчи парчаларнинг емирилиши, каскадли нуклонларнинг бирикиш

механизми ҳамда дейтронларни квазиэластик уриб чиқариш механизмлари ҳам ҳисса бериши мумкин. Таъкидлаб ўтилган механизмлар тажрибада кузатилган «елка»нинг пайдо бўлишига олиб келса керак.

Дейтронларнинг бошқа парчалар билан биргаликда чиқишининг таҳлили (5-жадвал) шуни кўрсатадики, дейтронлар туғилган ҳодисаларда заряди  $Z \leq 4$  парчаларнинг ўртача сони дейтронлар ҳосил бўлмаган воқеаларга нисбатан катта (заряди  $Z \geq 5$  парчалар учун кичкина) бўлар экан.



● – олдига учувчи дейтронлар учун; ○ – орқага учувчи дейтронлар учун

**4-расм. Кислород ядросининг тинч ҳолат санок системасида дейтронларнинг тўлиқ импульс бўйича тақсимооти**

**5-жадвал**

**Дейтрони бор ва дейтрони йўқ ҳодисаларда парчаларнинг ўртача кўпламчилиги**

$n_d$	Парча заряди						
	1	2	3	4	5	6	7
0	1.37±0.03	0.56±0.01	0.063±0.003	0.035±0.002	0.076±0.003	0.216±0.005	0.247±0.006
≥1	2.47±0.04	1.06±0.02	0.12±0.01	0.054±0.005	0.067±0.006	0.126±0.008	0.022±0.003

Ушбу боғланишни орқага ва олдига учувчи дейтронлар учун алоҳида таҳлил қилиш шуни кўрсатадики, бундай боғланишлар дейтронлар ҳосил бўлиш механизмига боғлиқ эмас.

Дисертациянинг **тўртинчи бобида** 3.25 А ГэВ/с импульсли  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида гелий-4 ядролари ҳосил бўлиш механизмларини (В.В. Глаголев, Қ. Олимов, С.Л. Лутпуллаев, А. А. Йўлдошев, Б.С. Йўлдошев, В.В. Луговой ва бошқа муаллифлар билан биргаликда) тадқиқ қилиш натижалари келтирилган. Бунда, асосан, нотурғун ядролар  $^8\text{Be}$ ,  $^9\text{B}$  ва уйғотилган  $^{12}\text{C}^*$

ядросининг  $\alpha$ -заррачалар ҳосил бўлишига қўшган ҳиссаларини топишга муҳим аҳамият берилган. Шунингдек,  $\alpha$ -заррачалар инклюзив кўндаланг кесимларининг ва бошқа кинематик характеристикаларининг кислород ядролари емирилишининг топологик каналларига боғлиқлиги ўрганилган. Тажриба натижалари КПБМ башоратлари билан таққослаб ўрганилган. Бундан ташқари, олинган натижалар Гольдхабернинг статистик модели ҳамда нуклонларнинг бирикиши моделларининг башоратлари билан таққосланади.

$\alpha$ -заррачалар ҳосил бўлиши механизмларининг ҳиссаларини аниқлаш учун кинетик энергиялар бўйича инвариант структуравий функцияси  $f(T) = Ed^3\sigma / dp^3$  тажриба натижаларини КПБМ башоратлари, ва нуклонлар бирикиши модели башорати билан ҳам таққосладик.

КПБМ башорати  $T < 15$  МэВ соҳада тажриба натижаларини статистик хатоликлар чегарасида қониқарли тавсифлайди. КПБМ енгил парчалар ҳосил бўлишида буғланиш механизми ҳиссасини етарли даражада тавсифлай олмайди, лекин биз ўрганган ҳолда кузатилган етарлича мослик  $\alpha$ -заррачалар ҳосил бўлишида, буғланиш механизми ҳиссасининг жуда камлиги, ёки деярли бутунлай йўқлигини билдиради.

$T > 15$  МэВ соҳада кинетик энергия ошиши билан тажриба ва КПБМ башоратлари орасидаги фарқ кескинлаша боради. Назарий тақсимот  $T \leq 100$  МэВда тугайди, тажрибавий тақсимот эса  $T \approx 200$  МэВга қадар давом этади. Бунақа катта фарқ КПБМда ядронинг  $\alpha$ -кластерли хусусиятини, ҳамда каскадли нуклонлар бирикиши механизмини ҳисобга олмаслик билан боғлиқ.

Кинетик энергиянинг  $T \geq 100$  МэВ соҳасида  $\alpha$ -заррачалар спектрини протонлар спектри асосида бирикиш модели билан тавсифладик. Бирикиш механизмининг  $\alpha$ -заррачалар ҳосил бўлиш инклюзив кўндаланг кесимидаги ҳиссаси  $1.4 \pm 0.3$  % га тенг.

$\alpha$ -заррачаларнинг кўндаланг импульс бўйича тажрибавий ва КПБМ башорати солиштирилганда кўндаланг импульсларнинг иккала тақсимотлардаги қийматлари бир-бирига мос келсада, спектр кўриниши анчагина фарқлидир.

«Секин»  $\alpha$ -заррачалар ( $T < 10$  МэВ) бурчак тақсимотига тўхталиб ўтамыз. Маълумки, парчаланишнинг статистик назариясига асосан, секин заррачаларнинг бурчак тақсимоти изотроп бўлиши керак. Кинетик энергиялари  $T < 10$  МэВ/нуклон бўлган енгил зарралар ( $p$ ,  $d$ ,  $t$  ва  ${}^3\text{He}$ ) чиқишини ўрганган пайтда тажриба натижалари статистик назария бўйича кутилган натижадан четлашиши кузатилди. Бу натижа парчаланувчи ядронинг бурчак моментига эга бўлиши орқали тушунтирилган эди.

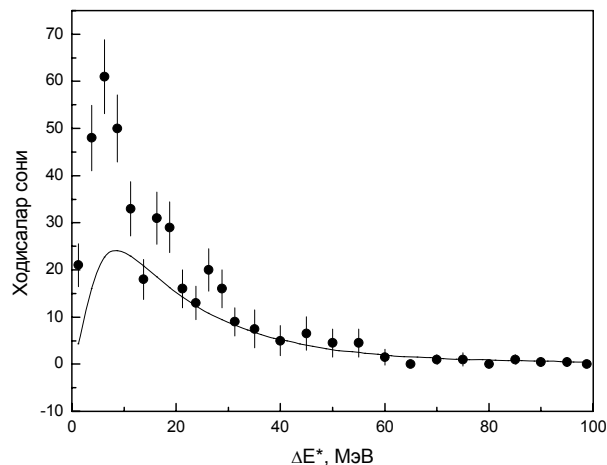
Шундай қилиб,  $3.25$  А ГэВ/с импульсли  ${}^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида  $\alpha$ -заррачаларнинг ҳар хил кинематик характеристикаларини ўрганиш қуйидаги натижаларга олиб келади. Кутилганидек,  $\alpha$ -заррачаларнинг асосий қисми ферми-емирилиш (статистик механизм) орқали ҳосил бўлади. Бунда «буғланиш» механизмининг ҳиссаси сезилмайди. Бирикиш механизмининг

ҳиссаси кинетик энергия ва кўндаланг импульснинг катта қийматида намоён бўлади.

3.25 ГэВ/с ли  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида 3 ва 4 та  $\alpha$ -заррача ҳосил бўлиш каналларида  $\alpha$ -зарраларга емирилувчи кўп нуклонли тизимларнинг оралик ҳолатлари ўрганилди, хусусан,  $^8\text{Be} \rightarrow \alpha + \alpha$  ва  $^9\text{B} \rightarrow \alpha + \alpha + p$  емирилишлар.

$\alpha$ -заррачалар ҳосил бўлишининг бошқа манбаларидан бири нотурғун  $^5\text{He}$  ва  $^5\text{Li}$  ядроларидир. Нотурғун литий-5 ядролари ҳосил бўлишининг инклюзив кўндаланг кесими  $\sigma(^5\text{Li}) = 8.4 \pm 0.5$  мбарнга тенг, бу эса бошқа турғун изотоплар кўндаланг кесимидан катта фарқ қилмайди.

Учта  $\alpha$ -заррачалар инвариант массаларини (5-расм) таҳлил қилиш асосида импульс ва энергиянинг сақланиш қонунларини ҳисобга олувчи фазовий изотропияга асосланувчи феноменологик моделдан фойдаланиб, уйғотилган  $^{12}\text{C}^*$  ядроларининг 3та  $\alpha$ -заррача ҳосил бўлувчи каналга ҳиссасини аниқладик. Бу ҳисса учта  $\alpha$ -зарралар ҳосил бўлувчи канал кўндаланг кесимининг  $(38 \pm 3)\%$  тенг чиқди. Каналнинг қолган қисми ферми-емирилиш ва протон нишон томонидан учта  $\alpha$ -заррачага эга бўлган қолдиқ-ядродан битта  $\alpha$ -кластерни квазиэластик уриб чиқариш натижасида амалга ошади.

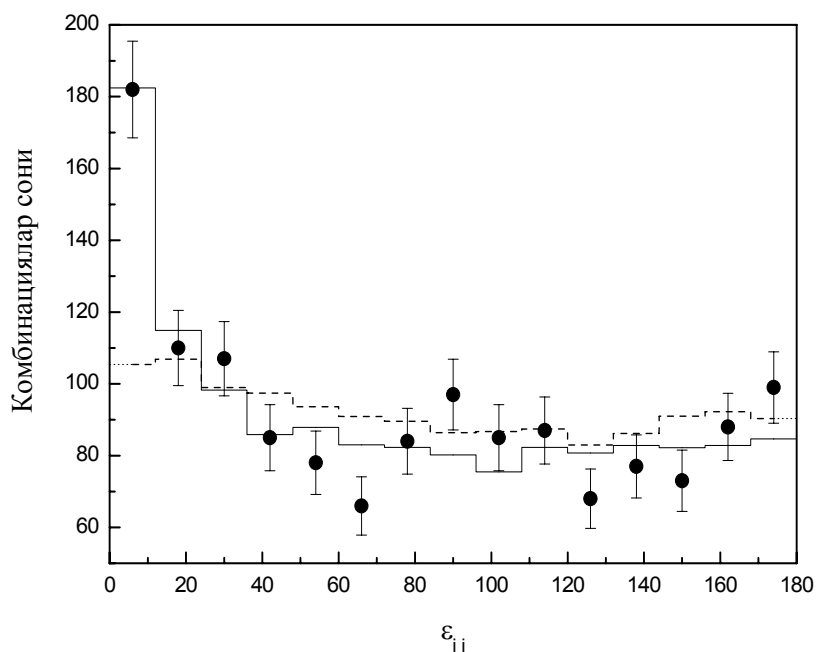


**5-расм. Ҳодисаларнинг кўзғалиш энергияси бўйича  $\Delta E^*$  тақсимоги**

3.25 ГэВ/с ли  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида 3 ва 4 та  $\alpha$ -заррача ҳосил бўлиш каналлари таҳлил килинганда унча катта бўлмаган азимутал асимметрия ва коллинеарлик аниқланди.  $\alpha$ -заррачалар жуфтлиги импульс векторлари коллинеарлиги кузатилишига сабаб нотурғун ядро  $^8\text{Be}$  нинг  $^8\text{Be} \rightarrow \alpha + \alpha$  канал бўйича 0.1 ва 3.04 МэВ энергия чиқиши билан борадиган асосий ва биринчи кўзгалган ҳолатлардаги емирилиши бўлиши мумкин. Ушбу фаразнинг тўғрилигини изотроп фаза соҳали феноменологик модели ёрдамида қуйидаги нотурғун ядролар ҳосил бўлиши ва емирилишини ҳисобга олган ҳолдаги  $^8\text{Be} \rightarrow \alpha + \alpha$  ва  $^9\text{B} \rightarrow \alpha + \alpha + p$  реакцияларда текшириб кўрдик.

6-расмда  $i$ - ва  $j$ -  $\alpha$ -заррачаларнинг  $(\epsilon_{ij})$  – жуфт азимутал бурчак бўйича тақсимоги келтирилган. Шу ернинг ўзида  $^8\text{Be}$  ва  $^9\text{B}$  нотурғун ядролари ҳосил бўлиши ва емирилишини ҳисобга олувчи ривожлантирилган феноменологик

изотроп фаза соҳали модели бўйича Монте-Карло ҳисоблари натижалари ҳам келтирилган.



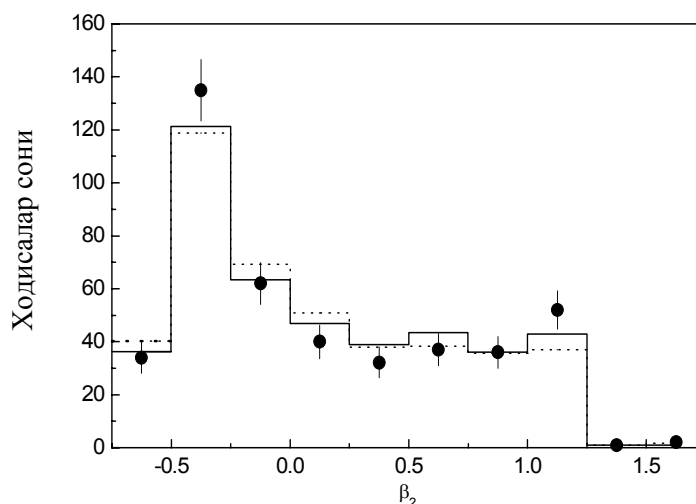
**6-расм.  $i$ - ва  $j$ -зарраларнинг ( $\epsilon_{ij}$ ) жуфт азимутал бурчаклар бўйича тақсимоти**

$^8\text{Be}$  ва  $^9\text{B}$  нотурғун ядролари ҳосил бўлиши ва емирилишини ҳисобга олинганда экспериментал ва модел ҳисобларида яхши мослик кузатилади. Энг яхши мосликка  $^8\text{Be}$  ядролари ҳосил бўлишининг эҳтимолликлари  $W(0.1)=15.4\%$  ва  $W(3.04)=6.6\%$  бўлганда,  $^9\text{B}$  ядролар ҳосил бўлишининг эҳтимоллиги  $W(0.3)=19\%$  бўлганда эришилди (қавс ичида емирилиш пайтида ажралиб чиқадиған энергиянинг қиймати МэВ ларда берилган).

7-расмда  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида охири ҳолатда 3 ва 4 та  $\alpha$ -зарра ҳосил бўлиш билан борувчи ҳар бир  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувлари учун ( $\beta_2$ ) азимутал коллинеарлик параметри бўйича тақсимот келтирилган. Шу ернинг ўзида  $^8\text{Be}$  ва  $^9\text{B}$  ностабил ядролари ҳосил бўлиши ва бўлмаслигини эътиборга олувчи ривожлантирилган феноменологик изотроп фаза соҳали модели бўйича ҳисоб натижалари ҳам келтирилган.  $^8\text{Be}$  ва  $^9\text{B}$  нотурғун ядролари ҳосил бўлишини эътиборга олувчи модел ҳисоблари тажриба спектрини қониқарли тавсифлайди ( $\chi^2=3.88$  10 та эркинлик даражасида, 95% ишонч эҳтимоллигида).

Шу билан бирга, коллинеарлик параметри қийматлари ҳам мос келади  $\langle\beta_2\rangle_{\text{эксп}}=0.13 \pm 0.03$ ;  $\langle\beta_2\rangle_{\text{расч}}=0.13 \pm 0.02$ . Юқоридаги нотурғун ядролар ҳосил бўлишини эътиборга олмаган модел ҳисобларида  $\beta_2$  нинг қиймати нолга тенг ( $\langle\beta_2\rangle_{\text{расч}}=0.004 \pm 0.024$  ва  $\chi^2=21.56$  10 та эркинлик даражасида, ишонч эҳтимоллиги 2% дан кам).

Хулоса қилиб айтганда, 3 ва 4 та  $\alpha$ -зарра ҳосил бўлиш билан содир бўлувчи каналлардаги тажриба натижаларида кузатиладиган азимутал коллинеарлик оралиқ нотурғун ядролар  $^8\text{Be}$  ва  $^9\text{B}$  ҳосил бўлиши ва емирилиши билан боғлиқ экан.



Нотурғун  $^8\text{Be}$  и  $^9\text{Be}$  ядролари ҳосил бўлишини этиборга олувчи (узлуксиз гистограмма) ва этиборга олмовчи (штрихли гистограмма) Монте-Карло модели ҳисоблари

### 7-расм. Индивидуал $^{16}\text{O}$ -тўқнашишларида $\beta_2$ -тақсимоги

б-жадвал

3.25 А ГэВ/с импульсли  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида турғун ва нотурғун изотопларнинг ҳосил бўлиш кўндаланг кесимлари, мбарнларда.

A	$\sigma \pm \Delta\sigma$	Z	A	$\sigma \pm \Delta\sigma$	
1	$^1\text{H}_1$	$509.0 \pm 5.7$	5	$^9\text{B}_5^*$	$5.70 \pm 0.29$
	$^2\text{H}_1$	$116.9 \pm 1.3$		$^{10}\text{B}_5$	$10.6 \pm 0.4$
	$^3\text{H}_1$	$41.8 \pm 0.4$		$^{11}\text{B}_5$	$10.9 \pm 0.4$
2	$^3\text{He}_2$	$40.7 \pm 1.9$	6	$^{12}\text{B}_5$	$0.51 \pm 0.42$
	$^4\text{He}_2$	$164.0 \pm 1.9$		$^{10}\text{C}_6$	$1.77 \pm 0.8$
	$^5\text{He}_2^*$	$8.40 \pm 0.50$		$^{11}\text{C}_6$	$9.18 \pm 0.76$
	$^6\text{He}_2$	$1.03 \pm 0.23$		$^{12}\text{C}_6$	$26.3 \pm 0.8$
3	$^5\text{Li}_3^*$	$8.40 \pm 0.50$	7	$^{12}\text{C}_6^*$	$9.80 \pm 0.80$
	$^6\text{Li}_3$	$19.0 \pm 0.8$		$^{13}\text{C}_6$	$9.48 \pm 0.76$
	$^7\text{Li}_3$	$10.6 \pm 0.8$		$^{14}\text{C}_6$	$3.68 \pm 0.76$
	$^8\text{Li}_3$	$4.80 \pm 0.76$		$^{13}\text{N}_7$	$9.40 \pm 0.79$
4	$^7\text{Be}_4$	$10.3 \pm 0.5$	8	$^{14}\text{N}_7$	$26.1 \pm 0.8$
	$^8\text{Be}_4^*$	$7.63 \pm 0.37$		$^{15}\text{N}_7$	$30.3 \pm 0.8$
	$^9\text{Be}_4$	$6.15 \pm 0.52$		$^{14}\text{O}_8$	$2.85 \pm 0.70$
	$^{10}\text{Be}_4$	$0.89 \pm 0.52$		$^{15}\text{O}_8$	$31.1 \pm 0.7$
				$^{16}\text{O}_8$	$13.0 \pm 0.7$

\*<sup>1</sup> Нотурғун ёки уйғотилган ҳолатлар

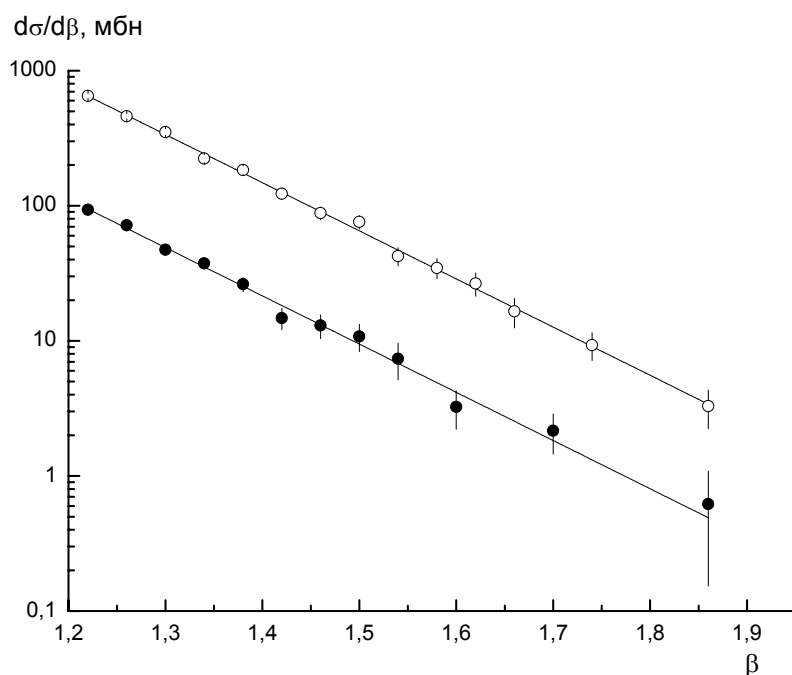
Турғун парчалар импульс тақсимога ( $\chi=1/p$ ) Гаусс функциялари билан яқинлашиш ёрдамида ҳамда нотурғун ядроларнинг  $\alpha$ -заррачалар ҳосил бўлишидаги ҳиссаларини ҳисоблашда қўлланилган усуллардан фойдаланиб 3.25 А ГэВ/с импульсли  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида илк бор заряди 1 дан 8 гача бўлган турғун ва нотурғун изотопларнинг ҳосил бўлиш кўндаланг кесимлари топилди (б-жадвал).

б-жадвалдан кўриниб турганидек, кўпзарядли парчалар орасида  $\alpha$ -зарралар ҳосил бўлишининг инклюзив кўндаланг кесими энг катта, шу билан

бирга, масса сони асосий масса сони ( $A=2Z$ ) дан 1 тага фарқ қилувчи барча «кўзгу» ядроларнинг ҳосил бўлиш кўндаланг кесимлари статистик хатоликлар чегарасида бир-бирига тенг.

Диссертациянинг **бешинчи бобида** 3.25 А ГэВ/с ли  $^{16}\text{O}p$ -, 40 ГэВ/с ли  $\pi^-C$ -, 4.2 ва 9.9 ГэВ/с ли  $pC$ -, 4.2 А ГэВ/с ли  $^4\text{He}C$ - ва  $CC$ - ҳамда 300 ГэВ/с ли  $p\text{Ne}$ -тўқнашувларида кумулятив протонлар ҳосил бўлишини илк бор тизимли (Қ. Олимов, С.Л. Лутпуллаев, В.И. Петров, Р.Н. Бекмирзаев, Б.С. Йўлдошев ва бошқа муаллифлар билан биргаликда) тадқиқ қилиш ҳамда кумулятив жараёнларни тавсифлашга бағишланган ёндашишларнинг таҳлил натижалари келтирилган.

8-расмда 40 ГэВ/с ли  $\pi^-C$ - ва 4.2 А ГэВ/с ли  $CC$ -тўқнашувларида кумулятив протонлар инклюзив кўндаланг кесимларининг кумулятив сони  $\beta$  бўйича тақсимоти  $\beta > 1.2$  соҳалар учун кўрсатилган.



Узлуксиз тўғри чизиклар – тажрибага (2) ифода билан яқинлашиш натижалари

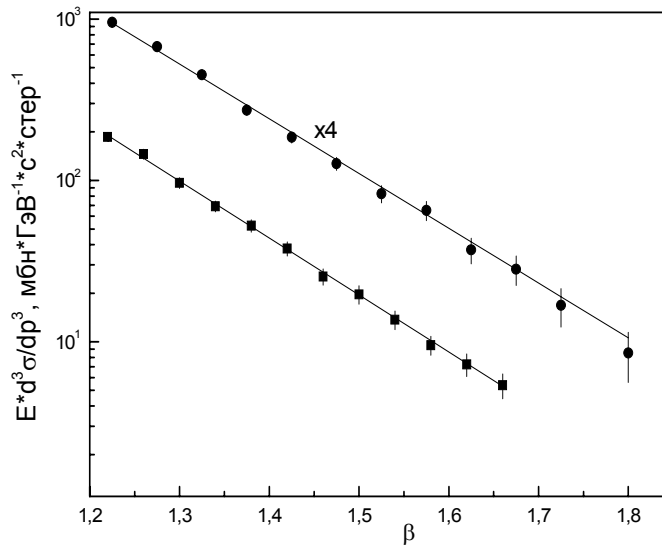
**8-расм. 40 ГэВ/с ли  $\pi^-C$ (●)- ва 4.2 А ГэВ/с ли  $CC$ (○)-ўзаро таъсирларида кумулятив протонлар инклюзив кўндаланг кесимларининг кумулятивлик сони  $\beta$  бўйича тақсимоти**

9- расмда – 300 ГэВ/с ли  $p^{20}\text{Ne}$ (●)- ва 3.25 А ГэВ/с ли  $^{16}\text{O}p$  (■)- тўқнашувлари учун кумулятив протонлар инвариант структуравий функциясининг кумулятивлик сони  $\beta$  бўйича тақсимотлари келтирилган. Тўғри узлуксиз чизиклар орқали тажрибавий тақсимотларга куйидаги

$$f(\beta) = a \exp(-b\beta) \quad (2)$$

ифода билан яқинлашиш натижалари кўрсатилган.

Кумулятив протонларнинг кумулятивлик сони  $\beta$  бўйича барча тақсимотларга (2) ифода билан яқинлашиш натижалари 6-жадвалда келтирилган.



Тўғри чизиқлар тажрибага (2)-ифода билан яқинлашиш натижалари

**9-расм. 300 ГэВ/с ли  $p^{20}\text{Ne}(\bullet)$ - ва 3.25 А ГэВ/с ли  $^{16}\text{O}p(\blacksquare)$ - тўқнашувларида кумулятив протонлар инвариант кўндаланг кесимларининг кумулятивлик сони бўйича тақсимои**

7-жадвал

**2-ифода билан яқинлашиш бўйича қиялик параметрлари, тўқнашув турлари ва ходисалар сони**

Ўзаротаъсир тури, $P_0(\text{ГэВ/с})$	Ходисалар сони	Қиялик параметри, $b$	$\chi^2/\text{э.д.с.}$
$\pi^-C, 40.0$	16657	$8.18 \pm 0.26$	1.1
$pC, 4.2$	6901	$8.09 \pm 0.49$	1.0
$pC, 9.9$	18325	$8.10 \pm 0.25$	0.9
$^4\text{He}C, 4.2 A$	12326	$8.00 \pm 0.28$	1.2
$CC, 4.2 A$	20530	$8.14 \pm 0.20$	0.4
$^{16}\text{O}p, 3.25 A$	12367	$8.13 \pm 0.21$	0.4
$p^{20}\text{Ne}, 300$	4990	$7.99 \pm 0.18$	0.8

7-жадвалдан кўришиб турибдики, қиялик параметрларининг қийматлари қаралаётган барча турдаги ўзаро таъсирлар ва бирламчи энергиялар учун статистик хатоликлар чегарасида бир-бирига тенг ва ҳамма ансамбллар бўйича унинг ўртача қиймати  $8.1 \pm 0.1$  ни ташкил қилади.



Шуни таъкидлаш керакки, кумулятив протонларнинг нафақат инвариант структуравий функцияларининг  $\beta$  га боғлиқлиги, ҳатто улар инклюзив кўндаланг кесимларининг ҳам кумулятивлик сонига боғлиқлиги экспоненциал қонуниятга бўйсунар экан.

Айтиш мумкинки, кумулятив протонларнинг ҳосил бўлиш механизми бирламчи зарра турига ҳамда энергияга боғлиқ эмас.

Кумулятив протонларнинг  $^{16}\text{O}p$ - ва  $p^{20}\text{Ne}$ -тўқнашувларидаги ўртача кўпламчилиги мос равишда  $1.11 \pm 0.02$  ва  $1.16 \pm 0.03$ ларга тенгдир,  $\pi^-$ - мезонлар, протонлар,  $\alpha$ -заррачалар ва углерод ядроларининг углерод ядролари билан ўзаро таъсирларида бу катталиқ  $1.05 \pm 0.01$ ни ташкил қилади. 4.2 А ГэВ/с импульсли СТа-ўзаро таъсирларини дастлабки таҳлилида кумулятив протонларнинг кумулятив ҳодисалардаги ўртача сони  $1.79 \pm 0.06$  га тенг чиқди. Демак, кумулятив протонларнинг ўртача сони парчаланувчи ядро масса сони ўсиши билан секин ортиб боради.

Кумулятив протонлар ўртача кўпламчилигининг парчаланувчи ядро масса сонига боғлиқлигини ўрганиш учун унга куйидаги ифода  $\langle n_{\text{cum}} \rangle = a + A^\alpha$  билан яқинлашилди. Бу ерда  $A$  – парчаланувчи ядро масса сони,  $a$  – ва  $\alpha$  – яқинлашиш параметрлари. Яқинлашиш натижасида 99 фоизли эҳтимолликда параметрларнинг қийматлари куйидагиларга  $a = -0.41 \pm 0.01$  ва  $\alpha = 0.15 \pm 0.01$  тенг чиқди. Тажриба натижаларига  $\langle n_{\text{cum}} \rangle = a + Z^\alpha$  ифода билан (бу ерда  $Z$  – ядро заряди) яқинлашганда эса 99 фоиздан кўпроқ эҳтимол билан параметрлар қийматлари  $a = -0.32 \pm 0.01$  ва  $\alpha = 0.17 \pm 0.01$  ларга тенг.

Шуниси қизиқки, ҳар иккала яқинлашишда ҳам даража кўрсаткичлари статистик хатоликлар чегараларида бир-бирига тенг ва  $1/6$  га жуда яқиндир. Бу эса протонлар сонининг масса сонига боғланиш кўрсаткичи  $1/3$  дан сезиларли фарқ қилишини кўрсатади. Кумулятив протонларнинг ҳосил бўлиши ядро зичлиги флуктуациясига боғлиқ бўлганлиги ва, ўз навбатида, флуктуация ўртача кўпламчилик флуктуациясига пропорционал бўлганлиги учун учиб келувчи ядро билан таъсирлашувчи парчаланувчи ядро трубкаси ўлчами  $\sim A^{1/3}$ , флуктуациялар сони  $\langle n \rangle^{1/2}$  га пропорционал бўлганда кумулятив протонлар сони  $\sim A^{1/6}$  га пропорционаллиги келиб чиқади. Мазкур вазиятда  $A$ -боғланиш характери кумулятив протонларнинг «совук» модель сценарийсига, яъни флуктонлар мавжуд деб ҳисобланадиган модель асосида ҳосил бўлишини кўрсатади. Юқоридаги ҳолатни тасдиқловчи фактлардан бири кумулятив ҳодисалар ҳиссасининг учиб келувчи зарра ёки ядролар масса сонига боғлиқ эмаслигидир. Кумулятив ҳодисалар ҳиссаларининг сон қийматлари 8-жадвалда келтирилган.

8-жадвалдан кўриш мумкинки, берилган парчаланувчи ядро учун кумулятив ҳодисалар улуши, нишон ядро масса сони бир хил бўлганда бирламчи зарра ёки ядро масса сонига (протон ёки барионлар тизими) боғлиқ эмас. Бу ҳолат кумулятив протонларнинг вужудга келиши бирламчи зарра турига (пион ёки протон) сезгирлигини кўрсатади.

**Кумулятив протонли ҳодисалар улушларининг бирламчи зарра турига боғлиқлиги**

Ўзаро таъсир тури, $P_0$ , ГэВ/ $c$	Ҳодисаларнинг тўлиқ сони	Кумулятив протонли ҳодисалар сони	Кумулятив протонли ҳодисалар улушлари, %
$\pi^{-12}\text{C}$ , 40.0	16657	1097	$6.6 \pm 0.2$
$p^{12}\text{C}$ , 4.2	6901	699	$10.1 \pm 0.4$
$p^{12}\text{C}$ , 9.9	18325	1825	$10.0 \pm 0.2$
${}^4\text{He}^{12}\text{C}$ , 4.2 A	12326	1211	$9.8 \pm 0.3$
${}^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ , 4.2 A	20530	2070	$10.1 \pm 0.2$
${}^{16}\text{O}p$ , 3.25 A	12367	1496	$12.1 \pm 0.4$
$p^{20}\text{Ne}$ , 300	4990	728	$14.6 \pm 0.6$
CTa, 4.2	2440	1013	$41.5 \pm 1.5$

Биринчи ҳолатдан фойдаланиб,  $p^{12}\text{C}$ -,  $\alpha^{12}\text{C}$ - ва  ${}^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ -тўқнашувлари бўйича кумулятив ҳодисаларнинг ўртача улушини топишимиз мумкин. Бу катталиқ  $10.0 \pm 0.1\%$  га тенг. Кумулятив протонли ҳодисалар улушининг бирламчи барионлар тизимига боғлиқ бўлмаслиги бирламчи зарраларнинг флуктонлар билан бир қаррали тўқнашувларининг устувор эканлигини кўрсатади. Флуктонлар сони эса берилган парчаланувчи ядро учун «совук» модель башорати бўйича ўзгармас катталиқка эга. Флуктон ва зарралар тўқнашувларида зарранинг тури, яъни кваркли таркиби муҳим аҳамиятга эга. Бу жиҳатдан барионли тизимлар ва пионлар тўқнашувларида ҳосил бўлган кумулятив ҳодисалар улушларининг нисбати диққатга сазовордир. Мазкур катталиқ  $0.66 \pm 0.02$  га тенг, бу эса статистик хатоликлар чегараларида 2/3га тенгдир, яъни пиондаги валент кварклар сони (2)нинг протондаги валент кварклар сони(3)га нисбатига айнан тенгдир. Демак, кумулятив протонларнинг ҳосил бўлиши кварк-партон даражаларида амалга ошар экан.

Хулоса қилиб айтганда, кумулятив протонлар ҳосил бўлишининг инвариант-инклюзив кўндаланг кесимларининг кумулятивлик сони  $\beta$  га боғлиқлиги универсал характерга эга бўлиб, бирламчи зарра турига, парчаланувчи ядро масса сонига ва бирламчи энергияга боғлиқ эмас. Кумулятив зарралар ҳосил бўлиши билан бошқа зарралар кўпламчилиги орасидаги боғланишларнинг таҳлили шуни кўрсатдики, улар орасида боғланиш мавжуд бўлиб, у кумулятив протонларнинг кумулятивлик даражасига боғлиқ эмас экан. Бошқача айтганда, мазкур иккала жараёнларнинг механизмлари орасида ҳеч қандай боғланиш мавжуд эмас.

**Иловаларда** кислород ядросининг 3 ва 4 та  $\alpha$ -зарраларга емирилиш каналларини изотропик фазовий соҳали модель бўйича ҳисоблаш алгоритми

келтирилган. Шунингдек уйғотилган  $^{12}\text{C}$  ядросининг 3 та  $\alpha$ -зарра ҳосил бўлувчи каналдаги улушини ҳисоблаш алгоритми келтирилган.

## ХУЛОСА

1. Илк бор 4 $\pi$ -геометрия шароитида 3.25 А ГэВ/с импульсли  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида протонлар ҳосил бўлиши тизимли таҳлил қилинди ва қуйидаги қонуниятлар топилди:

- кислород ядросининг тинч ҳолат саноқ системасидаги импульси  $p > 0.25$  ГэВ/с («буғланиш» протонларидан ташқари) тез протонлар, хусусан, олдига чиқувчилари импульс тақсимотининг шакли ядронинг уйғониш даражасига боғлиқ эмас;

- кислород ядросининг тинч ҳолат саноқ системасидаги орқага учувчи протонлар импульс тақсимотининг шакли ядронинг уйғониш даражасига жуда кучли боғланган;

- протонлар кинетик энергияси тақсимотининг  $T=70-90$  МэВ соҳасида структура кузатилиб, унинг икки нуклонли тизимларнинг секин пионларни ютиш оқибатида емирилишидан келиб чиқиши кўрсатилди;

- протонлар ҳосил бўлишининг асосий механизмлари – «буғланиш», қолдиқ ядронинг ферми-емирилиш ва каскадли жараёнда протонларни тўғридан-тўғри уриб чиқариш механизмларининг улушлари мос равишда  $27.4 \pm 0.5\%$ ,  $32.0 \pm 0.6\%$  ва  $40.6 \pm 0.7\%$  эканлиги топилди.

2. Илк бор 4 $\pi$ -геометрия шароитида 40 ГэВ/с даги  $\pi^-$ С-, 300 ГэВ/с даги  $p^{20}\text{Ne}$ - ва 3.25 А ГэВ/с даги  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида протонларнинг нормировка қилинган инвариант инклюзив дифференциал кесимлари таҳлили асосида импульси  $p > 0.25$  ГэВ/с тез протонларнинг, хусусан, олдига чиқувчиларининг туғилиш механизмлари универсал хусусиятга эгаллиги: бирламчи энергияга, бирламчи зарранинг ва парчаланувчи енгил ядронинг турига ҳамда ядронинг уйғониш даражасига боғлиқ эмаслиги кўрсатилди.

3. Илк бор 40 ГэВ/с импульсли  $\pi^-$ С-, 300 ГэВ/с импульсли  $p^{20}\text{Ne}$ - ва 3.25 А ГэВ/с импульсли  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида ҳосил бўлувчи протонларнинг кўпламчилик бўйича тақсимотлари аналитик тавсифланди. Протонлар ҳосил бўлишининг асосий механизмлари (буғланиш механизми, уйғотилган қолдиқ-ядронинг ферми-емирилиш механизми ва каскад жараёнида протонларнинг тўғридан-тўғри уриб чиқариш механизми) нинг статистик улушлари аниқланди ва улар мос равишда  $27 \pm 1\%$ ,  $32 \pm 1\%$  ва  $41 \pm 1\%$  га тенглиги аниқланди. Ушбу улушлар парчаланувчи енгил ядронинг энергияси ва масса сонига боғлиқ эмаслиги ва уларнинг бирламчи зарралар (пион ёки протон) тури, яъни улардаги валент кварклар сони билан уйғунлиги кўрсатилди. Таъкидлаб ўтиш лозимки, бу улушлар 3.25 А ГэВ/с импульсли  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида ҳосил бўлувчи протонларнинг нормировка қилинган инвариант-инклюзив дифференциал кесимлари таҳлили асосида аниқланган қийматларига тенг.

4. Кислород ядросининг тинч ҳолат санок системасида дейтронлар импульс тақсимотининг  $0.40 < p < 0.55$  ГэВ/с соҳасида илк бор «елка» кузатилиб, унинг нисбатан тез парчаларнинг емирилиши, каскадли нуклонларнинг бирикиш механизми ва дейтронларни протон-нишон томонидан кислород ядросидан бевосита уриб чиқарилиши туфайли ҳосил бўлиши мумкинлиги тўғрисида хулоса қилинди. Парчалар ўртача кўпламчилиги ҳодисада дейтрон мавжуд бўлиши билан корреляцияга эга, лекин дейтрон ҳосил бўлиш механизмига боғлиқ эмас. Бирикиш (коалесценция) модели тез дейтрон ва  $\alpha$ -зарралар импульс спектрини муваффақиятли тавсифлайди.

5. 3.25 А ГэВ/с ли  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида кислород ядроси парчаланишининг тажрибадан олинган натижалари КПБМ натижалари билан тизимли тарзда солиштирилди. КПБМ башоратини яхшилаш бўйича унинг аксиоматикасига ва параметрларига киритиладиган асосий чеклашлар аниқланди. Енгил парчалар ҳосил бўлиши тўғрисидаги реал кўринишни тавсифлаш учун моделда, «буғланиш» механизмини (ҳатто енгил  $^{16}\text{O}$  ядроси учун ҳам) каскадли нуклонлар бирикиши механизмини ва парчаланувчи ядро  $\alpha$ -кластерли структурасини ҳам ҳисобга олиш зарур. Бундан ташқари, парчаланувчи ядронинг бурчак моментини ҳам ҳисобга олиш керак.

6.  $^{16}\text{O}$ -реакцияларининг ҳар хил топологик каналларида  $\alpha$ -зарралар ҳосил бўлиши ҳамда уларнинг импульс ва бурчак тақсимотлари тадқиқ қилинди.  $\alpha$ -зарралар ҳосил бўлишига оралиқ нотурғун ядролар  $^8\text{Be}$ ,  $^9\text{B}$  ва уйғотилган  $^{12}\text{C}^*$  ядроларнинг кўшган ҳиссасини аниқлаб берувчи феноменологик моделлар ишлаб чиқилди ва синаб кўрилди. Натижада кўйидаги қонуниятлар топилди:

- кислород ядроларининг кўп парчаларга емирилиш каналлари ичида устувори гелий ядролари ҳосил бўладиган топологиялар бўлиб, бу ядроларнинг асосий қисми нотурғун ядролар –  $^5\text{Li}$ ,  $^8\text{Be}$ ,  $^9\text{B}$  ва уйғотилган  $^{12}\text{C}^*$  ядроларининг емирилишлари оқибатида содир бўлади;

- 3 ва 4 та  $\alpha$ -заррача ҳосил бўладиган каналларда оралиқ нотурғун ядролар  $^8\text{Be}$ ,  $^9\text{B}$  емирилиши билан боғлиқ коллинеарлик кузатилди;

- илк бор нотурғун ядролар –  $^5\text{Li}$ ,  $^8\text{Be}$ ,  $^9\text{B}$  ва уйғотилган  $^{12}\text{C}$  ядроларининг  $\alpha$ -заррачалар ҳосил бўлиш инклюзив кўндаланг кесимига берадиган ҳиссалари миқдорий жиҳатдан топилди;

- 3 та  $\alpha$ -заррача ҳосил бўлувчи каналларнинг  $38 \pm 3\%$  уйғотилган  $^{12}\text{C}^*$  ядроларининг емирилишидан содир бўлади, қолгани ферми-емирилиш ва протон нишон томонидан учта  $\alpha$ -заррага эга бўлган қолдиқ-ядродан бита  $\alpha$ -кластерни квазиэластик уриб чиқариш натижасида амалга ошади;

- парчаланувчи қолдиқ ядро бурчак моменти мавжуд бўлиб, бу эффект енгил парчадан оғир парчага ўтганда кучаяди.

7. Илк бор 3.25 А ГэВ/с импульсли  $^{16}\text{O}$ -тўқнашувларида заряди 1 дан 8 гача бўлган турғун ва нотурғун изотопларнинг кўндаланг кесимлари топилди. Масса сонлари асосий масса сони ( $A=2Z$ ) дан  $\Delta A = \pm 1$  га фарқ қилувчи турғун ва нотурғун изотоплар кўндаланг кесимларининг бир-бирига

тенглиги кўрсатилди. Хатоликлар чегарасида нотурғун ва турғун кўзгу изотоплар  ${}^9\text{B}$  ва  ${}^9\text{Be}$ , учун чиқиш кўндаланг кесимлари бир хил.

8. Илк бор 3.25 А ГэВ/с импульсли  ${}^{16}\text{O}$ -р-, 4.2 и 9.9 ГэВ/с импульсли  $\text{p}^{12}\text{C}$ -, 40 ГэВ/с импульсли  $\pi^{-12}\text{C}$ -, 300 ГэВ/с импульсли  $\text{p}^{20}\text{Ne}$ -, 4.2 А ГэВ/с импульсли  $\alpha^{12}\text{C}$ - ва  $\text{C}^{12}\text{C}$ -ўзаро таъсирларида кумулятив протонлар ҳосил бўлиши тадқиқ қилинди ва қуйидаги қонуниятлар аниқланди:

- кумулятив протонлар инклюзив-инвариант структуравий функцияларининг кумулятивлик сони ( $\beta$ ) бўйича тақсимотининг қиялик параметри универсал характерга эга бўлиб, бирламчи зарра ва нишон турига ҳамда бирламчи энергияга боғлиқ эмас (ядровий “скейлинг”);

- кумулятив протонларнинг ўртача сони берилган ядро учун снаряд турига ва бирламчи энергияга боғлиқ эмас. Бу эса кумулятив протонларнинг ҳосил бўлиши бирламчи зарраларнинг кўпнуклонли бирлашмалар (флуктонлар) билан тўқнашуви натижасида «совук» модель сценарийсига асосан ҳосил бўлишини кўрсатади. Кумулятив протонлар ҳосил бўлувчи ҳодисалар улуши берилган ядро учун снаряд массасига (нуклон ёки ядро) ва бирламчи энергияга боғлиқ эмас. Бу эса кумулятив протонларнинг «совук» модель башорати асосида вужудга келишини кўрсатувчи ишончли далилдир.

Кумулятив протонлар ва иккиламчи зарра ҳамда парчалар ҳосил бўлишининг механизмлари орасида боғланиш мавжуд эмас.

9. Енгил ядролар ҳосил бўлиш механизмлари бир-бирига боғлиқ эмас. Тажрибада кузатилган барча ўзаро боғлиқликлар энергия-импульс, барион ва электр зарядларининг сақланиш қонунлари амал қилинишидан юзага келади.

Енгил ядролар парчаланиши бирламчи энергиянинг кенг диапазонида тизимли ва кенг қамровли ҳамда бир хил методика ёрдамида тадқиқот қилинди. Диссертация натижаларининг аксарияти биринчи марта олинди ва улар юқори энергияли ядровий тўқнашувларда парчаланувчи ядролар структураларини ва хусусиятларини чуқур тушунишга ёрдам беради.

3.25 А ГэВ/с импульсли кислород ядроларининг протонлар билан ўзаро таъсирлашишларидаги парчалануш жараёнларини кенг тадқиқ қилиш ҳамда 3-300 ГэВ энергия оралиқларидаги  $\pi^-$ ,  $\text{p}$ ,  $\alpha$ ,  $\text{C}(\text{C})$ - ва  $\text{p}({}^{16}\text{O}, {}^{20}\text{Ne})$ -тўқнашувларида протонлар ҳосил бўлишнинг асосий механизмларини аниқлаш бўйича диссертация ишида қўйилган барча масалалар тўлиқ ҳал этилган.

Диссертация ишининг натижалари юқори энергияли адрон- ва ядро-ядро тўқнашувларида ядролар парчалануши муаммоларига ёндашувчи назарий моделларни текширишга имкон берувчи кенг фактик материалга эга. Булар ўзаро кучли таъсир назариясини яратишга, ионли тезлатгич-ларда янги тажрибалар ўтказиш ва уларни режалашда қўлланилиши мумкин.

Кислород ядросининг протонлар билан тўқнашувларидаги турғун ва нотурғун ядролар ҳосил бўлишининг кўндаланг кесимлари тўғрисидаги маълумотлардан космофизик ва космохимик тадқиқотларда ядровий синтез ҳодисаларининг рўй бериш жараёнларини ва хусусиятларини ўрганишда фойдаланиш мумкин.



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

---

**ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

**БАЗАРОВ ЭРКИН ХОДЖИЕВИЧ**

**ПРОЦЕССЫ ФРАГМЕНТАЦИИ ЯДЕР КИСЛОРОДА ВО  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ С ПРОТОНАМИ ПРИ 3.25 А ГэВ/с  
И МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОТОНОВ В  $\pi^-$ ,  $p$ ,  $\alpha$ ,  $C(C)$ -  
И  $p(^{16}O, ^{20}Ne)$ -СОУДАРЕНИЯХ ПРИ 3–300 ГэВ**

**01.04.08 - ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ,  
УСКОРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
(физико-математические науки)**

**АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

**Ташкент – 2015**

**Тема докторской диссертации зарегистрирована под номером 30.09.2014/B2014.5.FM156 в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан**

Докторская диссертация выполнена в Физико-техническом институте НПО «Физика-Солнце» и Институте ядерной физики.

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

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский) размещен на веб-странице по адресу [www.inp.uz](http://www.inp.uz) и на информационно-образовательном портале ZIYONET по адресу [www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz).

**Научный консультант:**

**Юлдашев Бехзод Садилович**

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

**Официальные оппоненты:**

**Ледницки Рихард**

доктор физико-математических наук, профессор

**Буртебаев Насурлла**

доктор физико-математических наук, профессор

**Артемов Сергей Викторович**

доктор физико-математических наук

**Ведущая организация:**

**Научно-исследовательский институт  
прикладной физики при Национальном  
университете Узбекистана**

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

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

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.  
(протокол рассылки № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2015 г.).

**У.С. Салихбаев**

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

**Р. Ярмухамедов**

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

**И. Хидиров**

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



## АННОТАЦИЯ ДОКТОРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** Одной из фундаментальных проблем в области релятивистской ядерной физики является установление закономерностей фрагментации релятивистских ядер во взаимодействиях с адронами и ядрами. Важную роль при этом играют экспериментальные и феноменологические исследования процессов фрагментации релятивистских ядер в адрон- и ядро-ядерных соударениях, что позволяет получить важную информацию о кластерной структуре (особенно легких) фрагментирующих ядер, ее влиянии на сечение образования и состав фрагментов, а также о вкладах различных механизмов в их формировании. При энергиях столкновения в несколько ГэВ на нуклон в ядерных соударениях доминирующим процессом является фрагментация ядер, вклад которой составляет около 80% от полного сечения реакции. Особый интерес при этом представляет экспериментальное изучение процессов фрагментации легких релятивистских четно-четных ядер, таких как  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  и  $^{20}\text{Ne}$  во взаимодействиях с адронами и ядрами, поскольку в этих ядрах ожидается доминирующее проявление  $\alpha$ -кластерной структуры.

До сих пор нет однозначного ответа на вопрос о том, какова  $\alpha$ -кластерная структура – стационарная или динамическая, проявляющаяся при определенных уровнях возбуждения фрагментирующего легкого, особенно четно-четного ядра. Эффективным способом проверки  $\alpha$ -кластерной структуры фрагментирующего ядра является изучение образования  $\alpha$ -частиц при разных уровнях возбуждения ядра-снаряда.

Определенный интерес представляет также обнаружение сильнокоррелированных малонуклонных ассоциаций и мультибарионных состояний в ядрах, возможное существование которых предсказывалось рядом моделей, основанных на кварк-партонной структуре адронов. Решение этой задачи непосредственно связано с детальным экспериментальным исследованием процессов формирования частиц в кинематической области, запрещенной для частиц, родившихся в столкновениях свободных нуклонов, в адрон- и ядро-ядерных соударениях при высоких энергиях.

В связи с изложенным актуально проведение систематического и комплексного изучения фрагментации ядер с идентификацией всех возможных фрагментов и вторичных рожденных частиц, прецизионным измерением и определением их кинематических характеристик в широком диапазоне первичных энергий и массовых чисел сталкивающихся ядер на статистически большом экспериментальном материале, что позволит выявить новые закономерности фрагментации ядер.

Востребованным является получение прецизионных данных по сечениям образования всех возможных изотопов фрагментирующих ядер, необходимых для разработки и тестирования теоретических моделей и подходов к описанию явления фрагментации ядер, а также для моделирования взаимодействия первичного космического излучения с ядрами атмосферы. Кроме этого, экспериментальные данные о средних

множественностях (инклюзивных сечениях) легких фрагментов – протонов, дейтронов, ядер трития и гелия-3, образованных во взаимодействиях релятивистских ядер с водородом, крайне востребованы для одной из важных проблем астрофизики – прохождения потоков частиц через межзвездную среду.

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

**Обзор международных научных исследований по теме диссертации.** Исследования процессов фрагментации релятивистских легких ядер и механизмов образования протонов, в том числе кумулятивных и легких фрагментов проводятся в Объединенном институте ядерных исследований, Физическом институте им. П.Н.Лебедева и Радиевом институте им. В.Г.Хлопина Российской Академии наук (Россия), Лоренц-Берклиевской лаборатории Калифорнийского университета и отделе Физики Вашингтонского университета (США), Германском Федеральном министерстве по исследованиям и технологиям (Германия), в отделе Физики Лундского университета (Швеция), Институте экспериментальной физики Словакской Академии наук (Словакия) и других научных центрах, входящих в состав Международных коллабораций EMU01 и EMU02.

Международным сотрудничеством BECQUEREL, созданным на базе Нуклотрона Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, определены кластерные структуры легких ядер ( $A=6-12$ ) и установлена их зависимость от массового числа фрагментирующего ядра и четности или нечетности числа протонов и нейтронов в них. Учеными Лоренц-Берклиевской лаборатории Калифорнийского университета США во взаимодействиях высокоэнергичных легких ядер  $\alpha$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$  и  $^{16}\text{O}$  с легкими и тяжелыми ядрами определены сечения образования изотопов, вылетающих под углами  $\theta < 0.72^\circ$ . Международными коллаборациями EMU01 и EMU02 проверена гипотеза предельной фрагментации и оценено критическое значение плотности энергии для реализации фазового перехода «жидкость-газ» в ядерной материи.

Проведенный обзор международных научных исследований показал, что получено очень мало экспериментальной информации по приоритетным мировым направлениям в области релятивистской ядерной физики: установление общих закономерностей процесса фрагментации ядер; установление механизмов образования протонов в ядерных соударениях. В частности, не определены сечения образования стабильных и нестабильных изотопов, а также вклады промежуточных нестабильных ядер в сечение образования  $\alpha$ -частиц. Кроме того, не исследовано влияние исходной (кластерной) структуры фрагментирующего ядра на выход и состав изотопов и не определены вклады основных механизмов образования протонов, в том числе природа происхождения (генезис) кумулятивных протонов.

**Степень изученности проблемы.** К настоящему времени ведущими учеными мира выполнен большой объем экспериментальных и теоретических исследований процессов множественной генерации частиц и фрагментации релятивистских ядер во взаимодействиях с адронами и ядрами. По исследуемой в диссертационной работе проблеме выполнены следующие экспериментальные исследования.

В работах Азимова С.А., Юлдашева Б.С., Лутпуллаева С.Л., а также шведских ученых (Andersson В., Otterlund I., Stenlund E.) были изучены образования протонов в адрон-ядерных соударениях при высоких энергиях. Однако полученные результаты не дали им возможности детально исследовать и установить механизмы образования протонов.

Российскими учеными (Зарубин П.И., Русакова В., Пересадько Н.Г., Артеменков Д.А. и др.) 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 фрагментации ядер.

Американские ученые (Neckman Н.Н., Greiner D.E., Lindstrom P.J. и др.) проводили исследования образования различных изотопов легких ядер  $\alpha$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$  и  $^{16}\text{O}$  во взаимодействиях с ядрами  $^9\text{Be}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{108}\text{Ag}$  и  $^{207}\text{Pb}$  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.

Образование кумулятивных протонов в адрон- и ядро-ядерных соударениях при высоких энергиях исследовалось российскими учеными Лексиным Г.А., Баюковым Ю.А., Любимовым В.Б., Армутлийским Д., Балдиным А.М. и другими. Однако несистематизированность экспериментальных данных и их скудность не позволили им установить механизмы образования кумулятивных протонов в ядерных соударениях при высоких энергиях. Осталась не решенной проблема происхождения кумулятивных протонов в адрон-ядерных соударениях при высоких энергиях.

Наиболее близкой к исследуемой проблеме является диссертационная работа Олимова К., в которой получены общие характеристики процесса фрагментации ядер кислорода во взаимодействиях с протонами при 3.25 А ГэВ/с; изучены множественности одно- и многозарядных фрагментов без их разделения по массам; определены сечения топологических каналов развала ядер кислорода; получено указание на то, что экспериментально наблюдаемые узкие угловые корреляции между парой  $\alpha$ -частиц могут быть обусловлены рожденьями и распадами нестабильных ядер  $^8\text{Be}$  и  $^9\text{B}$ , однако их количественные вклады в сечение образования  $\alpha$ -частиц не были определены; определен изотопный состав фрагментов с зарядом от 1 до 7, но не измерены их сечения образования. Осталось не изученным образование протонов, в том числе кумулятивных, и других легких фрагментов в  $^{16}\text{O}$ -

соударениях при 3.25 А ГэВ/с. Не исследован также развал ядер кислорода при их периферических соударениях с протонами.

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

2Ф-1.2.1. “Исследование механизмов фрагментации релятивистских ядер кислорода во взаимодействиях с нуклонами” (2000–2002);

Ф-2.1.26 “Исследование процессов множественной генерации частиц, фрагментации и состояний ядерной материи в столкновениях адронов и ядер высоких энергий с ядрами” (2003–2007);

Ф2-Ф029 “Исследование структуры ядерной материи и коллективных эффектов во взаимодействиях адронов и ядер с ядрами при высоких энергиях” (2007–2011).

**Целью исследования** является получение достаточно полной экспериментальной информации о процессах фрагментации ядер кислорода во взаимодействиях с протонами при 3.25 А ГэВ/с и установление основных механизмов образования протонов, в том числе кумулятивных, в  $\pi^-$ ,  $p$ ,  $\alpha$ ,  $C(C)$ - и  $p(^{16}\text{O}, ^{20}\text{Ne})$ -соударениях в интервале первичных энергий 3–300 ГэВ.

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

усовершенствование процедуры идентификации протонов и положительных пионов для получения прецизионных данных по их множественностям и кинематическим (угловым и импульсным) характеристикам;

учет потери различных типов частиц с короткими пробегами ( $L < 4$  см) в рабочей жидкости 2-метровой пропановой пузырьковой камеры;

выделение отдельных классов неупругих взаимодействий в ансамблях  $p(C_3H_8)$ -соударений при 4.2 и 9.9 ГэВ/с,  $\pi^-(C_3H_8)$ -взаимодействий при 40 ГэВ/с,  $p(NeH_2)$ -столкновений при 300 ГэВ/с,  $\alpha(C_3H_8)$ - и  $C(C_3H_8)$ -взаимодействий при 4.2 А ГэВ/с;

анализ множественности и импульсных спектров протонов-фрагментов в  $\pi^-$ ,  $p$ ,  $\alpha$ ,  $C(C)$ - и  $p(^{16}\text{O}, ^{20}\text{Ne})$ -соударениях и определение вкладов основных механизмов образования протонов;

исследование и установление закономерностей образования легких ядер с массовыми числами  $A=2$  и  $4$  в  $^{16}\text{O}p$ -соударениях при 3.25 А ГэВ/с;

изучение образования  $\alpha$ -частиц, разработка феноменологических моделей определения вкладов нестабильных ядер  $^8\text{Be}$  и  $^9\text{B}$  и возбужденных ядер углерода-12 в инклюзивное сечение образования ядер гелия-4 в  $^{16}\text{O}p$ -соударениях при 3.25 А ГэВ/с;

экспериментальное определение сечений образования стабильных и нестабильных изотопов с зарядами 1–8 в  $^{16}\text{O}p$ -соударениях при 3.25 А ГэВ/с;

детальное исследование образования кумулятивных протонов во взаимодействиях  $\pi^-$ -мезонов, протонов, ядер  $^4\text{He}$  и  $^{12}\text{C}$  с ядрами углерода и протонов с ядрами неона и кислорода при высоких энергиях для

обнаружения сильнокоррелированных малонуклонных ассоциаций и мультибарионных состояний в ядрах.

**Объектом исследования** являются ядерные процессы, вызванные адронами и ядрами при высоких энергиях.

**Предметом исследования** являются процессы фрагментации ядер, образование протонов, в том числе кумулятивных.

**Методы исследования.** Инклюзивный подход к образованию частиц и фрагментов в ядерных взаимодействиях при высоких энергиях с применением методов математической статистики; экспериментальная методика обработки फिल्मовой информации, полученной с пузырьковых камер, облученных пучками релятивистских адронов и ядер в сильном магнитном поле.

**Научная новизна диссертационного исследования** заключается в следующих результатах, полученных впервые:

прецизионно определены сечения образования стабильных и нестабильных изотопов с  $Z = 1-8$  в  $^{16}\text{O}p$ -соударениях при  $3.25 \text{ A ГэВ/с}$  и показано, что сечения образования зеркальных ядер совпадают в пределах статистических погрешностей;

оценены полуэмпирическим методом вклады основных механизмов образования протонов в  $\pi^-C^-$ ,  $p^{20}\text{Ne}$ - $^{16}\text{O}p$ -соударениях при  $40 \text{ ГэВ/с}$ ,  $300 \text{ ГэВ/с}$  и  $3.25 \text{ A ГэВ/с}$ , соответственно. Установлена независимость значений этих вкладов от энергии и массового числа фрагментирующего легкого ядра и их чувствительность к типу налетающей частицы (пион или протон);

установлено, что механизмы образования быстрых протонов ( $p > 0.25 \text{ ГэВ/с}$ ) в  $^{16}\text{O}p$ -,  $p^{12}\text{C}$ -,  $\pi^{-12}\text{C}$ -,  $p^{20}\text{Ne}$ -соударениях при  $3.25 \text{ A ГэВ/с}$ ,  $9.9 \text{ ГэВ/с}$ ,  $40 \text{ ГэВ/с}$  и  $300 \text{ ГэВ/с}$ , соответственно, не зависят от первичной энергии, сорта налетающей частицы и типа легкого фрагментирующего ядра, а также от степени возбуждения фрагментирующих ядер (ядерный скейлинг);

установлены основные механизмы образования дейтронов в  $^{16}\text{O}p$ -соударениях при  $3.25 \text{ A ГэВ/с}$ , связанные с слиянием каскадных нуклонов, ферми-развалом возбужденного ядра-остатка, распадами сравнительно быстрых легких фрагментов и прямым квазиупругим выбиванием дейтронов из ядра кислорода протоном;

определены сечения образования промежуточных состояний ядер ( $^8\text{Be}$ ,  $^9\text{B}$ ,  $^{12}\text{C}^*$ ) в  $^{16}\text{O}p$ -соударениях при  $3.25 \text{ A ГэВ/с}$  и найдены их вклады совместно с нестабильными ядрами  $^5\text{He}$ ,  $^5\text{Li}$  в инклюзивное сечение образования  $\alpha$ -частиц. Определен вклад распада возбужденных ядер  $^{12}\text{C}^*$  в канал образования 3-х  $\alpha$ -частиц, который составляет  $(38 \pm 3.0)\%$  сечения этого канала;

доказано, что образование кумулятивных протонов в  $^{16}\text{O}p$ -,  $p^{12}\text{C}$ -,  $\pi^{-12}\text{C}$ -,  $p^{20}\text{Ne}$ -,  $\alpha^{12}\text{C}$ - и  $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ -соударениях при  $3.25 \text{ A ГэВ/с}$ ,  $4.2 \text{ ГэВ/с}$ ,  $9.9 \text{ ГэВ/с}$ ,  $40 \text{ ГэВ/с}$ ,  $300 \text{ ГэВ/с}$  и  $4.2 \text{ A ГэВ/с}$ , соответственно, происходит в результате столкновения налетающего адрона с «флуктонами», образованными посредством флуктуации плотности нуклонов ядра в его основном состоянии.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем: накоплен уникальный банк прецизионных экспериментальных данных по сечениям образования стабильных и нестабильных изотопов ядра кислорода, вкладам распадов различных нестабильных ядер в формирование  $\alpha$ -частиц, во взаимодействиях ядер кислорода с протонами при 3.25 А ГэВ/с, а также вкладам основных механизмов образования протонов в адрон- и ядро-ядерных соударениях при высоких энергиях. Эти экспериментальные данные могут быть использованы для разработки теоретических моделей и подходов к описанию явления фрагментации ядер, а также для моделирования взаимодействия первичного космического излучения с ядрами атмосферы. Полученные экспериментальные данные по различным характеристикам легких фрагментов – протонов, дейтронов, ядер трития и гелия-3, образованных во взаимодействиях релятивистских ядер кислорода с водородом, представляют также практический интерес для решения одной из важных проблем астрофизики – прохождения потоков частиц через межзвездную среду.

**Достоверность полученных результатов** обосновывается, прежде всего, большой (>93 000 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.

**Теоретическая и практическая значимость результатов исследования.** Экспериментальные данные диссертационной работы необходимы для создания мирового банка ядерных данных, проверки теоретических моделей и подходов к проблеме фрагментации ядер в адрон- и ядро-ядерных соударениях при высоких энергиях, а также могут быть использованы при планировании и проведении новых экспериментов на ускорителях ионов. Данные о сечениях образования стабильных и нестабильных изотопов ядра кислорода могут найти свое применение в астро- и космофизических исследованиях.

**Внедрение результатов исследований.** Экспериментальные данные по сечениям образования нестабильных ядер  $^8\text{Be}$  и  $^9\text{B}$  и методы определения их вкладов в инклюзивное сечение образования  $\alpha$ -частиц использованы при моделировании и планировании эксперимента по исследованию кластерной структуры легких ядер в периферических взаимодействиях ядер с ядерной фотоэмульсией на нуклотроне Объединенного института ядерных исследований в рамках Международного сотрудничества по программе BECQUEREL (2009–2011, № 02-1-1087) (письма Объединенного института ядерных исследований № 100-25/19 от 6 февраля 2015г. и Академии наук Республики Узбекистан № 2/1255-289 от 9 марта 2015 г.).

**Апробация работы.** Результаты исследований апробированы на 10 научных конференциях, в частности на 6 Международных конференциях: V Международная конференция «Современные проблемы ядерной физики» (Самарканд, 2003), III Евразийская конференция «Ядерная наука и ее приложения» (Ташкент, 2004), Международная конференция, посвященная «Ядерной науке и ее приложениям» (Самарканд, 2012), XII Международная конференция «Физика высоких энергий, ядерная физика и ускорители» (Харьков, 2014), 64-я Международная конференция «Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий» (Минск, 2014), XXII Международный Балдинский семинар по проблемам физики высоких энергий (Дубна, 2014); а также на 4 Республиканских конференциях: «Фундаментальные и прикладные проблемы физики» (Ташкент, 2004, 2006, 2013), «Физика в Узбекистане» (Ташкент, 2005).

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на научных семинарах Физико-технического института Научно-производственного объединения «Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан (2008, 2009), на научных семинарах Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан (2012, 2014), на объединенном семинаре Физико-технического института Научно-производственного объединения «Физика-Солнце» и Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан (2012, 2015), на научном семинаре Научно-исследовательского института прикладной физики при Национальном университете Узбекистана (2014).

**Опубликованность результатов.** По теме диссертации опубликованы 34 научные работы, из них 18 научных статей в журналах, в том числе 6 в международных и 12 в республиканских научных журналах, 13 публикаций в виде научных трудов и тезисов, 3 препринта.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 155 наименований, 2 приложений и содержит 182 страницы основного текста, 34 рисунка, 16 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** дается краткий анализ основных результатов, полученных за последние годы по адрон- и ядро-ядерным соударениям при высоких энергиях по множественной генерации частиц и фрагментации ядер, а также показана актуальность и сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**В первой главе** диссертации изложены основные характеристики 1-метровой водородной пузырьковой камеры, пучка и дано краткое описание методики обработки फिल्मовой информации. Там же приведено краткое описание экспериментальных материалов, полученных с помощью 2-метровой пропановой и 30-дюймовой неон-водородной пузырьковых камер.

Статистика измеренных событий по рассматриваемым типам и первичным импульсам приведена в табл. 1.

Сведения об экспериментальном материале

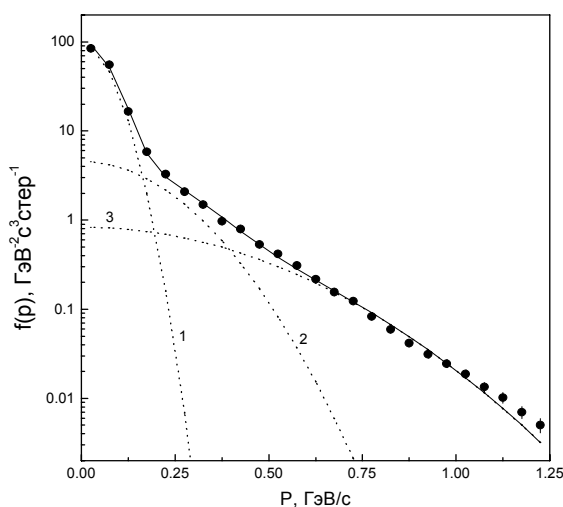
Тип взаимодействия	$P_0$ , А ГэВ/с	Полное число событий
$^{16}\text{O}p$	3.25	13500
$\pi^{-12}\text{C}$	40.0	16657
$p^{12}\text{C}$	4.2	6901
$p^{12}\text{C}$	9.9	18325
$^4\text{He}^{12}\text{C}$	4.2	12326
$^{12}\text{C}^{12}\text{C}$	4.2	20530
$p^{20}\text{Ne}$	300	5000
Общая статистика		<b>93239</b>

Во второй главе диссертации приводится детальное исследование образования протонов в  $^{16}\text{O}p$ -взаимодействиях при 3.25 А ГэВ/с,  $p\text{C}$ -соударениях при 4.2 и 9.9 ГэВ/с,  $p^{20}\text{Ne}$ -столкновениях при 300 ГэВ/с, выполненных совместно с коллективом соавторов в составе В.В. Глаголев, К. Олимов, А.А. Юлдашев, Б.С. Юлдашев и др.

На основании анализа нормированного инвариантного инклюзивного дифференциального сечения образования протонов по импульсу показано, что оно удовлетворительно описывается суммой трех гауссовских функций:

$$f(p) = Ed^3\sigma/dp^3 = a_1 \exp(-b_1 p^2) + a_2 \exp(-b_2 p^2) + a_3 \exp(-b_3 p^2), \quad (1)$$

где  $a_i$  и  $b_i$  – фитируемые параметры (определяемые методом наименьших квадратов).



**Рис.1. Нормированное инвариантное инклюзивное дифференциальное сечение образования протонов в  $^{16}\text{O}p$ -взаимодействиях при 3.25 А ГэВ/с как функция импульса**



На рис.1 в качестве примера показано нормированное инвариантное инклюзивное дифференциальное сечение образования для всех протонов, образованных в  $^{16}\text{O}p$ -соударениях при 3.25 А ГэВ/с в системе покоя ядра кислорода и вклады каждого члена выражения (1) (в виде пунктирных кривых – 1, 2, 3). Сплошная линия соответствует суммарному вкладу трех членов, соответствующих образованию протонов через «испарительный» механизм (кривая 1), механизмы Ферми-развала (кривая 2) и прямого выбивания протоном-мишенью или вторичными частицами (кривая 3). Доли этих механизмов оказались равными  $(27.4 \pm 0.5)\%$ ,  $(32.0 \pm 0.6)\%$  и  $(40.6 \pm 0.7)\%$  соответственно.

В табл. 2 приведены значения параметров аппроксимации нормированных инвариантных инклюзивных дифференциальных сечений образования протонов в  $^{16}\text{O}p$ -соударениях при 3.25 А ГэВ/с в системе покоя ядра кислорода и в  $p^{20}\text{Ne}$ -столкновениях при 300 ГэВ/с в лабораторной системе.

**Таблица 2**

**Результаты аппроксимации нормированного инвариантного инклюзивного дифференциального сечения образования протонов по импульсу выражением (1)**

Параметры	Тип соударения				
	$^{16}\text{O}p$			$p^{20}\text{Ne}$	
	все протоны	испущенные вперед	испущенные назад	все протоны	испущенные вперед
$a_1$	94.4±3.5	45.3±2.2	49.5±2.9	50.1±2.4	20.5±1.6
$b_1$	126.1±3.8	111.9±4.1	149.7±8.4	56.7±2.6	49.2±4.3
$a_2$	4.55±0.30	1.80±0.13	3.22±0.46	4.21±0.42	1.93±0.43
$b_2$	14.57±0.91	9.83±0.99	24.3±3.9	10.39±0.92	10.19±2.41
$a_3$	0.84±0.07	0.56±0.09	0.54±0.24	0.65±0.11	0.77±0.15
$b_3$	3.71±0.12	3.28±0.19	8.78±1.23	3.12±0.18	3.30±0.19
$\chi^2/\text{ч.с.св.}$	1.35	1.12	0.72	1.41	1.01

Из табл. 2 видно, что:

– значение параметра наклона  $b_1$  для  $^{16}\text{O}p$ -взаимодействий существенно больше, чем для  $p^{20}\text{Ne}$ -соударений. Учитывая, что  $b_1$  по физическому смыслу является величиной обратно пропорциональной дисперсии (ширине) импульсного распределения, это обстоятельство указывает на более узкое импульсное распределение, соответствующее первому члену в (1) для  $^{16}\text{O}p$ -взаимодействий. Такое отличие связано с различными условиями регистрации медленных протонов в водородной и неон-водородной пузырьковых камерах;

– значение параметра наклона  $b_1$  для протонов, летящих в заднюю полусферу в  $\approx 1.3$  раза больше, чем для протонов, летящих в переднюю полусферу. На правдоподобность найденного значения параметра  $b_1$  указывает тот факт, что величина первого члена выражения (1) при изменении импульса протона от  $p \approx 25$  МэВ/с до  $p \approx 250$  МэВ/с (область испарительных протонов) уменьшается почти на четыре порядка;

– значения параметров наклона  $b_2$  для протонов, летящих в переднюю полусферу, в пределах статистических погрешностей оказались одинаковыми для  $^{16}\text{O}p$ - и  $p^{20}\text{Ne}$ -соударений;

– в пределах статистических погрешностей оказались одинаковыми и значения параметров наклона  $b_3$  для протонов, летящих в переднюю полусферу для обоих типов взаимодействий.

Следует отметить, что аппроксимируя формулой (1) нормированное инвариантное инклюзивное дифференциальное сечение образования протонов, летящих в переднюю полусферу в  $p^{12}\text{C}$ -взаимодействиях при 4.2 ГэВ/с, для второго параметра наклона получено значение  $b_2 = 10.06 \pm 0.99$  (ГэВ/с) $^{-2}$ , что в пределах статистических погрешностей совпадает с таковыми для  $^{16}\text{O}p$ - и  $p^{20}\text{Ne}$ -соударений (см. табл. 2). К сожалению, из-за невозможности в 2-метровой пропановой пузырьковой камере идентифицировать протоны с импульсами  $P > 750$  МэВ/с, мы не можем сравнить значение третьего параметра наклона в  $p^{20}\text{Ne}$ -соударениях с данными для  $^{16}\text{O}p$ -соударений.

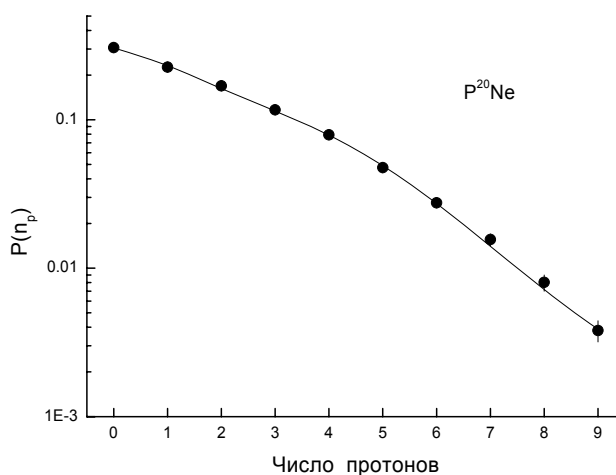
Таким образом, можно заключить, что механизм образования быстрых протонов, особенно летящих вперед, имеет универсальный характер, выражающийся в независимости его от первичной энергии и типа легкого фрагментирующего ядра.

Эти результаты не противоречат экспериментальным данным, полученным электронной методикой, в которой исследовались инвариантные структурные функции  $f(T)$  быстрых протонов ( $T > 70$  МэВ), вылетающих под различными углами во взаимодействиях протонов с разными ядрами (с массовым числом от  $A=6$  до  $A=124$ ) при 7.5 ГэВ/с. Оказалось, что при фиксированном угле вылета протонов  $f(T)$  удовлетворительно описывается одной экспонентой, и значение параметра наклона в пределах статистических погрешностей не зависит от массового числа фрагментирующего ядра.

Нами (совместно с К. Олимовым, В.И. Петровым, В.В. Луговым) впервые проведена апробация простой феноменологической модели для описания распределений протонов по множественности в  $\pi^-\text{C}$ -взаимодействиях при 40 ГэВ/с и  $p^{20}\text{Ne}$ -соударениях при 300 ГэВ/с. В рамках этой модели основными механизмами образования протонов являются выбивание протонов налетающей частицей в процессе многократного перерасеяния ее на нуклонах ядра; распад возбужденного ядра-остатка (Ферми-развал), образованного после прохождения внутриядерных соударений первичной частицы; «испарение» исходного ядра при периферических соударениях или же девозбуждения многонуклонных

фрагментов, образованных в результате распада возбужденного ядра-остатка.

На рис.2 в качестве примера показаны экспериментальные распределения событий по множественности (распределение вероятности) протонов для  $p^{20}\text{Ne}$ -соударений при 300 ГэВ/с и результаты расчетов по вышеупомянутой простой феноменологической модели. Модель хорошо воспроизводит экспериментальное распределение протонов по множественности для  $p^{20}\text{Ne}$ -соударений ( $\chi^2 = 3.8$  при семи степенях свободы, что соответствует более 80%-ному уровню значимости).



(●) при 300 ГэВ/с, сплошная линия – результаты расчета по феноменологической модели

**Рис.2. Распределение вероятностей появления событий с данным числом протонов в  $p^{20}\text{Ne}$ -соударениях**

В табл. 3 приведены окончательные результаты (с учетом потери медленных и быстрых протонов) по оценкам долей указанных доминирующих процессов образования протонов в  $\pi^-C$ -взаимодействиях при 40 ГэВ/с и  $p^{20}\text{Ne}$ -соударениях при 300 ГэВ/с вместе с данными, полученными в  $^{16}\text{O}p$ -соударениях при 3.25 А ГэВ/с.

**Таблица 3**

**Вклады механизмов образования протонов в  $\pi^{-12}\text{C}$ -,  $^{16}\text{O}p$ - и  $p^{20}\text{Ne}$ -соударениях при высоких энергиях**

Тип вклада	Тип взаимодействия		
	$\pi^{-12}\text{C}$	$p^{16}\text{O}$	$p^{20}\text{Ne}$
<i>Испарительный</i>	$0.22 \pm 0.01$	$0.27 \pm 0.01$	$0.28 \pm 0.01$
<i>Ферми-развал</i>	$0.43 \pm 0.02$	$0.32 \pm 0.01$	$0.31 \pm 0.01$
<i>Выбивание</i>	$0.35 \pm 0.02$	$0.41 \pm 0.02$	$0.41 \pm 0.02$

Из табл. 3 видно, что в случае  $^{16}\text{O}p$ - и  $p^{20}\text{Ne}$ -соударений наблюдается устойчивость – практическая независимость относительных вкладов различных механизмов образования протонов от энергии и массового числа фрагментирующего ядра. Наблюдаемое некоторое различие этих величин в  $\pi^{-12}\text{C}$ -соударениях, по-видимому, связано с меньшим сечением  $\pi\text{N}$ -взаимодействий по сравнению с  $p\text{N}$ -взаимодействиями, приводящим к относительно меньшему вкладу механизма выбивания протонов.

Таким образом, можно заключить, что доли различных процессов образования протонов не зависят от энергии и массового числа легкого фрагментирующего ядра, но чувствительны к типу налетающей частицы (пион или протон).

**В третьей главе** диссертации представлены экспериментальные результаты (полученные коллективом авторов в составе В.В. Глаголев, К. Олимов, С.Л. Лутпуллаев, А.А. Юлдашев, Б.С. Юлдашев и др.) по исследованию процессов образования дейтронов, ядер трития и гелия-3 в  $^{16}\text{O}p$ -соударениях при 3.25 А ГэВ/с и данные по корреляциям образования этих ядер с выходами других типов вторичных ядер-фрагментов и заряженных частиц. В табл. 4 приведены средние множественности и инклюзивные сечения образования легких фрагментов с  $A \leq 3$ .

Видно, что инклюзивное сечение образования дейтронов составляет около 20% сечения рождения протонов и в 2.4 раза превышает сечения образования зеркальных ядер  $^3\text{H}$  и  $^3\text{He}$ . Средняя множественность  $^2\text{H}$  и  $^3\text{H}$ , рассчитанная по КФИМ, оказалась в  $\approx 1.4$  раза меньше экспериментальной.

Таким образом, видно, что механизмов образования ядер  $^2\text{H}$  и  $^3\text{H}$ , заложенных в аксиоматику КФИМ, явно недостаточно для описания совокупности экспериментальных данных по этим ядрам.

В экспериментальном распределении дейтронов по полному импульсу в системе покоя ядра кислорода (рис.3) в области  $p = 0.40\text{--}0.55$  ГэВ/с обнаружена нерегулярность, отсутствующая в расчетах по КФИМ.

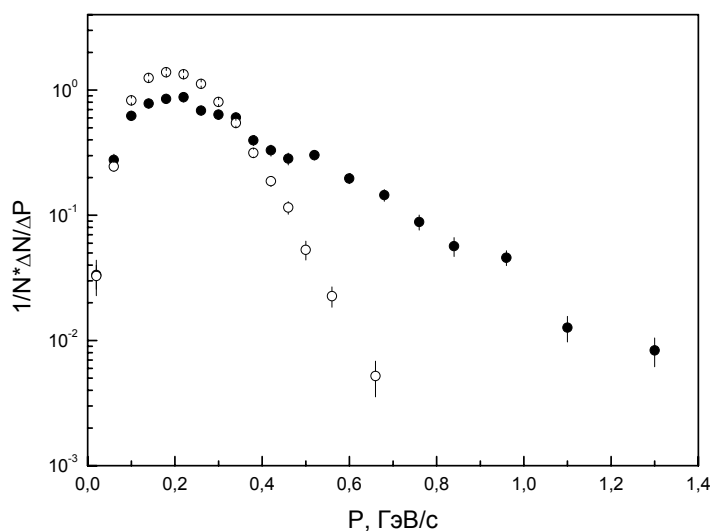
Из сравнения этих двух спектров можно заключить, что КФИМ переоценивает рождение дейтронов в области  $0.10 < p < 0.35$  ГэВ/с, а в области  $p > 0.4$  ГэВ/с – недооценивает. Такое расхождение связано с учетом в модели вклада механизма слияния быстрых каскадных нуклонов.

**Таблица 4**

**Средние множественности  $\langle n_f \rangle$  и инклюзивные сечения  $\sigma_{in}$  (мбн) выхода легких фрагментов  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$  и  $^3\text{He}$  в эксперименте и КФИМ**

Тип фрагмента	$^1\text{H}$	$^2\text{H}$	$^3\text{H}$	$^3\text{He}$
$\langle n_f \rangle$ (экспер.)	$1.78 \pm 0.02$	$0.331 \pm 0.007$	$0.141 \pm 0.005$	$0.142 \pm 0.005$
$\langle n_f \rangle$ (КФИМ)	$1.75 \pm 0.01$	$0.249 \pm 0.003$	$0.108 \pm 0.001$	$0.152 \pm 0.002$
$\sigma_{in}$ (экспер)	$594.2 \pm 5.5$	$110.3 \pm 2.3$	$47.1 \pm 1.6$	$47.4 \pm 1.6$
$\sigma_{in}$ (КФИМ)	$584.5 \pm 2.2$	$83.2 \pm 1.2$	$36.1 \pm 0.7$	$50.8 \pm 0.8$

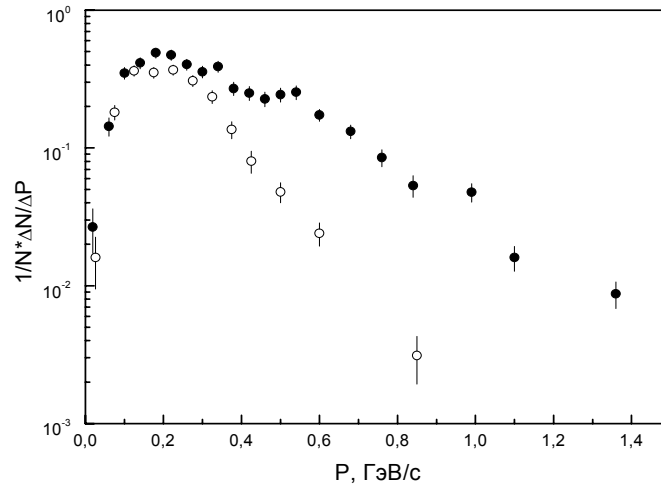
Для выяснения причины возникновения нерегулярности в импульсном спектре дейтронов в области  $p = 0.40\text{--}0.55$  ГэВ/с были изучены импульсные распределения дейтронов, летящих в переднюю и заднюю полусферы в системе покоя ядра кислорода по отдельности (рис.4).



● – экспериментальные данные, ○ – предсказания КФМ

**Рис. 3. Нормированное на общее число распределение дейтронов по полному импульсу в системе покоя ядра кислорода**

Видно, что импульсный спектр дейтронов, летящих назад, не имеет каких-либо особенностей, демонстрируя монотонный характер. Импульсный же спектр дейтронов, вылетающих в переднюю полусферу, довольно жесткий, а отмеченная выше нерегулярность в импульсном спектре всех дейтронов в интервале  $p = 0.40\text{--}0.55$  ГэВ/с выражена очень ярко. Это может быть следствием наложения минимум двух механизмов, имеющих разные средние значения импульсов. Возможно также, что такой эффект связан с существенным различием механизмов образования дейтронов, летящих в переднюю и заднюю полусферы. При этом надо помнить, что при образовании дейтронов, летящих назад, основной вклад дают так называемый испарительный механизм и механизм Ферми-развала. В процессах же рождения дейтронов, летящих вперед, помимо вышеуказанных механизмов, дают вклады механизм слияния каскадных нуклонов, распады относительно быстрых возбужденных легких фрагментов, а также прямое выбивание дейтронов из ядра кислорода, которые и могут являться причинами жесткости и возникновения нерегулярности в их импульсном спектре.



● – для дейтронов, летящих в переднюю полусферу; ○ – для дейтронов, летящих в заднюю полусферу

**Рис.4. Нормированное на общее число распределение дейтронов по полному импульсу в системе покоя ядра кислорода**

Изучение корреляций выхода дейтронов и образования других фрагментов (табл. 5) показало, что в событиях с образованием дейтрона средняя множественность фрагментов с  $Z \leq 4$  больше, а с  $Z \geq 5$  меньше, чем в событиях без образования дейтрона.

**Таблица 5**

**Средние множественности фрагментов с разными зарядами в событиях с дейтроном и без него**

$n_d$	Заряд фрагмента						
	1	2	3	4	5	6	7
0	$1.37 \pm 0.03$	$0.56 \pm 0.01$	$0.063 \pm 0.003$	$0.035 \pm 0.002$	$0.076 \pm 0.003$	$0.216 \pm 0.005$	$0.247 \pm 0.006$
$\geq 1$	$2.47 \pm 0.04$	$1.06 \pm 0.02$	$0.12 \pm 0.01$	$0.054 \pm 0.005$	$0.067 \pm 0.006$	$0.126 \pm 0.008$	$0.022 \pm 0.003$

На основании изучения этих корреляций для дейтронов, летящих в переднюю и заднюю полусферы, показано, что механизм образования дейтронов не связан с наличием или отсутствием в событии других фрагментов или заряженных частиц, т.е. наблюдаемые корреляции не чувствительны к механизму формирования дейтронов.

**В четвертой главе** диссертации приведены результаты изучения процессов образования ядер  ${}^4\text{He}$  при фрагментации релятивистских ядер кислорода во взаимодействиях с протонами при 3.25 А ГэВ/с (полученные коллективом авторов в составе В.В. Глаголев, К. Олимов, С.Л. Лутпуллаев, А.А. Юлдашев, Б.С. Юлдашев, В.В. Луговой и др.). Особое внимание в ней уделено определению вкладов нестабильных ядер  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^8\text{Be}$  и возбужденных ядер углерода в сечение образования  $\alpha$ -частиц. Также исследована зависимость инклюзивных сечений и различных кинематических характеристик  $\alpha$ -частиц от топологии развала ядер кислорода. Экспериментальные

данные сравнены с результатами расчета по КФИМ, с предсказаниями статистической модели Гольдхабера и с расчетами по модели коалесценции.

Для выяснения вкладов различных механизмов образования  $\alpha$ -частиц мы выполнили сравнение экспериментального нормированного инвариантного инклюзивного дифференциального сечения  $f(T) = Ed^3\sigma/dp^3$  с расчетами по КФИМ и по модели коалесценции. Расчет по КФИМ в области  $T < 15$  МэВ в пределах статистических погрешностей удовлетворительно описывает экспериментальный спектр. Поскольку КФИМ существенно недооценивает вклад испарительного механизма образования легких фрагментов, наблюдаемое в нашем случае согласие приводит к выводу, что для  $\alpha$ -частиц вклад испарительного механизма их образования или пренебрежимо мал, или отсутствует. В области  $T > 15$  МэВ с ростом кинетической энергии  $\alpha$ -частиц расхождение с расчетами по КФИМ и экспериментом усиливается. Теоретический спектр по КФИМ обрывается при  $T \leq 100$  МэВ, в то время как экспериментальное распределение простирается до области  $T \approx 200$  МэВ. Такое резкое разногласие между экспериментом и расчетом по КФИМ связано с неучетом в ней  $\alpha$ -кластерной структуры легких ядер, а также вклада механизма слияния. Для области  $T \geq 100$  МэВ мы выполнили расчет спектра  $\alpha$ -частиц по модели коалесценции на основе протонных спектров и установили, что вклад механизма слияния в инклюзивное сечение образования  $\alpha$ -частиц составляет  $1.4 \pm 0.3$  %.

Сравнение расчетов по КФИМ с экспериментальным распределением поперечных импульсов  $\alpha$ -частиц показало, что хотя средние значения поперечных импульсов совпадают, предсказания КФИМ и эксперимента по форме распределения существенно расходятся.

Угловое распределение фрагментов с  $T < 10$  МэВ на нуклон согласно статистической теории фрагментации должно быть изотропным. При изучении испускания легких фрагментов ( $p$ ,  $d$ ,  $t$  и  ${}^3\text{He}$ ) с энергией  $T < 10$  МэВ на нуклон было выявлено отклонение от отмеченного выше положения статистической теории. Этот экспериментальный факт мы интерпретировали как отражение наличия углового момента у фрагментирующего ядра.

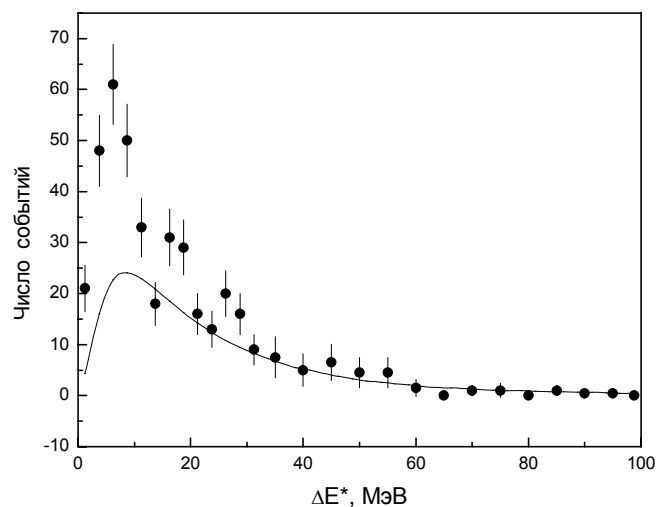
Проведенный нами анализ кинематических характеристик  $\alpha$ -частиц, образованных в  ${}^{16}\text{O}p$ -взаимодействиях при 3.25 А ГэВ/с, привел к выводу, что основная часть  $\alpha$ -частиц образуется за счет фермиевского развала (статистического механизма), в то время как вклад от испарительного механизма не заметен. Роль эффекта коалесценции хорошо проявляется в области больших кинетических энергий и поперечных импульсов.

В каналах образования трех и четырех  $\alpha$ -частиц в  ${}^{16}\text{O}p$ -взаимодействиях при 3.25 А ГэВ/с был проведен анализ промежуточных состояний многонуклонных систем, распадающихся на  $\alpha$ -частицы, частности  ${}^8\text{Be} \rightarrow \alpha + \alpha$  и  ${}^9\text{B} \rightarrow \alpha + \alpha + p$ .

Дополнительным источником образующихся  $\alpha$ -частиц могут являться другие (также нестабильные) ядра, такие как, например,  ${}^5\text{He}$  и  ${}^5\text{Li}$ . Имеющиеся экспериментальные данные позволили оценить сечение

образования нестабильного изотопа  ${}^5\text{Li}$ , распадающегося на  ${}^4\text{He}$  и протон. Сечение образования ядер литий-5 оказалось равным  $\sigma({}^5\text{Li}) = 8.4 \pm 0.5$  мбарн, что не сильно отличается от значений функции возбуждения, полученных нами для стабильных изотопов.

На основе анализа распределений по инвариантной массе трех  $\alpha$ -частиц (рис. 5) и при помощи разработанной нами феноменологической модели изотропного фазового пространства (учитывающей закон сохранения энергии-импульса) в  ${}^{16}\text{O}p$ -соударениях при  $3.25 A$  ГэВ/с впервые установлено, что вклад распада возбужденных ядер  ${}^{12}\text{C}^*$  в канал образования трех  $\alpha$ -частиц составляет около  $(38 \pm 3.0)\%$  сечения этого канала, а оставшаяся часть сечения канала реализуется через прямой Ферми-развал или квазиупругое выбивание одного  $\alpha$ -кластера из слабо связанного ядра-остатка, содержащего три  $\alpha$ -частицы.



Сплошная линия – фоновое распределение

**Рис. 5. Распределение систем трех  $\alpha$ -частиц по энергии возбуждения  $\Delta E^*$**

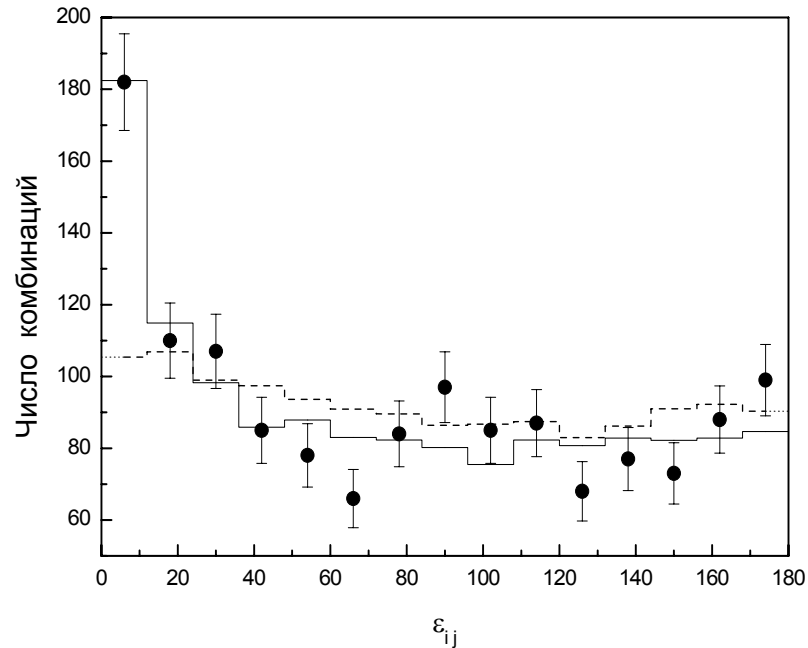
При анализе каналов образования трех или четырех  $\alpha$ -частиц в  ${}^{16}\text{O}p$ -соударениях при  $3.25 A$  ГэВ/с нами (В.В. Глаголевым, С.Л. Лутпуллаевым, К. Олимовым, В.В. Луговым, А.А. Юлдашевым, Б.С. Юлдашевым и др.) были обнаружены эффекты, свойственные азимутальной асимметрии и коллинеарности. Естественно предположить, что причинами возникновения коллинеарности векторов импульсов пар  $\alpha$ -частиц могут являться распады нестабильных ядер  ${}^8\text{Be} \rightarrow \alpha + \alpha$  в основном и первом возбужденных состояниях с энергосвободением 0.1 и 3.04 МэВ. Мы проверили справедливость этого предположения с учетом рождения и распада промежуточных нестабильных ядер  ${}^8\text{Be} \rightarrow \alpha + \alpha$  и  ${}^9\text{B} \rightarrow \alpha + \alpha + p$  с помощью феноменологической модели изотропного фазового пространства.

На рис. 6 показано распределение по парному азимутальному углу ( $\epsilon_{ij}$ )  $i$ -й и  $j$ -й  $\alpha$ -частиц. Там же приведены и наши расчеты, выполненные в рамках метода Монте-Карло по модифицированной феноменологической модели



изотропного фазового пространства с учетом и без учета рождения и распада нестабильных ядер  ${}^8\text{Be}$  и  ${}^9\text{B}$ .

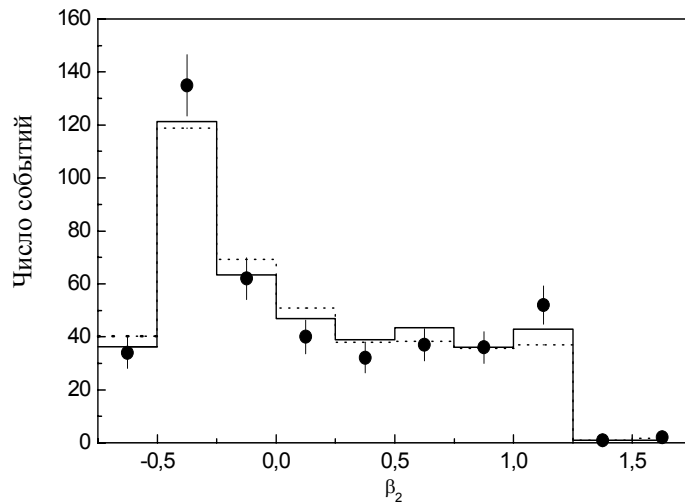
Хорошее согласие расчета с экспериментом наблюдается при учете рождения и распада промежуточных ядер  ${}^8\text{Be}$  и  ${}^9\text{B}$ . Наилучшее согласие достигнуто при вероятностях рождения  $W(0.1) = (15.4 \pm 0.6)\%$  и  $W(3.04) = (6.6 \pm 0.26)\%$  для ядер  ${}^8\text{Be}$  и  $W(0.3) = (19 \pm 0.45)\%$  для ядра  ${}^9\text{B}$  (в скобках указаны значения выделяемых энергий при распадах в МэВ).



**Рис. 6. Распределение по парному азимутальному углу ( $\epsilon_{ij}$ )  $i$ -й и  $j$ -й  $\alpha$ -частиц**

На рис. 7 приведено распределение по параметру азимутальной коллинеарности ( $\beta_2$ ) для индивидуальных актов  ${}^{16}\text{O}\alpha$ -соударений с тремя и четырьмя  $\alpha$ -частицами в конечном состоянии. Там же показаны и расчетные распределения по модифицированной феноменологической модели изотропного фазового пространства с учетом и без учета образования нестабильных ядер  ${}^8\text{Be}$  и  ${}^9\text{B}$ . Видно, что расчетное распределение с учетом образования нестабильных ядер  ${}^8\text{Be}$  и  ${}^9\text{B}$  удовлетворительно описывает экспериментальный спектр ( $\chi^2=3.88$  при 10-ти степенях свободы, что соответствует 95% уровню значимости). Также совпадают и их средние значения:  $\langle\beta_2\rangle_{\text{эксп}}=0.13 \pm 0.03$ ;  $\langle\beta_2\rangle_{\text{расч}}=0.13 \pm 0.02$ . Как и ожидалось, среднее значение расчетного  $\beta_2$  без учета рождения вышеуказанных нестабильных ядер оказалось сравнительно малым:  $\langle\beta_2\rangle_{\text{расч}}=0.004 \pm 0.024$  и  $\chi^2=21.56$  при 10 степенях свободы, что соответствует уровню значимости менее 2%.

Таким образом, можно заключить, что экспериментально наблюдаемая азимутальная коллинеарность в каналах образования трех и четырех  $\alpha$ -частиц обусловлена распадами промежуточных нестабильных ядер  ${}^8\text{Be}$  и  ${}^9\text{B}$ .



Результаты расчетов по модели Монте-Карло с учетом (сплошная гистограмма) и без учета (штриховая гистограмма) рождения нестабильных ядер  $^8\text{Be}$  и  $^9\text{B}$

Рис.7.  $\beta_2$ -распределение в индивидуальных актах  $^{16}\text{O}$ -соударений

Таблица 6

Сечения образования стабильных и нестабильных изотопов в  $^{16}\text{O}$ -соударениях при 3.25 А ГэВ/с, мбарн

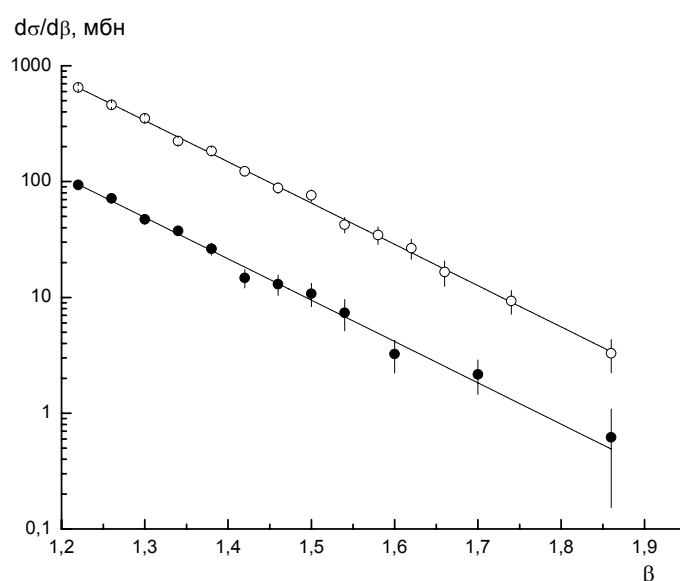
Z	A	$\sigma \pm \Delta\sigma$	Z	A	$\sigma \pm \Delta\sigma$
1	$^1\text{H}$	$594.5 \pm 5.5$	5	$^9\text{B}^*$	$5.70 \pm 0.29$
	$^2\text{H}$	$110.6 \pm 1.3$		$^{10}\text{B}$	$10.6 \pm 0.4$
	$^3\text{H}$	$45.0 \pm 1.6$		$^{11}\text{B}$	$10.9 \pm 0.4$
2	$^3\text{He}$	$45.4 \pm 1.6$		$^{12}\text{B}$	$0.51 \pm 0.42$
	$^4\text{He}$	$164.0 \pm 1.9$	6	$^{10}\text{C}$	$1.77 \pm 0.8$
	$^5\text{He}^*$	$8.40 \pm 0.50$		$^{11}\text{C}$	$9.18 \pm 0.76$
$^6\text{He}$	$1.03 \pm 0.23$	$^{12}\text{C}$		$26.3 \pm 0.8$	
3	$^5\text{Li}^*$	$8.40 \pm 0.50$		$^{12}\text{C}^*$	$9.80 \pm 0.80$
	$^6\text{Li}$	$19.0 \pm 0.8$		$^{13}\text{C}$	$9.48 \pm 0.76$
	$^7\text{Li}$	$10.6 \pm 0.8$		$^{14}\text{C}$	$3.68 \pm 0.76$
	$^8\text{Li}$	$4.80 \pm 0.76$	7	$^{13}\text{N}$	$9.40 \pm 0.79$
4	$^7\text{Be}$	$10.3 \pm 0.5$		$^{14}\text{N}$	$26.1 \pm 0.8$
	$^8\text{Be}^*$	$7.63 \pm 0.37$		$^{15}\text{N}$	$30.3 \pm 0.8$
	$^9\text{Be}$	$6.15 \pm 0.52$	8	$^{14}\text{O}$	$2.85 \pm 0.70$
	$^{10}\text{Be}$	$0.89 \pm 0.52$		$^{15}\text{O}$	$31.1 \pm 0.7$
		$^{16}\text{O}$		$13.0 \pm 0.7$	

\*)-нестабильные или возбужденные состояния

На основе аппроксимации импульсных спектров стабильных фрагментов гауссовскими функциями с использованием результатов приведенных выше процедур (определения вкладов нестабильных ядер с модами распадов включающими  $\alpha$ -частицы) были определены сечения образования всех стабильных и нестабильных ядер с  $Z=1-8$  в  $^{16}\text{O}$ -соударениях при 3.25 А ГэВ/с, представленные в таблице 6.

Из табл. 6 видно, что наибольшим инклюзивным сечением образования в ряду многозарядных фрагментов обладают  $\alpha$ -частицы, а также то, что сечения образования зеркальных ядер с массовыми числами, различающимися на  $\delta A = \pm 1$  от основного массового числа ( $A=2Z$ ), в пределах статистических погрешностей совпадают.

В пятой главе диссертации представлены результаты систематического исследования процессов образования кумулятивных протонов (С.Л. Лутпуллаевым, К. Олимовым, Б.С. Юлдашевым, В.И. Петровым, Р.Н. Бекмирзаевым и др.) и сделаны заключения о предпочтительности отдельных теоретических сценариев их формирования в  $^{16}\text{O}$ -соударениях при 3.25 А ГэВ/с, в  $\pi^-$ -С-соударениях при 40 ГэВ/с,  $p$ -С-взаимодействиях при 4.2 и 9.9 ГэВ/с,  $^4\text{He}$ - и  $\text{C}$ -столкновениях 4.2 А ГэВ/с, а также в  $p\text{Ne}$ -взаимодействиях при 300 ГэВ/с.



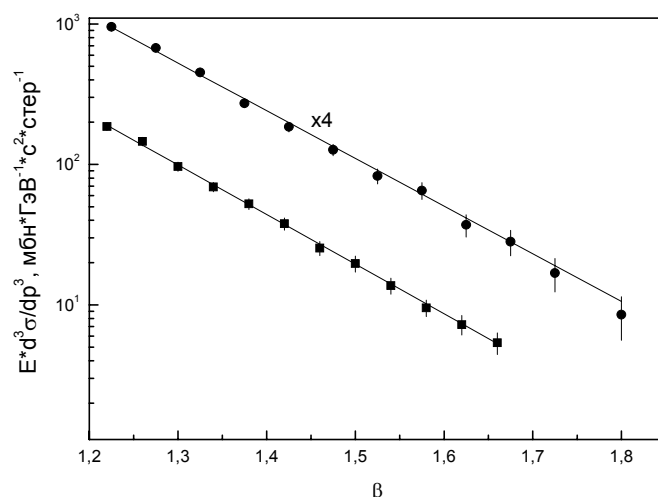
Символы: (○) – для  $\text{C}\text{C}$ -соударений при 4.2 А ГэВ/с и (●) – для  $\pi^-$ -С-соударений при 40 ГэВ/с. Прямые линии – результаты аппроксимации экспериментальных данных зависимостью вида (2)

**Рис. 8. Инклюзивные сечения протонов как функция кумулятивного числа  $\beta$  для  $\pi^-$ -С-соударений при 40 ГэВ/с)**

На рис. 8 в качестве примера приведены инклюзивные сечения образования протонов в зависимости от кумулятивного числа  $\beta$  (минимальная масса мишени, участвующей в образовании кумулятивного протона, в относительных единицах массы протона) в области  $\beta > 1.2$  для  $\text{C}\text{C}$ - и  $\pi^-$ -С-соударений при импульсах 4.2 А ГэВ/с и 40 ГэВ/с соответственно, а на рис. 9 – инвариантные инклюзивные сечения образования кумулятивных протонов для  $p^{20}\text{Ne}$ - и  $^{16}\text{O}$ -соударений.

Прямыми линиями показаны результаты аппроксимации экспериментальных данных зависимостью вида

$$f(\beta) = a \exp(-b\beta). \quad (2)$$



Символы: (●) – для  $p^{20}\text{Ne}$  и (■) – для  $^{16}\text{Op}$ -соударений при высоких энергиях.  
 Прямые линии – результаты аппроксимации экспериментальных данных зависимостью вида (2)

**Рис. 9. Инвариантное инклюзивное сечение образования кумулятивных протонов в зависимости от показателя кумулятивности  $\beta$**

Результаты аппроксимации всех экспериментальных данных по распределению протонов по числу  $\beta$  в соответствии с выражением (2) приведены в табл. 7, из которой видно, что значения параметров наклона  $b$  в пределах статистических погрешностей совпадают между собой для всех рассматриваемых типов соударений и первичных энергий. Средняя величина  $b$  по всем рассматриваемым ансамблям составляет  $8.1 \pm 0.1$ .

**Таблица 7**

**Параметры наклона в параметризации (2), тип соударений и число событий**

Тип взаимодействия, $P_0$ (ГэВ/с)	Число событий	Параметр наклона, $b$	$\chi^2/\text{ст.св.}$
$\pi^-C$ , 40.0	16657	$8.18 \pm 0.26$	1.1
$pC$ , 4.2	6901	$8.09 \pm 0.49$	1.0
$pC$ , 9.9	18325	$8.10 \pm 0.25$	0.9
$^4\text{HeC}$ , 4.2 A	12326	$8.00 \pm 0.28$	1.2
CC, 4.2 A	20530	$8.14 \pm 0.20$	0.4
$^{16}\text{Op}$ , 3.25 A	12367	$8.13 \pm 0.21$	0.4
$p^{20}\text{Ne}$ , 300	4990	$7.99 \pm 0.18$	0.8

Интересно отметить тот факт, что и инвариантные инклюзивные сечения образования кумулятивных протонов и распределения протонов по  $\beta$  в зависимости от кумулятивного числа  $\beta$  имеют экспоненциальный характер.

Таким образом, можно заключить, что механизм образования кумулятивных протонов не зависит ни от типа снаряда, ни и от первичной энергии.

Средние множественности кумулятивных протонов в кумулятивных  $^{16}\text{O}p$ - и  $p^{20}\text{Ne}$ -событиях оказались равными  $1.11 \pm 0.02$  и  $1.16 \pm 0.03$  соответственно, в то время как во взаимодействиях  $\pi^-$ -мезонов, протонов,  $\alpha$ -частиц и ядер углерода с ядрами углерода (независимо от типа налетающей частицы) эта величина равна  $1.05 \pm 0.01$ . Предварительный анализ образования кумулятивных протонов в СТа-соударениях при 4.2 А ГэВ/с дал значение ее средней множественности в кумулятивных событиях, равное  $1.79 \pm 0.06$ . Таким образом, средняя множественность кумулятивных протонов в кумулятивных событиях слабо растет с увеличением массового числа фрагментирующего ядра.

Аппроксимация А-зависимости средней множественности кумулятивных протонов выражением:  $\langle n_{\text{cum}} \rangle = a + A^\alpha$ , где  $A$  – массовое число фрагментирующего ядра,  $a$  и  $\alpha$  – параметры фитирования, дало значение  $a = -0.41 \pm 0.01$  и  $\alpha = 0.15 \pm 0.01$  при уровне достоверности более 99%. При ее аппроксимации зависимостью  $\langle n_{\text{cum}} \rangle = a + Z^\alpha$  значения параметров получаются равными  $a = -0.32 \pm 0.01$  и  $\alpha = 0.17 \pm 0.01$  также при уровне достоверности более 99%. В обеих аппроксимациях значения показателей степени близки к величине 1/6, существенно отличающейся от значения 1/3, характерного для А-зависимости средних множественностей всех протонов. Поскольку образование кумулятивных протонов связано с числом флуктуаций ядерной плотности (которое, в свою очередь, пропорционально дисперсии средней множественности), то во взаимодействующей с налетающей частицей «трубке» фрагментирующего ядра размером  $\sim A^{1/3}$  число таких флуктуаций будет пропорционально  $\langle n \rangle^{1/2}$ , а среднее число кумулятивных протонов будет пропорционально  $\sim A^{1/6}$ . В данном случае характер А-зависимости подтверждает сценарий их «холодного» образования, основанного на существовании флуктонов. Другим веским аргументом в пользу такого сценария служит независимость доли кумулятивных событий от массового числа налетающей частицы или ядра. Численные значения этих долей приведены в табл. 8.

Анализируя данные табл. 8, отметим следующее: доля кумулятивных событий не зависит от массового числа налетающей частицы (протон или ядро) для ядер-мишеней с одинаковыми А. Данные указывают на чувствительность этих долей к типу налетающей частицы (пион или система барионов).

Первое обстоятельство указывает на возможность объединения числа событий с кумулятивным протоном в разных ансамблях данных для вычисления их средней доли для барионных систем (для  $p^{12}\text{C}$ -,  $\alpha^{12}\text{C}$ - и  $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ -соударений). В нашем случае эта величина составляет  $(10.0 \pm 0.1)\%$ .

Независимость доли событий с кумулятивным протоном от размеров налетающей барионной системы может указывать на доминирующую роль однократных взаимодействий налетающих частиц с флуктонами, числа которых в соответствии с холодной моделью неизменны в нашем случае (одна и та же ядро-мишень). Поскольку взаимодействие сталкивающихся объектов является однократным, то на его характеристики будут оказывать влияние свойства первичных частиц (например, кварковый состав). Интересно в этом смысле рассмотреть отношение долей кумулятивных событий для пионов и барионных систем. Нетрудно видеть, что это отношение равно  $0.66 \pm 0.02$ , т.е.  $2/3$ , что в свою очередь совпадает с отношением чисел валентных кварков пиона и протона и указывает на реализацию кумулятивных процессов на кварк-партонном уровне.

**Таблица 8**

**Доля событий с кумулятивным протоном в зависимости от типа налетающей частицы**

Тип взаимодействия, $P_0$ , ГэВ/с	Полное число событий	Число событий с кумулятивным протоном	Доля событий с кумулятивным протоном, %
$\pi^{-12}\text{C}$ , 40.0	16657	1097	$6.6 \pm 0.2$
$p^{12}\text{C}$ , 4.2	6901	699	$10.1 \pm 0.4$
$p^{12}\text{C}$ , 9.9	18325	1825	$10.0 \pm 0.2$
${}^4\text{He}^{12}\text{C}$ , 4.2 A	12326	1211	$9.8 \pm 0.3$
${}^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ , 4.2 A	20530	2070	$10.1 \pm 0.2$
${}^{16}\text{O}_p$ , 3.25 A	12367	1496	$12.1 \pm 0.4$
$p^{20}\text{Ne}$ , 300	4990	728	$14.6 \pm 0.6$
CTa, 4.2	2440	1013	$41.5 \pm 1.5$

Таким образом, можно заключить, что зависимость инвариантных инклюзивных сечений образования кумулятивных протонов от кумулятивного числа  $\beta$  имеет универсальную закономерность, заключающуюся в независимости как от первичной энергии, так и массы фрагментирующего ядра. На основе изучения корреляций множественностей вторичных частиц и фрагментов с выходом кумулятивных протонов установлено, что средние множественности вторичных частиц и фрагментов коррелированы с выходом кумулятивного протона, но в пределах статистических погрешностей не зависят от показателя кумулятивности протона  $\beta$ .

В приложениях приведены описания алгоритмов моделирования распадов ядер кислорода на три и четыре  $\alpha$ -частицы в рамках модели

изотропного фазового пространства. Там же приведен и алгоритм расчета вклада возбужденного ядра  $^{12}\text{C}$  в канал образования трех  $\alpha$ -частиц.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые в условиях  $4\pi$ -геометрии выполнен систематический анализ образования протонов-фрагментов в  $^{16}\text{O}p$ -соударениях при  $3.25 \text{ A ГэВ/с}$  и показано, что форма импульсного спектра протонов с  $p > 0.25 \text{ ГэВ/с}$  (за исключением «испарительных»), вылетающих в переднюю полусферу в системе покоя фрагментирующего ядра, не зависит от степени его возбуждения, а форма импульсного спектра протонов, вылетающих в заднюю полусферу в системе покоя фрагментирующего ядра, сильно коррелирована со степенью его возбуждения.

Обнаружена нерегулярность в спектре кинетической энергии быстрых протонов в области  $T = 70\text{--}90 \text{ МэВ}$ , обусловленная возможным распадом двухнуклонной системы за счет поглощения ею медленного пиона.

Экспериментально оценены вклады основных механизмов образования протонов (испарительный механизм, механизм Ферми-развала возбужденного ядра-остатка и механизм прямого выбивания протонов в процессе каскадирования) и определены их статистические веса (вклады), которые соответственно составили  $27.4 \pm 0.5\%$ ,  $32.0 \pm 0.6\%$  и  $40.6 \pm 0.7\%$ .

2. На основе анализа нормированного инвариантного инклюзивного дифференциального сечения образования протонов для  $^{16}\text{O}p$ -взаимодействий при  $3.25 \text{ A ГэВ/с}$ ,  $p^{12}\text{C}$ -соударений при  $9,9 \text{ ГэВ/с}$ ,  $\pi^{-12}\text{C}$ -взаимодействий при  $40 \text{ ГэВ/с}$  и  $p^{20}\text{Ne}$ -соударений при  $300 \text{ ГэВ/с}$  сделан вывод о том, что механизм образования быстрых протонов, особенно летящих вперед, имеет универсальный характер, выражающийся в его независимости от первичной энергии, сорта налетающей частицы и типа легкого фрагментирующего ядра.

3. Впервые апробирована трехстадийная феноменологическая модель для аналитического описания распределений по множественности протонов в  $\pi^{-}\text{C}$ -соударениях при  $40 \text{ ГэВ/с}$ ,  $p^{20}\text{Ne}$ -столкновениях при  $300 \text{ ГэВ/с}$  и  $^{16}\text{O}p$ -соударениях при  $3.25 \text{ A ГэВ/с}$  и определены доли вкладов основных механизмов образования протонов – «испарительного», Ферми-развала и прямого выбивания первичным протоном и вторичными частицами. Установлено, что эти доли не зависят от энергии и массового числа фрагментирующего легкого ядра, но чувствительны к типу налетающей частицы (пион или протон), т.е. к числу их валентных кварков. Следует отметить, что значения этих долей для  $p^{20}\text{Ne}$ -столкновений при  $300 \text{ ГэВ/с}$  и  $^{16}\text{O}p$ -соударений при  $3.25 \text{ A ГэВ/с}$  совпадают с таковыми, определенными на основе анализа нормированного инвариантного инклюзивного дифференциального сечения образования протонов, образованных в  $^{16}\text{O}p$ -взаимодействиях при  $3.25 \text{ A ГэВ/с}$ .

4. В импульсном спектре «дейтронов-вперед» в системе покоя ядра кислорода в области  $0.40 < p < 0.55 \text{ ГэВ/с}$  обнаружено «плечо», которое может быть связано с механизмом слияния быстрых каскадных нуклонов,

распадами сравнительно быстрых легких фрагментов, а также с прямым квазиупругим выбиванием дейтрона из ядра кислорода протоном. Средние множественности фрагментов коррелируют с наличием дейтрона в событии, но не зависят от механизма образования дейтрона. Модель слияния (коалесценции) успешно описывает импульсный спектр быстрых дейтронов и  $\alpha$ -частиц.

5. Выполнено систематическое сравнение экспериментальных данных по фрагментации ядра кислорода в  $^{16}\text{O}p$ -соударениях при 3.25 А ГэВ/с с предсказаниями КФИМ. Установлены основные черты КФИМ, требующие изменения аксиоматики и вводимых в модель параметров для улучшения предсказательной силы КФИМ. Показано, что для реалистического описания процессов фрагментации ядер в адрон-ядерных соударениях при высоких энергиях в модели необходим учет как вкладов испарительного механизма (даже для таких легких ядер, как  $^{16}\text{O}$ ), так и механизма слияния быстрых каскадных нуклонов, а также  $\alpha$ -кластерной структуры легких ядер. Доказана необходимость учета небольшого углового момента, приобретаемого фрагментирующим ядром.

6. Исследовано образование  $\alpha$ -частиц в  $^{16}\text{O}p$ -реакциях и в различных топологических каналах развала ядер кислорода, проанализированы их импульсные и угловые спектры. Разработаны и апробированы феноменологические модели образования  $\alpha$ -частиц через нестабильные промежуточные ядра  $^8\text{Be}$ ,  $^9\text{B}$  и возбужденное ядро  $^{12}\text{C}^*$ . В частности установлено, что доминирующим каналом мультифрагментации является развал ядра кислорода с выходом ядер гелия, часть которых является продуктом распадов короткоживущих ядер  $^5\text{Li}$ ,  $^5\text{He}$ ,  $^8\text{Be}$ ,  $^9\text{B}$  и  $^{12}\text{C}^*$ .

В каналах образования трех и четырех  $\alpha$ -частиц обнаружена коллинеарность, обусловленная распадами нестабильных ядер  $^8\text{Be}$  и  $^9\text{B}$ .

Впервые количественно установлены вклады каналов от распада  $^8\text{Be}$ ,  $^9\text{B}$  и возбужденного ядра  $^{12}\text{C}^*$  в инклюзивный канал образования  $\alpha$ -частиц. Вклад распада возбужденных ядер  $^{12}\text{C}^*$  в канал образования трех  $\alpha$ -частиц составляет  $38 \pm 3.0\%$  сечения этого канала, а оставшаяся часть сечения канала реализуется через прямой Ферми-развал или квазиупругое выбивание одного  $\alpha$ -кластера из слабо связанного ядра-остатка, содержащего три  $\alpha$ -частицы.

Анализом угловых спектров двух-, трех- и четырехнуклонных фрагментов получено указание на наличие углового момента у фрагментирующего ядра-остатка; эффект усиливается при переходе от легкого фрагмента к более тяжелым.

7. Впервые в условиях полной геометрии измерены сечения образования стабильных и нестабильных изотопов с зарядом  $Z=1-8$  в  $^{16}\text{O}p$ -соударениях при 3.25 А ГэВ/с. Показано, что сечения образования зеркальных ядер с массовыми числами, различающимися на  $\Delta A = \pm 1$  от основного массового числа, определяемого как  $A = 2Z$ , в пределах статистических погрешностей совпадают. В пределах статистических погрешностей также совпадают сечения выходов нестабильного изотопа  $^9\text{B}$  и зеркального ему стабильного



изотопа  ${}^9\text{Be}$ . Наблюдаемая закономерность распространяется и на зеркальные ядра ( ${}^{15}\text{N}$ ,  ${}^{15}\text{O}$ ), образовавшиеся в результате потери одного нуклона исходного ядра  ${}^{16}\text{O}$  в периферических соударениях с протоном-мишенью.

8. Впервые проведен комплексный сравнительный анализ процессов образования кумулятивных протонов в  ${}^{16}\text{O}p$ -соударениях при 3.25 А ГэВ/с, в  $p^{12}\text{C}$ -взаимодействиях при 4.2 ГэВ/с и 9,9 ГэВ/с, в  $\pi^{-12}\text{C}$ -взаимодействиях при 40 ГэВ/с и в  $p^{20}\text{Ne}$ -соударениях при 300 ГэВ/с, в  $\alpha^{12}\text{C}$ - и  ${}^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ -соударениях при 4.2 А ГэВ/с и показано, что значение параметра наклона распределений инвариантных дифференциальных инклюзивных сечений образования кумулятивных протонов по  $\beta$  демонстрирует универсальный характер («ядерный скейлинг»), заключающийся в его независимости от типа снаряда, мишени и первичной энергии. Установлена независимость средней множественности кумулятивных протонов в кумулятивных событиях для одного и того же ядра-мишени от первичной энергии и типа снаряда. Показано, что образование кумулятивных протонов происходит преимущественно по сценарию «холодной» модели. Установлено отсутствие корреляций между механизмами образования кумулятивных протонов и вторичных частиц и фрагментов.

9. Установлена независимость механизмов формирования легких фрагментов. Наблюдаемые в эксперименте корреляционные явления являются следствием действия законов сохранения энергии-импульса, электрического и барионного зарядов в процессах фрагментации ядер.

Общий итог проведенных работ сводится к систематическому и комплексному исследованию процессов фрагментации легких ядер в широком диапазоне первичных энергий с помощью единой методики. Подавляющая часть данных, включенных в эту диссертацию, получена впервые, и эти данные позволяют глубже и детальнее понять особенности и свойства ядер, фрагментирующих под действием частиц высоких энергий и релятивистских ядер.

Поставленные в диссертационной работе задачи по комплексному экспериментальному и феноменологическому исследованию процессов фрагментации и выяснению основных механизмов образования протонов и легких фрагментов в  $\pi^{-}$ ,  $p, \alpha, \text{C}(\text{C})$ - и  $p({}^{16}\text{O}, {}^{20}\text{Ne})$ -соударениях в интервале первичных энергий 3–300 ГэВ решены полностью.

Результаты диссертационной работы дают обширный экспериментальный материал для проверки адекватности теоретических моделей и подходов к проблеме фрагментации ядер в адрон- и ядро-ядерных соударениях при высоких энергиях, и могут быть использованы при планировании и проведении новых экспериментов на ускорителях ионов.

Данные о сечениях образования стабильных и нестабильных изотопов, полученных во взаимодействии ядер кислорода с протонами при высоких энергиях могут найти применение в космофизических и космохимических исследованиях для выяснения особенностей протекания космогенного нуклеосинтеза.



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

---

**INSTITUTE of NUCLEAR PHYSICS**

**BOZOROV ERKIN**

**THE PROCESSES OF FRAGMENTATION OF OXYGEN NUCLEI IN  
INTERACTIONS WITH PROTONS AT 3.25 A GeV / c AND  
MECHANISMS OF FORMATION OF PROTONS IN  $\pi^-$ , p,  $\alpha$ , C (C) AND  
p( $^{16}\text{O}$ ,  $^{20}\text{Ne}$ ) COLLISIONS AT 3–300 GeV**

**01.04.08- ATOMIC NUCLEUS AND ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS.  
ACCELERATORY FACILITIES  
(physical and mathematical sciences)**

**ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION**

**Tashkent – 2015**

**The Post Doctorate thesis has been registered with the number 30.09.2014/B2014.5.FM156 at the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan.**

Doctoral dissertation is carried out at the Physical-Technical Institute SPA "Physics-Sun" and the Institute of Nuclear Physics.

The full text of doctoral dissertation is placed on web page of Scientific council on award of scientific degree of doctor of sciences 16.07.2013.FM.11.01 at the Institute of Nuclear Physics and National University of Uzbekistan to address [www.inp.uz](http://www.inp.uz).

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

**Scientific consultant:**

**Yuldashev Bekhzod Sadykovich**

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

**Official opponents:**

**Lednický Richard**

doctor of sciences in physics and mathematics, professor

**Burtebayev Nassurlla**

doctor of sciences in physics and mathematics, professor

**Artemov Sergey Viktorovich**

doctor of sciences in physics and mathematics

**Leading organization:**

**Institute of Applied Physics of the National University of Uzbekistan**

Defense will take place on « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 at \_\_\_\_\_ at the meeting of Scientific council 16.07.2013.FM.11.01 at Institute of Nuclear Physics and National University of Uzbekistan to address: INP, Ulugbek, Tashkent, tel.: (+99871)150-30-70; fax: (+99871)150-30-80; e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz)).

The doctoral dissertation is registered at Information-resource centre of Institute of Nuclear Physics, number \_\_\_, it is possible to review it in the IRC (100214, INP, Ulugbek, Tashkent, tel.: (+99871) 289-31-19).

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

**U.S.Salikhbaev**

Chairman of scientific council on award of scientific degree of doctor of sciences, D.Ph.M.S., professor

**R.Yarmukhamedov**

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

**I.Khidirov**

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

## ANNOTATION OF DOCTORAL DISSERTATION

**Topicality and demand of the theme of dissertation.** The establishment of regularities of fragmentation of relativistic nuclei in interactions with hadrons and nuclei is one of the fundamental problems of relativistic nuclear physics. Herewith, the experimental and phenomenological investigations of the processes of fragmentation of relativistic nuclei in hadron- and nucleus-nucleus collisions, allowing one to obtain the important information about cluster structure of the fragmenting nuclei (especially the light ones), its influence on cross-section of formation and content of fragments, as well as about contributions of different processes in their yield, play an important role. At collision energies of several GeV/nucleon, the fragmentation of nuclei is a dominant process accounting for about 80% of the reaction total cross-section. It is of special interest to study experimentally the processes of fragmentation of light relativistic even-even nuclei, such as  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ , and  $^{20}\text{Ne}$ , because we expect the dominant manifestation of an  $\alpha$ -cluster structure in these nuclei.

We still do not have the answer to the question whether the  $\alpha$ -cluster structure is stationary or dynamic one manifesting itself at some definite levels of excitation of the fragmenting light nucleus, especially of the even-even nucleus. The effective method of testing the  $\alpha$ -cluster structure of the fragmenting nucleus is the study of formation of  $\alpha$ -particles at different levels of excitation of the projectile nucleus.

Also, it is of some definite interest to discover the strongly correlated few nucleon associations and multibaryon clusters in nuclei, existence of which was predicted by several models based on the quark-parton structure of hadrons. The solution of this problem is directly related with the experimental investigation of the processes of formation of particles in the kinematical region, forbidden for the particles formed in collisions of free nucleons, in hadron- and nucleus-nucleus collisions at high energies.

Due to above, it is of topical interest to conduct the systematic and complex study of nucleus fragmentation with identification of all possible fragments and secondary produced particles, and to measure precisely and determine their kinematical characteristics in wide ranges of collision energies and mass numbers of colliding nuclei on statistically rich experimental material to allow one to extract the new regularities of nucleus fragmentation.

It is of demand to obtain the precise data on cross-sections of formation of all possible isotopes of fragmenting nuclei, necessary for working out and testing the theoretical models and approaches for description of the phenomenon of nucleus fragmentation, and also for modeling the interaction of the primary cosmic radiation with nuclei of atmosphere. Besides, the experimental data on the mean multiplicity (inclusive cross-sections) of light fragments – protons, deuterons, tritium and helium-3 nuclei, formed in interactions of relativistic nuclei with hydrogen are of extreme demand for solution of one of the important problems of astrophysics – the passage of flux of particles through the interstellar medium.

**Conformity of research to priority directions of development of science and technologies of the Republic of Uzbekistan.** The dissertation is carried out in accordance with the priority directions of science and technologies development: the state scientific and technical program of basic researches F2 - "Physics, Astronomy, Power engineering and engineering industry".

**Review of international scientific researches on dissertation subject.** Study of the processes of fragmentation of relativistic light nuclei and formation mechanisms of protons, including cumulative and light fragments are held at the Joint Institute for Nuclear Research, P.N. Lebedev Institute of Physics and V.G. Khlopin Radium Institute of the Russian Academy of Sciences (Russia), Lawrence Berkley Laboratory of University of California and the Department of Physics at Washington University (USA), the German Federal Ministry on Research and Technologies (Germany), Physics Department of Lund University (Sweden), the Institute of Experimental Physics of Slovak Academy of Sciences (Slovakia) and other research centers that are part of international collaborations EMU01 and EMU02.

The International Collaboration BECQUEREL, based on the Nuclotron of Laboratory of High Energies of the Joint Institute for Nuclear Research defined cluster structures of light nuclei ( $A = 6-12$ ) and their dependence on the mass number of the fragmenting nucleus and even or odd number of protons and neutrons in them. Scientists of the Lawrence Berkley Laboratory, University of California, USA, in interactions of high-energy light nuclei  $\alpha$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$  and  $^{16}\text{O}$  with light and heavy nuclei determined cross-sections for the isotopes emitted at angles  $\theta < 0.72^\circ$ . The International Collaborations EMU01 and EMU02 tested the hypothesis of limiting fragmentation and estimated critical energy density for the implementation of phase transition "liquid-gas" in nuclear matter.

A review of international research has shown that very little experimental information is received on the priority areas of the internationally conducted studies in the field of relativistic nuclear physics: The establishment of general regularities of nuclear fragmentation process; establishment of mechanisms for the formation of protons in the nuclear collisions. In particular: cross-sections of the formation of stable and unstable isotopes, as well as the contributions of intermediate unstable nuclei to the  $\alpha$ -particles production cross-section are not defined. Also, influence of original (cluster) structure of fragmenting nucleus on yield of isotopes and their composition is not examined and defined contribution basic mechanisms of formation of protons, including the nature of the origin (genesis) of cumulative protons is not identified.

**Degree of study of the problem.** At present, leading international scientists carried out a large number of the experimental and theoretical investigations dedicated to the processes of multiple generation of particles and fragmentation of relativistic nuclei in interactions with hadrons and nuclei, although the set of some fundamental problems still remains unsolved, including:

In the works of Azimov S.A., Yuldashev B.S., Luptullaev S.L. and Swedish scientists (Andersson Bo, Otterlund I. and Stenlund E.) proton production in high-

energy hadron-nuclear collisions was studied. However, the obtained results did not allow them to carry out detailed studies of protons production and to establish mechanisms of their formation.

The Russian scientists (Zarubin P.I., Rusakova V., Peresad'ko N.G., Artemenkov D.A. and others) have carried out intensive researches on cluster structure of light nuclei in peripheral collisions with emulsion nuclei. But they could not determine production cross-sections for all possible isotopes, formed in fragmentation of nuclei and to establish mechanisms of their fragmentation.

The US scientists (Heckman H.H., Greiner D.E., Lindstrom P.J. and others) studied production of various  $\alpha$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$  and  $^{16}\text{O}$  light nuclei isotopes in collisions with  $^9\text{Be}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{108}\text{Ag}$  and  $^{207}\text{Pb}$  nuclei at high energies by means of electronic method under small angles of outgoing fragments. Limited angular coverage in determination of outgoing fragments did not allow them to obtain total yield cross-sections for these isotopes and to establish more accurately mechanisms of their production.

Formation of cumulative protons in hadron- and nuclear-nuclear collision was studied by G.A. Laksin, Yu.A. Bayukov, V.B. Liubimov, D. Armutliyskiy, A.M. Baldin and others. However, lack of available experimental data and its scattered character did not allow them to identify mechanisms of cumulative protons formation in collisions with nuclei at high energies. Thus, formation of cumulative protons in high-energy hadron-nuclear collisions is not solved yet.

The closest by topic to the studied problems is the dissertation of Olimov K., in which general characteristics of oxygen nuclei fragmentation process in interactions with protons at 3.25 A GeV/c were obtained; multiplicities of single- and multi-charged fragments were studied without separation by mass; oxygen nuclei decomposition topological channel cross-sections were determined; indications obtained showing that the experimentally observed narrow angular correlations between pairs of  $\alpha$ -particles can be a result of production and decay of non-stable  $^8\text{Be}$  and  $^9\text{B}$  nuclei, although their quantitative contributions to  $\alpha$ -particles production cross-sections were not determined; the isotope composition of fragments with charges from 1 to 7 was determined, but their formation cross-sections were not measured. Production of protons including cumulative and light fragments produced in  $^{16}\text{O}$ -collisions at 3.25 A GeV/c is still to be studied. Also, oxygen nuclei breakup processes at peripheral collisions with protons were not studied.

**Connection of dissertational research with the plans of scientific-research works** is reflected in the following projects:

2F-1.2.1. "Investigation of mechanisms of fragmentation of relativistic oxygen nuclei in interactions with nucleons" (2000-2002),

F-2.1.26 "Investigation of the processes of multiparticle generation, fragmentation and states of a nuclear matter in collisions of hadrons and nuclei with nuclei at high energies" (2003-2007),

F2-F029 "Investigation of the nuclear matter structure and collective effects at interactions of hadrons and nuclei with nuclei at high energies" (2007-2011).

**The aim of research** is to obtain a qualitatively new and quantitative information about the process of fragmentation of oxygen nuclei in interactions with protons at 3.25 A GeV/c and the establishment of the basic mechanisms of formation of protons, including cumulative in  $\pi^-$ , p,  $\alpha$ , C(C) and p( $^{16}\text{O}$ ,  $^{20}\text{Ne}$ ) collisions in the range of primary energies 3–300 GeV.

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

improvement of the procedures of identification of protons and positive pions for obtaining precise data on their multiplicities and kinematical (angular and momentum) characteristics;

accounting for the losses of various types of particles with short tracks ( $L < 4$  cm) in the 2 m propane bubble chamber;

extraction of the separate classes of inelastic interactions in the set of p( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) collisions at 4.2 and 9.9 GeV/c,  $\pi^-$ ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) interactions at 40 GeV/c, p( $\text{NeH}_2$ ) collisions at 300 GeV/c,  $\alpha$ ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), and C( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) interactions at 4.2 A GeV/c;

analysis of multiplicity and momentum spectra of proton fragments in  $\pi^-$ , p,  $\alpha$ , C (C) and p( $^{16}\text{O}$ ,  $^{20}\text{Ne}$ ) collisions and determination of contributions of main mechanisms of proton formation;

investigation and establishment of regularities of formation of light nuclei with mass numbers  $A=2$  and 4 in  $^{16}\text{O}$ p collisions at 3.25 A GeV/c;

study of formation of  $\alpha$ -particles, working out the phenomenological models of determination of contributions of unstable nuclei  $^8\text{Be}$  and  $^9\text{B}$  and excited carbon-12 nuclei into inclusive cross-section of formation of helium-4 nuclei in  $^{16}\text{O}$ p collisions at 3.25 A GeV/c;

the experimental determination of the cross-sections of formation of stable and unstable isotopes with the charges 1-8 in  $^{16}\text{O}$ p collisions at 3.25 A GeV/c;

the detailed investigation of formation of cumulative protons in interactions of  $\pi^-$  mesons, protons,  $^4\text{He}$ , and  $^{12}\text{C}$  nuclei with carbon nuclei and of protons with neon and oxygen nuclei at high energies for discovery of the strongly correlated few nucleon associations and multibaryon states in nuclei.

**Object of research** is the nuclear processes, induced by hadrons and nuclei at high energies.

**Subject of research** is the processes of fragmentation of nuclei, formation of protons, including the cumulative ones.

**Methods of research.** An inclusive approach to the formation of particles and fragments in nuclear interactions at high energies using the methods of mathematical statistics; the experimental methods of analysis of film information, obtained from bubble chambers, irradiated by the beams of relativistic hadrons and nuclear in the strong magnetic field.

**Scientific novelty of the dissertational research** is as following results done for the first time:

for the first time, stable and non-stable isotopes formation cross-sections were precisely measured for isotopes with  $Z = 1-8$  in  $^{16}\text{O}$ p-collisions at 3.25 A GeV/c, and it was shown that mirror nuclei formation cross-sections coincide within statistical errors;



in  $\pi^-C$ -,  $p^{20}Ne$ -  $^{16}Op$ -collisions at 40 GeV/c, 300 GeV/c and 3.25 A GeV/c, respectively, contribution from major proton production mechanisms was estimated by means of semi-empirical method. It was demonstrated that these contributions do not depend on the energies and mass numbers of fragmenting light nucleus and are sensitive to the type of incident particle (pion or proton);

it was established that the mechanisms of formation of fast protons ( $p > 0.25$  GeV/c) in  $^{16}Op$ ,  $p^{12}C$ ,  $\pi^{-12}C$ ,  $p^{20}Ne$  collisions at 3.25 A GeV/c, 9.9 GeV/c, 40 GeV/c, and 300 GeV/c, respectively, do not depend on the primary energy, type of the impinging particle or the light fragmenting nucleus, as well as the degree of excitation of the fragmenting nuclei (nuclear scaling);

the main mechanisms of deuteron formation, connected with the fusion of the cascade nucleons, Fermi breakup of the excited remnant nucleus, breakups of the comparatively fast light fragments and direct quasi-elastic knocking out the deuterons from oxygen nuclei by protons, in  $^{16}Op$  collisions at 3.25 A GeV/c were established;

the cross-sections of formation of the intermediate states of ( $^8Be$ ,  $^9B$ ,  $^{12}C^*$ ) nuclei in  $^{16}Op$  collisions at 3.25 A GeV/c and their contributions along with  $^5He$ ,  $^5Li$  nuclei to the inclusive cross-section of formation of  $\alpha$ -particles were determined. The contribution of the breakup of the excited  $^{12}C^*$  nuclei to the channel of formation of three  $\alpha$ -particles was determined to be  $(38 \pm 3)\%$  of the cross-section of this channel;

it was proved that the formation of cumulative protons in  $^{16}Op$ ,  $p^{12}C$ ,  $\pi^{-12}C$ ,  $p^{20}Ne$ ,  $\alpha^{12}C$ , and  $^{12}C^{12}C$  collisions at 3.25 A GeV/c, 4.2 GeV/c, 9.9 GeV/c, 40 GeV/c, 300 GeV/c, and 4.2 A GeV/c, respectively, occurs through the collision of the impinging hadron with “fluctons”, formed as a result of fluctuation of the nucleon density of a nucleus in its ground state.

**Practical results** of the research are as follows:

The unique bank of the precise experimental data on cross-sections of formation of stable and unstable isotopes of oxygen nuclei, the contributions of breakups of various unstable nuclei to formation of  $\alpha$ -particles in interactions of oxygen nuclei with protons at 3.25 A GeV/c, as well as on contributions of the main mechanisms of proton formation in hadron- and nucleus-nucleus collisions at high energies, was created. These experimental data can be used for working out the theoretical models and approaches for description of the phenomenon of fragmentation of nuclei, and also for the modeling of interaction of the primary cosmic irradiation with the atmosphere nuclei. The experimental data obtained on various characteristics of light fragments – protons, deuterons, tritium and helium-3 nuclei, formed in interactions of the relativistic oxygen nuclei with the hydrogen, are also of a practical interest for solving one of the important problems of astrophysics – a passage of fluxes of particles through the interstellar medium.

**Reliability of the obtained results** is justified, first of all, by the large statistics (more than 93 000 events) of the experimental material, the more precise determination of the charge and identification of particles and fragments by mass, and also by the measurement with a high precision of their emission angles and

momenta; application of the commonly accepted statistical methods of analysis of the experimental data, and also use of both the inclusive and exclusive approaches for the result interpretation; agreement of the obtained experimental data with the results of other experiments and main conclusions of the theoretical works, devoted to the problem of a nucleus fragmentation.

**Theoretical and practical significance of the results of research.** The experimental data of the dissertation work are necessary for a creation of the world bank of the nuclear data, for testing the theoretical models and approaches on problem of a nucleus fragmentation in hadron- and nucleus-nucleus collisions at high energies, and can also be used for planning and conducting of new experiments at ion accelerators. Data on cross-sections of the formation of stable and unstable isotopes of oxygen nuclei can find its application at astro and cosmic physics investigations.

**Application of the research results.** The experimental data on the cross-sections of unstable nuclei  $^8\text{Be}$  and  $^9\text{B}$  and methods for determining the contributions of these nuclei in the inclusive cross-section for the  $\alpha$ -particles were used within the framework of the International Collaboration BECQUEREL while modeling and planning the experiment on investigation of the cluster structure of light nuclei in peripheral interactions of nuclei with nuclear emulsion on the Nuclotron of the Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russia) (2009–2011, number 02-1-1087) (Letters from the Joint Institute for Nuclear Research of February 6, 2015, and the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan number 2/1255-289 of March 9, 2015).

**Approbation of the work.** Results of research are approved at 10 scientific conferences, including 6 International Conferences: V International Conference «Modern Problems of Nuclear Physics» (Samarkand, 2003), III Eurasian conference «Nuclear Science and its Applications» (Tashkent, 2004), International conference «Nuclear Science and its Applications» (Samarkand, 2012), XII International Conference «Physics of High energy, the Nuclear Physics and Accelerators» (Kharkov, 2014), 64<sup>th</sup> International Conference “Fundamental Problems of Nuclear Physics, Atomic Energy and Nuclear Technologies” (Minsk, 2014), XXII International Baldin seminar on problems of high energy physics (Dubna, 2014); and at 4 Republic Conferences: «Fundamental and Applied Problems of Physics» (Tashkent, 2004, 2006, 2013), «Physics in Uzbekistan» (Tashkent, 2005).

The results of dissertation work were reported at the scientific seminar of Physical-Technical Institute of SPA “Physics-Sun” (2008, 2009), at scientific seminar of the Institute of Nuclear Physics (2012, 2014), at the joint seminar of Physical-Technical Institute of SPA “Physics-Sun” and the Institute of Nuclear Physics of Uzbek Academy of Sciences (2012, 2015), at the scientific seminar of the Scientific Research Institute of Applied Physics at National University of Uzbekistan (2014).

**Publication of results.** Dissertation is based on 34 published scientific works, including 18 scientific papers, 6 international publications and 12

publications at local scientific journals, 13 publications in the proceedings of scientific conference and thesis, 3 preprints.

**Structure and volume of dissertation.** Dissertation consists of Introduction, five chapters, conclusions, the list of the cited literature consisting of 155 items, two appendices, and contains 182 pages of the main text, 34 figures, and 16 tables.

## MAIN CONTENTS of DISSERTATION

**In introduction**, the analysis of the main results, obtained in the last years on hadron- and nucleus-nucleus collisions at high energies, for the multiparticle generation and fragmentation of nuclei is given, and the aim and the main problems considered in the dissertation work are formulated.

**In the first chapter** of dissertation, the main characteristics of 1 meter hydrogen bubble chamber and of a beam are presented, and a brief description of a methodology of treatment and analysis of film information is given. The brief description of the experimental material, obtained with the help of 2 meter propane and 30 inch neon – hydrogen bubble chambers, is also given in this chapter.

Statistics of the measured events for the considered types of collisions and primary momenta are shown in table 1.

**Table 1**

**Information about the experimental material**

Type of Interaction	P <sub>o</sub> , A GeV/c	Total number of events
<sup>16</sup> Op	3.25	13500
π <sup>-12</sup> C	40.0	16657
p <sup>12</sup> C	4.2	6901
p <sup>12</sup> C	9.9	18325
<sup>4</sup> He <sup>12</sup> C	4.2	12326
<sup>12</sup> C <sup>12</sup> C	4.2	20530
p <sup>20</sup> Ne	300	5000
The total number of events		<b>93239</b>

**The second chapter** is devoted to the detailed investigation of formation of protons in <sup>16</sup>Op interactions at 3.25 A GeV/c, pC collisions at 4.2 and 9.9 GeV/c, p<sup>20</sup>Ne collisions at 300 GeV/c, αC, and CC collisions at 4.2 A GeV/c (conducted jointly with the coauthors: Glagolev V.V., Olimov K., Yuldashev A.A., Yuldashev B.S., etc.).

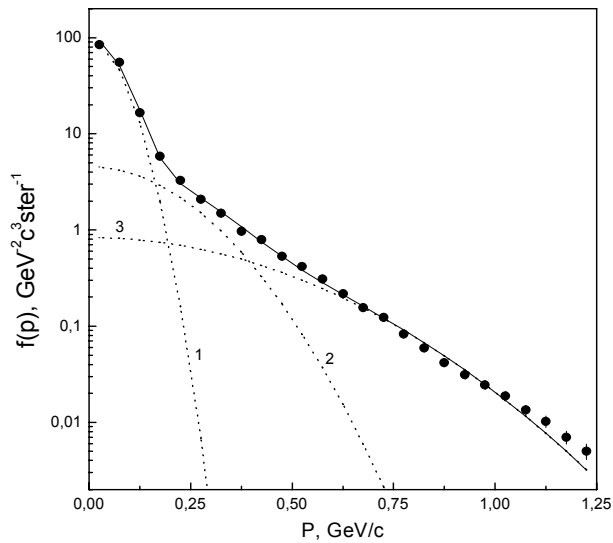
Analysis of the normalized invariant inclusive differential cross-sections of formation of protons versus their momentum showed that it is described rather well by the combination of three Gauss functions:

$$f(p) = a_1 \exp(-b_1 p^2) + a_2 \exp(-b_2 p^2) + a_3 \exp(-b_3 p^2), \quad (1)$$

where  $a_i$  and  $b_i$  are fitting parameters.

Figure 1 shows, as an example, the normalized invariant inclusive differential cross-sections for the formation of all protons, formed in  $^{16}\text{O}p$  collisions at 3.25 A GeV/c, in the system of rest of the oxygen nucleus along with the contributions of each term given in expression (1).

A solid line (fig. 1) corresponds to the combined contribution of three terms, pertaining to the proton formation via the «evaporation» mechanism (curve 1), mechanism of Fermi breakup (curve 2), and the mechanism of direct knocking out by the target protons or secondary particles (curve 3). The contributions of these mechanisms proved to be  $(27.4 \pm 0.5)\%$ ,  $(32.0 \pm 0.6)\%$ , and  $(40.6 \pm 0.7)\%$ , respectively.



**Fig.1. Normalized invariant inclusive differential cross-sections of formation of protons in  $^{16}\text{O}p$  collisions at 3.25 A GeV/c as a function of momentum**

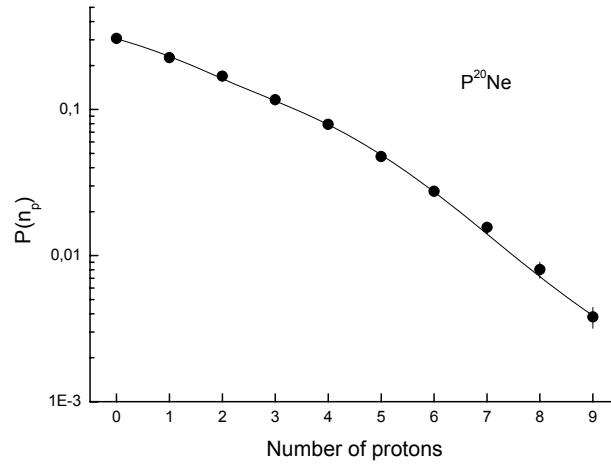
For the protons, emitted into the forward hemisphere, the values of the slope parameters  $b_2$  and  $b_3$  coincide within the statistical errors in  $^{16}\text{O}p$  and  $p^{20}\text{Ne}$  collisions. Besides it, for the protons, flying into the forward hemisphere in  $p^{12}\text{C}$  collisions at 4.2 GeV/c, the value obtained for a second slope parameter ( $b_2$ ) coincided within the statistical uncertainties with the corresponding values obtained for  $^{16}\text{O}p$  and  $p^{20}\text{Ne}$  collisions.

Therefore, we can conclude that the mechanism of formation of fast protons, especially of those emitted into the forward hemisphere, has the universal character, expressed by its independence from the primary energy and type of the light fragmenting nucleus.

For the first time, we tested a simple phenomenological model for the description of proton distributions on their multiplicity in  $\pi^-C$  interactions at 40 GeV/c and  $p^{20}\text{Ne}$  collisions at 300 GeV/c. In this simple model, the main mechanisms of protons formation are as follows: knocking out the protons by a projectile particle in the process of multiple scattering on the nucleons of a nucleus; breakup of the excited remnant nucleus (Fermi breakup), formed after

intranuclear collisions caused by a primary particle; «evaporation» of the initial nucleus at the peripheral collisions or de-excitation of many nucleon fragments, resulted from a decay of the excited remnant nucleus.

Figure 2 shows, as an example, the experimental distribution of protons on their multiplicity for  $p^{20}\text{Ne}$  collisions at 300 GeV/c and the results of calculations using the above mentioned simple phenomenological model. The model reproduces very well the experimental distribution of protons on their multiplicity in  $p^{20}\text{Ne}$  collisions ( $\chi^2 = 3.8$  per 7 degrees of freedom, which corresponds to the more than 80% level of statistical significance).



**Fig. 2. Multiplicity distribution for protons in  $p^{20}\text{Ne}$ - collisions (●) at 300 GeV/c, solid line – results of approximation by the phenomenological model**

In table 2, the final results (taking into account the loss of slow and fast protons) for the contributions of the above mentioned mechanisms of the proton formation in  $\pi^-C$  interactions at 40 GeV/c and  $p^{20}\text{Ne}$  collisions at 300 GeV/c along with the corresponding data obtained in  $^{16}\text{Op}$  collisions at 3.25 A GeV/c are presented.

**Table 2**

**Contributions of mechanisms of proton formation in  $\pi^{-12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{Op}$ , and  $p^{20}\text{Ne}$  collisions at high energies**

Type of contribution	Type of interaction		
	$\pi^{-12}\text{C}$	$p^{16}\text{O}$	$p^{20}\text{Ne}$
«Evaporation»	$0.22 \pm 0.01$	$0.27 \pm 0.01$	$0.28 \pm 0.01$
Fermi Breakup	$0.43 \pm 0.02$	$0.32 \pm 0.01$	$0.31 \pm 0.01$
Knocking out	$0.35 \pm 0.02$	$0.41 \pm 0.02$	$0.41 \pm 0.02$

One can see from table 3 that, in case of  $^{16}\text{Op}$  and  $p^{20}\text{Ne}$  collisions, we observe a practical independence of the relative contributions of different mechanisms of proton formation from the energy and mass number of the

fragmenting nucleus. Some differences, observed for these values in  $\pi^{-12}\text{C}$  collisions, are probably due to the smaller cross-section of  $\pi^- \text{N}$  interactions, which leads to the lesser contribution for the mechanism of knocking out the protons.

Therefore, we can conclude, that the fractions of contributions of different mechanisms of proton formation are independent from the energy and mass number of the light fragmenting nucleus, but they are sensitive to the type of a projectile particle (pion or proton).

**In the third chapter**, the experimental results of investigation of formation of deuterons, tritium and helium-3 nuclei in  $^{16}\text{O}p$  collisions at 3.25 A GeV/c with the data on correlations between the formation of these nuclei and the yield of the other types of the charged secondary fragments and particles are presented (conducted jointly with the coauthors: Glagolev V.V., Olimov K., Lutpullaev S.L., Yuldashev A.A., Yuldashev B.S. etc.). In table 3, the mean multiplicities and inclusive cross-sections of formation of the light fragments with  $A \leq 3$  are shown in experiment and CFEM.

One can see that the inclusive cross-section of formation of the deuterons equals about 20% of the cross-section of proton formation and is approximately 2.4 times larger than the cross-section of formation of the «mirror»  $^3\text{H}$  and  $^3\text{He}$  nuclei. The mean multiplicity for  $^2\text{H}$  and  $^3\text{H}$  nuclei, calculated using Cascade-Fragmentation-Evaporation model (CFEM), is  $\approx 1.4$  times smaller than the corresponding experimental data.

**Table 3**

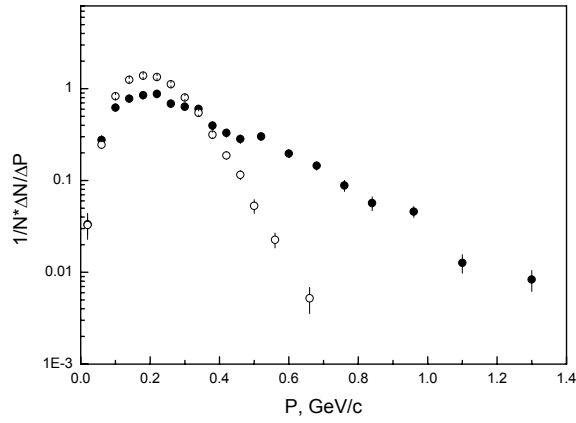
**Mean multiplicities  $\langle n_f \rangle$  and inclusive cross-sections  $\sigma_{in}$  (mbn) for the yield of light fragments of  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ , and  $^3\text{He}$  nuclei in experiment and CFEM**

Fragment type	$^1\text{H}$	$^2\text{H}$	$^3\text{H}$	$^3\text{He}$
$\langle n_f \rangle$ (exper.)	$1.78 \pm 0.02$	$0.331 \pm 0.007$	$0.141 \pm 0.005$	$0.142 \pm 0.005$
$\langle n_f \rangle$ (CFEM)	$1.75 \pm 0.01$	$0.249 \pm 0.003$	$0.108 \pm 0.001$	$0.152 \pm 0.002$
$\sigma_{in}$ (exper.)	$594.5 \pm 5.5$	$110.6 \pm 2.3$	$47.1 \pm 1.6$	$47.4 \pm 1.6$
$\sigma_{in}$ (CFEM)	$584.5 \pm 2.2$	$83.2 \pm 1.2$	$36.1 \pm 0.7$	$50.8 \pm 0.8$

Therefore, the mechanisms of formation of  $^2\text{H}$  and  $^3\text{H}$  nuclei, included into CFEM structure, are not enough for the description of the existing set of the experimental data for these nuclei.

In the experimental distribution of deuterons on their total momentum in the rest system of the oxygen nucleus (fig.3), an irregularity is observed in region  $p = 0.40\text{--}0.55$  GeV/c, which is absent in CFEM calculations.

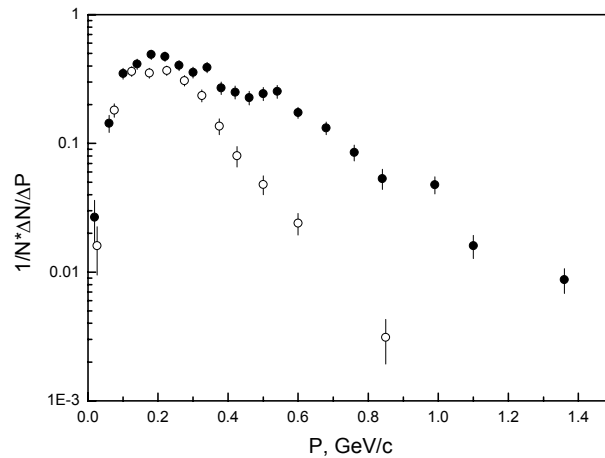
From the comparison of two spectra, we can conclude that CFEM overestimates formation of deuterons in region  $0.10 < p < 0.35$  GeV/c, and underestimates the experimental data in region  $p > 0.4$  GeV/c. Such disagreement is connected with the fact that the mechanism of fusion of fast cascade nucleons is neglected in the model.



● – experimental data, ○ – CFEM predictions

**Fig. 3. Distribution of deuterons on their total momenta in the rest system of the oxygen nucleus**

To clarify the reasons for appearance of irregularities in the momentum spectrum of deuterons in region  $p = 0.40\text{--}0.55$  GeV/c, we studied separately the momentum distributions of deuterons, emitted into the forward and backward hemispheres in the rest frame of the oxygen nucleus (see fig. 4).



● – for deuterons, moving into the forward hemisphere; ○ – for deuterons, moving into the backward hemisphere

**Fig. 4. Distribution of deuterons on their total momentum in the system of rest of the oxygen nucleus**

It is visible that the momentum spectrum of deuterons, emitted into the backward hemisphere, does not have any peculiarity and demonstrates a single mode character. Momentum spectrum of deuterons, emitted into the forward hemisphere, is rather hard and the above mentioned irregularity is clearly expressed in region  $p = 0.40\text{--}0.55$  GeV/c. It can be due to the superposition of two mechanisms, having the different mean values of momenta. Probably, such an effect is connected with different mechanisms of formation of deuterons, emitted

into the forward and backward hemispheres. For formation of deuterons, emitted into the backward hemisphere, the main contribution is given by the so called «evaporation» mechanism and mechanism of Fermi breakup. For formation of deuterons, emitted into forward hemisphere, besides of the above mentioned mechanisms, there also exist contributions from the mechanisms of fusion of cascade nucleons, decays of the relatively fast excited light fragments, and also a direct knocking out the deuterons from the oxygen nuclei, which could be the reason for a hardness and appearance of irregularities in their momentum spectrum.

The study of correlations between the yield of deuterons and formation of other fragments (table 4) shows that, in the events with formation of deuterons, the mean multiplicity of fragments with  $Z \leq 4$  is larger and those of fragments with  $Z \geq 5$  is smaller compared to the events with absence of deuterons.

**Table 4**

**Mean multiplicities of fragments in the events with and without deuteron formation**

$n_d$	Charge of fragment						
	1	2	3	4	5	6	7
0	1.37±0.03	0.56±0.01	0.063±0.003	0.035±0.002	0.076±0.003	0.216±0.005	0.247±0.006
≥1	2.47±0.04	1.06±0.02	0.12±0.01	0.054±0.005	0.067±0.006	0.126±0.008	0.022±0.003

Based on the study of these correlations for the deuterons emitted into the forward and backward hemispheres, it is shown that mechanism of deuteron formation is not connected with a presence or absence of the other fragments or charged particles in an event, which means that the correlations observed are not sensitive to the mechanism of deuteron formation.

**In the fourth chapter**, the results of the study of the mechanisms of formation of  $^4\text{He}$  nuclei in the processes of fragmentation of relativistic oxygen nuclei in interactions with protons at 3.25 A GeV/c are presented (conducted jointly with the coauthors: Glagolev V.V., Olimov K., Lutpullaev S.L., Yuldashev A.A., Yuldashev B.S., Lugovoi V.V., etc.). Special attention was paid to the determination of contributions of unstable nuclei  $^9\text{B}$ ,  $^8\text{Be}$  and contribution of excited carbon nucleus in the cross-section of formation of  $\alpha$ -particles. The dependence of inclusive cross-sections and kinematical characteristics of  $\alpha$ -particles on the topology of breakup of oxygen was also investigated. Experimental data were compared with the results of calculations using CFEM model and with the predictions of the statistical Goldhaber and coalescence models.

Aiming to clarify the contributions from different mechanisms of formation of  $\alpha$ -particles, we compared the experimental normalized invariant inclusive differential cross-section  $f(T) = Ed^3\sigma/d\vec{p}^3$  with the CFEM calculations and predictions of the coalescence model. The CFEM calculations are in a relatively good agreement within the statistical uncertainties with the experimental spectrum



in region  $T < 15$  MeV. Because CFEM underestimates rather strongly the contribution from the evaporation mechanism for the formation of light fragments, an agreement observed in this case leads to the conclusion that the contribution of evaporation mechanism is negligibly small or absent for  $\alpha$ -particles. In region  $T > 15$  MeV, with an increase in the kinetic energy of  $\alpha$ -particles, disagreement between CFEM calculations and experiment becomes stronger. Theoretical CFEM spectrum breaks and ends at  $T \leq 100$  MeV, while the experimental distribution extends upto  $T \approx 200$  MeV. Such a large disagreement between the experiment and CFEM calculations is due to neglecting the  $\alpha$ -cluster structure of light nuclei and the contribution from fusion mechanism. In region  $T \geq 100$  MeV, we calculated the spectrum of  $\alpha$ -particles within the framework of coalescence model using the experimental proton spectrum. Contribution of fusion mechanism into the inclusive cross-section of formation of  $\alpha$ -particles was found to be  $1.4 \pm 0.3$  %.

Comparison of CFEM calculations with the experimental transverse momentum distribution of  $\alpha$ -particles shows that, although the average values of the transverse momenta coincide, there exists a fundamental disagreement between predictions of CFEM and experiment at describing the shapes of the spectra.

It is known that, according to the statistical fragmentation model, the angular distribution of fragments with  $T < 10$  MeV per nucleon should be isotropic. While studying the emission of light fragments (p, d, t and  $^3\text{He}$ ) with energy  $T < 10$  MeV per nucleon, we observed the deviation of the experimental angular spectra from the above mentioned prediction of the statistical theory. This experimental fact was interpreted by us as an evidence for existence of an angular momentum of the fragmenting nucleus.

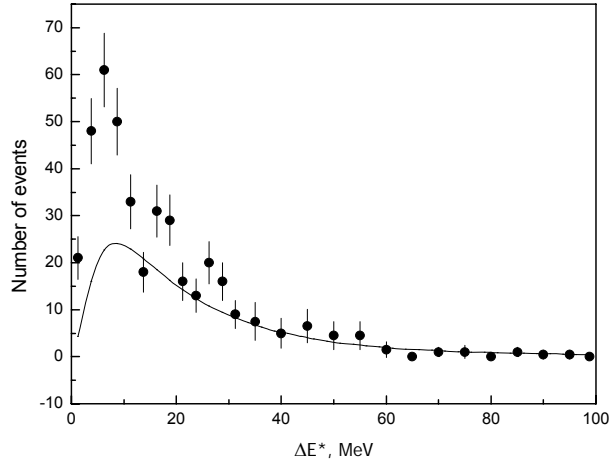
Our analysis of kinematical characteristics of  $\alpha$ -particles, formed in  $^{16}\text{O}$ p interactions at 3.25 A GeV/c, leads to the conclusion that the main part of  $\alpha$ -particles are formed due to the Fermi breakup (statistical mechanism) while the contribution from the evaporation mechanism remains negligibly small. Role of the coalescence effect becomes apparent and visible in region of quite large values of kinetic energies and transverse momenta.

In the channels of formation of 3 and 4  $\alpha$ -particles in  $^{16}\text{O}$ p interactions at 3.25 A GeV/c, we carried out an analysis of intermediate states of many nucleon systems, decaying to  $\alpha$ -particles, in particular  $^8\text{Be} \rightarrow \alpha + \alpha$  and  $^9\text{B} \rightarrow \alpha + \alpha + \text{p}$  reactions.

Also instable nuclei, such as  $^5\text{He}$  and  $^5\text{Li}$ , can be an additional source of formation of  $\alpha$ -particles. The existing experimental data allow us to estimate the cross-sections of formation of instable isotope  $^5\text{Li}$ , decaying into  $^4\text{He}$  and proton. This cross-section of lithium-5 formation proved to be  $\sigma(^5\text{Li}) = 8.4 \pm 0.5$  mbarn, which does not differ rather strongly from the values of excitation functions, obtained by us for stable isotopes.

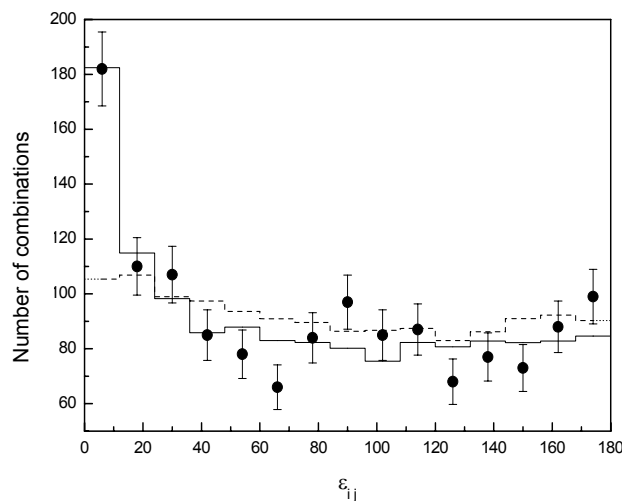
Based on the invariant mass of three  $\alpha$ -particles (fig. 5) and using elaborated by us the phenomenological model of isotropic phase space, taking into the account the conservation laws for energy – momentum in  $^{16}\text{O}$ p collisions at 3.25 A

GeV/c, we found for the first time that the contribution from decay of excited  $^{12}\text{C}^*$  nuclei into the channel of formation of 3  $\alpha$ -particles was about 38% percent of this channel and the remaining part of the cross-section of this channel is realized via the direct Fermi breakup and quasi elastic knocking out the one  $\alpha$ -cluster from the weakly bound remnant nucleus, containing three  $\alpha$ -particles.



**Fig. 5. Distribution of excitation energy  $\Delta E^*$  for a system of three  $\alpha$ -particles. Solid line – background distribution**

While analyzing the channels of formation of 3 and 4  $\alpha$ -particles in  $^{16}\text{O}$ p collisions at 3.25 A GeV/c, we discovered the small azimuthal asymmetry and collinearity. Naturally, we suggested that that the reason for appearance of collinearity of momentum vectors for pairs of  $\alpha$ -particles could be the decays of instable nuclei  $^8\text{Be} \rightarrow \alpha + \alpha$  in their ground and first excited states with the energy release equal to 0.1 and 3.04 MeV, respectively. We checked this assumption taking into account the formation and decays of intermediate instable nuclei  $^8\text{Be} \rightarrow \alpha + \alpha$  and  $^9\text{B} \rightarrow \alpha + \alpha + p$  with the help of a phenomenological model of isotropic phase space. In fig. 6, the distribution on the pair azimuthal angle ( $\varepsilon_{ij}$ ) between i-th and j-th  $\alpha$ -particles is presented.

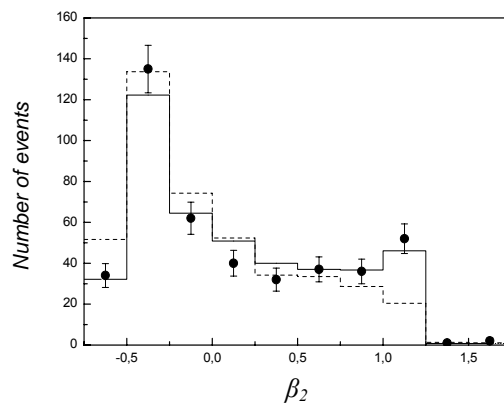


**Fig. 6. Distribution on pair azimuthal angle ( $\varepsilon_{ij}$ ) between i-th and j-th  $\alpha$ -particles. Notation is the same as in fig. 5**

In this figure, our Monte Carlo calculations under the modified phenomenological model of isotropic phase space with taking into account the formation and decays of unstable nuclei  ${}^8\text{Be}$  and  ${}^9\text{B}$  as well as the calculations without their formation are presented.

A good agreement between the calculations and experiment is observed when taking into account the formation and decays of intermediate  ${}^8\text{Be}$  and  ${}^9\text{B}$  nuclei. The best agreement was achieved at the formation probabilities  $W(0.1) = 15.4\%$  and  $W(3.04) = 6.6\%$  for  ${}^8\text{Be}$  nuclei, and  $W(0.3) = 19\%$  for  ${}^9\text{B}$  nuclei (the values of the energy in MeV released at the decay of the given nuclei is shown in brackets).

In fig. 7, the distribution on the parameter of azimuthal collinearity ( $\beta_2$ ) for individual acts of  ${}^{16}\text{O}p$  collisions with 3 and 4  $\alpha$ -particles in the final states is shown.



Results of calculations by our Monte – Carlo model with taking into account (solid histogram) and without (dashed histogram) the formation of unstable  ${}^8\text{Be}$  and  ${}^9\text{B}$  nuclei

**Fig.7.  $\beta_2$  distribution for individual acts of  ${}^{16}\text{O}p$  collisions**

There are also shown the results of calculations of distributions using the modified model of isotropic phase space with taking into account and without formation of unstable  ${}^8\text{Be}$  and  ${}^9\text{B}$  nuclei. We can see that the calculated distribution with formation of unstable  ${}^8\text{Be}$  and  ${}^9\text{B}$  nuclei describes satisfactorily the experimental spectrum ( $\chi^2=3.88$  per 10 degrees of freedom, which corresponds to more than 95% level of statistical significance). The average values of these parameters,  $\langle\beta_2\rangle_{\text{exper}} = 0.13 \pm 0.03$ ,  $\langle\beta_2\rangle_{\text{calcul}} = 0.13 \pm 0.02$ , also coincided. As expected, the average value for the parameter  $\beta_2$  without taking into account the formation of the above mentioned nuclei becomes equal to zero:  $\langle\beta_2\rangle_{\text{calcul}} = 0.004 \pm 0.024$  at  $\chi^2=21.56$  per 10 degrees of freedom, which corresponds to the level of statistical significance less than 2%.

Therefore, we can conclude that the azimuthal collinearity observed in experiment in the channels of formation of 3 and 4  $\alpha$ -particles is due to decays of the intermediate unstable  ${}^8\text{Be}$  and  ${}^9\text{B}$  nuclei.

On the basis of approximations by Gauss functions of the momentum spectra versus  $x$  ( $x=1/p$ ) of stable fragments and also using the results of the above mentioned procedures for the determination of contributions of unstable nuclei

with decay modes, we determined the cross-sections of formation of all the stable and instable nuclei with  $Z=1-8$  in  $^{16}\text{Op}$  collisions at 3.25 A GeV/c, presented in table 5.

From table 5, we can see that the largest inclusive cross-section of formation of multicharge fragments belongs to the  $\alpha$ -particles, and also that the cross-sections of formation of the «mirror» nuclei with mass numbers differing by  $\Delta A = \pm 1$  from the basic mass number ( $A=2Z$ ) coincide within the statistical uncertainties.

**Table 5**

**Cross-sections of formation of the stable and unstable isotopes in  $^{16}\text{Op}$  collisions at 3.25 A GeV/c (mbarns)**

Z	A	$\sigma \pm \Delta\sigma$	Z	A	$\sigma \pm \Delta\sigma$
1	$^1\text{H}$	$594.5 \pm 5.5$	5	$^9\text{B}^*$	$5.70 \pm 0.29$
	$^2\text{H}$	$110.6 \pm 1.3$		$^{10}\text{B}$	$10.6 \pm 0.4$
	$^3\text{H}$	$45.0 \pm 1.6$		$^{11}\text{B}$	$10.9 \pm 0.4$
2	$^3\text{He}$	$45.4 \pm 1.6$		$^{12}\text{B}$	$0.51 \pm 0.42$
	$^4\text{He}$	$164.0 \pm 1.9$	6	$^{10}\text{C}$	$1.77 \pm 0.8$
	$^5\text{He}^*$	$8.40 \pm 0.50$		$^{11}\text{C}$	$9.18 \pm 0.76$
	$^6\text{He}$	$1.03 \pm 0.23$		$^{12}\text{C}$	$26.3 \pm 0.8$
3	$^5\text{Li}^*$	$8.40 \pm 0.50$		$^{12}\text{C}^*$	$9.80 \pm 0.80$
	$^6\text{Li}$	$19.0 \pm 0.8$		$^{13}\text{C}$	$9.48 \pm 0.76$
	$^7\text{Li}$	$10.6 \pm 0.8$		$^{14}\text{C}$	$3.68 \pm 0.76$
	$^8\text{Li}$	$4.80 \pm 0.76$		7	$^{13}\text{N}$
4	$^7\text{Be}$	$10.3 \pm 0.5$	$^{14}\text{N}$		$26.1 \pm 0.8$
	$^8\text{Be}^*$	$7.63 \pm 0.37$	$^{15}\text{N}$		$30.3 \pm 0.8$
	$^9\text{Be}$	$6.15 \pm 0.52$	8	$^{14}\text{O}$	$2.85 \pm 0.70$
	$^{10}\text{Be}$	$0.89 \pm 0.52$		$^{15}\text{O}$	$31.1 \pm 0.7$
				$^{16}\text{O}$	$13.0 \pm 0.7$

<sup>\*)</sup>unstable and excited states

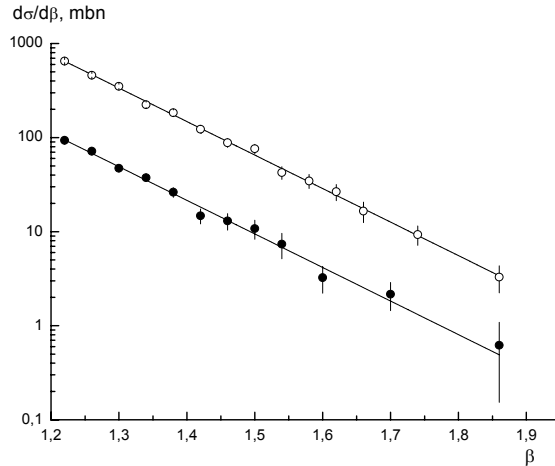
**In the fifth chapter**, the results of systematic investigations of the processes of formation of the cumulative protons are presented and conclusions are given about the preferable scenario of their formation in  $^{16}\text{Op}$  collisions at 3.25 A GeV/c,  $\pi^- \text{C}$  collisions at 40 GeV/c, pC interactions at 4.2 and 9.9 GeV/c,  $^4\text{HeC}$  and CC collisions at 4.2 A GeV/c, and also in pNe interactions at 300 GeV/c (conducted jointly with the coauthors: Lutpullaev S.L., Olimov K., Yuldashev B.S., Petrov V.I., Bekmirzaev R.N., etc.).

In figure 8, as an example, the inclusive cross-sections of proton formation in the dependence on the cumulative number  $\beta$  for  $\beta > 1.2$  in CC and  $\pi^- \text{C}$  collisions at the momenta of 4.2 A GeV/c and 40 GeV/c, respectively, are given. Figure 9 presents the invariant inclusive cross-sections for the formation of cumulative protons in  $p^{20}\text{Ne}$  and  $^{16}\text{Op}$  collisions. The results of approximation of the experimental data by the below expression are given by the straight lines:

$$f(\beta) = a \exp(-b\beta). \quad (2)$$

Results of approximations of all the experimental data for proton distributions versus value  $\beta$  by the expression given in (2) are shown in table 6.

From table 6, one can see, that the values of the slope parameter  $b$  coincide within the statistical errors for all the considered types of collisions and primary energies. The value of  $b$  averaged from all the considered collisions proved to be  $8.1 \pm 0.1$ .



(●) – for  $\pi^-C$  collisions at 40 GeV/c and (○) – for CC collisions at 4.2 A GeV/c. Straight lines – the results of approximation of the experimental data by the relation given in (2)

**Fig. 8. Inclusive cross-sections of formation of protons as functions of the cumulative number  $\beta$**

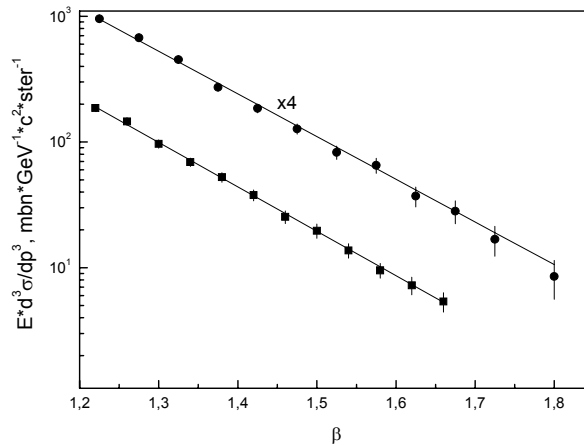
It is interesting to mention that not only the invariant inclusive cross-sections of formation of cumulative protons versus the cumulative number  $\beta$ , but also the distributions of protons on  $\beta$  have the similar exponential character.

**Table 6**

**The values of the slope parameter obtained using approximation given in (2) along with the types of collisions and the number of events**

Type of interaction, $P_o(\Gamma \ni B/c)$	Number of events	Slope parameter, $b$	$\chi^2/n.d.f.$
$\pi^-C, 40.0$	16657	$8.18 \pm 0.26$	1.1
$pC, 4.2$	6901	$8.09 \pm 0.49$	1.0
$pC, 9.9$	18325	$8.10 \pm 0.25$	0.9
${}^4HeC, 4.2 A$	12326	$8.00 \pm 0.28$	1.2
CC, 4.2 A	20530	$8.14 \pm 0.20$	0.4
${}^{16}Op, 3.25 A$	12367	$8.13 \pm 0.21$	0.4
$p^{20}Ne, 300$	4990	$7.99 \pm 0.18$	0.8

Therefore, one can conclude that the mechanism of formation of the cumulative protons do not depend on the type of projectile and the primary energy.



Straight lines – the results of approximation of the experimental data by the expression given in (2)

**Fig. 9. Invariant inclusive cross-section of cumulative protons formation depending on the cumulative parameter  $\beta$  for  $p^{20}\text{Ne}$  (●) and  $^{16}\text{Op}$  (■) collisions at high energies**

Approximation of the  $A$  dependence of the mean multiplicity of the cumulative protons by the expression  $\langle n_{\text{cum}} \rangle = a + A^\alpha$  (where  $A$  – mass number of the fragmenting nucleus,  $a$  and  $\alpha$  are fitting parameters) gives the values  $a = -0.41 \pm 0.01$  and  $\alpha = 0.15 \pm 0.01$  at the more than 99% confidence level. At approximation by the expression  $\langle n_{\text{cum}} \rangle = a + Z^\alpha$  the values of the parameters are equal to  $a = -0.32 \pm 0.01$  and  $\alpha = 0.17 \pm 0.01$  also at the more than 99% confidence level. For both the approximations, the values obtained for the power degree are close to the value  $1/6$ , which differs significantly from the value  $1/3$ , specific for the  $A$  dependence of the average multiplicities of all the protons. Since formation of the cumulative protons is connected with the number of fluctuations of the nuclear density, which is proportional to the variance of the average multiplicity, then, in the «tube» of the fragmenting nucleus of a size  $\sim A^{1/3}$  interacting with an impinging particle, the number of such fluctuation will be proportional to  $\langle n \rangle^{1/2}$  with the average number of the cumulative protons being proportional to  $\sim A^{1/6}$ . In the given case, the character of  $A$  dependence confirms the scenario of «cold» formation of the cumulative protons, based on the existence of fluctons. The other strong argument supporting such a scenario is an independence of the fraction of cumulative events from the mass number of the projectile particle or nucleus. The numerical values for these fractions are presented in table 7.

From table 7, it follows that the fractions of the cumulative events are independent from the mass number of a projectile particle (proton or nucleus) for the target with the same mass number  $A$ . These data show the sensitivity of these fractions to the type of a projectile particle (pion or system of baryons).

The first circumstance shows the possibility to combine the number of events with the cumulative protons in different ensembles given for the calculation of their average fraction for the baryon systems (for  $p^{12}\text{C}$ ,  $\alpha^{12}\text{C}$ , and  $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$  collisions). In our case, this value is equal to  $(10.0 \pm 0.1)\%$ . Independence of the fraction of events with the cumulative proton on the size of a projectile baryon system can point out the dominant role of the single interactions of the impinging particles with fluctons, which numbers are constant according to «cold» model in our case (the same target nucleus). Since the interaction of the colliding objects is the single folded, then its characteristics will be influenced by the properties of the primary particles (for example, their quark composition). In this sense, it is interesting to consider the ratio of the cumulative events for pions and baryon systems. It is easy to see that this ratio equals to  $0.66 \pm 0.02$ , i.e.  $2/3$ , which coincides with the ratio of the numbers of valent quarks for pion and proton pointing that the cumulative processes proceed on quark parton level.

Thus one can conclude that the dependence of the invariant inclusive cross-sections of formation of the cumulative protons on the cumulative number  $\beta$  has the universal regularity, expressed in its independence from the primary energy and mass of the fragmenting nucleus. Based on the study of correlations between multiplicities of secondary particles and fragments and formation of the cumulative protons we established that the mean multiplicities of the secondary particles and fragments correlate with the yield of cumulative proton, but are independent within the statistical uncertainties from the value of the cumulative parameter  $\beta$  of a proton.

**Table 7**

**Fraction of events with the cumulative protons as a function of the type of projectile particle or nucleus**

Type of interaction, $P_o$ , GeV/c	The total number of events	The number of events with cumulative proton	Fraction of events with the cumulative proton, %
$\pi^{-12}\text{C}$ , 40.0	16657	1097	$6.6 \pm 0.2$
$p^{12}\text{C}$ , 4.2	6901	699	$10.1 \pm 0.4$
$p^{12}\text{C}$ , 9.9	18325	1825	$10.0 \pm 0.2$
$^4\text{He}^{12}\text{C}$ , 4.2 A	12326	1211	$9.8 \pm 0.3$
$^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ , 4.2 A	20530	2070	$10.1 \pm 0.2$
$^{16}\text{O}_p$ , 3.25 A	12367	1496	$12.1 \pm 0.4$
$p^{20}\text{Ne}$ , 300	4990	728	$14.6 \pm 0.6$
CTa, 4.2	2440	1013	$41.5 \pm 1.5$

**In appendixes**, the description of the algorithms of the modeling the decays of oxygen nuclei on 3 and 4  $\alpha$ -particles in the framework of the isotropic phase space model are given. There the algorithm for calculating the contribution of the excited  $^{12}\text{C}$  nucleus into the channel of formation of 3  $\alpha$ -particles is also presented.

## CONCLUSION

1. For the first time, under  $4\pi$  acceptance conditions, a systematic analysis for the formation of proton fragments was carried out in  $^{16}\text{O}p$  collisions at 3.25 A GeV/c and it was shown that:

- shape of momentum spectrum of protons at  $p > 0.25$  GeV/c (except «evaporated» ones), emitted into the front hemisphere in the system of rest of the fragmenting nucleus, does not depend on the degree of the nucleus excitation;

- shape of momentum spectrum of protons, moving into the back hemisphere in the system of rest of the fragmenting nucleus, is strongly correlated with its degree of excitation;

- an irregularity observed in the spectrum of kinetic energy of fast protons in the region of  $T = 70\text{--}90$  MeV in the oxygen rest frame is shown to be due to the decay of two nucleon system after absorbing the slow pion;

- the basic mechanisms for the proton formation (“evaporation” mechanism, mechanism of Fermi decay of the excited remnant nucleus, and mechanism of direct knock out of protons at the process of cascading) were identified and their statistical weights (contributions) estimated to be  $(27.4 \pm 0.5)\%$ ,  $(32.0 \pm 0.6)\%$ , and  $(40.6 \pm 0.7)\%$ , respectively.

2. Based on an analysis of the normalized invariant inclusive differential cross-section of the proton formation in  $^{16}\text{O}p$  interactions at 3.25 A GeV/c,  $p^{12}\text{C}$  collisions at 9.9 GeV/c,  $\pi^{-12}\text{C}$  interactions at 40 GeV/c, and  $p^{20}\text{Ne}$  collisions at 300 GeV/c the conclusion was made that the mechanism of fast proton formation, especially those moving forward, have an universal character, expressed in its independence on the primary energy and type of impinging particle or the light fragmenting nucleus.

3. For the first time, a three stage phenomenological model for the analytical description of distribution of proton multiplicities in  $\pi^{-}\text{C}$  collisions at 40 GeV/c,  $p^{20}\text{Ne}$  collisions at 300 GeV/c and  $^{16}\text{O}p$  collisions at 3.25 A GeV/c was developed and the contributions for the main mechanisms of proton formation – «evaporation», Fermi decay and direct knocking out of by the primary proton and secondary particles were determined. It was established that these contributions are independent from the energy and mass number of light fragmentation nucleus, but are sensitive to the type of projectile particle (pion or proton), i.e. to the number of its valent quarks. It is necessary to point out that the values of these contributions (fractions) for  $p^{20}\text{Ne}$ -collisions at 300 GeV/c and  $^{16}\text{O}p$  collisions at 3.25 A GeV/c coincide within uncertainties with the values determined from an analysis of the invariant structure function of protons, formed in  $^{16}\text{O}p$  interactions at 3.25 A GeV/c.

4. In the momentum spectrum of “forward deuterons” in the system of rest of the oxygen nucleus in the region of  $0.40 < p < 0.55$  GeV/c a shoulder was observed, which could be due to the fusion mechanism of fast cascade nucleons, decays of the relatively fast light fragments, and also due to the direct quasi elastic knocking out of deuteron from the oxygen nucleus by the primary proton. Average



multiplicities of fragments correlate with availability of a deuteron in an event, but are independent from mechanism of deuteron formation. Coalescence model describes successfully the momentum spectrum of fast deuterons and  $\alpha$ -particles.

5. A systematic comparison of experimental data on oxygen nucleus fragmentation in  $^{16}\text{O}p$  collisions at 3.25 A GeV/c with the CFEM model predictions was made. It was shown that for the realistic description of a nucleus fragmentation processes in hadron-nucleus collisions at high energies it is necessary to take into account the contribution of “evaporation” mechanism (even for such light nuclei as  $^{16}\text{O}$ ), mechanism of fusion of fast cascade nucleons, and also an  $\alpha$ -cluster structure of light nuclei in the CFEM model. The necessity for taking into account the small angular moment acquired by the fragmenting nucleus was proved.

6. Formation of  $\alpha$ -particles in  $^{16}\text{O}p$  reactions and in different topological channels of oxygen nucleus disintegration was investigated, and their momentum and angular spectra were analyzed. Phenomenological models of formation of  $\alpha$ -particles through breakup of intermediate nuclei  $^8\text{Be}$ ,  $^9\text{B}$  and excited nucleus  $^{12}\text{C}^*$  were worked out and tested. In particular, it was established that:

- dominant channel of multifragmentation was a disintegration of oxygen nucleus with emission of helium nuclei, part of them being the products of decay of short - lived  $^5\text{Li}$ ,  $^5\text{He}$ ,  $^8\text{Be}$ ,  $^9\text{B}$ , and  $^{12}\text{C}^*$  nuclei;

- in the channels of formation of 3 and 4  $\alpha$ -particles, a collinearity caused by decays of the instable  $^8\text{Be}$  and  $^9\text{B}$  nuclei was revealed;

- for the first time, the contributions of the channels of decays of  $^8\text{Be}$  and  $^9\text{B}$  nuclei and that of the excited  $^{12}\text{C}^*$  nucleus into the inclusive channel of formation of  $\alpha$ -particles were established quantitatively;

- contribution of the excited nucleus  $^{12}\text{C}^*$  decays into the channel of formation of 3  $\alpha$ -particles was proved to be about 38% of the cross-section of this channel, and the remaining part of the cross-section of this channel was realized through the direct Fermi decay or quasi elastic knocking out of a single  $\alpha$ -cluster from the weakly bound remnant nucleus, containing three  $\alpha$ -particles;

- from the analysis of the angular spectrum of two-, three-, and four-nucleon fragments, the hint on the existence of an angular moment of the fragmenting remnant nucleus was obtained; the effect became more intensive at the transition from the lighter to the heavier fragments.

7. For the first time, under the conditions of  $4\pi$  acceptance, cross-sections of formation of stable and instable isotopes with charges  $Z=1-8$  in  $^{16}\text{O}p$  collisions at 3.25 A GeV/c were measured. It was shown that cross sections for the formation of “mirror” nuclei with mass numbers, differing on  $\Delta A = \pm 1$  from the basic mass number defined as  $A = 2Z$ , coincided within statistical errors. The cross-sections for the yields of instable isotope  $^9\text{B}$  and its “mirror” stable isotope  $^9\text{Be}$  also coincided within statistical uncertainties. A regularity observed can also be extended to the mirror nuclei ( $^{15}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ), formed as a result of a loss of one nucleon by initial  $^{16}\text{O}$  nucleus in the peripheral collisions with target protons.

8. For the first time, the formation of cumulative protons in  $^{16}\text{O}p$  interactions at 3.25 A GeV/c,  $p^{12}\text{C}$  collisions at 4.2 GeV/c and 9.9 GeV/c,  $\pi^{-12}\text{C}$ - interactions at 40 GeV/c,  $p^{20}\text{Ne}$  collisions at 300 GeV/c, and in  $\alpha^{12}\text{C}$  and  $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$  collisions at 4.2 A GeV/c was studied in detail and it was shown that:

- the values of a slope parameter for the distributions of invariant inclusive cross-sections of formation of the cumulative protons depending on the cumulative number  $\beta$  showed the universal character («nuclear scaling»), expressed by their independence from the type of projectile or target and the primary energy;

- an independence of the mean multiplicity of the cumulative protons in cumulative events from the same target nucleus on the primary energy and type of a projectile was established. It was shown that formation of cumulative protons proceeds predominantly through the «cold» model scenario. The argument for this version of scenario is based on the independence of the fraction of cumulative events on the mass number of a projectile nucleus or particle.

- an absence of correlations between mechanisms of formation of cumulative protons and secondary particles and fragments was revealed;

9. An independence of mechanisms of formation of light fragments was established. The correlation phenomena observed in experiment are the consequences of conservation laws for energy – momentum, electrical and baryon charges in the processes of fragmentation of nuclei.

The main framework of the researches conducted in the dissertation is the systematic and complex study of the processes of fragmentation of light nuclei in a wide range of primary energies with the use of a single methodology. The overwhelming majority of the results, included in this thesis, were obtained for the first time, and these data allow for a deeper and more detailed understanding of characteristics and properties of nuclei, fragmenting under an action of high energy particles and relativistic nuclei.

The problems, set in the dissertation, on complex experimental and phenomenological study of fragmentation processes and establishment of the dominant processes in formation of protons and light fragments in the  $\pi^{-}$ ,  $p$ ,  $\alpha$ ,  $\text{C}$  ( $\text{C}$ ) and  $p$  ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{20}\text{Ne}$ ) collisions in a range of primary energies 3–300 GeV were fully solved.

Results of the dissertation work give a wide practical material for the test of theoretical models and approaches at investigation of problems of fragmentation of nuclei in hadron- and nucleus-nucleus collisions at high energies and can be used for the development of the theory of strong interactions, and can also be used for planning and carrying out the new experiments on the ion accelerators.

Data on cross-sections of formation of stable and unstable isotopes produced in interactions of oxygen nuclei with protons at high energies, obtained in the present thesis, can find their application in space physics and cosmochemical studies for determination of characteristics of the processes of cosmogenic nucleosynthesis.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I бўлим (I часть; part I)**

1. Юлдашев Б.С., Белов М.А., Базаров Э.Х., Липин В.Д., Лутпуллаев С.Л., Насыров Ш.З., Олимов К., Юлдашев А.А. Некоторые особенности фрагментации ядра кислорода во взаимодействиях с протоном при 3.25 А ГэВ/с// Доклады Академии наук Республики Узбекистан. – Ташкент, 2002. – №3. – С. 16-19.
2. Юлдашев Б.С., Базаров Э.Х., Глаголев В.В., Липин В.Д., Лутпуллаев С.Л., Олимов К., Олимов Х.К., Юлдашев А.А. Особенности энергетических характеристик протонов-фрагментов, образованных в  $^{16}\text{O}$ -взаимодействиях при высоких энергиях// Доклады Академии наук Республики Узбекистан. – Ташкент, 2003. – №1. – С. 32-35.
3. Базаров Э.Х., Лутпуллаев С.Л., Олимов К., Хамидов Х.Ш., Юлдашев А.А., Юлдашев Б.С. Образование дейтронов в  $^{16}\text{O}$ -соударениях при 3.25 А ГэВ/с// Доклады Академии наук Республики Узбекистан. – Ташкент, 2004. – №3. – С.27-30.
4. Базаров Э.Х. Корреляции в рождениях дейтронов и вторичных фрагментов в  $^{16}\text{O}$ -соударениях при 3.25 А ГэВ/с// Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2004. – № 2(6). – С. 87-90.
5. Базаров Э.Х. Об энергетическом спектре протонов, образованных в  $^{16}\text{O}$ -соударениях при 3.25 А ГэВ/с // Ядерная физика. – Москва, 2005. – №9 (68). – С.1611-1613; Bazarov E.Kh. On the Energy Spectrum of Protons Produced in  $^{16}\text{O}$  Collisions at a Momentum of 3.25 GeV/c per Nucleon// Physics of Atomic Nuclei. – Moscow, 2005. – vol.68, N 9. – pp. 1551-1553.
6. Базаров Э.Х., Глаголев В.В., Луговой В.В., Лутпуллаев С.Л., Олимов К., Петров В.И., Юлдашев А.А., Юлдашев Б.С. О сечениях образования стабильных и нестабильных изотопов с зарядом от 1 до 8 в  $^{16}\text{O}$ -соударениях при 3.25 А ГэВ/с // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – Москва, 2005. – № 4 (81). – С.174-176.
7. Базаров Э.Х., Лутпуллаев С.Л., Олимов К. Петров В.И., Хамидов Х.Ш., Юлдашев Б.С., Каршиев Д.А. Образование кумулятивных протонов в  $^{16}\text{O}$ -соударениях при 3.25 А ГэВ/с// Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2005. – №3 (7). – С. 159-164.
8. Bazarov E.Kh. Sources of Alpha-Particle Production Production in  $^{16}\text{O}$  Collisions at 3.25 GeV/c per Nucleon// Physics of Atomic Nuclei. – Moscow, 2006. – vol. 69, N1. – pp. 165-167.
9. Бекмирзаев Р.Н., Базаров Э.Х., Игамкулов З.А., Олимов К., Петров В.И., Тугалов Ф., Хамидов Х.Ш., Шукуров Э.Х., Юлдашев Б.С. Особенности импульсного спектра протонов в  $^{20}\text{Ne}$ -соударениях при 300 ГэВ/с// Доклады Академии наук Республики Узбекистан. – Ташкент, 2007. – №5. – С. 26-29.

10. Базаров Э.Х. Образование ядер  ${}^4\text{He}$  в различных топологических каналах в  ${}^{16}\text{O}$ -взаимодействиях при 3.25 А ГэВ/с// Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2007. – №2 (9). – С. 94-97.
11. Olimov K., Bazarov E.Kh., Bekmirzaev R.N., Lutpullaev S.L., Olimov A.K., Petrov V.I., Sattarov A.R., Khamidov Kh.Sh., Yuldashev B.S. Production of Cumulative Protons in High-Energy Hadron-Nucleus and Nucleus-Nucleus Interactions// Physics of Atomic Nuclei. – Moscow, 2007. – vol. 70, N 4. – pp. 709-711.
12. Olimov K, Lutpullaev S.L., Petrov V.I., Bazarov E.Kh, Yuldashev B.S. On the Production of Cumulative Protons in High-Energy Hadron-Nucleus and Nucleus-Nucleus Collisions// Physics of Atomic Nuclei. – Moscow, 2007. – vol. 70, N 11. – pp. 1982-1983.
13. Bazarov E.Kh., Production of cumulative protons at high-energy  ${}^{16}\text{O}$ - and  ${}^{20}\text{Ne}$ -collisions// Ukrainian Journal of Physics. – Kiev, 2007. – vol. 52, N11. – pp. 1052-1055.
14. Базаров Э.Х. О вкладах механизмов образования протонов в адрон-ядерных соударениях при высоких энергиях// Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2007. – №4 (9). – С.286-288.
15. Базаров Э.Х. Импульсное и угловое распределения дейтронов в  ${}^{16}\text{O}$ -соударениях при импульсе 3.25 А ГэВ/с// Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2008. – №1 (10). – С. 5-9.
16. Базаров Э.Х., Каршиев Д., Юлдашев Б.С., Олимов К., Кратенко М.Ю., Луговой В.В., Лутпуллаев С.Л., Петров В.И., Юлдашев А.А. О сечениях выхода промежуточных нестабильных ядер  ${}^8\text{Be}$ ,  ${}^9\text{Be}$  и возбужденных ядер  ${}^{12}\text{C}^*$  в каналах с образованием ядер  ${}^4\text{He}$  в  ${}^{16}\text{O}$ -соударениях при 3.25 А ГэВ/с// Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2011. – №5(13). – С.311-315.
17. Юлдашев Б.С., Лутпуллаев С.Л., Олимов К., Базаров Э., Каршиев Д.А. О механизмах образования протонов и дейтронов в  ${}^{16}\text{O}$ -соударениях при 3.25 ГэВ/с на нуклон// Доклады Академии наук Республики Узбекистан. – Ташкент, 2012. – №1. – С. 30-33.
18. Базаров Э.Х., Каршиев Д.А., Лутпуллаев С.Л., Олимов К., Петров В.И., Турдалиев К.Т., Юлдашев А.А., Юлдашев Б.С. Сравнительный анализ реакций с образованием зеркальных ядер  ${}^7\text{Li}$  и  ${}^7\text{Be}$  в  ${}^{16}\text{O}$ -взаимодействиях при 3.25 А ГэВ/с// Доклады Академии наук Республики Узбекистан. – Ташкент, 2013. – №5. – С. 13-15.

## II бўлим (II часть; II part)

19. Базаров Э.Х. Корреляция степени возбуждения фрагментирующего ядра с импульсным спектром протонов в  ${}^{16}\text{O}$ -соударениях при 3.25 А ГэВ/с// Фундаментальные и прикладные вопросы физики: Труды Межд. конф. 18-19 ноября 2004. – Ташкент, 2004. – С.19-22.
20. Юлдашев Б.С., Юлдашев А.А., Лутпуллаев С.Л., Базаров Э.Х., Каршиев Д.А. Характеристики каналов с образованием зеркальных ядер  ${}^7\text{Be}$

и  ${}^7\text{Li}$  в  ${}^{16}\text{O}$ -взаимодействиях при 3.25 А ГэВ/с// Фундаментальные и прикладные вопросы физики: Труды межд. конф. 14-15 ноября 2013. – Ташкент, 2013. – С. 24-26.

21. Yuldashev B.S., Bazarov E.Kh., Lutpullaev S.L., Olimov K., Petrov V.I., Cumulative protons in hadron-nucleus and nucleus-nucleus interactions// XXII international Baldin seminar on High Energies Physics Problems: Proceedings of Science. – Dubna (Russia), 2014. – 8 p.

22. Юлдашев Б.С., Лутпуллаев С.Л., Базаров Э., Каршиев Д., Олимов К. О механизмах образования протонов и дейтронов в  ${}^{16}\text{O}$ -соударениях при 3.25 А ГэВ/с// Препринт ИЯФ АН РУ. – Ташкент, 2011. – № Р-7-698. – 10 с.

23. Базаров Э.Х., Юлдашев Б.С., Каршиев Д.А., Лутпуллаев С.Л., Олимов К., Петров В.И., Турдалиев К.Т., Юлдашев А.А. Сравнительный анализ реакций с образованием зеркальных ядер  ${}^7\text{Li}$  и  ${}^7\text{Be}$  в  ${}^{16}\text{O}$ -взаимодействиях при 3.25 А ГэВ/с// Препринт ИЯФ АН РУз. – Ташкент, 2013. – № Р-7-705. – 6 с.

24. Базаров Э.Х., Каршиев Д.А., Турдалиев К.Т., Юлдашев Б.С. К вопросу об образовании протонов и  $\alpha$ -частиц в  ${}^{16}\text{O}$ -соударениях при 3.25 А ГэВ/с// Препринт ИЯФ АН РУ. – Ташкент, 2014. – № Р-7-709. – 16 с.

25. Bazarov E. Kh., Glagolev V.V., Ismatov E.I., Karshiev D.A., Turumov E., Lugovoi V.V., Lutpullaev S.L., Olimov K., Yuldashev A.A., Yuldashev B.S., Fazilov M.I. 3 and 4  $\alpha$ -Particles Production Channels in the  ${}^{16}\text{O}$ -Collisions at 3.25 А GeV/c and the Isotropic Phase space Model// Modern Problems of Nuclear Physics: Book of abstracts the fifth Intern. Conf. 12-15 August 2003 in Samarqand. – Tashkent, 2003. – pp. 57-58.

26. Bazarov E.Kh., Lutpullaev S.L., Olimov K., Yuldashev A.A. Fragmentation of Relativistic Oxygen Nuclei in Interactions with Protons// Modern Problems of Nuclear Physics: Book of abstracts the fifth Intern. Conf. 12-15 August 2003 in Samarqand. – Tashkent, 2003. – pp. 72-73.

27. Bazarov E.Kh., Lutpullaev S.L., Olimov K., Yuldashev A.A., Yuldashev B.S. Peculiarities of the Oxygen Nuclei Fragmentation in the Peripheral Interaction with Proton at 3.25 А GeV/c// Modern Problems of Nuclear Physics: Book of abstracts the fifth Intern. Conf. 12-15 August 2003 in Samarqand. – Tashkent, 2003. – pp. 74-75.

28. Olimov K., Lutpullaev S.L., Olimov Kh.K., Petrov V.I., Yuldashev A.A., Yuldashev B.S., Bazarov E.Kh. Recent Results on Investigation of  ${}^{16}\text{O}$  Collisions at 3.25 А GeV/c// Modern Problems of Nuclear Physics: Book of abstracts of the sixth Intern. Conf. 19-22 September 2006. – Tashkent, 2006. – pp. 38-40.

29. Bazarov E.Kh., Olimov K., Karshiev D.A., Yuldashev B.S. Inclusive Production of Deuterons in  ${}^{16}\text{O}$ -Interactions at 3.25 А GeV/c// Modern Problems of Nuclear Physics: Book of abstracts of the sixth Intern. Conf. 19-22 September 2006 in Tashkent. – Tashkent, 2006. – pp.108-109.

30. Bazarov E.Kh., Olimov K., Petrov V.I., Lutpullaev S.L. Formation of Proton-Fragments in Hadron-Nucleus and Nucleus-Nucleus Collisions at High Energies// Modern Problems of Nuclear Physics: Book of abstracts of the sixth Intern. Conf. 19-22 September 2006 in Tashkent. –Tashkent, 2006. – pp. 109-110.

31. Bazarov E.Kh., Yuldashev B.S., Lutpullaev S.L., Olimov K., Yuldashev A.A., Karshiev D.A. Study of the momentum spectrum of protons at different degrees of excitation in  $^{16}\text{O}$ -Interactions at 3.25 A GeV/c// Nuclear Science and its Application: Book of abstracts of the VII Eurasian Conf. 25-28 September 2012 Samarkand. – Tashkent, 2012. – pp.120-121.

32. Bazarov E.Kh., Yuldashev B.S., Lutpullaev S.L., Olimov K., Yuldashev A.A., Karshiev D.A. Energy spectra of protons produced in  $^{16}\text{O}$ -Interactions at 3.25 A GeV/c// Nuclear Science and its Application: Book of abstracts of the VII Eurasian Conf. 25-28 September 2012 Samarkand. – Tashkent, 2012. – pp. 121-122.

33. Юлдашев Б.С., Глаголев В.В., Лутпуллаев С.Л., Базаров Э.Х., Каршиев Д.А., Олимов К., Петров В.И. Образование зеркальных ядер  $^7\text{Be}$  и  $^7\text{Li}$  в  $^{16}\text{O}$ -соударениях при 3,25 А·ГэВ/с// XII конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям: Тез. докл. 17-21 марта 2014.- Харьков, 2014.- С.41-42.

34. Bazarov E.H., Yuldashev B.S., Lutpullaev S.L., Olimov K., Petrov V.I. Production of cumulative protons in hadron and nucleus-nucleus collisions at high energies// “NUCLEUS 2014” Fundamental problems of nuclear physics, atomic power engineering and nuclear technologies: Book of abstracts of LXIV Intern. Conf. 1 - 4 jule 2014. – Minsk, 2014. – p.106.

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

Босишга рухсат этилди: 15.04.2015  
Ҳажми: 4,5. Адади: 100. Буюртма: № 28  
“Top Image Media” босмахонасида босилди.  
Тошкент шаҳри, Я.Ғуломов кўчаси, 74-уй

