

АНДАТПА

«6D060500 – Ядролық физика» мамандығы бойынша философия докторы (Ph.D) ғалыми дәрежесіне іздену диссертациясының

Федосимова Анастасия Игоревна

Релятивистикалық ядролардың өзара әрекеттесуінде пайда болатын қайталама бөлшектердің бөлінуіндегі

Диссертациялық жұмыс энергиялардың кең спектріндегі релятивистік ядролардың өзара әрекеттестігінде пайда болған қайталама бөлшектердің үлестеріндегі флуктуацияларды зерттеуге арналған. Флуктуациялар қарапайым акт деңгейінде де, каскадты процестерде де қарастырылды. 10^{12} эВ-тан жоғары бастапқы энергия кезіндегі, тікелей өлшеу негізінде бастапқы ғарыш бөлшектерінің энергиясын анықтаудың дәлдігіне, каскадтық процестің дамуы кезінде қайталама бөлшектердің көптігі үлкен флуктуацияларының әсерін айтарлықтай басуға мүмкіндік беретін әдістеме ұсынылды. Нөсер бөлшектерінің флуктуациясын, ұшатын ядроның фрагменттер санын және ядро нысанасын өзара әрекеттесудің бастапқы параметрлерінің флуктуацияларымен байланыстыратын қайталама бөлшектердің жалған жылдамдықты таралуындағы корреляциялар классификациясы ұсынылған. Ұшып келе жатқан ядроның толық қирауы оқиғаларында табылған қайталама бөлшектердің таралуындағы аномалды флуктуациялардың талдауы ұсынылған.

Тақырыптың өзектілігі

Энергетикалық спектрлерді және бастапқы ғарыштық сәулелердің элементтік құрамын дәл білу астрофизикалық көздерде ғарыштық сәулелердің қалыптасу ерекшеліктерін, сондай-ақ Галактикадағы ғарыштық сәулелердің таралу процестерінің бөлшектерін түсінуге мүмкіндік береді. Әр түрлі космологиялық модельдер элементтердің әртүрлі спектрлерін және ғарыштық сәулелердің әртүрлі элементтік құрамын болжайды. Осыған байланысты, кең энергетикалық диапазонда жоғары қуатты ғарыштық ядролардың энергиясын өлшеу кезінде, дәлдікті арттыруға мүмкіндік беретін әдістерді әзірлеу өзекті міндет болып табылады. Бастапқы ғарыштық бөлшектің параметрлерін анықтау үшін күрделі кері есепті шешу қажет, өйткені бақылау деңгейіне дейін өзара әрекеттесулердің жеткілікті саны болады. Мұндай мәселені шешудің ең дұрыс әдісі – каскадты модельдеу. Бұл жағдайда үдеткіштерде алынған мәліметтерден қарапайым оқиғаның сипаттамалары (өзара әрекеттесу қимасы, серпімділік, процестің көптігі және т.б.) қолданылады. Каскад сипаттамаларын өлшеулерді Монте-Карло модельдеу нәтижелерімен салыстыру энергияны қайта құруға және бастапқы бөлшектің массасын бағалауға мүмкіндік береді.

Ғарыштық сәулелерді $E > 10^{14}$ эВ энергиясымен өлшеу негізінен кең

атмосфералық нәсерлерді талдау арқылы жер үсті станцияларында жүргізіледі. Бұл жанама өлшеулер қайталама бөлшектердің сипаттамаларын өлшеу нәтижелерін және модельдеу нәтижелерін салыстыруға негізделеді, осылайша ядро-ядролық өзара әрекеттесудің қарапайым актіні білуге байланысты. Бастапқы ғарыштық бөлшектердің энергиясы мен массасын қалпына келтіру үшін детекторлардағы сигналдарды адрондық өзара әрекеттесудің әртүрлі модельдері тұрғысынан түсіндіретін әртүрлі тәсілдер қолданылады.

$E < 10^{14}$ эВ кезіндегі ғарыштық сәулелер Жер атмосферасынан тыс биіктік аэростаттар мен ғарыш аппараттарында тікелей өлшеулермен зерттеледі.

Ғарыштық бөлшектердің энергиясы $E < 10^{11}$ эВ энергиясы бар бөлшектер үшін өте дәл өлшенеді. Қазіргі магниттік спектрометрлер бастапқы энергияны 10%-дан аз қателікпен анықтай алады. Алайда, мұндай құрылғылар $E > 10^{12}$ эВ энергиясында шектеулерге ие және ғарыштық сәулелерді тікелей өлшеуге негізделген бастапқы энергияны анықтау міндеті күрделене түседі.

10^{12} - 10^{14} эВ диапазонында өлшеу әдістерінің жетіспеушілігі бар. Әр түрлі ғарыштық және баллонды эксперименттердің тәжірибелік мәліметтері бастапқы энергияны өлшеу кезіндегі үлкен қателіктер салдарынан бір-біріне жиі қайшы келеді. Өлшеу дәлдігін арттыруға мүмкіндік беретін тәсілдерді әзірлеу осы энергетикалық салада ғарыштық сәулелер физикасын дамыту үшін өте маңызды және өзекті міндет болып табылады.

Ғарыштық технологияларын дамытудың қазіргі кезеңінде $10^{12} - 10^{14}$ эВ диапазонындағы бастапқы энергияны анықтауға арналған жалғыз сенімді құрылғы ионизациялық калориметр болып табылады.

Ионизациялық калориметрдің (ИК) жұмыс принципі калориметрдің тығыз затынан өту кезінде қайталама бөлшектер каскадының сипаттамаларын өлшеуге негізделеді. Каскадтағы бөлшектердің санын өлшеу үшін калориметр арнайы детекторлармен байланысады. Әрбір бақылау деңгейінде N бөлшектер санын өлшей отырып, каскадтық қисық құрылады - $\log N$ -нің d өткен қабаттың қалыңдығынан бақылау деңгейіне дейін тәуелділігі. Егер каскадтық қисықтық максимумы өлшенсе, онда бастапқы бөлшектердің энергиясын анықтауға болады.

Бастапқы энергия неғұрлым жоғары болса, калориметрдің қалыңдығы соғұрлым көп болуы керек. Бұл ИК-ні ғарыш аппараттарында қолдануды қиындатады.

Осыған байланысты, үлкен салмақ мәселесін шешу үшін жұқа калориметрді қолдануға болады. Онда қайталама бөлшектер каскадының басталуы ғана тіркеледі. Бастапқы ғарыштық бөлшектің энергиясын E анықтау үшін, оның каскад мөлшеріне (каскадтағы бөлшектер санына) тәуелділігі қолданылады: $N = \alpha E^\beta$, мұнда α , β – бақылау деңгейінің тереңдігіне (ену тереңдігі) және бастапқы ғарыштық бөлшектің салмағына байланысты белгілі бір коэффициенттер.

Жұқа калориметрдің негізгі мәселесі – каскадтық қисықтың өсу

бұтағында каскад мөлшерінің үлкен флуктуациясы. Мысалы, $d = 40 \text{ г/см}^2$ ену тереңдігінде, флуктуациялар соншалықты үлкен, энергиясы 10^{14} эВ болатын кейбір нөсерлердің N_i , энергиясы 10^{15} эВ болатын нөсерлерден жоғары болады.

Осылайша, калориметрдің мөлшерін азайту өлшеу дәлдігінің айтарлықтай төмендеуіне әкеледі.

Бұл мәселені шешу үшін диссертацияда, энергияны анықтаудың дәлдігін жоғалтпай, қондырғының мөлшерін айтарлықтай азайтуға мүмкіндік беретін ультражұқа ионизациялық калориметрдегі энергияны анықтауға арналған инновациялық әдістеме ұсынылған. Әдістemenің мәні каскадты қисықтарды талдаудан корреляциялық қисықтарды қолдануға көшуден тұрады, олар каскадты процестің дамуындағы флуктуацияларға тәуелді емес.

Диссертацияда каскад мөлшерінің (каскадтағы бөлшектер саны) каскад мөлшерінің өсу жылдамдығына тәуелділігін пайдалану ұсынылды.

Бастапқы ғарыштық бөлшектің энергиясы ионизациялық жоғалуға және қайталама бөлшектердің пайда болуына жұмсалады. Сонымен қатар, каскад дамуының басында нөсердегі бөлшектер санының көбею жылдамдығы жоғары. Содан кейін біртіндеп каскадтық қисықтың максимумында нөлге дейін төмендейді.

Бастапқы энергияны анықтау үшін бір-бірімен жұтқыш қабатымен бөлінген Z_1 және Z_2 екі көрші деңгейлерде N қайталама бөлшектердің санын өлшеуді жүргізу қажет. Алынған өлшеулер негізінде корреляциялық қисықтар – каскадтың даму жылдамдығына сәйкес $\log N_{(Z_1)}$ каскад мөлшерінің $\log N_{(Z_1)} - \log N_{(Z_2)}$ мәніне тәуелділігі құрылады.

Әр түрлі бастапқы энергияларға сәйкес келетін корреляциялық қисықтар бір-біріне параллель және каскадтың даму тереңдігіне байланысты емес. Бұл жұқа калориметрді пайдалануға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, каскадтық қисықтың өсу бұтағында, каскад мөлшерінің үлкен флуктуацияларымен байланысты жұқа калориметрдің негізгі проблемасы шешіледі.

Жоғары қуатты ғарыштық сәулелердің бастапқы энергиясын өлшеу нәтижелері, қайталама бөлшектердің сипаттамаларын өлшеу нәтижелерін және үлгілеу нәтижелерін салыстыруға негізделеді, осылайша ядро-ядролық өзара әрекеттесудің қарапайым актісін білуіне байланысты.

Өзара әрекеттесудің қарапайым актісінде бөлшектердің көпше туылуы үдерістеріндегі корреляция мен флуктуацияларды зерттеу, бөлшектердің көпше тууының көптеген теориялық модельдері үшін сыни болып табылады. Талдау нәтижелері ядро-ядролық өзара әрекеттесуді сипаттау үшін пайдаланылатын модельдердің болжамдарын, сондай-ақ каскадтық процестерді модельдеу үшін бөлшектер генераторы ретінде пайдаланылатын модельдерді егжей-тегжейлі бағалауға мүмкіндік береді.

Моделдеу кезінде туындайтын қателерді азайту үшін, каскадты процестердің даму ерекшеліктерін түсіну қажет, көбейту флуктуациясы, ядро-ядролық өзара әрекеттесу өнімдерінің жалған жылдамдықты таралуы, ядро-ядролық өзара әрекеттесудің әр түрлі түрлерінде қайталама

бөлшектердің таралу ерекшеліктері туралы егжей-тегжейлі ақпарат қажет.

Бұдан басқа, релятивистік ядро-ядролық соғыстарда бөлшектердің көп туылу үдерістеріндегі флуктуацияларды зерттеу, жоғары тығыздық пен температураларда ядролық материяның қасиеттерін талдау үшін өзекті болып табылады.

Заманауи ұғымдарға сәйкес, жоғары энергиядағы кезіндегі ядролардың өзара әрекеттесуінде адронды зат кварк-глюон плазмасына (КМК) айналады, онда кварктер мен глюондар квазиссіз күйде болады, яғни деконфайнмент процесі байқалады.

Қоздырылған ядролық материя ұйытқысынан қайталама бөлшектердің тууы, ұжымдық сипатта болады, ол қайталама бөлшектердің таралауы кезінде маңызды флуктуацияларға әкелуі тиіс.

КМК іздеу кең энергетикалық интервалда жүзеге асырылады.

Бір жағынан, өзара әрекеттесудің барынша қолжетімді энергиялары бойынша зерттеулер жүргізілуде. ЦЕРН (Еуропалық ядролық өзара әрекеттестік орталығы) және Брукхевен ұлттық зертханасында (АҚШ) жүргізілген зерттеулер қайталама бөлшектердің таралуында ұжымдық сипатты тапты.

Екінші жағынан, адронды материяның кварк-глюон плазмасына фазалық ауысуының сыни нүктесіне жақын энергия аймағы белсенді зерттелуде. Теориялық ұсыныстарға сәйкес, сыни нүкте нуклонға 4-тен 11 ГэВ-ға дейінгі энергия аралығында болуы тиіс. Фазалық ауысу нүктесіне жақын зерттеулер КМК қасиеттері және процестің динамикасы туралы сапалы жаңа ақпарат алуға мүмкіндік береді деп болжанады. Бұдан басқа, бұл салада еркін кварктардан басқа протондар мен нейтрондарды қамтитын ядролық материяның аралас фазасының болуын болжайды.

Осы мәселені зерттеу үшін бірнеше ірі халықаралық тәжірибелер бағытталған, оның ішінде Дармштаттағы FAIR және Дубнадағы NICA.

Соқтығысу геометриясымен байланысты флуктуацияларды критикалық нүктеге (фазалық ауысу нүктесіне) жақын фазалық ауысудың көрінісіне байланысты флуктуациялардан бөлу негізделген нәтижелерді алу үшін сыни сәт болып табылады. Бұл ретте өзара әрекеттесудің бастапқы жағдайы туралы әдетте эксперименттік ақпарат жеткіліксіз. Өзара әрекеттесудің орталық дәрежесіне байланысты, қайталама бөлшектердің таралуы жеке өзара әрекеттестікте айтарлықтай ерекшеленуі мүмкін. Осыған байланысты ядролық материяның кварк-глюон плазмасына фазалық ауысуымен байланысты, динамикалық флуктуацияларды іздеудің ең өзекті мәні event-by-event (көмекші) жоғары энергиядағы ядролардың соқтығысуын талдау болып табылады. Әрбір жеке оқиғаның сипаттамаларын егжей-тегжейлі талдау кварк-глюон плазмасының қалыптасуы үшін неғұрлым қолайлы жағдайлар жасалған оқиғалардағы фазалық ауысудың әсерін тікелей бақылауға мүмкіндік береді деп болжанады. Соңғы жылдары көмекші зерттеудің жылдам дамуы, қайталама бөлшектердің сипаттамаларын жоғары дәлдікпен өлшеуге қабілетті үлкен қабылдау детекторлары бар күрделі эксперименттердің пайда болуымен байланысты.

Диссертацияда ұсынылған зерттеудің түбегейлі айырмашылығы - стандартты тәсілдерден басқа, қосымша, снаряд ядросы мен нысана ядросының фрагментациялық сипаттамаларының өзара әрекеттесудің бастапқы параметрлерін анықтау үшін қолдану болып табылады. Тәжірибеде қарама-қарсы сәулелерде снаряд ядросының фрагменттері әдетте тіркелмейді. Дегенмен, олардың сипаттамаларын зерттеу бастапқы күйдің геометриясы туралы маңызды ақпарат бере алады.

Зерттеу ең алдымен қайталама бөлшектердің таралуындағы аномалды флуктуацияларға бағытталған: ұшып бара жатқан ядроның толық бұзылу оқиғалары, қайталама бөлшектердің аномалды жоғары көпшелігі бар оқиғалары, нөсер бөлшектерінің айтарлықтай көп бөлшекті корреляциялары бар оқиғалары және т.б..

Мұндай зерттеулер кварк-глюон плазмасының қасиеттерін іздеу және талдауда да, релятивистік ядроларының өзара әрекеттесу процестерін сипаттайтын үлгілерді жетілдіруде де өзекті.

Диссертациялық жұмыстың мақсаты

Қатты флуктуациялайтын каскадтық процестерді талдаудың жаңа әдістерін жасау үшін, релятивистік ядролардың өзара әрекеттесуінде пайда болған қайталама бөлшектердің таралуындағы флуктуацияларды зерттеу.

Зерттеудің міндеттері

1. 10^{12} эВ-тан жоғары бастапқы энергиядағы тікелей өлшеулерге негізделген бастапқы ғарыштық бөлшектердің энергиясын өлшеу әдісін жасау, каскадтық процестің дамуы кезінде, энергияны анықтаудың дәлдігіне қайталама бөлшектердің көптігінің үлкен флуктуацияларының әсерін айтарлықтай басуға мүмкіндік береді.

2. Нөсер бөлшектерінің флуктуацияларын, ұшатын ядро мен нысана ядросының өзара әрекеттесу бастапқы параметрлерінің флуктуацияларының фрагменттер санын байланыстыратын екінші бөлшектердің жалған жылдам тартуларындағы корреляциялардың классификациясын ұсыну.

3. Ұшып келе жатқан ядроның толық бұзылу оқиғаларында қайталама бөлшектердің таралуындағы флуктуацияларға талдау жүргізу.

Зерттеу нысандары: Релятивистік ядролардың өзара әрекеттесуінде пайда болған қайталама бөлшектердің таралуындағы флуктуациялар.

Зерттеу пәні: Қайталама бөлшектердің көптік, жалған жылдамдық, нөсер бөлшектерін, снаряд ядросы мен нысана ядросының фрагменттерін бөлудегі корреляциялар таралуындағы релятивистік ядро-ядролық соғысуларда флуктуацияларды эксперименталды зерттеу, каскадты процестерді модельдеу, талдау әдістерін жасау.

Зерттеу әдісі: корреляциялық қисықтар әдісі, Херст әдісі, event-by-event талдау.

Қорғауға шығарылатын негізгі ережелер:

1 қайталама бөлшектер санының ультра жұқа калориметрдегі каскадтың даму жылдамдығына тәуелділігін пайдалану каскадтың дамуындағы флуктуациялардың $E > 1$ ТэВ бар бастапқы бөлшектер энергиясын анықтау дәлдігіне әсерін айтарлықтай төмендетеді

2 EMU01 коллаборация экспериментінің деректері негізінде алынған Херст көрсеткішінің ^{197}Au ядроларының соққыларында екінші бөлшектер үлестіру аралығының еніне тәуелділігі 10.7 фотоэмульсия ядроларымен АГЭВ барлық оқиғаларды бастапқы жағдайларға байланысты өзара әрекеттесудің төрт түріне бөледі: жарылыс, ағыс, аралас және булану

3 EMU01 коллаборация экспериментінде фотоэмульсия ядроларымен өзара әрекеттестікте 200 АГЭВ энергиясымен ^{32}S күкіртінің ұшқан ядросының толық қирауы нөсерлі бөлшектердің өте жоғары көптігімен және басқа Оқиғалармен салыстырғанда аз мәндерге қарай жылжумен

Жұмыстың ғылыми жаңалығы

1. Ультразұқа калориметр негізінде 10^{12}эВ -тан жоғары энергиялардың кең интервалы үшін бастапқы ғарыштық сәулеленудің энергиясын анықтаудың әмбебап тәсілі әзірленді.

2. Херст әдісі негізінде фотоэмульсия ядроларымен алтын ядроларының өзара әрекеттесуінде қайталама бөлшектердің жалған жылдам таралуында, өзара әрекеттесудің бастапқы жағдайларына байланысты, барлық оқиғаларды өзара әрекеттесудің төрт түріне бөлетін: жарылыс түрі, ағынды түрі, аралас түрі және буландырғыш түрі тығыздық флуктуацияларының классификациясы ұсынылған.

3 Жоғары көпше нөсерлі бөлшектермен және тар орташа жалған жылдам таралумен, орташа жалған жылдамдық төменгі мәндеріне қарай жылжыған ұшатын ядроның толық қирау оқиғаларының аномалды жоғары саны анықталды.

Жұмыстың теориялық және практикалық маңыздылығы

1 Ғарыштық бөлшектердің энергиясын анықтау үшін корреляциялық қисықтарды қолдану калориметрдің геометриялық өлшемдерін айтарлықтай азайтуға және бастапқы энергияны өлшеу дәлдігін арттыруға мүмкіндік береді.

2 Қайталама бөлшектің жалған жылдам пайда болған бөліктеріндегі корреляциялардың ұсынылған жіктелуі нөсер бөлшектерінің көптігі флуктуациясын және ұшатын ядро фрагменттері мен нысана ядросының фрагменттері санын өзара әрекеттесудің бастапқы параметрлерінің флуктуацияларымен байланыстыруға мүмкіндік береді (өзара әрекеттің орталық дәрежесі және өзара әрекет жасайтын ядролардың асимметрия дәрежесі).

3 200 АГЭВ кезінде $S+Em$ өзара әрекеттесуінде ұшып келе жатқан ядроның толық бұзылу оқиғаларындағы флуктуацияларды талдау осы аномалды оқиғалардың өзіндік ерекшеліктерін табуға мүмкіндік береді.

Нәтижелердің сенімділігі

Зерттеу барысында алынған нәтижелер мен қорытындылар барлық бөлімдердің мазмұнын көрсетеді және рецензияланатын халықаралық және отандық ғылыми басылымдардағы негізгі ғылыми нәтижелердің жарияланымдарымен расталады. Жұмыстың ғылыми қорытындыларының дұрыстығы тәуелсіз зерттеулердің нәтижелерімен және басқа авторлар алған қорытындылармен келісілуімен расталады.

Зерттеу көздері пайдаланылған әдебиеттер тізімінде көрсетілген бірегей ғылыми жұмыстар болып табылады.

Автордың жеке қосқан үлесі

Осы зерттеулерді орындау барысында автор сандық есептердің негізгі бөлігін орындады, талдау әдістерін әзірлеуге елеулі үлес қосты, сондай-ақ міндеттерді қою мен конференцияларға нәтижелерді ұсынуға белсенді қатысты.

Жарияланымдар

Диссертация материалдары бойынша 22 ғылыми жұмыс (12 мақала, 1 патент, 9 тезис), оның ішінде 4 Scopus және Web of Science индекстелетін журналдарда және 5 ҚР БҒСБК ұсынған басылымдарда жарияланды.

Жұмыстың апробациялау

Диссертациядағы нәтижелер халықаралық конференцияларда талқыланды: "Ядролық және радиациялық физика", "Фараби әлемі", "21st Int. Symposium on Heavy Ion Fusion", "The 3rd international conference on particle physics and astrophysics", "19th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions", сондай-ақ Мәскеу қаласында Мәскеу инженерлік-физика институтының Ұлттық зерттеу ядролық университетінің эксперименталды ядролық физика кафедрасының отырыстарында талқыланды.

Диссертация тақырыбының ғылыми жұмыстар жоспарларымен байланысы

Диссертациялық жұмыс аясында жүргізілген зерттеулер № BR05236730 "Плазма физикасы мен плазма тәрізді аймақтың іргелі мәселелерін зерттеу" мақсатты қаржыландыру бағдарламасы бойынша, 4824ГҚ4 "Асимметриялық ядролардың өзара әрекеттесуіндегі деконфайнмент процестерінің эксперименттік көріністерін іздеу" гранттық қаржыландыру жобасы бойынша, 1276ГҚ2 "Жұқа калориметр негізінде жоғары иондалған сәулеленуді өлшеу технологиясының ғылыми негіздерін дамыту" гранттық қаржыландыру жобасы бойынша, 1563ГҚ "Ядролардың өзара әрекеттесуіндегі фрагментациялық және көптеген процестерді зерттеу". гранттық қаржыландыру жобасы бойынша жүргізілді.

Диссертацияның көлемі мен құрылымы

Диссертация кіріспеден, үш бөлімнен, қорытындыдан, пайдаланылған әдебиеттер тізімінен тұрады. Диссертацияның көлемі 105 бет, оның ішінде 5 кесте және 59 сурет.