

АНДАТПА

«6D060400 – Физика» мамандығы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алуға ұсынылған Сызганбаева Сауле Аскаровнаның «**Интерполяциялық момент тәсілінің шеңберінде идеал емес плазманың динамикалық сипаттамалары мен оптикалық қасиеттері**» диссертациялық жұмысына

Жұмыстың жалпы сипаттамасы. Бұл диссертация моменттердің өздігінен келісілген әдісінің модификацияланған интерполяциялық тәсілін қолдана отырып, идеалды емес плазманың динамикалық және оптикалық қасиеттерін зерттеуге арналған. Зерттеу нәтижелерін салыстыру үшін теориялық әдістер сынақтан өтіп, сандық есептеулер мен эксперименттік мәліметтер пайдаланылды.

Зерттеу тақырыбының өзектілігі. Плазма физикасы қазіргі уақытта қарқынды даму кезеңін бастан өткеруде. Заттың төртінші күйінің қасиеттеріне қызығушылық көптеген себептерден туындаған. Негізгілердің бірі - табиғи отынның қысқаруына байланысты энергетикалық проблемаларды шешу. Алдағы дағдарыстан шығудың бірнеше жолы бар - жаңартылатын энергия көздері, ядролық энергия және термоядролық синтез қондырғыларынан алынатын энергия. Соңғысы анағұрлым тиімді болып шықты. Біріншіден, бұл энергия әлемдік сұраныстың негізгі бөлігін қамтамасыз ете алады, екіншіден, БТС-дегі реакторда атомдық реакторына қарағанда радиоактивті материалдар анағұрлым аз, сондықтан радиоактивті өнімдердің кездейсоқ шығарылуының салдары қауіпті емес, үшіншіден, БТС-де электр энергиясын тікелей алуға жол беріледі. БТС-де энергия алу үшін қазіргі уақытта екі жол бар. Біріншісі плазманы бірнеше жүз миллион градус температураға дейін қыздыруға негізделген. Екіншісі - термоядролық жанармайды қарқынды электромагниттік сәулелену ағындарымен немесе ауыр иондардың шоғырларымен бір мезгілде сығу кезінде жоғары температураға дейін қарқынды қыздыру. Жақында Калифорниядағы БТС-де дейтерио-третий плазмасын қыздырып, сығымдау үшін жұмсалғаннан көп энергия алуға мүмкіндік туды. Тығыз плазманың эксперименттік зерттеулері жеткілікті түрде күрделі және қомақты қаржылық шығыстарды талап етеді, сондықтан тығыз, жоғары температуралық плазманың термодинамикалық, оптикалық және электродинамикалық қасиеттері туралы шынайы деректер алуға мүмкіндік беретін талдаудың бірқатар теориялық әдістері әзірленді.

Әрине, басқарылатын термоядролық синтез қондырғыларынан басқа, идеалды емес плазманың қолдану ауқымы, зарядталған бөлшектердің өзара әрекеттесуінің орташа потенциалдық энергиясынан және одан жоғары реттегі жылу қозғалыстың орташа кинетикалық энергиясынан жарылатындай ұлғайды: ішкі тұрмыстық техника өндірісінен бастап жұлдыздар мен планеталарға дейін. Плазманың көмегімен қала қалдықтарын ең экологиялық таза түрде жағып, суды тазартуға, тіпті жараларды емдеуге болады. Соңғы

тенденция конденсацияланған затқа әсер етудің күшті көздерінің пайда болуы болып табылады. Бұл идеалды емес плазмасынның экстремалды параметрлерін және құбылыстарға бай жиынтығын әртүрлі жүзеге асыра алу мүмкіндіктерін күрт арттырды. Бұл, атап айтқанда, жоғары қуатты фемтосекундтық лазерлер мен ауыр иондық сәулелер, олардың көмегімен біз бүгінде конденсацияланған заттардың беті мен көлемін қыздырып, әртүрлі плазмалық әсерлерді зерттей аламыз. Дәстүрлі түрде идеалды емес плазманы генерациялау үшін қолданылатын қуатты жарылыстарды айтпағанда, бұл ерекше физика.

Жоғарыда жазылғандай, әлем жоғары энергиялық тәжірибелік құрылғыларды, атап айтқанда, инерциялық термоядролық синтез жүйелерін дамытуға бағыт алды. Бірақ мәселе мынада, Болашақ ИТС реакторларының жұмыс денесінің физикалық жағдайлары (температурасы мен тығыздығы), мұнда табиғатта бар сутегі изотоптарының (дейтерий мен тритий) нысаны сыртқы лазерлік сәулеленумен немесе ауыр иондардың сәулелерімен металдарға қарағанда 5 реттік тығыздыққа дейін қатты қысылады, мұндай экстремалды жағдай кейбір кішігірім параметрлер бойынша ыдырауға негізделген дәстүрлі физикалық теориялар сәтсіздікке ұшырайды және жұмыс денесіндегі процестерді диагностикалау және басқару үшін балама пертурбативті емес теориялық тәсілдер қажет.

Соңғы уақытта теориялық зерттеулермен қатар компьютерлік технологияда қарқынды прогресс байқалды, бұл идеалды емес плазмадағы барған сайын күрделі және күрделірек физикалық процестерді «тікелей» сандық модельдеу деп аталатын тәсілмен жүзеге асыруға мүмкіндік береді (кванттық молекулалық динамика әдісі және кванттық Монте-Карло, т.б.). Сандық модельдеу нәтижелері ең сенімділердің қатарына жатады, өйткені олар «бірінші» принциптерге негізделген. Үздіксіз орта ретінде әртүрлі физикалық жүйелерді модельдеуге арналған жасуша ішіндегі бөлшектердің әдістері де белгілі бір орынды алады.

Бөлшектердің өзара әрекеттесуінің кулондық потенциалын қолдана отырып, идеалды емес плазманың сипаттамаларын сипаттаудың дәйекті кванттық механикалық теориясын құрып, есептеу мәселелеріне әкеледі. Демек, плазманың статистикалық теориясында өзара әрекеттесудің кулондық потенциалын әртүрлі әсерлерді ескеретін кейбір тиімді потенциалдармен алмастыруға негізделген псевдопотенциалды модельдер пайда болды. Бұл потенциалдар қысқа қашықтықта, ал үлкен қашықтықта кулонмен сәйкес келеді, яғни ұзақ мерзімді болып қалады.

Бөлшектер арасындағы кулондық өзара әрекеттесуі бар жүйелерді зерттеудің теориялық әдістерінің арасында моменттер әдісі ерекше орын алады. Оның мәні - жүйенің сызықтық жауап беру функциясы белгілі бір математикалық қасиеттері бар параметр - бөлшек-сызықтық түрлендіру функциясы ретінде параметрленеді. Түрлендіру коэффициенттері Крамерс-крониг арақатынасы арқылы жауап беру функциясының жалған бөлігінің алғашқы моменттерінен есептелген ортогональды полиномалар болып табылады. Моменттерді Кубоның қайталама кванттау әдісімен сызықтық

реакция теориясы шеңберінде тәуелсіз және дәл есептеуге болады. Біздің өзін-өзі үйлестіретін тәсіліміз білімге негізделген немесе статикалық модельдеу арқылы зерттейтін физикалық жүйенің динамикалық сипаттамаларын қалпына келтіруге мүмкіндік береді. Өзара әрекеттесетін зарядтардың пертурбативті емес статистикалық жүйелері үшін олардың идеалды еместігінің кез-келген дәрежесінде есептеулер жүргізу мүмкіндігі ерекше негіз береді. Бұл жағдайда, мысалы, кинетикалық теориядағыдай, идеалды емес дәрежесі бойынша ешқандай ыдырау жасау қажет емес.

Жоғарыда айтылғандардың негізінде идеялды емес плазманың динамикалық және оптикалық қасиеттері туралы дәйекті ақпарат алуға мүмкіндік беретін зерттеулер өзекті деп тұжырымдауға болады.

Жұмыстың мақсаты - момент әдісі шеңберінде тығыз идеалды емес плазманың динамикалық және оптикалық қасиеттерін зерттеу.

Мақсатқа қол жеткізу үшін қойылған **міндеттерді** шешу қажет болды:

- динамикалық құрылымдық факторларды есептеу және талдау, нәтижелерді сандық эксперименттердің деректерімен салыстыру;
- плазмалық модтардың сөну дисперсиясы мен декрементін талдау;
- электронды газдағы зарядталған бөлшектердің энергетикалық шығындарын есептеу;
- тығыз плазмадан электромагниттік толқындардың шағылу коэффициенті үшін өрнектерді табу және талдау;

Зерттеу объектісі - тығыз идеалды емес плазма болып табылады.

Зерттеу мәні - тығыз идеалды емес плазманың динамикалық және оптикалық қасиеттері.

Зерттеу әдістері. Қойылған мақсаттарға қол жеткізу үшін қажетті міндеттерді шешу кезінде интерполяциялық өздігінен келісілген моменттердің әдісі пайдаланылатын болады.

Жұмыстың жаңалығы. Диссертациялық жұмыста алғаш рет:

- айнаымалы параметрлерді пайдаланбай, шағылысу коэффициентінің есептері жүргізілді және бірегей эксперимент пен сандық модельдеу нәтижелерімен сәйкестік көрсетілді;
- интерполяциялық өздігінен келісілген моменттердің әдісі шеңберінде электрондық газдың тежеу қабілеті зерттелді;
- бір компонентті плазма мен электрондық газ модельдеріндегі динамикалық құрылымдық факторлар есептеліп талданды, нәтижелері басқа авторлардың деректерімен келісіледі;
- жүйедегі ұжымдық модалардың дисперсиясы мен сөнуі зерттелді.

Зерттеудің теориялық және практикалық маңыздылығы. Жүргізілген зерттеулер мен диссертацияда алынған нәтижелер басқарылатын термоядролық қондырғыларда және астрофизикалық объектілерде кездесетін эксперименталды түрде зерттелген плазма түрлерінің динамикалық сипаттамаларын болжауға мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелері плазманы диагностикалау үшін белгілі бір практикалық маңызы бар тығыз кулондық жүйелер теориясын дамытады.

Қорғауға шығарылатын ережелер

- Классикалық идеалды емес бір компонентті плазмадағы плазмалық толқындардың диэлектрлік сипаттамалары (идеалды емес параметрде $5 \leq \Gamma \leq 160$) диэлектрлік функция алғашқы бес сома ережесін қанағаттандыратындай $\sim 3,75\%$ дейінгі қателік шегі бар сандық эксперименттердің деректеріне сәйкес келеді.

- $r_s \gtrsim 1$, ($n_e \gtrsim 10^{22} \text{ см}^{-3}$) тығыздық параметрлеріндегі интерполяциялық өздігінен келісілген моменттердің әдісі ішінде табылған электронды газдағы түскен зарядталған бөлшектің поляризациялық энергия шығыны, жылдамдықтардың барлық диапазонында $\sim 5\%$ дейін қателігі бар заманауи сандық эксперименттердің деректеріне сәйкес келеді.

- 532-1064 нм толқын ұзындығы диапазонындағы р-поляризацияланған электромагниттік сәулелену үшін соққымен-сығылған плазма қабатынан шағылысу коэффициенттерінің мәндері, түсу бұрыштарының кең диапазонында (0-ден $\frac{\pi}{3}$ -ге дейін) моменттердің әдісімен есептелген өтпелі қабаттың енін есепке алмаған плазмада, мәні перпендикулярлық түсумен төмендейтін $\sim 5,5\%$ дейінгі қателікпен нақты тәжірибелер деректеріне сәйкес келеді.

Жұмыс нәтижелерінің сенімділігі. Диссертациялық жұмыста дәлелденген математикалық теоремалар арқылы белгілі және дәлелденген физикалық модельдер қолданылды. Алынған қатынастар белгілі фундаментальды теңдеулер мен математикалық өрнектерге негізделген.

Басқа зерттеулермен байланысы. Диссертация инерциялық термоядролық синтез бойынша тәжірибелік жұмыстармен, физикалық процестерді модельдеумен және тығыз идеалды емес плазма саласындағы теориялық жұмыстармен байланысты.

Жарияналымдар. Диссертациялық жұмыстың материалдары бойынша 20 баспа жұмысы: ҚР Оқу-ағарту министрлігінің саласында сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынатын басылымдардағы мақалалар 7, Web of Science және Scopus халықаралық ақпараттық ресурсына кіретін импакт-факторы бар журналдарында 5 мақала, халықаралық ғылыми конференциялардың материалдарында 8 жұмыс жарияланған.

Thomson Reuters дерекқоры бойынша немесе Scopus халықаралық ғылыми дерекқорына кіретін басылымдардағы импакт-факторы бар мақалалар:

- S.A. Syzganbayeva, J. Ara, A. Askaruly, A.B. Ashikbayeva, I.M. Tkachenko, and Y.V. Arkhipov // Collective phenomena in a quasi-classical electron fluid within the interpolational self-consistent method of moments // Europhysics Letters. –2022. –Volume 140. –Number 1. – 11001p.

- Yu.V. Arkhipov, A. Ashikbayeva, A. Askaruly, A.E. Davletov, D.Yu. Dubovtsev, Kh. S. Santybayev, S.A. Syzganbayeva, L. Conde, I.M. Tkachenko. Dynamic characteristics of three-dimensional strongly coupled plasmas // Physical Review E. –2020. –Vol.102(5). – P. 053215.

- Yu. V. Arkhipov, D. Yu. Dubovtsev, **S.A. Syzganbayeva**, I.M. Tkachenko. Optical properties of dense plasmas // Plasma Physics Reports. –2020. –V.46(1). – P.71-76.

- Yu. V. Arkhipov, A.B. Ashikbayeva, A. Askaruly, D. Yu. Dubovtsev, **S.A. Syzganbayeva**, I.M. Tkachenko. Stopping power of an electron gas: The sum rule approach // Contributions to Plasma Physics. –2019. –V.59(6). – P. e201800171.

- Yu. V. Arkhipov, A.B. Ashikbayeva, A. Askaruly, M. Bonitz, L. Conde, A.E. Davletov, T. Dornheim, D. Yu. Dubovtsev, S. Groth, Kh. Santybayev, **S.A. Syzganbayeva**, I.M. Tkachenko. Sum rules and exact inequalities for strongly coupled one-component plasmas // Contributions to Plasma Physics. – 2018. – V.58(10). – P. 967-975.

- Yu. V. Arkhipov, A.B. Ashikbayeva, A. Askaruly, A.E. Davletov, S. Syzganbaeva, I.M. Tkachenko. Dense Plasma Dynamic Structure Factor Simulation Data vs. the Method of Moments // Contributions to Plasma Physics. – 2015.- Vol. 55. – No.5. – P.381-389.

Автордың жеке үлесі – диссертациялық жұмыстың барлық көлемін, зерттеу әдісін таңдауды, есептерді шешуді және сандық есептеулерді автор өз бетінше орындады. Тапсырма қою, алынған нәтижелерді талқылау ғылыми жетекшілермен бірлесіп жүргізілді.

Диссертациялық жұмыс ҚР ОАМ «Идеалдық емес плазманың динамикалық қасиеттерін тікелей анықтау» (AP05132333), «2D және 3D геометриядағы кулондық жүйелердің динамикалық қасиеттері» (AP09260349) тақырыбы бойынша ғылыми-зерттеу жұмысы шеңберінде орындалды.