

ШОМШЕКОВА САУЛЕ АХМЕТБЕКОВНА

БЕЙСТАЦИОНАР ЭКЗОПЛАНЕТАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДІҢ ДИНАМИКАЛЫҚ ЭВОЛЮЦИЯСЫН ЗЕРТТЕУ

«6D060300 - Механика» мамандығы бойынша философия докторы (PhD)
дәрежесін алу үшін дайындалған диссертацияға

АНДАТПА

Зерттеу тақырыбының өзектігі. Күн жүйесінен тыс планеталардың (экзопланеталардың) ашылуы астрономияның дамуына және аспан механикасының әдісін қолдану жаңа дәуірдің бастауы болды. 1995 жылы бірінші экзопланет табылғанға дейін Күн жүйесі Әлемдегі жалғыз планеталық жүйе болып саналды. Күн жүйесінің барлық планеталарының орбиталары шеңберге жақын $e \approx 0$, тек қана Меркурийдікі $e = 0.2$, орбита еңкеюі - 7^0 . Соңғы 25 жыл ішінде түрлі ғарыш аппараттары - Corot (2006), Кеплер (2009), Gaia (2013), TESS (2018), Cheops (2020) ұшырылды Күн жүйесінен тыс нысандардың (экзопланеталардың) көп мөлшерін (4174-29.01.2020) табуға мүмкіндік берді, олардың кейбірін Жермен салыстыруға болады.

Қазіргі заманғы астрофизиканың, сонымен қатар теориялық және аспан механикасының өзекті мәселесі экзопланетарлық жүйелердегі эксцентриситет пен орбита еңкеюі мәндерінің шамасының неліктен өсуін түсіндіретін себептерінің болмауы болып табылады. Мүмкін болатын себептердің бірі - орталық жұлдыз мен планета массаларының анизотропты өзгеруі, бұл жүйенің динамикалық эволюциясына әсер етеді. Орталық жұлдыздардың массасы, мөлшері, пішіні және планеталардың орбиталық элементтерінің уақыт өте келе өзгеруін анықтауға мүмкіндік береді. Тақырып өте өзекті, өйткені ғарыш аппараттарының жаңа ұшырылымдары жоспарланған, олар көп экзопланеталарды табуы керек, олардың кейбірі Жермен салыстыруға болатындығы әбден мүмкін.

19 ғасырдың аяғына дейін аспан механикасындағы мәселелер тек стационарлық аспан денелері үшін шешілді. Айнымалы массасы бар екі дененің есептері үшін салыстырмалы қозғалыс дифференциалдық теңдеуін алғаш рет 1884 жылы Гильден қолданған.

Қосымша зерттеулер В.Г. Фесенков, Г.М. Идлис, Т.Б. Омаров, Ж.Д. J.D. Hajidemetriou, Л.Г. Лукьянов, Э.Н. Поляхов, А.А. Беков, А. Deprit, L. Floriga және басқалар бейстационар ғарыш жүйелерінің табиғатын зерттеуде бейстационар аспан механикасының моделі мәселелерінің ерекше маңыздылығын көрсетті.

Өткен ғасырдың 80-ші жылдарында көптеген теоретиктер гравитациялық жүйелердің аспан механикасындағы мәселелерді шешіп,

гравитациялық денелердің массалық анымалылығын белсенді зерттеді. Омаров Т.Б. интенсивті корпускулалық сәулелену арқылы кең қос жұлдыздардың динамикасы зерттеді.

Гравитациялық шаң-тозаңды зат ішінде қозғалатын екі дененің мәселесі шешілді. Омаров Т.Б. пен бірге қосымша осыған ұқсас зерттеулерді профессор J.D. Hajidemetriou жүргізді. Динамикалық астрономия тарихындағы екі жақты жұмыстың нәтижесінде «Омаров-Хаджидеметриу элементтері» сияқты ұғымдар пайда болды.

Күн жүйесінен тыс планеталардың орбиталары эксцентриситеті және орбита еңкеюі мәні бойынша әртүрлі болып өзгереді. Күн жүйесінен тыс планеталардың пайда болуы орталық жұлдыздың массасына тікелей байланысты. Үлкен планеталардың таралуы жұлдыздардың массаларының көбеюімен тез өсетіндігі белгілі болды. Сонымен қатар жұлдыздардың аралық массалары (Күн массасы 1,5-3) массивті және кіші эксцентриситетті кең орбиталарда болатындығы белгілі болды.

Соңғы 10 жыл ішінде динамикалық жүйелердегі анизотроптық массаның аynamалылығы туралы мәселелерді әлем ғалымдары белсенді зерттелуде.

Бұл диссертацияда аспан-механикасының белгілі математикалық модельдерін қолдана отырып, планеталық жүйелердің динамикалық эволюциясының табиғатын түсіну үшін массаның аynamалылығын планетаның орбиталық элементтеріне әсері зерттелген.

Диссертация жұмысының мақсаты орталық жұлдыз және екі планетаны қамтитын үш өзара гравитациялық сфералық аспан денелері жүйесінің массаларындағы анизотроптық аynamалылығы реактивті күштердің пайда болуына әкелетіндігін ескеріп, планеталардың орбиталық элементтеріне массаның аynamалылығының әсерін зерттеу.

Зерттеу міндеттері:

1 Массалары анизотропты өзгертін үш өзара гравитациялық сфералық аспан денелерінен тұратын жүйенің динамикасын зерттеу, орталық жұлдызбен байланысты салыстырмалы координаттар жүйесінде реактивті күштердің өрнектерін алу.

2 Компьютерлік алгебраның әдістерін қолданып, әртүрлі қарқында анизотропты өзгертін екі планеталық үш денелі есеп үшін қалаған дәлдікке дейінгі кіші e_j және i_j параметрлері бойынша Пуанкаре аynamалыларын және Кеплер элементтерінің аналогтарын қолдана отырып квазикониялық қима бойымен периодты емес қозғалыс негізінде қатарға жіктеудің аналитикалық алгоритмін жасау.

3 Пуанкаре аynamалыларының екінші жүйесінің аналогтарындағы орбиталық параметрлердің әрекетін анықтайтын эволюция теңдеулерін және Лагранж формасындағы Кеплер элементтерінің аналогтарындағы эволюциялық теңдеулерді алу.

4 Динамикалық эволюцияны зерттеу үшін нақты экзопланеталық жүйелерді таңдау. Пуанкаре элементтерінің екінші жүйесінің аналогтарындағы және Кеплер элементтерінің аналогтарындағы

эволюциялық теңдеулердің сандық шешімдерін Лагранж түріндегі қозғалыс теңдеулерін қолдана отырып және таңдалған экзопланеталардың бақылаушы деректерінен жүйе параметрлерінің мәндерін таңдау.

5 Бұл жүйелердегі массалардың анизотропты өзгеруі және экзопланеталардың орбиталарының эксцентриситеті, орбита еңкеюі біршама үлкендігінің өзара арасындағы байланысты зерттеу.

Зерттеу объектісі - бейстационар экзопланеталық жүйелер эволюциясының динамикасы.

Зерттеу әдістері. Ұйытқу теориясын қолдануға арналған бастапқы теңдеулер «ата-аналық» жұлдызының ортасында салыстырмалы координаталар жүйесіндегі қозғалыс теңдеулері болып табылады.

Қозғалыс теңдеулері бейстационарлы жүйелер үшін әзірленген ұйытқу теориясының әдістерімен зерттеледі. Квазиконикалық қима бойымен периодты емес қозғалысқа негізделген ұйытқу теориясының әдістері қолданылады.

Бейстационар экзопланеталық жүйелер эволюциясының динамикасын талдау үшін қазіргі заманғы компьютерлік алгебраның әдістері мен сандық әдістері қолданылады және оларды жүзеге асыру үшін Mathematica жүйесі қолданылады.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы.

1. Компьютерлік алгебраның әдістерін және Mathematica символдық есептеу жүйесін қолдана отырып, екі планеталы үш денелі есептер үшін салыстырмалы түрде кіші параметрлердің кез-келген реттілігіне дейін жіктеу қатарындағы ұйытқу функциясының аналитикалық алгоритмі жасалынған.

2. GJ 180: GJ 180b, GJ180c экзопланеталық жүйенің динамикалық эволюциясының эволюциялық теңдеулері үшін сандық шешім алынды.

3. Нақты экзопланеталық жүйелердің орбиталдық қозғалысына масса айнымалылығының әсерінің әсері анықталды. Олар айнымалы массасы бар жұлдыздық жүйелер эволюциясында маңызды рөл атқарады. Массыдағы уақытша өзгерістер орбиталдық қозғалыстарға айтарлықтай әсер етеді, бұл аспан денелерінің айналмалы қозғалыстарының динамикалық эволюциясына әсер етеді.

Нәтижелердің теориялық және тәжірибелік маңыздылығы.

Диссертациялық жұмыста алынған нәтижелер аспан механикасындағы үш немесе одан да көп денелердің есептеріндегі бейстационар жүйелердің динамикалық эволюциясын зерттеу үшін қолданыла алады. Нәтижелер бірнеше планеталардан тұратын жүйелердің қалыптасу және эволюция процестерін зерттеу үшін қолданыла алады. Зерттеу нәтижелері анизотропты конфигурацияда және әртүрлі қарқынмен масса жоғалудың жоғары деңгейіне ие «ескі» жұлдыздар - қызыл алыптар төңірегіндегі планеталық жүйелер эволюциясының ерекшеліктерін айқындайды.

Жарияланымдар. Диссертация бойынша 10 жұмыс жарық көрді, оның ішінде 3 ғылыми жарияланымдар, ғылыми жұмыстардың негізгі ғылыми нәтижелерін жариялау үшін ҚР Білім және ғылымды бақылау комитеті

ұсынған тізімге енгізілген, 2 ғылыми жарияланымдар Thomson Reuters мәліметтер базасында немесе Scopus мәліметтер базасында, 5 халықаралық конференциялардың материалдарындағы жарияланымдар.

Диссертация тақырыбы бойынша нәтижелер келесі жұмыстарда жарияланды:

Рейтенгі жоғары мақалалар

Диссертация материалдары бойынша 10 жарияланым жарияланған.

ThomsonReuters или *Scopus* база мәліметтерінде:

1. Prokopenya A., Minglibayev M., Shomshekova S. Computing Perturbations in the Two-Planetary Three-Body Problem with Masses Varying Non-Isotropically at Different Rates // *Mathematics in Computer Science*. – 2020. – Vol.14 – No. 2. – P.241–251. <https://doi.org/10.1007/s11786-019-00437-0>. [Impact Factor = 0.75.]. Q3. CiteScore-33-процентиль.

2. А) Прокопеня А.Н., М.Дж. МинглибаевМ.Дж., Шомшекова С.А. Применение компьютерной алгебры в исследованиях двухпланетной задачи трех тел с переменными массами // *Программирование* – 2019. - №2. – С.58-65. DOI:10.1134/SO132347419020092

3. Б) ProkopenyaA., MinglibayevM., Shomshekova S. Applications of Computer Algebra in the Study of the Two-Planet Problem of Three Bodies with Variable Masses // *Programming and Computer Software*. – 2019. – Vol. 45. – No. 2. – P.73–80. [DOI:10.1134/S0361768819020087] [ImpactFactor = 0.75.]. Q4. CiteScore-23-процентиль.

Қазақстан Республикасы Білім және ғылым саласындағы бақылау комитет басылымдарындағы мақалалар:

1. Минглибаев М. Дж., Маемерова Г.М., Шомшекова С.А. Дифференциальные уравнения относительного движения нестационарных экзопланетных систем // *Вестник КазНПУ, серия физико-математическая*. – 2017. – Т.57. №1. – С.141 -147.

2. MinglibayevM., Shomshekova S. Analytical expressions of the perturbing functions in two planetary three - body problem with masses varyng non-isotropically when available for reactive forces // *ИзвестияНАНПК, серияфизико-математическая*. – 2018. –Vol. 319. №3. – С.134-163.

3. Минглибаев М., Шомшекова С. Статистический анализ экзопланетных систем по спектральным классам звезд // *Вестник КазНУ им. аль-Фараби. Серия физическая. (Recent Contribution to Physics)*. – 2019. – Т. 68. № 1. – С.20-28.

Халықаралық конференциялардағы жұмыстар мен жарияланымдары:

1. Minglibayev M., Prokopenya A., Shomshekova S. Computing Perturbations in Two-Planetary Three-Body Problem with masses varying Non-isotropically at different rates // *International*

Conference on Applications of Computer Algebra (ACA-2018). – Universidad de Santiago de Compostela. – 2018. – P.47.

2. Минглибаев М., Прокопеня А., Шомшекова С. Исследования вековых возмущений в двухпланетной задаче трех тел с переменными массами // Международная конференция «Астрономия 2018», приуроченная к XIII съезду Международной общественной организации «Астрономическое общество». – Москва. – 2018. – С. 232-235. [10.31361/eaas.2018-1.043](https://doi.org/10.31361/eaas.2018-1.043).

3. Minglibayev M., Prokopenya A., Mayemerova G., Shomshekova S. On expansion of the perturbing functions in two-planetary three-body problem with masses varying non-isotropically at different rates // Computer Algebra Systems in Teaching and Research. – Siedlce. – 2018. Vol. VII. – P. 37-44.

4. Минглибаев М., Шомшекова С. К динамике планет в экзопланетных системах с родительской звездой переменной массы // Международная конференция «Современная звездная астрономия-2017». – Екатеринбург. – 2017. Получен сертификат.

5. Шомшекова С. Статистическое исследование нестационарных экзопланетных систем по спектральным классам центральной звезды // Материалы международной конференции студентов и молодых ученых «Фарабиэлемі». – Алматы. – 2017. – С.97.

Диссертацияның құрылымы мен көлемі. Диссертация титулдық беттен, мазмұны, жазбалары мен қысқартуларынан, 5 бөлімнен тұрады, олар кіші, қорытынды, пайдаланылған әдебиеттер тізіміне бөлінген. Жұмыста 26 сурет бар. Жұмыстың жалпы көлемі 119 беттен, соның ішінде бір қосымша 14 беттен тұрады.

Диссертацияның негізгі мазмұны. Кіріспеде диссертация тақырыбының өзектілігі, мақсаты, объектісі, тақырыбы, зерттеу міндеттері, жұмыстың ғылыми жаңалығын негіздеу, оның теориялық және практикалық маңыздылығы, қорғалуға тиісті ғылыми қағидалары, қол жетімді басылымдар саны көрсетілген.

1-тарауда NASA Exoplanet Archive деректер қорындағы еуропалық каталогтың деректері талданды және олардың динамикалық эволюциясын зерттеу үшін экзопланетарлық жүйелер таңдалды. Іріктеудің негізгі өлшемдері:

а) Жұлдыздардағы заттардың едәуір массалық шығарылуы, яғни массаның жоғалу жылдамдығы $10^{-6}M_{\odot}/\text{жыл}$ болатын бейстационар экзопланеталық жүйелерге, ұзартылған және аайнымалы орбиталарға тән.

б) 3 денелік есепке сәйкес, біз 2 планеталы жүйе және барлық қажетті орбиталық параметрлері анықталған жүйелерді таңдаймыз.

в) Жүйенің планеталары кішкентай эксцентриситет және көлбеулікпен орбитада қозғалады және Жердің тиімді орбитасы аймағында массивті планеталар болмайды

Деректерді талдау басты тізбекті жұлдыздардың ішінде М жұлдыздары үшін массалық жоғалту ең үлкен екенін көрсетті. Вольф-Райе жұлдыздары көп мөлшерде жоғалтады, бірақ ақарастырылмайды, себебі бұл жұлдыздардың жанында планеталардың пайда болуы үшін жағдай жоқ.

Қазіргі уақытта барлық қажетті бақыланатын орбиталық параметрлер GJ 180 - GJ 180 b, GJ 180 c жүйесі бар.

2 тарауда, Мещерский теңдеулеріне сүйене отырып, абсолютті (барицентрлік) декарттық координаттар жүйесінде реактивті күштер болған кезде қозғалыс теңдеулері алынады. Қарастырылып отырған мәселенің қозғалыс теңдеулері квазиконикалық қима бойынша периодты емес қозғалысқа негізделген ұйытқу теориясын қолдануға ыңғайлы орталық жұлдыздың центрінде болатын салыстырмалы координаттар жүйесінде алынған. Лагранж теңдеулері түрінде ұйытқыған планеталық қозғалыс теңдеулері алынды. Өрнектер салыстырмалы координаттар жүйесінде массаның анизотропты айнымалылығы бар реактивті күштер үшін алынады.

3 тарауда Пуанкаре екінші айнымалы аналогтарындағы эволюция теңдеулері бойынша сандық есептеулер нәтижелері келтірілген. Нәтижелерді талдау орбиталық жазықтықтағы бөлшектердің салыстырмалы жылдамдығының өзгеруімен 5000 Жер жылының уақыт аралықтарында орбиталық параметрлердің массадағы изотроптық өзгерістер жағдайында салыстырғанда өзгермейтіндігін көрсетті, дегенмен уақытқа тәуелділік орбиталық параметрлердің тұрақты массалармен салыстырғанда айтарлықтай өзгеруіне әкеледі. Орбитаның жазықтығына перпендикуляр бөлшектердің салыстырмалы шығарылу жылдамдығының өзгеруімен реактивті күш планеталардың кейбір орбиталық параметрлеріне әсер етеді, мысалы эксцентриситет және орбита еңкеюі аналогтары, бұл созылыңқы орбиталарға әкеледі.

Пуанкаре элементтері бұл мәселені кішкене эксцентриситеттер мен орбита еңкеюі үшін жақсы сипаттайды, бірақ есептеулер көрсеткендей, эксцентриситет пен орбита еңкеюінің артуы мүмкін. Пуанкаре элементтерінің екінші жүйесінің аналогтарында қозғалыс теңдеулерін бірнеше рет түрлендірілуі керек, осыған байланысты дәлдік азаяды.

4 тарауда квазиконикалық қиманың бойымен периодты емес қозғалыс негізінде әр түрлі мөлшерде анизотропты түрде өзгертін екі планеталық үш денелік есепте ұйытқу функцияларды жіктеуге арналған жалпы теңдеулер алынды. Ұзақ уақыт аралығындағы орташа қозғалыстағы резонанстың болмаған кезде денелердің орташа бойлығымен орташаланған орбиталық параметрлердің эволюциясын сипаттайтын дифференциалдық қозғалыс теңдеулері алынды. Бұл жағдайда протопланетарлық дискінің қалдықтарынан заттардың шығарылуына байланысты ата-аналық жұлдыз массасының азаюы және планеталар массасының көбеюінің әсері ескеріледі. Қажетті дәлдіктегі эксцентриситет пен орбита еңкеюі бойынша дәрежелік қатарындағы ұйытқушы функцияның аналитикалық жіктеуі алынды. Ата-аналық жұлдыздар мен планеталардың массаларындағы анизотроптық айнымалылығымен экзопланеталық жүйелердің динамикалық эволюциясын зерттеу үшін қолдануға болатын кез-келген дәлдіктегі ұйытқушы функциялардың эксцентриситет пен орбита еңкеюі бойынша жіктелінген қатынастары алынған.

5 тарауда, ұйытқу теориясын қолдану арқылы (бастапқы жуықтау), квазиконикалық қима бойымен периодты емес қозғалысты сипаттайтын айнымалы массалы екі дене есебін нақты шешімі қарастырылған. планетарлық Лагранж теңдеулері түрінде орбитальдық параметрлердің әрекетін анықтайтын ұйытқу функцияларының эксцентритеті мен көлбеулігінің үшінші ретті дифференциалдық теңдеулер алынды. 5000 жер жыл аралығындағы орбиталық параметрлердің эволюциясын сипаттайтын орташа бойлық арқылы орташаланған қозғалыстың дифференциалдық теңдеулер алынды. Лагранж формасындағы эволюциялық теңдеулерді қолдана отырып, Wolfram Mathematica компьютерлік алгебра жүйесі арқылы, GJS80 GJ180: GJ 180 b, GJ 180 c экзопланетлық жүйе планеталарының орбиталдық элементтері аналогтарының эволюциясының сандық есептеулер жүргізілді. Реактивті күштің болуы орбитаның еңкеюі және бұрыштың бойлығына көбірек әсерін тигізеді.