

ISSN 2518-1483 (Online),
ISSN 2224-5227 (Print)

**ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES**

**№1
2026**

ISSN 2518-1483 (Online),
ISSN 2224-5227 (Print)

2026 • 1



**ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND
CHEMICAL SCIENCES**

PUBLISHED SINCE JANUARY 1944

ALMATY, NAS RK

EDITOR-IN-CHIEF

ZHURINOV Murat Zhurinovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of IAAS and NAS RK, General Director Oil refining and Petrochemistry Research Institute (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

KALIMOLDAYEV Maksat Nuradilovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detailuri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

ABILMAGZHANOV Arlan Zainutallaevich, PhD in Chemistry, General Director of JSC "Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry named after D.V. Sokolsky", (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197468109>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2024265>

EDITORIAL BOARD:

ADEKENOV Sergazy Mynzhasarovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Director of the JSC "Phytochemistry Research and Production Center", (Karaganda, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006153118>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/48648658>

RAMAZANOV Tlekkabul Sabitovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701328029>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/13503476>

ABIEV Rufat, Doctor of Technical Sciences (Biochemistry), Professor, Head of the Department of Optimization of Chemical and Biotechnological Equipment, St. Petersburg State Technological Institute (St. Petersburg, Russia), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602431781>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1405661>

OLIVIERO Rossi Cesare, PhD (Chemistry), Professor at the University of Calabria (Calabria, Italy), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221375979>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/399768>

TIGINYANU Ion Mihailovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician, President of the Academy of Sciences of Moldova, Technical University of Moldova (Chisinau, Moldova), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006315935>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

SANG SU Kwak, PhD (Biochemistry, Agricultural Chemistry), Professor, Chief Scientist, Research Center for Plant Systems Engineering, Korea Research Institute of Bioscience and Biotechnology (KRIBB), (Daecheon, Korea), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59286321700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30028581>

BERSIMBAYEV Rakhmetkazhi Iskenderovich, Doctor of Biological Sciences, Professor, Academician of NAS RK, L.N. Gumilyov Eurasian National University (Astana, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004012398>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/19854255>

CALANDRA Pietro, PhD (Physics), Professor, Institute for the Study of Nanostructured Materials (Rome, Italy), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/616360>

BOSHKAEV Kuantai Avgazyevich, PhD, Associate Professor, Department of Theoretical and Nuclear Physics, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=54883880400>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2080231>

BURKITBAEV Mukhambetkali, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8513885600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/29017135>

QUEVEDO Hernando, Professor, National Autonomous University of Mexico (UNAM), Institute of Nuclear Sciences (Mexico City, Mexico), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55989741100>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30353742>

ZHUSUPOV Marat Abzhanovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Theoretical and Nuclear Physics, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602166928>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/566>

KOVALEV Alexander Mikhailovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of NAS of Ukraine, Institute of Applied Mathematics and Mechanics (Donetsk, Ukraine), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202799321>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/65533963>

TAKIBAEV Nurgali Zhabagaevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24077239000>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1671760>

KHARIN Stanislav Nikolaevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Kazakh-British Technical University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701353063>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2023295>

ABISHEV Medeu Erzhanovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Corresponding Member of NAS RK, (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1556025>

ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES.

ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print)

Owner: «Central Asian Academic Research Center» LLP (Almaty).

The certificate of registration of a periodical printed publication in the Committee of Information of the Ministry of Information and Social Development of the Republic of Kazakhstan № KZ93VPY00121157 issued 05.06.2025

Thematic scope: *physics and chemistry*.

Periodicity: 4 times a year.

<http://reports-science.kz/index.php/en/archive>

БАС РЕДАКТОР

ЖҰРЫНОВ Мұрат Жұрынулы, химия ғылымдарының докторы, профессор, ХҒАҚ және ҚР ҰҒА академигі, Мұнай өңдеу және мұнай-химиясы ғылыми-зерттеу институтының бас директоры (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/author/detail.uri?authorId=6602177960>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

БАС РЕДАКТОРДЫҢ ОРЫНБАСАРЛАРЫ:

КАЛИМОЛДАЕВ Мақсат Нұрәділұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/author/detail.uri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/rec-ord/2428551>

ӘБИЛМАҒЖАНОВ Арлан Зайнуталлайұлы, химия ғылымдарының кандидаты, Д.В. Сокольский атындағы «Жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ Бас директоры (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/author/detail.uri?authorId=57197468109>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2024265>

РЕДАКЦИЯ АЛҚАСЫ:

ӘДЕКЕНОВ Серғазы Мынжасарұлы, химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, «Фитохимия» ғылыми-өндірістік орталығы» АҚ директоры (Қарағанды, Қазақстан), <https://www.scopus.com/author/detail.uri?authorId=7006153118>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/48648658>

РАМАЗАНОВ Тілеккабыл Сәбитұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/author/detail.uri?authorId=6701328029>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/13503476>

ӘБИЕВ Руфат, техника ғылымдарының докторы (биохимия), профессор, Санкт-Петербург мемлекеттік технологиялық институты «Химиялық және биотехнологиялық аппаратураны оңтайландыру» кафедрасының меңгерушісі (Санкт-Петербург, Ресей), <https://www.scopus.com/author/detail.uri?authorId=6602431781>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1405661>

О.ЛИВЬЕРО Росси Сесаре, PhD (химия), Калабрия университетінің профессоры (Калабрия, Италия), <https://www.scopus.com/author/detail.uri?authorId=57221375979>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/399768>

ТИГИНЯНУ Ион Михайлович, физика-математика ғылымдарының докторы, академик, Молдова Ғылым академиясының президенті, Молдова техникалық университеті (Кишинев, Молдова), <https://www.scopus.com/author/detail.uri?authorId=7006315935>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

САНГ-СУ Квак, PhD (биохимия, агрохимия), профессор, Корей Биоғылым және биотехнология ғылыми-зерттеу институты (KRIBB), өсімдіктердің инженерлік жүйелері ғылыми-зерттеу орталығының бас ғылыми қызметкері (Дэчон, Корея), <https://www.scopus.com/author/detail.uri?authorId=59286321700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30028581>

БЕРСІМБАЕВ Рахметқажы Ескендірұлы, биология ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті (Астана, Қазақстан), <https://www.scopus.com/author/detail.uri?authorId=7004012398>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/19854255>

КАЛАНДРА Пьетро, PhD (физика), нанокүрылымды материалдарды зерттеу институтының профессоры (Рим, Италия), <https://www.scopus.com/author/detail.uri?authorId=7004303066>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/616360>

БӨШКАЕВ Қуантай Авғазыұлы, PhD теориялық және ядролық физика кафедрасының доценті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/author/detail.uri?authorId=54883880400>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2080231>

БҮРКІТБАЕВ Мұхамбетқали, химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/author/detail.uri?authorId=8513885600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/29017135>

QUEVEDO Hernando, профессор, Мексика ұлттық автономиялық университеті (UNAM), Ядролық ғылымдар институты (Мехико, Мексика), <https://www.scopus.com/author/detail.uri?authorId=55989741100>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30353742>

ЖҮСІПОВ Марат Абжанұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, теориялық және ядролық физика кафедрасының профессоры, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/author/detail.uri?authorId=6602166928>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/566>

КОВАЛЕВ Александр Михайлович, физика-математика ғылымдарының докторы, Украина ҰҒА академигі, Қолданбалы математика және механика институты (Донецк, Украина), <https://www.scopus.com/author/detail.uri?authorId=7202799321>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/65533963>

ТАКИБАЕВ Нұрғали Жабағаұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/author/detail.uri?authorId=24077239000>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1671760>

ХАРИН Станислав Николаевич, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/author/detail.uri?authorId=6701353063>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2023295>

ӘБІШЕВ Медеу Ержанұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/author/detail.uri?authorId=26530759900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1556025>

ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES

ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print)

Меншіктеуші: «Орталық Азия академиялық ғылыми орталығы» ЖШС (Алматы қ.).

Ақпарат агенттігінің мерзімді баспасөз басылымын, ақпарат агенттігін және желілік басылымды қайта есепке қою туралы ҚР Мәдениет және Ақпарат министрлігі «Ақпарат комитеті» Республикалық мемлекеттік мекемесі **05.06.2025 ж.** берген № **KZ93VPY00121157** Куәлік.

Тақырыптық бағыты: *физика, химия.*

Мерзімділігі: жылына 4 рет.

<http://reports-science.kz/index.php/en/archive>

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

ЖУРИНОВ Мурат Журинович, доктор химических наук, профессор, академик МААН и НАН РК, Генеральный директор Научно-исследовательского института нефтепереработки и нефтехимии (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

КАЛИМОЛДАЕВ Максат Нурадилович, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

АБИЛЬМАГЖАНОВ Арлан Зайнуталлаевич, кандидат химических наук, Генеральный директор АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197468109>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2024265>

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

АДЕКЕНОВ Сергазы Мынжасарович, доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, директор АО «Научно-производственного центра «Фитохимия» (Караганда, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006153118>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/48648658>

РАМАЗАНОВ Тлеккабул Сабитович, (заместитель главного редактора), доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701328029>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/13503476>

АБИЕВ Руфат, доктор технических наук (биохимия), профессор, заведующий кафедрой «Оптимизация химической и биотехнологической аппаратуры», Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Санкт-Петербург, Россия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602431781>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1405661>

ОЛИВЬЕРО Россини Чезаре, доктор философии (PhD, химия), профессор Университета Калабрии (Калабрия, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221375979>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/399768>

ТИГИНЯНУ Ион Михайлович, доктор физико-математических наук, академик, президент Академии наук Молдовы, Технический университет Молдовы (Кишинев, Молдова), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006315935>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

САНГ-СУ Квак, доктор философии (PhD, биохимия, агрохимия), профессор, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский центр инженерных систем растений, Корейский научно-исследовательский институт бионауки и биотехнологии (KRIBB) (Дэчон, Корея), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59286321700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30028581>

БЕРСИМБАЕВ Рахметкажи Искендерович, доктор биологических наук, профессор, академик НАН РК, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева (Астана, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004012398>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/19854255>

КАЛАНДРА Пьетро, доктор философии (PhD, физика), профессор Института по изучению наноструктурированных материалов (Рим, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/616360>

БОШКАЕВ Куантай Агазыевич, PhD, преподаватель, доцент кафедры теоретической и ядерной физики, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=54883880400>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2080231>

БУРКИТБАЕВ Мухамбетали, доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8513885600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/29017135>

QUEVEDO Hernando, профессор, Национальный автономный университет Мексики (UNAM), Институт ядерных наук (Мехико, Мексика), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55989741100>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30353742>

ЖУСУПОВ Марат Абжанович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и ядерной физики, Казахский национальный университет имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602166928>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/566>

КОВАЛЕВ Александр Михайлович, доктор физико-математических наук, академик НАН Украины, Институт прикладной математики и механики (Донецк, Украина), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202799321>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/65533963>

ТАКИБАЕВ Нурғали Жабағевич, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24077239000>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1671760>

ХАРИН Станислав Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701353063>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2023295>

АБИШЕВ Медеу Ержанович, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1556025>

ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES

ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print)

Собственник: ТОО «Центрально-азиатский академический научный центр» (г. Алматы).

Свидетельство № KZ93VPY00121157 о повторной регистрации периодического печатного издания информационного агентства, информационного агентства и сетевого издания, выданное Республиканским государственным учреждением «Комитет информации» Министерства культуры и информации Республики Казахстан **05.06.2025**Тематическая направленность: *физика, химия*.

Периодичность: 4 раза в год.

<http://reports-science.kz/index.php/en/archive>

CONTENTS

PHYSICS

Aimaganbetova Z.K., Kulshymbayev Y.A., Zhanturina N.N., Beketova G.K. First-principles calculation of the electronic properties of the Double Halide Perovskite $\text{Cs}_2\text{Ag}_{0.2}\text{Na}_{0.4}\text{In}_{0.6}\text{Ti}_{0.4}\text{Cl}_6$ based on the quantum ESPRESSO software.....	14
Amangeldinova S., Zhuniskhan S., Kalzhigitov N., Kurmangaliyeva V. Study of the cluster structure of ^5He and ^5Li mirror nuclei in two-cluster approximation.....	35
Chokin K., Otunchi Ye., Kozhahmetova A., Kasenova A., Shongalova A. Development and testing of a laboratory pyrometallurgical installation for recycling lithium-ion batteries.....	46
Issayeva A., Beisebayeva A., Madybekova G., Shynazbekova Sh., Issa A. Comparative analysis of physico-chemical characteristics of drinking, spring and natural water in the South Kazakhstan.....	65
Kim V.Yu., Aimuratov Y.K. Search for transient cosmic events by scanning the sky with wide-field telescopes.....	78
Koshtybayev T.B., Tatenov A.M., Aliyeva M.E., Tugelbaeva G.T., Zhanaliyeva G.Zh. Study of the electromagnetic field based on thermodynamics principles.....	89
Mukamedenkyzy V., Akberdiyev B. Numerical investigation of the effect of inclination angle on the stability of mechanical equilibrium in Ar–N ₂ binary gas mixtures.....	105
Myasnikova L.N., Uzakbaeva S.S., Shanina Z.K., Bekeshev A.Z. Kinetic properties of high-density polyethylene filled with chromium spinel powder.....	119
Nurbayev B.M., Dmitriyeva E.A., Kemelbekova A.E. The role of low-dimensional layered structures in enhancing the stability of tin-based perovskite materials.....	136
Sattinova Z., Ermakhanova F., Assilbekov B., Taimuratova L. Influence of various cooling conditions and heat transfer coefficients on solidification during the formation of beryllium ceramic products.....	149
Shestakova L.I., Serebryanskiy A.V., Spassyyuk R.R., Omarov Ch.T. Search for gas of comet-meteor origin in the inner Solar System: caii ion emission.....	165
Ualikhanova U., Tursynkazy F., Syzdykova A.M., Altayeva G.S., Altaibayeva A.B. Studying the amplitude of $f(T)$ gravitational waves using Bessel functions.....	179

Zhexenbayeva G.A., Nasirova D.M., Aimanova G.K., Shomshekova S.A. Photometric study of the symbiotic object V725 Tau.....	194
Zhusupova N.K., Zhadyranova A.A. Bounce cosmology in $f(T, \mathcal{T})$ gravity based on energy condition analysis.....	205
Ziyatbekova G., Abdimanapova P., Sagyntay O., Nurym A., Ilinov R. Using artificial intelligence to predict diseases based on medical data.....	225

CHEMISTRY

Almassov N.Zh., Zhumagaliyeva A.N., Duisenbekov S.E., Zhakiyev N.K. Design and optimization of hybrid renewable energy systems for hydrogen production in Kazakhstan.....	236
Amangeldi B., Zhanikulov N., Taimasov B., Aitureev M.M., Dauletiyarov M. Calculation of the Raw material composition for obtaining white Portland cement clinker.....	251
Baeshov A., Tashenov E.A., Atykhanova S.B., Koshkarbayeva Sh.T. Preparation of cadmium sulfide by electrochemical method using a composite sulfur-graphite electrode.....	267
Baisalova G.Zh., Azhikhanova Zh., Taltenov A.A., Kuzhatova P. Determination of the total phenolic content in perennial herbaceous plants of the flora of Kazakhstan.....	277
Darmenbayeva A.S., Rajasekharan R., Zhussipnazarova G.M., Mukazhanova Zh.B., Begenova B.E. Composites based on chitosan and cellulose: synthesis, properties, and application prospects.....	287
Erkasov R.Sh., Zhamkenova A.S., Sergazina S.M., Nurmukhanbetova N.N., Kassenova N.B. Halide-dependent modulation of hydrogen bonding in Mn(II) complexes with protonated acetamide: a QAIM, NCI, and energy decomposition study.....	304
Kalimoldina L.M., Shaikhova Zh.E., Kaliyeva B.K., Bubish Sh., Askarova Sh.K. The effect of silver nanoparticles on the germination of bean, lemon, tangerine and avocado seeds.....	320
Kurtebayeva A.A., Alvarez-Torrellas S., Gomes H.T., Orynbayev S.A., Kalmakhanova M.S. Activated-carbon-enhanced polymeric membranes for efficient elimination of emerging contaminants.....	334

Massenova A.T., Zhumakanova A.S., Torlopov I.I., Rakhmetova K.S., Abilmagzhanov A.Z. Optimization of the hierarchical zeolite ZSM-5 synthesis process by steam-assisted alkaline modification.....	350
Mutushev A.Zh., Nuraly A.M., Sanat A.S., Shaukharova M.A., Yessimsiitova Z.B. The effect of light-converting films on the accumulation of bioactive compounds and the quality of fruits.....	366
Nefedov A.N., Taikenova A.T. Current state of organic corrosion inhibitor application in oil refining.....	379
Omarov B.T., Altybayev Zh.M., Serikbayeva B.S. Production of biohumus by vermicomposting of organic wastes and study of its agroecological effectiveness.....	399
Rakhman D.M., Kappasuly A., Makhayeva D.N., Kazybayeva D.S., Irmukhametova G.S. Development and investigation of mucoadhesive hydrogels based on gellan–cysteine complexes.....	414
Sabyrzhanova A.E., Bolatkyzy N., Berganaeva G.E., Dyusebaeva M.A. Study of amino acids and fatty acids in the aerial part of <i>Plantago major</i>	428
Satayeva S., Akhmetova F., Urazova A., Aituganova S., Yerniyazova K. The influence of PEPA concentration on the physical, mechanical, and operational properties of ED-20 epoxy adhesives.....	439
Zamanbek A.Zh., Koshkarbayeva Sh.T., Satayev M.S. Methods of Obtaining Silver Nanoparticles and Antibacterial Properties.....	450
Zhortarova A.A., Salkeyeva L.K., Minayeva Ye.V., Ibrayev M.K., Fazylov S.D. New possibilities for the synthesis and phosphorylation of phosphonoacetic acid ester.....	462

МАЗМҰНЫ

ФИЗИКА

Аймағанбетова З.К., Құлшымбаев Е.А., Жантурина Н.Н., Бекетова Г.К. Quantum Espresso бағдарламасы негізінде Cs ₂ Ag _{0.2} Na _{0.4} In _{0.6} Ti _{0.4} Cl ₆ кос галогенді перовскиттің электрондық қасиеттерін бірінші принциптік есептеу.....	14
Амангелдинова С., Жүнісхан С., Калжигитов Н., Курманғалиева В. Екі кластерлік жуықтауда 5He және 5Li айналық ядроларының кластерлік құрылымын зерттеу.....	35
Чокин К., Отунчи Е., Кожаметова А., Касенова А., Шонғалова А. Литий-ионды аккумуляторларды қайта өндеуге арналған зертханалық пирометаллургиялық қондырғыны әзірлеу және сынау.....	46
Исаева А.Б., Бейсебаева А.С., Мадыбекова Г.М., Шиназбекова Ш.С., Иса А.Б. Сравнительный анализ физико-химических характеристик питьевой, родниковой и природной воды юга Казахстана.....	65
Ким В.Ю., Аймуратов Е.К. Кең бұрышты телескоптармен аспанды сканерлеу арқылы өтпелі ғарыштық оқиғаларды іздеу.....	78
Коштыбаев Т.Б., Татенов А.М., Алиева М.Е., Тугелбаева Г.Т., Жаналиева Г.Ж. Электромагниттік өрісті термодинамикалық бастамалар тұрғысында зерттеу.....	89
Мукамеденқызы В., Ақбердиев Б. Ar–N ₂ бинарлы газ қоспаларындағы механикалық тепе-теңдік тұрақтылығына қиғаш бұрыштың әсерін сандық зерттеу.....	105
Мясникова Л.Н., Узакбаева С.С., Шанина З.К., Бекешев А.З. Хром-шпинельді ұнтақ қосылған жоғары тығыздықты полиэтиленнің кинетикалық қасиеттері.....	119
Нұрбаев Б.М., Дмитриева Е.А., Кемелбекова А.Е. Қалайы негізіндегі перовскитті материалдардың тұрақтылығын арттырудағы төменөлшемді қабатты құрылымдардың рөлі.....	136
Саттинова З., Ермаханова Ф., Асылбеков Б., Таймуратова Л. Бериллий керамикалық бұйымдарын қалыптастыру кезінде әр түрлі салқындату жағдайлары мен жылу беру коэффициенттерінің қатаюға әсері.....	149
Шестакова Л.И., Серебрянский А.В., Спасюк Р.Р., Омаров Ш.Т. Күн жүйесінің ішкі аймағындағы комета-метеорлық тектегі газды іздеу: CaII иондарының жарқырауы.....	165

Уалиханова У.А., Тұрсынқазы Ф., Сыздықова А.М., Алтаева Г.С., Алтайбаева А.Б.
Бессель функцияларын пайдаланып $f(T)$ гравитациялық толқындардың
амплитудасын зерттеу.....179

Жексенбаева Г.А., Насирова Д.М., Айманова Г.К., Шомшекова С.А
V725 Тау симбиотикалық объектiсiн фотометрлiк зерттеу.....194

Жусупова Н.К., Жадыранова А.А.
Энергия шарттарын талдауға негiзделген $f(T, T)$ серпiлiс космологиясы.....205

Зиятбекова Г.З., Абдиманапова П.Б., Сағынтай О.А., Нұрым А.А., Ильинов Р.А.
Жасанды интеллект көмегiмен медициналық деректер бойынша
ауруларды болжау.....225

ХИМИЯ

Алмассов Н.Ж., Жумагалиева А.Н., Дүйсенбеков С.Е., Жакиев Н.К.
Қазақстанда сутегi өндiруге арналған гибрирдiк жаңартылатын энергия жүйелерiн
жобалау және оңтайландыру.....236

Амангелдi Б., Жаникулов Н., Таймасов Б., Айтуреев М., Даулетияров М.
Ақ портландцемент клинкерiн алу үшiн шикiзат шихта құрамын есептеу.....251

Баешов А., Ташенов Е.А., Атыханова С.Б., Кошкарбаева Ш.Т.
Композициялы күкiрт-графит электродын қолдану арқылы кадмий
сульфидiн электрохимиялық әдiспен алу.....267

Байсалова Г.Ж., Ажиханова Ж., Талтенов А.А., Құжатова П.
Қазақстан флорасындағы көпжылдық шөптесiн өсiмдiктердiң фенолдық
қосылыстарының жиынтық мөлшерiн анықтау.....277

**Дарменбаева А.С., Rajasekharan R., Жусипназарова Г.М., Мукажанова Ж.Б.,
Бегенова Б.Е.**
Хитозан және целлюлоза негiзiндегi композиттер: синтез, қасиеттерi және қолдану
перспективалары.....287

**Еркасов Р.Ш., Жамкенова А.С., Сергазина С.М., Нурмуханбетова Н.Н.,
Касенова Н.Б.**
Mn (II) кешендерiндегi сутектiк байланыстардың энергиясы мен табиғатына
галогеннiң әсерi: QTAIM, NCI және энергия декомпозициясы.....304

Калимолдина Л.М., Шаихова Ж.Е., Калиева Б.К., Бубиш Ш., Аскарова Ш.К.
Күмiс нанобөлшектерiнiң бұршақ, лимон, мандарин, авокадо тұқымдарының
өнуiне әсерi.....320

Қуртебаева А.А., Álvarez-Torrellas S., Gomes Н.Т., Орынбаев С.Ә., Калмаханова М.С. Алаңдаушылық тудыратын ластаушы заттарды тиімді жою үшін белсендірілген көмір полимерлі мембраналар.....	334
Масенова А.Т., Жұмақанова А.С., Торлопов И.И., Рахметова К.С., Абильмагжанов А.З. ZSM-5 иерархиялық цеолитін бумен сілтілі модификациялау арқылы алу процесін онтайландыру.....	350
Мутушев А.Ж., Нұралы Ә.М., Санат А.С., Шаукарова М.А., Есимситова З.Б. Жарық түрлендіретін пленкалардың биоактивті қосылыстардың жинақталуына және жеміс сапасына әсері.....	366
Нефедов А.Н., Тайекенова А.Т. Мұнай өңдеу өнеркәсібінде органикалық коррозия ингибиторларын қолданудың қазіргі жағдайы.....	379
Омаров Б.Т., Алтыбаев Ж.М., Серикбаева Б.С. Органикалық қалдықтарды вермикомпостинг арқылы биогумус өндіру және оның агроэкологиялық тиімділігін зерттеу.....	399
Рахман Д.М., Қаппасұлы Ә., Махаева Д.Н., Қазыбаева Д.С., Ирмухаметова Ғ.С. Геллан–цистеин кешендері негізінде мукоадгезиялық гидрогельдерді әзірлеу және зерттеу.....	414
Сабыржанова А.Е., Болатқызы Н., Берганаева Г.Е., Дюсебаева М.А. Plantago Major жер үсті бөлігінің құрамындағы амин қышқылдары мен май қышқылдарын зерттеу.....	428
Сатаева С., Ахметова Ф., Уразова А., Айтуганова С., Ерниязова К. ЭД-20 эпоксидті желімдерінің физика-механикалық және эксплуатациялық қасиеттеріне ПЭПА концентрациясының ықпалы.....	439
Заманбек А.Ж., Кошкарбаева Ш.Т., Сатаев М.С. Күміс нанобөлшектерінің алыну әдістері мен антибактериалдық қасиеттері.....	450
Жоргарова А.А., Салькева Л.К., Минаева Е.В., Ибраев М.К., Фазылов С.Д. Фосфоносірке қышқылының эфирін синтездеу мен фосфорландырудың жаңа мүмкіндіктері.....	462

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА

Аймаганбетова З.К., Кулшымбаев Е.А., Жантурина Н.Н., Бекетова Г.К. Расчет по первому принципу электронных свойств двойного галогенидного перовскита Cs ₂ Ag _{0.2} Na _{0.4} In _{0.6} Ti _{0.4} Cl ₆ на основе программы Quantum Espresso.....	14
Амангелдинова С., Жүнісхан С., Калжигитов Н., Курмангалиева В. Исследование кластерной структуры зеркальных ядер ⁵ He и ⁵ Li в двухкластерном приближении.....	35
Чокин К., Отунчи Е., Кожрахметова А., Касенова А., Шонгалова А. Разработка и испытания лабораторной пирометаллургической установки для переработки литий-ионных аккумуляторов.....	46
Исаева А.Б., Бейсебаева А.С., Мадыбекова Г.М., Шиназбекова Ш.С., Иса А.Б. Сравнительный анализ физико-химических характеристик питьевой, родниковой и природной воды юга Казахстана.....	65
Ким В.Ю., Аймуратов Е.К. Поиск транзиентных космических событий методом сканирования неба широкоугольными телескопами.....	78
Коштыбаев Т.Б., Татенов А.М., Алиева М.Е., Тугелбаева Г.Т., Жаналиева Г.Ж. Исследование электромагнитного поля на основе термодинамических принципов.....	89
Мукамеденкызы В., Акбердиев Б. Численное исследование влияния угла наклона на устойчивость механического равновесия в бинарной газовой смеси Ar–N ₂	105
Мясникова Л.Н., Узакбаева С.С., Шанина З.К., Бекешев А.З. Кинетические свойства высокоплотного полиэтилена с добавлением хром-шпинельного порошка.....	119
Нурбаев Б.М., Дмитриева Е.А., Кемелбекова А.Е. Роль низкоразмерных слоистых структур в повышении стабильности перовскитных материалов на основе олова.....	136
Саттинова З., Ермаханова Ф., Асылбеков Б., Таймуратова Л. Влияние различных условий охлаждения и коэффициентов теплопередачи на затвердевание при формировании бериллиевых керамических изделий.....	149

Шестакова Л.И., Серебрянский А.В., Спасюк Р.Р., Омаров Ш.Т. Поиск газа кометно-метеорного происхождения во внутренней области Солнечной Системы: Свечение ионов СаII.....	165
Уалиханова У.А., Турсынказы Ф., Сыздыкова А.М., Алтаева Г.С., Алтайбаева А.Б. Изучение амплитуды $f(T)$ гравитационных волн с использованием функций Бесселя.....	179
Жексенбаева Г.А., Насирова Д.М., Айманова Г.К., Шомшекеева С.А. Фотометрическое исследование симбиотического объекта V725 Tau.....	194
Жусупова Н.К., Жадыранова А.А. Космология отскока в $f(T, \mathcal{J})$ гравитации на основе анализа энергетических условий.....	205
Зиятбекова Г.З., Абдимананова П.Б., Сағынтай О.А., Нұрым А.А., Ильинов Р.А. Использование искусственного интеллекта для прогнозирования заболеваний на основе медицинских данных.....	225

ХИМИЯ

Алмассов Н.Ж., Жумагалиева А.Н., Дуйсенбеков С.Е., Жакиев Н.К. Проектирование и оптимизация гибридных возобновляемых источников энергии для производства водорода в Казахстане.....	236
Амангелді Б., Жаникулов Н., Таймасов Б., Айтуреев М., Даулетияров М. Расчёт состава сырьевой шихты для получения белого порландцементного клинкера.....	251
Башов А., Ташенов Е.А., Атыханова С.Б., Кошкарбаева Ш.Т. Получение сульфида кадмия электрохимическим методом с использованием композитного сера-графитового электрода.....	267
Байсалова Г.Ж., Ажиханова Ж., Талтенов А.А., Кужатова П. Определение суммы фенольных соединений в многолетних травянистых растениях флоры Казахстана.....	277
Дарменбаева А.С., Rajasekharan R., Жусиппазарова Г.М., Мукажанова Ж.Б., Бегенова Б.Е. Композиты на основе хитозана и целлюлозы: синтез, свойства и перспективы применения.....	287
Еркасов Р.Ш., Жамкенова А.С., Сергазина С.М., Нурмуханбетова Н.Н., Касенова Н.Б. Влияние галогена на энергетику и природу водородных связей в Mn(II): QTAIM, NCI и энергодекомпозиция.....	304

Калимолдина Л.М., Шаихова Ж.Е., Калиева Б.К., Бубиш Ш., Аскарова Ш.К. Влияние наночастиц серебра на прорастание семян фасоли, лимона, мандарина, авокадо.....	320
Куртебаева А.А., Álvarez-Torrellas S., Gomes Н.Т., Орынбаев С.А., Калмаханова М.С. Полимерные мембраны с активированным углем для эффективного удаления загрязняющих веществ вызывающих обеспокоенность.....	334
Масенова А.Т., Жұмақанова А.С., Торлопов И.И., Рахметова К.С., Абильмагжанов А.З. Оптимизация процесса получения иерархического цеолита ZSM-5 паровой щелочной модификацией.....	350
Мутушев А.Ж., Нуралы А.М., Санат А.С., Шаукарова М.А., Есимсиитова З.Б. Влияние светопреобразующих плёнок на накопление биоактивных соединений и качество плодов.....	366
Нефедов А.Н., Тайекенова А.Т. Современное состояние применения органических ингибиторов коррозии в нефтепереработке.....	379
Омаров Б.Т., Алтыбаев Ж.М., Серикбаева Б.С. Получение биогумуса путем вермикомпостирования органических отходов и исследование его агроэкологической эффективности.....	399
Рахман Д.М., Қаппасұлы Ә., Махаева Д.Н., Казыбаева Д.С., Ирмухаметова Г.С. Разработка и исследование мукоадгезивных гидрогелей на основе комплексов геллан–цистеин.....	414
Сабыржанова А.Е., Болаткызы Н., Берганаева Г.Е., Дюсебаева М.А. Исследование аминокислот и жирных кислот в составе надземной части <i>Plantago Major</i>	428
Сатаева С., Ахметова Ф., Уразова А., Айтуганова С., Ерниязова К. Влияние концентрации ПЭПА на физические, механические и эксплуатационные свойства эпоксидных клеев ЭД-20.....	439
Заманбек А.Ж., Кошкарбаева Ш.Т., Сатаев М.С. Методы получения наночастиц серебра и антибактериальные свойства.....	450
Жоргарова А.А., Салькева Л.К., Минаева Е.В., Ибраев М.К., Фазылов С.Д. Новые возможности синтеза и фосфорилирования фосфонуксусного эфира.....	462

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 1.
Number 357 (2026), 205–224

<https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.415>

UDC: 524.8
IRSTI: 41.03.01

©Zhusupova N.K.¹, Zhadyranova A.A.^{2*}, 2026.

¹Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan;

²L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.

*E-mail: a.a.zhadyranova@gmail.com

BOUNCE COSMOLOGY IN $f(T, \mathcal{T})$ GRAVITY BASED ON ENERGY CONDITION ANALYSIS

Zhusupova Nazym — PhD student, Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: zhnaz88@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-8900-0829>;

Zhadyranova Aliya — PhD, Senior Lecturer, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana,
Kazakhstan.

E-mail: a.a.zhadyranova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1153-3438>.

Abstract. This article investigates cosmological dynamics within the framework of modified torsional gravity $f(T, \mathcal{T})$, where the gravitational action depends on the torsion scalar and the trace of the matter energy–momentum tensor \mathcal{T} . This formulation allows for a direct coupling between geometry and matter and enables the study of evolutionary scenarios beyond standard cosmological expansion. The analysis is performed for a spatially homogeneous and isotropic Friedmann–Lemaître–Robertson–Walker geometry. A parametrized scale factor is adopted to ensure regular behavior of the dynamical variables and to describe a cosmological bounce, in which a contracting phase smoothly transitions into an expanding one. Analytical expressions for the energy density, pressure, and equation-of-state parameter are derived, and their behavior near the transition region is examined. It is shown that the expansion rate vanishes at the bounce, signaling a change in the evolutionary regime. Around this point, the energy density reaches a maximum before decreasing, while the pressure remains negative. The equation-of-state parameter temporarily departs from standard regimes, accompanied by violations of the null and strong energy conditions. Meanwhile, the dominant energy condition remains satisfied, indicating the physical consistency of the model.

These results demonstrate that both linear and nonlinear realizations of $f(T, \mathcal{T})$ gravity successfully capture the key features of cosmological bounce scenarios and provide a viable framework for exploring alternative evolutionary paths of the early Universe.

Keywords: modified gravity, $f(T, \mathcal{T})$ theory, torsion, cosmological bounce, energy conditions

Financing. This work is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, Grant No. AP26194585 Gravitational wave and observational estimates of the constraints of cosmological models with non-minimal coupling.

For citations: Zhusupova N.K., Zhadyranova A.A. Bounce Cosmology in Gravity Based on Energy Condition Analysis. Academic Journal of Physical and Chemical Sciences. 2026. No.1. Pp. 205–224. DOI: <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.415>

©Жусупова Н.К.¹, Жадыранова А.А.^{2*}, 2026.

¹Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан;

²Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан.

*E-mail: a.a.zhadyranova@gmail.com

ЭНЕРГИЯ ШАРТТАРЫН ТАЛДАУҒА НЕГІЗДЕЛГЕН $f(T, \mathcal{T})$ СЕРПІЛІС КОСМОЛОГИЯСЫ

Жусупова Назым — PhD докторант, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: zhnaz88@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-8900-0829>;

Жадыранова Алия Амирбековна — PhD, аға оқытушы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан,

E-mail: a.a.zhadyranova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1153-3438>.

Аннотация. Мақалада модифицияланған торсиондық гравитацияның $f(T, \mathcal{T})$ теориясы аясындағы космологиялық динамика қарастырылады, мұнда гравитациялық әрекет бұрылу скаляры T мен материяның энергия-импульс тензорының ізі \mathcal{T} арқылы анықталатын функциямен сипатталады. Мұндай тәсіл теорияның геометриялық және материалдық құрамдас бөліктерінің тікелей өзара әсерін ескеруге және стандартты космологиялық кеңеюден өзгеше Ғалам эволюциясының сценарийлерін талдауға мүмкіндік береді. Зерттеу кеңістіктік біртекті және изотропты Фридман–Леметр–Робертсон–Уокер геометриясы үшін жүргізіледі. Масштабтық фактордың параметрленген формасы қолданылып, ол динамикалық шамалардың реттелген сипаттамасын қамтамасыз етеді және сығылу фазасының кеңею фазасына ауысуымен сипатталатын космологиялық отскок режимін сипаттауға мүмкіндік береді. Осы негізде энергия тығыздығы, қысым және күй теңдеуінің параметрі үшін өрнектер алынған және олардың өтпелі аймақ маңындағы уақыттық өзгерісі талданған. Серпіліс сәтінде кеңею жылдамдығы нөлге тең болатыны көрсетілген, бұл жүйе эволюциясының сипатының өзгеруіне сәйкес келеді. Осы кезеңде энергия тығыздығы максимал мәніне жетіп, кейін азаяды, ал қысым бүкіл эволюция барысында теріс мәнін сақтайды. Күй теңдеуінің



параметрі уақытша стандартты космологиялық режимдер шегінен шығады, бұл нөлдік және күшті энергия шарттарының бұзылуымен қатар жүреді. Сонымен қатар, басым энергия шарты сақталады, бұл қарастырылып отырған модельдің физикалық тұрғыдан үйлесімділігін көрсетеді. Алынған нәтижелер $f(T, \mathcal{T})$ теориясының сызықтық және сызықтық емес жүзеге асырылулары космологиялық отскоктың негізгі ерекшеліктерін тиімді түрде сипаттай алатынын және Ғаламның ерте эволюциясының баламалы сценарийлерін талдауда қолданылуы мүмкін екенін көрсетеді. Модель бастапқы шарттардың кең ауқымында параметрлердің орнықты сипаттамасын көрсетеді.

Түйін сөздер: модификацияланған гравитация, $f(T, \mathcal{T})$ теориясы, торсион, космологиялық серпіліс, энергия шарттары

©Жусупова Н.К.¹, Жадыранова А.А.^{2*}, 2026.

¹Казахский национальный педагогический университет имени Абая,
Алматы, Казахстан;

²Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва,
Астана, Казахстан.

*E-mail: a.a.zhadyranova@gmail.com

КОСМОЛОГИЯ ОТСКОКА В $f(T, \mathcal{T})$ ГРАВИТАЦИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Жусупова Назым — PhD докторант, Казахский национальный педагогический университет имени Абая, Алматы, Казахстан,

E-mail: zhnaz88@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-8900-0829>;

Жадыранова Алия — PhD, старший преподаватель, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, Астана, Казахстан,

E-mail: a.a.zhadyranova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1153-3438>.

Аннотация. В статье рассматривается космологическая динамика в рамках модифицированной торсионной гравитации $f(T, \mathcal{T})$, в которой гравитационное действие задается функцией от скаляра кручения T и следа тензора энергии–импульса материи \mathcal{T} . Такой подход позволяет учитывать прямое взаимодействие геометрической и материальной составляющих теории и анализировать сценарии эволюции Вселенной, отличающиеся от стандартной модели космологического расширения. Рассмотрение проводится для пространственно однородной и изотропной геометрии Фридмана–Леметра–Робертсона–Уокера. Используется параметризованная форма масштабного фактора, обеспечивающая регулярное поведение динамических величин и позволяющая описать режим космологического отскока, при котором фаза сжатия сменяется фазой расширения. На этой основе получены выражения для плотности энергии, давления и параметра уравнения состояния, а также проанализировано их временное поведение в окрестности переходной области. Показано, что в момент отскока скорость расширения обращается в нуль, что соответствует смене характера эволюции системы. Вблизи

этого момента плотность энергии достигает максимума, после чего убывает, тогда как давление остается отрицательным. Параметр уравнения состояния временно выходит за пределы стандартных космологических режимов, что сопровождается нарушением нулевого и сильного энергетических условий. При этом доминирующее энергетическое условие сохраняется, что указывает на физическую согласованность рассматриваемой модели. Полученные результаты показывают, что линейные и нелинейные реализации теории $f(T, \mathcal{T})$ способны воспроизводить основные особенности космологического отскока и могут использоваться для анализа альтернативных сценариев эволюции ранней Вселенной. Модель демонстрирует устойчивое поведение параметров при широком диапазоне начальных условий.

Ключевые слова: модифицированная гравитация, теория $f(T, \mathcal{T})$, торсион, космологический отскок, энергетические условия

Кіріспе. Қазіргі космологиялық модельдер Ғаламның кеш кезеңдегі эволюциясын жеткілікті дәлдікпен сипаттағанымен, ерте уақыттардағы динамикаға қатысты түбегейлі мәселелер әлі де ашық күйінде қалып отыр. Әсіресе бастапқы сингулярлықтың болуы кеңістік пен уақыттың белгілі бір мезетте физикалық мағынасын жоғалтатынын көрсетіп, классикалық гравитациялық теориялардың қолданылу шегін айқындайды. Осы мәселе балама космологиялық сценарийлерді іздеуге түрткі болып, сингулярлықсыз дамуды сипаттайтын тәсілдерге қызығушылықты арттырды. Сол бағыттардың бірі - серпіліс космологиясы, мұнда Ғалам эволюциясы сығылу фазасынан кеңею фазасына үздіксіз ауысу арқылы жүзеге асады. Мұндай сценарий сингулярлықтан қашуға мүмкіндік беріп қана қоймай, ерте кезеңдегі физикалық шамалардың уақыт бойынша өзгерісін бірізді түрде сипаттауға жол ашады. Алайда серпіліс режимін стандартты жалпы салыстырмалық теориясы аясында іске асыру көбіне энергия шарттарының бұзылуымен немесе физикалық тұрғыдан күрделі материя компоненттерін енгізумен байланысты болады.

Осыған байланысты серпіліс динамикасын геометриялық негізде түсіндіре алатын модификацияланған гравитациялық теориялар ерекше назарға ие. Телепараллельді гравитацияда гравитациялық өзара әрекет кеңістік-уақыттың қисықтығымен емес, оның бұрылу қасиетімен сипатталады, бұл балама космологиялық шешімдерді қарастыруға мүмкіндік береді. Бұл теорияны $f(T, \mathcal{T})$ түрінде кеңейту торсион скалярымен қатар материяның энергия-импульс тензорының ізін ескеруге жағдай жасап, геометрия мен материя арасындағы өзара байланысты айқын көрсетеді. Мұндағы T – бұралу скаляры, ал \mathcal{T} – энергия-импульс тензорының ізі. Мұндай байланыс космологиялық динамикаға тікелей әсер етіп, энергия тығыздығы, қысым және күй тендеуінің параметрі сияқты шамалардың уақыт бойынша бейстандарт сипаттамасын қалыптастырады. Серпіліс аймағында бұл шамалар классикалық космологияда қабылданған режимдерден уақытша ауытқуы мүмкін, соның нәтижесінде нөлдік және күшті энергия шарттарының бұзылуы байқалады, ал доминантты энергия шартының

сақталуы модельдің физикалық үйлесімділігін қамтамасыз етеді. Осы тұрғыда $f(T, \mathcal{T})$: гравитациясы аясындағы серпіліс космологиялық сценарийлерді талдау ерте Ғалам эволюциясын сипаттаудың балама және перспективалы бағыты ретінде қарастырылады.

Сонымен қатар, ерте Ғалам динамикасын сипаттаудағы тағы бір маңызды мәселе – бастапқы шарттарға сезімталдық пен модельдердің тұрақтылығы болып табылады. Классикалық инфляциялық сценарийлер бірқатар бақылаулық деректерді сәтті түсіндіргенімен, олардың бастапқы күйіне қатысты сұрақтар толық шешімін тапқан жоқ. Осы тұрғыдан алғанда, серпіліс космологиясы инфляцияға балама ретінде ғана емес, сонымен бірге Ғалам эволюциясының біртұтас және үздіксіз сипаттамасын ұсынатын теориялық негіз ретінде қарастырылады. Серпіліс сценарийінде кеңістік-уақыттың геометриялық сипаттамалары үздіксіз болып сақталады, ал физикалық шамалар шекті мәндерден аспайды, бұл модельдің математикалық және физикалық тұрғыдан орнықтылығын арттырады.

Тағы бір назар аударатын жайт – серпіліс космологиясында энергия шарттарының рөлі. Жалпы салыстырмалық теориясында энергия шарттары гравитациялық тартылыстың сипатын анықтайтын негізгі талаптар ретінде қарастырылғанымен, ерте Ғаламдағы экстремалды жағдайларда олардың қатаң орындалуы міндетті болмауы мүмкін. Осыған байланысты энергия шарттарының уақытша бұзылуын қамтитын модельдер ерте Ғалам динамикасын сипаттауда маңызды ақпарат береді. Телепараллельді $f(T, \mathcal{T})$: гравитациясында геометрия мен материя арасындағы байланыс бұл бұзылуларды тиімді түрде іске асырып, серпіліс режимін қосымша экзотикалық материя енгізбей-ақ жүзеге асыруға мүмкіндік береді. Сондықтан мұндай модельдерді зерттеу қазіргі космологиядағы теориялық олқылықтарды толтыруға бағытталған өзекті мәселе болып табылады.

Сонымен бірге, серпіліс космологиясының артықшылықтарының бірі – ол ерте Ғаламдағы кванттық-гравитациялық эффектілерді тиімді феноменологиялық деңгейде сипаттауға мүмкіндік береді. Бастапқы сингулярлық маңында классикалық гравитацияның жарамсыз болатыны белгілі болғандықтан, мұндай аймақта геометрия мен материяның стандартты өзара әрекеттесуін жалпылау қажеттілігі туындайды. Телепараллельді гравитация осы тұрғыдан қолайлы теориялық алаң болып табылады, себебі онда геометриялық сипаттама қисықтықтан бұрылуға ауыстырылып, кеңістік-уақыттың құрылымы өзгеше түрде ұйымдастырылады. Бұл айырмашылық серпіліс режимін іске асыру үшін қажетті динамикалық еркіндіктерді қамтамасыз етеді.

$f(T, \mathcal{T})$: гравитациясында материяның энергия-импульс тензорының ізі гравитациялық секторға тікелей қатысады, нәтижесінде өріс тендеулері классикалық телепараллельді теориямен салыстырғанда күрделірек құрылымға ие болады. Алайда дәл осы күрделілік серпіліс динамикасын сипаттауда шешуші рөл атқарады. Геометрия–материя байланысының болуы энергия тығыздығы мен қысымның уақыт бойынша өзгерісін жаңа режимдерге көшіреді және серпіліс аймағында энергия шарттарының уақытша бұзылуын табиғи түрде қамтамасыз

етеді. Бұл жағдай серпіліс сценарийін іске асыру үшін жиі қолданылатын экзотикалық немесе фантомдық материяны енгізу қажеттілігін төмендетеді.

Серпіліс космологиясында маңызды рөл атқаратын тағы бір аспект - күй теңдеуінің параметрінің эволюциясы. Классикалық космологияда бұл параметр көбіне тұрақты немесе баяу өзгеретін шама ретінде қарастырылса, серпіліс сценарийлерінде оның уақыт бойынша айқын өзгеруі динамиканың негізгі белгілерінің бірі болып табылады. Әсіресе серпіліс маңында күй теңдеуінің параметрінің фантомдық аймаққа өтуі кеңею фазасының басталуын қамтамасыз ететін маңызды фактор ретінде қарастырылады. $f(T, \mathcal{T})$: гравитациясы аясында бұл режим геометрия мен материя арасындағы байланыс арқылы қалыптасып, модельдің ішкі үйлесімділігін сақтайды.

Сонымен қатар, серпіліс сценарийлерін талдауда кинематикалық шамалардың, атап айтқанда Хаббл және баяулау параметрлерінің уақыт бойынша өзгерісін зерттеу ерекше маңызға ие. Бұл шамалар серпіліс сәтіндегі сығылу мен кеңею фазалары арасындағы өтудің тегістігін және тұрақтылығын сипаттайды. Таңдалған параметрленген масштабтық фактор арқылы алынатын Хаббл параметрінің нөлдік мән арқылы үздіксіз өтуі серпіліс құбылысының негізгі кинематикалық шарттарының орындалатынын көрсетеді. Ал баяулау параметрінің теріс мәндерге уақытша өтуі үдеулі кеңею фазасының іске асуын айқындайды.

Осы тұрғыда $f(T, \mathcal{T})$: гравитациясы аясындағы серпіліс космологиясын зерттеу тек теориялық қызығушылықпен ғана шектелмейді, сонымен қатар қазіргі және болашақ бақылаулық деректермен салыстыру үшін негіз қалыптастырады. Ерте Ғалам динамикасының мұндай балама сценарийлері құрылымдардың түзілуі, космологиялық параметрлердің эволюциясы және энергия шарттарының рөлі сияқты мәселелерді қайта қарастыруға мүмкіндік береді. Сондықтан телепараллельді $f(T, \mathcal{T})$: гравитациясы негізіндегі серпіліс модельдерін жүйелі түрде талдау қазіргі космологиядағы ашық мәселелерді түсіндіруде маңызды қадам болып табылады.

Материалдар және негізгі әдістер. Бұл жұмыста серпіліс космологиялық динамикасы телепараллельді гравитацияның кеңейтілген $f(T, \mathcal{T})$: формализмі аясында қарастырылады. Аталған теорияда гравитациялық өзара әрекет кеңістік-уақыттың қисықтығымен емес, оның кбұрылу қасиетімен сипатталады, ал материяның әсері энергия-импульс тензорының ізі арқылы ескеріледі (Wald, 1984). Мұндай құрылым геометрия мен материя арасындағы өзара байланысты күшейтіп, стандартты космологиялық сценарийлерден өзгеше динамикалық режимдерді, соның ішінде серпіліс құбылысын сипаттауға мүмкіндік береді (Харко, 2014).

Телепараллельді $f(T, \mathcal{T})$: гравитациясының негізі келесі әсер функционалымен беріледі:

$$\mathcal{S} = \frac{1}{16\pi G} \int d^4x e [T + f(T, \mathcal{T})] + \int d^4x e \mathcal{L}_m, \quad (1)$$

мұндағы

\mathcal{S} – гравитациялық–материалдық жүйенің толық әсер функционалы;

G – Ньютонның гравитациялық тұрақтысы;

x^μ – төртөлшемді кеңістік-уақыт координаталары ();

$e = \det(e^A_\mu)$ – тетрада детерминанты;

$f(T, \mathcal{T})$ – торсион скаляры мен энергия-импульс тензорының ізіне тәуелді еркін функция;

\mathcal{L}_m – материя лагранжианы.

Бұл әсер формасы гравитациялық және материалдық бөліктердің өзара байланысын біртұтас түрде сипаттап, космологиялық теңдеулерді вариациялық принцип арқылы алуға негіз қалайды.

Телепараллельді формализмде Вейценбёк байланысы

$$\Gamma_{\mu\nu}^\rho = e_A^\rho \partial_\nu e_A^\mu \quad (2)$$

түрінде анықталады, ал осы байланыс арқылы торсион тензоры

$$T_{\mu\nu}^\rho = \Gamma_{\nu\mu}^\rho - \Gamma_{\mu\nu}^\rho \quad (3)$$

енгізіледі. Контурсия тензоры Вейценбёк және Леви–Чивита байланыстарының айырмасы ретінде анықталып, суперпотенциал арқылы торсион скаляры

$$T = S_\rho^{\mu\nu} T_{\mu\nu}^\rho \quad (4)$$

түрінде өрнектеледі. Материяның энергия-импульс тензорының ізі

$$\mathcal{T} = T_{\mu}^{\mu} = \rho - 3p \quad (5)$$

ретінде анықталады. Мұндағы ρ – энергия тығыздығы, p – изотропты қысым

Бұл жұмыста келесі сызықтық модель қарастырылады:

$$f(T, \mathcal{T}) = \alpha T + \beta \mathcal{T}, \quad (6)$$

мұнда α және β – еркін параметрлер. Мұндай таңдау модельдің аналитикалық тұрғыдан айқын болуын қамтамасыз етіп, серпіліс режимінің негізгі қасиеттерін талдауға мүмкіндік береді (Vamba et al., 2014).

Космологиялық орта кеңістіктік біртекті және изотропты Фридман–Леметр–Робертсон–Уокер геометриясымен сипатталады. Бұл жағдайда Ғалам динамикасы масштабтық фактор $a(t)$ арқылы анықталып, кеңею немесе сығылу жылдамдығы Хаббл параметрімен

$$H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \quad (7)$$

өрнектеледі. Серпіліс космологиясында негізгі кинематикалық шарт ретінде белгілі бір мезетте $H = 0$ болуы және оның уақыт бойынша туындысының таңбасының өзгеруі қарастырылады, бұл сығылу фазасынан кеңею фазасына өтуді сипаттайды (Vamba et al., 2014).

Серпіліс режимін жүзеге асыру үшін масштабтық фактордың параметрленген формасы қолданылады. Таңдалған параметрлеу серпіліс сәтінде масштабтық фактордың нөлге тең болмауын қамтамасыз етіп, энергия тығыздығы мен қысым сияқты негізгі физикалық шамалардың шекті мәндерге ие болуына мүмкіндік береді. Бұл тәсіл нақты аналитикалық шешімге тәуелді болмай, серпіліс кинематикасының жалпы қасиеттерін сипаттауға бағытталған.

Материя компоненті идеал сұйықтық ретінде қарастырылып, энергия тығыздығы мен қысым стандартты түрде енгізіледі. Осы шамалар арқылы күй теңдеуінің параметрі

$$\omega(t) = \frac{p(t)}{\rho(t)} \quad (8)$$

анықталады. Серпіліс аймағында бұл параметр классикалық космологияда қабылданған режимдерден уақытша ауытқуы мүмкін, бұл серпіліс сценарийінің маңызды динамикалық белгісі болып табылады (Cai et al., 2010).

Материя компонентін идеал сұйықтық ретінде қарастыру серпіліс космологиясын зерттеуде кеңінен қолданылатын және физикалық тұрғыдан негізделген жуықтау болып табылады. Бұл тәсіл энергия тығыздығы мен қысым арасындағы байланысты қарапайым әрі айқын түрде сипаттауға мүмкіндік беріп, алынған динамикалық теңдеулердің интерпретациясын жеңілдетеді. Сонымен қатар, идеал сұйықтық моделі ерте Ғаламдағы орташа динамикалық қасиеттерді сипаттауға жеткілікті болып табылады, себебі серпіліс аймағында негізгі рөлді микроскопиялық процестерден гөрі, геометриялық және макроскопиялық эффектілер атқарады.

Күй теңдеуінің параметрі $\omega(t)$ космологиялық эволюцияның сипатын анықтайтын маңызды шамалардың бірі болып табылады. Оның уақыт бойынша өзгерісі Ғаламның әртүрлі динамикалық режимдерге өтуін сипаттайды. Серпіліс маңында $\omega(t)$ параметрінің классикалық мәндерден ауытқуы энергия шарттарының бұзылуымен тікелей байланысты болып, үдеулі кеңею фазасының іске асуына мүмкіндік береді. Бұл ауытқу тұрақты күйде сақталмай, уақытша сипатқа ие болуы серпіліс сценарийінің физикалық тұрғыдан орнықты екенін көрсетеді.

Серпіліс режимін талдауда масштабтық фактордың параметрленген формасын қолдану модельдің жалпы қасиеттерін айқындауға бағытталған тиімді әдіс болып табылады. Мұндай параметрлеу нақты өріс теңдеулерінің күрделі құрылымына тәуелді болмай, серпіліс құбылысының негізгі кинематикалық белгілерін зерттеуге мүмкіндік береді. Атап айтқанда, масштабтық фактордың минимумға

жетуі, Хаббл параметрінің нөл арқылы өтуі және баяулау параметрінің уақытша теріс мәндерге өтуі серпіліс сценарийінің жүзеге асатынын айқын көрсетеді.

Осылайша, идеал сұйықтық жуықтауы мен параметрленген масштабтық факторды бірге қолдану телепараллельді $f(T, \mathcal{T})$ гравитациясында серпіліс космологиясының негізгі динамикалық қасиеттерін жүйелі түрде зерттеуге мүмкіндік береді. Бұл тәсіл алынған нәтижелерді әрі қарай энергия шарттары арқылы талдауға және серпіліс механизмінің физикалық негізділігін бағалауға сенімді негіз қалайды.

Идеал сұйықтық жуықтауы серпіліс космологиясында материяның күрделі ішкі құрылымын енгізбей-ақ, гравитациялық динамиканың негізгі әсерлерін айқындауға мүмкіндік береді. Мұндай модельде тұтқырлық, жылуөткізгіштік және анизотропты кернеулер ескерілмейді, алайда бұл шектеулер серпіліс маңындағы жалпы эволюциялық қасиеттерді сипаттауға кедергі келтірмейді. Керісінше, геометрия мен материя арасындағы байланыстың $f(T, \mathcal{T})$ гравитациясында күшеюі идеал сұйықтық жағдайының өзінде бейстандарт динамикалық режимдердің пайда болуына әкеледі. Сондықтан бұл жуықтау серпіліс сценарийінің негізгі физикалық механизмдерін айқындау үшін жеткілікті әрі теориялық тұрғыдан негізделген болып табылады.

Масштабтық фактор мен Хаббл параметрінен бөлек, Ғалам эволюциясының үдеулі немесе баяулау сипатын сипаттау үшін баяулау параметрі енгізіледі. Ол масштабтық фактор арқылы келесі түрде анықталады:

$$q(t) = - \frac{\ddot{a}(t)}{a(t)H^2(t)}. \quad (9)$$

Берілген жұмыста қолданылған параметрленген масштабтық фактор үшін $q(t)$ уақытқа тәуелді функция ретінде анықталып, серпіліс маңындағы динамикалық режимдерді талдауда қолданылады. Аталған параметр серпіліс сәтінде Ғалам эволюциясының сығылу фазасынан кеңею фазасына ауысуын және үдеулі кеңею аймағының пайда болуын айқындауға мүмкіндік береді. Осылайша, баяулау параметрі серпіліс сценарийінің кинематикалық ерекшеліктерін сипаттайтын негізгі шамалардың бірі болып табылады.

Серпіліс режимін сипаттау үшін масштабтық фактордың параметрленген формасы қолданылады, ол серпіліс сәтінде $a(t)$ -тың нөлге тең болмауын қамтамасыз етеді және барлық динамикалық шамалардың шекті мәндерге ие болуына мүмкіндік береді. Осы параметрлеу арқылы $H(t)$ және $\dot{H}(t)$ анықталып, олар энергия тығыздығы мен қысымды өрнектеуде пайдаланылады.

Осы жұмыста гравитациялық тұрақтыны қысқаша белгілеу үшін

$$\kappa^2 \equiv 8\pi G \quad (10)$$

анықтамасы енгізіледі. Мұндай белгілеу өрнектердің ықшам жазылуын қамтамасыз етеді және энергия тығыздығы мен қысымға арналған формулаларды жазуда кеңінен қолданылады.

Өріс теңдеулерін шешу нәтижесінде энергия тығыздығы мен қысым уақытқа тәуелді шамалар ретінде алынады:

$$\rho(t) = -\frac{3(\alpha+1)[(2\beta+3)H^2+5\beta\dot{H}]}{8\pi G[4\beta(\beta+1)-3]}, \quad (11)$$

$$p(t) = \frac{3(\alpha+1)[(2\beta+3)H^2+(\beta+2)\dot{H}]}{8\pi G[4\beta(\beta+1)-3]}. \quad (12)$$

Осы шамалар арқылы күй теңдеуінің параметрі, (8) формуланы пайдала отырып

$$\omega(t) = \frac{p(t)}{\rho(t)} = -\frac{(2\beta+3)H^2+(\beta+2)\dot{H}}{(2\beta+3)H^2+5\beta\dot{H}} \quad (13)$$

анықталады. Бұл өрнек серпіліс аймағында күй теңдеуінің параметрінің стандартты космологиялық режимдерден уақытша ауытқуын сипаттайды (Cai et al., 2010).

Серпіліс режимін нақты сипаттау үшін масштабтық фактордың симметриялы параметрленген формасы қолданылады. Атап айтқанда, уақытқа қатысты жұп функция ретінде алынатын

$$a(t) = \sqrt{\gamma t^2 + 1} \quad (14)$$

масштабтық факторы серпіліс космологиясының негізгі талаптарын қанағаттандырады. Бұл таңдауда масштабтық фактор барлық уақыт мезеттерінде оң мәнге $t = 0$ ие болып, нүктесінде минимумға жетеді, ал алыс өткен мен болашақта монотонды түрде өседі. Мұндай сипаттама Ғаламның ығысу фазасынан кеңею фазасына бірқалыпты ауысуын сипаттайды.

Берілген масштабтық фактор үшін Хаббл параметрі мен оның уақыт бойынша туындысы аналитикалық түрде анықталады:

$$H(t) = \frac{\gamma t}{\gamma t^2 + 1}, \quad \dot{H}(t) = \frac{\gamma(1-\gamma t^2)}{(\gamma t^2 + 1)^2}. \quad (15)$$

Аталған өрнектер серпіліс сәтінде $H(0) = 0$ болатынын және оның уақыт бойынша туындысының таңбасы осы нүктеде өзгеретінін көрсетеді, бұл серпіліс құбылысының кинематикалық шарттарына толық сәйкес келеді.

Осы нәтижелерді сызықтық $f(T, \mathcal{T}) = \alpha T + \beta \mathcal{T}$ моделінің өріс теңдеулеріне қоя отырып, энергия тығыздығы мен қысымның уақытқа тәуелді өрнектері алынады:

$$\rho(t) = \frac{3(\alpha+1)\gamma^2(3(\beta-1)\gamma^2 t^2 - 5\beta)}{(4\beta(\beta+1)-3)(\gamma^2 t^2 + 1)^2}, \quad (16)$$

$$p(t) = \frac{3(\alpha+1)\gamma^2(\beta+(\beta+1)\gamma^2t^2+2)}{(4\beta(\beta+1)-3)(\gamma^2t^2+1)^2}. \quad (17)$$

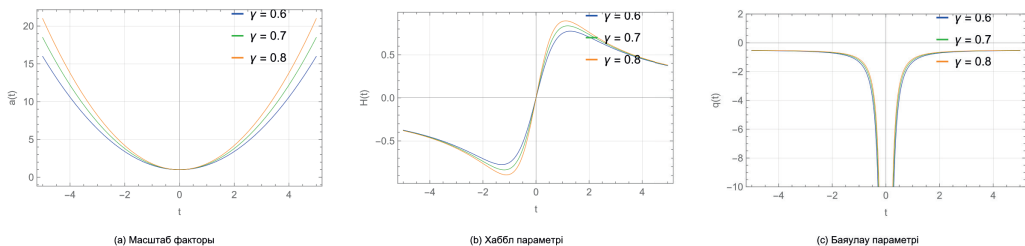
Бұл өрнектер серпіліс аймағында энергия тығыздығының шекті мәнге ие болып, $t = 0$ болғанда максимумға жететінін, ал қысымның бүкіл эволюция барысында теріс мәндер аймағында қалатынын көрсетеді.

Энергия тығыздығы мен қысым негізінде күй теңдеуінің параметрі

$$\omega(t) = \frac{p(t)}{\rho(t)} = \frac{\beta+(\beta+1)\gamma^2t^2+2}{3(\beta-1)\gamma^2t^2-5\beta} \quad (18)$$

анықталады. Бұл параметрдің уақыт бойынша өзгерісі серпіліс аймағында стандартты космологиялық режимдерден ауытқуды көрсетіп, энергия шарттарының бұзылу мүмкіндігін талдауға негіз болады.

Нәтижелер. Алынған динамикалық шешімдердің физикалық тұрғыдан үйлесімділігін бағалау үшін энергия шарттары қолданылады. Нөлдік энергия шарты (NEC), күшті энергия шарты (SEC) және доминантты энергия шарты (DEC) энергия тығыздығы мен қысымның сәйкес комбинациялары арқылы анықталып, серпіліс аймағында олардың орындалу немесе бұзылу ерекшеліктері талданады (Santos et al., 2007; Visser, 2000).



Сурет 1 - Әр түрлі параметр мәндерінде космолық уақытқа тәуелді масштаб факторы $a(t)$, Хаббл параметрі $H(t)$ және баяулау параметрі $q(t)$ эволюциясы.

Сурет 1-де масштабтық фактордың $a(t)$, Хаббл параметрінің $H(t)$ және баяулау параметрінің $q(t)$ космологиялық уақытқа тәуелділігі әртүрлі серпіліс параметрі мәндерінде көрсетілген. Масштабтық фактордың эволюциясы уақыт бойынша симметриялы сипатқа ие болып, $t = 0$ болғанда минимум мәнге жететіні байқалады. Бұл сипаттама Ғаламның серпіліс сценарийіне сәйкес келетін сығылу фазасынан кеңею фазасына бірқалыпты ауысуын сипаттайды. γ параметрі артқан сайын масштабтық фактордың өсу қарқыны серпілістен кейінгі аймақта күшейеді, бұл кеңею фазасының анағұрлым қарқынды болатынын көрсетеді.

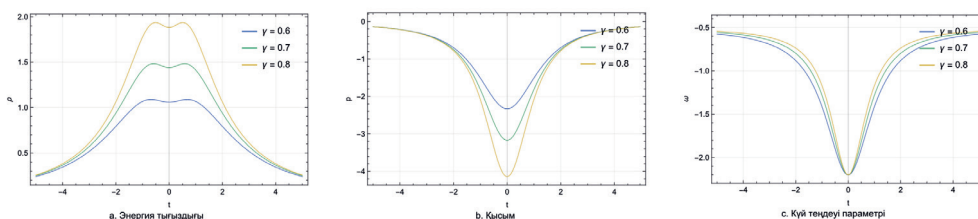
Хаббл параметрінің уақыт бойынша өзгерісі серпіліс сәтінде $H = 0$ шартын қанағаттандырады. Теріс уақыт аймағында $H(t) < 0$ болуы Ғаламның сығылу фазасын сипаттаса, оң уақыт аймағында $H(t) > 0$ мәндерге өтуі кеңею фазасының басталуын білдіреді. Осылайша, $H(t)$ эволюциясы серпіліс құбылысының кинематикалық талаптарына толық сәйкес келеді. Сонымен қатар,

γ мәнінің ұлғаюы Хаббл параметрінің серпіліс маңындағы еңкіштігін арттырып, эволюция динамикасына айқын әсер етеді (Percival et al., 2010).

Баяулау параметрінің $q(t)$ эволюциясы серпіліс маңында терең минимумның пайда болуымен сипатталады. Бұл серпіліс сәтінде үдеулі кеңею режимінің қысқа уақыт аралығында жүзеге асатынын көрсетеді. Уақыттың алыс аймақтарында $q(t)$ нөлге жақындап, кеңеюдің баяулау сипатына ауысатыны байқалады. Мұндай сипаттама таңдалған масштабтық фактордың серпіліс динамикасын адекватты сипаттайтынын дәлелдейді.

Сурет 1-дегі кинематикалық шамалардың бірлескен эволюциясы серпіліс сценарийінің параметрлік тұрғыдан орнықты екенін көрсетеді. Атап айтқанда, масштабтық фактор, Хаббл параметрі және баяулау параметрінің уақыт бойынша үздіксіз және шекті мәндерге ие болуы серпіліс маңында ешбір физикалық сингулярлықтың пайда болмайтынын айқындайды. Бұл қасиет таңдалған параметрленген масштабтық фактордың тек формальды түрде ғана емес, динамикалық тұрғыдан да үйлесімді екенін көрсетеді. Серпіліс маңындағы барлық кинематикалық шамалардың тегіс өзгеруі модельдің математикалық орнықтылығын қамтамасыз етіп, ерте Ғалам эволюциясын сипаттауда қолдануға жарамды екенін дәлелдейді.

Сонымен қатар, γ параметрінің өзгеруі арқылы серпіліс сценарийінің әртүрлі кинематикалық режимдерін жүзеге асыруға болатыны байқалады. Бұл параметр серпіліс маңындағы өтудің «өткірлігін» және серпілістен кейінгі кеңею фазасының қарқындылығын реттейтін тиімді басқарушы шама ретінде көрінеді. Осы тұрғыда γ параметрі серпіліс космологиясындағы маңызды еркіндік дәрежесі болып табылады және оны әртүрлі мәндерде таңдау арқылы бақылаулық деректерге жақын модельдер құруға мүмкіндік туады. Мұндай параметрлік икемділік телепараллельді $f(T, \mathcal{T})$ гравитациясының серпіліс сценарийлерін зерттеудегі артықшылығын көрсетеді.



Сурет 2 - Әр түрлі параметр мәндерінде космолық уақытқа тәуелді энергия тығыздығы $\rho(t)$, қысым $p(t)$ және күй теңдеуінің параметрі $q(t)$ эволюциясы.

Сурет 2-де энергия тығыздығы $\rho(t)$, қысым $p(t)$ және күй теңдеуінің параметрі $q(t)$ уақытқа тәуелді түрде көрсетілген. Энергия тығыздығы серпіліс нүктесіне жақындаған сайын өсіп, $t = 0$ болғанда максимум мәнге жетеді, одан кейін кеңею фазасында біртіндеп кемиді. Бұл нәтиже серпіліс сәтінде физикалық шамалардың шекті мәндерге ие болатынын және сингулярлықтың болмауын көрсетеді.

Қысымның эволюциясы барлық уақыт аралығында теріс мәндер аймағында қалып, серпіліс сценарийіне тән бейстандарт динамиканы айқындайды. Теріс қысым серпіліс маңында кеңею фазасын іске қосатын негізгі факторлардың бірі болып табылады. Әртүрлі γ мәндерінде қысымның абсолюттік шамасы өзгергенімен, оның жалпы сипаттамасы сақталады (Solanki et al., 2024).

Күй теңдеуінің параметрі $\omega(t)$ серпіліс аймағында $\omega < -1$ аймағына өтетінін көрсетеді. Бұл құбылыс фантомдық режимнің уақытша іске асуын білдіреді және серпіліс сценарийін жүзеге асыру үшін қажетті шарттардың бірі болып табылады. Серпілістен алыс уақыт аймақтарында мәндері біртіндеп жоғарылап, стандартты космологиялық режимдерге жақындайды. Осы нәтижелер серпіліс динамикасының негізгі ерекшеліктерін айқын көрсетіп, энергия шарттарын әрі қарай талдауға негіз қалайды (Eisenstein et al., 2005).

Сурет 2-де көрсетілген динамикалық тәуелділіктер серпіліс космологиясының энергетикалық құрылымын тереңірек түсінуге мүмкіндік береді. Энергия тығыздығының серпіліс нүктесіне жақындаған сайын шекті максимумға жетуі кеңістік-уақыт эволюциясында ешбір шексіз шамалардың пайда болмайтынын айқын көрсетеді. Бұл қасиет серпіліс сценарийінің басты артықшылықтарының бірі болып табылады, себебі ол бастапқы сингулярлық проблемасынан табиғи түрде қашуға мүмкіндік береді. Энергия тығыздығының симметриялы түрде өзгеруі сығылу және кеңею фазаларының бір-бірімен үздіксіз байланыста екенін көрсетіп, модельдің уақыттық кері симметриясын айқындайды.

Қысымның бүкіл эволюция барысында теріс мәндер аймағында қалуы серпіліс механизмінің физикалық негізін түсіндіруде маңызды рөл атқарады. Теріс қысым кеңістік-уақыттың гравитациялық түрде «итерілмелі» режимге өтуін қамтамасыз етіп, серпіліс маңында кеңею фазасының басталуына жағдай жасайды. Бұл бейстандарт қысым режимі классикалық материя түрлерінде кездеспейтіндіктен, телепараллельді $f(T, \mathcal{T})$ гравитациясында геометрия мен материя арасындағы бейминимал байланыстың шешуші маңызға ие екенін көрсетеді. Сонымен қатар, γ параметрінің әртүрлі мәндерінде қысымның тереңдігі өзгергенімен, оның теріс сипаты сақталады, бұл серпіліс динамикасының параметрлік тұрғыдан орнықты екенін білдіреді.

Күй теңдеуінің параметрінің уақыт бойынша эволюциясы серпіліс аймағында фантомдық режимнің уақытша іске асатынын көрсетеді. $\omega(t) < -1$ аймағына өтуі энергия тығыздығы мен қысым арасындағы қатынастың классикалық шектерден шығатынын білдіріп, серпіліс сценарийін жүзеге асыру үшін қажетті энергетикалық жағдайларды қалыптастырады. Мұндай режимнің уақытша сипатта болуы модельдің физикалық тұрғыдан қолайлы екенін көрсетеді, себебі серпілістен алыс аймақтарда $\omega(t)$ стандартты космологиялық мәндерге біртіндеп жақындайды. Бұл қасиет ерте Ғаламдағы бейстандарт динамика мен кеш кезеңдегі классикалық эволюция арасындағы табиғи өтуді қамтамасыз етеді.

Жалпы алғанда, энергия тығыздығы, қысым және күй теңдеуінің параметрінің бірлескен эволюциясы телепараллельді $f(T, \mathcal{T})$ гравитациясында серпіліс космологиясының энергетикалық тұрғыдан іске асу мүмкіндігін айқын

көрсетеді. Аталған шамалардың барлығы серпіліс маңында шекті және үздіксіз өзгеріп, модельдің математикалық тұрақтылығы мен физикалық үйлесімділігін қамтамасыз етеді. Бұл нәтижелер энергия шарттарын әрі қарай талдауға берік негіз қалыптастырып, серпіліс сценарийінің энергетикалық механизмін тереңірек зерттеуге мүмкіндік береді.

Космологиялық модельдің физикалық тұрғыдан іске асу мүмкіндігін бағалау үшін энергия тығыздығы мен қысым арасындағы қатынастарды сипаттайтын шектеулер қолданылады. Бұл шектеулер кеңістік-уақыт динамикасының мағыналы болуын қамтамасыз етіп, энергия ағынының себептілік принципін бұзбауын талап етеді. Серпіліс сценарийлерінде мұндай шарттар ерекше маңызға ие, себебі сығылу фазасынан кеңею фазасына өту классикалық космологияда қабылданған энергетикалық талаптардан ауытқуды қажет етеді (Visser, 2000).

Алдымен нөлдік энергия шарты қарастырылады. Ол энергия-импульс тензорының нөлдік бағыттар бойымен проекциясы теріс болмауын талап етеді және тығыздық пен қысым арқылы

$$\rho(t) + p(t) \geq 0 \quad (19)$$

түрінде өрнектеледі. Серпіліс аймағында бұл шарттың уақытша бұзылуы күй теңдеуінің параметрінің фантомдық мәндерге өтуіне мүмкіндік береді, нәтижесінде Ғалам динамикасы баяулаудан үдеуге ауысады. Мұндай сипаттама серпіліс механизмінің негізгі белгісі ретінде қарастырылады (Cai et al., 2010).

Материяның физикалық жарамдылығын сипаттайтын келесі шектеу доминантты энергия шартымен анықталады. Бұл шарт энергия тығыздығының қысымнан басым болуын талап етіп,

$$\rho(t) \geq |p(t)| \quad (20)$$

теңсіздігімен беріледі. Осы талаптың орындалуы энергия ағынының жарық жылдамдығынан аспауын қамтамасыз етеді және модельде себептіліктің сақталатынын көрсетеді. Серпіліс космологиясында доминантты энергия шартының сақталуы алынған шешімдердің физикалық тұрғыдан қабылдануға болатынын білдіреді (Santos et al., 2007).

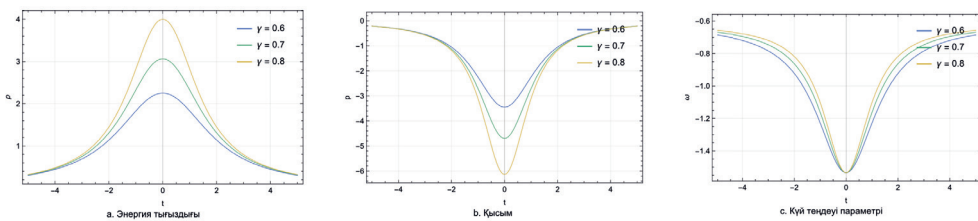
Гравитациялық тартылыстың сипатын сипаттайтын күшті энергия шарты энергия тығыздығы мен қысымның комбинациясына байланысты енгізіледі және

$$\rho(t) + 3p(t) \geq 0 \quad (21)$$

түрінде жазылады. Бұл шарт классикалық космологияда Ғаламның баяулау режиміне сәйкес келеді. Алайда серпіліс сценарийлерінде оның бұзылуы жиі байқалады, себебі серпіліс маңында үдемелі кеңею фазасы қалыптасады. Мұндай ерекшелік қазіргі үдемелі Ғаламды сипаттайтын бақылаулық нәтижелермен үйлеседі (Riess et al., 1998; Perlmutter et al., 1999).

Тандалған $f(T, \mathcal{T}) = \alpha T + \beta \mathcal{T}$ моделінде алынған энергия тығыздығы мен қысым өрнектері энергия шарттарының уақыт бойынша эволюциясын кешенді түрде талдауға мүмкіндік береді. Серпіліс нүктесіне жақын аймақта нөлдік және күшті энергия шарттарының бұзылуы байқалады, ал доминантты энергия шартының сақталуы модельдің физикалық үйлесімділігін көрсетеді. Бұл нәтиже телепараллельді гравитациядағы бейминимал байланыс серпіліс космологиясын іске асыруда маңызды рөл атқаратынын көрсетеді және тұтқыр эффектілерді ескеретін кеңейтілген модельдермен үйлеседі (Zhadyranova et al., 2025).

Сонымен қатар, серпіліс аймағында баяулау параметрінің шекті және үздіксіз өзгеруі алынған динамиканың тұрақты сипатқа ие екенін көрсетеді. Энергия шарттарының уақытша бұзылуы серпіліс сәтінде үдемелі кеңею фазасының қалыптасуына мүмкіндік беріп, сығылу мен кеңею фазалары арасындағы өтуді тегіс жүзеге асырады. Мұндай сипаттама бейминимал геометрия–материя байланысы бар космологиялық модельдерге тән жалпы қасиет ретінде қарастырылып, энергия тығыздығы мен қысым арасындағы қатынастардың серпіліс динамикасында шешуші рөл атқаратынын көрсетеді (Zhadyranova et al., 2026).



Сурет 3 - NEC, DEC және SEC энергия шарттарының космологиялық уақытқа тәуелділігі (γ параметрінің әртүрлі мәндері үшін).

Сурет 3-те нөлдік (NEC), доминантты (DEC) және күшті (SEC) энергия шарттарының космологиялық уақытқа тәуелді эволюциясы γ серпіліс параметрінің әртүрлі мәндері үшін көрсетілген. Бұл шарттар алынған серпіліс шешімдерінің физикалық тұрғыдан іске асу мүмкіндігін бағалауда негізгі критерийлердің бірі болып табылады, себебі олар энергия тығыздығы мен қысым арасындағы қатынастарға қойылатын іргелі шектеулерді сипаттайды.

Алдымен нөлдік энергия шартының эволюциясын қарастырайық. Суреттен серпіліс нүктесіне жақын аймақта $\rho + p$ қосындысының теріс мәндер қабылдайтыны анық байқалады. Бұл NEC шарттарының уақытша бұзылуын білдіреді және серпіліс сценарийлеріне тән негізгі ерекшелік болып табылады. Дәл осы шарттың бұзылуы серпіліс сәтінде Хаббл параметрінің нөлдік мән арқылы өтуіне және сығылу фазасынан кеңею фазасына тегіс ауысуға мүмкіндік береді. Уақыттың алыс аймақтарында $\rho + p$ оң мәндерге қайта оралып, классикалық космологиялық режимнің қалпына келетінін көрсетеді.

Доминантты энергия шартының эволюциясы серпіліс сценарийінің физикалық үйлесімділігін бағалауда ерекше маңызға ие. Сурет 3-тен $\rho - p$ комбинациясының

бүкіл уақыт аралығында оң мәндер аймағында қалатынын көруге болады. Бұл энергия ағынының жарық жылдамдығынан аспайтынын және себептілік принципінің сақталатынын білдіреді. Осылайша, NEC пен SEC шарттарының уақытша бұзылуына қарамастан, DEC шарттарының орындалуы модельдің физикалық тұрғыдан қабылдануға болатынын көрсетеді.

Жалпы алғанда, Сурет 3-тегі нәтижелер телепараллельді $f(T, \mathcal{T})$ гравитациясында серпіліс космологиясының энергетикалық тұрғыдан іске асу мүмкін екенін көрсетеді. NEC және SEC шарттарының уақытша бұзылуы серпіліс механизмін қамтамасыз етсе, DEC шарттарының сақталуы алынған шешімдердің физикалық үйлесімділігін сақтап қалады. Бұл серпіліс сценарийінің тек математикалық емес, нақты физикалық модель ретінде қарастырылуына негіз береді.

Алынған энергия тығыздығы мен қысым өрнектерін пайдалана отырып, энергия шарттарын сипаттайтын негізгі комбинациялар тікелей анықталады. Атап айтқанда, нөлдік энергия шартымен байланысты $\rho+p$ қосындысы келесі түрде жазылады (Koussour et al., 2024):

$$\rho(t) + p(t) = \frac{3(\alpha+1)\gamma^2(3(\beta-1)\gamma^2 t^2 - 4\beta + (\beta+1)\gamma^2 t^2 + 2)}{(4\beta(\beta+1) - 3)(\gamma^2 t^2 + 1)^2}. \quad (22)$$

Бұл өрнек серпіліс аймағында теріс мәндер қабылдап, $t = 0$ маңында нөлдік энергия шартының уақытша бұзылатынын көрсетеді. Аталған қасиет серпіліс механизмінің іске асуы үшін қажетті шарттардың бірі болып табылады (Cai et al., 2010; Vamba et al., 2014).

Доминантты энергия шартына сәйкес келетін $\rho-p$ комбинациясы

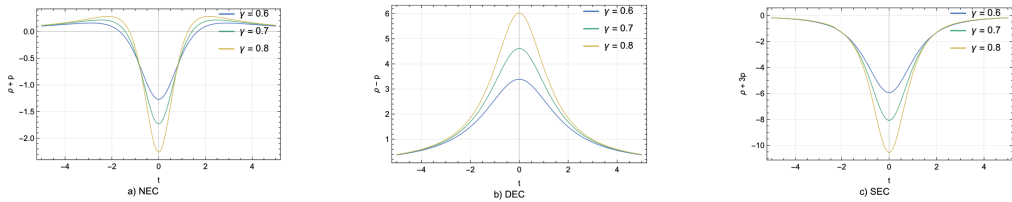
$$\rho(t) - p(t) = \frac{3(\alpha+1)\gamma^2(3(\beta-1)\gamma^2 t^2 - 6\beta - (\beta+1)\gamma^2 t^2 - 2)}{(4\beta(\beta+1) - 3)(\gamma^2 t^2 + 1)^2} \quad (23)$$

түрінде анықталады. Бұл шаманың серпіліс аймағынан тыс оң мәндерге ие болуы энергия ағынының себептілік шектерінде қалатынын және модельдің физикалық тұрғыдан үйлесімді екенін көрсетеді (Santos et al., 2007).

Күшті энергия шартымен байланысты $\rho+3p$ қосындысы

$$\rho(t) + 3p(t) = \frac{3(\alpha+1)\gamma^2(3(\beta-1)\gamma^2 t^2 - 5\beta + 3(\beta+(\beta+1)\gamma^2 t^2 + 2))}{(4\beta(\beta+1) - 3)(\gamma^2 t^2 + 1)^2} \quad (24)$$

түрінде алынады. Серпіліс маңында бұл өрнектің теріс мәндерге өтуі үдемелі кеңею фазасының қалыптасуын сипаттайды және классикалық баяулау режимінен ауытқуды көрсетеді. Мұндай нәтиже телепараллельді $f(T, \mathcal{T})$ гравитациясында серпіліс космологиясының жүзеге асуына энергетикалық тұрғыдан мүмкіндік бар екенін айқындайды (Visser, 2000; Hawking and Ellis, 2023).



Сурет 4 - Энергия шарттарын сипаттайтын $\rho+p$, $\rho-p$ және $\rho+3p$ комбинацияларының космологиялық уақытқа тәуелді эволюциясы.

Сурет 4–те энергия шарттарын сипаттайтын $\rho + p$, $\rho - p$ және комбинацияларының космологиялық уақытқа тәуелді эволюциясы әртүрлі мәндері үшін көрсетілген. Серпіліс маңында $\rho + p$ және $\rho + 3p$ шамаларының теріс аймақтарға өтуі нөлдік және күшті энергия шарттарының уақытша бұзылуын көрсетеді, бұл үдеулі кеңею фазасының қалыптасуымен тікелей байланысты. Ал $\rho - p$ комбинациясының оң мәндер аймағында қалуы доминантты энергия шартының сақталатынын және модельдің себептілік тұрғысынан орнықты екенін көрсетеді.

Модель параметрлері α , β және γ физикалық мағынаға ие және еркін таңдалған шамалар болып табылмайды. α параметрі бұралу скаляры T -нің гравитациялық динамикаға қосатын үлесін сипаттайды, ал β параметрі геометриялық бөлік пен материя арасындағы байланысты, яғни энергия–импульс тензоры ізінің \mathcal{T} арқылы әсерін анықтайды. Масштабтық фактор параметризациясындағы γ шамасы серпілістің уақыттық ауқымын және оның қарқындылық дәрежесін сипаттайды. Параметрлердің таңдалған мәндері ерекшеліксіз серпілістің жүзеге асуын қамтамасыз етеді және космологиялық эволюцияның кейінгі кезеңдеріндегі стандартты динамикаға қайшы келмейді. Жалпы салыстырмалылық теориясының шегіне ($\alpha \rightarrow 0$, $\beta \rightarrow 0$) жақындағанда модель бақылау деректерімен үйлесімді сипаттама береді.

Соңғы жылдары энергия шарттарының орындалуы немесе бұзылуы модификацияланған гравитация модельдерінің физикалық жарамдылығын бағалаудың маңызды критерийі ретінде қарастырылуда. Бақылау деректеріне негізделген заманауи зерттеулерде (Planck, SNe Ia, BAO) космологиялық модельдердің параметрлері энергия шарттары тұрғысынан талданып, олардың үдемелі кеңеюді сипаттау қабілеті тексеріледі. Осы тұрғыда ұсынылған модельде NEC және SEC шарттарының серпіліс маңында уақытша бұзылуы, ал DEC шартының сақталуы алынған шешімдердің физикалық тұрғыдан үйлесімді екенін көрсетеді және қазіргі космологиялық шектеулермен қайшылыққа келмейді (Mahmood et al., 2024).

Қорытынды

Бұл жұмыста телепараллельді $f(T, \mathcal{T}) = \alpha T + \beta \mathcal{T}$ гравитациясы аясында серпіліс космологиялық сценарийінің жүзеге асу мүмкіндігі талданды. Таңдалған

параметрленген масштабтық фактор Ғалам динамикасының сингулярлықсыз сипатта дамуына мүмкіндік беріп, сығылу фазасынан кеңею фазасына тегіс өтуді қамтамасыз ететіні көрсетілді.

Алынған аналитикалық өрнектер негізінде энергия тығыздығы серпіліс мезетінде шекті максимумға жететіні, ал қысым бүкіл эволюция барысында теріс мәндер аймағында қалатыны анықталды. Күй тендеуінің параметрі серпіліс маңында фантомдық аймаққа уақытша өтіп, нөлдік және күшті энергия шарттарының бұзылуына әкелетіні көрсетілді. Сонымен қатар, энергия тығыздығы мен қысым комбинацияларын талдау доминантты энергия шартының сақталатынын көрсетті, бұл модельдің физикалық тұрғыдан үйлесімді екенін айқындайды. Алынған нәтижелер телепараллельді гравитациядағы геометрия мен материя арасындағы байланыс серпіліс космологиясын сипаттауда маңызды рөл атқаратынын және ерте Ғалам эволюциясының баламалы сценарийлерін зерттеуге негіз бола алатынын көрсетеді.

Серпіліс аймағында баяулау параметрінің уақыт бойынша үздіксіз өзгеруі алынған динамиканың тұрақты сипатқа ие екенін көрсетеді. Хаббл параметрінің нөлдік мән арқылы өтуі сығылу мен кеңею фазалары арасындағы өтудің кинематикалық тұрғыдан дұрыс жүзеге асатынын растайды. Бұл серпіліс сценарийінің тек формальды емес, нақты космологиялық эволюцияны сипаттай алатынын білдіреді.

Сонымен бірге, алынған нәтижелер серпіліс космологиясында энергия шарттарының классикалық түрде орындалмауы міндетті түрде физикалық қайшылыққа әкелмейтінін көрсетеді. Керісінше, геометрия мен материя арасындағы байланыс арқылы мұндай бұзылулар ерте Ғалам динамикасының табиғи бөлігі ретінде қарастырылуы мүмкін. Бұл телепараллельді гравитация аясында серпіліс сценарийлерін одан әрі кеңейтіп, параметрлік зерттеулер жүргізуге және бақылаулық деректермен салыстыруға мүмкіндік береді.

Жалпы алғанда, алынған нәтижелер серпіліс космологиясы тек теориялық тұрғыдан қызықты модель ғана емес, сонымен қатар ерте Ғалам эволюциясын сипаттауда нақты физикалық мағынасы бар сценарий екенін көрсетеді. Телепараллельді $f(T, \mathcal{T})$ гравитациясында геометриялық сипаттамалардың өзгеруі материя қасиеттерімен тікелей байланысып, динамикалық тендеулердің құрылымын елеулі түрде түрлендіреді. Бұл өз кезегінде серпіліс аймағында байқалатын энергия шарттарының бұзылуын табиғи құбылыс ретінде қарастыруға мүмкіндік береді және модельдің ішкі логикалық тұтастығын сақтайды.

Бұдан бөлек, алынған серпіліс шешімдері параметрлердің кең ауқымында орнықты болып шықты, бұл модельдің әмбебап сипатын көрсетеді. Мұндай тұрақтылық серпіліс сценарийлерін одан әрі күрделірек жағдайларда, мысалы анизотропты немесе тұтқыр космологиялық модельдерде зерттеуге негіз қалайды. Сонымен қатар, телепараллельді гравитациядағы бейминимал байланыстарды бақылаулық деректермен салыстыру арқылы шектеу қою мүмкіндігі болашақ зерттеулердің маңызды бағыты ретінде қарастырылуы мүмкін. Осы тұрғыда ұсынылған тәсіл ерте Ғалам физикасын түсінуге және балама космологиялық модельдерді дамытуға арналған тиімді құралдардың бірі болып табылады.

Сонымен қатар, алынған нәтижелер серпіліс космологиясының телепараллельді $f(T, \mathcal{T})$ гравитациясы аясында өздігінен қалыптасатын динамикалық механизм ретінде қарастырылуы мүмкін екенін көрсетеді. Бұл тұрғыда серпіліс құбылысы арнайы таңдалған бастапқы шарттардың немесе жасанды параметрлердің нәтижесі емес, керісінше, геометрия мен материя арасындағы өзара әрекеттесудің табиғи салдары болып табылады. Мұндай сипаттама модельдің физикалық негізділігін күшейтіп, оны ерте Ғалам эволюциясын сипаттайтын балама сценарий ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

Алынған аналитикалық шешімдердің маңызды ерекшелігі – барлық негізгі физикалық шамалардың серпіліс маңында шекті мәндерге ие болуы. Энергия тығыздығының, қысымның, Хаббл және баяулау параметрлерінің үздіксіз және тегіс эволюциясы кеңістік-уақыттың геометриялық құрылымында үзілістердің жоқ екенін көрсетеді. Бұл қасиет серпіліс сценарийінің математикалық тұрғыдан орнықты екенін ғана емес, сонымен қатар физикалық мағынасы бар екенін де айқындайды. Мұндай орнықтылық ерте Ғалам динамикасын сипаттауда ерекше маңызды, себебі дәл осы аймақта классикалық теориялар көбіне өз қолданылу шегіне жетеді.

Серпіліс аймағында энергия шарттарының уақытша бұзылуы алынған модельде орталық рөл атқарады. Нөлдік және күшті энергия шарттарының бұзылуы үдеулі кеңею фазасының пайда болуына мүмкіндік берсе, доминантты энергия шартының сақталуы себептілік пен энергия ағынының физикалық шектерін қамтамасыз етеді. Бұл тепе-теңдік серпіліс космологиясының ішкі логикасын көрсетіп, энергия шарттарының классикалық түсіндірмесін ерте Ғалам жағдайларына бейімдеу қажеттігін айқын көрсетеді. Осы тұрғыда алынған нәтижелер энергия шарттарын абсолютті талап ретінде емес, кеңістік-уақыттың динамикасына тәуелді шарттар ретінде қарастыру орынды екенін меңзейді.

Бұл жұмыста $f(T, \mathcal{T})$ -гравитация теориясы аясында энергия шарттарын талдау негізінде серпіліс моделі қарастырылады. $f(T)$, $f(R)$ және $f(T, \mathcal{T})$ теорияларында серпіліс қарастырылған жұмыстардан айырмашылығы - бұл зерттеуде функцияның бұралу скаляры T мен энергия-импульс тензоры ізінің \mathcal{T} -ға бір мезгілде тәуелділігі ескеріледі. Мұндай тәсіл геометрия мен материялық үлестің өзара әсерінің ығысудан кеңеюге өтудің динамикасына ықпалын талдауға мүмкіндік береді. Масштабтық фактордың бір параметризациясы аясында функцияның сызықтық және бейсызықтық түрлері қарастырылды. Нәтижелер серпіліс нүктесінің маңында NEC шартының бұзылатынын, алайда DEC шартының сақталатынын көрсетеді, бұл ығысудан кеңеюге ерекшеліксіз өтудің жүзеге асу шарттарымен үйлеседі. Жалпы алғанда, телепараллельді $f(T, \mathcal{T})$ гравитациясы аясында алынған серпіліс шешімдері ерте Ғалам физикасын түсіндіруде жаңа мүмкіндіктер ашады. Геометрия мен материя арасындағы бейминимал байланыс динамикалық теңдеулердің құрылымын түбегейлі өзгертіп, серпіліс құбылысын қосымша экзотикалық компоненттерді енгізбей-ақ сипаттауға мүмкіндік береді. Бұл қасиет модельді теориялық тұрғыдан ғана емес, феноменологиялық тұрғыдан да тартымды етеді.

Алдағы зерттеулерде ұсынылған тәсілді кеңейту арқылы анизотропты кеңістік-уақыттарда серпіліс динамикасын талдау, тұтқыр эффектiлердi немесе қосымша еркін параметрлердi енгізу, сондай-ақ бақылаулық деректермен салыстыру арқылы модель параметрлеріне шектеу қою мүмкіндіктері қарастырылуы мүмкін. Осы бағыттар телепараллельді гравитациядағы серпіліс космологиясын әрі қарай дамытуға және ерте Ғалам эволюциясын сипаттаудың толыққанды теориялық негізін қалыптастыруға жол ашады.

References

- Bamba K., Cai Y.F., Nojiri S., Odintsov S.D. (2014) Bounce cosmology from $F(R)$ gravity and $F(R)$ bigravity. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 01:008. DOI: 10.1088/1475-7516/2014/01/008 (in Eng.).
- Cai Y.F., Saridakis E.N., Setare M.R., Xia J.Q. (2010) Quintom cosmology: Theoretical implications and observations. *Physics Reports*, 493:1–60. DOI: 10.1016/j.physrep.2010.04.001 (in Eng.).
- Eisenstein D.J., Zehavi I., Hogg D.W., et al. (2005) Detection of the baryon acoustic peak in the large-scale correlation function of SDSS luminous red galaxies. *Astrophysical Journal*, 633:560–574. DOI: 10.1086/466512 (in Eng.).
- Hawking S.W., Ellis G.F.R. (2023) *The Large Scale Structure of Space–Time*. Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781009253161 (in Eng.).
- Koussour M., et al. (2024) Exploring cosmological evolution and constraints in $f(T)$ teleparallel gravity. *Physics of the Dark Universe*, 46:101664. DOI: 10.1016/j.dark.2024.101664 (in Eng.).
- Mahmood I., Sohail H., Ditta A., Shekh S.H., Yadav A.K. (2024) Reconstruction of symmetric teleparallel gravity with energy conditions. *International Journal of Geometric Methods in Modern Physics*, 21(12):2450204. DOI: 10.1017/9781009253161 (in Eng.).
- Percival W.J., et al. (2010) Baryon acoustic oscillations in the Sloan Digital Sky Survey Data Release 7 galaxy sample. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 401:2148–2168. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2009.15812.x (in Eng.).
- Perlmutter S., et al. (1999) Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae. *Astrophysical Journal*, 517:565–586. DOI: 10.1086/307221 (in Eng.).
- Riess A.G., et al. (1998) Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant. *Astronomical Journal*, 116:1009–1038. DOI: 10.1086/300499 (in Eng.).
- Santos J., Alcaniz J.S., Reboucas M.J., Carvalho F.C. (2007) Energy conditions in $f(R)$ gravity. *Physical Review D*, 76:083513. DOI: 10.1103/PhysRevD.76.083513 (in Eng.).
- Solanki R., Bhat A., Sahoo P.K. (2024) Bulk viscous cosmological model in $f(T, \mathcal{J}')$ modified gravity. *Astroparticle Physics*, 163:103013. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2024.103013 (in Eng.).
- Visser M. (2000) Energy conditions and their cosmological implications. In: *Particle Physics and the Early Universe*, 98–112. (in Eng.).
- Wald R.M. (1984) *General Relativity*. University of Chicago Press, 506 p. (in Eng.).
- Zhadyranova A., Kanibekova Zh., Zhumabekova V., Koussour M., Anshokova D., Muminov S., Rayimbaev J. (2025) Observational evidence of bulk viscosity effects in $f(R, T)$ cosmological models. *Physics Letters A*, 548:130560. DOI: 10.1016/j.physleta.2025.130560 (in Eng.).
- Zhadyranova A., Koussour M., Kanibekova Zh., Zhumabekova V., Ismail U., Muminov S., Rayimbaev J. (2026) Divergence-free deceleration and energy conditions in non-minimal $f(R, T)$ gravity. *International Journal of Geometric Methods in Modern Physics*, 23:2550154. DOI: 10.1142/S021988782550154X (in Eng.).

Publication Ethics and Publication Malpractice in the journals of the Central Asian Academic Research Center LLP

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the journals of the Central Asian Academic Research Center LLP implies that the described work has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The Central Asian Academic Research Center LLP follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct (http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf). To verify originality, your article may be checked by the Cross Check originality detection service <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the Central Asian Academic Research Center LLP.

The Editorial Board of the Central Asian Academic Research Center LLP will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайте:

**[www:nauka-nanrk.kz](http://www.nauka-nanrk.kz)
ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print)
<http://reports-science.kz/index.php/en/archive>**

Ответственный редактор *А. Ботанқызы*
Редакторы: *Д.С. Аленов, Т. Апендиев*
Верстка на компьютере *Г.Д. Жадырановой*

Подписано в печать 16.03.2026.

Формат 60x88¹/₈.
18,0 п.л. Заказ 1.