

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

**ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES**

**№2
2026**

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

2026 • 2



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 of the Research Institute of Petroleum Refining and Petrochemicals (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960> <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

Editorial Board:

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

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 Tlekkaul Sabitovich, (Deputy Editor-in-Chief), 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>

ABILMAGZHANOV Arlan Zainutallaevich, PhD in Chemistry, First Deputy Director General 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>

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 Жұрыңұлы, 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/authid/detail.uri?authorId=6602177960%3Cp%3Ehttps://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

Редакция ұжымы:

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

ӘДЕКЕНОВ Серғазы Мыңжасарұлы, химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, "Фитохимия" ғылыми-өндірістік орталығы " АҚ директоры (Қарағанды, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/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/authid/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/authid/detail.uri?authorId=6602431781>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1405661>

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

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

САНГ-СУ Квак, PhD (биохимия, агрохимия), профессор, Корея Биология және биотехнология ғылыми-зерттеу институты (KRIIBV), өсімдіктердің инженерлік жүйелері ғылыми-зерттеу орталығының бас ғылыми қызметкері, (Дэчон, Корея), <https://www.scopus.com/authid/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/authid/detail.uri?authorId=7004012398>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/19854255>

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

БОШКАЕВ Қуантай Авғазыұлы, Ph.D. Теориялық және ядролық физика кафедрасының доценті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/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/authid/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/authid/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/authid/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/authid/detail.uri?authorId=7202799321>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/65533963>

ТАКИБАЕВ Нұрғали Жабағұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/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/authid/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/authid/detail.uri?authorId=26530759900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1556025>

ӘБІЛМАҒЖАНОВ Арлан Зайнуталлайұлы, химия ғылымдарының кандидаты, Д.В. Сокольский атындағы "Отын, катализ және электрохимия институты" АҚ Бас директорының бірінші орынбасары, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197468109>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2024265>

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 МАН и НАН РК, Генеральный директор НИИ нефтепереработки и нефтехимии (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960%3Cp%3Ehttps://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

Редакционная коллегия:

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>

АДЕКЕНОВ Сергезы 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 Росси 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), (Дэжон, Корея), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59286321700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30028581>

БЕРСИМБАЕВ Рахметкажи Искендинович, 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 Авгазыевич, 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 Мухамбеткали, 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 им. 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 Жабағәевич, 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>

АБИЛМАТЖАНОВ Арлан Зайнуталлаевич, кандидат химических наук, первый заместитель генерального директора 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>

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>

© ТОО «Центрально-азиатский академический научный центр», 2026

CONTENTS

PHYSICS

Koshtybayev T.B., Aliev Sh., Aliyeva M.E., Zhavliyeva A.T. Covariant approach to the kinetic theory of plasma in a strong electromagnetic field.....	13
Kemelbekova A., Shongalova A., Bondar E., Otunchi Ye. Recycling technologies for spent lithium-ion batteries: environmental impact, recovered products, and future development trends.....	25
Koilyk N., Baimbetova G., Dalelkhankyzy A., Kaptagay G., Primkulova Zh. Simplification of the fermionic dynamical symmetry model for identical particles and its mapping into bosonic space.....	38
Massak B., Agyl-Mussapar O., Amangeldinova S., Kurmangaliyeva V., Snow M. Constraints on Yukawa-Type short-range interactions from neutron interferometry data.....	60
Nurbayev B.M., Dmitriyeva E.A. Tin-based perovskites.....	70
Nurtazina A.S., Zhubaev A.K. Study of the effect of highly dispersed ochre on the kinetic characteristics of epoxy composites.....	92
Shokanov A.K., Khamrayev Sh.I., Smikhan Y.A. Mössbauer studies of fly ash-based tracers.....	103
Ualikhanova U.A., Kurban Y.Y., Syzdykova A.M., Altayeva G.S., Altaibayeva A.B. Breaking the degeneracy between metric and teleparallel gravity theories through multi-messenger gravitational-wave astronomy.....	119
Zhadyranova A.A., Yerzhan B. Dynamics of bounce regimes in modified teleparallel gravity.....	134
Zhusupova N.K. Application of machine learning methods in the analysis of gravitational waves and cosmological models.....	151

CHEMISTRY

Aubakirov Ye., Akhmetova F., Tashmukhambetova Zh., Toshtay K., Amantaiuly K. Conversion of Polymer Waste into Synthetic Fuel via Modification of Taizhuzhen Zeolite with Tungsten Salts.....	164
Auyeshov A.P., Eskibayeva Ch.Z., Ibrayeva A.M., Alzhanov K.B., Dikanbayeva A.K. Physicochemical study of serpentinite waste and phosphoric acid products.....	175
Bayeshova A.K., Bayeshov A., Tuleshova E.Zh. Reduction of copper ions by zinc in the presence of titanium(iv) ions in sulfuric acid solutions.....	188

Fazylov S.D., Syzdykov A.K., Pustolaikina I.A., Kazhmuratova A.T., Tazhibay A.M. Production of α -, β -, γ -oligosaccharide clathrate cytosine complexes.....	200
Jalmakhanbetova R.I., Yelshibayeva A.M., Zhumagaliyeva Zh.Zh., Mukusheva G.K. Terpenoid compounds of <i>Artemisia terrae-albae</i> growing in the Turkestan Region of Kazakhstan.....	213
Kapizov O.S., Mukhanov D.K., Dzheldybaeva I.M., Seisenov E.B., Akimbayeva A.B. Sustainable recycling of ferrosilicon machining chips from metallurgical plants into high-performance silicon–carbon anodes.....	228
Massalimova B.K. Wastewater treatment methods for heavy metal removal: production of activated carbon from biomass.....	244
Nurtai Zh., Orynassar R., Aimaganbetova Z.K., Zhanturina N.N. Simulation of kinetic parameters of vinyl ester resin samples with diatomite and dimethyl methylphosphonate fillers.....	272
Sagyntayeva A., Zhanikulov N., Sudarev E., Kaiyrbaeva M., Zhakipbayev B. Research on the quality of raw materials for obtaining gypsum-cement-pozzolanic composite material.....	286
Satayeva S., Yermukhanova S., Urazova A., Mendygaliyeva A., Sabitov B. Obtaining benzene by photocatalytic oxidation of toluene.....	302
Sdikova G.Zh., Dalabayeva N.S., Sarova N.B., Muhtar T.Zh., Zhaltirbayeva N.K. Efficiency of phosphorus-containing inhibitors in protecting steel against corrosion.....	315
Shaimardan M., Azhikhanova Z., Abutalip M., Toktarbaiuly O. Isolation and Characterization of lignin from <i>Phlomis tuberosa</i> L. biomass via acid treatment.....	329
Yesimsiitova Z.B., Seisenova A., Oryngaliyeva S.Zh., Sanuar A., Manap K.R. Obtaining carbonized materials from rice husk using a mobile pyrolysis plant for energy applications.....	338
Zhetenova M.S., Suleimenova M.Sh., Nuraly A.M., Mutushev A.Zh., Kalimoldina L.M. Development and research of carotenoid-containing extracts obtained from plant raw materials.....	353
Zhortarova A.A., Kubicek V., Salkeyeva L.K., Ibrayev M.K., Seidakhmetova R.B. Synthesis and investigation of biological activity of 1,3-Bis(4-Phenylthiazol-2-yl)-2,4-Bis(N,N- Diethylamino)-1,3-Diaza-2,4-Diphosphétidine.....	367
Zhumabek M., Tungatarova S.A., Murzin D.Yu., Baizhumanova T.S. Structural and catalytic properties of SCS-derived Co–Al–Mg–Mn catalysts in dry reforming of methane.....	383

МАЗМҰНЫ

ФИЗИКА

Қоштыбаев Т.Б., Алиев Ш., Алиева Е.М., Жавлиева А.Т. Күшті электромагниттік өрістегі плазманың кинетикалық теориясына коварианттық көзқарас.....	13
Кемелбекова А., Шонғалова А., Бондарь Е., Отунчи Е. Пайдаланылған литий-ионды аккумуляторларды қайта өңдеу технологиялары: экологиялық әсері, алынатын өнімдер және болашақ даму бағыттары.....	25
Қойлық Н.О., Байымбетова Г.А., Дәлелханқызы А., Қаптағай Г.А., Примкулова Ж.Е. Бірдей бөлшектер үшін фермионды динамикалы-симметриялық модельді ықшамдау және оны бозондық кеңістікке бейнелеу.....	38
Масақ Б., Ағыл-Мұсапар О., Амангелдинова С., Курманғалиева В., Сноу М. Нейтрондық интерферометрия негізінде юкава типті қысқа-қашықтықтағы өзара әсерлесулерге шектеулер қою.....	60
Нұрбаев Б.М., Дмитриева Е.А. Қалайы негізіндегі перовскиттер.....	70
Нуртазина А.С., Жубаев А.К. Дисперстілігі жоғары охраның эпоксидті композиттердің кинетикалық сипаттамаларына ықпалын зерттеу.....	92
Шоканов А.К., Хамраев Ш.И., Смихан Е.А. Ұшқыш күл негізіндегі трассерлердің мессбауэрлік зерттеулері.....	103
Уалиханова У.А., Құрбан Е.Е., Сыздыкова А.М., Алтаева Г.С., Алтайбаева А.Б. Көп арналы гравитациялық-толқындық астрономия арқылы метрикалық және телепараллельді гравитация теорияларының айырмашылығын зерттеу.....	119
Жадыранова А.А., Ержан Б. Модификацияланған телепараллель гравитациядағы серпіліс режимдерінің динамикасы.....	134
Жусупова Н.К. Машиналық оқыту әдістерін гравитациялық толқындар мен космологиялық модельдерді талдауда қолдану.....	151

ХИМИЯ

Аубакиров Е., Ахметова Ф., Ташмұхамбетова Ж., Тоштай Қ., Амантайұлы Қ. Тайжүзген цеолитін вольфрам тұздарымен модификациялау арқылы полимер қалдықтарын синтетикалық отынға түрлендіру.....	164
Ауешов А.П., Ескибаева Ч.З., Ибраева А.М., Алжанов К.Б., Диканбаева А.К. Серпентинит қалдықтарының фосфор қышқылымен әрекеттесу өнімдерінің физика-химиялық зерттелуі.....	175

Башова А.К., Башов А.Б., Түлешова Э.Ж.

Мыс иондарын күкіртқышқылды ерітінділерде титан (IV) иондары қатысында
мырышпен тотықсыздандыру.....188

Фазылов С.Д., Сыздықов А.Қ., Пустолайкина И.А., Қажмұратова А.Т., Тәжібай А.М.
Цитизиннің α -, β -, γ -олигосахаридтермен клатраттыкешендерін алу.....200

Джалмаханбетова Р.И., Елшібаева А.М., Жумагалиева Ж.Ж., Мукушева Г.К.
Қазақстанның Түркістан өңірінде өсетін *Artemisia terrae-albae* терпеноидты
косылыстары.....213

Капизов О.С., Муханов Д.К., Желдыбаева И.М., Сейсенев Е.Б., Акимбаева А.Б.
Металлургиялық зауыттардың ферросилиций жоңқаларын жоғары өнімді
кремний-көміртекті анодтарға тұрақты қайта өңдеу.....228

Масалимова Б.К.

Ауыр металдардан ағын суларды жою әдістері: биомассада белсендендірілген
көміртек алу.....244

Нуртай Ж., Орынбасар Р.О., Аймағанбетова З.К., Жантурина Н.Н.

Диатомит пен диметил метилфосфонат толтырғыштары бар винилэфир шайыр
үлгілерінің кинетикалық параметрлерінің модельдеу.....272

Сағынтаева А., Жаниқұлов Н., Сударев Е., Қайырбаева М., Жакипбаев Б.

Гипс-цемент-пуццоланды композициялық материал алу үшін қажетті
шикізаттардың сапасын зерттеу.....286

Сатаева С., Ермуханова С., Уразова А., Мендығалиева А., Сабитов Б.

Толуолдың фотокаталитикалық тотығуы арқылы бензол алу.....302

Сдикова Г.Ж., Далабаева Н.С., Сарова Н.Б., Мұхтар Т.Ж., Жалтырбаева Н.К.

Фосфор ингибиторлардың болаттың жемірілуіне қарсы тиімділігі.....315

Шаймардан М., Ажиханова Ж., Әбутәліп М., Тоқтарбайұлы О.

Phlomis Tuberosa L. өсімдігі биомассасынан лигнинді қышқылдық өңдеу арқылы
бөліп алу және сипаттау.....329

Есимсиитова З.Б., Сейсенова А., Орынғалиева С.Ж., Сануар А., Манап К.Р.

Энергиялық қолдану үшін жылжымалы пиролиз қондырғысын пайдалану арқылы
күріш қауызынан көміртекті материалдар алу.....338

**Жетенова М.С., Сүлейменова М.Ш., Нұралы Ә.М., Мутушев А.Ж.,
Калимолдина Л.М.**

Өсімдік шикізатынан алынған құрамында каротиноид бар сығындыларды
әзірлеу және зерттеу.....353

Жортарова А.А., Kubicek V., Салькева Л.К., Ибраев М.К., Сейдахметова Р.Б.
1,3-бис(4-фенилтиазол-2-ил)-2,4-бис(N,N-диэтиламино)-1,3-диазо-2,4-дифосфетидиннің
синтезі және биологиялық белсенділігін зерттеу.....367

Жұмабек М., Тунгатарова С.А., Мурзин Д.Ю., Байжуманова Т.С.
SCS әдісімен дайындалған Co–Al–Mg–Mn катализаторларының метанның құрғақ
реформингіндегі құрылымдық және каталитикалық қасиеттері.....383

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА

Коштыбаев Т.Б., Алиев Ш., Алиева М.Е., Жавлиева А.Т.

Ковариантный подход к кинетической теории плазмы в сильном электромагнитном поле.....13

Кемелбекова А., Шонгалова А., Бондарь Е., Отунчи Е.

Технологии переработки отработанных литий-ионных аккумуляторов: экологическое воздействие, получаемые продукты и будущие направления развития.....25

Қойлық Н.О., Баймбетова Г.А., Дәлелханқызы А., Қаптағай Г.Ә., Примкулова Ж.Е.

Упрощение фермионной динамико-симметрической модели для идентичных частиц и её отображение в бозонное пространство.....38

Масақ Б., Ағыл-Мұсапар О., Амангелдинова С., Курмангалиева В., Сноу М.

Ограничения на юкавовские короткодействующие взаимодействия на основе нейтронной интерферометрии.....60

Нурбаев Б.М., Дмитриева Е.А.

Перовскиты на основе олова.....70

Нуртазина А.С., Жубаев А.К.

Исследование влияния высокодисперсной охры на кинетические характеристики эпоксидных композитов.....92

Шоканов А.К., Хамраев Ш.И., Смихан Е.А.

Мёссбауэровские исследования трассеров на основе летучей золы.....103

Уалиханова У.А., Курбан Е.Е., Сыздыкова А.М., Алтаева Г.С., Алтайбаева А.Б.

Разрешение вырождения метрических и телепараллельных теорий гравитации посредством многоканальной гравитационно-волновой астрономии.....119

Жадыранова А.А., Ержан Б.

Динамика отскоковых режимов в модифицированной телепараллельной гравитации.....134

Жусупова Н.К.

Применение методов машинного обучения при анализе гравитационных волн и космологических моделей.....151

ХИМИЯ

Аубакиров Е., Ахметова Ф., Ташмухамбетова Ж., Тоштай К., Амантайулы К.

Конверсия полимерных отходов в синтетическое топливо путем модификации цеолита тайжугзен солями вольфрама.....164

Ауешов А.П., Ескибаева Ч.З., Ибраева А.М., Алжанов К.Б., Диканбаева А.К. Физико-химическое исследование продуктов взаимодействия серпентинитовых отходов и фосфорной кислоты.....	175
Башова А.К., Башов А.Б., Тулешова Э.Ж. Восстановление ионов меди цинком в присутствии ионов титана (IV) в растворах серной кислоты.....	188
Фазылов С.Д., Сыздыков А.К., Пустолайкина И.А., Кажмуратова А.Т., Тажибай А.М. Получение α -, β -, γ -олигосахаридных клатратных комплексов цитизина.....	200
Джалмаханбетова Р.И., Елшыбаева А.М., Жумагалиева Ж.Ж., Мукушева Г.К. Терпеноидные соединения <i>Artemisia terrae-albae</i> , произрастающего в Туркестанском регионе Казахстана.....	213
Капизов О.С., Муханов Д.К., Желдыбаева И.М., Сейсенов Е.Б., Акимбаева А.Б. Устойчивая переработка стружки ферросилиция металлургических заводов в высокопроизводительные кремний-углеродные аноды.....	228
Масалимова Б.К. Методы очистки сточных вод от тяжелых металлов: получение активированного угля из биомассы.....	244
Нуртай Ж., Орынбасар Р.О., Аймаганбетова З.К., Жантурина Н.Н. Моделирование кинетических параметров образцов винилэфирных смол с наполнителями из диатомита и диметилметилфосфоната.....	272
Сагынтаева А., Жаникулов Н., Сударев Е., Кайырбаева М., Жакипбаев Б. Исследование качества сырья для получения гипсо-цементно-пуццоланового композиционного материала.....	286
Сатаева С., Ермуханова С., Уразова А., Мендыгилиева А., Сабитов Б. Получение бензола методом фотокаталитического окисления толуола.....	302
Сдикова Г.Ж., Далабаева Н.С., Сарова Н.Б., Мухтар Т.Ж., Жалтырбаева Н.К. Эффективность фосфорсодержащих ингибиторов против коррозии стали.....	315
Шаймардан М., Ажиханова Ж., Абуталип М., Токтарбай О. Выделение и характеристика лигнина из биомассы <i>Phlomis Tuberosa</i> L. с помощью кислотной обработки.....	329
Есимсиитова З.Б., Сейсенова А., Орынгалиева С.Ж., Сануар А., Манап К.Р. Получение карбонизированных материалов из рисовой шелухи с использованием мобильной пиролизной установки для энергетических применений.....	338

**Жетенова М.С., Сулейменова М.Ш., Нуралы А.М., Мутушев А.Ж.,
Калимолдина Л.М.**

Разработка и исследование каротиноидсодержащих экстрактов, полученных
из растительного сырья.....353

Жортарова А.А., Kubicek V., Салькева Л.К., Ибраев М.К., Сейдахметова Р.Б.

Синтез и исследование биологической активности 1,3-бис(4-фенилтиазол-2-ил)-2,4-
бис(N,N-диэтиламино)-1,3-дiazо-2,4-дифосфетидина.....353

Жумабек М., Тунгатарова С.А., Мурзин Д.Ю., Байжуманова Т.С.

Структурные и каталитические свойства Co–Al–Mg–Mn катализаторов, приготовленных
методом SCS, для сухого риформинга метана.....383

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 2.
Number 358 (2026), 119–133

<https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.441>

UDC: 524.834
IRSTI: 29.05.45

©Ualikhanova U.A.^{1*}, Kurban Y.Y.¹, Syzdykova A.M.¹, Altayeva G.S.²,
Altaibayeva A.B.¹, 2026.

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan;

²Shokan Ualikhanov Kokshetau University, Kokshetau, Kazakhstan.

E-mail:ulbossyn.ualikhanova@gmail.com

BREAKING THE DEGENERACY BETWEEN METRIC AND TELEPARALLEL GRAVITY THEORIES THROUGH MULTI-MESSENGER GRAVITATIONAL-WAVE ASTRONOMY

Ualikhanova Ulbossyn — PhD, Senior Lecturer, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,

E-mail: ulbossyn.ualikhanova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2351-0658>;

Kurban Yermakhan — Master's student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,

E-mail: kuermahan@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-6639-0437>;

Syzdykova Arailym — PhD student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,

E-mail: syzdykovarailym@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8999-6566>;

Altayeva Gulsinay — Master, Senior Lecturer, Shokan Ualikhanov Kokshetau University, Kokshetau, Kazakhstan,

E-mail: gulsinay.altayeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2611-7413>;

Altaibayeva Aziza — PhD, Associate Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,

E-mail: aziza.ltaibayeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9254-7027>.

Abstract. The physical origin of dark energy, as well as the increasing Hubble tension between the local and the early cosmic microwave background expansion rates of the universe, have motivated the development of alternative gravity theories. However, discerning among these models has proved to be a challenging task. While standard extensions of general relativity by means of metric modifications (e.g., $f(R)$ gravity) and their teleparallel analogs (e.g., $f(T)$ gravity) may appear structurally similar in terms of background cosmological evolution, they show an incredible degree of degeneracy. Since they can be fine-tuned to predict identical cosmic kinematics, using expansion measurements will leave us unable to know whether cosmic acceleration is driven by space-time curvature R or torsion T . In this paper, we show that this mathematical degeneracy can be explicitly broken when investigating the

dynamics of cosmic structures, that is, in the case of linear cosmological perturbations. We analytically prove that although both theories predict the existence of a modified gravitational friction term $\alpha_M \neq 0$, their polarization, which affects the propagation of primordial gravitational waves throughout the universe, they lead to different polarization spectra. The structural differences between curvature-induced fields and torsion-induced ones alter the amplitude and phase of individual polarization modes in distinct ways during the perturbative regime. Consequently, we propose a definitive observational test for future space-based gravitational wave interferometers. By measuring the polarization of gravitational waves, binary compact object mergers with known distances, these instruments can isolate these subtle asymmetric signatures. This approach offers a clean, model-independent breakthrough capable of bypassing historical mathematical degeneracies and unambiguously determining the true geometric nature of our space-time.

Keywords: dark energy, $f(R)$ gravity, $f(T)$ gravity, teleparallel gravity, gravitational waves, space-time geometry

Financing. *This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP26101851).*

For citations: Ualikhanova U.A., Kurban Y.Y., Syzdykova A.M., Altayeva G.S., Altaibayeva A.B. *Breaking the Degeneracy between Metric and Teleparallel Gravity Theories through Multi-Messenger Gravitational-Wave Astronomy. Academic Journal of Physical and Chemical Sciences.* 2026. No.2. Pp. 119–133. DOI: <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.441>

©Уалиханова У.А.^{1*}, Құрбан Е.Е.¹, Сыздыкова А.М.¹, Алтаева Г.С.²,
Алтайбаева А.Б.¹, 2026.

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан;

²Ш. Уәлиханов атындағы Көкшетау университеті, Көкшетау, Қазақстан.

E-mail: ulbossyn.ualikhanova@gmail.com

КӨП АРНАЛЫ ГРАВИТАЦИЯЛЫҚ-ТОЛҚЫНДЫҚ АСТРОНОМИЯ АРҚЫЛЫ МЕТРИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ТЕЛЕПАРАЛЛЕЛЬДІ ГРАВИТАЦИЯ ТЕОРИЯЛАРЫНЫҢ АЙЫРМАШЫЛЫҒЫН ЗЕРТТЕУ

Уалиханова Улбосын — PhD, аға оқытушы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан,

E-mail: ulbossyn.ualikhanova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2351-0658>;

Құрбан Ермахан — магистрант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан,

E-mail: kuermahan@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-6639-0437>;

Сыздыкова Арайлым — PhD докторант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан,

E-mail: syzdykovarailym@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8999-6566>;



Алтаева Гүлсинай — магистр, аға оқытушы, Ш. Уәлиханов атындағы Көкшетау университеті, Көкшетау, Қазақстан,

E-mail: gulsinay.altayeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2611-7413>;

Алтайбаева Азиза — PhD, қауымдастырылған профессор, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан,

E-mail: aziza.ltaibayeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9254-7027>.

Аннотация. Күңгірт энергияның физикалық шығу тегі, сондай-ақ ғаламның жергілікті және ерте ғарыштық микротолқынды фон кеңею жылдамдықтары арасындағы Хаббл шиеленісінің артуы балама гравитация теорияларының дамуына түрткі болды. Дегенмен, бұл модельдерді ажырату қиын міндет болып шықты. Метрикалық модификациялар (мысалы, $f(R)$ гравитация) және олардың телепараллель аналогтары (мысалы, $f(T)$ гравитация) арқылы жалпы салыстырмалылықтың стандартты кеңейтімдері фондық космологиялық эволюция тұрғысынан құрылымдық жағынан ұқсас болып көрінуі мүмкін болса да, олар жоғары дәрежедегі дегенерацияны көрсетеді. Оларды бірдей ғарыштық кинематиканы болжау үшін дәл баптауға болатындықтан, кеңею өлшемдерін пайдалану бізге ғарыштық үдеудің кеңістік-уақыт қисығымен R немесе бұралумен T байланысты екенін білуге мүмкіндік бермейді. Бұл мақалада біз ғарыштық құрылымдардың динамикасын зерттеген кезде, яғни сызықтық космологиялық ауытқулар жағдайында бұл математикалық дегенерацияны анық түрде бұзуға болатынын көрсетеміз. Біз екі теория да ғалам бойынша алғашқы гравитациялық толқындардың таралуына әсер ететін $\alpha_M \neq 0$ модификацияланған гравитациялық үйкеліс терминінің бар екенін болжағанымен, олар әртүрлі поляризация спектрлеріне әкелетінін аналитикалық түрде дәлелдейміз. Қисықтық тудыратын өрістер мен бұралу тудыратын өрістер арасындағы құрылымдық айырмашылықтар пертурбативті режим кезінде жеке поляризация режимдерінің амплитудасы мен фазасын әртүрлі жолдармен өзгертеді.

Демек, біз болашақ кеңістіктік гравитациялық толқын интерферометрлері үшін нақты бақылау сынағын ұсынамыз. Гравитациялық толқындардың поляризациясын өлшеу арқылы, белгілі қашықтықтағы екілік компакт нысандардың бірігуі арқылы, бұл құралдар осы нәзік асимметриялық қолтаңбаларды бөліп ала алады. Бұл тәсіл тарихи математикалық дегенерацияларды айналып өтіп, кеңістік-уақыт матасының шынайы геометриялық табиғатын бізмәнді түрде анықтауға қабілетті таза, модельге тәуелсіз серпіліс ұсынады.

Түйін сөздер: күңгірт энергия, $f(R)$ гравитациясы, $f(T)$ гравитациясы, телепараллель гравитация, гравитациялық толқындар, кеңістік-уақыт геометриясы

©Уалиханова У.А.^{1*}, Курбан Е.Е.¹, Сыздыкова А.М.¹, Алтаева Г.С.²,
Алтайбаева А.Б.¹, 2026.

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
Астана, Казахстан;

²Кокшетауский университета имени Ш.Уалиханова, Кокшетау, Казахстан.
E-mail: ulbossyn.ualikhanova@gmail.com

РАЗРЕШЕНИЕ ВЫРОЖДЕНИЯ МЕТРИЧЕСКИХ И ТЕЛЕПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТЕОРИЙ ГРАВИТАЦИИ ПОСРЕДСТВОМ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВОЙ АСТРОНОМИИ

Уалиханова Улбосын — PhD, старший преподаватель, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,

E-mail: ulbossyn.ualikhanova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2351-0658>;

Курбан Ермахан — магистрант, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,

E-mail: kuermahan@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-6639-0437>;

Сыздыкова Арайлым — PhD докторант, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,

E-mail: syzdykovarailym@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8999-6566>;

Алтаева Гульсинай — магистр, старший преподаватель, Кокшетауский университет имени Ш. Уалиханова, Кокшетау, Казахстан,

E-mail: gulsinay.altayeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2611-7413>;

Алтайбаева Азиза — PhD, ассоциированный профессор, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,

E-mail: aziza.ltaibayeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9254-7027>.

Аннотация. Физическая природа тёмной энергии, а также возрастающая напряжённость Хаббла, выражающаяся в расхождении между локально измеряемой скоростью расширения Вселенной и значениями, полученными по данным раннего реликтового излучения, стимулировали развитие альтернативных теорий гравитации. Однако выбор между такими моделями остаётся сложной задачей. Стандартные расширения общей теории относительности, основанные на модификации метрического формализма, например $f(R)$ -гравитация, и их телепараллельные аналоги, такие как $f(T)$ -гравитация, могут демонстрировать сходную фоновую космологическую эволюцию, что приводит к высокой степени теоретического вырождения. Поскольку данные модели могут быть построены таким образом, чтобы предсказывать идентичную космическую кинематику, одних только измерений расширения Вселенной недостаточно для установления того, обусловлено ли космическое ускорение кривизной пространства-времени R или кручением T . В данной работе показано, что указанное математическое вырождение может быть устранено при анализе динамики космических структур, в частности в режиме линейных космологических возмущений. Аналитически показано, что, несмотря на наличие в обеих теориях модифицированного члена гравитационного трения $\alpha_M \neq 0$, влияющего на распространение первичных гравитационных волн во Вселенной, метрические и телепараллельные модели

приводят к различным спектрам поляризации. Структурные различия между полями, порождаемыми кривизной, и полями, связанными с кручением, по-разному изменяют амплитуду и фазу отдельных поляризационных мод в режиме возмущений. На этой основе предложен наблюдательный тест для будущих космических гравитационно-волновых интерферометров. Измерение поляризации гравитационных волн от слияний двойных компактных объектов с известными расстояниями позволит выявить тонкие асимметричные сигнатуры, характерные для различных геометрических описаний гравитации. Предложенный подход открывает возможность модельно-независимого различения метрических и телепараллельных теорий гравитации, преодоления их фонового космологического вырождения и уточнения геометрической природы пространства-времени.

Ключевые слова: тёмная энергия, $f(R)$ - гравитация, $f(T)$ - гравитация, телепараллельная гравитация, гравитационные волны, геометрия пространства-времени

Кіріспе. Қазіргі заманғы фундаменталды физика мен бақылаулық космология терең парадигмалық трансформация қарсаңында тұр. Соңғы онжылдықтар бойы Λ CDM (Лямбда-Салқын Күңгірт Материя) деп аталатын Стандартты космологиялық модель Әлемнің эволюциясын сипаттау үшін өте табысты теориялық іргетас қызметін атқарды. Альберт Эйнштейннің Жалпы салыстырмалық теориясына сүйенетін бұл модель бастапқы нуклеосинтезден бастап, реликті фондық сәулеленудің температуралық анизотропиясына, Әлемнің ірі масштабты құрылымының қалыптасуына және галактикалардың таралуына дейінгі бақылау деректерінің кең спектрін тамаша түсіндіреді. Алайда, осы көрнекті жетістіктерге қарамастан, Λ CDM моделі өз ішінде концептуалды осалдықтарды қамтиды (Nojiri, 2011, 2; Davies, 1980, 2; Riess, 1998, 3). Олардың ең бастысы — физикалық табиғаты белгісіз екі субстанцияны постулаттау қажеттілігі: бариондық емес салқын күңгірт материя және космологиялық Λ тұрақтысы арқылы сипатталатын күңгірт энергия. Әлемнің кейінгі эволюция сатыларында оның үдемелі ұлғаюіне жауапты күңгірт энергия теориялық физиканың ең үлкен жұмбағы болып табылады. Λ -ны кванттық өріс теориясы шеңберінде вакуум энергиясы ретінде түсіндіру әрекеттері байқалатын мәнмен ондаған шама ретіндегі апатты сәйкессіздікке әкеп соғады, бұл шешілмейтін дәл реттеу проблемасы ретінде белгілі (Dimopoulos, 2021, 3; Gamonal, 2021, 3).

Оның үстіне, соңғы жылдары бақылаулық космология бұрын-соңды болмаған дағдарысқа тап болды, бұл стандартты парадигманы қайта қарауды мәжбүрлік етеді. Мовасын "Хаббл кернеулігі" (H_0 tension) деп аталатын құбылыс — әртүрлі тәуелсіз әдістермен өлшенген Хаббл тұрақтысының мәндері арасындағы статистикалық маңызды сәйкессіздік. Цефеидтер мен Ia типті жаңа жұлдыздардың фотометриялық қашықтықтарын калибрлеуге негізделген жергілікті өлшеулер (атап айтқанда, SH0ES ынтымақтастығының деректері) $H_0 \approx 73 \text{ км/с/Мпк}$ мәнін береді (Capozziello, 2016, 3; Capozziello, 2008, 2). Сонымен бірге, Planck спутнигінің Λ CDM моделінің қатаң шеңберінде реликтік сәулеленуді талдау

негізінде алынған ерте Әлем деректерін экстраполяциялау едәуір аз мәнді болжайды: $H_0 \approx 67 \text{ км/с/Мпк}$. Бұл сәйкессіздік бүгінгі күні 5σ статистикалық маңыздылық деңгейіне жетті, бұл құбылысты аспаптар калибрлеудің қарапайым жүйелік қателерімен түсіндіру мүмкіндігін толығымен жоққа шығарады (Carozziello, 1996, 2). Бұл кернеулік Әлемнің ұлғаю жылдамдығын динамикалық түрде өзгерте отырып, жаңа физиканың кейінгі сатыларда ($z < 1$) іске қосылуы керек екенін айқын көрсетеді (Paliathanasis, 2019, 2).

Экзотикалық материялық субстанцияларды енгізудің табиғи және математикалық талғамды баламасы ретінде модификацияланған гравитация теориялары табылады. Егер ЖСТ макроскопиялық ғарыштық масштабтарда гравитациялық әсерлесудің түпкілікті теориясы болмаса, онда үдемелі ұлғаю құбылысы таза геометриялық әсерлермен түсіндірілуі мүмкін. Осы тұрғыда гравитацияның «геометриялық үштігі» деген іргелі тұжырымдамасы ерекше маңызға ие. Бұл тәсіл бойынша, гравитациялық әсерлесу математикалық тұрғыдан үш түрлі жолмен эквивалентті түрде сипатталуы мүмкін: ғарыш-уақыт қисықтығы арқылы (Левит-Чивита байланыстылығын қолданатын метрикалық гравитация), ғарыш-уақыт иірілуі арқылы (Витценбек байланыстылығына негізделген телепараллельдік гравитация) және неметриалық арқылы. Тарихи тұрғыдан ЖСТ-ның ең терең зерттелген кеңейтімі метрикалық $f(R)$ гравитациясы болып табылады, мұнда Эйнштейн-Гилберт классикалық әрекетіндегі Ричи қисықтық скаляры R одан алынған алгебралық функциямен алмастырылады. Алайда соңғы кездері ЖСТ-ның телепараллельдік эквиваленті және оның тікелей жалпыламасы — $f(T)$ гравитациясы орасан зор теориялық назар аударуда. $f(T)$ теориясының басты айырмашылығы — негізгі динамикалық айнымалы ретінде тетрада өрісі h_μ^a -ның ғарыштың нөлдік қисықтығында қолданылуында, бұл ретте бүкіл гравитациялық динамика иірілу скалярында T кодталған (Papagiannopoulos, 2018, 2).

Терең концептуалды айырмашылықтарға қарамастан, екі парадигма — метрикалық $f(R)$ және телепараллельдік $f(T)$ — кеңістіктік жазық Фридман-Робертсон-Уокер (FRW) метрикасының фондық деңгейінде феноменологиялық нашарлау мәселесіне белгілі бір дәрежеде ұшырауы мүмкін. Бұл теориялардың математикалық аппараты $f(R)$ немесе $f(T)$ функциялық пішінін алдын ала берілген кез келген фондық ғарыштық ұлғаю тарихын $H(z)$ өте жоғары дәлдікпен қайта шығаратындай етіп таңдауға мүмкіндік береді. Бұл ғарыштық қашықтықтардың интегралдық өлшемдеріне негізделген дәстүрлі тесттердің Әлемнің ірі масштабты құрылымын қисықтық пен иірілудің қайсысы басқаратыны туралы мәселені түбегейлі шеше алмайтынын білдіреді. Бұл кинематикалық нашарлауды қатаң түрде бұзу үшін пертурбативтік деңгейге көшу және жаңа астрофизикалық зондтарды тарту қажет (Cataneo, 2016, 3).

Астрофизиканың көп арналы астрономия дәуіріне енуі — қос нейтрон жұлдыздар жүйесінің бірігуінен GW170817 гравитациялық-толқындық сигналының және онымен бірге жүретін GRB 170817A гамма-шапшылымының эпохалды тіркелуімен белгіленді — бұл ғалымдарға гравитация негіздерін тестілеу үшін тамаша құрал берді. Гравитациялық толқындар метриканың тура қозғалыстары

болып табылады және оның ішкі динамикасы туралы бұрмаланбаған ақпаратты өз бойында алып жүреді. Модификацияланған гравитация теорияларында тензорлық қозғалыстардың таралуы эффективті Планк массасының эволюциясы есебінен модификацияланады. Бұл модификацияланған гравитациялық үйкеліс (α_M) құбылысын тудырады, ол гравитациялық толқын амплитудасының қосымша әлсіреуіне әкеп соғады. Соның салдарынан, LISA немесе Einstein Telescope сияқты детекторлармен өлшенетін гравитациялық-толқындық фотометриялық қашықтық d_L^{GW} электромагниттік қашықтықтан d_L^{EM} жүйелі түрде ауытқитын болады (Nojiri, 2011, 3).

Дегенмен, метрикалық және телепараллельдік гравитация арасындағы нашарлауды түпкілікті шешу үшін тек гравитациялық үйкелістің өзі жеткіліксіз. Бұл мақаланың орталық дәлелі гравитациялық сәулеленудің поляризациялық модаларының спектрін талдау болып табылады. ЖСТ тек екі тензорлық поляризацияның өмір сүруіне жол береді. Метрикалық $f(R)$ гравитациясына көшу өріс теңдеулерінің ретін төртінші ретке дейін арттырады, бұл жаңа скалярлық еркіндік дәрежесін тудырып, қосымша жаңа поляризацияны пайда етеді. Керісінше, телепараллельдік $f(T)$ гравитациясында дифференциалдық теңдеулер түбегейлі екінші ретті теңдеулер болып қалады, және теория скалярлық модаларды тудырмайды. Осылайша, біз гравитациялық үйкеліс әсерлері бір мезгілде анықталған жағдайда скалярлық поляризацияның болмауы біздің Өлеміміздің телепараллельдік сипаттамасының әділдігінің математикалық қатаң дәлелі ретінде қызмет ететінін көрсетеміз (Kumar, 2023, 2).

Мақалада келтірілген есептеулер мен физикалық тұжырымдарды қадағалауды жеңілдету үшін, төмендегі 1-кестеде негізгі шартты белгілер мен олардың сипаттамалары жүйеленіп көрсетілген.

Кесте 1. Негізгі космологиялық шартты белгілер және олардың физикалық сипаттамалары.

Шарт-ты белгі	Сипаттамасы (Анықтамасы)	Жұмыстағы физикалық мәні / рөлі
H_0	Хаббл тұрақтысы (H_0 tension)	Өртүрлі әдістермен өлшенген Ғаламның қазіргі кеңею жылдамдығы мәндерінің арасындағы қайшылықты сипаттайды.
$f(R)$	Метрикалық гравитация теориясы	Кеңістік-уақыттың қисықтығына негізделген жалпы салыстырмалылық теориясының (ЖСТ) кеңейтілген түрі.
$f(T)$	Телепараллельді гравитация теориясы	Кеңістік-уақыттың бұралуына негізделген баламалы гравитациялық модель.
α_M	Модификацияланған гравитациялық үйкеліс параметрі	Эффективті Планк массасының өзгеруінен туындайтын, гравитациялық толқын амплитудасын бәсеңдететін параметр.
h_{ij}	Метриканьң кіші тензорлық ауытқулары	Кеңістікте таралатын гравитациялық толқындардың математикалық сипаттамасы.
M_{Pl}^2	Эффективті Планк массасы	Модификацияланған гравитацияда уақыт бойынша динамикалық түрде өзгертін тиімді тартылыс тұрақтысы.
$a(t)$	Масштабтық фактор	Ғаламның уақыт бойынша геометриялық өлшемдерінің ұлғаюын (кеңеюін) сипаттайтын шама.
H	Хаббл параметрі $H = \dot{a}/a$	Ғаламның фондық деңгейдегі динамикалық кеңею жылдамдығын көрсетеді.

z	Қызыл ығысу	Космологиялық қашықтық пен уақыт масштабын өлшеуге арналған негізгі көрсеткіш.
d_L^{GW}	Гравитациялық-толқындық фотометриялық қашықтық	Гравитациялық толқын детекторлары (LISA, ET) арқылы сигнал амплитудасы негізінде өлшенетін қашықтық.
d_L^{EM}	Электромагниттік фотометриялық қашықтық	Жарық немесе басқа электромагниттік сәулелену көмегімен анықталатын стандартты космологиялық қашықтық.
h_b	"Тыныс алатын" (breathing) скалярлық поляризация	Тек $f(R)$ теориясына тән, кеңістіктің симметриялы радиалды созылуы мен сығылуын тудыратын қосымша мода.
h_+, h_x	«Қосу» және «айқас» тензорлық поляризациялары	ЖСТ пен барлық баламалы теорияларда кездесетін стандартты гравитациялық толқын поляризациялары.

Сондай-ақ, мәтінде кездесетін негізгі аббревиатуралар мен олардың физикалық сипаттамалары 2-кестеде көрсетілген.

Кесте 2. Мәтінде кездесетін негізгі қысқартулар мен аббревиатуралар тізімі.

Аббревиатура	Толық атауы (Түпнұсқа тілінде)	Қазақша баламасы / Физикалық мағынасы
ЖСТ	Жалпы салыстырмалылық теориясы	Альберт Эйнштейннің классикалық тартылыс күші теориясы.
Λ CDM	Lambda-Cold Dark Matter	Космологиялық константа мен суық күңгірт затты есепке алатын стандартты космологиялық модель.
CMB	Cosmic Microwave Background	Реликтілік сәулелену. Ғаламның ерте кезеңінен қалған фондық жылулық сәулелену.
FRW	Friedman-Robertson-Walker	Фридман-Робертсон-Уокер метрикасы. Кеңістігі тегіс және біртекті Ғаламды сипаттайтын стандартты метрика.
SH0ES	Supernovae and H_0 for the Equation of State of dark energy	Хаббл тұрақтысын цефеидтер мен Ia типті суперновалар арқылы локалды өлшейтін халықаралық зерттеу коллаборациясы.
GW	Gravitational Wave	Гравитациялық толқын. Массаның үдемелі қозғалысынан туындайтын кеңістік-уақыт метрикасының толқындары.
EM	Electromagnetic	Электромагниттік. Жарық спектріндегі (гамма-сәулелер, оптикалық және т.б.) бақылауларға қатысты сипаттама.
WKB	Wentzel-Kramers-Brillouin	ВКБ-жуықтауы. Кванттық механика мен толқындық физикада квазиклассикалық есептеулер жүргізуге арналған математикалық әдіс.
LISA	Laser Interferometer Space Antenna	Лазерлік интерферометриялық ғарыштық антенна. Гравитациялық толқындарды тіркеуге арналған ғарыштық интерферометр.
ET	Einstein Telescope	Эйнштейн телескопы. Гравитациялық толқындарды тіркеуге арналған келесі буынның жерүсті детекторы.

Зерттеу материалдары. Сәйкестікті бұзу үшін метриканың кіші тензорлық ауытқуларын h_{ij} көлденең ізсіз калибрлеуде ($\partial_i h_j^j = 0, h_i^i = 0$) енгіземіз. Модификацияланған гравитацияда гравитациялық толқынның таралуы эффективті Планк массасына M_*^2 тәуелді, ол уақыттың функциясына айналады (Qi, 2023, 2):

$$S^{(2)} \propto \int dt d^3x a^3 M_*^2 \left[\dot{h}_{ij}^2 - \frac{(\nabla h_{ij})^2}{a^2} \right], \quad (1)$$

мұнда $a(t)$ — масштабтық фактор.

Әдістері. Осы әрекетке Эйлер-Лагранж теңдеулерін қолданып, оны h_{ij} - бойынша вариациялаймыз:

$$\frac{d}{dt} (a^3 M_*^2 \dot{h}_{ij}) - a M_*^2 \nabla^2 h_{ij} = 0. \quad (2)$$

Уақыт бойынша туындыны көбейтіндінің туындысы ретінде аша отырып, біздің алатынымыз:

$$(3a^2 \dot{a} M_*^2 + a^3 \dot{M}_*^2) \ddot{h}_{ij} + a^3 M_*^2 \ddot{h}_{ij} - a M_*^2 \nabla^2 h_{ij} = 0. \quad (3)$$

Теңдеуді $a^3 M_*^2$ - ге бөліп және Фурье-кеңістігіне көшіп ($\nabla^2 \rightarrow -k^2$), оны канондық түрге келтіреміз:

$$\ddot{h}_{ij} + \left(3 \frac{\dot{a}}{a} + \frac{\dot{M}_*^2}{M_*^2} \right) \dot{h}_{ij} + \frac{k^2}{a^2} h_{ij} = 0. \quad (4)$$

Хаббл параметрі $H = \dot{a}/a$ және өлшемсіз гравитациялық үйкеліс параметрі $\alpha_M = \frac{\dot{M}_*^2}{H M_*^2}$ енгізе отырып, гравитациялық толқындардың таралуының жалпыланған теңдеуін аламыз:

$$\ddot{h}_{ij} + 3H(1 + \alpha_M) \dot{h}_{ij} + \frac{k^2}{a^2} h_{ij} = 0. \quad (5)$$

Гравитациялық толқындардың жылдамдығы жарық жылдамдығына тең болып қалады ($c_T = 1$), алайда $\alpha_M \neq 0$ болуы амплитуданың қосымша әлсіреуіне әкеп соғады.

Нәтижелер. Фотометриялық қашықтықтардың қатынасы. ВКБ-жуықтауы (WKB) шеңберінде толқын амплитудасы h кинетикалық мүше коэффициентінің түбіріне кері пропорционалды түрде әлсірейді:

$$h \propto \frac{1}{a\sqrt{M_*^2}}. \quad (6)$$

Фотометриялық қашықтық d_L өлшенетін амплитудаға кері пропорционал. Осыдан гравитациялық-толқындық қашықтықтың d_L^{GW} стандартты электромагниттік қашықтыққа қатынасы келесідей жазылады:

$$\frac{d_L^{GW}}{d_L^{EM}} = \frac{a\sqrt{M_*^2}}{a\sqrt{(M_*^2)_0}} = \sqrt{\frac{M_*^2}{(M_*^2)_0}}, \quad (7)$$

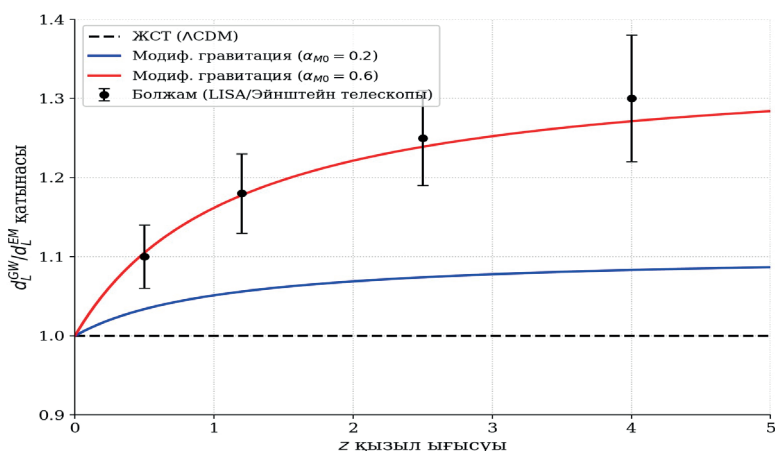
мұндағы 0 индексі $z = 0$ мәнді білдіреді. $\alpha_M = d(\ln M_*^2)/d(\ln a)$ анықтамасын $a = 1$ – ден a - ға дейін интегралдай отырып, келесідей теңдеу аламыз:

$$\ln \left(\frac{M_*^2}{(M_*^2)_0} \right) = \int_1^a \alpha_M d \ln a' \quad (8)$$

Қызыл ығысуға көшіп ($d \ln a = -dz/(1+z)$) және потенциалдап, соңғы қатынасты табамыз:

$$d_L^{GW}(z) = d_L^{EM}(z) \exp \left(\frac{1}{2} \int_0^z \frac{\alpha_M(z')}{1+z'} dz' \right). \quad (9)$$

Бұл құбылыс эффективті гравитациялық тұрақтының эволюциясын тікелей бақылау мүмкіндігін ашады. Әсер 1-суретте көрсетілген.



Сурет 1. Фотометриялық қашықтықтардың $\frac{d_L^{GW}}{d_L^{EM}}$ қызыл ығысуға z тәуелділігі. Нүктелі сызық ЖСТ (Λ CDM) болжамдарына сәйкес келеді, тұтас сызықтар — үйкеліс параметрінің α_M әртүрлі мәндері бар модификацияланған гравитация модельдері. Қателік жолақтары бар нүктелер LISA және Einstein Telescope детекторларының күтілетін сезімталдығын имитациялайды.

Талқылау. Бақылау аномалияларын талдау және түсіндіру. Біздің пертурбативтік талдауымыздың орталық элементі 1-сурет болып табылады, ол ғарыштық масштабтарда Жалпы салыстырмалылық теориясының негіздерін тексерудің түйінді бақылау критерийі болып саналады. Бұл графикте гравитациялық-толқындық фотометриялық қашықтықтың электромагниттік қашықтыққа қатынасының d_L^{GW}/d_L^{EM} қызыл ығысуға тәуелді эволюциясы көрсетілген. Осы қисықтардың артында тұрған физиканы түсіну бәсекелес геометриялық парадигмалар арасындағы нашарлауды бұзу үшін өте маңызды.

ЖСТ-ға негізделген стандартты ғарыштық модель (Λ CDM) шеңберінде гравитация тек ғарыш-уақыт қисықтығымен сипатталады, Планк массасы

өзгеріссіз қалады. Бұл координат жүйесінде гравитациялық толқындар мен фотондар бірдей таралады, тек Әлемнің адиабаттық ұлғаюы салдарынан әлсірейді. Математикалық тұрғыдан бұл екі қашықтық детерминациясының бірдей екендігімен көрінеді, ол графикте 1.0 деңгейіндегі қара нүктелі сызықпен көрсетілген. Осы көлденең сызықтан кез келген статистикалық маңызды ауытқу Эйнштейн теңдеулерімен сипатталмайтын «жаңа физиканың» болуын білдіреді.

Түсті қисықтар (көк және қызыл) гравитациялық үйкеліс параметрінің α_{MO} әртүрлі мәндерінде $f(R)$ және $f(T)$ сияқты модификацияланған гравитация теорияларының болжамдарына сәйкес келеді. Бұл қисықтардың z артқан сайын өсуі эффективті Планк массасының M_* динамикалық эволюциясының әсерін айқын көрсетеді. Кеңейтілген гравитация теорияларында ғарыш-уақыттың «тұтқырлығы» Әлемнің ұлғаюіне қарай өзгереді, бұл гравитациялық толқын амплитудасының қосымша әлсіреуіне әкеп соғады. Сигнал амплитудасы стандартты жағдайға қарағанда тезірек төмендейтіндіктен, детекторлармен тіркелетін d_L^{GW} қашықтығы жүйелі түрде асыра бағаланады. Осылайша, алыстағы объект бізге электромагниттік спектрге қарағанда гравитациялық спектрде «бұлыңғырырақ» болып көрінеді.

Теориялық қисықтардың үстіне салынған, LISA және Einstein Telescope сияқты болашақ интерферометрлердің өлшеулерін имитациялайтын деректер нүктелеріне ерекше назар аудару қажет. Қателіктердің тік жолақтары бар қара нүктелер «стандартты сиреналардың» — тіркелген электромагниттік аналогы бар қос нейтрон жұлдыздар жүйелерінің бірігу оқиғаларын тіркеу кезінде күтілетін статистикалық дәлдікті көрсетеді. Суреттен көрініп тұрғандай, келесі буын аспаптарының болжанатын сезімталдығы сенімділік аймақтары ЖСТ болжамдарының шегінен толығымен шығуына жеткілікті болады.

Демек, 1-сурет қосарлы функцияны орындайды. Біріншіден, ол тензорлық ауытқулардың абстрактілі математикалық формализмін тікелей эксперименттік тексеру жазықтығына көшіреді. Екіншіден, ол гравитация модификациясының кумулятивті сипатын көрсетеді: әсер үлкен ғарыштық қашықтықтарда анағұрлым айқын болады, бұл ГТ-астрономияның терең шолуларын күңгірт энергияның табиғатын зерттеудің таптырмас құралына айналдырады. Алайда, бұл тесттің ЖСТ-ны жоққа шығару қабілетіне қарамастан, ол модификацияның нақты нысаны (қисықтық немесе иірілу) туралы мәселені әлі де ашық қалдырады, бұл келесі бөлімде талқыланатын поляризациялық талдауды тартуды қажет етеді.

Поляризациялық модалар спектрі.

$d_L^{GW} \neq d_L^{EM}$ өлшемі ЖСТ-ны жоққа шығарады, бірақ $f(R)$ пен $f(T)$ -ні ажыратпайды. Дискриминатор ретінде теориялардың ішкі еркіндік дәрежелерінен туындайтын поляризациялық спектр шығады.

$f(R)$ гравитациясы үшін толық модификацияланған өріс теңдеулерін қарастырайық:

$$f_R R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} f g_{\mu\nu} - \nabla_\mu \nabla_\nu f_R + g_{\mu\nu} \square f_R = \kappa^2 T_{\mu\nu}^{(m)}, \quad (10)$$

мұндағы $f_R \equiv \partial f / \partial R$ Жасырын скалярлық еркіндік дәрежесін анықтау үшін осы теңдеудің ізін аламыз, оны кері метрика $g^{\mu\nu}$ арқылы жазамыз:

$$g^{\mu\nu} (f_R R_{\mu\nu}) = f_R R, \quad (11)$$

$$g^{\mu\nu} (-\frac{1}{2} f g_{\mu\nu}) = -2f, \quad (12)$$

$$g^{\mu\nu} (-\nabla_\mu \nabla_\nu f_R) = -\square f_R, \quad (13)$$

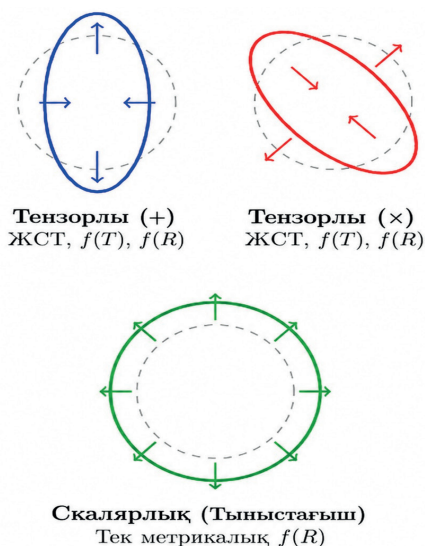
$$g^{\mu\nu} (g_{\mu\nu} \square f_R) = 4\square f_R. \quad (14)$$

Осы компоненттерді жинақтай отырып, жаңа скалярлық еркіндік дәрежесі (скалярон) үшін кинематикалық теңдеуді аламыз:

$$3\square f_R + f_R R - 2f = \kappa^2 T. \quad (15)$$

f_R - дің алдында Даламбер операторының $\square$ болуы қисықтықтың туындысының тәуелсіз массивтік скалярлық өріс ретінде таралатынын дәлелдейді. Бұл өрістің детекторлармен әсерлесуі қосымша поляризация h_b тудырады.

Телепараллельдік $f(T)$ гравитациясында қозғалыс теңдеулері екінші ретті болып қалады. Із алу салдары иірілу функцияларының алдында $\square$ операторының пайда болуына әкелмейді. Осылайша, негізгі $f(T)$ теориясы скалярлық модаларды қоздырмайды, тек стандартты тензорлық поляризациялар h_+ және $h_\times$ болжайды (2-сурет).



Сурет 2. Сынақ бөлшектер сақинасының әртүрлі поляризациялық модалар өткен кездегі деформациясының схематикалық бейнесі.

Қорытынды. Бұл жұмыста заманауи космологияның іргелі мәселесі — фондық ғарыштық ұлғаю деңгейіндегі гравитацияның балама теориялары арасындағы кинематикалық нашарлауды (дегенерацияны) жан-жақты теориялық зерттеу жүргізілді. Стандартты космологиялық модельдің (Λ CDM) өсіп келе жатқан дағдарысы, өзін ең айқын «Хаббл кернеулігі» H_0 tension) түрінде көрсетіп, Әлемнің кейінгі эволюция сатыларындағы динамикасы туралы түсініктерімізді қайта қарау қажеттілігін анық көрсетеді. Алайда, бұл мәселені модификацияланған гравитацияны енгізу арқылы шешу әрекеттері концептуалды кедергіге міндетті түрде тап болады: Жалпы салыстырмалық теориясының метрикалық кеңейтімдері (мысалы, ғарыш-уақыт қисықтығына негізделген $f(R)$ гравитациясы) және олардың телепараллельдік аналогтары (мысалы, абсолютті жазық кеңістіктегі иірілуге негізделген $f(T)$ гравитациясы) Хаббл параметрінің $H(z)$ бірдей ұлғаю тарихын математикалық тұрғыдан дәл қайта шығара алады. Бұл Ia типті жаңа жұлдыздар, бариондық акустикалық тербелістер және реликті сәулелену анизотропиясы сияқты дәстүрлі космологиялық зондтарды гравитациялық әсерлесудің шынайы геометриялық табиғатын ашу үшін түбегейлі жеткіліксіз етеді.

Біздің зерттеуіміздің басты нәтижесі көрсетілген феноменологиялық нашарлаудың фондық кинематикадан сызықтық ғарыштық ауытқулар динамикасына, атап айтқанда — гравитациялық толқындар физикасына көшу кезінде түпкілікті және қайтымсыз түрде жойылатынының қатаң аналитикалық дәлелі болып табылады. Астрофизиканың көп арналы астрономия дәуіріне енуі ғарыш-уақыт «матасын» тікелей тестілеу үшін бірегей терезені ашады.

Біріншіден, біз екі модификацияланған парадигманың — метрикалық және телепараллельдік — ғарыштық масштабтарда эффективті Планк массасының динамикалық эволюциясын болжайтынын көрсеттік. Бұл α_M параметрімен сипатталатын модификацияланған гравитациялық үйкеліс құбылысының пайда болуына әкеп соғады. Бұл үйкелістің болуы гравитациялық толқын амплитудасының кеңейіп жатқан Әлем арқылы таралу кезінде ЖСТ болжамдарынан өзгеше заңдылықпен әлсірейтінін білдіреді. Мұның салдары гравитациялық-толқындық фотометриялық қашықтық d_L^{GW} пен стандартты электромагниттік қашықтық d_L^{EM} арасындағы міндетті сәйкессіздік болып табылады. Келесі буын детекторларымен (LISA, Einstein Telescope немесе Cosmic Explorer) «стандартты сиреналар» (электромагниттік аналогы бар қос нейтрон жұлдыздар немесе қара құрдымдар) арқылы $d_L^{GW}/d_L^{EM} \neq 1$ қатынасын өлшеу инфрақызыл масштабтарда модификацияланған гравитацияның және ЖСТ-ның бұзылуының даусыз дәлелі қызметін атқарады.

Екіншіден, және бұл мақаланың орталық тұжырымы болып табылады, біз гравитациялық үйкеліс әсерінің өзі қисықтық пен иірілуді ажырата алмайтынын анықтадық. Шынайы дискриминатор (smoking gun) ретінде гравитациялық сәулеленудің поляризациялық спектрі шығады. Метрикалық $f(R)$ гравитациясы өріс теңдеулеріндегі жоғары (төртінші) туындылардың болуына байланысты қосымша скалярлық еркіндік дәрежесін — скаляронды міндетті түрде

тудырады. Бұл өрістің бақылаулық көрінісі үшінші, «тыныс алатын» (breathing) поляризациялық моданың козуы болып табылады, ол кеңістіктің симметриялық радиалды созылуын және қысылуын тудырады. Керісінше, телепараллельдік $f(T)$ гравитациясында иірілу скаляры тетрада өрісінің тек бірінші туындыларын қамтиды, соның арқасында қозғалыс тендеуі қатаң екінші ретті сақтайды. Соның салдарынан, негізгі $f(T)$ теориясы таралатын скалярлық модаларды қамтымайды және тек екі классикалық тензорлық поляризацияны («плюс» және «крест») болжайды.

Осы теориялық нәтижелерге сүйене отырып, біз болашақ бақылау миссиялары үшін қатаң екі сатылы алгоритмді тұжырымдаймыз. Егер келесі онжылдықтың интерферометрлері гравитациялық-толқындық сигналдың аномальді әлсіреуін тіркесе (бұл $\alpha_M \neq 0$ дәлелдейді), зерттеушілер көп детекторлы поляризациялық жауап талдауын жүргізулері қажет. «Тыныс алатын» мода анықталған жағдайда, Әлем Риман геометриясымен басқарылады және $f(R)$ парадигмасы өзінің эксперименттік расталуын алады. Алайда, егер гравитациялық сәулелену қатаң тензорлық болып шықса, біз метрикалық модификацияны математикалық түрде жоққа шығаруға мәжбүр боламыз. Мұндай бақылаулар комбинациясы Әлемнің ірі масштабты құрылымының іргелі негізі ғарыш-уақыттың қисықтығы емес, оның Абсолютті Параллелизм геометриясымен сипатталатын иірілуі екенінің дәлелі болады.

Кеңірек философиялық және теориялық тұрғыдан алғанда, бұл нәтижелер күңгірт энергия мәселесін шешу шеңберінен әлдеқайда асып түседі. Гравитацияның телепараллельдік табиғатының расталуы теориялық физиканың негізін түбегейлі қайта қарауды талап етеді. Иірілуі бар геометрия гравитацияны калибрлік теориялар тіліне (электромагнетизм мен ядролық күштерге ұқсас) — нақтырақ айтқанда, ғарыш-уақыт трансляциялар тобына қайта тұжырымдауға мүмкіндік беретін табиғи математикалық құрылымға ие. Бұл, өз кезегінде, жоғары ретті метрикалық тәсілдерге тән патологиялардан бос, кванттық гравитацияның эффективті теориясын (УФ-аяқталу) құруға жаңа, математикалық тұрғыдан сәйкес жолдар аша алады. Осылайша, алдағы онжылдықтардағы прецизионды гравитациялық-толқындық астрономия H_0 дағдарысын шешіп қана қоймай, сонымен қатар фундаменталды әсерлесулердің түпкілікті бірыңғай теориясын құрудың дұрыс жолын көрсете алады. Осы жұмыста ұсынылған феноменологиялық маркерлер болашақ революциялық ашылулар үшін теориялық негізді қалайды.

References

- Capozziello S. et al. (1996) Noether symmetries in cosmology. La Rivista del Nuovo Cimento (1978-1999). – Vol. 19. – P. 1-114. (in Eng).
- Capozziello S., Francaviglia M. (2008) Extended theories of gravity and their cosmological and astrophysical applications. General Relativity and Gravitation. – No. 40. – P. 357-420. (in Eng).
- Capozziello S., SJ G.G., Vernieri D. (2016) String duality transformations in $f(R)$ gravity from Noether symmetry approach. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. – Vol. 2016. – No. 01. – P. 015. (in Eng).

Cataneo M. et al. (2016) Cluster abundance in chameleon $f(R)$ gravity I: toward an accurate halo mass function prediction. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. – Vol. 2016. – No. 12. – P. 024. (in Eng).

Davies P.C.W. (1980) Quantum fields in curved space. *General Relativity and Gravitation*. Vol. 1. One hundred years after the birth of Albert Einstein. Edited by A. Held. New York. – Vol. 1. – P. 255. (in Eng).

Dimopoulos K., Sánchez López S. (2021) Quintessential inflation in Palatini $f(R)$ gravity. *Physical Review D*. – Vol. 103. – No. 4. – P. 043533. (in Eng).

Gamonal M. (2021) Slow-roll inflation in $f(R, T)$ gravity and a modified Starobinsky-like inflationary model. *Physics of the Dark Universe*. – Vol. 31. – P. 100768. (in Eng).

Hohmann M., Järv L., Ualikhanova U. (2017) Dynamical systems approach and generic properties of $f(T)$ cosmology. *Physical Review D*. – Vol. 96. – No. 4. – P. 043508. (in Eng).

Kumar S. et al. (2023) New late-time constraints on $f(R)$ gravity. *Physics of the Dark Universe*. – Vol. 42. – P. 101281. (in Eng).

Nojiri S., Odintsov S.D. (2011) Unified cosmic history in modified gravity: from $F(R)$ theory to Lorentz non-invariant models. *Physics Reports*. – Vol. 505. – No. 2-4. – P. 59-144. (in Eng).

Nojiri S., Odintsov S.D. (2011) Unified cosmic history in modified gravity: from $F(R)$ theory to Lorentz non-invariant models. *Physics Reports*. – Vol. 505. – No. 2-4. – P. 59-144. (in Eng).

Paliathanasis A. (2019) Similarity solutions for the Wheeler–Dewitt equation in $f(R)$ -cosmology. *The European Physical Journal C*. – Vol. 79. – No. 12. – P. 1031. (in Eng).

Papagiannopoulos G. et al. (2018) New integrable models and analytical solutions in $f(R)$ cosmology with an ideal gas. *Physical Review D*. – Vol. 97. – No. 2. – P. 024026. (in Eng).

Qi Y. et al. (2023) The late-time dynamics of $F(R)$ gravity dark energy model. *Physics of the Dark Universe*. – Vol. 40. – P. 101180. (in Eng).

Riess A.G. et al. (1998) Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant. *The astronomical journal*. – Vol. 116. – No. 3. – P. 1009. (in Eng).

Publication Ethics and Publication Malpractice in the journals of the «Central Asian Academic Research Center» LLP (Almaty)

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 National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the work described 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 National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan 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 originality detection service Cross Check <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 National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Requirements for articles design for publication in the journal are available on the websites:

www.nauka-nanrk.kz

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

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

Managing Editor: T. Apendiev
Editors: D.S. Alenov, A. Shormakova
Computer layout: G.D. Zhadyranova

Signed for print: June 22, 2026
Format: 70×90 1/16. 24.5 printed sheets. Order No. 2.

*«Central Asian Academic Research Center» LLP
Almaty, Shevchenko Street, 28*