

О редакторе тематического блока члене-корреспонденте РАН профессоре Андрее Николаевиче Морозове



- *Заведующий кафедрой физики Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (МГТУ имени Н.Э. Баумана)*
- *Head of the Physics Department of the Bauman Moscow State Technical University (Bauman MSTU)*
- *Генеральный директор Центра прикладной физики МГТУ имени Н.Э. Баумана*
- *CEO of the Bauman Moscow State Technical University Center for Applied Physics*
- *Член Научного совета при Совете Безопасности Российской Федерации*
- *Member of the Scientific Council of the Security Council of the Russian Federation*
- *Член экспертного совета по физике Высшей аттестационной комиссии*
- *Member of the Expert Council on Physics of the Higher Attestation Commission*
- *Член совета по приоритетному направлению Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации «Противодействие техногенным, биогенным, социокультурным угрозам, терроризму и идеологическому экстремизму, а также киберугрозам и иным источникам опасности для общества, экономики и государства»*
- *Member of the Council for the priority direction of the Strategy of Scientific and Technological Development of the Russian Federation “Counteraction to Technological, Biogenic, Social, and Cultural Threats, Terrorism and Ideological Extremism, as well as Cyber Threats and Other Sources of Hazard to Society, Economy and the State”*
- *Член Президиума Московского физического общества*
- *Member of the Bureau of the Moscow Physical Society*
- *Главный редактор журнала Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана, серии «Естественные науки»*
- *Editor-in-Chief of the Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University, “Natural Sciences” series*

- | | |
|--|---|
| • <i>Председатель оргкомитета Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике»</i> | • <i>Chairman of the Organizing Committee of the All-Russian Conference “Irreversible Processes in Nature and Technics”</i> |
| Государственные награды, звания и премии | Honours and awards |
| • <i>Благодарственное письмо Президента Российской Федерации (2024)</i> | • <i>Letter of Appreciation of President of the Russian Federation (2024)</i> |
| • <i>Медаль «300 лет Российской академии наук» (2024)</i> | • <i>“300 Years of the Russian Academy of Sciences” medal (2024)</i> |
| • <i>Почетный знак имени К.Э. Циолковского (2020)</i> | • <i>Honorary Badge named after K.E. Tsiolkovsky (2020)</i> |
| • <i>Лауреат премии имени С.И. Мосина (2019)</i> | • <i>Winner of the S.I. Mosin Prize (2019)</i> |
| • <i>Медаль имени С.П. Королева (2009)</i> | • <i>S.P. Korolev Medal (2009)</i> |
| • <i>Почетное звание «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации» (2005)</i> | • <i>Honorary title of the Honored Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation (2005)</i> |
| • <i>Лауреат премий имени А. Чижевского (2004)</i> | • <i>Winner of A. Chizhevsky Prize (2004)</i> |

Андрей Николаевич Морозов родился в городе Москве в 1959 г. В 1982 г. окончил Московское высшее техническое училище имени Н.Э. Баумана по специальности «Производство летательных аппаратов». После окончания аспирантуры кафедры физики защиты в 1987 г. кандидатскую диссертацию по теоретической механике, а в 1994 г. – докторскую по специальности «Применение вычислительной техники, математических методов и математического моделирования в научных исследованиях». С 1998 г. А.Н. Морозов является заведующим кафедрой физики, а с 1991 г. – генеральным директором Центра прикладной физики МГТУ им. Н.Э. Баумана. В период с 2015 г. по 2020 г. работал заместителем директора по научной работе Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН.

А.Н. Морозов известный ученый, автор 10 монографий, более 330 научных статей и 31 изобретения. Основные его научные работы посвящены разработке теории и созданию систем пассивной и активной оптической локализации химических соединений в

открытой атмосфере и на подстилающих поверхностях; опто-электронных информационно-измерительных систем, включая гравитационные антенны; разработке теории немарковских физических процессов; создания теории связанных гравитационных волн.

А.Н. Морозовым предложены и научно обоснованы методы оптической локализации химических соединений. Он является главным конструктором серии информационно-измерительных комплексов и приборов химической разведки и мониторинга, принятых на снабжение Министерством обороны Российской Федерации и на вооружение Федеральной службы безопасности России. Разработанные изделия позволили решить проблему обеспечения Вооруженных сил и специальных служб средствами оперативного дистанционного контроля и разведки для предотвращения угроз применения токсичных химикатов.

Под непосредственным руководством А.Н. Морозова выполнен цикл работ по разработке новых информационно-измерительных приборов и комплексов на основе дифференциального поглощения, комбинационного рассеяния света и люминесценции. Создана теория и проведен расчет явления собственного фонового излучения в фурье-спектрорадиометрах. Разработана и апробирована математическая модель большебазного свободномассового интерферометра Фабри – Перо, учитывающая давление света на зеркала резонатора. Установлены явление нелинейной генерации высокочастотного оптического шума в свободномассовом резонаторе Фабри – Перо и явление низкочастотного оптического резонанса в многолучевом

интерферометре Фабри – Перо. На основе проведенных исследований предложен гетеродинный метод регистрации гравитационных волн и обоснована лазерная интерференционная гравитационная антенна, использующая явление низкочастотного оптического резонанса. Предложено использование низкочастотного оптического резонанса для регистрации высокочастотных гравитационных волн реликтового происхождения.

А.Н. Морозовым разработан метод описания немарковских случайных процессов, задаваемых линейным интегральным преобразованием, и проведено описание кинетических процессов в конденсированных средах с помощью интегральных стохастических уравнений. Разработана теория немарков-

ских физических процессов, которая использована для описания физических явлений с долговременной памятью.

А.Н. Морозов совместно с академиком Владиславом Ивановичем Пустовойтом теоретически предсказали новый класс связанных гравитационных волн и установили их свойства; в частности, было показано, что скорость связанных гравитационных волн в газах меньше скорости света в пустоте и равна скорости света в диэлектрической среде.

About the Editor of the Themed Section RAS Corresponding Member Professor Andrey N. Morozov

Andrey Nikolaevich Morozov was born in Moscow in 1959. In 1982, he graduated from Bauman Moscow Higher Technical School with a degree in aircraft manufacturing. After completing postgraduate studies at the Department of Physics, he defended his PhD thesis on theoretical mechanics in 1987 and his doctoral thesis on the application of computer science, mathematical methods and mathematical modeling in scientific research in 1994. He has been Head of the Physics Department since 1998, and General Director of the Center for Applied Physics at Bauman Moscow State Technical University since 1991. From 2015 to 2020, he worked as Deputy Director for Research at the Scientific and Technological Center for Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences.

A.N. Morozov is a well-known scientist and the author of 10 monographs, more than 330 scientific articles and 31 inventions. His main scientific works are devoted to the development of theory and creation of systems of passive and active optical location of chemical compounds in the open atmosphere and on underlying surfaces; optoelectronic information-measuring systems, including gravitational antennas; development of the theory of non-Markovian physical processes; and the creation of the theory of coupled gravitational waves.

Andrey N. Morozov proposed and scientifically substantiated methods of optical location of chemical compounds. He is the chief designer of a series of information-measuring complexes and chemical reconnaissance and monitoring devices adopted for supply by the Ministry of Defense of the Russian Federation and in service with the Federal Security Service of Russia. These developed products made it possible to provide the Armed Forces and special services with means of operational remote control and reconnaissance to prevent threats of toxic chemicals.

He performed a cycle of works on development of new information-measuring devices and complexes on the basis of differential absorption, Raman scattering of light

and luminescence. The theory and calculation of the phenomenon of intrinsic background radiation in Fourier spectroradiometers are created by him. He developed and tested a mathematical model of a large-base free-mass Fabry – Pérot interferometer, which takes into account the pressure of light on the resonator mirrors; established the phenomenon of nonlinear generation of high-frequency optical noise in a free Fabry – Pérot mass resonator and the phenomenon of low-frequency optical resonance in a multipath Fabry – Pérot interferometer; with the basis of the conducted research, substantiated a heterodyne method for registering gravitational waves is proposed and a laser interference gravitational antenna using the phenomenon of low-frequency optical resonance; and proposed the use of low-frequency optical resonance for registration of high-frequency gravitational waves of relic origin.

He developed a method for describing non-Markovian random processes defined by a linear integral transformation, and described kinetic processes in condensed media using integral stochastic equations. The theory of non-Markovian physical processes, used to describe physical phenomena with long-term memory, has also been developed by him.

Together with RAS Academician Vladislav Ivanovich Pustovoit he theoretically predicted a new class of coupled gravitational waves and

established their properties, in particular, showing that the velocity of coupled gravitational waves in gases is less than the speed of light in the void and equal to the speed of light in a dielectric medium.

Аннотация к тематическому блоку

А.Н. Морозов

Инициатором проведения междисциплинарных исследований по теме «Фундаментальные проблемы гравитационно-волновой астрономии и гравиметрии» являлся академик РАН В.Я. Панченко, в то время – председатель совета РФФИ. Инициатива была поддержана академиком РАН В.И. Пустовойтом и академиком РАН А.М. Черепашуком.

В рамках проведенных исследований выполнялись работы по двум направлениям: создания научных основ для реализации отечественных установок по регистрации гравитационных волн и разработки современных высокоточных гравиметров.

Гравитационное излучение было предсказано А. Эйнштейном в общей теории относительности. Первые обнаружения гравитационных волн были выполнены посредством наземных лазерных интерферометров LIGO и VIRGO, что позволило сделать вывод о появлении нового инструмента для прецизионных измерений в области астрофизики и космологии.

Эти волны интенсивно излучаются компактными и массивными астрофизическими объектами, например, при столкновении черных дыр или нейтронных звезд, когда, как правило, нет электромагнитного излучения. Гравитационные волны слабо взаимодействуют с веществом, меньше поглощаются, чем электромагнитное излучение, и поэтому несут информацию о взаимодействии массивных объектов и процессах внутри них.

Современные наземные детекторы, которые имеют максимальную чувствительность в диапазоне частот от 10 Гц до 1 кГц, обеспечили первые обнаружения гравитационных волн.

Проектируемый космический лазерный интерферометр LISA рассчитан на диапазон частот 0.1–10 мГц, ориентируясь, преимущественно, на двойные черные дыры и белые карлики.

В мире на сегодняшний день реализуется несколько проектов поиска гравитационных волн, такие как проекты LIGO (США), VIRGO (Италия, Франция), TAMA-300 (Япония), GEO 600 (Германия) и др. Основной их особенностью является попытка регистрации коротких всплесков гравитационных волн астрофизического происхождения от достаточно редких событий, таких как слияние черной дыры или нейтронных звезд.

Разработка проектов и пуск в действие гравитационно-волновых антенн преследует цель создания нового, неэлектромагнитного, канала получения информации об окружающем мире.

Принцип использования пары свободных масс-зеркал и лазерного интерферометра для регистрации их малых колебаний, вызванных гравитационной волной, был впервые предложен академиком В.И. Пустовойтом и профессором М.Е. Герценштейном в 1962 г. В 1970-х годах в США идея использования лазерных интерферометров была обоснована в работах Р. Форварда и Р. Вайса (R. Forward, R. Weiss) с сотрудниками.

Строительство лазерных интерференционных гравитационных антенн, обладающих базой порядка нескольких километров и высокой чувствительностью, осуществлено в ряде зарубежных научных центров. Они реализованы по схеме интерферометра Майкельсона, плечи которого содержат резонаторы Фабри – Перо. Такая схема построения гравитационной антенны имеет ряд преимуществ, в частности, возможность точной настройки и юстировки, и одновременно позволяет получить очень высокую чувствительность по отношению к деформациям пространства, вызванным прохождением гравитационных волн.

Для снижения влияния вибраций и шумовых факторов сейсмического происхождения зеркала резонатора Фабри – Перо устанавливают на пробных массах, слабо связанных с основанием, что приводит к проявлению новых более тонких эффектов, например, вызванных давлением лазерного излучения на зеркала интерферометра.

Современные исследования в области создания нового поколения лазерных интерференционных гравитационных антенн направлены на повышение их чувствительности и надежности. Исследуются фундаментальные шумы, включая квантовые, тепловые эффекты, отражение и распростра-

нение оптического излучения в периодических структурах зеркал интерферометра. Разрабатываются предложения по использованию гравитационных антенн, работающих в высокочастотной части спектра, в частности, предназначенных для регистрации реликтовых гравитационных волн. Оценивается возможность создания высокоточной космической лазерной гравитационно-волновой антенны на основе группировки спутников Земли. Перспективными представляются работы по регистрации источников гравитационных волн по результатам многоволновых наблюдений в широком диапазоне электромагнитного излучения и по регистрации высокоэнергичных нейтрино.

Широким фронтом проводятся исследования возможности создания высокоточных квантовых гравиметров и градиентометров с использованием холодных атомов и технологии атомного чипа. Выполнялись работы по созданию сети высокостабильных стандартов частоты и времени в интересах обеспечения навигации по гравитационному полю Земли и созданию космической группировки нового поколения для измерения гравитационного поля Земли с высоким пространственным и временным разрешением.

Предлагаемый вниманию читателей выпуск журнала «Вестник РФФИ» посвящен результатам проектов ученых – победителей конкурса Российского фонда фундаментальных исследований на лучшие научные проекты междисциплинарных фундаментальных исследований по исследованию проблем регистрации гравитационных волн и гравиметрии. В текущий выпуск вошли пять оригинальных статей, подготовленных по данным многолетних исследований и разработок. Все авторы статей, включенных в тематический блок журнала, – участники инициативных проектов, поддерживаемых Российским фондом фундаментальных исследований.

В статье В.О. Гладышева, И.В. Фомина, Ил.С. Голяка, А.Л. Назолина, П.П. Демкина, В.Л. Кауца, А.А. Есакова и С.Е. Табалина «Оптический метод регистрации высокочастотных гравитационных волн» обсуждаются методы и предлагаются технические решения, которые позволят регистрировать высокочастотные гравитационные волны с необходимой чувствительностью. Проанализированы типы космологических и астрофизических источников, генерирующих такие гравитационные волны. Определены основные характеристики высокочастотных реликтовых гравитационных волн и показана возможность их регистрации посредством гравитационно-оптического резонанса в интерферометрах Фабри – Перо. Создан физический макет комплекса для регистрации высокочастотных гравитационных волн и показано возможность при реализации предложенной методики нахождения корреляции сигналов с нескольких гравитационно-волновых антенн проводить верификацию различных классов космологических моделей.

Проблеме миниатюризации гравитационных антенн посвящена статья Н.И. Петрова и В.И. Пустовойта «Малогабаритный интерферометр с резонаторами Фабри – Перо

для обнаружения гравитационных волн». Основная идея заключается в использовании в качестве зеркал резонатора Фабри – Перо отражающие периодические структуры, имеющие экспоненциально узкую полосу пропускания лазерного излучения. Теоретически показано, что такой резонатор Фабри – Перо позволяет при лабораторных размерах установки получить чувствительность по отношению к гравитационным возмущениям, сопоставимую с чувствительностью установок LIGO и VIRGO. Также предложен метод, при котором осуществляется измерение корреляционной функции интенсивностей резонансных мод ненулевого порядка с двух плеч интерферометра Маха – Цандера, что позволяет существенно повысить разрешение гравитационной антенны.

Принципиально важный вопрос повышения чувствительности лазерных интерференционных гравитационных антенн рассмотрен в статье А.В. Андрианова «Повышение чувствительности интерферометрических измерений с использованием сжатого света». Исследованы свойства квантового сжатого света, который генерируется при распространении оптических импульсов в среде с кубической (керровской) нелинейностью. Экспериментально показана возможность повышения чувствительности гравитационной антенны на 4 дБ лучше уровня дробового шума. Использование керровских сред для генерации сжатого света заметно упрощает выбор нелинейных материалов и длин волн, в частности, появляется возможность перехода в диапазон длин волн 1.5 мкм и более, который представляется наиболее перспективным для новых гравитационных антенн с зеркалами на кремниевой основе.

Работа И.А. Биленко, С.П. Вятчина, В.П. Митрофанова, С.Е. Стрыгина и Ф.Я. Халили «Фундаментальные шумы и пределы чувствительности интерферометрических детек-

торов гравитационных волн нового поколения» направлена на развитие методов повышения чувствительности интерферометрических детекторов гравитационных волн нового поколения. Большое внимание в статье уделено анализу квантовых пределов чувствительности и разработке методов их преодоления в лазерных интерферометрах. Проведено исследование схем квантовых измерений малых смещений на основе двух видов связи: дисперсионной и диссипативной. Показана возможность подавления эффекта параметрической колебательной неустойчивости, возникающей при больших мощностях оптической накачки. Полученные результаты, помимо применения в гравитационных антеннах, имеют большое значение для создания прецизионных измерительных систем в других областях, в частности, в микро- и наноэлектромеханических и оптомеханических системах.

Результаты экспериментальных исследований с помощью оптоакустической гравитационной антенны изложены в статье В.Н. Руденко, А.В. Гусева, Н.Л. Квашнина, С.М. По-

пова и С.И. Орешкина «Поиск гравитационных сигналов коллапсирующих объектов в Галактике». Уникальность гравитационно-волновой оптоакустической антенны заключается в том, что с ее помощью удастся измерять высокочастотные, килогерцовые, вариации гравитационного градиента, которые могут иметь как астрофизическое, так и геофизическое происхождение. Среди полученных оригинальных результатов работы необходимо отметить измерения низкочастотных вариаций гравитационного градиента на интерферометре VIRGO, а также измерение сейсмогравитационных шумов в главной штольне Баксанской нейтринной обсерватории и разработку алгоритма поиска нейтрино-гравитационных корреляций с помощью гравитационного детектора и нейтронного телескопа.

Важность проведенных фундаментальных исследований в областях разработки методов и технических средств регистрации гравитационных волн и прецизионной гравиметрии в рамках конкурса Российского фонда фундаментальных исследований показала возможности и потенциал российских научных коллективов. Дальнейшее развитие этих направлений в нашей стране представляется абсолютно необходимым как с точки зрения фундаментальной науки, так и в рамках прикладных применений разработанных элементов гравитационных антенн и гравиметров для решения задач создания передовых отечественных информационно-измерительных систем различного назначения.

Представленные работы отражают передовые достижения российских ученых в области исследования гравитационных волн, включая новые технические решения и, безусловно, будут интересны широкому кругу читателей.

Abstract of the Themed Section

A.N. Morozov

The initiator of interdisciplinary research on the topic *Fundamental problems of gravitational-wave astronomy and gravimetry* was Academician of the Russian Academy of Sciences V.Ya. Panchenko, at that time Chairman of the Council of the Russian Foundation for Basic Research. The initiative was supported by Academician of the Russian Academy of Sciences V.I. Pustovoit and Academician of the Russian Academy of Sciences A.M. Cherepashchuk.

Within the framework of the conducted research, work was carried out in two directions: creating the scientific basis necessary to implement the domestic installations for registration

of gravitational waves, and developing modern high-precision gravimeters.

Gravitational radiation was predicted by A. Einstein in the General Relativity Theory. Gravitational waves were first detected with the ground-based laser interferometers LIGO and VIRGO, which led to the conclusion that a new tool was thus developed for precision measurements in the field of astrophysics and cosmology.

These waves are intensely emitted by compact and massive astrophysical objects, such as colliding black holes or neutron stars, usually accompanied by no electromagnetic radiation. Gravitational waves interact weakly with matter, are less absorbed than electromagnetic radiation and, therefore, carry data on the interaction of massive objects and the processes within them.

Modern ground-based detectors, with a maximum sensitivity in the frequency range from 10 Hz to 1 kHz, provided the first detections of gravitational waves. The planned LISA space laser interferometer is designed for a frequency range of

The possibility of creating high-precision quantum gravimeters and gradiometers using cold atoms and atomic chip technology is being widely researched. Work has been carried out to create a network of highly stable frequency and

The article by N.I. Petrov and V.I. Pustovoit *Small-Sized Interferometer with Fabry – Pérot Resonators for Gravitational Wave Detection* is devoted to the problem of miniaturization of gravitational antennas. The basic idea

is to use reflecting periodic structures with exponentially narrow bandwidth of laser radiation as mirrors of the Fabry – Pérot resonator. Theoretically, it has been shown that such a Fabry – Pérot resonator makes it possible, with an installation that may fit in a laboratory, to obtain sensitivity to gravitational wave disturbances comparable to the sensitivity of the LIGO and VIRGO installations. A method is also proposed in which the correlation function of the intensities of nonzero resonant modes is measured from two arms of the Mach – Zehnder interferometer, which significantly increases the resolution of the gravitational antenna.

The fundamentally important issue of increasing the sensitivity of laser interference gravitational antennas is considered in the article by A.V. Andrianov *Quantum-Enhanced Interferometer Using Kerr Squeezing*. The properties of quantum compressed light, which is generated during the propagation of optical pulses in a medium with cubic (Kerr) nonlinearity, are investigated. The possibility of increasing the sensitivity of a gravitational antenna by 4 dB above the level of shot noise has been experimentally shown. The use of Kerr media to generate compressed light significantly simplifies the choice of nonlinear materials and wavelengths, in particular, it becomes possible to switch to a wavelength range of 1.5 microns or more, which seems to be the most promising for new gravitational antennas with silicon-based mirrors.

The work by I.A. Bilenko, S.P. Vyatchanin, V.P. Mitrofanov, S.E. Strygin, and F.Ya. Khalili *Fundamental Noise and Sensitivity Limits of New Generation Interferometric*

Gravitational Wave Detectors is aimed at developing methods to increase the sensitivity of interferometric gravitational wave detectors of a new generation. Much attention is paid to the analysis of quantum limits of sensitivity and the development of methods to overcome them in laser interferometers. The subjects of the study were quantum measurement schemes of small displacement based on two types of coupling, dispersive and dissipative. It is demonstrated the possibility to suppress the effect of parametric vibration instability arising at high optical pumping powers. The obtained results, in addition to their application in gravity antennas, are of great importance for the creation of precision measurement systems in other fields, in particular, in micro- and nano-electromechanical and optomechanical systems.

The results of experimental studies using an opto-acoustic gravitational antenna are presented in the article *Search for Gravitational Signals of Collapsing Objects in the Galaxy* by V.N. Rudenko, A.V. Gusev, N.L. Kvashnin, S.M. Popov, and S.I. Oreshkin. The uniqueness of the gravitational-wave opto-acoustic antenna lies in the fact that it can be used to measure high-frequency, kilohertz variations of the gravitational gradient, which may be of an astrophysical or a geophysical origin. Among the original results of the work, it is necessary to note the measurements of low-frequency variations of the gravitational gradient on the VIRGO interferometer, as well as the measurement of seismic-gravitational noise in the main adit of the Baksan Neutrino Observatory and the development of an algorithm for searching neutrino-gravitational correlations using a gravitational detector and a neutron telescope.

The vital fundamental research in the fields of development of methods and technical means of gravitational wave registration and precision gravimetry within the framework of the contest of the Russian Foundation for Basic Research showed the capabilities and potential of Russian scientific teams. Further development of these directions in our country seems absolutely necessary from the point of view of fundamental science as well as within the framework of applications of the developed elements of gravity antennas and gravimeters as solutions for creating advanced domestic information-measuring systems for various purposes.

The presented papers reflect the most advanced achievements in the field of gravitational waves investigation, including the novel technological solutions and, undoubtedly, will be of interest to a wide range of readers.