

## РЕГИСТРАЦИЯ РЕЛИКТОВЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН С ПОМОЩЬЮ НИЗКОЧАСТОТНОГО ОПТИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА

Ил.С. Голяк<sup>1</sup>

А.Н. Морозов<sup>2</sup>

И.В. Фомин<sup>2</sup>

iliyagol@bmstu.ru

amor@bmstu.ru

fomin\_iv@bmstu.ru

<sup>1</sup> АО «ЦПФ МГТУ им. Н.Э. Баумана», Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Обсуждается возможность существования высокочастотных гравитационных волн реликтового происхождения, для регистрации которых необходима разработка специализированных гравитационных антенн. Для этого предложено применять лазерные гравитационные антенны, основанные на явлении низкочастотного оптического резонанса. Выполнен расчет чувствительности интерферометра Фабри — Перо, использующего явление низкочастотного оптического резонанса. Получены формулы, описывающие прошедшее интерферометр Фабри — Перо излучение и спектральную плотность отклика на воздействие гравитационной волны. Показана возможность регистрации реликтовых гравитационных волн в высокочастотной части спектра и выполнена оценка предельной чувствительности лазерной гравитационной антенны. Установлено, что основным фактором, ограничивающим чувствительность лазерной гравитационной антенны, является фотонный шум. Для уменьшения вклада фотонного шума предложено существенно снизить мощность прошедшего интерферометр Фабри — Перо лазерного излучения, что удастся достичь при использовании низкочастотного оптического резонанса. Проведена оценка необходимой мощности прошедшего интерферометр излучения для достижения предельной чувствительности лазерной гравитационной антенны. Выполненное математическое моделирование подтвердило наличие низкочастотного оптического резонанса в высокочастот-

### Ключевые слова

*Реликтовые гравитационные волны, низкочастотный оптический резонанс, интерферометр Фабри — Перо, метрика пространства-времени, спектральная плотность*

---

ной части спектра излучения, прошедшего интерферометр Фабри — Перо. Установлено, что в области высоких частот резонансный отклик на 2 порядка превышает нерезонансное воздействие на интерферометр Фабри — Перо

---

Поступила 04.05.2021

Принята 07.06.2021

© Автор(ы), 2022

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 19-29-11015 мк «Разработка макета комплекса для отработки процесса получения и обработки информации с комплекса лазерных интерференционных гравитационных антенн наземного и космического базирования»)*

**Введение.** Зарегистрированные в настоящее время гравитационные волны представляют собой низкочастотные цуги с характерными частотами 30...300 Гц, вызванные слиянием черных дыр или черной дыры и нейтронной звезды [1–3]. Кроме анализа гравитационных волн астрофизического происхождения, также рассматривается возможность непосредственного детектирования реликтовых гравитационных волн, возникающих на инфляционной стадии эволюции ранней вселенной [4, 5]. Согласно теории космологических возмущений, реликтовые гравитационные волны порождаются квантовыми флуктуациями скалярного поля, индуцирующими возмущения метрики пространства-времени на стадии космологической инфляции, которые заполняют вселенную в виде гравитационно-волнового фона [6]. Различные инфляционные модели ранней вселенной предсказывают существование реликтовых гравитационных волн с характерными частотами в высокочастотной части спектра вплоть до  $10^{11}$  Гц [7–10].

Для регистрации высокочастотных гравитационных волн предложены несколько возможных методов, основанных на использовании взаимодействия гравитационной волны с электромагнитными волнами СВЧ-диапазона [11, 12], а также способы регистрации высокочастотных гравитационных волн с использованием многопроходных лазерных интерферометров [13–15].

*Цель работы* — оценка возможности применения явления низкочастотного оптического резонанса в интерферометре Фабри — Перо для регистрации высокочастотных реликтовых гравитационных волн.

**Оценка чувствительности интерферометра Фабри — Перо.** В интерферометре Фабри — Перо наблюдается явление низкочастотного оптического резонанса, заключающееся в селективном отклике прошедшего интерферометр оптического излучения при его отстройке от оптического резонанса [15, 16]. Если фазовый сдвиг (параметр настройки)  $\kappa$ , характеризующий настройку интерферометра, существенно меньше потерь  $\Delta$ , кото-

рые возникают при переотражении лазерного излучения в интерферометре, то мощность прошедшего интерферометр Фабри — Перо излучения можно рассчитать по формуле [5, 17]:

$$W_{A0} = \frac{\Delta^2}{\kappa^2 + \Delta^2} W_0, \quad (1)$$

где  $\kappa$ ,  $\Delta$  — параметры,  $\kappa \ll 1$  и  $\Delta \ll 1$ ;  $W_0$  — мощность лазерного излучения на входе в интерферометр.

При относительном смещении зеркал интерферометра  $x(t)$ , вызванном прохождением гравитационной волны, которая описывается изменением метрики пространства-времени  $h(t)$ , возникают вариации мощности лазерного излучения, прошедшего интерферометр Фабри — Перо [5, 17]. Спектральную плотность этих вариаций мощности можно рассчитать по формуле [5, 17]:

$$G_{\delta W_A}(\omega) = \frac{64\pi^2 L^2}{\kappa^2 \lambda_e^2} \frac{\beta^4 \omega^2}{\left((\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2\right)(\omega^2 + 4\beta^2)} W_0^2 G_h(\omega), \quad (2)$$

где  $L$  — длина резонатора;  $\lambda_e$  — длина волны лазерного излучения;  $G_h(\omega)$  — спектральная плотность вариаций метрики пространства-времени  $h(t)$ ;  $\beta$ ,  $\omega_0$  — величины,  $\beta = c\Delta / (2L)$ ,  $\omega_0 = \sqrt{c(\kappa^2 + \Delta^2) / (4L^2)}$ ,  $c$  — скорость света.

В случае, когда  $\kappa \gg \Delta$ , а частота внешнего воздействия  $\omega$  близка к собственной частоте  $\omega_0$ , выражение (2) приобретает более простой вид

$$G_{\delta W_A}(\omega) = \frac{16\pi^2 L^2 \Delta^2}{\kappa^4 \lambda_e^2} W_0^2 G_h(\omega), \quad (3)$$

а формула (1) записывается как

$$W_{A0} = \frac{\Delta^2}{\kappa^2} W_0. \quad (4)$$

Если при измерениях реликтовых гравитационных волн осуществляется усреднение спектральной плотности  $G_{\delta W_A}(\omega)$  за период времени  $T$ , то повышение чувствительности составит

$$K = \sqrt{2\beta T} = \sqrt{\frac{cT\Delta}{L}}.$$

Окончательно выражение (3) приобретет вид

$$\tilde{G}_{\delta W_A}(\omega) = KG_{\delta W_A}(\omega) = \frac{16\pi^2 \sqrt{cTL}^{3/2} \Delta^{5/2}}{\kappa^4 \lambda_e^2} W_0^2 G_h(\omega). \quad (5)$$

Для оценки потенциальной чувствительности интерферометра Фабри — Перо, использующего явления низкочастотного оптического резонанса, рассмотрим два случая. В первом будем полагать, что чувствительность приемника лазерного излучения, прошедшего интерферометр Фабри — Перо, ограничена его собственными шумами. Для фотоприемника DET10N2, имеющего рабочий спектральный диапазон 500...1700 нм и полосу чувствительности до 70 МГц, эквивалентная мощность шума  $2,0 \cdot 10^{-14}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> [18]. В этом случае формулу (5) можно представить в виде

$$G_h(\omega) = \frac{\kappa^4 \lambda_e^2}{16\pi^2 \sqrt{cTL}^{3/2} \Delta^{5/2} W_0^2} \tilde{G}_{\delta W_A}(\omega), \quad (6)$$

где  $\tilde{G}_{\delta W_A}(f) = 4 \cdot 10^{-28}$  Вт<sup>2</sup>/Гц или  $\tilde{G}_{\delta W_A}(\omega) = 6,4 \cdot 10^{-29}$  Вт<sup>2</sup> · с.

Во втором случае будем полагать, что чувствительность фотоприемника ограничена дробовым фотонным шумом. Тогда предельная чувствительность

$$\tilde{G}_{\delta W_A}(f) = \frac{2\pi c \hbar}{\lambda_e} W_{A0}, \quad (7)$$

где  $\hbar$  — постоянная Планка. В этом случае формула (6) с учетом выражений (4) и (7) преобразуется к виду

$$G_h(\omega) = \frac{\kappa^2 \lambda_e \sqrt{c \hbar}}{8\pi L^{3/2} \Delta^{1/2} \sqrt{TW_0}}. \quad (8)$$

Формулы (6) и (8) позволяют определить амплитуду потенциально регистрируемых вариаций метрики пространства-времени:

$$h_0 = \sqrt{G_h(\omega) \Delta\omega} = \sqrt{G_h(\omega) \frac{c\Delta}{L}}.$$

Здесь  $\Delta\omega = c\Delta/L$  — ширина резонансной линии низкочастотного оптического резонанса. Кроме того, эти формулы позволяют найти плотность энергии гравитационных волн [5]:

$$\Omega_{GW}(\omega) = \frac{1}{6\pi H_0^2} \omega^3 G_h(\omega),$$

где  $H_0 = 2,17 \cdot 10^{-18}$  с<sup>-1</sup> — параметр Хаббла.

Проведем расчет потенциальной чувствительности интерферометра Фабри — Перо при использовании явления низкочастотного оптического резонанса. Будем полагать, что  $\lambda_e = 1,064$  мкм,  $\Delta = 10^{-5}$ ,  $T = 10^4$  с,  $W_0 = 10^3$  Вт. Результаты расчета предельной чувствительности интерферометра Фабри — Перо в зависимости от его размера  $L$  и параметра настройки  $\kappa$  приведены в таблице.

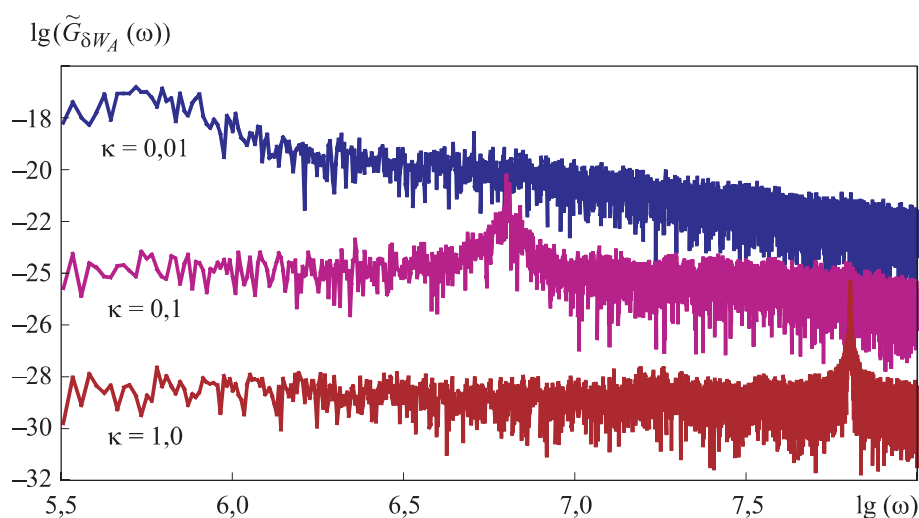
**Результаты расчета предельной чувствительности интерферометра Фабри — Перо**

$\kappa$	$f$ , Гц	$\Omega_h$ , расчет по (9) / (11)	$\Omega_{GW}$ , расчет $\Omega_h$ по (9) / (11)
$L = 2,4$ м			
$10^{-4}$	$10^3$	$2,3 \cdot 10^{-66} / 1,2 \cdot 10^{-49}$	$6,4 \cdot 10^{-21} / 3,4 \cdot 10^{-4}$
$10^{-3}$	$10^4$	$2,3 \cdot 10^{-62} / 1,2 \cdot 10^{-47}$	$6,4 \cdot 10^{-14} / 3,4 \cdot 10^1$
$10^{-2}$	$10^5$	$2,3 \cdot 10^{-58} / 1,2 \cdot 10^{-45}$	$6,4 \cdot 10^{-7} / 3,4 \cdot 10^6$
$10^{-1}$	$10^6$	$2,3 \cdot 10^{-54} / 1,2 \cdot 10^{-43}$	$6,4 / 3,4 \cdot 10^{11}$
$L = 240$ м			
$10^{-4}$	10	$2,3 \cdot 10^{-69} / 1,2 \cdot 10^{-52}$	$6,4 \cdot 10^{-30} / 3,4 \cdot 10^{-13}$
$10^{-3}$	$10^2$	$2,3 \cdot 10^{-65} / 1,2 \cdot 10^{-50}$	$6,4 \cdot 10^{-23} / 3,4 \cdot 10^{-8}$
$10^{-2}$	$10^3$	$2,3 \cdot 10^{-61} / 1,2 \cdot 10^{-48}$	$6,4 \cdot 10^{-16} / 3,4 \cdot 10^{-3}$
$10^{-1}$	$10^4$	$2,3 \cdot 10^{-57} / 1,2 \cdot 10^{-46}$	$6,4 \cdot 10^{-9} / 3,4 \cdot 10^2$

Согласно приведенным в таблице значениям предельной чувствительности, основным ограничением является фотонный шум, который на много порядков снижает чувствительность гравитационной антенны. Интенсивность этого шума линейно зависит от мощности прошедшего интерферометр Фабри — Перо излучения  $W_{A0}$ . В связи с этим при разработке схемной реализации лазерных гравитационных антенн необходимо стремиться к снижению падающего на фотоприемник излучения. Оценка показывает, что для достижения уровнем фотонного шума уровня собственных шумов фотоприемника падающее на него излучение не должно превышать  $2 \cdot 10^{-9}$  Вт.

**Результаты математического моделирования.** Используя формулы из [5, 16], проведем расчет низкочастотного оптического резонанса в интерферометре Фабри — Перо при воздействии на него гравитационной волны с интенсивностью  $\Omega_h = 10^{-40}$  с<sup>-1</sup>. При этом  $\lambda_e = 1,064$  мкм,  $\Delta = 10^{-3}$ ,  $W_0 = 10^3$  Вт,  $L = 2,4$  м,  $\kappa = 0,01; 0,1; 1,0$ .

В соответствии с полученной зависимостью (рисунок) с увеличением параметра  $\kappa$  в области высоких частот наблюдается резонансный отклик на внешнее воздействие. При этом указанный отклик примерно на 2 порядка превышает нерезонансное воздействие на интерферометр Фабри — Перо.



Зависимость спектральной плотности  $\tilde{G}_{\delta W_A}(\omega)$  при различных значениях  $\kappa$

**Заключение.** Результаты проведенного анализа показали перспективность использования явления низкочастотного оптического резонанса в интерферометре Фабри — Перо для регистрации реликтовых гравитационных волн. Практическая реализация этой возможности требует создания лазерных гравитационных антенн, имеющих достаточно высокую чувствительность в области высоких частот [19].

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Abbott B.P., Abbott P., Abbott T.D., et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, vol. 116, iss. 6, art. 061102. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>
- [2] Abbott B.P., Abbott P., Abbott T.D., et al. Gravitational waves and gamma-rays from a binary neutron star merger: GW170817 and GRB 170817A. *ApJL.*, 2017, vol. 848, no. 2, art. L13. DOI: <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa920c>
- [3] Пустовойт В.И. О непосредственном обнаружении гравитационных волн. *УФН*, 2016, т. 186, № 9, с. 1133–1152.
- [4] Boyle L.A., Buonanno A. Relating gravitational wave constraints from primordial nucleosynthesis, pulsar timing, laser interferometers, and the CMB: implications for the early Universe. *Phys. Rev. D*, 2008, vol. 78, no. 4, art. 043531. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.78.043531>

- [5] Фомин И.В., Червон С.В., Морозов А.Н. Гравитационные волны ранней все-ленной. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018.
- [6] Giovannini M. Primordial backgrounds of relic gravitons. *Prog. Part. Nucl. Phys.*, 2020, vol. 112, art. 103774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2020.103774>
- [7] Ahmad S., Myrzakulov R., Sami M. Relic gravitational waves from quintessential inflation. *Phys. Rev. D*, 2017, vol. 96, iss. 6, art. 063515. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.96.063515>
- [8] Ito A., Soda J. MHz gravitational waves from short-term anisotropic inflation. *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, 2016, vol. 2016, art. 035. DOI: <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2016/04/035>
- [9] Adshead P., Giblin J.T., Pieroni M., et al. Constraining axion inflation with gravitational waves from preheating. *Phys. Rev. D*, 2020, vol. 101, iss. 8, art. 083534. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.083534>
- [10] Gangopadhyay M.R., Myrzakul S., Sami M., et al. Paradigm of warm quintessential inflation and production of relic gravity waves. *Phys. Rev. D*, 2021, vol. 103, iss. 4, art. 043505. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.103.043505>
- [11] Брагинский В.Б., Менский М.Б. Высокочастотное детектирование гравитационных волн. *Письма в ЖЭТФ*, 1971, т. 13, № 11, с. 585–587.
- [12] Li F.-Y., Tang M.-X., Shi D.-P. Electromagnetic response of a Gaussian beam to high-frequency relic gravitational waves in quintessential inflationary models. *Phys. Rev. D*, 2003, vol. 67, iss. 10, art. 104008. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.67.104008>
- [13] Blaut A. Angular and frequency response of the gravitational wave interferometers in the metric theories of gravity. *Phys. Rev. D*, 2012, vol. 85, iss. 4, art. 043005. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.85.043005>
- [14] Arvanitaki A.G., Andrew A. Detecting high-frequency gravitational waves with optically levitated sensors. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, vol. 110, iss. 7, art 071105. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.071105>
- [15] Гладышев В.О., Морозов А.Н. Низкочастотный оптический резонанс в многолучевом интерферометре Фабри — Перо. *Письма в ЖТФ*, 1993, т. 19, № 14, с. 39–42.
- [16] Морозов А.Н. Необратимые процессы и броуновское движение. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997.
- [17] Есаков А.А., Морозов А.Н., Табалин С.Е. и др. Применение низкочастотного оптического резонанса для регистрации высокочастотных гравитационных волн. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сер. Естественные науки*, 2015, № 1 (58), с. 26–35. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2015-1-26-35>
- [18] Голяк И.С., Морозов А.Н., Назолин А.Л. и др. Разработка информационно-измерительного комплекса для регистрации высокочастотных гравитационных волн. *Радиостроение*, 2020, № 3, с. 35–49. DOI: <https://doi.org/10.36027/rdeng.0320.0000172>

[19] Голяк И.С., Морозов А.Н., Назолин А.Л. и др. Информационно-измерительный комплекс для регистрации высокочастотных гравитационных волн. *Радиостроение*, 2020, № 5, с. 42–51. DOI: <https://doi.org/10.36027/rdeng.0520.0000184>

**Голяк Илья Семенович** — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник АО «ЦПФ МГТУ им. Н.Э. Баумана» (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Морозов Андрей Николаевич** — член-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Фомин Игорь Владимирович** — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Голяк Ил.С., Морозов А.Н., Фомин И.В. Регистрация реликтовых гравитационных волн с помощью низкочастотного оптического резонанса. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2022, № 2 (101), с. 57–67.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-2-57-67>

## REGISTRATION OF RELIC GRAVITATIONAL WAVES USING LOW-FREQUENCY OPTICAL RESONANCE

**I.S. Golyak**<sup>1</sup>

[iliyagol@bmstu.ru](mailto:iliyagol@bmstu.ru)

**A.N. Morozov**<sup>2</sup>

[amor@bmstu.ru](mailto:amor@bmstu.ru)

**I.V. Fomin**<sup>2</sup>

[fomin\\_iv@bmstu.ru](mailto:fomin_iv@bmstu.ru)

<sup>1</sup> Applied Physics Center JSC, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

### Abstract

The study centers around the possible existence of high-frequency relic gravitational waves, focuses on specialized gravitational antennas necessary for their registration, and proposes to use low-frequency optical resonance laser gravitational antennas. Within the study, we calculated the sensitivity of the Fabry — Pérot interferometer, which uses the phenomenon of low-frequency optical resonance, and obtained formulas to describe the radiation transmitted by the Fabry — Pérot interferometer and the spectral density of the

### Keywords

*Relic gravitational waves, low-frequency optical resonance, Fabry — Pérot interferometer, space-time metric, spectral density*



response to the action of a gravitational wave. The study reveals the possibility of registering relic gravitational waves in the high-frequency part of the spectrum, and estimates the limiting sensitivity of a laser gravitational antenna. Findings of the research show that the main factor limiting the sensitivity of a laser gravitational antenna is photon noise. To reduce the contribution of photon noise, we propose to significantly reduce the power of laser radiation transmitted through the Fabry — Pérot interferometer, which can be achieved using low-frequency optical resonance. We estimated the required power of the radiation transmitted through the interferometer to achieve the limiting sensitivity of the laser gravitational antenna. The mathematical modeling confirmed the presence of low-frequency optical resonance in the high-frequency part of the radiation spectrum that passed through the Fabry — Pérot interferometer. We found that in the high-frequency region the resonant response exceeded by 2 orders of magnitude the non-resonant effect on the Fabry — Pérot interferometer

Received 04.05.2021

Accepted 07.06.2021

© Author(s), 2022

*This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 19-29-11015 mk “Development of a model of a complex for testing the process of receiving and processing information from a complex of ground-based and space-based laser interference gravitational antennas”)*

## REFERENCES

- [1] Abbott B.P., Abbott P., Abbott T.D., et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, vol. 116, iss. 6, art. 061102. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>
- [2] Abbott B.P., Abbott P., Abbott T.D., et al. Gravitational waves and gamma-rays from a binary neutron star merger: GW170817 and GRB 170817A. *ApJL*, 2017, vol. 848, no. 2, art. L13. DOI: <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa920c>
- [3] Pustovoit V.I. On the direct detection of gravitational waves. *Phys. Usp.*, 2016, vol. 59, no. 10, pp. 1034–1051. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2016.03.037900>
- [4] Boyle L.A., Buonanno A. Relating gravitational wave constraints from primordial nucleosynthesis, pulsar timing, laser interferometers, and the CMB: implications for the early Universe. *Phys. Rev. D*, 2008, vol. 78, no. 4, art. 043531. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.78.043531>
- [5] Fomin I.V., Chervon S.V., Morozov A.N. Gravitatsionnye volny ranney vselennoy [Gravitation waves of the early Universe]. Moscow, BMSTU Publ., 2018.

- [6] Giovannini M. Primordial backgrounds of relic gravitons. *Prog. Part. Nucl. Phys.*, 2020, vol. 112, art. 103774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2020.103774>
- [7] Ahmad S., Myrzakulov R., Sami M. Relic gravitational waves from quintessential inflation. *Phys. Rev. D*, 2017, vol. 96, iss. 6, art. 063515. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.96.063515>
- [8] Ito A., Soda J. MHz gravitational waves from short-term anisotropic inflation. *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, 2016, vol. 2016, art. 035. DOI: <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2016/04/035>
- [9] Adshead P., Giblin J.T., Pieroni M., et al. Constraining axion inflation with gravitational waves from preheating. *Phys. Rev. D*, 2020, vol. 101, iss. 8, art. 083534. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.083534>
- [10] Gangopadhyay M.R., Myrzakul S., Sami M., et al. Paradigm of warm quintessential inflation and production of relic gravity waves. *Phys. Rev. D*, 2021, vol. 103, iss. 4, art. 043505. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.103.043505>
- [11] Braginskiy V.B., Menskiy M.B. High-frequency detection of gravitation waves. *Pis'ma v ZhETF*, 1971, vol. 13, no. 11, pp. 585–587 (in Russ.).
- [12] Li F.-Y., Tang M.-X., Shi D.-P. Electromagnetic response of a Gaussian beam to high-frequency relic gravitational waves in quintessential inflationary models. *Phys. Rev. D*, 2003, vol. 67, iss. 10, art. 104008. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.67.104008>
- [13] Błaut A. Angular and frequency response of the gravitational wave interferometers in the metric theories of gravity. *Phys. Rev. D*, 2012, vol. 85, iss. 4, art. 043005. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.85.043005>
- [14] Arvanitaki A.G., Andrew A. Detecting high-frequency gravitational waves with optically levitated sensors. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, vol. 110, iss. 7, art 071105. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.071105>
- [15] Gladyshev V.O., Morozov A.N. Low-frequency optical resonance in a multiple-wave Fabry — Pérot interferometer. *Pis'ma v ZhTF*, 1993, vol. 19, no. 14, pp. 39–42 (in Russ.).
- [16] Morozov A.N. Neobratimye protsessy i brounovskoe dvizhenie [Irreversible processes and Brownian motion]. Moscow, BMSTU Publ., 1997.
- [17] Esakov A.A., Morozov A.N., Tabalin S.E., et al. Application of low-frequency optical resonance for detection of high-frequency gravitational waves. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2015, no. 1 (58), pp. 26–35 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2015-1-26-35>
- [18] Golyak I.S., Morozov A.N., Nazolin A.L., et al. Information-measuring complex development for detecting high-frequency gravitational waves. *Radiostroenie* [Radio Engineering], 2020, no. 3, pp. 35–49 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.36027/rdeng.0320.0000172>
- [19] Golyak I.S., Morozov A.N., Nazolin A.L., et al. Information-measuring complex for registration high frequency gravitational waves. *Radiostroenie* [Radio Engineering], 2020, no. 5, pp. 42–51 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.36027/rdeng.0520.0000184>

**Golyak I.S.** — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Senior Research Fellow, Applied Physics Center JSC, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Morozov A.N.** — Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Head of Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Fomin I.V.** — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Golyak I.S., Morozov A.N., Fomin I.V. Registration of relic gravitational waves using low-frequency optical resonance. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2022, no. 2 (101), pp. 57–67 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-2-57-67>