

УДК 530.12, 531.51

© Манучарян Г. Д., Фомин И. В., 2024

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ФОТОН-ГРАВИТОННОЙ КОНВЕРСИИ

Манучарян Г. Д.^{a,b,1}, Фомин И. В.^{a,2}^a МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 105005, Россия.^b ГАИШ МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, 119234, Россия.

Рассмотрены космологические модели в рамках модифицированных теорий гравитации, допускающие наличие эпохи преобладания жесткой энергии. Проанализированы 14 экспериментальных установок с целью определения наиболее перспективной для детектирования высокочастотного гравитационно-волнового реликтового излучения. Соответствующие выводы представлены в заключении.

Ключевые слова: Общая теория относительности, модифицированные теории гравитации, гравитационные волны, гравитационные детекторы.

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF DETECTING HIGH-FREQUENCY GRAVITATIONAL WAVES RADIATION ON THE BASIS OF PHOTON-GRAVITON CONVERSION

Manucharyan G. D.^{a,b,1}, Fomin I. V.^{a,2}^a Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia.^b Sternberg Astronomical Institute, Moscow, 119234, Russia.

Cosmological models in the framework of modified theories of gravitation, allowing the presence of the epoch of stiff energy predominance, are considered. We analysed 14 possible detectors in order to determine the most promising one for detection of high-frequency gravitational-wave relic radiation. The corresponding conclusions are presented.

Keywords: General Relativity, modified theories of gravity, gravitational waves, gravitational-wave detectors.

PACS: 04.50.-h

DOI: 10.17238/issn2226-8812.2024.1.78-83

Введение

Общая теория относительности хоть в очередной раз и прошла экспериментальную проверку [1], но тем не менее не отвечает на вопросы связанные с ускоренным расширением Вселенной, сущности темной энергии и материи, в связи с чем продолжают теоретические работы в направлении модификации ОТО [2, 3].

Реликтовые гравитационные волны являются одним из критериев верификации космологических моделей и теорий гравитации, характеристики которых существенно зависят от физических процессов в инфляционную эпоху. Отклонения параметра состояния постинфляционной материи от значения, соответствующего излучению $w_\gamma = 1/3$ во время перехода, соответствующего наличию дополнительной эпохи преобладания “жесткой энергии”, приводит к увеличению диапазона возможных частот реликтовых гравитационных волн.

¹E-mail: gevorgbek.manucharyan@gmail.com²E-mail: ingvor@inbox.ru

В настоящей работе мы рассматриваем космологические модели, допускающие наличие эпохи преобладания жесткой энергии и обсуждаем возможности прямой регистрации реликтовых гравитационных волн на основе различных методов детектирования.

Для оценки возможности прямого детектирования в данной работе рассматриваются классический и модифицированный эффекты Герценштейна, предполагающие преобразование излучения гравитационных волн (ГВ) в фотоны в присутствии постоянного и переменного магнитных полей соответственно, а также высокочастотный гравитационно-оптический резонанс в многолучевом интерферометре [4]. Как будет показано ниже, последний метод является наиболее перспективным для наблюдения реликтовых гравитационных волн в лабораторных условиях.

1. Космологические модели на основе гравитации Эйнштейна-Гаусса-Бонне и скалярно-тензорной гравитации

В рамках гравитации Эйнштейна-Гаусса-Бонне с действием

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{1}{2} R - g^{\mu\nu} \frac{1}{2} \partial_\mu \phi_{\text{GB}} \partial_\nu \phi_{\text{GB}} - V_{\text{GB}}(\phi_{\text{GB}}) - \frac{1}{2} \xi(\phi_{\text{GB}}) R_{\text{GB}}^2 \right], \quad (1)$$

где ξ - функция неминимального взаимодействия скалярного поля и скаляра Гаусса - Бонне R_{GB}^2 , определенного как

$$R_{\text{GB}}^2 = R^2 - 4R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} + R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma}, \quad (2)$$

рассматривается решение, представленное ранее в [6].

В рамках скалярно - тензорной гравитации рассматривается действие [5]

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{1}{2} F(\phi) R - \frac{\omega(\phi)}{2} g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi - V(\phi) \right], \quad (3)$$

где $F(\phi)$, $\omega(\phi)$ - дифференцируемые по полю функции, R - скаляр Риччи, рассматриваются общие решения с квадратичной связью параметра Хаббла и функцией неминимального взаимодействия скалярного поля и скалярной кривизны вида $H = \lambda \sqrt{F(\phi)}$. В полученных решениях допускается наличие эпохи преобладания "жесткой энергии" между эпохами инфляции и преобладания излучения с параметром состояния постинфляционной материи

$$\frac{3}{5} \leq w_s \leq 1. \quad (4)$$

Плотность энергии реликтовых гравитационных волн для указанных случаев оценивается как [7]

$$\Omega_{\text{GW}}(f) \simeq \Omega_{\text{GW}}^0 \cdot \begin{cases} 1, & f < f_{\text{RD}} \\ 1.27 \left(\frac{f}{f_{\text{RD}}} \right)^\alpha, & f \geq f_{\text{RD}} \end{cases}, \quad (5)$$

где $\Omega_{\text{GW}}^0 = 10^{-15} \cdot r/h^2$, $h \simeq 0.68$ - относительная константа Хаббла, r - тензорно-скалярное отношение, параметр $\alpha_S = 2 \left(\frac{3w-1}{3w+1} \right)$, f_{RD} - частота моды, соответствующей размеру горизонта в начале эпохи преобладания излучения, определенная через чувствительность LIGO $h^2 \Omega_{\text{GW}}(100) \lesssim 10^{-9}$ как

$$f_{\text{RD}}(w) = 100 \cdot \left(\frac{h^2 \cdot \Omega_{\text{GW}}(100)}{10^{-15} \cdot r} \right). \quad (6)$$

Частота обрезания спектра задана как [6]

$$f_{\text{cutoff}}(w) \leq f_{\text{RD}}(w) \left(\alpha_S \left[\frac{1 \times 10^{-6}}{1.27 \times \Omega_{\text{GW}}^0} - \frac{1}{1.27} \ln \left(\frac{f_{\text{RD}}(w)}{f_{\text{bbn}}} \right) \right] + 1 \right)^{1/\alpha_S}. \quad (7)$$

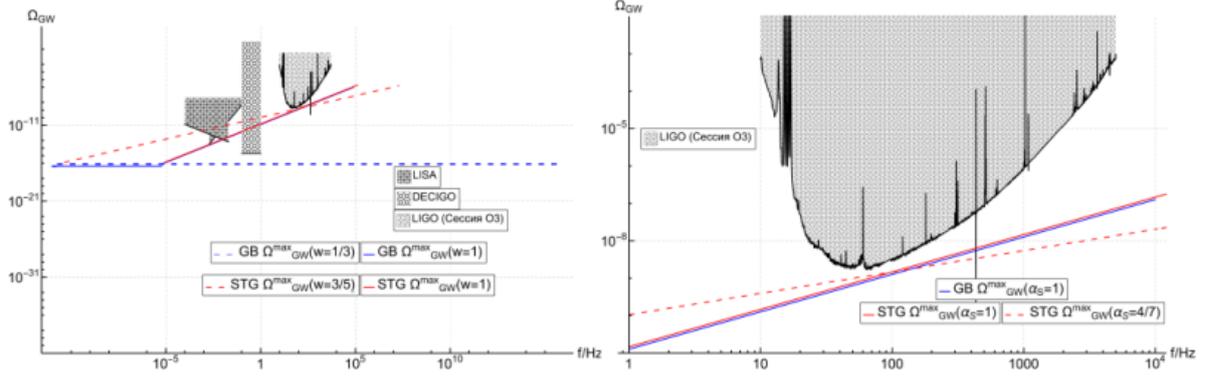


Рис. 1. Максимальная плотность энергии реликтовых гравитационных волн с полосами чувствительности детекторов LIGO [8], DECIGO [9], LISA [10].

2. Оценка возможности непосредственного детектирования гравитационных волн

Как можно увидеть на рисунке 1, экспериментальное детектирование реликтовых гравитационных волн от рассматриваемых моделей невозможно на действующей установке LIGO.

При взаимодействии Гауссовского пучка с высокочастотными гравитационными волнами (ВЧ-ГВ) [11] на частоте $f \simeq 4.4 \times 10^6$ Гц, частота образования фотонов оценивается как $n \sim 10^{11}$ Гц, однако фазовый сдвиг «сгенерированных» фотонов по отношению к имеющимся в детекторе фотонов — малая величина $\sim 10^{-28}$ [12], следовательно детектирование невозможно в лабораторных условиях. При оценке возможности применения модифицированного эффекта Герценштейна [13], оценка аналогична предыдущей: при круговой частоте гравитационных волн $\omega_{GW} \simeq 6\pi \cdot 10^7$ Гц для скалярно-тензорной гравитации частота образования фотонов оценивается как $n_{\omega_g} \approx n_{2\omega_g} \sim 9 \times 10^8$ Гц, для гравитации Эйнштейна-Гаусса-Бонне $n_{\omega_g} \approx n_{2\omega_g} \sim 5 \times 10^8$ Гц. Однако фазовый сдвиг также мал: $\sim 10^{-28}$ и, следовательно, детектирование невозможно. Детекторы слабо взаимодействующих тонких частиц (WISP) в виду своей конструкции также можно использовать как детекторы гравитационных волн. Для них оценки возможности непосредственного детектирования представлены в таблице 1, откуда видно, что ни у одной из указанных установок не хватает чувствительности.

Таблица 1. Экспериментальные установки детекторов WISP, которые можно применять как детекторы ВЧГВ. h_{\min} — минимальная амплитуда ВЧГВ, которую можно регистрировать на заданной частоте. Величина h_{GW}^{\max}/h_{\min} показывает во сколько раз амплитуда гравитационных волн меньше минимально требуемой.

Установка	Полоса чувствительности	h_{\min} [14]	h_{GW}^{\max}/h_{\min}
ALPS [15]	$(3 - 7.5) \times 10^{14}$ Гц	$h_{\min}(f_{GW} = 3 \times 10^{14}) \approx 3.64 \times 10^{-25}$	$\approx 2 \times 10^{11}$
OSQAR I [16]	$(3 - 7.5) \times 10^{14}$ Гц	$h_{\min}(f_{GW} = 3 \times 10^{14}) \approx 4.92 \times 10^{-25}$	$\approx 2.8 \times 10^{11}$
OSQAR II [16]	$(3 - 7.5) \times 10^{14}$ Гц	$h_{\min}(f_{GW} = 3 \times 10^{14}) \approx 1.04 \times 10^{-25}$	$\approx 5.9 \times 10^{10}$
CAST [17]	$(5 - 15) \times 10^{18}$ Гц	$h_{\min}(f_{GW} = 10^{18}) \approx 5.25 \times 10^{-28}$	$\approx 1.1 \times 10^{12}$
ALPS IIc [18]	$\sim 4 \times 10^{14}$ Гц	$h_{\min}(f_{GW} = 4 \times 10^{14}) \approx 2.84 \times 10^{-30}$	$\approx 1.6 \times 10^6$
JURA [19]	$\sim 4 \times 10^{14}$ Гц	$h_{\min}(f_{GW} = 4 \times 10^{14}) \approx 3.97 \times 10^{-32}$	$\approx 2.3 \times 10^4$
IAXO [20]	$\sim (2.4 - 24) \times 10^{17}$ Гц	$h_{\min}(f_{GW} = 10^{18}) \approx 9.78 \times 10^{-30}$	$\approx 2 \times 10^{10}$

В рамках интерферометрических методов регистрации рассмотрены 2 схемы, а именно: двухуровневые трехмерные интерферометры [21] и интерферометр Майкельсона с резонаторами Фабри - Перо [4]. Для первого в диапазоне частот $f \in (1 - 250)$ МГц минимально детектируемое возмущение метрики составляет величину $\sim 10^{-19} \text{ м}/\sqrt{\Gamma \text{ ц}}$, что на частоте 4.4 МГц (соответствует частоте обрезания спектра при значении параметра состояния вещества $w = 3/5$) на 8 порядков выше мак-

симальной амплитуды гравитационных волн от моделей в рамках скалярно-тензорной гравитации и гравитации Эйнштейна-Гаусса-Бонне. В случае же гравитационно-оптического резонанса, рассмотренного в [4], получена удовлетворительная оценка [22], а именно: при длине плеч резонатора $L \simeq 27.5$ м и времени усреднения информации $T \simeq 1411$ с чувствительности метода достаточно, более того, при достижении теоретической чувствительности можно определить какая из рассмотренных моделей корректна (рис. 2).

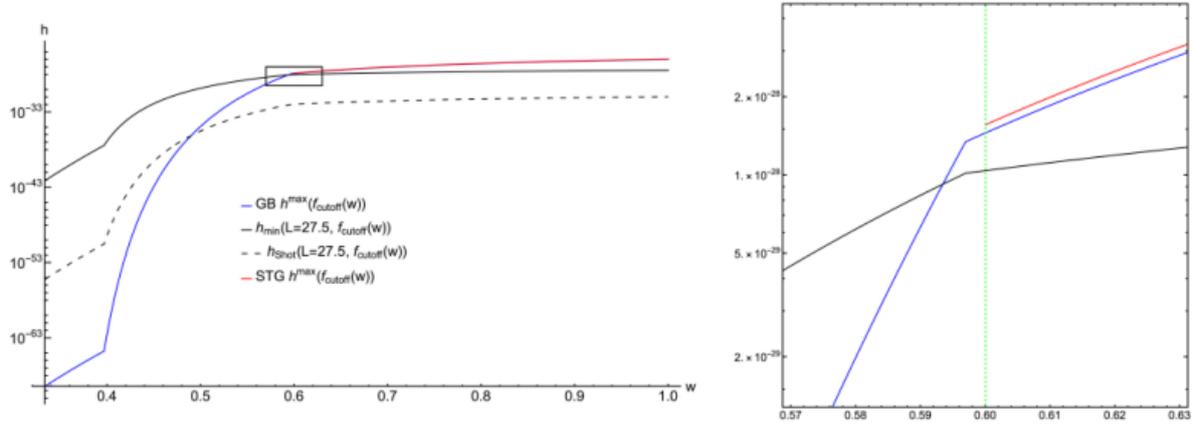


Рис. 2. Минимальная детектируемая амплитуда (черная сплошная линия) и ограничение на чувствительность детектора снизу с учетом дробового фотонного шума (черная штриховая линия) для рассматриваемой установки и максимальная амплитуда ГВ в зависимости от параметра состояния постинфляционной материи Вселенной w . Зеленая заштрихованная линия соответствует частоте 4.4 МГц.

Заключение

В рамках данной работы были рассмотрены 14 различных установок для регистрации высокочастотного гравитационно-волнового излучения посредством фотон-гравитонной конверсии. В рамках предложенного анализа установлено, что необходимой чувствительностью обладает установка, работающая на основе гравитационно-оптического резонанса, и данный метод можно рассматривать в качестве перспективного для регистрации высокочастотных реликтовых гравитационных волн.

Список литературы/References

1. Abbott B.P., Abbott R., Abbott T., Abernathy M., Acernese F., Ackley K., Adams C., Adams T., Addesso P., Adhikari R. and others. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Physical review letters*, 2016, **116**(6), 061102.
2. Gibbons G. Cosmological evolution of the rolling tachyon. *Physics Letters B*, 2002, **537**(1-2), 1–4.
3. Clifton T., Ferreira P.G., Padilla A., Skordis C. Modified gravity and cosmology. *Physics reports*, 2012, **513**(1-3), 1–189.
4. Morozov A.N., Golyak I.S., Fomin I.V., Chervon S.V. Detectors of high-frequency gravitational waves based on the gravitational - optical resonance. *Space, Time and Fundamental Interactions*, 2022, no. 41, pp. 49–61.
5. Fomin I.V., et al. Relic gravitational waves in verified inflationary models based on the generalized scalar–tensor gravity. *The European Physical Journal*, 2022, C 82.7: 642.
6. Manucharyan G.D., Fomin I.V. Corrections to standard inflationary models induced by Gauss-Bonnet scalar. *Space, Time and Fundamental Interactions*, 2022, no. 40, pp. 119–131.
7. Tanin E.H., Tankanen T. Gravitational wave constraints on the observable inflation. *J. Cosm. Astropart. Phys.*, 2021, vol. 2021, no. 01, p. 053.

8. LSC. LIGO Document Control Center Portal. — 2021. — Access mode: <https://dcc.ligo.org/cgi-bin/DocDB/DocumentDatabase> (online; accessed: 2021)
9. Kawamura, Seiji, et al. The Japanese space gravitational wave antenna: DECIGO. *Classical and Quantum Gravity*, 2011, 28.9: 094011.
10. Amaro-Seoane, Pau, et al. Laser interferometer space antenna. arXiv preprint arXiv:1702.00786 (2017).
11. 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, no. 10, pp. 104008.
12. Mitskievich N.V., Nesterov A.I. Possible gravitational radiation detection using the geometric phase of a light beam. *General Relativity and Gravitation*, 1995, no. 27, pp. 361–366.
13. Zheng H., Wei L.F. Experimental system to detect the electromagnetic response of high-frequency gravitational waves. *Physical Review D.*, 2022, vol. 106, no. 10, p. 104003.
14. Ejlli A., Ejlli D., Cruise A. M., Pisano G., Grote H. Upper limits on the amplitude of ultra-high-frequency gravitational waves from graviton to photon conversion. *The European Physical Journal C* 79(12), 1032, 2019.
15. Ehret K., Frede M., Ghazaryan S., Hildebrandt M., Knabbe E.-A., Kracht D., Lindner A., List J., Meier T., Meyer N. and others. New ALPS results on hidden-sector lightweights. *Physics Letters B*, 2010, 689(4-5), pp. 149–155,
16. Ballou R., Deferne G., Finger Jr M., Finger M., Flekova L., Hosek J., Kunc S., Macuchova K., Meissner K., Pugat P. and others. New exclusion limits on scalar and pseudoscalar axionlike particles from light shining through a wall. *Physical Review D*, 2015, 92(9), 092002.
17. Anastassopoulos V., Aune S., Barth K., Belov A., Cantatore G., Carmona J., Castel J., Cetin S., Christensen F., Collar J. and others. New CAST limit on the axion-photon interaction. arXiv preprint arXiv:1705.02290, 2017.
18. Bähre R., Döbrich B., Dreyling-Eschweiler J., Ghazaryan S., Hodajerdi R., Horns D., Januschek F., Knabbe E.-A., Lindner A., Notz D. and others, Any light particle search II—technical design report. *Journal of Instrumentation*, 2013, 8(09), T09001.
19. Beacham J., Burrage C., Curtin D., De Roeck A., Evans J., Feng J. L., Gatto C., Gninenko S., Hartin A., Irastorza I. and others. Physics beyond colliders at CERN: beyond the standard model working group report. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 2019, 47(1), 010501.
20. Armengaud E., Avignone F., Betz M., Brax P., Brun P., Cantatore G., Carmona J., Carosi G., Caspers F., Caspi S. and others. Conceptual design of the international axion observatory (IAXO). *Journal of Instrumentation*, 2014, 9(05), T05002.
21. Vermeulen, Sander M., et al. An experiment for observing quantum gravity phenomena using twin table-top 3D interferometers. *Classical and Quantum Gravity*, 2021, 38.8: 085008.
22. Manucharyan G.D., Fomin I.V., Gladyshev V.O., Litvinov D.A. On the detection of high-frequency relic gravitational waves. *Space, Time and Fundamental Interactions*, 2023, no. 3.

Авторы

Манучарян Геворг Дереникович, ассистент кафедры “Физика”, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, с. 1, г. Москва, 105005, Россия.

E-mail: gevorgbek.manucharyan@gmail.com

Фомин Игорь Владимирович, д.ф.-м.н., профессор кафедры “Физика”, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, с. 1, г. Москва, 105005, Россия.

E-mail: ingvor@inbox.ru

Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Манучарян Г. Д., Фомин И. В. Анализ возможности детектирования высокочастотного гравитационно-волнового излучения на основе фотон-гравитонной конверсии. *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия*. 2024. № 1. С. 78–83.

Authors

Manucharyan Gevorg Derenikovich, assistant of Physics department, Bauman Moscow State Technical University, 2nd Baumanskaya st., 5c1, Moscow, 105005, Russia.

E-mail: gevorgbek.manucharyan@gmail.com

Fomin Igor Vladimirovich, Ph.D., Professor of Physics department, Bauman Moscow State Technical University, 2nd Baumanskaya st., 5c1, Moscow, 105005, Russia.

E-mail: ingvor@inbox.ru

Please cite this article in English as:

Manucharyan G. D., Fomin I. V. Analysis of the possibility of detecting high-frequency gravitational waves radiation on the basis of photon-graviton conversion. *Space, Time and Fundamental Interactions*, 2024, no. 1, pp. 78–83.