

## Высокочастотные реликтовые гравитационные волны

**Фомин Игорь Владимирович**

ingvor@inbox.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана

**Морозов Андрей Николаевич**

amor@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана

**Голяк Илья Семенович**

iliyagol@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана

**Есаков Артем Александрович**

a.esakov@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана

*Рассмотрены высокочастотные реликтовые гравитационные волны космологического генезиса. Показано, что для широкого класса космологических моделей, верифицируемых по современным наблюдательным данным, высокочастотные реликтовые гравитационные волны имеют наибольшую плотность энергии. Приведен анализ методов непосредственного детектирования высокочастотных реликтовых гравитационных волн. Сделан вывод, что существует потенциальная возможность детектирования высокочастотных реликтовых гравитационных волн.*

**Ключевые слова:** космологические возмущения, модифицированные теории гравитации, интерферометр Фабри — Перо, гравитационные волны

Основной мотивацией для изучения высокочастотных гравитационных волн является отсутствие известных компактных и достаточно плотных астрофизических объектов, способных испускать гравитационные волны с частотами выше 10 Гц. Таким образом, любое открытие гравитационных волн на более высоких частотах будет соответствовать либо экзотическим астрофизическим объектам (первичные черные дыры, космические струны или бозонные звезды), либо процессам, происходящим в ранней вселенной на инфляционной стадии ее эволюции [1].

Необходимо отметить, что оценки максимальной плотности энергии стохастического гравитационно-волнового фона от экзотических астрофизических объектов  $\Omega_{GW} \lesssim 10^{-8}$  [1] существенно ниже чем оценки плотности энергии реликтовых гравитационных волн  $\Omega_{GW} \lesssim 10^{-6}$ , которая ограничена по влиянию реликтовых гравитационных волн на темп первичного нуклеосинтеза [2].

Отметим, что плотность энергии гравитационных волн характеризуется безразмерным параметром  $\Omega_{GW} = \Omega_{GW}(f)$ , который связан с амплитудой гравитационных волн  $h_{GW}$  и их частотой  $f$  известным соотношением [2]:

$$h_{GW}(f) = 1.26 \times 10^{-18} \left( \frac{H_0}{f} \right) \sqrt{h^2 \Omega_{GW}(f)},$$

где  $h \simeq 0,68$  — нормированный параметр Хаббла в современную эпоху эволюции вселенной.

Исходя из современных наблюдательных ограничений на вклад реликтовых гравитационных волн в анизотропию и поляризацию реликтового излучения [3], ограничений на плотность энергии ГВ по их влиянию на темп первичного нуклеосинтеза и ограниче-

ний эксперимента LIGO как наиболее чувствительного детектора гравитационных волн с частотой  $f \approx 100$  Гц [4], для широкого класса моделей космологической инфляции, подразумевающих дополнительную стадию преобладания «жесткой» энергии, максимальная плотность энергии гравитационных волн  $\Omega_{GW}(f = f_*) \approx 1,3 \cdot 10^{-6}$  находится в диапазоне частот  $10^5$  Гц  $\lesssim f_* \lesssim 10^{10}$  Гц [5], причем частота  $f_* = f_*(w)$ , соответствующая максимальной плотности энергии гравитационных волн, зависит от значения параметра состояния  $w$  после завершения инфляционной стадии.

В [6] рассмотрен метод детектирования высокочастотных гравитационных волн на основе гравитационно-оптического резонанса в интерферометрах Фабри — Перо, условием возникновения которого является выполнение следующего соотношения между длиной резонатора и частотой гравитационной волны

$$L = \frac{nc}{2f}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

где  $c$  — скорость света в вакууме.

Рассматривая ограничения на чувствительность такого детектора, связанные с дробовым фотонным шумом и радиационным давлением, можно определить оптимальный для детектирования данным способом диапазон частот гравитационных волн с плотностью энергии  $\Omega_{GW} \approx 1,3 \cdot 10^{-6}$  как  $f = 3 - 5$  МГц, а соответствующую ему минимальную длину резонатора  $L = 50 - 30$  М.

Таким образом, существует потенциальная возможность детектирования высокочастотных реликтовых гравитационных волн, предсказываемых в космологических моделях с дополнительной стадией преобладания «жесткой энергии», посредством рассмотренного метода гравитационно-оптического резонанса. Однако необходимо отметить два существенных ограничения, именно: попадание только части диапазона частот реликтовых гравитационных волн с максимальной плотностью энергии в диапазон частот  $f = 3 - 5$  МГц, ограниченный чувствительностью детектора, и необходимость точного соблюдения условия гравитационно-оптического резонанса.

## Литература

- [1] Aggarwal N., Aguiar O.D., Bauswein A., et al. Challenges and opportunities of gravitational-wave searches at MHz to GHz frequencies. *Living Reviews in Relativity*, 2021, vol. 24, no. 4. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41114-021-00032-5>
- [2] Caprini C., Figueroa D.G. Cosmological Backgrounds of Gravitational Waves. *Classical and Quantum Gravity*, 2018, vol. 35, no.16, art. no. 163001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6382/aac608>
- [3] Tristram M., et al. Improved limits on the tensor-to-scalar ratio using BICEP and Planck data. *Physical Review D*, 2022, vol. 105, no. 8, art. no. 083524. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.105.083524>
- [4] Abbott B.P., et al. Search for the isotropic stochastic background using data from Advanced LIGO's second observing run. *Physical Review D*, 2019, vol. 100, no. 6, art. no. 061101. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.100.061101>
- [5] Fomin I.V., Chervon S.V., Morozov A.N., Golyak I.S. Relic gravitational waves in verified inflationary models based on the generalized scalar–tensor gravity. *The European Physical Journal C*, 2022, vol. 82, no. 7, art. no. 642. DOI: <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10601-9>
- [6] Голяк И.С., Есаков А.А., Морозов А.Н., Назолин А.Н., Табалин С.Е., Фомин И.В. Применение гравитационно-оптического резонанса для регистрации высокочастотных гравитационных волн. *Радиостроение*, 2021, № 2, с. 13–23. DOI: <https://doi.org/10.36027/rdeng.0221.0000190>