

МЕТОД ГЕНЕРИРОВАНИЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ПОСРЕДСТВОМ СИСТЕМЫ СТОЯЧИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

А.Н. Морозов
И.В. Фомин
В.О. Гладышев
В.Л. Кауц
Е.А. Шарандин
А.В. Каютенко

amor@bmstu.ru
fomin_iv@bmstu.ru
gladyshhev@bmstu.ru
kauts@bmstu.ru
shar@bmstu.ru
akayutenko@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрен метод генерирования гравитационных волн посредством системы стоячих электромагнитных волн на разностной частоте в электромагнитных резонаторах и их дальнейшей регистрации на основе различных типов детекторов. В качестве фактора амплификации амплитуды гравитационных волн, индуцированных предложенным способом, рассмотрена обратная зависимость их амплитуды от квадрата разностной частоты. Это является следствием уравнений Эйнштейна для изученной конфигурации электромагнитных полей в резонаторе. Сопоставлены характеристики гравитационных волн, связанных с электромагнитным полем внутри резонатора, и гравитационных волн в пустом пространстве. Исследована возможность проведения эксперимента по генерированию и детектированию гравитационных волн с контролируемыми параметрами источника и детектора (опыта Герца) на основе предложенного метода. Рассмотрены различные типы существующих и перспективных детекторов низкочастотных гравитационных волн и получена оценка характеристик источника, которые необходимы для успешного детектирования гравитационных волн, генерируемых посредством указанного метода. Эффективность предложенного подхода сопоставлена с другими методами генерирования гравитационных волн. Отмечена специфика рассмотренного метода генерирования гравитационных волн, связанная с возможностью получения

Ключевые слова

*Гравитационные волны,
метрический тензор,
электромагнитные волны,
стоячая волна, электромаг-
нитный резонатор*

в лабораторных условиях низкочастотных гравитационных волн с частотой, близкой к частоте гравитационных волн астрофизических источников, и амплитудой, существенно превышающей амплитуду высокочастотных гравитационных волн, которые можно генерировать на основе ранее предложенных методов

Поступила 09.11.2021

Принята 13.12.2021

© Автор(ы), 2022

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (проект РНФ № 19-12-00242 «Конверсия электромагнитных и гравитационных волн в нелинейной диэлектрической среде при облучении интенсивным источником света»)

Введение. В настоящее время в качестве источников гравитационно-волнового излучения рассматривают различные астрофизические процессы [1] и космологические возмущения в ранней вселенной [1, 2]. Гравитационные волны, возникшие вследствие слияния черных дыр и нейтронных звезд, обнаружены в экспериментах LIGO и Virgo [3, 4] на основе интерференционного метода, предложенного в [5]. Реликтовые гравитационные волны космологического генезиса пока не обнаружены. В качестве источников также рассматривают различные лабораторные источники гравитационных волн, основанные на взаимодействии электромагнитного излучения и вещества [6, 7] и на электромагнитном поле как источнике гравитационных волн [8–13]. Таким образом, гравитационно-волновые флуктуации метрики пространства–времени индуцируются как возмущениями среды, так и переменным электромагнитным полем $\delta T_{\mu\nu} = \delta T_{\mu\nu}^{\text{CP}} + \delta T_{\mu\nu}^{\text{EM}}$. Преобладание первого или второго фактора связано со спецификой процесса генерирования гравитационных волн.

Согласно приведенным в [6, 7] оценкам, взаимодействие короткого импульса мощного лазерного излучения и вещества ($\delta T_{\mu\nu}^{\text{CP}} \gg \delta T_{\mu\nu}^{\text{EM}}$) позволяет генерировать высокочастотные гравитационные волны с амплитудой порядка $h_0 \sim 10^{-40}$ для реалистичных параметров эксперимента, что гораздо меньше предела чувствительности современных детекторов $h_0 \sim 10^{-21}$ – 10^{-22} [3, 4].

Тем не менее в [14, 15] показано, что учет процессов конверсии интенсивного лазерного излучения в гравитационную волну в нелинейных диэлектрических средах позволяет рассматривать перечисленные методы генерирования и регистрации высокочастотных гравитационных волн как актуальные. Анализ процессов генерирования гравитационно-волнового излучения посредством электромагнитных полей специальной конфигурации в вакууме $\delta T_{\mu\nu}^{\text{CP}} = 0$, диэлектрических средах $\delta T_{\mu\nu}^{\text{CP}} \neq 0$

и внешнем магнитном поле, проведенный в [16–19], подразумевает возможность получения в лабораторных условиях гравитационных волн с контролируемыми характеристиками, т. е. возможность их усиления.

В настоящей работе в качестве источника гравитационных волн рассмотрены две плоские стоячие электромагнитные волны с частотами ω_1 и ω_2 в резонаторе Фабри — Перо, в качестве фактора амплификации гравитационных волн в контексте предложенного метода — зависимость их амплитуды от разностной частоты стоячих электромагнитных волн $\tilde{\omega} = \omega_1 - \omega_2$ вида $h_0 \sim \tilde{\omega}^{-2}$, которая является следствием уравнений гравитационного поля в рамках линеаризованной теории гравитации Эйнштейна. Изучена возможность непосредственно детектирования низкочастотных гравитационных волн, полученных с использованием предложенного метода, на основе существующих и перспективных детекторов.

Гравитационные волны, индуцированные электромагнитными волнами. Уравнения гравитационного поля в рамках ОТО записываются следующим образом [1]:

$$R_{\mu\nu} = \kappa \left(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} T \right), \quad (1)$$

где $\kappa = 8\pi G/c^4$, G — гравитационная постоянная, c — скорость света в вакууме; $T_{\mu\nu}$ — тензор энергии–импульса источника гравитационного поля; $g_{\mu\nu}$ — метрический тензор, определяющий геометрию пространства–времени, $\mu, \nu = 0, 1, 2, 3$ — индексы; $T = T_{\rho}^{\rho} = g^{\rho\sigma} T_{\rho\sigma}$.

В рамках линеаризованной ОТО слабые гравитационные поля рассматриваются как малые возмущения пространства Минковского [1]:

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}, \quad |h_{\mu\nu}| \ll 1.$$

Для некоторого выделенного направления $x^1 = x$ уравнения гравитационного поля (1) в явном виде записываются так [17–19]:

$$-h_{11,00} + 2h_{01,01} - h_{00,11} + h_{22,00} + h_{33,00} = 2\kappa T_{00}; \quad (2)$$

$$h_{11,00} - 2h_{01,01} + h_{00,11} + h_{22,11} + h_{33,11} = 2\kappa T_{11}; \quad (3)$$

$$h_{22,01} + h_{33,01} = 2\kappa T_{01}, \quad h_{22,11} - h_{22,00} = 2\kappa T_{22}, \quad h_{33,11} - h_{33,00} = 2\kappa T_{33}, \quad (4)$$

где

$$h_{\mu\nu, \sigma\rho} = \frac{\partial^2 h_{\mu\nu}}{\partial x^\sigma \partial x^\rho}; \quad \frac{\partial}{\partial x^0} = \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t}; \quad \frac{\partial}{\partial x^1} = \frac{\partial}{\partial x},$$

и тензор энергии–импульса $T_{\mu\nu}$ удовлетворяет законам сохранения

$$\frac{\partial T^{\mu\nu}}{\partial x^\mu} = 0. \quad (5)$$

В общем случае система уравнений (2)–(5) может иметь решения в виде поперечных гравитационных волн, определяемых компонентами h_{22} и h_{33} , и продольных гравитационных волн h_{00} , h_{10} , h_{01} , h_{11} [16–19].

В вакууме ($T_{\mu\nu} = 0$) приведенные уравнения имеют вид:

$$-h_{11,00} + 2h_{01,01} - h_{00,11} + h_{22,00} + h_{33,00} = 0; \quad (6)$$

$$h_{11,00} - 2h_{01,01} + h_{00,11} + h_{22,11} + h_{33,11} = 0; \quad (7)$$

$$h_{22,01} + h_{33,01} = 0, \quad h_{22,11} - h_{22,00} = 0, \quad h_{33,11} - h_{33,00} = 0. \quad (8)$$

Следствием системы уравнений (6)–(8) является условие, наложенное на компоненты продольных гравитационных волн [19]: $h_{11,00} - 2h_{01,01} + h_{00,11} = 0$. Таким образом, система уравнений (6)–(8) может быть записана так:

$$h_{22,00} + h_{33,00} = 0, \quad h_{22,01} + h_{33,01} = 0, \quad h_{22,01} + h_{33,01} = 0;$$

$$h_{22,11} - h_{22,00} = 0, \quad h_{33,11} - h_{33,00} = 0.$$

Система (6)–(8) имеет решения в виде плоских поперечных гравитационных волн [1]:

$$h_{22} = -h_{33} = h_0 \cos \left[\omega_g \left(t \mp \frac{x}{c} \right) \right], \quad (9)$$

где h_0 , ω_g — амплитуда и частота гравитационных волн в пустом пространстве; знак «–» соответствует случаю распространения волны в положительном направлении $x^1 = x$, знак «+» — в отрицательном.

Следовательно, внутренние решения системы уравнений (2)–(4) для заданного тензора энергии-импульса $T_{\mu\nu}$ соответствуют гравитационному полю, связанному с источником, а решение (9) в виде плоских поперечных гравитационных волн является внешним. Таким образом, сопоставление характеристик связанных и свободных гравитационных волн предполагает выбор определенного типа источников гравитационного поля, требующих гравитационно-волнового решения уравнений (2)–(4). В качестве возможного источника могут рассматриваться электромагнитные волны в различных средах и внешних полях [16–19].

Связь внутренних и внешних решений определяется из условия непрерывности плотности потока энергии гравитационных волн [16–19]:

$$ct^{01} = -\frac{c}{4\kappa} \left(\partial_0 h_{\alpha\beta} \partial_1 h^{\alpha\beta} \right), \quad \alpha, \beta = 1, 2, 3,$$

на границе раздела области, заполненной электромагнитным полем, и пустого пространства $(ct^{01})_{in} = (ct^{01})_{out}$ в случае полного поглощения электромагнитной волны некоторой поверхностью.

Следовательно, анализ связанных с электромагнитным полем гравитационных волн представляет интерес как с позиции их отличия от свободных гравитационных волн в пустом пространстве, так и для оценки возможности создания источников наблюдаемых гравитационных волн.

Генерирование гравитационных волн системой стоячих электромагнитных волн. В качестве источника гравитационных волн в [17] рассмотрены стоячие электромагнитные волны в электромагнитном резонаторе длины L с зеркалами, находящимися в точках $x = -L/2$ и $x = L/2$, и ненулевыми компонентами электрического и магнитного полей:

$$E_y = E_1 \left[\cos \left(\omega_1 \left(t - \frac{x}{c} \right) \right) + \cos \left(\omega_1 \left(t + \frac{x}{c} \right) \right) \right] + E_2 \left[\cos \left(\omega_2 \left(t - \frac{x}{c} \right) \right) + \cos \left(\omega_2 \left(t + \frac{x}{c} \right) \right) \right]; \quad (10)$$

$$H_z = H_1 \left[\cos \left(\omega_1 \left(t - \frac{x}{c} \right) \right) - \cos \left(\omega_1 \left(t + \frac{x}{c} \right) \right) \right] + H_2 \left[\cos \left(\omega_2 \left(t - \frac{x}{c} \right) \right) - \cos \left(\omega_2 \left(t + \frac{x}{c} \right) \right) \right], \quad (11)$$

где $E_1 = H_1$; $E_2 = H_2$.

Ненулевые компоненты тензора энергии-импульса:

$$T_{00} = T_{11} = \frac{E_1 E_2}{4\pi} \left[\cos \left(\tilde{\omega} \left(t - \frac{x}{c} \right) \right) + \cos \left(\tilde{\omega} \left(t + \frac{x}{c} \right) \right) \right]; \quad (12)$$

$$T_{01} = T_{10} = -\frac{E_1 E_2}{4\pi} \left[\cos \left(\tilde{\omega} \left(t - \frac{x}{c} \right) \right) - \cos \left(\tilde{\omega} \left(t + \frac{x}{c} \right) \right) \right]. \quad (13)$$

Здесь $\tilde{\omega} = \omega_1 - \omega_2$ — разностная частота. Тензор энергии-импульса с компонентами (12), (13) удовлетворяет законам сохранения (5).

В таком случае точные решения уравнений гравитационного поля (3)–(5) имеют вид [17]:

$$h_{00} = h_{11} = -\frac{4GE_1 E_2}{c^3 \tilde{\omega}} \left(\frac{L}{2} + x \right) \sin \left(\tilde{\omega} \left(t - \frac{x}{c} \right) \right) - \frac{4GE_1 E_2}{c^3 \tilde{\omega}} \left(\frac{L}{2} - x \right) \sin \left(\tilde{\omega} \left(t + \frac{x}{c} \right) \right);$$

$$\begin{aligned}
 h_{01} = h_{10} &= \frac{4GE_1E_2}{c^3\tilde{\omega}} \left(\frac{L}{2} + x \right) \sin \left(\tilde{\omega} \left(t - \frac{x}{c} \right) \right) - \\
 &- \frac{4GE_1E_2}{c^3\tilde{\omega}} \left(\frac{L}{2} - x \right) \sin \left(\tilde{\omega} \left(t + \frac{x}{c} \right) \right); \\
 h_{22} + h_{33} &= -\frac{4GE_1E_2}{c^2\tilde{\omega}^2} \cos \left(\tilde{\omega} \left(t - \frac{x}{c} \right) \right) - \frac{4GE_1E_2}{c^2\tilde{\omega}^2} \cos \left(\tilde{\omega} \left(t + \frac{x}{c} \right) \right).
 \end{aligned}$$

Внешние гравитационно-волновые решения [17]:

$$h_{22} = -h_{33} = \frac{2GE_1E_2}{c^2\tilde{\omega}^2} \cos \left(\tilde{\omega} \left(t \mp \frac{x}{c} \right) \right) = h_0 \cos \left(\tilde{\omega} \left(t \mp \frac{x}{c} \right) \right). \quad (14)$$

Таким образом, метрика пространства–времени в окрестности электромагнитного резонатора, заполненного двумя стоячими электромагнитными волнами, определяется как

$$\begin{aligned}
 ds^2 &= c^2 dt^2 - dx^2 - \left[1 - h_0 \cos \left(\tilde{\omega} \left(t \mp \frac{x}{c} \right) \right) \right] dy^2 - \\
 &- \left[1 + h_0 \cos \left(\tilde{\omega} \left(t \mp \frac{x}{c} \right) \right) \right] dz^2,
 \end{aligned}$$

т. е. содержит только компоненты одного из видов поляризации $h_+(x, t) = h_0 \cos(\tilde{\omega}(t \mp x/c))$ гравитационной волны и является диагональной.

В этом случае отношение амплитуд связанных продольных и свободных поперечных гравитационных волн составляет

$$r_{gw} \equiv \frac{h_0^{(c)}}{h_0} \approx \frac{\tilde{\omega}L}{c} = 2\pi \left(\frac{L}{\lambda_{gw}} \right).$$

Для малой разностной частоты, такой что $(\tilde{\omega}L/c) \ll 1$, получим $r_{gw} \ll 1$, т. е. основная часть гравитационного поля при дальнейшем распространении гравитационной волны после поглощения электромагнитной находится вне источника в виде низкочастотных поперечных гравитационных волн с частотой $\omega_{gw} = \tilde{\omega}$.

Соотношение между параметрами источника и детектора гравитационных волн. В рамках задачи генерирования и детектирования гравитационных волн контролируемые параметрами источника являются напряженности электрического поля $E_1 = E_2 = E_0$ в резонаторе и их разностная частота $\tilde{\omega}$, а контролируемым параметром детектора — амплитуда регистрируемых гравитационных волн h_0 .

Рассматривая генерирование стоячих электромагнитных волн с компонентами (10), (11) с использованием лазерного излучения в электромагнитном резонаторе, напряженность электрического поля внутри резонатора определяем следующим образом:

$$E_0^2 = \frac{8\pi}{c} I_L Q = \frac{8\pi}{c} \left(\frac{P_L}{S} \right) Q,$$

где Q — добротность резонатора; P_L — мощность лазера накачки резонатора; S — площадь поперечного сечения пучка. С учетом $f_{gw} = \tilde{f} = \tilde{\omega}/(2\pi)$ из (14) получим выражение для оценки разностной частоты:

$$f_{gw} = \tilde{f} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{G}{c^3} \frac{P_L}{S} Q \right)^{1/2} h_0^{-1/2}.$$

Оценка мощности лазерного излучения:

$$P_L = \left(\frac{\pi c^3}{4G} \right) \frac{S h_0}{Q} \tilde{f}^2. \quad (15)$$

Принимая площадь поперечного сечения пучка $S \approx 1 \text{ см}^2 = 10^{-4} \text{ м}^2$ и добротность резонатора $Q = 10^6$, из (15) получаем

$$P_L \approx 3 \cdot 10^{25} h_0 \left(\frac{\tilde{f}}{\text{Гц}} \right)^2. \quad (16)$$

Выражение (16) определяет связь параметров источника и детектора при реализации опыта Герца, т. е. эксперимента по генерированию и детектированию гравитационных волн с контролируемыми характеристиками источника и детектора.

Оценки параметров источника и детекторов гравитационных волн. Рассмотрим оценки мощности лазерного излучения, необходимой для реализации эксперимента на основе некоторых методов детектирования гравитационных волн.

Применим интерферометрический метод для регистрации гравитационных волн, основанный на наблюдении влияния гравитационного излучения на интерференционную картину в интерферометрах Майкельсона [3, 4].

В случае низкочастотных гравитационных волн частота лазерного излучения в интерферометре существенно превышает частоту гравитационных волн $\Omega \gg f_{gw}$, т. е. длина гравитационной волны существенно превосходит размеры плеч $\lambda_{gw} \gg L$.

Для интерферометров LIGO и KAGRA максимальная чувствительность $h_0 \approx 10^{-23}$ достигается на частоте $f_{gw} \approx 100 \dots 300 \text{ Гц}$ [20]. Рассмат-

ривая эти значения в качестве оптимальных, из (16) получаем мощность лазерного излучения $P_L \approx 3 \cdot (10^6 - 10^7)$ Вт, необходимую для реализации опыта Герца на основе предложенного метода генерирования гравитационных волн.

Отметим, что новое поколение проектируемых наземных гравитационно-волновых антенн подразумевает чувствительность $h_0 \approx 10^{-25}$ на частоте $f_{gw} \sim 100$ Гц (Einstein Telescope) [21] и $h_0 \approx 10^{-26}$ на частоте $f_{gw} \sim 10^3$ Гц (NEMO) [22]. Таким образом, необходимая мощность лазера накачки резонатора оценивается как $P_L \approx 3 \cdot (10^4 - 10^5)$ Вт.

В качестве детектора гравитационных волн в [23] предложено измерение электрического поля в сверхпроводниках, возникающего под действием гравитационной волны. На резонансной частоте (соответствующей собственной частоте колебаний ионов сверхпроводника) $f_{gw} \approx 10^3$ Гц чувствительность детекторов оценивалась как $h_0 \approx 10^{-24}$. Тогда мощность лазерного излучения, необходимая для реализации опыта Герца, $P_L \approx 3 \cdot 10^7$ Вт.

Оценка влияния упругих деформаций кристаллической решетки в поле плоской гравитационной волны на оптические свойства кристалла проведена в [24, 25]. В качестве метода детектирования в [24] рассмотрено измерение разности фаз $\delta\varphi$ двух лучей, распространяющихся в кристалле ортогонально направлению распространения гравитационной волны, предельная чувствительность таких детекторов также оценивалась как $h_0 \approx 10^{-24}$.

Мощность лазерного излучения источника

$$P_L \approx 3 \cdot 10^7 \left(\frac{\tilde{f}}{\text{Гц}} \right)^2,$$

т. е. для частоты $\tilde{f} = f_{gw} \approx 10^3$ Гц имеем аналогичную оценку мощности лазерного излучения $P_L \approx 3 \cdot 10^7$ Вт. Тем не менее в отличие от предыдущего метода в рассматриваемом случае возможно детектирование гравитационных волн в более широком диапазоне частоты.

Следовательно, для реализации опыта Герца на основе предложенного метода генерирования гравитационных волн необходим источник лазерного излучения мощностью $P_L \geq 3 \cdot 10^6$ Вт. Хотя мощность современных лазеров достигает гораздо больших значений $P_L \approx 10^{15}$ Вт, такое излучение генерируется в виде коротких импульсов $\tau \leq 1$ нс [26, 27], аналитическое описание которых отличается от рассмотренной модели пло-

ских электромагнитных волн (10), (11). Оценка амплитуды гравитационных волн, индуцируемых подобным коротким импульсом лазерного излучения, рассмотрена в [28] и составляет $h_0 \sim 10^{-37}$.

При работе в непрерывном режиме для генерирования системы стоячих электромагнитных волн с компонентами (10), (11) в электромагнитном резонаторе максимальная мощность лазерного излучения существенно ниже необходимой $P_L \sim 10^3$ Вт [29]. Для такой мощности излучения из (16) получим амплитуду индуцированных гравитационных волн порядка $h_0 \sim 10^{-27}$ (с частотой $f_{gw} \approx 100$ Гц) и $h_0 \sim 10^{-29}$ (с частотой $f_{gw} \approx 10^3$ Гц).

Гравитационные волны, индуцированные системой электромагнитных волн на разностной частоте, не могут быть зарегистрированы современными детекторами, поскольку различие амплитуды таких волн и предела чувствительности современных детекторов составляет 4–5 порядков, а для перспективных детекторов — 2–3 порядка.

Полученный результат можно интерпретировать в качестве технических, а не принципиальных проблем при реализации опыта Герца на основе предложенного метода, которые могут быть решены как использованием возможностей для увеличения характеристик источника, так и улучшения чувствительности детекторов гравитационных волн.

Заключение. Рассмотрены методы генерирования и последующего детектирования гравитационных волн в лабораторных условиях. Источник гравитационных волн — резонатор Фабри — Перо, заполненный двумя стоячими электромагнитными волнами. Настраиваемые характеристики источника — напряженности электрического (и магнитного) поля электромагнитных волн E_1 и E_2 , разностная частота \tilde{f} .

На основе предельной чувствительности в различных экспериментах по детектированию гравитационных волн получены оценки разностной частоты и соответствующей ей мощности лазерного излучения в рамках предложенного метода генерирования гравитационных волн посредством системы электромагнитных волн.

Хотя реалистичные оценки амплитуды низкочастотных гравитационных волн $h_0 \sim 10^{-27} - 10^{-29}$, которые могут быть получены в рамках предложенного метода, не соответствуют возможности их непосредственного детектирования, полученные значения гораздо выше амплитуды высокочастотных гравитационных волн, индуцированных посредством возмущений вещества $h_0 \sim 10^{-40}$ или мощным импульсом лазерного излучения $h_0 \sim 10^{-37}$.

Отметим, что эффект амплификации гравитационных волн на разностной частоте электромагнитных волн $h_0 \sim \tilde{\omega}^{-2}$ может рассматриваться в качестве основы для дальнейших исследований в области методов генерирования гравитационных волн в лабораторных условиях в рамках модификации конфигурации электромагнитных полей в резонаторе и увеличения чувствительности детекторов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Maggiore M. Gravitational waves. Vol. 1. Theory and experiments. Oxford, Oxford Univ. Press, 2007.
- [2] Фомин И.В., Червон С.В., Морозов А.Н. Гравитационные волны ранней вселенной. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018.
- [3] 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>
- [4] Abbott B.P., Abbott P., Abbott T.D., et al. Gravitational waves and gamma-rays from a binary neutron star merger: GW170817 and GRB170817A. *ApJL*, 2017, vol. 848, art. L13. DOI: <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa920c>
- [5] Герценштейн М.Е., Пустовойт В.И. К вопросу об обнаружении гравитационных волн малых частот. *ЖЭТФ*, 1962, т. 43, № 2, с. 605–607.
- [6] Kadlecová H., Klimo O., Weber S., et al. Gravitational wave generation by interaction of high power lasers with matter using shock waves. *Eur. Phys. J. D*, 2017, vol. 71, no. 4, art. 89. DOI: <https://doi.org/10.1140/epjd/e2017-70586-y>
- [7] Fomin I.V., Gladyshev V.O., Gorelik V.S., et al. Laboratory sources of gravitational waves. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1705, art. 012004. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1705/1/012004>
- [8] Грищук Л.П., Сажин М.В. Излучение гравитационных волн электромагнитным резонатором. *ЖЭТФ*, 1973, т. 65, № 2, с. 441–454.
- [9] Грищук Л.П., Сажин М.В. Возбуждение и детектирование стоячих гравитационных волн. *ЖЭТФ*, 1975, т. 68, с. 1569–1582.
- [10] Денисов В.И. Гравитационное поле внутри сферического электромагнитного резонатора. *Вестник Московского университета. Сер. Физика. Астрономия*, 1977, т. 18, № 5, с. 52–57.
- [11] Герценштейн М.Е. Волновой резонанс световых и гравитационных волн. *ЖЭТФ*, 1962, т. 44, № 1, с. 113–114.
- [12] Зельдович Я.Б. Электромагнитные и гравитационные волны в постоянном магнитном поле. *ЖЭТФ*, 1973, т. 65, с. 1311–1315.
- [13] Kolosnitsyn N.I., Rudenko V.N. Gravitational Hertz experiment with electromagnetic radiation in a strong magnetic field. *Phys. Scr.*, 2015, vol. 90, no. 7, art. 074059. DOI: <https://doi.org/10.1088/0031-8949/90/7/074059>

- [14] Gorelik V.S., Pustovoi V.I., Gladyshev V.O., et al. Generation and detection of high frequency gravitational waves at intensive electromagnetic excitation. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2018, vol. 1051, art. 012001.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1051/1/012001>
- [15] Pustovoi V.I., Gladyshev V.O., Kauts V.L., et al. High frequency gravitational waves generation by optical methods. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1557, art. 012034.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1557/1/012034>
- [16] Морозов А.Н., Пустовойт В.И. Генерация и регистрация связанных высокочастотных гравитационных волн. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2020, № 1 (88), с. 46–60.
DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2020-1-46-60>
- [17] Морозов А.Н., Пустовойт В.И., Фомин И.В. О гравитационных волнах, связанных с электромагнитными волнами. *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия*, 2020, № 2, с. 53–63.
- [18] Morozov A.N., Pustovoi V.I., Fomin I.V. Bound gravitational waves in a dielectric medium and a constant magnetic field. *Eur. Phys. J. Plus*, 2020, vol. 135, no. 12, art. 950.
DOI: <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00961-0>
- [19] Morozov A.N., Pustovoi V.I., Fomin I.V. Generation of gravitational waves by a standing electromagnetic wave. *Gravit. Cosmol.*, 2021, vol. 27, no. 1, pp. 24–29.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S020228932101014X>
- [20] Akutsu T., Ando M., Arai K., et al. KAGRA: 2.5 generation interferometric gravitational wave detector. *Nature Astron.*, 2019, vol. 3, no. 1, pp. 35–40.
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41550-018-0658-y>
- [21] Maggiore M., Van den Broeck C., Bartolo N., et al. Science case for the Einstein telescope. *JCAP*, 2020, vol. 2020, art. 050.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2020/03/050>
- [22] Ackley K., Adya V.B., Agrawal P., et al. Neutron star extreme matter observatory: a kilohertz-band gravitational-wave detector in the global network. *Publ. Astron. Soc. Austral.*, 2020, vol. 37, art. 047. DOI: <https://doi.org/10.1017/pasa.2020.39>
- [23] Peng H., Torr D.G. The electric field induced by a gravitational wave in a superconductor: a principle for a new gravitational wave antenna. *Gen. Relat. Gravit.*, 1990, vol. 22, no. 1, pp. 53–59. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00769245>
- [24] Vinet J.Y. Elasto-optical detection of gravitational waves. *Annales de l'I.H.P. Physique Théorique*, 1979, vol. 30, no. 3, pp. 251–262.
- [25] Sabín C., Bruschi D.E., Ahmadi M., et al. Phonon creation by gravitational waves. *New J. Phys.*, 2014, vol. 16, art. 085003.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/8/085003>
- [26] Bagnoud V., Blazevic A., Borneis S., et al. PHELIX: a petawatt-class laser recently commissioned for experiments in plasma and atomic physics. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2009, vol. 194, art. 152028. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/194/15/152028>

[27] Коржиманов А.В., Гоносков А.А., Хазанов Е.А. и др. Горизонты петаваттных лазерных комплексов. *УФН*, 2011, т. 181, № 1, с. 9–32.

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.0181.201101c.0009>

[28] Lageyre P., D’Humieres E., Ribeyre X. Gravitational influence of high power laser pulses. *Phys. Rev. D*, 2021, vol. 105, iss. 10, art. 104052.

DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.105.104052>

[29] Sprangle P., Hafizi B., Ting A., et al. High-power fiber lasers for directed-energy applications. *Appl. Opt.*, 2015, vol. 54, iss. 31, pp. F201–F209.

DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.54.00F201>

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).

Гладышев Владимир Олегович — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, декан факультета «Фундаментальные науки» (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Кауц Владимир Леонидович — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Шарандин Евгений Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Каютенко Александр Викторович — начальник ОТЭ НУК «Фундаментальные науки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Морозов А.Н., Фомин И.В., Гладышев В.О. и др. Метод генерирования гравитационных волн посредством системы стоячих электромагнитных волн. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2022, № 6 (105), с. 90–105.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-6-90-105>

**METHOD FOR GENERATING GRAVITATIONAL WAVES
BY MEANS OF A STANDING ELECTROMAGNETIC
WAVE SYSTEM**

A.N. Morozov

amor@bmstu.ru

I.V. Fomin

fomin_iv@bmstu.ru

V.O. Gladyshev

gladyshev@bmstu.ru

V.L. Kauts

kauts@bmstu.ru

E.A. Sharandin

shar@bmstu.ru

A.V. Kayutenko

akayutenko@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

In this paper, we consider the method of generating gravitational waves by means of a system of standing electromagnetic waves at the difference frequency in electromagnetic resonators and their further registration based on various types of detectors. As a factor of amplification of the amplitude of gravitational waves induced by the proposed method, the inverse dependence of their amplitude on the square of the difference frequency is considered, which is a consequence of Einstein's equations for the studied configuration of electromagnetic fields in the resonator. The characteristics of gravitational waves associated with the electromagnetic field inside the resonator and gravitational waves in empty space are compared. The possibility of conducting an experiment on the generation and detection of gravitational waves with controlled parameters of the source and detector (Hertz experiment) on the basis of the proposed method has been investigated. Various types of existing and promising detectors of low-frequency gravitational waves are considered and an estimate of the source characteristics necessary for the successful detection of gravitational waves generated by this method is obtained. The effectiveness of the proposed approach is compared with other methods of generating gravitational waves. The specificity of the considered method of generating gravitational waves is noted, associated with the possibility of obtaining in laboratory conditions low-frequency gravitational waves with a frequency close to the fre-

Keywords

Gravitational waves, metric tensor, electromagnetic waves, standing wave, electromagnetic resonator

quency of gravitational waves of astrophysical sources
and the amplitude significantly exceeding the amplitude Received 09.11.2021
of high-frequency gravitational waves, which can be Accepted 13.12.2021
generated on the basis of previously proposed methods © Author(s), 2022

The study was supported by grant funds of the Russian Science Foundation (RSF project no. 19-12-00242, The conversion of electromagnetic and gravitational waves in a nonlinear dielectric medium when irradiated with an intense light source)

REFERENCES

- [1] Maggiore M. Gravitational waves. Vol. 1. Theory and experiments. Oxford, Oxford Univ. Press, 2007.
- [2] Fomin I.V., Chervon S.V., Morozov A.N. Gravitatsionnye volny ranney vselennoy [Gravitation waves of the early Universe]. Moscow, BMSTU Publ., 2018.
- [3] 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>
- [4] Abbott B.P., Abbott P., Abbott T.D., et al. Gravitational waves and gamma-rays from a binary neutron star merger: GW170817 and GRB170817A. *ApJL*, 2017, vol. 848, art. L13. DOI: <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa920c>
- [5] Gertsenshteyn M.E., Pustovoyt V.I. On the detection of low-frequency gravitational waves. *ZhETF*, 1962, vol. 43, no. 2, pp. 605–607 (in Russ.).
- [6] Kadlecoá H., Klimo O., Weber S., et al. Gravitational wave generation by interaction of high power lasers with matter using shock waves. *Eur. Phys. J. D*, 2017, vol. 71, no. 4, art. 89. DOI: <https://doi.org/10.1140/epjd/e2017-70586-y>
- [7] Fomin I.V., Gladyshev V.O., Gorelik V.S., et al. Laboratory sources of gravitational waves. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1705, art. 012004. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1705/1/012004>
- [8] Grishchuk L.P., Sazhin M.V. Emission of gravitational waves by an electromagnetic cavity. *ZhETF*, 1973, vol. 65, no. 2, pp. 441–454 (in Russ.).
- [9] Grishchuk L.P., Sazhin M.V. Excitation and detection of standing gravitational waves. *ZhETF*, 1975, vol. 68, pp. 1569–1582 (in Russ.).
- [10] Denisov V.I. The gravitational field inside a spherical electromagnetic resonator. *Moscow Univ. Phys.*, 1977, vol. 32, no. 5, pp. 41–45.
- [11] Gertsenshteyn M.E. Wave resonance of light and gravitational waves. *JETP*, 1962, vol. 14, no. 1, pp. 84–85.
- [12] Zeldovich Ya.B. Electromagnetic and gravitational waves in a stationary magnetic field. *JETP*, 1974, vol. 38, no. 4, pp. 652–654.
- [13] Kolosnitsyn N.I., Rudenko V.N. Gravitational Hertz experiment with electromagnetic radiation in a strong magnetic field. *Phys. Scr.*, 2015, vol. 90, no. 7, art. 074059. DOI: <https://doi.org/10.1088/0031-8949/90/7/074059>

- [14] Gorelik V.S., Pustovoyt V.I., Gladyshev V.O., et al. Generation and detection of high frequency gravitational waves at intensive electromagnetic excitation. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2018, vol. 1051, art. 012001.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1051/1/012001>
- [15] Pustovoyt V.I., Gladyshev V.O., Kauts V.L., et al. High frequency gravitational waves generation by optical methods. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1557, art. 012034.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1557/1/012034>
- [16] Morozov A.N., Pustovoyt V.I. Generation and registration of high-frequency coupled gravitational waves. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2020, no. 1 (88), pp. 46–60 (in Russ.).
DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2020-1-46-60>
- [17] Morozov A.N., Pustovoyt V.I., Fomin I.V. On the gravitational waves coupled with electromagnetic waves. *Prostranstvo, vremya i fundamentalnye vzaimodeystviya* [Space, Time and Fundamental Interactions], 2020, no. 2, pp. 53–63 (in Russ.).
- [18] Morozov A.N., Pustovoyt V.I., Fomin I.V. Bound gravitational waves in a dielectric medium and a constant magnetic field. *Eur. Phys. J. Plus*, 2020, vol. 135, no. 12, art. 950.
DOI: <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00961-0>
- [19] Morozov A.N., Pustovoyt V.I., Fomin I.V. Generation of gravitational waves by a standing electromagnetic wave. *Gravit. Cosmol.*, 2021, vol. 27, no. 1, pp. 24–29.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S020228932101014X>
- [20] Akutsu T., Ando M., Arai K., et al. KAGRA: 2.5 generation interferometric gravitational wave detector. *Nature Astron.*, 2019, vol. 3, no. 1, pp. 35–40.
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41550-018-0658-y>
- [21] Maggiore M., Van den Broeck C., Bartolo N., et al. Science case for the Einstein telescope. *JCAP*, 2020, vol. 2020, art. 050.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2020/03/050>
- [22] Ackley K., Adya V.B., Agrawal P., et al. Neutron star extreme matter observatory: a kilohertz-band gravitational-wave detector in the global network. *Publ. Astron. Soc. Austral.*, 2020, vol. 37, art. 047. DOI: <https://doi.org/10.1017/pasa.2020.39>
- [23] Peng H., Torr D.G. The electric field induced by a gravitational wave in a superconductor: a principle for a new gravitational wave antenna. *Gen. Relat. Gravit.*, 1990, vol. 22, no. 1, pp. 53–59. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00769245>
- [24] Vinet J.Y. Elasto-optical detection of gravitational waves. *Annales de l'I.H.P. Physique Théorique*, 1979, vol. 30, no. 3, pp. 251–262.
- [25] Sabín C., Bruschi D.E., Ahmadi M., et al. Phonon creation by gravitational waves. *New J. Phys.*, 2014, vol. 16, art. 085003.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/8/085003>
- [26] Bagnoud V., Blazevic A., Borneis S. PHELIX: a petawatt-class laser recently commissioned for experiments in plasma and atomic physics. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2009, vol. 194, art. 152028. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/194/15/152028>

[27] Korzhimanov A.V., Gonoskov A.A., Khazanov E.A., et al. Horizons of petawatt laser technology. *Phys.-Usp.*, 2011, vol. 54, no. 1, pp. 9–28.

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.0181.201101c.0009>

[28] Lageyre P., D’Humieres E., Ribeyre X. Gravitational influence of high power laser pulses. *Phys. Rev. D*, 2021, vol. 105, iss. 10, art. 104052.

DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.105.104052>

[29] Sprangle P., Hafizi B., Ting A., et al. High-power fiber lasers for directed-energy applications. *Appl. Opt.*, 2015, vol. 54, iss. 31, pp. F201–F209.

DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.54.00F201>

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).

Gladyshev V.O. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Head of the Faculty of Fundamental Sciences (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Kauts V.L. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Assoc. Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Sharandin E.A. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Assoc. Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Kayutenko A.V. — Head of Department, Scientific and Educational Complex Fundamental Sciences, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Morozov A.N., Fomin I.V., Gladyshev V.O., et al. Method for generating gravitational waves by means of a standing electromagnetic wave system. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2022, no. 6 (105), pp. 90–105 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-6-90-105>