

## Подавление эффекта параметрической неустойчивости в гравитационно-волновом детекторе LIGO Voyager

С. Е. Стрыгин<sup>1, \*</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, кафедра физики колебаний  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 15.03.2024; после доработки 26.04.2024; подписана в печать 05.05.2024)

Проведен расчет числа неустойчивых комбинаций упругих и стоксовых оптических мод гравитационно-волнового детектора LIGO Voyager, частот и пространственных распределений векторов смещений упругих мод зеркал. Рассчитаны значения коэффициентов перекрытия неустойчивых мод вплоть до оптических мод девятого порядка с учетом азимутального условия параметрической неустойчивости. Выполнен анализ влияния температурной зависимости модуля Юнга материала зеркал на число неустойчивых мод в резонаторе Фабри–Перо.

PACS: 42.50.Wk, 42.65.Es, 43.40.+s, 46.40.-f УДК: 535.3, 534.01

Ключевые слова: гравитационно-волновые детекторы, параметрическая неустойчивость.

DOI: 10.55959/MSU0579-9392.79.2440301

### ВВЕДЕНИЕ

Гравитационные волны впервые были обнаружены гравитационно-волновым детектором LIGO [1] в 2015 г. после того, как 100 лет назад они были предсказаны А. Эйнштейном [2]. В настоящее время в мире осуществляют свою успешную работу несколько гравитационно-волновых детекторов с разными характеристиками, например такие, как LIGO [3, 4], VIRGO [5, 6], GEO [7], KAGRA [8]. Одновременно с этими детекторами разрабатываются проекты гравитационных детекторов третьего поколения: Телескоп Эйнштейна (Einstein Telescope) [9] и Cosmic Explorer [10] — проект космического детектора гравитационных волн. Все эти гравитационные детекторы должны будут начать свою работу в недалеком будущем. Среди гравитационно-волновых детекторов также есть криогенные детекторы — LIGO Voyager, KAGRA, которые сейчас находятся в процессе своей полной модернизации. Данные детекторы функционируют при низких температурах с целью подавления в них разного рода тепловых шумов (например, тепловые шумы в зеркалах и отражающих покрытиях, в подвесах и др.).

Для существенного увеличения чувствительности гравитационно-волновых детекторов необходимо также иметь большие значения циркулирующей мощности в резонаторах Фабри–Перо, расположенных в плечах детекторов. Однако большие значения циркулирующей мощности могут стать источником нелинейных эффектов, которые, в свою очередь, не позволят достигнуть планируемой чувствительности для регистрации гравитационных волн.

Хорошо известно, что нелинейное взаимодействие упругих и световых волн в непрерывной среде приводит к рассеянию Манделштама–Бриллюэна, когда один квант основной оптической волны  $\hbar\omega_0$  распадается на квант дополнительной оптической волны  $\hbar\omega_1$  (стоксовая мода,  $\omega_0 > \omega_1$ ) и фонon упругой волны  $\hbar\omega_m$  так, чтобы выполнялось равенство  $\hbar\omega_0 = \hbar\omega_1 + \hbar\omega_m$ . Если мощность основной волны накачки достаточно велика, то возникнет вынужденное рассеяние, а амплитуды упругой и стоксовой мод соответственно значительно возрастут.

Аналогичное явление наблюдается и в гравитационно-волновых детекторах, когда упругие колебания зеркал резонаторов Фабри–Перо (механические степени свободы) взаимодействуют с оптическими модами в резонаторе благодаря пондеромоторной оптической силе светового давления, действующей на поверхность зеркал. Любые две оптические моды внутри резонатора будут играть роль основной и стоксовой мод соответственно. При больших добротностях оптических и упругих мод увеличивается эффективность взаимодействия между ними, что ведет к появлению параметрической неустойчивости (ПН). Данный эффект имеет пороговый характер и возникает при превышении значения циркулирующей мощности  $W$  определенного порогового значения при условии, что разность частот основной оптической моды и стоксовой моды близка к частоте упругой моды колебаний зеркала.

Для резонатора Фабри–Перо условие наступления ПН имеет следующий вид [11]:

$$\mathcal{R} = \frac{16\pi W}{c\lambda m\phi\omega_m^2 T} \times \frac{\Lambda_1}{1 + \frac{\Delta^2}{\gamma_1^2}} > 1, \quad (1)$$

$$\Lambda_1 = \frac{V \left( \int A_0 A_1 u_z dS \right)^2}{\int |A_0|^2 dS \int |A_1|^2 dS \int |\vec{u}|^2 dV},$$

\* E-mail: strigin@physics.msu.ru

где  $c$  — скорость света в вакууме,  $m$  — масса зеркала,  $\phi$  — угол потерь материала зеркал,  $W$  — циркулирующая мощность в резонаторе Фабри–Перо (в основной моде),  $\lambda$  — длина волны основной оптической моды,  $T$  — эффективный коэффициент пропускания зеркал (по мощности),  $\gamma_1$  — коэффициент затухания стоксовой оптической моды,  $\Delta = \omega_0 - \omega_1 - \omega_m$  — величина расстройки,  $\Lambda_1$  — коэффициент перекрытия основной, стоксовой оптических мод и упругой моды,  $A_0, A_1$  — функции распределения светового поля по сечению пучка основной и стоксовой мод,  $u_z$  — перпендикулярная к поверхности цилиндрического зеркала компонента вектора смещения  $\vec{u}$  упругой моды,  $\int dS, \int dV$  соответствуют интегрированию по поверхности зеркала и по объему зеркала  $V$ .

При возникновении ПН происходит лавинообразное нарастание амплитуд упругих колебаний зеркала, что было предсказано и подробно описано в [11, 12]. Параметрическая неустойчивость была экспериментально обнаружена в [13].

Параметрическая неустойчивость является серьезной проблемой для всех гравитационно-волновых детекторов, поэтому необходимо, с одной стороны, проанализировать возможные комбинации упругих и оптических мод, приводящих к данной неустойчивости, а с другой стороны, иметь надежные методы для подавления выявленных неустойчивостей. В настоящее время существуют несколько основных методов подавления параметрической неустойчивости. Один из первых предложенных методов подавления ПН заключается в механическом воздействии на положение зеркал через электростатическое управление контроля положения зеркал и их ориентации в пространстве [14]. Для минимизации числа неустойчивых мод также предлагались методы изменения температуры зеркал резонатора Фабри–Перо (локальный нагрев), так называемый эффект термолинзирования при помощи кольцевых нагревателей. Такого рода нагревание приводит к изменению радиуса кривизны зеркал и, как следствие, к уменьшению количества неустойчивых мод [15–17]. В последующем методы изменения радиуса кривизны зеркал были еще усовершенствованы [14, 18]. Однако тепловое изменение радиуса кривизны зеркал не может быть эффективным для криогенных гравитационно-волновых детекторов.

Пассивный метод подавления параметрической неустойчивости, состоящий в креплении низкоимпедансных демпферов к боковым поверхностям зеркала для уменьшения добротности упругих мод, был предложен в [19]. Данные демпферы упругих мод представляют собой массы, электрически связанные с пьезоэлектрическими преобразователями и подключенные к диссипативному элементу (резистору) [19, 20]. Было показано, что использование данного метода позволяет уменьшить на порядок величину  $\mathcal{R}$ . Однако предложенные методы подавления параметрической неустойчивости за счет изменения радиуса кривизны зеркал детекторов и использования малых демпферов, прикреплен-

ных к боковой поверхности зеркал, не полностью решают данную проблему. Например, остается открытым вопрос использования демпферов в криогенных детекторах (например, в LIGO Voyager) из-за зависимости пьезоэлектрических свойств материала демпферов и слоев клея от температуры. Вопрос выбора материала для демпферов должен быть дополнительно проработан. Важно изучить свойства демпферов и связующих эпоксидных смол при температуре около 123 К.

В работе [21] был предложен метод подавления параметрической неустойчивости в резонаторе Фабри–Перо интерферометра Advanced LIGO, использующий зависимость модуля Юнга материала зеркал от температуры. Изменение модуля Юнга приводит к изменению частот упругих мод зеркал, нарушению условия возбуждения ПН и к возможной минимизации числа неустойчивых мод, ведущих к параметрической неустойчивости.

В настоящей работе рассмотрено явление параметрической неустойчивости в гравитационно-волновом криогенном детекторе LIGO Voyager, найдены неустойчивые комбинации упругих и стоксовых оптических мод гравитационно-волнового детектора, частоты и пространственные распределения векторов смещений упругих мод зеркал, значения коэффициентов перекрытия для всех комбинаций упругих и оптических мод вплоть до оптических мод девятого порядка с учетом азимутального условия параметрической неустойчивости. Также был выполнен анализ влияния температурной зависимости модуля Юнга материала зеркал на число неустойчивых мод в резонаторе Фабри–Перо интерферометра LIGO Voyager.

## 1. ЭФФЕКТ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВОМ ДЕТЕКТОРЕ LIGO VOYAGER

В 2018 г. эффект параметрической неустойчивости был проанализирован в проектируемом подземном гравитационно-волновом детекторе третьего поколения — телескопе Эйнштейна (англ. Einstein Telescope) для зеркал из кремния и сапфира соответственно [22]. При значении циркулирующей мощности равном 3 МВт и длинах плеч 10 км было показано, что существуют 8 неустойчивых упругих мод для зеркал из сапфира и 12 неустойчивых мод для зеркал из кремния в частотном диапазоне до 65 кГц.

Для увеличения чувствительности гравитационно-волновых детекторов и уменьшения уровня тепловых шумов необходимо работать при криогенных температурах. Гравитационно-волновой детектор LIGO Voyager является новым криогенным детектором третьего поколения, работа которого будет происходить при температуре около 123 К. Для минимизации тепловых шумов зеркал и силы радиационного давления выбираются большие

значения диаметра и массы зеркал резонатора Фабри–Перо. Зеркала из плавленого кварца (для детектора Advanced LIGO массой 40 кг при комнатной температуре) здесь заменяются на криогенные зеркала из кремния массой 200 кг соответственно. Материал, из которого изготавливаются зеркала для гравитационно-волновых детекторов, должен удовлетворять многим характеристикам: малый угол механических потерь (лучше уменьшающийся с температурой), малые оптическое поглощение и потери на рассеяние (особенно для криогенных детекторов). Такое изменение материала зеркал диктуется в основном увеличением механических потерь в плавленом кварце при низких температурах. Более того, кремний менее подвержен термолинзированию (изменению радиуса кривизны зеркал) и позволяет использовать большие значения циркулирующей мощности внутри резонатора Фабри–Перо. Стоит также заметить, что выбор материала зеркал с высокой скоростью звука предпочтителен с точки зрения параметрической неустойчивости (приводит к уменьшению данного эффекта).

Температура 123 К выбирается из соображения близкого к нулю коэффициента теплового расширения кремния и минимизации термоупругих шумов [23, 24]. Добротность упругих мод зеркал из кремния при низких температурах увеличивается при уменьшении температуры вплоть до  $10^9$ . Поэтому кремний является перспективным материалом в гравитационно-волновых детекторах третьего поколения, при этом чувствительность детектора LIGO Voyager улучшается в частотном диапазоне от 10 Гц до 10 кГц. Однако кремний является непрозрачным материалом для длины волны излучения 1064 нм, поэтому использование оптических систем из кремния приведет к увеличению длины волны лазера до 2000 нм с циркулирующей мощностью внутри резонатора Фабри–Перо до 3 МВт.

Ранее в рамках исследования параметрической неустойчивости детектора гравитационных волн LIGO Voyager с использованием кремниевых зеркал [23] с добротностью упругих мод зеркал  $Q = 10^7$  (что отражает несколько видов потерь) были обнаружены только две неустойчивые моды с максимальным коэффициентом  $\mathcal{R} \cong 76$ .

В данной работе использовалась модель одиночного резонатора Фабри–Перо, так как любые неустойчивые моды, присутствующие в одиночном резонаторе, будут представлять собой угрозу во всем гравитационно-волновом детекторе. Был проведен расчет числа неустойчивых комбинаций упругих и стоксовых мод: частоты и пространственные распределения векторов смещений упругих мод рассчитывались численно, используя программу COMSOL<sup>®</sup>, на треугольной сетке с числом элементов сетки около 70000 и для параметров из табл. 1. Частоты упругих мод ограничивались частотным диапазоном вплоть до 65 кГц. Расчеты значений коэффициентов перекрытия для всех комбинаций упругих и оптических мод были сде-

ланы вплоть до оптических мод девятого порядка с учетом азимутального условия параметрической неустойчивости. Стоит заметить, что анализ параметрической неустойчивости в каждом случае был проведен с учетом антистоксовых мод, которые могут подавлять параметрические неустойчивости [11]. Также были учтены дифракционные потери стоксовых и антистоксовых оптических мод для оценки коэффициентов затухания оптических мод. Хорошо известно, что модуль Юнга для кремния уменьшается с увеличением температуры, а зависимость измеренного значения модуля Юнга от температуры в широком диапазоне температур (включая 123 К) можно охарактеризовать величиной  $dY/dT \cong -21.6 \times 10^6$  Па/К [25].

Таблица 1. Параметры гравитационно-волнового детектора LIGO Voyager для расчета параметрической неустойчивости

Радиус зеркал $R$	22,5 см
Высота зеркал $H$	55 см
Модуль Юнга $Y$	189 ГПа
Коэффициент Пуассона $\sigma$	0.181
Плотность $\rho$	2332 кг/м <sup>3</sup>
Радиусы кривизны зеркал $R_1, R_2$	1801/2596 м
Длина резонатора Фабри–Перо $L$	4000 м
Коэффициент пропускания (по энергии) $T$	$2 \times 10^{-3}$
Угол потерь $\phi$	$1 \times 10^{-7}$
Длина волны $\lambda$	2000 нм
Масса зеркал $m$	200 кг
Циркулирующая мощность $W$	3 МВт
Скорость света $c$	$3 \times 10^8$ м/с

Малое контролируемое изменение температуры зеркал гравитационно-волнового детектора LIGO Voyager вблизи температуры 123 К, при которой проходит через нуль коэффициент теплового расширения для кремния, может помочь решить проблему параметрической неустойчивости. В детекторах второго поколения, работающих при комнатных температурах, минимизировать количество неустойчивых мод температурными методами можно как за счет изменения радиуса кривизны зеркал, так и за счет температурной зависимости значения модуля Юнга материала зеркал. Стоит отметить, что эти два метода подавления ПН необходимо использовать одновременно. Метод подавления эффекта ПН на основе температурной зависимости значения модуля Юнга может дополнить существующие на сегодняшний день методы подавления ПН и минимизировать число неустойчивых мод детекторов. Например, изменение радиуса кривизны зеркал тепловым воздействием позволяет подавить ПН. Однако из-за большой плотности расположения в спектре упругих мод изменение их частот

при изменении радиуса кривизны зеркал приводит к тому, что одна упругая мода становится устойчивой, а другая мода, наоборот, становится неустойчивой. Кроме того, для криогенных детекторов изменение радиуса кривизны зеркал тепловыми методами будет неэффективным и сложно реализуемым. В свою очередь, изменение частот упругих мод из-за температурной зависимости плотности и коэффициента Пуассона материала зеркал незначительно по сравнению с изменениями, вызванными температурной зависимостью модуля Юнга.

В 2020 г. был выполнен анализ влияния температурной зависимости модуля Юнга материала зеркал на число неустойчивых мод в резонаторе Фабри–Перо интерферометра Advanced LIGO [21]. Было обнаружено 6 неустойчивых упругих мод и показано, что часть мод при малых изменениях температуры зеркал становятся устойчивыми.

В данной работе проанализировано влияние температурной зависимости модуля Юнга материала зеркал на количество неустойчивых мод в детекторе LIGO Voyager и показано, что использование данного метода, наряду с применением других методов подавления ПН, позволяет минимизировать число неустойчивых мод. При расчетах были обнаружены 4 неустойчивые упругие моды в резонаторе Фабри–Перо детектора LIGO Voyager в частотном диапазоне вплоть до 65 кГц. Одна из наиболее «опасных» упругих неустойчивых мод с собственной частотой 12876 Гц при повышении температуры зеркала на  $\Delta T = 20$  К становится устойчивой, при этом упругие моды с частотами 38669 Гц и 51544 Гц становятся устойчивыми уже при повышении температуры на  $\Delta T = 5$  К и  $\Delta T = 7$  К соответственно (см. табл. 2). Стоит заметить, что устойчивая упругая мода с частотой 63303 Гц может стать неустойчивой, если изменение температуры будет происходить в данном диапазоне температур. Изменение температуры в сторону понижения от 123 К приводит также к изменению частот упругих мод и условий выполнения ПН. При этом упругие моды с частотами 32281 Гц, 38669 Гц, 51544 Гц ставятся устойчивыми при изменении температуры на  $\Delta T = -15$  К,  $\Delta T = -6$  К и  $\Delta T = -18$  К соответственно. При этом существуют некоторые неустойчивые упругие моды, которые не могут стать устойчивыми даже при этих малых возможных изменениях температуры. Стоит отметить, что эффективность данного метода подавления ПН обусловлена тем, что все неустойчивые моды с частотами ниже 65 кГц являются слабонеустойчивыми, то есть с малыми (но большими 1) значениями параметра  $\mathcal{R}$ .

Полезно сравнить уровень термоупругих шумов в криогенном детекторе LIGO Voyager при изменениях температуры зеркал с уровнем таких шумов при заданной температуре детектора 123 К и при комнатной температуре соответственно. Как было показано в [26], спектральная плотность термоупругих шумов зависит от коэффициента теплового расширения материала и температуры как  $S \propto (\alpha T)^2$ , где  $\alpha$  — коэффициент теплового рас-

Таблица 2. Параметры неустойчивых мод и изменения температуры зеркал для их подавления

$f_m$ [Гц]	Стоксовая мода	$\Lambda_1$	$\mathcal{R}$	$\Delta T$ [K]
12876	$LG_{10}$	0.081	4.3	+20
32281	$LG_{21}$	0.2	1.3	-15
38669	$LG_{22}$	0.05	5.23	-6; +5
51544	$LG_{40}$	0.66	5.13	-18; +7

ширения материала зеркал. Отношения спектральных плотностей термоупругих шумов при рабочей температуре 123 К детектора LIGO Voyager (и при увеличении температуры на 20 К) и комнатной температуре 293 К для кремния можно оценить исходя из данных о коэффициентах теплового расширения кремния [27]:  $S(143)/S(293) \cong 5 \times 10^{-3}$  и  $S(123)/S(293) \cong 1.3 \times 10^{-6}$ .

Хотя изменение температуры зеркал для подавления параметрической неустойчивости (например, для упругой моды с частотой 12876 Гц на 20 К) приводит к значительному увеличению уровня термоупругого шума по сравнению с уровнем данного шума при рабочей температуре 123 К, однако уровень этого термоупругого шума крайне незначителен по сравнению с его уровнем при комнатной температуре. Кроме того, при меньших изменениях температуры зеркал (например, на 5 К для упругой моды с частотой 38669 Гц) для подавления параметрической неустойчивости уровень вносимого термоупругого шума также значительно снижается. В свою очередь, метод температурной зависимости модуля Юнга для подавления неустойчивых мод как раз и может эффективно использоваться в случае малых изменений температур зеркал.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хотя метод подавления ПН в гравитационно-волновых детекторах из-за температурной зависимости модуля Юнга не дает значительных преимуществ по сравнению с другими методами подавления, данный метод может быть крайне актуальным в будущих криогенных детекторах третьего поколения. При условии, что другие методы не приводят к полному подавлению всех неустойчивых мод (например, останутся единственная неустойчивая упругая мода) или приведут к возникновению новых неустойчивых мод при изменении условия возникновения ПН, метод температурной зависимости модуля Юнга является крайне эффективным. Малые нагревание или охлаждение зеркал являются возможным решением для подавления наиболее опасных отдельных неустойчивых мод и выхода их из резонанса. Малые изменения температуры зеркал дают возможность выбрать в окрестности рабочей температуры 123 К детектора LIGO Voyager

«рабочую температуру» для функционирования детектора без значительного увеличения уровня тепловых шумов, минимизации количества неустойчивых мод и одновременного подавления параметрической неустойчивости для большинства неустойчивых мод. В некоторых случаях требуется изменение температуры всего на несколько градусов, чтобы конкретная неустойчивая мода стала устойчивой.

В свою очередь, для криогенных детекторов (LIGO Voyager, Einstein Telescope) возможно также выбрать оптимальный фиксированный радиус кривизны зеркал (в окрестности утвержденного значения этого параметра) при криогенных температурах с наименьшим числом неустойчивых мод (лучше с единственной неустойчивой модой). После этого можно использовать метод температурной зависимости модуля Юнга для подавления этих неустойчивых мод. При этом, как показано в [16], изменение радиуса кривизны зеркал при измене-

нии температуры характеризуется коэффициентом  $dR/dT \cong 1$  м/К, что приводит к незначительному изменению частот оптических мод в резонаторе  $df/dR \cong 10$  Гц/м. Но даже такие малые изменения частоты могут уменьшить или увеличить число неустойчивых мод. Поэтому необходима более эффективная комбинация известных методов подавления с применением метода температурной зависимости модуля Юнга. Стоит заметить, что малое изменение температурного режима не приводит к большим модификациям и изменениям параметров многих гравитационно-волновых детекторов. Однако выбор оптимального режима работы детекторов при вариации температуры для получения минимального количества неустойчивых мод является крайне важной задачей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-29-11003).

- 
- [1] Abbott B.P., Abbott R., Abbott T.D. et al. // *Phys. Rev. Lett.* **116**, 061102 (2016).
- [2] Einstein A. // *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin (Math. Phys.)* **1916**, 688 (1916).
- [3] Abramovici A., Althouse W.E., Drever R. et al. // *Science* **256**, 325. (1992).
- [4] Aasi J., Abbott B.P., Abbott R. et al. // *Class. Quantum Grav.* **32**, 074001. (2015).
- [5] Bradaschia C., Del Fabbro R., Di Virgilio A. et al. // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **289**, 518. (1990).
- [6] Acernese F., Agathos M., Agatsuma K. et al. // *Class. Quantum Grav.* **32**, 024001. (2015).
- [7] Willke B., Aufmuth P., Aulbert C. et al. // *Class. Quantum Grav.* **19**, 1377. (2002).
- [8] Akutsu T., Ando M., Arai K. et al. // *Prog. Theor. Exp. Phys.* **05A101**. (2020).
- [9] Punturo M., Abernathy M., Acernese F. et al. // *Class. Quantum Grav.* **27**, 194002.(2010).
- [10] Abbott B.P., Abbott R., Abbott, T.D. et al. // *Class. Quantum Grav.* **34**, 044001.(2017).
- [11] Vyatchanin S.P., Strigin S.E. // *Physics-USpekhi* **55**, 1115. (2013).
- [12] Braginsky V.B., Strigin S.E., Vyatchanin S. // *Phys. Lett. A* **287**, 331. (2001).
- [13] Evans M., Gras S., Fritschel et al. // *Phys. Rev. Lett.* **114**, 161102. (2015).
- [14] Blair C., Gras S., Abbott R. et al. // *Phys. Rev. Lett.* **118**, 151102. (2017).
- [15] Zhao C., Ju L., Degallaix J. et al. // *Phys. Rev. Lett.* **94**, 121102. (2005).
- [16] Gras S., Blair D. G., Zhao C. // *Class. Quantum Grav.* **26**, 135012. (2009).
- [17] Degallaix J., Zhao C., Ju L., Blair D.G. // *J. Opt.Soc. Am. B* **24**, 1336. (2007).
- [18] Strigin S.E. // *Phys. Lett. A* **379**, 1671. (2015).
- [19] Biscans S., Gras S., Blair C.D. et al. // *Phys. Rev. D* **100**, 122003. (2019).
- [20] Gras S., Fritschel P., Barsotti L., Evans M. // *Phys. Rev. D* **92**, 082001. (2015).
- [21] Strigin S.E. // *Physics Open* **5**, 100035. (2020).
- [22] Strigin S.E. // *Phys. Lett. A* **382**, 2256. (2018).
- [23] Zhang J., Zhao C., Ju L., Blair D. // *Class. Quantum Grav.* **34**, 055006. (2017).
- [24] Adhikari R.X., Arai K., Brooks A.F. et al. // *Class. Quantum Grav.* **37**, 165003. (2020).
- [25] Chun-Hyung Cho // *Current Appl. Phys.* **9**, 538. (2009).
- [26] Braginsky V.B., Gorodetsky M.L., Vyatchanin S. // *Phys. Lett. A* **264**, 1. (1999).
- [27] Middelmann T., Walkov A., Bartl G., Schodel R. // *Phys. Rev. B* **92**, 174113. (2015).

## Suppression of the Effect of Parametric Instability in the LIGO Voyager Gravitational Wave Detector

S. E. Strigin

*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University  
Moscow 119991, Russia  
E-mail: strigin@physics.msu.ru*

The number of unstable combinations of elastic and Stokes optical modes of the LIGO Voyager gravitational wave detector, frequencies and spatial distributions of displacement vectors of elastic modes of mirrors were calculated. The values of overlap factors for unstable modes up to ninth-order optical modes are calculated, taking into account the azimuthal condition of parametric instability. An analysis of the influence of the

temperature dependence of the Young's modulus of the mirror material on the number of unstable modes in the Fabry-Perot resonator was performed.

PACS: 42.50.Wk, 42.65.Es, 43.40.+s, 46.40.-f

*Keywords:* gravitational wave detectors, parametric instability.

*Received 15 March 2024.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2024. **79**, No. 4. Pp. 462–468.

**Сведения об авторе**

Стрыгин Сергей Евгеньевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: [strigin@physics.msu.ru](mailto:strigin@physics.msu.ru).