

Прототип детектора гравитационных волн для регистрации излучения ранней Вселенной в килогерцовом диапазоне

Г.Н. Измайлов

Московский авиационный институт (НИУ) Москва, Россия

E-mail: gizmailov@mail.ru

Аннотация. Предложен принцип действия детектора и его конструкция, предназначенного для регистрации излучения ранней Вселенной, в рамках гравитационного канала передачи энергии. Новый тип детектора рассматривается как дополнительный инструмент для экспериментального исследования истории космоса. Подчеркивается актуальность проекта и указывается теоретическая возможность существования гравитационных волн в килогерцовом диапазоне частот. Анализируются схемы современных криогенных детекторов, которые могут служить прототипами для разработки нового прибора.

Ключевые слова. реликтовое гравитационное излучение, стохастический гравитационный волновой фон, космические струны, криогеника, магнитокалориметры

Введение Разработка прототипа детектора гравитационных волн (ГВ) в килогерцовом (кГц) диапазоне частот представляет собой перспективное направление в современной физике и астрофизике. Известно, что регистрация реликтового микроволнового излучения, идущего из космоса в 1965 г., подтвердила теорию Большого Взрыва Вселенной и совершила прорыв в познании космоса [1-5]. Использование другого канала передачи энергии может стать важным инструментом для исследования ранней Вселенной, а также для изучения экзотических астрофизических объектов, таких как нейтронные звёзды, чёрные дыры или гипотетические космологические струны [6, 7].
Методы и материалы; результаты
А. Основные принципы работы прототипа ГВ представляют собой уникальный канал передачи информации о событиях во Вселенной. Сверхмассивные чёрные дыры имеют массы до 10 000 000 000 масс Солнца и находятся в центрах галактик. Стохастический ГВ фон создан в ранней Вселенной при наличии первичных чёрных дыр. ГВ с частотами в диапазоне от нескольких сотен герц до нескольких килогерц могут быть вызваны слиянием нейтронных звёзд, колебаниями молодых нейтронных звёзд или другими высокоэнергетическими процессами [7]. В зависимости от динамических параметров, колебания хребта космических струн и их разрывы [8] также могут делать вклад в диапазон среднечастотных ГВ. Промежуточно-массовые чёрные дыры (IMBH), с массами ~ 1000 – 100000 M _☉ пока неуловимы и представляют собой недостающее звено. Когда компактный объект приближается слишком близко к IMBH, он захватывается с излучением гравитационной волны, чтобы в конечном итоге быть проглоченным целиком, когда он пересечёт горизонт событий. Промежуточный процесс – движение масс по спирали, представляет собой отображение искривлённого пространствoвремени и может наблюдаться совместно с существующими гравитационно-волновыми наземными детекторами. ПМЧД могут обнаруживаться совместно с космическими детекторами, что позволит делать многодиапазонную широкополосную гравитационно-волновую астрономию.
Прототип детектора должен быть оптимизирован для регистрации именно этих частот, что отличает его от существующих детекторов (например, LIGO, VIRGO, KAGRA), работающих в более низком частотном диапазоне [9].
Предполагается, что в прототипе детектора используются чувствительные элементы, реагирующие на микроскопические изменения пространствoвремени в кГц – МГц диапазоне.
Мембранные, резонансные и магнестрикционные системы: В качестве чувствительных элементов детекторов используют механические резонаторы или мембраны, которые способны усиливать сигналы гравитационных волн за счёт их собственных колебаний. Эти системы могут быть изготовлены из сверхчистых материалов, таких как кремний или сапфир, для минимизации потерь энергии. Данный тип детектора использует генерацию магнитного отклика материала датчика при его деформации гравитационной волной.
Для достижения высокой чувствительности детектор может использовать криогенные системы, снижающие тепловой шум и повышающие точность измерений. Современные криогенные детекторы, такие как KAGRA (Япония), служат основой для разработки новых технологий.
Б. Возможные схемы реализации Болометрические детекторы: Болометры, чувствительные к изменениям температуры, могут быть адаптированы для регистрации вторичных эффектов гравитационных волн, например, нагрева материала. Альтернативой могут служить наноразмерные механические осцилляторы, охлажденные до сверхнизких температур, могут использоваться для обнаружения малых возмущений пространствoвремени.
В. Целесообразность проекта <i>Научная значимость:</i> Обнаружение гравитационных волн в килогерцовом диапазоне позволит получить новые данные о процессах, происходящих в экстремальных условиях, таких как слияние нейтронных звёзд или коллапс массивных объектов. Это также может помочь проверить теории, выходящие за рамки стандартной модели физики, например, теорию струн или дополнительные измерения.

Технологическая база:
Разработка прототипа стимулирует развитие новых технологий, таких как криогенные системы, квантовая оптика и наномеханика, которые могут найти применение в других областях науки и техники.
Дополнение к существующим экспериментам:
Детектор в кГц диапазоне будет дополнять существующие проекты, такие как LIGO, VIRGO, KAGRA и будущие космические миссии (например, LISA). Это позволит создать более полную картину гравитационно-волнового "неба".

Оценка флуктуации температуры
Определим статистическую температуру при генерации волн энергии δQ стохастическим гравитационно-волновым фоном (СГВФ),

$$T = \frac{\delta Q}{dS},$$

где $dS = k_B \ln W$, k_B – постоянная Больцмана, W – число допустимых энергетических состояний [10]. Полагая, что при генерации рождается два кванта излучения с энергией $h\nu$, где $\nu = 10^6$ Гц

$$\Delta T \simeq 1,40 \cdot 10^{-4} \text{ К}.$$

Результаты
Итак, в криогенной установке с температурой $T < 0,2 \cdot 10^{-4}$ К можно заметить флуктуации температуры, вызванные поглощением ПМГВ. Для этого можно предложить установку из двух перпендикулярно расположенных детекторов и подключение схемы антисовпадений их показаний. В обзоре прототипов установок для регистрации СГВФ указаны схемы [11, 12] существующих и проектируемых магнитокалориметров, при рабочих температурах ниже микрокельвинов.
В качестве механизма передачи энергии гравитона магнитному полю в магнитокалориметрах предлагается возбуждение магнона [13].

Заключение
Прототип детектора ГВ в кГц диапазоне — это многообещающий проект,

Рис. 1 Магнитный калориметр (рис. из статьи [10])

который может значительно расширить наши знания о Вселенной. Используя современные криогенные технологии и квантовые методы, возможно создать прибор, способный зарегистрировать сигналы, недоступные для текущих систем. Реализация такого детектора станет важным шагом в развитии гравитационно-волновой астрономии и откроет новые горизонты в исследовании космоса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] https://ru.wikipedia.org/wiki/Реликтовое_космическое_излучение

[2] Sunyaev R. A., Zel'dovich Y. B. Small-scale fluctuations of relic radiation *Astrophys. Space Sci.*, 1970, vol. 7, № 1 , pp. 3—19.

[3] Komatsu, Eiichiro. New physics from the polarized light of the cosmic microwave background. *Nat. Rev. Phys.*, 2022, vol. 4 (7), pp. 452–469. [arXiv:2202.13919](https://arxiv.org/abs/2202.13919). Bibcode:2022NatRP...4..452K. DOI:10.1038/s42254-022-00452-4.

[4] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2017/summary/>

[5] Agazie G. *et al.* Focus on NANOGrav's 15 yr Data. *ApJL*, 2023, vol. 951, №.1

[6] Sazhin M.V. Opportunities for detecting ultralong gravitational waves. *Sov. Astron. Journal.*,1978, vol. 22, pp. 36—38.

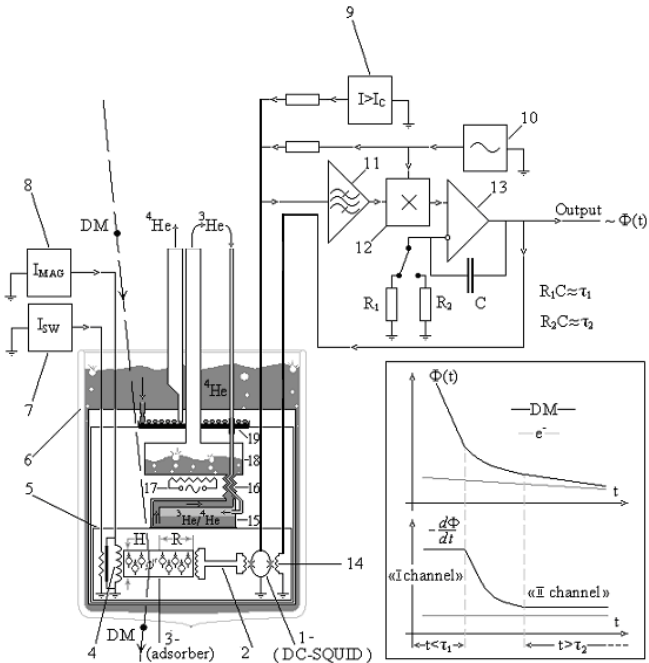
[7] Aggarwal N. et al *Challenges and Opportunities of Gravitational Wave Searches above 10 kHz* //arXiv:2501.11723v1 [gr-qc] 20 Jan 2025

[8] Chitose A., Ibe M., Watanabe K., Shirai S., Nakayama Y., Revisiting Metastable Cosmic String Breaking JHEP 04 (2024) 068
<https://doi.org/10.1007/JHEP04%282024%29068>

[9] Пустовойт В.И., Морозов А.Н., Гладышев В.О., Измайлов Г.Н. Лазерные гравитационно-волновые антенны: Краткий обзор. М., Изд. МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2014.

[10] Киттель Ч. Статистическая термодинамика М., Главн. ред. физ-мат. лит. изд-ва «Наука» 1977г. 366 с.

[11] [Golovashkin](#) A.I., [Izmaïlov](#) G.N. и др. Dark Matter Particle Detection System SQUID - Magnetic Calorimeter. *Am. J. of Modern Phys.*, 2013, vol. 2, Issue 4 pp. 208-216 DOI: 10.11648/j.ajmp.20130204.15.



[12] Egelhof P., Kraft-Bermuth S. Calorimetric low temperature detectors for heavy ion physics and their application in nuclear and atomic physics. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 2023, v. 132, September, 104031 <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2023.104031>2023.

[13] Киттель Ч. Элементарная теория твёрдого тела М., Главн. ред. физ-мат. лит. изд-ва «Наука» 1965г. 368 с.

Prototype of a gravitational wave detector to record radiation from the early Universe in the kilohertz range

Izmaïlov G.N.
MAI, Moscow, Russia

E-mail: gizmailov@mail.ru

Abstract. The operating principle of a detector designed to register radiation of the early Universe within the gravitational energy transfer channel is proposed. This new type of the detector is considered as an alternative tool for experimental study of the history of space. The relevance of the project is emphasized and the theoretical possibility of the existence of gravitational waves in the kilohertz frequency range (IMGW) is indicated. The schemes of modern cryogenic detectors are analyzed, which can serve as prototypes for the development of a new device.

Key words. relic gravitational radiation, stochastic gravitational wave background, cosmological strings, cryogenics, magnetocalorimeters for extreme conditions, such as the merger of neutron stars or the collapse of massive objects.

Introduction

Development of a prototype gravitational wave (GW) detector in the kilohertz (kHz) frequency range is a promising direction in modern physics and astrophysics. It is known that the registration of relic microwave radiation coming from space in 1965 confirmed the Big Bang theory of the Universe and made a breakthrough in the study of space [1-5]. Using another energy transmission channel can become an important and alternative tool for exploring the early Universe, as well as for studying exotic astrophysical objects such as neutron stars, black holes or hypothetical cosmological strings [6, 7, 8]. Supermassive black holes have masses up to 10,000,000,000 solar masses and are located at the centers of galaxies. The stochastic GW background is created in the early Universe by the presence of primordial black holes. GWs with frequencies in the range of a few hundred hertz to a few kilohertz can be caused by neutron star mergers, oscillations of young neutron stars, or other high-energy processes [7]. Depending on the dynamical parameters, oscillations of the cosmic string cord and their breaks [8] can also contribute to the mid-frequency GW range. Intermediate-mass black holes (IMBH), with masses of ~1000 – 100,000 M_⊙, are still elusive and can represent the missing link. When a compact object gets too close to the IMBH, it is captured emitting gravitational wave, eventually to be swallowed whole when it crosses the event horizon. The intermediate process, the spiraling of the masses, is a representation of curved spacetime and can be observed jointly with existing ground-based gravitational wave detectors.

Methods and materials; results

A. *Basic principles of the prototype.*

GW are a unique channel for transmitting information about events in the Universe. Supermassive black holes have masses up to 10,000,000,000 solar masses and are located at the centers of galaxies. The stochastic GW background is created in the early Universe by the presence of primordial black holes. GWs with frequencies in the range of a few hundred hertz to a few kilohertz can be caused by neutron star mergers, oscillations of young neutron stars, or other high-energy processes [7]. Depending on the dynamical parameters, oscillations of the cosmic string ridge and their breaks [8] can also contribute to the mid-frequency GW range. Intermediate-mass black holes (IMBH), with masses of ~1000 – 100,000 M_⊙, are still elusive and represent the missing link. When a compact object gets too close to the IMBH, it is captured by gravitational wave emission, eventually to be swallowed whole when it crosses the event horizon. The intermediate process, the spiraling of the masses, is a representation of curved spacetime and can be observed jointly with existing ground-based gravitational wave detectors.

The detector prototype involves the use of sensitive elements that respond to microscopic changes in spacetime in the kHz range. GWs with frequencies in the range from several hundred hertz to several kilohertz can be caused by neutron star mergers, oscillations of young neutron stars or other high-energy processes [7], vibrations of cosmic strings core and unstable cosmic string breaking [8].

The prototype should be optimized to register these frequencies, which distinguishes it from existing detectors (e.g. LIGO, VIRGO, KAGRA) operating in a lower frequency range [9].

Membrane, resonance and magnetostrictive systems:

Mechanical resonators or membranes have been used as sensitive elements of detectors, which are capable of amplifying gravitational wave signals due to their own oscillations. These systems can be made of ultra-pure materials such as silicon or sapphire to minimize energy losses. This type of detector uses the generation of a magnetic response of the sensor material when it is deformed by a GW.

To achieve high sensitivity, the detector can use cryogenic systems that reduce thermal noise and increase the accuracy of measurements. Modern cryogenic interferometric detectors, such as KAGRA (Japan), serve as a basis for the development of new technologies.

B. *Possible implementation schemes.*

Bolometric detectors: Bolometers are sensitive to temperature changes so its can be adapted to register secondary effects of gravitational waves, such as heating of a material. An alternative is nanoscale mechanical oscillators cooled to ultra-low temperatures, which can be used to detect small disturbances in spacetime.

C. Feasibility of the project.

Scientific significance:

Detection of gravitational waves in the kHz range will provide new data on processes occurring in extreme conditions, such as the merger of neutron stars or the collapse of massive objects or oscillations of cosmic strings. It can also help test theories that go beyond the standard model of physics, such as string theory or extra dimensions.

Technological base:

The development of the prototype will stimulate the development of new technologies such as cryogenic systems, quantum optics and nanomechanics, which could find application in other areas of science and technology.

Addition to existing experiments:

The detector in the kHz range will complement existing projects such as LIGO, VIRGO, KAGRA and future space missions (e.g. LISA). This will allow us to create a more complete scope of the gravitational wave "sky".

D. Evaluation of temperature fluctuations

We will determine the statistical temperature during the generation of energy waves δQ by stochastic GW background

$$T = \frac{\delta Q}{dS},$$

where $dS = k_B \ln W$, k_B is Boltzmann constant, W is the adopted energetic levels number in the system [10]. Assuming that two radiation quanta with energy $h\nu$ are generated during generation, where $\nu = 10^6$ Hz then $\Delta T \approx 1,40 \cdot 10^{-4}$ K.

So, in a cryogenic setup with a temperature of $T < 0.2 \cdot 10^{-4}$ K, temperature fluctuations caused by the absorption of the SGWB can be observed. For this purpose, a setup of two perpendicularly located detectors and the connection by an anticoincidence circuit for their readings can be proposed. In a review of prototype setups for recording the SGWB, schemes [11, 12] of existing and planned magnetocalorimeters are indicated, at operating temperatures below microkelvins.

Magnon excitation [13] is proposed as a mechanism for transferring graviton energy to a magnetic field in magnetocalorimeters.

Conclusion

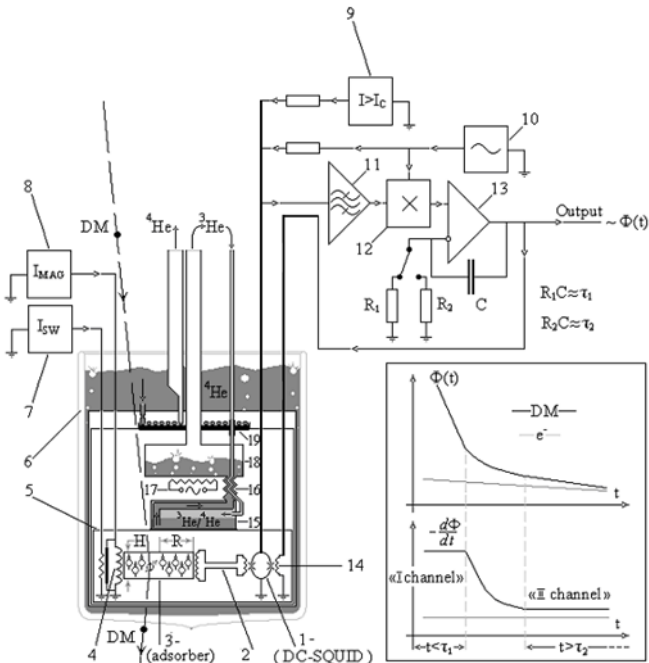
The prototype of the GW detector in the kHz range is a promising project,

Fig. 1 Magnetic calorimeter (fig. from [11])

which can significantly expand our knowledge of the Universe. Using modern cryogenic of registering signals that are inaccessible to current systems. The implementation of such wave astronomy and will open new horizons in space exploration.

References

[1] https://ru.wikipedia.org/wiki/Реликтовое_космическое_излучение
[2] Sunyaev R. A., Zel'dovich Y. B. Small-scale fluctuations of relic
[3] Komatsu, Eiichiro. New physics from the polarized light of the cosmic microwave
[arXiv:2202.13919](https://arxiv.org/abs/2202.13919). Bibcode:2022NatRP...4..452K. DOI:10.1038/s42254-022-00452-
[4] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2017/summary/>
[5] Agazie G. et al. Focus on NANOGrav's 15 yr Data. *ApJL*, 2023, vol. 951, №.1
[6] Sazhin M.V. Opportunities for detecting ultralong gravitational waves. *Sov. Astron. Journal.*,1978, vol. 22, pp. 36—38.



technologies and quantum methods, it is possible to create a device capable a detector will be an important step in the development of gravitational

radiation *Astrophys. Space Sci.*, 1970, vol. 7, № 1 , pp. 3—19.
background. *Nat. Rev. Phys.*, 2022, vol. 4 (7), pp. 452—469.
4.

[7] Aggarwal N. et al *Challenges and Opportunities of Gravitational Wave Searches above 10 kHz* //arXiv:2501.11723v1 [gr-qc] 20 Jan 2025

[8] Chitose A., Ibe M., et al.. Revisiting Metastable Cosmic String Breaking JHEP 04 (2024) 068

<https://doi.org/10.1007/JHEP04%282024%29068>

[9] Пустовойт В.И., Морозов А.Н., Гладышев В.О., Измайлов Г.Н. Лазерные гравитационно-волновые антенны: Краткий обзор. М., Изд. МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2014. Pustovoit V.I. et al Laser GW antennae 2014 (in Russian)

[10] Kittel Ch. Thermal physics J. Willey & Sons Inc. N.Y. 1969, pp. 419.

[11] [Golovashkin](#) A.I., [Izmaïlov](#) G.N. и др. Dark Matter Particle Detection System SQUID - Magnetic Calorimeter. *Am. J. of Modern Phys.*, 2013, vol. 2, Issue 4 pp. 208-216 DOI: 10.11648/j.ajmp.20130204.15.

[12] Egelhof P., Kraft-Bermuth S. Calorimetric low temperature detectors for heavy ion physics and their application in nuclear and atomic physics. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 2023, v. 132, September, 104031 <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2023.1040312023>.

[10] Киттель Ч. Статистическая термодинамика М., Главн. ред. физ-мат. лит. изд-ва «Наука» 1977г. 366 с.

[11] [Golovashkin](#) A.I., [Izmaïlov](#) G.N. и др. Dark Matter Particle Detection System SQUID - Magnetic Calorimeter. *Am. J. of Modern Phys.*, 2013, vol. 2, Issue 4 pp. 208-216 DOI: 10.11648/j.ajmp.20130204.15.

[12] Egelhof P., Kraft-Bermuth S. Calorimetric low temperature detectors for heavy ion physics and their application in nuclear and atomic physics. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 2023, v. 132, September, 104031 <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2023.1040312023>.

[13] Киттель Ч. Элементарная теория твёрдого тела М., Главн. ред. физ-мат. лит. изд-ва «Наука» 1965г. 368 с.

] Kittel Ch. Elementary solid state physics J. Willey & Sons Inc. N.Y. 1962, pp. 339