

УДК 53.05:681.327.11

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

Измайлов Г.Н.

gizmailov@mail.ru

ИРЭ РАН им. В.А. Котельникова, Москва, Россия

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 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, 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 звезды, черные 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. Прототип детектора предполагает использование чувствительных элементов, реагирующих на микроскопические изменения пространствoвремени в кГц диапазоне. ГВ с частотами в диапазоне от нескольких сотен герц до нескольких килогерц могут быть вызваны слиянием нейтронных звезд, колебаниями молодых нейтронных звезд или другими высокоэнергетическими процессами [7].

Прототип должен быть оптимизирован для регистрации именно этих частот, что отличает его от существующих детекторов (например, LIGO, VIRGO, KAGRA), работающих в более низком частотном диапазоне [8].

Мембранные, резонансные и магнитострикционные системы: в качестве чувствительных элементов детекторов используют механические резонаторы или мембраны, которые способны усиливать сигналы гравитационных волн за счет 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. *Научная значимость:* обнаружение гравитационных волн в килогерцовом диапазоне позволит получить новые данные о процессах, происходящих в экстремальных условиях, таких как слияние нейтронных звезд 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 [9]. Полагая, что при генерации рождается два кванта излучения с энергией $\hbar\nu$, 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 СГВФ. 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 [10, 11] существующих и проектируемых магнитокалориметров, при рабочих

температурах ниже микрокельвинов. В качестве механизма передачи энергии гравитона магнитному полю в магнитокалориметрах предлагается возбуждение магнона [12].

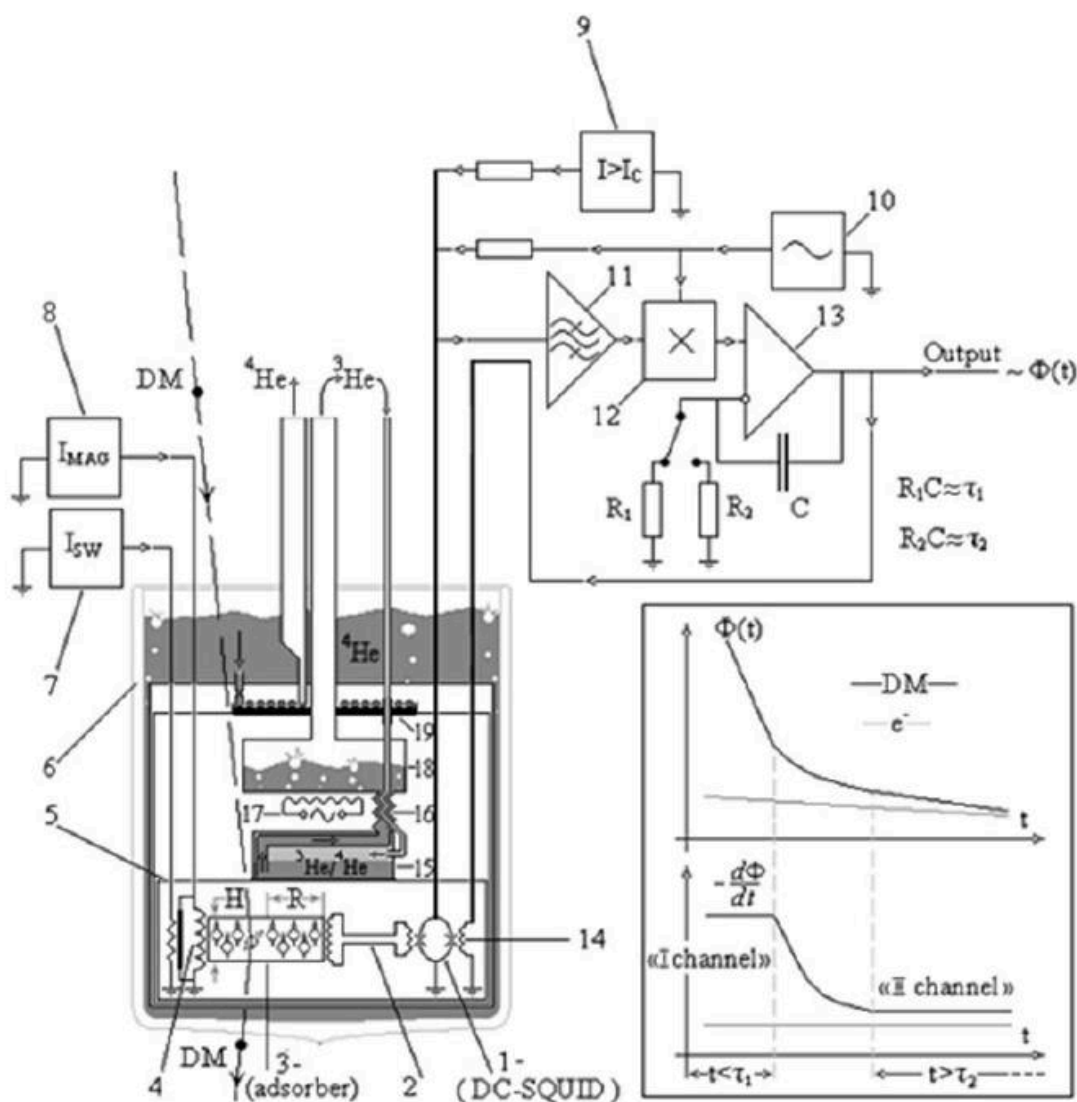


Рис. 1. Магнитный калориметр (рис. из статьи [10])

Заключение. Прототип детектора ГВ в кГц диапазоне — это многообещающий проект, который может значительно расширить наши знания о Вселенной. Используя современные криогенные технологии и квантовые методы, можно 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] *Реликтовое излучение*. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Реликтовое_излучение (дата обращения 15.03.2025).

- [2] Sunyaev R.A., Zel'dovich Y.B. Small-scale fluctuations of relic radiation *Astrophys. Space Sci.*, 1970, vol. 7, no. 1, pp. 3–19.
- [3] Komatsu E. New physics from the polarized light of the cosmic microwave background. *Nat. Rev. Phys.*, 2022, vol. 4 (7), pp. 452–469. <https://doi.org/10.1038/s42254-022-00452-4>
- [4] Nobel Prize in Physics 2017. URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2017/summary/> (accessed 15.03.2025).
- [5] Agazie G. et al. Focus on NANOGrav's 15 yr Data. *ApJL*, 2023, vol. 951, no. 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. *Rev. Rel.*, 2021, vol. 24. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.11723>
- [8] Пустовойт В.И., Морозов А.Н., Гладышев В.О., Измайлов Г.Н. *Лазерные гравитационно-волновые антенны: Краткий обзор*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
- [9] Киттель Ч. *Статистическая термодинамика*. Москва, Главн. ред. физ-мат. лит., 1977, 366 с.
- [10] Golovashkin A.I., Izmailov G.N. et al. Dark Matter Particle Detection System SQUID — Magnetic Calorimeter. *Am. J. of Modern Phys.*, 2013, vol. 2, iss. 4, pp. 208–216. <https://doi.org/10.11648/j.ajmp.20130204.15>
- [11] 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, vol. 132, art. no. 104031. <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2023.104031>
- [12] Киттель Ч. *Элементарная теория твердого тела*. Москва, Главн. ред. физ-мат. лит., 1965, 368 с.

Prototype of a Gravitational Wave Detector to Record Radiation from the Early Universe in the Kilohertz Range

Izmailov G.N.

gizmailov@mail.ru

V.A. Kotelnikov IRE RAS, Moscow, Russia

Abstract. The operating principle of a detector designed to register radiation of the early Universe within the gravitational energy transfer channel is proposed. The new type of the detector is considered as a 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 (SGWR) is indicated. The schemes of modern cryogenic detectors are analyzed, which can serve as prototypes for the development of a new device.

Keywords: relic gravitational radiation, stochastic gravitational wave background, cryogenics, magnetocalorimeters 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 chan-

nel can become an important 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].

Methods and materials; results. A. Basic principles of the prototype. GW are a unique channel for transmitting information about events in the Universe. 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].

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 [8].

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 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.

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”.

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 the Boltzmann constant, W is the adopted energetic levels number in the system [9]. Assuming that two radiation quanta with energy $h\nu$ are generated during generation, where $\nu = 10^6$ Hz,

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

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 [10, 11] of existing and planned magnetocalorimeters are indicated, at operating temperatures below microkelvins.

Magnon excitation [12] is proposed as a mechanism for transferring graviton energy to a magnetic field in magnetocalorimeters.

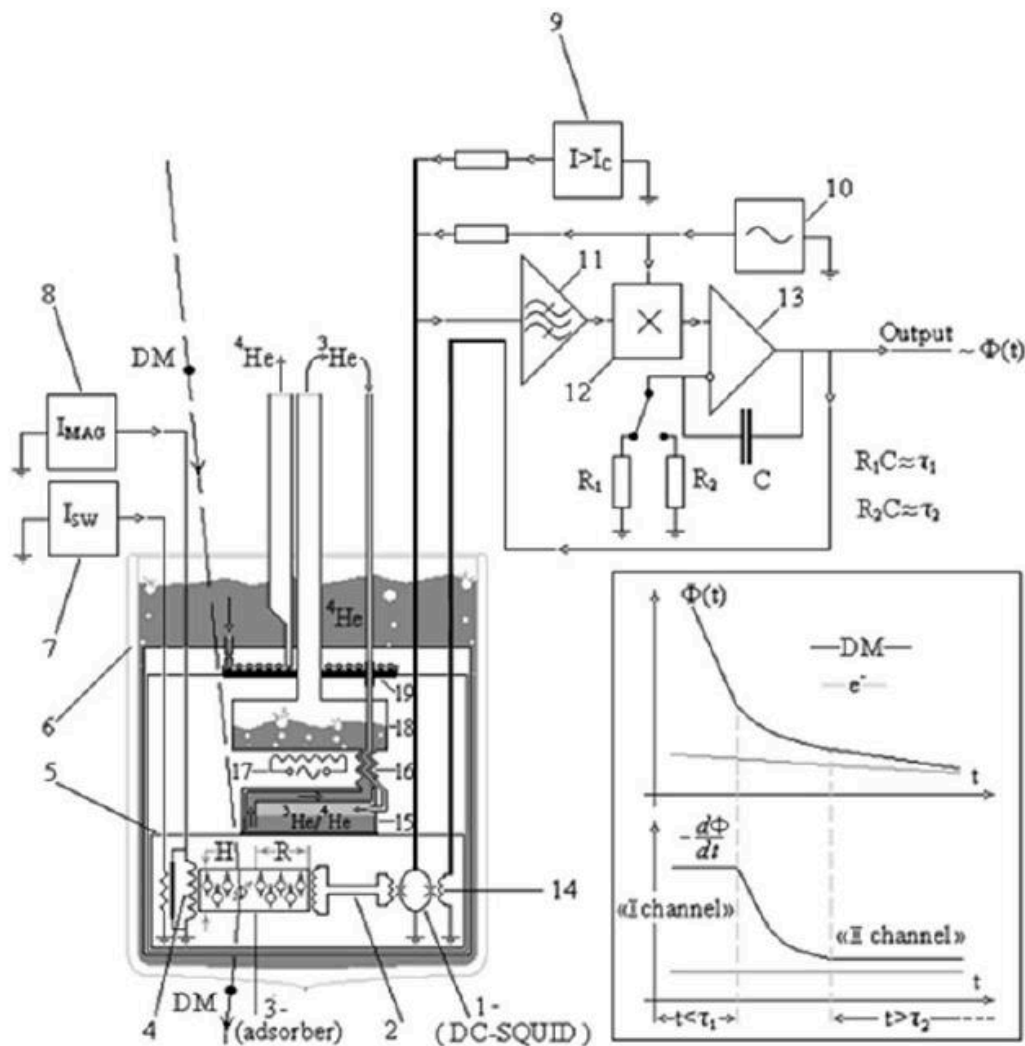


Fig. 1. Magnetic calorimeter (fig. from [10])

Conclusion. The prototype of the GW detector in the kHz range is a promising project, which can significantly expand our knowledge of the Universe. Using

modern cryogenic technologies and quantum methods, it is possible to create a device capable of registering signals that are inaccessible to current systems. The implementation of such a detector will be an important step in the development of gravitational wave astronomy and will open new horizons in space exploration.

References

- [1] Relic radiation. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Реликтовое_излучение (accessed 15.03.2025).
- [2] Sunyaev R.A., Zel'dovich Y.B. Small-scale fluctuations of relic radiation *Astrophys. Space Sci.*, 1970, vol. 7, no. 1, pp. 3–19.
- [3] Komatsu E. New physics from the polarized light of the cosmic microwave background. *Nat. Rev. Phys.*, 2022, vol. 4 (7), pp. 452–469. <https://doi.org/10.1038/s42254-022-00452-4>
- [4] Nobel Prize in Physics 2017. URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2017/summary/> (accessed 15.03.2025).
- [5] Agazie G. et al. Focus on NANOGrav's 15 yr Data. *ApJL*, 2023, vol. 951, no. 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. *Rev. Rel.*, 2021, vol. 24. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.11723>
- [8] Pustovoit V.I., Morozov A.N., Gladyshev V.O., Izmailov G.N. Laser gravitational wave Antennas: A Brief Overview. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2014. (In Russ.).
- [9] Kittel Ch. Thermal physics. J. Willey & Sons Inc., N.Y., 1969, 419 p.
- [10] Golovashkin A.I., Izmailov G.N. et al. Dark Matter Particle Detection System SQUID — Magnetic Calorimeter. *Am. J. of Modern Phys.*, 2013, vol. 2, iss. 4, pp. 208–216. <https://doi.org/10.11648/j.ajmp.20130204.15>
- [11] 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, vol. 132, art. no. 104031. <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2023.104031>
- [12] Kittel Ch. Elementary solid state physics. J. Willey & Sons Inc., N.Y., 1962, 339 p.