

Текущий статус гравитационных установок в подземной лаборатории БНО ИЯИ РАН

**¹Безруков Л.Б., ³Руденко К.В., ²Орешкин С.И.,
²Попов С.М., ^{1,2,3}Руденко В.Н.**

¹ИЯИ РАН, ²ГАИШ МГУ, ³ФизФак МГУ

Аннотация

На пикете ПК-14 Главной штольне БНО **создана лаборатория чистой атмосферы**, обозначенная на плане подземных установок как «камера гравитационных антенн». В данной лаборатории располагаются **две установки для прецизионных гравитационных измерений**. Большая установка **«опто-акустическая гравитационная антенна ОГАН»** представляет собой детектор гравитационного излучения космического происхождения (соответствующий проект развивался в БНО совместно с Институтом Лазерной Физики СО РАН и ГАИШ МГУ). Новая установка **прототип (пилотная модель)** крупно масштабного **кольцевого лазерного интерферометра**, т.н. **«Гироскоп Саньяка»** являющимся чувствительным датчиком гравитации – инерциальных возмущений наземного фона глобального и локального характера. Такие возмущения могут вызываться астро-гео-динамическими и геофизическими эффектами, порождаемыми внутренней гравитацией и термодинамикой Земли, а также её суточным и орбитальным вращением. **С помощью лазерного интерферометра Саньяка возможно получение информации, имеющей ценность параллельно для физики элементарных частиц, квантовой теории поля, лазерной физики, астрометрии, глобальной геодинамики и сейсмологии.** В докладе кратко описаны главные принципы и конструктивные особенности указанных установок. Сформулированы основные пункты программы их использования. Обращено внимание на **расширение программы БНО «детектирование Галактических коллапсаров» за счет совместного поиска «нейтрино-гравитационных корреляций» на детекторах ОГАН и БПСТ.**

Литература

1.V.N. Rudenko, Yu.M. Gavriluk , A.V. Gusev, D.P. Krichevskiy, S.I. Oreshkin, S.M. Popov¹ and I. S. Yudin Gravitational wave detector OGRAN as multi-messenger project of RAS-MSU: International Journal of Modern Physics A Vol. 35, Nos. 2 & 3 (2020) 2040007 (15 pages) © World Scientific Publishing Company DOI: [10.1142/S0217751X20400072](https://doi.org/10.1142/S0217751X20400072)

2. S.Andrusenko , Y.Gavriluk, A.Gusev, D.Krichevskii, S.Oreshkin, S.Popov and V.Rudenko. Search for Gravitational-Neutrino Correlations on Ground-Based Detectors Universe (2022), 8, 446. <https://doi.org/10.3390/universe8090446>

3. В.Н.Руденко, С.И.Орешкин, К.В.Руденко . Измерение глобальных грави-инерциальных эффектов кольцевыми лазерными интерферометрами. УФН т 192, №9, стр. 984 – 1018 (2022) DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.12.039128>

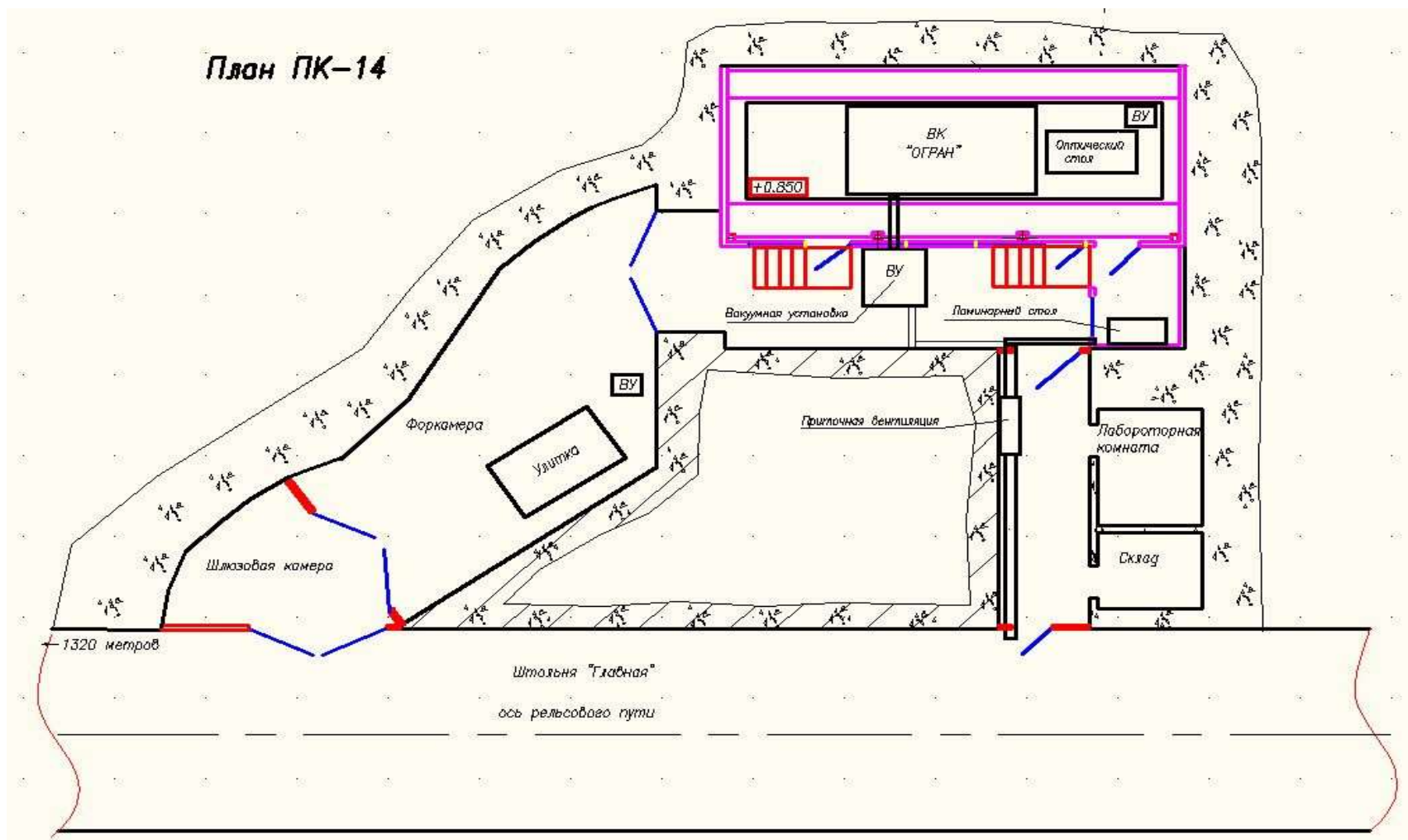


Рис 4 Структура подземной лаборатории ОГРАН

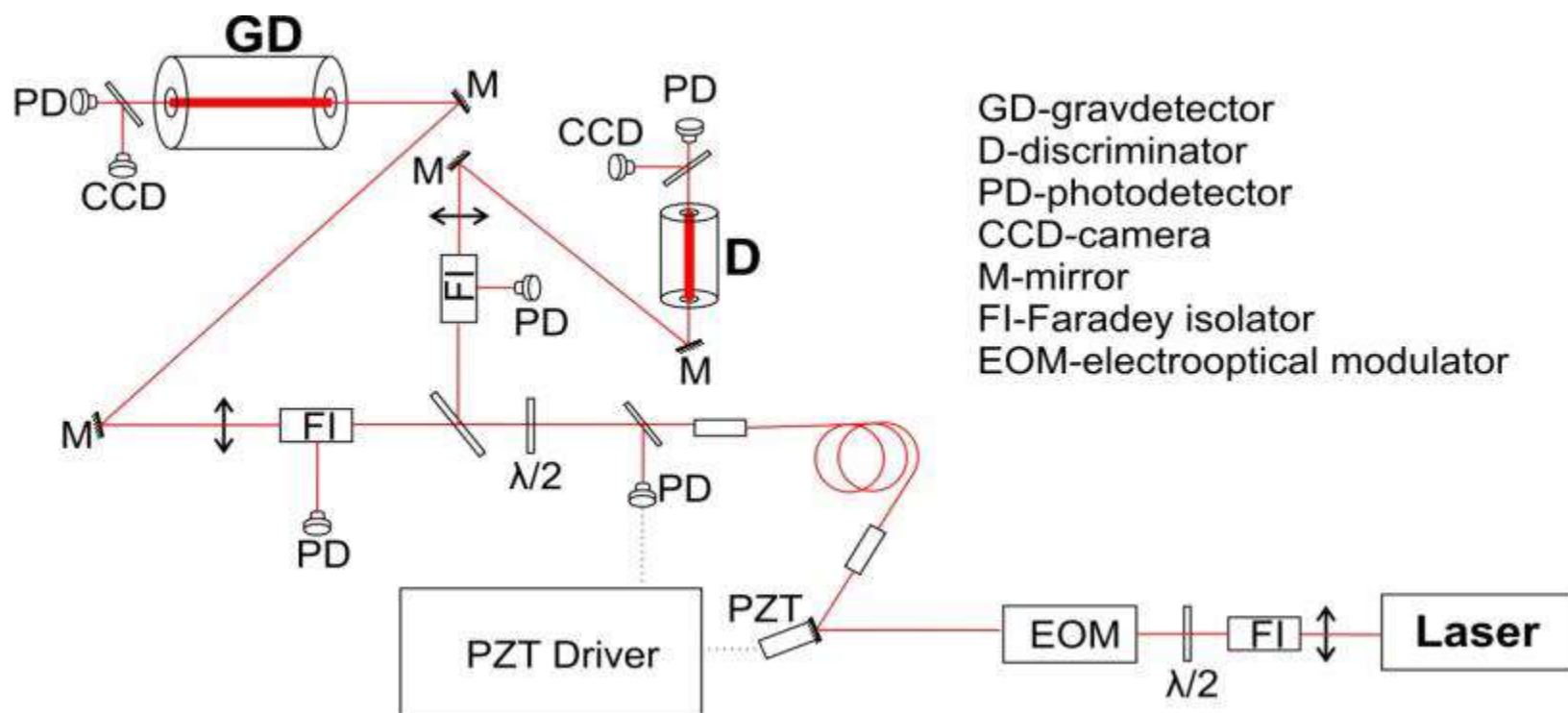


Рис 5 Опто-электронная схема ОГРАН с двумя ФП эталонами высокой резкости, элементами свето провода (цепи контроля рабочей точки и автоподстройкой лазера не показаны)



Рис 6 Вид конструкции детектора ОГРiН на испытательном стенде с кольцом опорной подвески и сейсмо фильтрами



Рис 7 Вид загруженной внешней камеры оптоакустического детектора ОГАН в подземной лаборатории ПК-14 на антисейсмическом фундаменте за защитной панелью (справа).

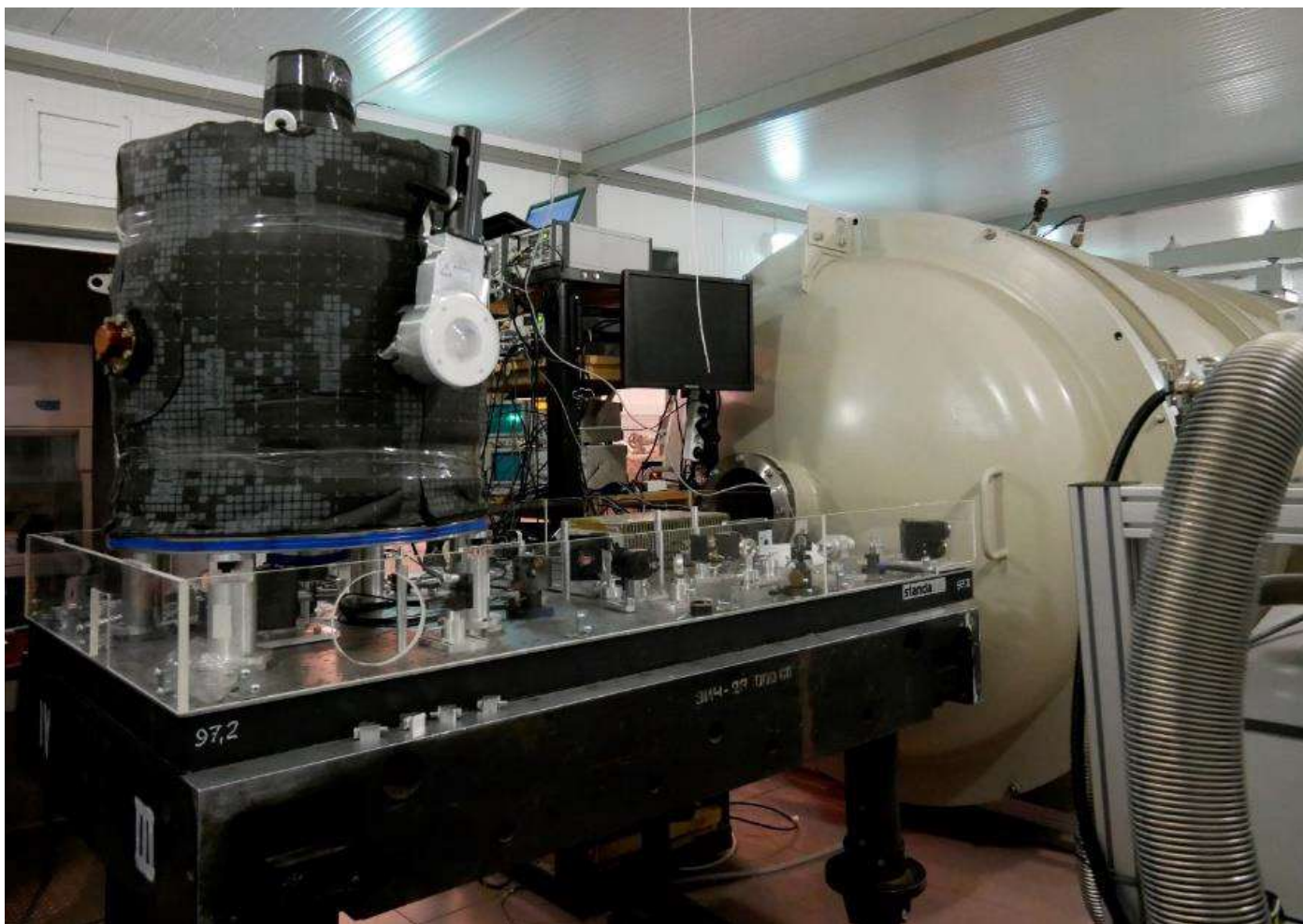


Рис 8 Вид антенны ОГРАН в процессе монтажа с опто-электронными узлами: на оптическом столе установлена камера с опорным резонатором дискриминатора: система откачки (справа) не подключена



Рис 9 Камера ОГРАН (вид с торца) в чехле активного термостата поддерживающего температуру камеры с точностью 0.01 К

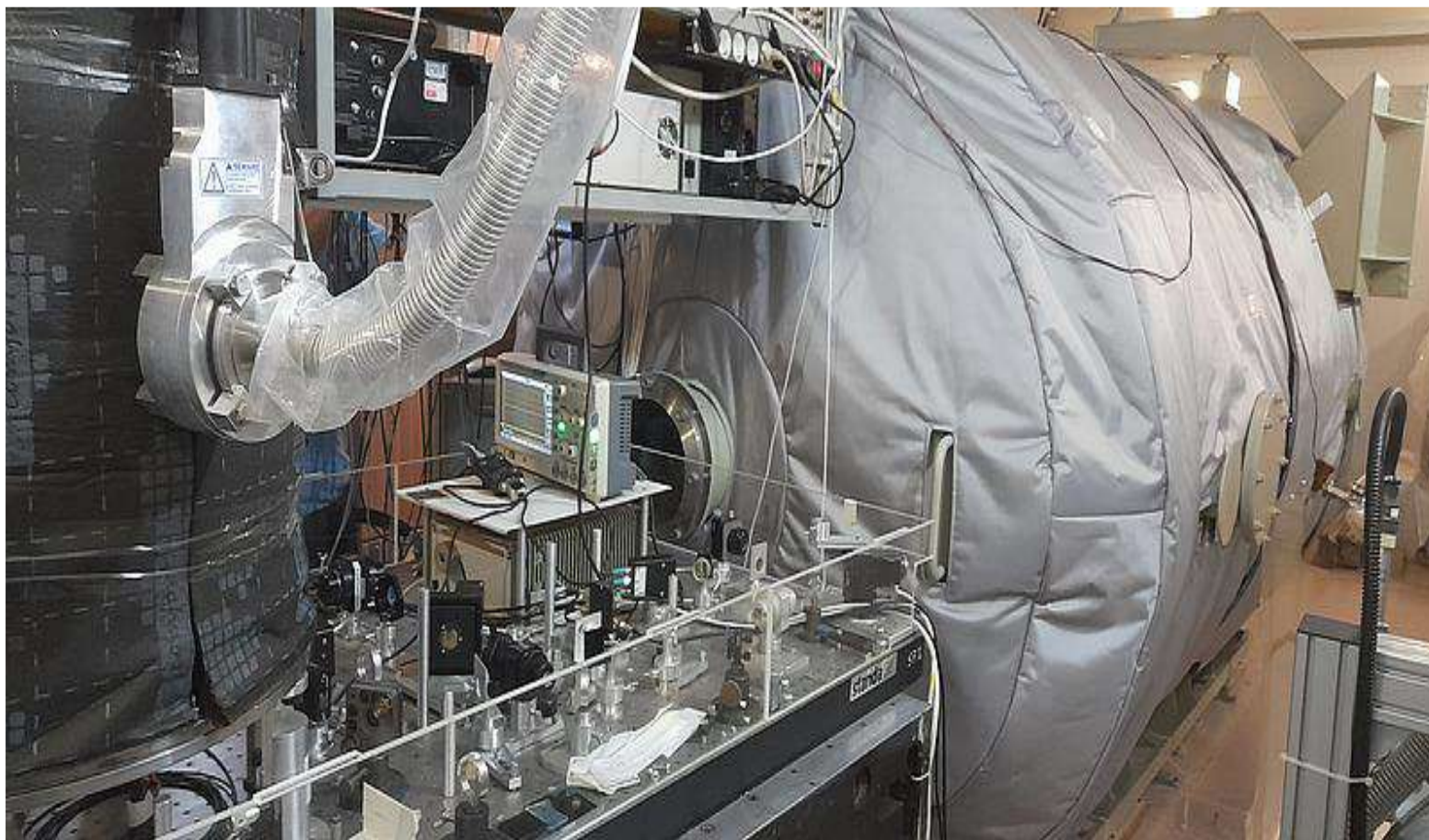
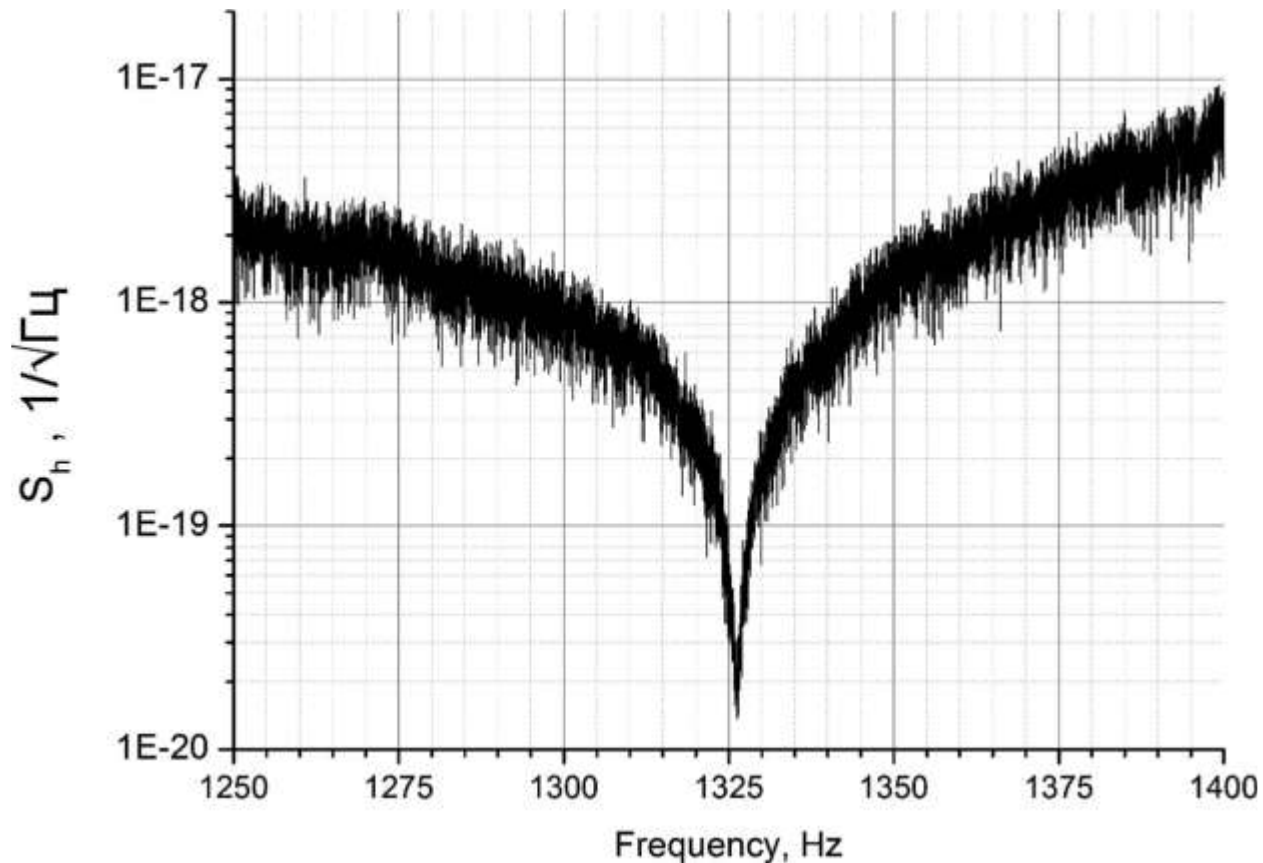


Рис 10 Камера ОГРАН в активном термо-чехле (вид сбоку от оптического стола)

A high frequency resonance gravity gradiometer

S. N. Bagaev,¹ L. B. Bezrukov,² N. L. Kvashnin,¹ V. A. Krysanov,² S. I. Oreshkin,³
A. M. Motylev,³ S. M. Popov,³ V. N. Rudenko,^{2,3} A. A. Samoilenko,³ M. N. Skvortsov,¹
and I. S. Yudin³

A new setup OGRAN—the large scale opto-acoustical gravitational detector is described. As distinguished from known gravitational bar detectors it uses the optical interferometrical readout for registering weak variations of gravity gradient at the kilohertz frequency region. At room temperature, its sensitivity is limited only by the bar Brownian noise at the bandwidth close to 100 Hz. It is destined for a search for rare events—gravitational pulses coincident with signals of neutrino scintillator (BUST) in the deep underground of Baksan Neutrino Observatory of INR RAS.



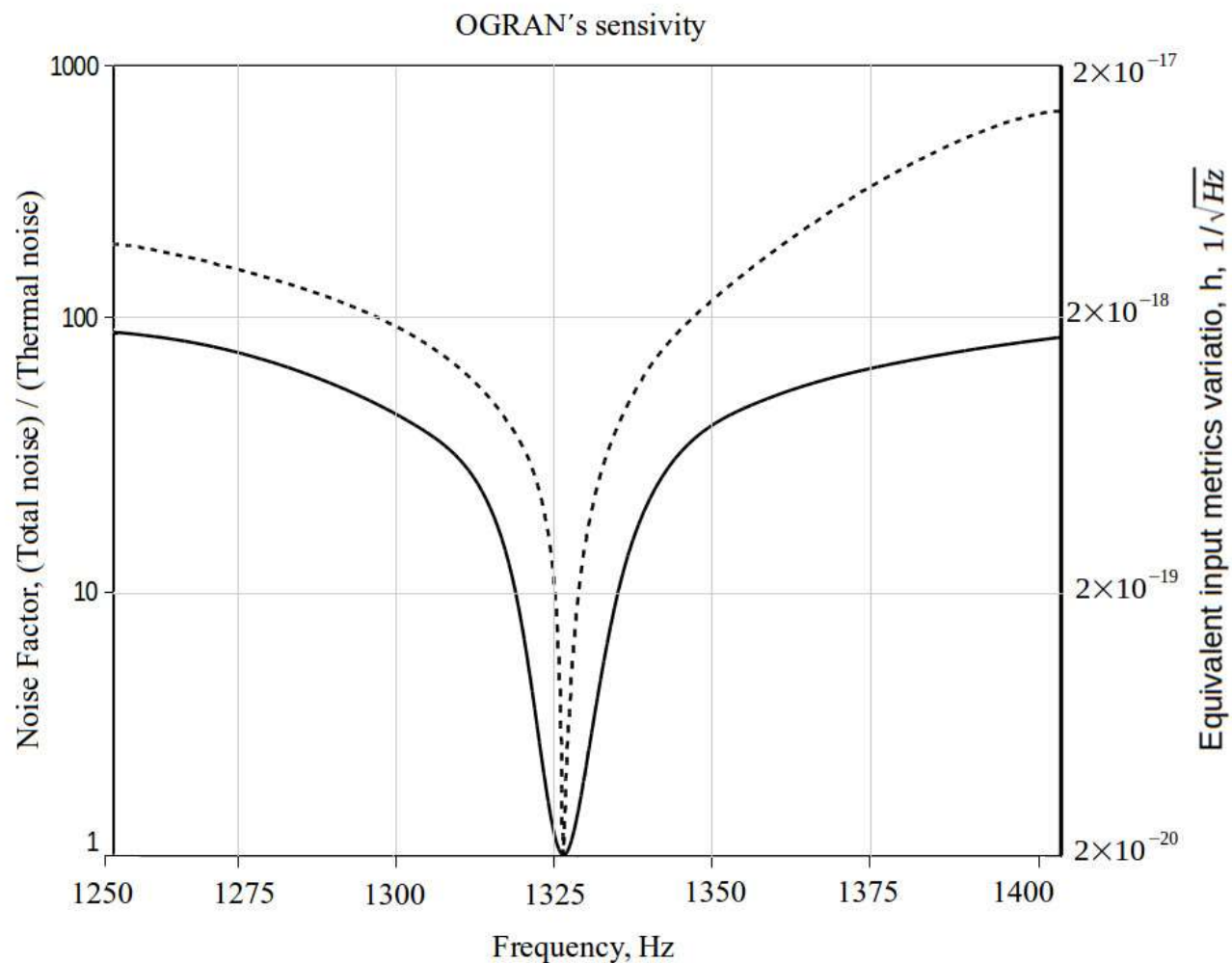


Рис 11 Спектральная плотность шума антенны ОГРАН (пунктирная линия - экспериментальная кривая старого варианта установки (резкость $F=2000$); сплошная линия - кривая СПШ антенны после модернизации ($F=30000$)).

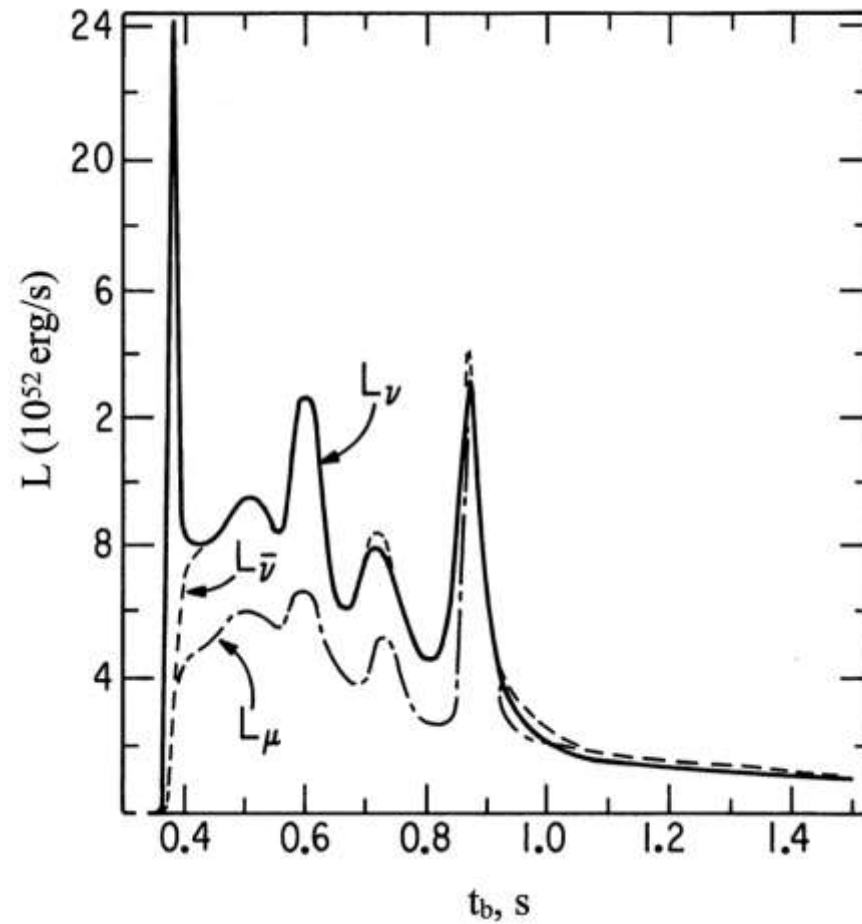


Рис 12 Нейтринная светимость коллапсирующей звезды $M = 20M_{\odot}$, t_b - время после отскока (R. Mayle, J.R. Wilson, D.N. Schramm, *Astrophys. J.* 318, 288 (1987)).

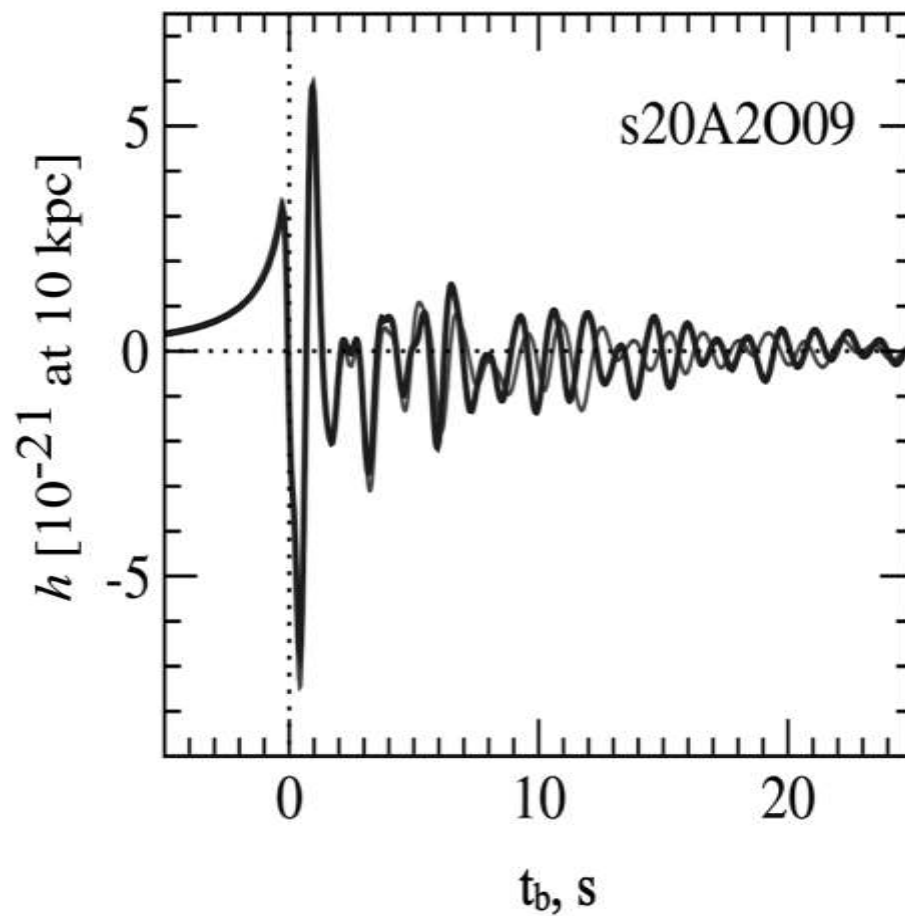


Рис 13 Структура всплеска ГВ от коллапса звезды вращения $M = 20M_0$, t_b - время после отскока (H.Dimmelmeier, C.D. Ott, A.Marek, Phys. Rev. D 78, 064056 (2008)).

Article

Search for Gravitational-Neutrino Correlations on Ground-Based Detectors

Svetlana Andrusenko ¹, Yurii Gavriluk ^{2,3}, Andrei Gusev ², Daniil Krichevskiy ^{2,4}, Sergei Oreshkin ², Sergei Popov ² and Valentin Rudenko ^{2,3,*}

¹ Physics Department, Bauman Moscow State Technical University, 105005 Moscow, Russia

² Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, 119991 Moscow, Russia

³ Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, 117312 Moscow, Russia

⁴ Faculty of Science, University of Bern, CH-3012 Bern, Switzerland

* Correspondence: valentin.rudenko@gmail.com

Abstract: The problem of joint data processing from ground-based gravitational and neutrino detectors is considered in order to increase the detection efficiency of collapsing objects in the Galaxy. The development of the “neutrino-gravitational correlation” algorithm is carried out within the framework of the theory of optimal filtration as applied to the well-known OGRAN and BUST facilities located at the BNO INR RAS. The experience of analyzing neutrino and gravitational data obtained during the outburst of supernova SN1987A is used. Sequential steps of the algorithm are presented; formulas for estimating the statistical efficiency of a two-channel recorder are obtained.

Keywords: gravitational waves; neutrino telescope; multi-messenger astronomy



Схема gw - ν корреляции: временная эволюция выходных сигналов гравитационного (красным) и нейтринного (синим) детекторов

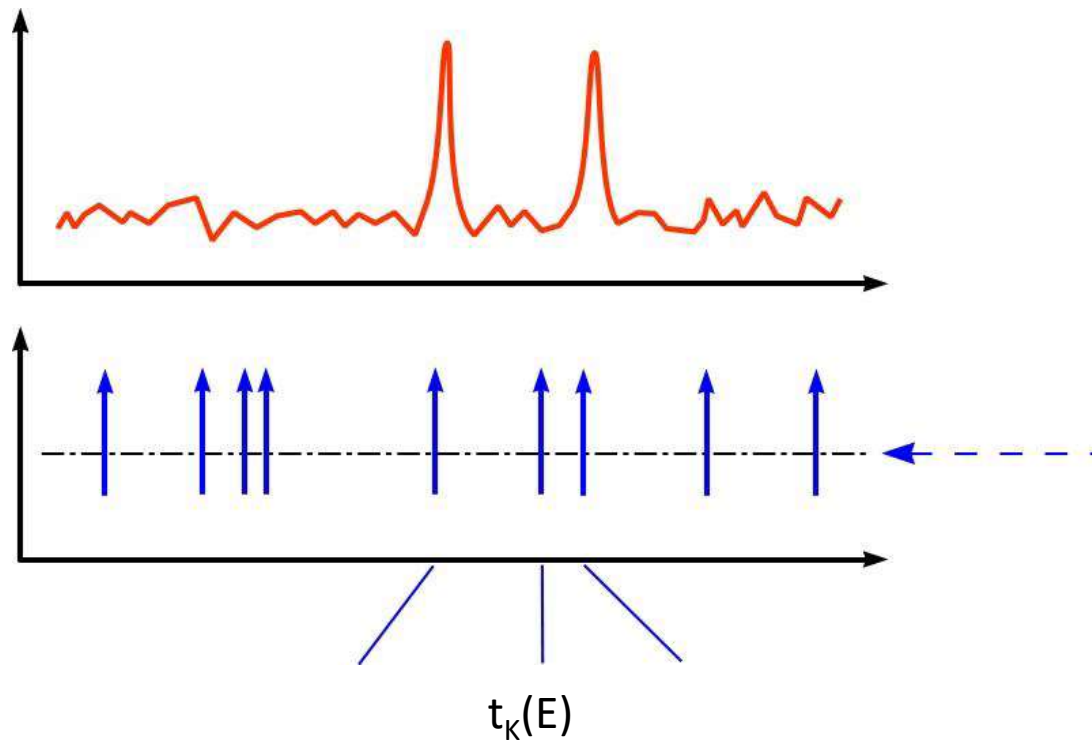
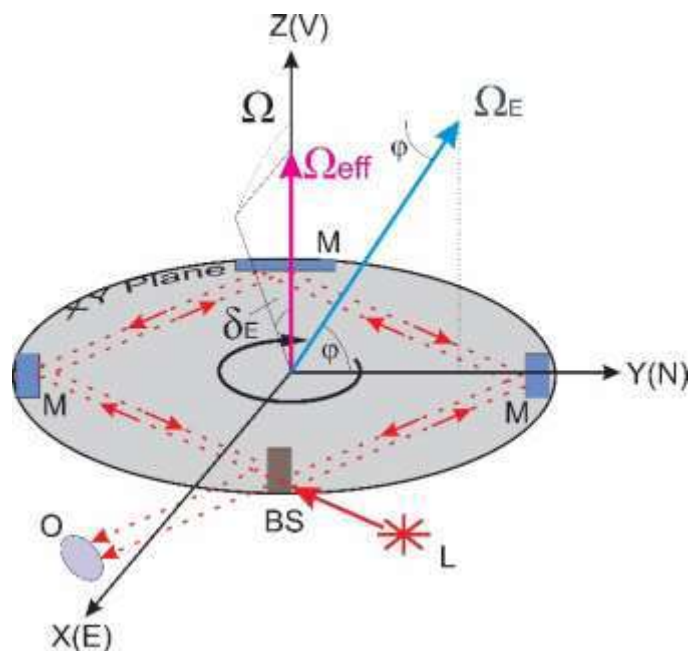


Рис 14

$\tau_k = t_k(E) + \tau_s + \delta\tau$, (τ_k , $t_k(E)$ времена gw и ν событий)
 $\delta\tau$ —сдвиг, R , τ_s — амплитуда и длительность gw сигнала
 критерий gw - ν корреляции по вариациям $\delta\tau$
 $D = \max \left| \sum_{k=1} \{R^2 (\tau_k + \delta\tau)\} / \sigma^2 \right| \geq C\alpha$
 σ —дисперсия, $C\alpha$ —порог решения

**кольцевой лазерный интерферометр
[Гироскоп Саньяка (ГС)]
прецизионный датчик
грави – инерциальных возмущений**



Кольцевой интерферометр ГС на поверхности Земли
Эффективная угловая скорость ГС : $\Omega_{eff} = \Omega_E \sin (\varphi + \delta_N) \cos(\delta_E)$
, где Ω_E – угловая скорость Земли, δ_N , δ_E - углы отклонения к северу и востоку, φ - широта расположения ГС.

К теории эффекта Саньяка

интерпретация кинематической природы эффекта – законы СТО

В неподвижной системе отсчета **скорость гармонической волны v** , бегущей кольцевому волноводу образуется из её **фазовой скорости v_{ph}** и линейной **скорости точек на периферии кольца**, вращающегося вокруг оси симметрии с угловой частотой Ω . По релятивистскому закону сложения скоростей в СТО имеем:

$$v_{\pm} = (v_{ph} \pm R\Omega) / (1 \pm v_{ph} R \Omega) \quad (1)$$

где знаки $(\pm)$ отвечают встречным волнам бегущим по и против вращения кольца радиуса R . Имея разные скорости распространения, встречные волны затрачивают разное время на прохождение периметра кольца $P = 2\pi R$.

Используя (1) легко подсчитать эти времена $t_{\pm}$ и их разность

$$\delta t = t_{+} - t_{-} = 4R^2\Omega / c^2[1 - (R\Omega / c)^2] \quad (2)$$

При малой скорости вращения $R\Omega \ll c$

$$\delta t = 4(\Omega A)/c^2, \quad \delta \Phi = 8\pi (\Omega A)/c\lambda \quad (3)$$

Формулы (3) записаны для общего случая в векторной форме, когда нормаль к площади кольца $\mathbf{n}=\mathbf{A}/|A|$ не совпадает с осью его вращения (т.е. тогда входит скалярное произведение $(\Omega \mathbf{A})$)

Эффект Саньяка **универсален по отношению к природе бегущих по кольцу объектов, будь то гармонические волны, солитоны или частицы**

ОЦЕНКИ

(расщепление) мод

$$\delta f_{\text{sagn}} = |f_- - f_+|$$

$$\delta f_{\text{sagn}} = \frac{4(A\Omega)}{P\lambda}$$

предел Пуассоновского шума

$$\Delta f_q = \langle \Delta f^2 \rangle^{1/2} = \frac{\nu}{Q} \sqrt{\frac{h\nu}{W} \frac{1}{\nu_m}}$$

условие регистрации

$$\Delta f_{\text{sagn}} \geq \Delta f_q \quad \Omega \geq \frac{c}{2RQ} \sqrt{\frac{h\nu}{W} \frac{1}{\nu_m}} \quad R \geq \frac{c}{2\Omega Q} \sqrt{\frac{h\nu}{W} \frac{1}{\nu_m}}$$

Типичные параметры: $W \approx 1\text{mW}$, $\nu \approx 3 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$, $Q \approx 10^{10}$ позволяют детектировать угловую скорость вращения земли $\Omega = 7.3 \cdot 10^{-5} \text{ rad/sec}$.

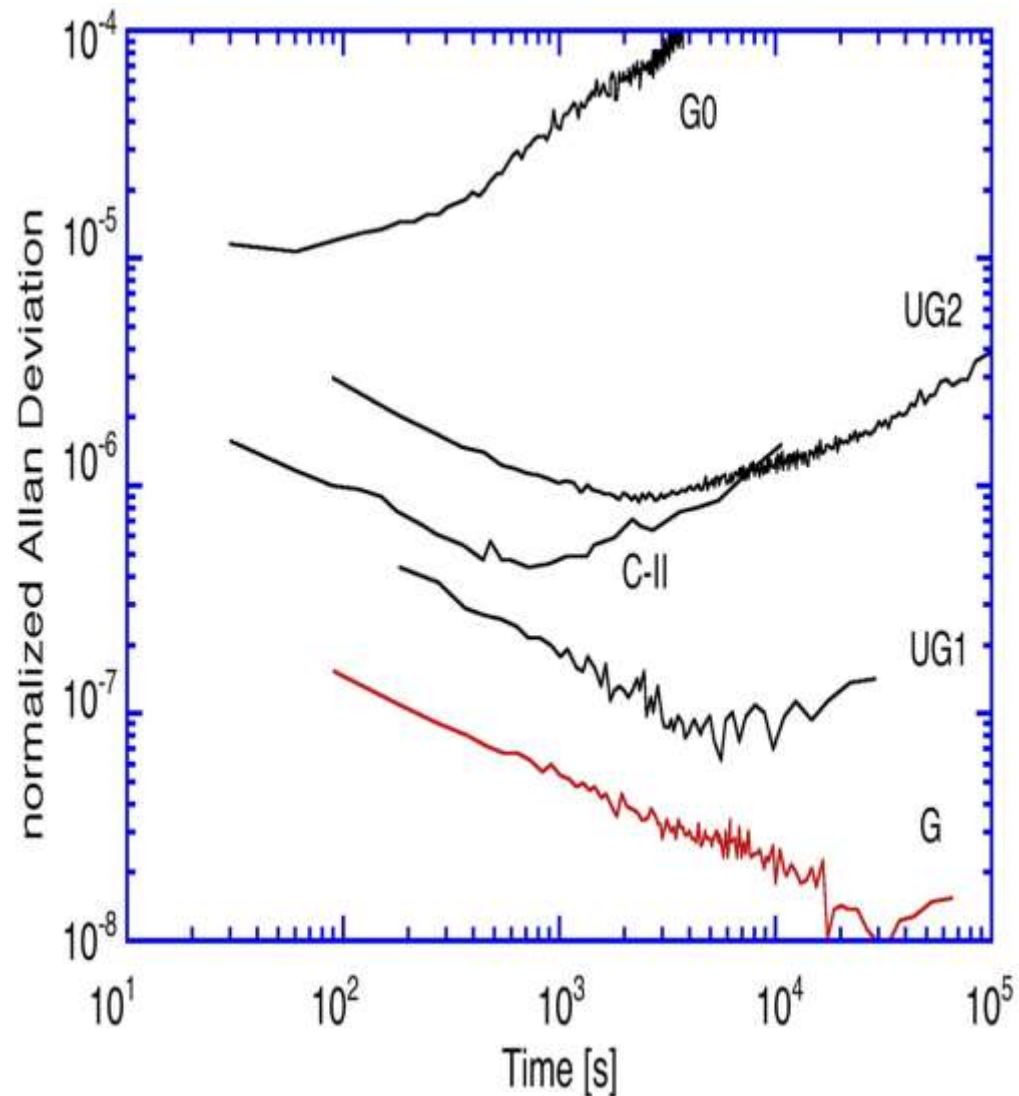
**Для регистрации
вариаций ($10^{-8} -$
 10^{-10}) Ω**

$$R \geq \frac{3 \cdot (10^4 \div 10^6)}{\sqrt{\tau_m}} \text{ cm}$$

**Даже при $\tau_m = 10^5$
сек, требуется R
 $\geq 1-100 \text{ m!}$**

Ring Lasers Performance

- Resolution 10^{-10} rad
- Angle of a hair viewed from 2000 km
- PSD $\sim 10^{-11}$ rad/s/rtHz



Пилотная модель ГС ($L = 16$ см)

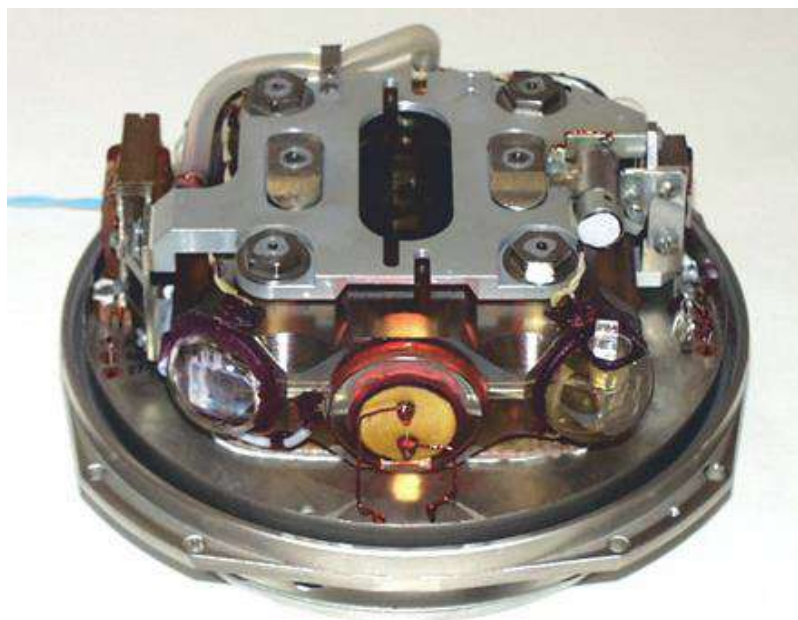
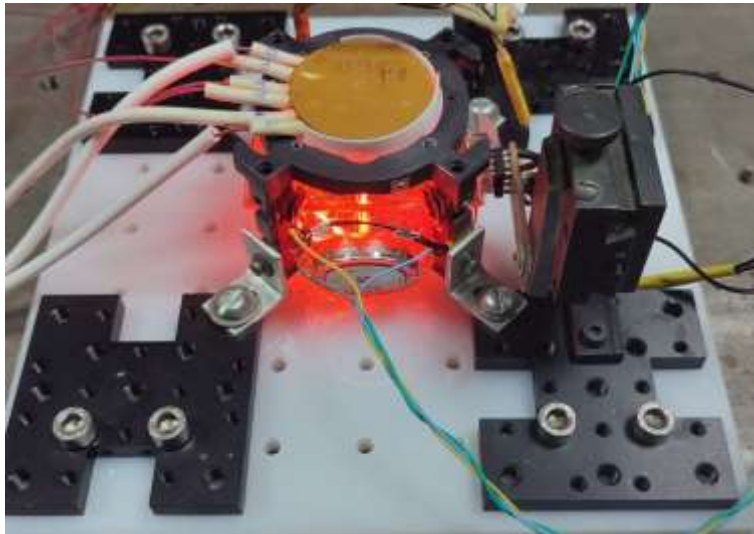


Фото 16 НИИ Полус производит навигационные лазерные гироскопы для гражданской авиации. Наиболее известной серией являются гироскопы КМ-11-1А (периметр кольца 24 см, сторона 7.6 см). Масштабный коэффициент (расщепление Саньяка) ≈ 0.8 Гц /град/час. За время измерения 1 час фактический уровень шума допускает выход на $\Omega_{\min} \approx 0.002$ рад/с

Экспериментальные образцы с периметром 120 см (сторона 40 см) имеют $\Omega_{\min} \approx 4 \cdot 10^{-12}$ рад/с при времени измерения 100 часов.

Кольцевой HeNe лазер на основе эффекта Зеемана с частотной подставкой



Длина периметра: 16 см

Возможности:

- независимая стабилизация тока разряда в двух плечах области разряда;

- создание постоянной или знакопеременной частотной подставки разных форм (прямоугольной, гармонической, треугольной и др.);

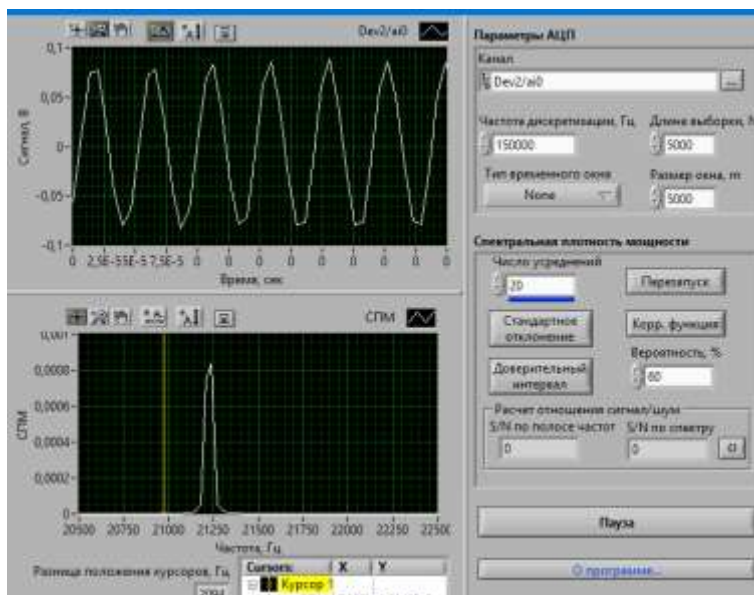
- перестройка длины резонатора в диапазоне до трех последовательных мод;

- система регистрации с компьютерной обработкой информации.

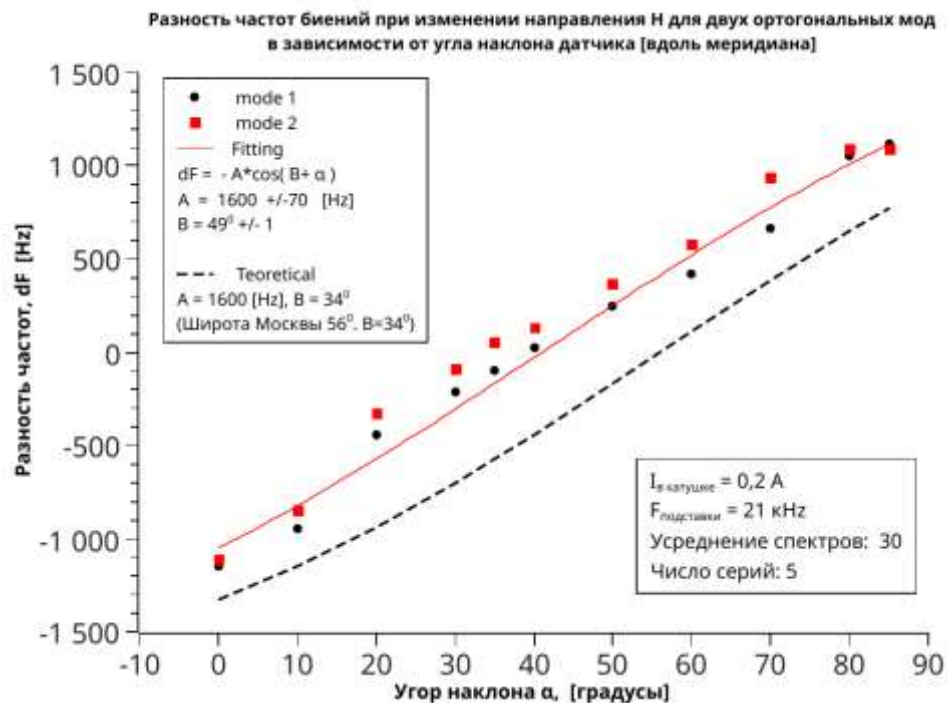
В планах:

- ввод данных о направлении H , формирующего частотную подставку, в компьютер;

- автоматизация системы стабилизации периметра резонатора.



Проверка чувствительности - регистрации вращения Земли

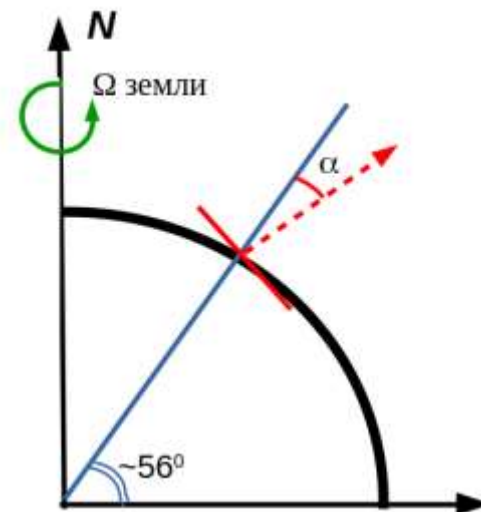
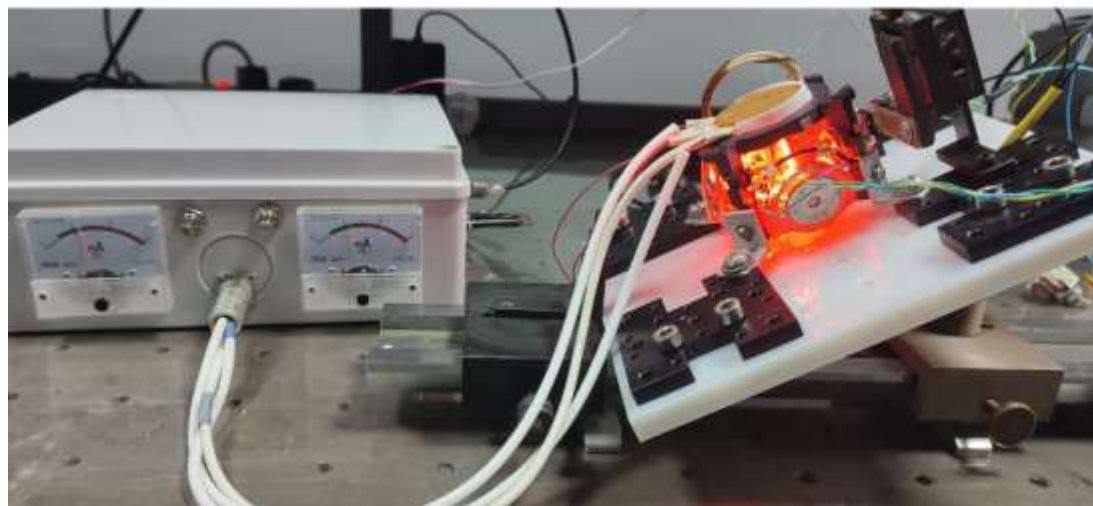


F – частотная подставка

$F_{H\pm}$ = частота биений
для двух направлений
магнитного поля

$$F_{H\pm} = F \pm \Omega_{\text{земли}}$$

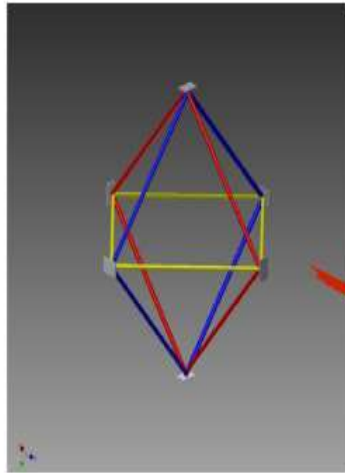
$$dF = F_{H+} - F_{H-}$$



«Гирокосп Саньяка» в подземной обсерватории LNGS



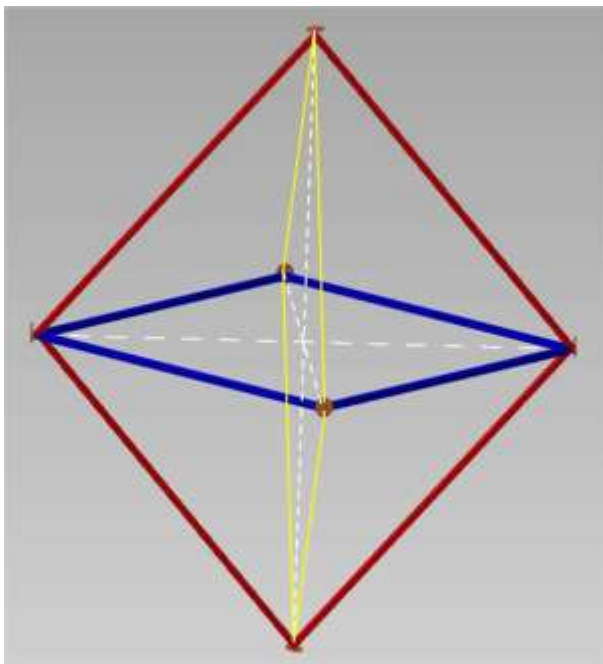
- 3D- Sensor
- Larger Scale Factor
- Active Stabilization
- Deep Underground Installation



Shared Cavities with control of diagonals...

... however we are after a **DC** quantity!!!!





Octahedral configuration of GINGER. Six mirrors give rise to three mutually perpendicular square rings. The active control of the geometry may be achieved by laser cavities along the three diagonals connecting the mirrors.

- **Октаэдрическая конфигурация трех ГС.**
- **(Шесть зеркал образуют три взаимно перпендикулярных квадратных контура; активный контроль геометрии осуществляется лазерными резонаторами, установленными вдоль трех диагоналей, соединяющих зеркала).**

Constraining theories of gravity by GINGER experiment

Ограничения гравитации из GINGER эксперимент

Salvatore Capozziello^{1,2,4}, Carlo Altucci¹, Francesco Bajardi¹, Andrea Basti^{3,4},
Nicolò Beverini³, Giorgio Carelli³, Donatella Ciampini³, Angela D. V. Di Virgilio⁴,
Francesco Fuso³, Umberto Giacomelli⁴, Enrico Maccioni^{3,4}, Paolo Marzili³,
Antonello Ortolan³, Alberto Porzio⁴, Andrea Simonelli⁴, Giuseppe Terreni⁴,
Raffaele Velotta¹

Abstract The debate on gravity theories to extend or modify general relativity is very active today because of the issues related to ultraviolet and infrared behavior of Einstein's theory. In the first case, we have to address the quantum gravity problem. In the latter, dark matter and dark energy, governing the large-scale structure and the cosmological evolution, seem to escape from any final fundamental theory and detection. The state of the art is that, up to now, no final theory, capable of explaining gravitational interaction at any scale, has been formulated. In this perspective, many research efforts are devoted to test theories of gravity by space-based experiments. Here, we propose straightforward tests by the GINGER experiment, which, being Earth based, requires little modeling of external perturbation, allowing a thorough analysis of the systematics, crucial for experiments where sensitivity breakthrough is required. Specifically, we want to show that it is possible to constrain parameters of gravity theories, like scalar-tensor or Horava-Lifshitz gravity, by considering their post-Newtonian limits matched with experimental data. In particular, we use the Lense-Thirring measurements provided by GINGER to find out relations among the parameters of theories and finally compare the results with those provided by LARES and Gravity Probe B satellites

GINGER (Gyroscopes IN General Relativity) experiment

Контакт с Гран Сассо группой ГС проекта

e-mail 27 march 2023 year

Dear Valentin,

....I read your paper, which is a very good and well written review paper, **but it lacks of the more recent updates**. I send you the pdf of some of our recent papers. First of all, the design of GINGER is change. We abandoned the octahedral configuration ...

Works are in progress with the collaboration of Italian geophysical institute on the recent earthquake in Turkey and Afganistan. The **interest for multiple high performant rotational sensors distributed on the globes certainly very high** both for **Geophysics/Geodesy and gravitational theory (see Eur. Phys. J. Plus (2021) 136:394)**

Ciao, Nicolo Beverini

Thanks for your attention