

*Ю. А. Будагов, Б. Ди Джироламо, М. В. Ляблин*

## **Прецизионный лазерный инклинометр ОИЯИ в составе интерференционной гравитационной антенны VIRGO**

В европейском мегапроекте VIRGO по поиску гравитационных волн получены первые результаты применения прецизионного лазерного инклинометра (ПЛИ), созданного в ОИЯИ.

Идея применения ПЛИ в современных астрофизических экспериментах, принадлежащая директору ОИЯИ В. А. Матвееву, встретила в научных кругах резонансную поддержку и была реализована в кратчайшие сроки. В ходе обсуждения с коллегами (д-р Ф. Моля и др.) в Европейском консорциуме по астрофизике частиц было высказано предложение использовать ПЛИ в гравитационной антенне VIRGO. На Международной конференции по астрофизике частиц 2018 г. в Амстердаме был представлен наш доклад с детальным описанием параметров ПЛИ. Профессор Ф. Риччи во время посещения метрологической лаборатории

ЦЕРН, где расположен ПЛИ, ознакомился с работой прибора и одобрил идею использования ПЛИ в угловой сейсмостабилизации VIRGO. В итоге директор ОИЯИ В. А. Матвеев и директор Европейской гравитационной обсерватории (EGO) С. Катсаневас приняли совместное решение поддержать полученные рекомендации коллег.

В августе 2019 г. в детекторном комплексе интерферометрической гравитационной антенны (ИГА) эксперимента VIRGO сотрудниками ОИЯИ М. В. Ляблиным и Н. С. Азаряном, а также сотрудником ЦЕРН Б. Ди Джироламо был установлен и запущен созданный в ОИЯИ прецизионный лазерный инклинометр для мониторинга угловой микросейсмической активности (рис. 1). Использование инклинометра уменьшит воздействие угловых микросейсмических накло-

---

*J. A. Budagov, B. Di Girolamo, M. V. Lyablin*

## **JINR Precision Laser Inclinator as a Component of the Interferometric Gravitational Antenna VIRGO**

First results have been obtained on the application of the JINR developed Precision Laser Inclinator (PLI) in the European mega project VIRGO on the search for gravitational waves.

The idea of the PLI application in modern astrophysical experiments was brought in by JINR Director V. Matveev. It was met with resonance support in a scientific circles and was implemented in a very short time. In discussions with colleagues (Dr. F. Moglia et al.) in the Astroparticle Physics European Consortium (APPEC), it was suggested to use PLI in the gravitational antenna VIRGO. Our report with detailed description of the PLI parameters was delivered at the International Conference

on Astrophysics in Amsterdam in 2018. While visiting the metrological laboratory of CERN, Professor F. Ricci became familiar with the device operation and approved the idea to use PLI in the angle seismostabilization of VIRGO. As a result, JINR Director V. Matveev and Director of the European Gravitational Observatory S. Katsanevas took a joint decision to support the recommendations obtained from colleagues.

In August 2019, JINR staff members M. Lyablin and N. Azaryan and CERN staff member B. Di Girolamo installed and launched a precision laser inclinometer in the detector complex of the interferometric gravitational antenna (IGA) of the VIRGO experiment to monitor the

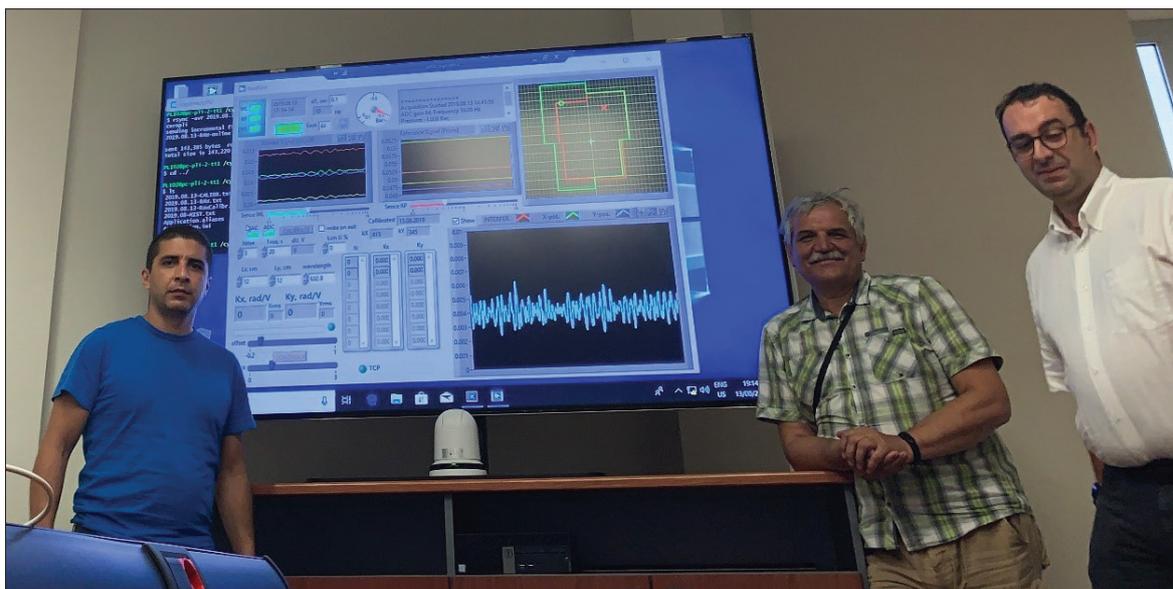


Рис. 1. Визуализация регистрируемых прецизионным лазерным инклинометром угловых микросейсмических колебаний в конференц-зале VIRGO. Слева направо: Н. С. Азарян, М. В. Ляблин, Б. Ди Джироламо

Fig. 1. Visualization of angular microseismic oscillations registered by the precision laser inclinometer in the VIRGO conference hall. Left to right: N. Azaryan, M. Lyablin, and B. Di Girolamo



Рис. 2. Прецизионный лазерный инклинометр, установленный в лабораторном зале интерференционного зеркала VIRGO

Fig. 2. The precision laser inclinometer installed in the laboratory hall of the VIRGO interferometric mirror

angle microseismic activity (Fig. 1). Application of the inclinometer will diminish the impact of angle microseismic slopes of the Earth surface on sensitive elements of IGA, which, in its turn, will lead to the growth of its sensitivity in the region of frequencies that correspond to fusion of black holes and neutron stars in the Universe.

The PLI set-up near one of the VIRGO IGA mirrors was produced in the JINR–CERN–EGO collaboration. For six months the PLI data (Fig. 2) will be compared with the

data of operating seismometers of VIRGO, and a decision will be taken on the measurement results of a probable application of PLI for seismo-isolation of sensitive elements of the gravitational antenna.

First results showed that PLI detects angular microseismic phenomena with sufficient sensitivity and in full accordance with the data of VIRGO seismometers that are installed near it, indicating absence of system errors in the data obtained at PLI.

When first prototypes of this unique angular seismometer were produced and studied in 2010, it became clear that it was a new breakthrough method to register angular microseismic oscillations of the Earth surface. The development of the method leads to the production of an automated remote-regulated device that can efficiently register changes in angular inclinations of the Earth surface in time with a sensitivity of  $2.4 \cdot 10^{-11}$  rad/Hz<sup>1/2</sup> in the frequency range of 10<sup>-3</sup>–12.3 Hz.

The following major directions of application of the new device were defined:

— measurement of microseismic angular oscillations of the Earth surface — the source of considerably new information about geophysical processes inside the Earth;

нов земной поверхности на чувствительные элементы ИГА, что, в свою очередь, приведет к увеличению ее чувствительности в области частот, соответствующих слиянию черных дыр и нейтронных звезд во Вселенной.

Установка ПЛИ вблизи одного из зеркал ИГА VIRGO была выполнена в сотрудничестве ОИЯИ–ЦЕРН–ЕГО. На протяжении шести месяцев показания ПЛИ (рис. 2) будут сравниваться с действующими показаниями сейсмометров VIRGO, и по результатам измерений будет принято решение о возможности использования ПЛИ для сейсмоизоляции чувствительных элементов гравитационной антенны.

Уже первые результаты показали: ПЛИ регистрирует угловые микросейсмические явления с достаточной чувствительностью и в полном согласии с показаниями сейсмометров VIRGO, установленных рядом с ним, что свидетельствует об отсутствии системных ошибок в данных, получаемых с ПЛИ.

Когда в 2010 г. были собраны и исследованы первые прототипы этого уникального углового сейсмометра, стало понятно, что это новый, прорывной способ регистрации угловых микросейсмических колебаний поверхности Земли. Развитие метода привело к созданию автоматизированного дистанционно настраиваемого

прибора, который может эффективно регистрировать изменение угловых наклонов поверхности Земли во времени с чувствительностью  $2,4 \cdot 10^{-11}$  рад/Гц<sup>1/2</sup> в частотном диапазоне  $10^{-3}$ –12,3 Гц.

Были определены следующие основные направления применения нового прибора:

- измерение микросейсмических угловых колебаний поверхности Земли — источника существенно новой информации о геофизических процессах внутри Земли;

- использование долговременных измерений углового наклона поверхности Земли для предсказания землетрясений, что позволяет определить зоны накопления сейсмической энергии и количественно рассчитать мощность и время будущего землетрясения;

- использование зарегистрированных угловых микросейсмиков для стабилизации крупномасштабных физических установок. В ЦЕРН ведется подготовка регистрации деформации поверхности Земли при прохождении поверхностных микросейсмических волн в зоне расположения LHC;

- создание сейсмоизолированной оптической платформы для проведения физических исследований в условиях пониженного воздействия угловых микросейсмических шумов.

- application of long-term measurements of the angular oscillations of the Earth surface to predict earthquakes, which allows one to determine zones of seismic energy accumulation and calculate quantitatively the power and time of a future earthquake;

- application of registered angular microseisms to stabilize large-scale physics facilities. The registration of the Earth surface deformation in the passage of surface microseismic waves in the location of the LHC is being prepared at CERN;

- the development of the seismo-isolated optical platform for physics research in the conditions of lowered action of angular microseismic noise.

The European gravitational-wave detector VIRGO, a French–Italian detector of gravitational waves, is one of scientific mega projects of Europe where about four hundred scientists take part. It is located near the Italian city of Pisa (Fig. 3). Gravitational waves were predicted by A. Einstein in 1916, the search for them started half a century later but their discovery occurred only decades later.

In September 2015, two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) in the USA registered an outburst of gravitational waves pro-

duced in fusion of two heavy black holes at a distance of about 1.3 billion light-years from Earth. It is important not only to fix an outburst of gravitational waves but also to understand where the signal came from in each case. That is why VIRGO, despite the fact that its sensitivity is a little lower than in LIGO, plays an important part in the search for a new outburst.

The main part of the VIRGO detector is the laser Michelson interferometer each arm of which is 3 km long. The VIRGO range width of registered frequencies plus its sensitivity allows one to fix gravitational radiation from black holes fusion at a distance of up to 50 Mpc. To achieve the necessary sensitivity, the following devices were developed for VIRGO: a unique high-power ultra-stable laser source, mirrors with superhigh reflection coefficient, seismic isolators and other devices. But the problem of angular seismo-isolation of sensitive elements in the gravitational antenna in VIRGO is still unresolved. These are the interferometer mirrors, the dividing plate, the mirror system in the preparation of the laser beam to power the interferometer and additional mirrors that organize recycling of the laser beam in the interferometer. In total, up to 10 sensitive elements of the gravitational

Европейский гравитационно-волновой детектор VIRGO — франко-итальянский детектор гравитационных волн — один из научных мегапроектов Европы, в котором задействовано около четырех сотен сотрудников, расположен вблизи итальянского города Пизы (рис. 3). Гравитационные волны были предсказаны Эйнштейном в 1916 г., их поиск начался полвека спустя, но их открытия пришлось ждать несколько десятилетий.

В сентябре 2015 г. два детектора Лазерно-интерферометрической гравитационно-волновой обсерватории (LIGO) в США зафиксировали всплеск гравитационных волн, рожденных при слиянии двух тяжелых черных дыр на расстоянии около 1,3 млрд световых лет от Земли. Но важно не только зафиксировать всплеск гравитационных волн, но и понять, откуда в каждом конкретном случае пришел сигнал. Именно поэтому VIRGO, несмотря на его несколько меньшую чувствительность, чем у LIGO, играет важную роль в поиске источника нового всплеска.

Основная часть детектора VIRGO — лазерный интерферометр Майкельсона, каждое плечо которого

имеет длину 3 км. Широкий диапазон регистрируемых частот детектора VIRGO в совокупности с его чувствительностью позволяет зафиксировать гравитационное излучение от слияний черных дыр на расстоянии до 50 мегапарсек. Чтобы достичь необходимой чувствительности, для VIRGO были разработаны: уникальный высокомогущный ультрастабильный лазерный источник, зеркала со сверхвысоким коэффициентом отражения, сейсмические изоляторы и другие устройства. Но до сих пор в гравитационной антенне VIRGO не решена задача угловой сейсмоизоляции чувствительных элементов антенны. Это прежде всего зеркала интерферометра, делительная пластинка, система зеркал в подготовке лазерного пучка для питания интерферометра и дополнительные зеркала, которые организуют рециклирование лазерного луча в интерферометре. Всего требуется сейсмоизолировать от угловых колебаний поверхности Земли до 10 чувствительных элементов гравитационной антенны. Поэтому в настоящее время гравитационная антенна продолжает работать в условиях интенсивных микросейсмических шу-

Рис. 3. Гравитационная антенна VIRGO (вид с высоты птичьего полета)



Fig. 3. Gravitational antenna VIRGO (bird's eye view)

мов, которые ухудшают ее чувствительность в области частот от 1 до 10 Гц.

Особенности ПЛИ ОИЯИ — регистрация зависимости углов наклона от времени и отсутствие резонансных явлений в конструкции инклинометра, что позволяет использовать прибор в системах онлайн-стабилизации оптической платформы от угловых микросейсм. Именно этот аспект волнует больше всего сотрудников VIRGO.

Действительно, при наклонах основания интерферометрического зеркала под действием угловых микросейсм происходит наклон места подвеса зеркала, что приводит к его перемещению в плече интерферометра на несколько микрометров. Поскольку подобное смещение точки подвеса носит периодический характер, то это сопровождается параметрическим возбуждением колебания подвеса с зеркалом на резонансных частотах также в направлении плеча интерферометра. Совокупность этих колебаний носит непредсказуемый характер, и уменьшить их амплитуду возможно только установкой основания подвеса зеркала в неизменное горизонтальное положение. Именно эта задача и является приоритетной для использования ПЛИ в системе ИГА в VIRGO.

Создание комплекса угловой сейсмоизоляции активных элементов ИГА VIRGO подразумевает создание проекта модернизации установки. Для этого необходимо провести исследования на прототипе сейсмоизолированной от угловых колебаний поверхности Земли платформы. Затем на основе полученных на прототипе результатов спроектировать, изготовить и установить элементы угловой сейсмоизоляции для зеркал, делительной пластинки и других чувствительных элементов ИГА VIRGO. Но уже сейчас есть уверенность: использование ПЛИ поможет на два порядка уменьшить воздействие на элементы ИГА VIRGO угловых микросейсмических колебаний в области частот  $10^{-3}$ –10 Гц, что безусловно положительно скажется на ее чувствительности.

antenna are necessary to seismo-isolate angular fluctuations of the Earth. That is why at present the gravitational antenna is operating in conditions of intense microseismic noise, which worsens its sensitivity in the region of frequencies from 1 to 10 Hz.

The peculiarities of the JINR PLI are the registration of dependence of slope angles on time and the absence of resonance phenomena in the construction of the inclinometer, allowing one to use the device in on-line stabilization systems of the optical platform from angular microseisms. This aspect is most interesting for the VIRGO staff.

Actually, in inclination of the interferometric mirror base under the action of angular microseism, a slope occurs in the place of the mirror suspension, leading to its moving several micrometers in the interferometer arm. As this displacement of the suspension place has a periodic character it is accompanied by parametric excitation of the fluctuations of the suspension of the mirror in resonance frequencies also in the direction of the interferometer arm. All these fluctuations are unpredictable, and it is possible to diminish their amplitude only if the mirror suspension is stabilized in the horizontal unchangeable position. This

task is of the priority importance in PLI application in the IGA system in VIRGO.

The development of the complex for angular seismo-isolation of active VIRGO IGA elements means the work-out of a project of the facility refurbishment. It is necessary to conduct studies at the prototype of the platform seismo-isolated from angular oscillations of the Earth surface. Then, based on the results obtained at the prototype, it is possible to design, produce and install elements of the angular seismo-isolation for the mirrors, the dividing plate and other sensitive elements of VIRGO IGA. Today there is certainty in the fact that application of PLI will help to two orders diminish the action on the VIRGO IGA elements of the angular microseismic oscillations in the frequency range of  $10^{-3}$ –10 Hz, which obviously will positively influence its sensitivity.