

*К. Н. Гусев, Д. Борович, В. Б. Бруданин, В. Г. Егоров,  
И. В. Житников, Д. Р. Зинатулина, А. А. Клименко, О. И. Кочетов,  
А. В. Лубашевский, И. Б. Немченко, Н. С. Румянцева,  
А. А. Смольников, М. В. Фомина, Е. А. Шевчик, М. В. Ширченко*

## Всё ближе к измерению массы нейтрино

Эксперимент GERDA, который проводится в подземной лаборатории Гран-Сассо (LNGS) в Италии, предназначен для поиска гипотетического ядерного процесса, называемого двойным безнейтринным бета-распадом. Его экспериментальное обнаружение является заветной мечтой физики элементарных частиц, так как позволит получить ключевую информацию о природе нейтрино и структуре нейтринных масс и даже поможет объяснить загадку Вселенной о соотношении материи и антиматерии. Двойной безнейтринный бета-распад до сих пор никому не удалось зарегистрировать, но эксперимент GERDA первым среди всех конкурирующих проектов сумел достичь чувствительности по периоду полураспада в  $10^{26}$  лет, что в 10 000 000 000 000 000 раз превышает возраст нашей Вселенной [1].

GERDA — интернациональная европейская коллаборация, включающая более 100 физиков из Бельгии, Германии, Италии, России, Польши и Швейцарии. Специалисты ОИЯИ с самого начала принимают активное участие в проекте.

Подтверждение существования осцилляций нейтрино было первым экспериментальным фактом, который не совпадал с предсказаниями Стандартной модели физики элементарных частиц. Три типа нейтрино могут переходить из одного в другой в процессе их перемещения в пространстве. Этот факт убедительно доказывает наличие ненулевой массы у нейтрино, что противоречит постулатам СМ. Кроме того, существует давнее предположение, что нейтрино является майорановской частицей, т. е., в отличие от других составляющих материи, таких как электроны и кварки,

---

*K. N. Gusev, D. Borowicz, V. B. Brudanin, V. G. Egorov,  
I. V. Zhitnikov, D. R. Zinatulina, A. A. Klimenko, O. I. Kochetov,  
A. V. Lubashevskiy, I. B. Nemchenok, N. S. Romyantseva,  
A. A. Smolnikov, M. V. Fomina, E. A. Shevchik, M. V. Shirchenko*

## Closing in on the Neutrino Mass

The GERDA experiment in the Gran Sasso underground laboratory (LNGS) is searching for a hypothetical nuclear decay called neutrinoless double beta decay which represents a sort of Holy Grail for elementary particle physics: if detected, it will give essential information on whether neutrinos are identical to their antiparticles, on the origin of their masses and it will help to understand why there is so much more matter than antimatter in the Universe. The decay still escapes detection, but GERDA is the first experiment to reach a sensitivity for the half-life beyond  $10^{26}$  yr, 10 000 000 000 000 000 times the age of the Universe [1].

GERDA is an international European collaboration of more than 100 physicists from Belgium, Germany, Italy, Russia, Poland, and Switzerland. JINR physicists have actively participated in the project since the very beginning.

The so-called neutrino oscillation is the first established experimental observation not consistent with predictions of the Standard Model of particle physics: the three known neutrino types can transform into each other while traveling through space, which proves that neutrinos have non-zero masses, a property that contradicts the Standard Model. Additionally, there is the longstanding conjecture that neutrinos are so-called Majorana particles: differing from all other constituents of matter like elec-

нейтрино и антинейтрино эквивалентны. В этом случае должен происходить двойной безнейтринный бета-распад, в котором возникновение материи и антиматерии не сбалансированы, как во всех других случаях. Подобный дисбаланс, вероятно, поможет ответить на важнейший вопрос, почему в нашей Вселенной материи намного больше, чем антиматерии.

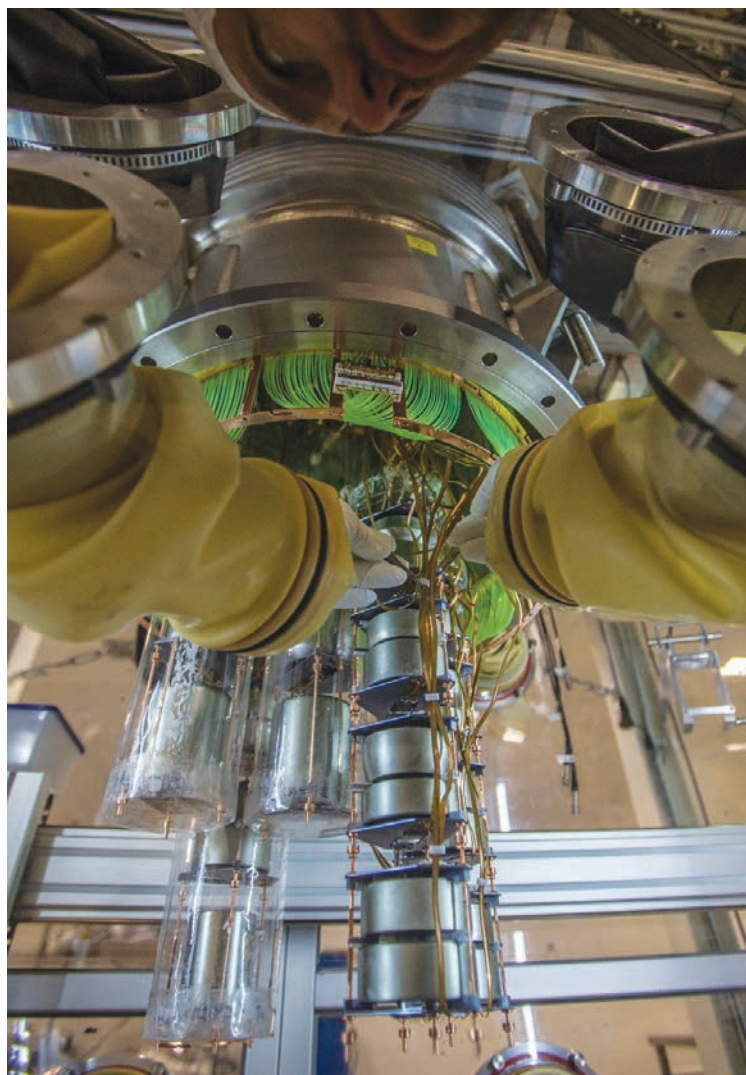
Эксперимент GERDA предназначен для проверки гипотезы Майораны посредством поиска двойного безнейтринного бета-распада изотопа  $^{76}\text{Ge}$ . Два нейтрона в ядре  $^{76}\text{Ge}$  одновременно превращаются в два протона с испусканием двух электронов. Этот процесс запрещен в СМ, так как в нем не рождается двух антинейтрино, т. е. необходимый баланс между материей и антиматерией нарушен.

Чувствительность к обнаружению двойного безнейтринного бета-распада главным образом зависит от уровня естественного радиоактивного фона в интересующем нас энергетическом интервале. В эксперименте GERDA достигнут беспрецедентный индекс фона как за счет использования пассивных методов защиты (окружающих детекторы слоев из чистой воды и жидкого аргона), так и дополнительных, активных методов подавле-

ния фоновых событий. На сегодня GERDA является первым экспериментом, в котором удалось превысить значение чувствительности по периоду полураспада в  $10^{26}$  лет или, другими словами, проверить, что искомым процесс имеет период полураспада по меньшей мере  $10^{26}$  лет, что на 16 порядков больше, чем возраст нашей Вселенной. Такой предел означает, что интенсивность распада меньше, чем 1 событие в 1 кг  $^{76}\text{Ge}$  за 18 лет.

В стандартной интерпретации двойного безнейтринного бета-распада период полураспада связан с так называемой майорановской массой нейтрино. Используя предел на период полураспада, полученный в GERDA, а также в других экспериментах по двой-

Сборка массива германиевых детекторов  
в чистой комнате в подземной лаборатории Гран-Сассо



Assembling an array of germanium detectors in a clean room  
in the Gran Sasso underground laboratory

trons or quarks, they could be their own antiparticles. In this case, neutrinoless double beta decay will exist, in which matter is created without the balancing creation of antimatter. This imbalance would help to explain why there is so much more matter than antimatter in the Universe.

The GERDA experiment, located in the Gran Sasso underground laboratory in Italy, is designed to scrutinize the Majorana hypothesis by searching for neutrinoless double beta decay of the germanium isotope  $^{76}\text{Ge}$ : two neutrons inside a  $^{76}\text{Ge}$  nucleus simultaneously transform into two protons with the emission of two electrons. This decay is forbidden in the Standard Model because the two normally produced antineutrinos — the balancing antimatter — are missing.

The sensitivity to detect neutrinoless double beta decay largely depends on the level interfering signals from environmental radioactivity. GERDA has reached the lowest level of those by shielding with pure water and liquid argon and additional methods to reject the remaining

ному бета-распаду, можно заключить, что эта масса должна быть ниже  $0,07\text{--}0,16 \text{ эВ}/c^2$ .

Предел на другой вариант массы нейтрино получен коллаборацией Planck, изучающей космический микроволновой фон — реликтовое излучение от Большого взрыва: сумма масс всех известных типов нейтрино не превышает  $0,12\text{--}0,66 \text{ эВ}/c^2$ . В эксперименте KATRIN в Технологическом институте Карлсруэ (Германия), в котором исследуется распад трития, в ближайшие годы будет измерен еще один вариант, а именно масса электронного нейтрино. KATRIN планирует достичь чувствительности около  $0,2 \text{ эВ}/c^2$ . Несмотря на то, что массы, полученные в столь разных экспериментах, сравнить напрямую нельзя, все эти исследования позволяют осуществить перекрестную проверку гипотезы о майорановской природе нейтрино. До сих пор никаких нестыковок с данной гипотезой обнаружить не удалось.

В течение периода накопления данных, которому посвящена статья в Science, в GERDA использовался массив германиевых детекторов общей массой 35,6 кг. Германий, из которого изготавливались детекторы, был обогащен изотопом  $^{76}\text{Ge}$  до уровня более 85% (содержание в естественной смеси — 7,8%) для увеличения чувствительности к периоду полураспада. На

следующем этапе исследований будет увеличена масса изотопа, но, кроме того, необходимо дальнейшее снижение естественного радиоактивного фона. Этого планируется достичь за счет улучшения идентификации частиц по форме сигнала и применения еще более радиационно чистых конструкционных материалов вблизи германиевых детекторов. Для дальнейшего продвижения в деле поиска двойного безнейтринного бета-распада  $^{76}\text{Ge}$  создана коллаборация LEGEND. Первая фаза нового эксперимента будет проводиться на базе модифицированной инфраструктуры GERDA в LNGS и оперировать с 200 кг детекторов из  $^{76}\text{Ge}$ . Чувствительность в  $10^{27}$  лет будет достигнута после 5 лет набора данных. Старт эксперимента запланирован на 2021 г.

### Список литературы

1. *The GERDA collab.* Probing Majorana Neutrinos with Double Beta Decay // Science. Published online on Thursday, 5 Sept. 2019. DOI: 10.1126/science/aav8613.

interfering signals. It is now the first experiment that has surpassed a sensitivity for the half-life of the decay of  $10^{26}$  years, or in other words, has proven that the process has a half-life of at least  $10^{26}$  years, 16 orders of magnitude longer than the age of the Universe. This half-life limit corresponds to a rate of less than one decay per 18 years for 1 kg of  $^{76}\text{Ge}$ .

In the standard interpretation of neutrinoless double beta decay, the half-life is related to a special variant of the neutrino mass called the Majorana mass. Using the GERDA limit and the ones from other double beta decay experiments, this mass has to be below  $0.07\text{--}0.16 \text{ eV}/c^2$ .

A limit on another variant of the neutrino mass is available from the Planck collaboration investigating the cosmic microwave background radiation — the relic of the Big Bang: the sum of the masses of all known neutrino types is below  $0.12\text{--}0.66 \text{ eV}/c^2$ . The tritium decay experiment KATRIN at the Karlsruhe Institute of Technology (Germany) is measuring in the upcoming years yet another variant, the electron neutrino mass. KATRIN will reach a sensitivity of about  $0.2 \text{ eV}/c^2$ . The masses deduced from these different investigations cannot be compared directly but, most interestingly, allow a cross checks of the par-

adigm that neutrinos are Majorana neutrinos. So far, no tension has been observed.

During the data collection period, reported in the Science paper, GERDA operated germanium detectors with a total mass of 35.6 kg. The fraction of the isotope  $^{76}\text{Ge}$  is enriched from the natural abundance of 7.8% to more than 85% to increase the half-life sensitivity. As the next step, the mass will be increased and an even further reduction of interfering signals is required. The latter will be achieved by improving the identification of these signals and by further reducing the radioactivity of material close to the germanium detector. The LEGEND collaboration was formed to pursue this goal starting with 200 kg  $^{76}\text{Ge}$  and using the existing GERDA infrastructure at LNGS. The sensitivity will reach  $10^{27}$  years after about 5 years starting in 2021.

### References

1. *The GERDA collab.* Probing Majorana Neutrinos with Double Beta Decay // Science. Published online on Thursday, 5 Sept. 2019. DOI: 10.1126/science/aav8613.