

**Аннотация к проекту
GERDA (“G&M”):
Поиск безнейтринного двойного бета-распада ^{76}Ge**

Участники от ОИЯИ:

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

Руководитель проекта: К.Н.Гусев (Konstantin.Gusev@jinr.ru)

Заместители руководителя проекта: А.В.Лубашевский, Д.Р.Зинатулина

Экспериментальное подтверждение существования нейтринных осцилляций позволило доказать наличие массы у нейтрино. Однако принципиальный вопрос о его природе (является ли нейтрино частицей Майораны (частица тождественна своей античастице) или Дирака) до сих пор не получил ответа. Эксперименты по поиску двойного безнейтринного бета ($0\nu\beta\beta$) распада призваны помочь в разрешении этой важнейшей проблемы. В данном процессе изменяется лептонное число, поэтому он однозначно запрещен в доминирующей в настоящее время Стандартной Модели (СМ) электрослабого взаимодействия. Следовательно, регистрация $0\nu\beta\beta$ распада будет безусловным подтверждением наличия «новой физики» за пределами СМ.

Аппаратурная сигнатура $0\nu\beta\beta$ распада – это узкий пик с энергией, эквивалентной энергии распада в суммарном электронном спектре. Поэтому энергетическое разрешение детектора имеет решающее значение, а значит эксперименты, в которых используются полупроводниковые детекторы, обладают несомненным преимуществом.

Коллаборация GERDA создана для поиска $0\nu\beta\beta$ распада ^{76}Ge . Экспериментальная установка расположена в Национальной лаборатории Гран Сассо в Италии. В GERDA применены полупроводниковые детекторы, изготовленные из особо чистого германия, обогащенного изотопом ^{76}Ge . Детекторы погружены в криостат, заполненный 64 м^3 жидкого аргона (Рис. 1а), который охлаждает детекторы до необходимой температуры и, одновременно, служит дополнительной защитой от внешнего радиоактивного фона. Предусмотрено две фазы эксперимента.

В первой фазе GERDA [1, 2] была накоплена статистика в 21,6 кг лет и получены следующие результаты. Уровень фона в интересующем интервале энергий составил $\sim 10^{-2}$ отсчетов на кэВ на кг в год, что являлось рекордным значением на тот момент. Ни одного события $0\nu\beta\beta$ распада обнаружено не было. Установлен новый предел на период полураспада ^{76}Ge по данному каналу $T_{1/2}^{0\nu} > 2,1 \times 10^{25}$ лет (90% CL) при чувствительности $2,4 \times 10^{25}$ лет. К важным результатам первой фазы GERDA можно отнести уточнение периода полураспада ^{76}Ge по двухнейтринному каналу и улучшение пределов на периоды полураспада для майоронных мод [3], а также для $2\nu\beta\beta$ распадов ^{76}Ge на возбужденные состояния ^{76}Se [4].

Целью второй фазы GERDA было улучшение чувствительности по периоду полураспада $0\nu\beta\beta$ распада на порядок. Чувствительность $0\nu\beta\beta$ экспериментов линейно растет со временем до тех пор, пока в узком энергетическом интервале вблизи искомого пика не будет зарегистрировано фоновых событий. GERDA Фаза II является первым бесфоновым экспериментом по поиску $0\nu\beta\beta$ распада благодаря беспрецедентному уровню фона в 10^{-3} отсчета на кэВ на кг в год. Это позволит нам

достичь намеченной чувствительности $>10^{26}$ лет после накопления необходимой статистики в 100 кг лет (Рис. 16).

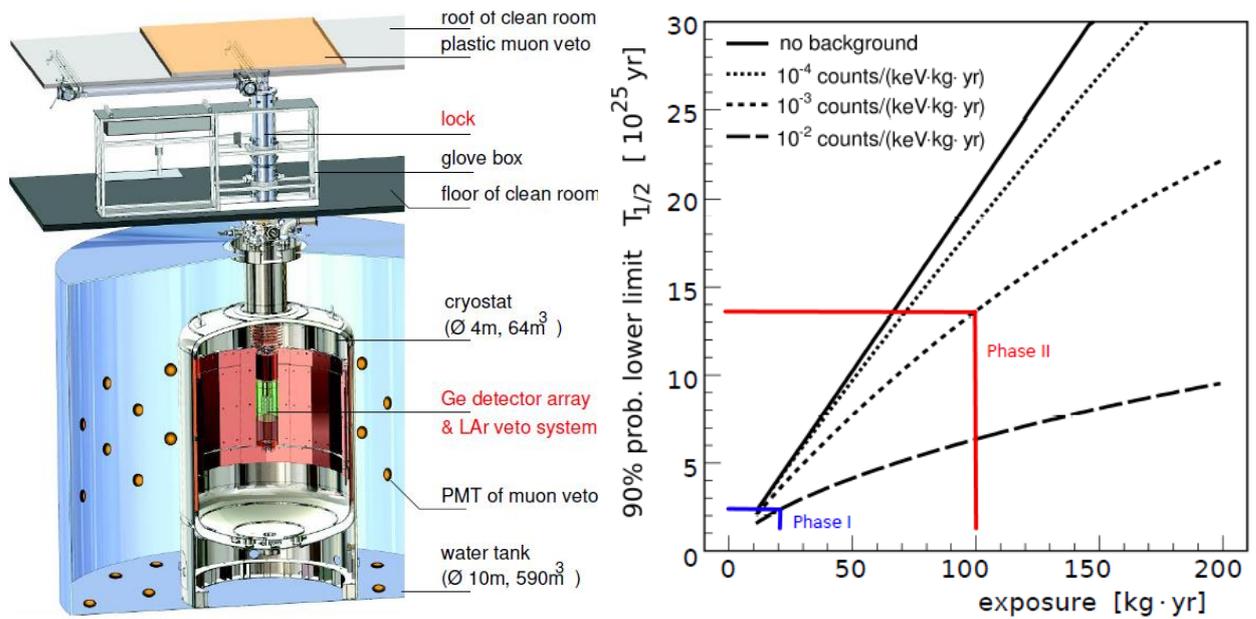


Рис 1. а) Слева: установка GERDA. Компоненты, появившиеся во второй фазе отмечены красным; б) справа: оценка чувствительности эксперимента GERDA в зависимости от экспозиции для различных уровней фона.

Наиболее принципиальное преимущество второй фазы GERDA – это возможность регистрации сцинтилляций в жидком аргоне, окружающем детекторы. Таким образом, аргон уже является активной, а не пассивной, как в первой фазе, защитой от фонового излучения. Система аргонного вето была разработана на базе исследований процессов регистрации сцинтилляций в жидком аргоне в тестовой низкофоновой установке LArGe [5] и с помощью кремниевых фотоумножителей, соединенных со спектросмещающими фибрами. Правильность такого подхода была полностью подтверждена первыми результатами, полученными во второй фазе GERDA. Установка начала свою работу в декабре 2015 года. К июню 2016 года была накоплена статистика в 10,8 кг лет. Этих данных было достаточно, чтобы убедиться в успешном достижении запланированного уровня фона в 10^{-3} отсчетов на кэВ на кг в год и установить новый предел на период полураспада для $0\nu\beta\beta$ распада ^{76}Ge $T_{1/2}^{0\nu} > 5,3 \times 10^{25}$ лет (90% CL) [6].

Последние результаты:

Энергетический спектр для BEGe детекторов, накопленный к настоящему моменту во второй фазе, представлен на Рис. 2.

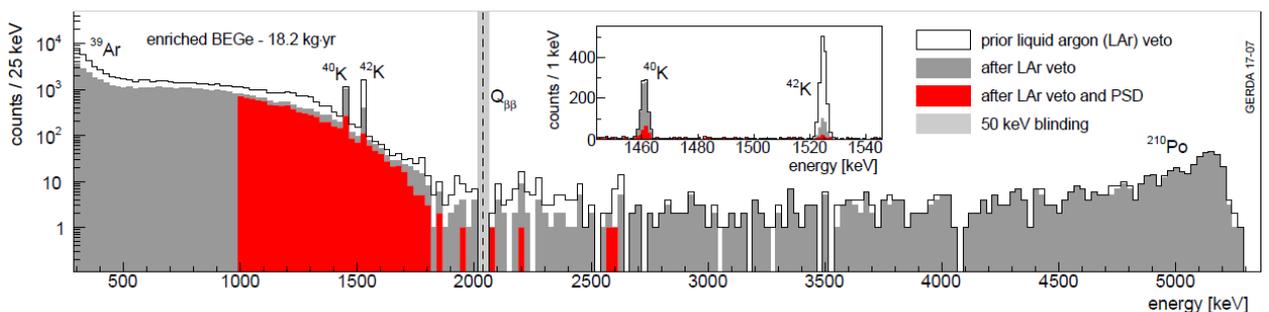


Рис. 2. Энергетический спектр для BEGe детекторов во второй фазе GERDA. На вставке: спектр вблизи γ -линий от ^{40}K и ^{42}K .

Вертикальной полосой отмечен закрытый интервал вблизи $Q_{\beta\beta}$. Для энергий ниже 500 кэВ в спектре доминируют события, вызванные β -частицами из распада ^{39}Ar , до 1,8 МэВ – события $2\nu\beta\beta$ распада ^{76}Ge и комптоновского рассеяния γ -квантов от ^{40}K и ^{42}K . В энергетическом интервале свыше 2,62 МэВ события возникают из-за α -распадов на поверхности p^+ -электрода и в области канавки, в основном от ^{210}Po . Поскольку γ -кванты в случае ^{40}K появляются вследствие электронного захвата, энергопотеря в жидком аргоне не происходит, а значит, для подавления таких событий эффективен лишь метод отбора по форме импульса в германиевом детекторе. В случае же ^{42}K , источником γ -излучения является β -распад и энерговыделение в аргоне может составлять до 2 МэВ. Это позволяет подавить более 80% подобных событий с помощью активного аргонового вето. Вблизи $Q_{\beta\beta}$ спектр состоит из событий от α -частиц, от распадов ^{42}K на поверхности детектора и комптоновски рассеянных γ -квантов от распадов ^{214}Bi и ^{208}Tl . Уровень фона для VEGe детекторов составляет $1.0_{-0.4}^{+0.6} \times 10^{-3}$ отсчетов на кэВ на кг в год. Нормированная на энергетическое разрешение и эффективность, эта величина более чем в пять раз ниже, чем у любого из конкурирующих экспериментов, не использующих германий.

Полная статистика, использованная для последнего анализа, составила 23,5 кг лет и 23,2 кг лет для первой и второй фаз эксперимента соответственно. Ни одного события вблизи $Q_{\beta\beta}$ обнаружено не было. Установлен новый предел на период полураспада ^{76}Ge по данному каналу $T_{1/2}^{0\nu} > 8,0 \times 10^{25}$ лет (90% CL) при чувствительности $5,8 \times 10^{25}$ лет. Это наилучшая чувствительность среди всех существующих экспериментов по поиску $0\nu\beta\beta$ распада.

Накопление данных во второй фазе GERDA будет продолжено вплоть до достижения запланированной экспозиции в 100 кг лет в 2019-2020 гг. К тому моменту чувствительность эксперимента превысит $1,0 \times 10^{26}$ лет. Чувствительность проекта может быть улучшена за счет дополнительного понижения фона и добавления инновационных обогащенных германиевых детекторов. Подобная модификация эксперимента GERDA может быть проведена в 2018-2019 гг. Планируется не только увеличить массу исследуемого изотопа путем добавления новых обогащенных детекторов, но и заменить существующую систему активного аргонового вето усовершенствованной версией.

Расчетная чувствительность эксперимента GERDA не позволяет рассчитывать на получение информации об иерархии масс нейтрино. Поэтому следующим шагом на пути к решению этой проблемы будет создание эксперимента нового поколения LEGEND, в котором также предусмотрено две фазы. В первой из них масса исследуемого изотопа составит ~ 200 кг, а расчетная чувствительность – 10^{27} лет, во второй – 1000 кг и 10^{28} лет соответственно. Реализация этого проекта позволит однозначно ответить на вопрос об иерархии масс нейтрино. Не менее важным является то, что ультранизкофоновый германиевый эксперимент, благодаря высокому энергетическому разрешению применяемых детекторов, имеет несравнимо большую перспективу открытия $0\nu\beta\beta$ распада по сравнению с конкурирующими проектами. Первая фаза нового проекта будет проводиться на базе модифицированной установки GERDA. Наша цель – начать набор данных в эксперименте LEGEND уже в 2021 году.

В коллаборацию GERDA входит более 100 ученых из 16 научных центров шести стран. Высокая компетентность сотрудников ЛЯП ОИЯИ обусловила их участие во всех ключевых этапах реализации проекта. В ЛЯП было создано пластиковое мюонное вето для эксперимента GERDA, заметный вклад был внесен в разработку и создание активного аргонового вето. Физики нашего института участвуют в анализе получаемых данных и играют определяющую роль во всех операциях, связанных с наиболее важной частью проекта – германиевыми

детекторами. Специалисты ОИЯИ активно включились в работу над экспериментом нового поколения LEGEND.

План выполнения проекта:

2018-2019 гг.: Подготовка и проведение модификации эксперимента GERDA путем добавления инновационных детекторов из обогащенного германия и замены имеющегося активного аргонового вето на его усовершенствованную версию. Достижение проектной чувствительности в 10^{26} лет.

2019-2020 гг.: Достижение проектной экспозиции эксперимента GERDA в $100 \text{ кг} \times \text{лет}$. Подготовка к первой фазе крупномасштабного эксперимента LEGEND (закупка обогащенного ^{76}Ge , изготовление и тестирование новых детекторов, разработка низкофоновых материалов и электроники).

2020-2021 гг.: Завершение эксперимента GERDA, публикация финальных результатов. Модификация криостата GERDA для первой фазы LEGEND. Инсталляция детекторов и начало набора данных в проекте LEGEND.

Литература

1. «The GERDA experiment for the search of $0\nu\beta\beta$ decay in ^{76}Ge », Eur. Phys. J. C 73 (2013) 2330.
2. «Results on Neutrinoless Double- β Decay of ^{76}Ge from Phase I of the GERDA Experiment», Phys. Rev. Lett 111 (2013) 122503.
3. «Results on $\beta\beta$ decay with emission of two neutrinos or Majorons in ^{76}Ge from GERDA Phase I», Eur. Phys. J. C 75 (2015) 416.
4. « $2\nu\beta\beta$ decay of ^{76}Ge into excited states with GERDA Phase I», J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 42 (2015) 115201.
5. «LArGe: active background suppression using argon scintillation for the Gerda $0\nu\beta\beta$ -experiment», Eur. Phys. J. C 75 (2015) 506.
6. «Background-free search for neutrinoless double- β decay of ^{76}Ge with GERDA», Nature 544 (2017) 47.