

**Аннотация к проекту
GERDA (LEGEND):
Поиск безнейтринного двойного бета-распада ^{76}Ge**

Участники от ОИЯИ:

В.Б.Бруданин, С.И.Васильев, В.П.Вольных, Л.Грубчин, Ю.Б.Гуров, К.Н.Гусев, С.А.Евсеев, И.В.Житников, И.И.Камнев, А.А.Клименко, А.В.Лубашевский, Ф.Мамедов, И.Б.Немченко, А.В.Рахимов, С.В.Розов, Н.С.Румянцева, В.Г.Сандуковский, А.А.Смольников, Д.В.Философов, М.В.Фомина, Ж.Х.Хушвактов, К.В.Шахов, Е.А.Шевчик, Ю.А.Шитов, Е.А.Якушев

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

Заместители руководителя проекта: А.В.Лубашевский, Н.С.Румянцева

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.

Эксперимент LEGEND, являющийся преемником проекта GERDA, создается для поиска $0\nu\beta\beta$ распада ^{76}Ge . В обоих экспериментах применяются полупроводниковые детекторы, изготовленные из особо чистого германия, обогащенного изотопом ^{76}Ge . Детекторы погружены в криостат, заполненный жидким аргоном, который охлаждает детекторы до необходимой температуры и, одновременно, служит дополнительной пассивной и активной защитой от внешнего радиоактивного фона.

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. Проект GERDA стал первым бесфоновым экспериментом по поиску $0\nu\beta\beta$ распада благодаря беспрецедентному уровню фона $< 10^{-3}$ отсчета на кэВ на кг в год. Это позволило нам достичь намеченной чувствительности $> 10^{26}$ лет после накопления необходимой статистики в 100 кг лет. Опыт, полученный в GERDA в области снижения фона, позволяет рассчитывать на достижение бесфонового режима накопления данных и в проекте нового поколения LEGEND, в котором предусмотрено, как минимум, две фазы. В первой из них (LEGEND-200) масса исследуемого изотопа составит ~ 200 кг, а расчетная чувствительность – 10^{27} лет, во второй (LEGEND-1000) – 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 заметно большую перспективу открытия $0\nu\beta\beta$ распада по сравнению с конкурирующими проектами.

На момент написания проекта в коллаборацию LEGEND входит 240 ученых из 47 научных центров со всего мира. Высокая компетентность сотрудников ЛЯП ОИЯИ обуславливает их участие во всех ключевых этапах реализации проекта. На текущую дату ОИЯИ внес в коллаборацию около 15 кг обогащенного ^{76}Ge и этот вклад ежегодно увеличивается. Объединенная группа специалистов из ОИЯИ и Мюнхенского технического университета отвечает за разработку и изготовление нового активного аргонового вето для LEGEND-200, а также за НИОКР по созданию подобной системы в LEGEND-1000. Наша группа в ОИЯИ проектирует новый перчаточный бокс для проведения операций с открытыми германиевыми детекторами. Сотрудниками ЛЯП ОИЯИ была разработана оригинальная методика по подавлению доминирующего фона от ^{42}Ar , успешно примененная в эксперименте GERDA. Для LEGEND-200 в ОИЯИ будут изготовлены сверхнизкофоновые нейлоновые кожухи со спектросмещающим покрытием, которые будут смонтированы вокруг германиевых детекторов и позволят значительно снизить фон от ^{42}Ar . Физики нашего института участвуют в анализе получаемых данных и играют определяющую роль во всех операциях, связанных с наиболее важной частью проекта – германиевыми детекторами.

Краткое описание проекта

Двойной безнейтринный бета распад – это гипотетический процесс $((A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^-)$, происходящий с изменением лептонного числа. Его открытие установило бы, что нейтрино является майорановской частицей, предоставило бы доступ к абсолютной шкале масс нейтрино и поддержало бы расширения Стандартной модели физики элементарных частиц, которые пытаются объяснить преобладание барионной материи над антиматерией в нашей вселенной. В последних экспериментах, таких как GERDA, были достигнуты пределы на период полураспада по этому каналу, превышающие 10^{26} лет, поэтому для того, чтобы детектировать $0\nu\beta\beta$ распад необходимо практически полностью подавить радиоактивный фон.

Коллаборация LEGEND, в которой объединились ученые из экспериментов GERDA и Majorana, а также некоторых других, направила свои усилия на поиск $0\nu\beta\beta$ распада ^{76}Ge ($^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se} + 2e^-$). В проекте используются полупроводниковые детекторы, изготовленные из особо чистого германия, обогащенного изотопом ^{76}Ge , то есть детектор является одновременно и источником искомых событий. Массив детекторов непосредственно погружается в криостат, заполненный жидким аргоном, который охлаждает детекторы до необходимой температуры и, в то же время, служит дополнительной пассивной и активной защитой от внешнего радиоактивного фона. Запланировано, как минимум, две фазы эксперимента. В первой из них (LEGEND-200) будет использоваться около 200 кг детекторов из обогащенного германия. Чувствительность проекта превысит 10^{27} лет. Во второй фазе эксперимента общая масса ^{76}Ge будет доведена до 1000 кг, а расчетная чувствительность составит 10^{28} лет.

Главным преимуществом LEGEND-200 является использование существующей инфраструктуры эксперимента GERDA [1], поскольку создание крупной экспериментальной установки «с нуля» требует значительных финансовых и временных затрат. В нашем же случае речь идет о модификации уже имеющегося оборудования. Установка (см. Рис. 1) расположена в Национальной лаборатории Гран Сассо в Италии на глубине 3500 метров водного эквивалента.

В эксперименте LEGEND-200 будет непосредственно использовано следующее уже имеющееся оборудование:

- обогащенные германиевые детекторы:
 - ~ 30 кг детекторов из эксперимента GERDA,
 - ~ 30 кг детекторов из эксперимента Majorana,
 - ~ 20 кг детекторов нового типа, уже произведенных в рамках проекта LEGEND (часть из них использовалась в GERDA в последний год набора данных);
- криостат GERDA, диаметр горловины которого (после небольшой модификации) позволит опустить в аргон массив из 14 гирлянд детекторов общей массой 200 кг;
- водяной бак, оборудованный фотоумножителями, и система пластикового мюонного вето;
- чистая комната, расположенная над криостатом;
- лаборатория германиевых детекторов – отдельное помещение (не показано на Рис. 1), также находящееся под землей, в котором происходит монтаж детекторов в капсулы и их предварительное тестирование.

Для успешной реализации проекта LEGEND-200 необходимо дополнительно:

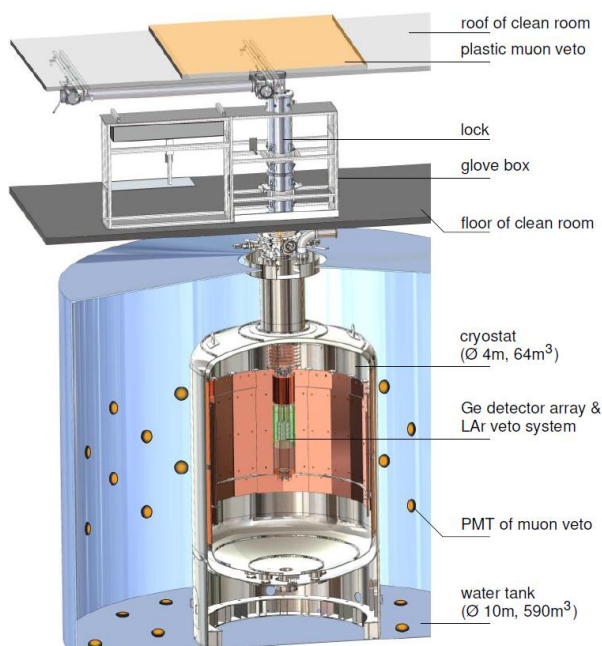


Рис. 1. Установка GERDA. Основные компоненты подписаны.

- Произвести недостающие детекторы из обогащенного германия (~ 120 кг).
- Разработать и изготовить новые капсулы для детекторов. В конструкции капсул для LEGEND-200 широко применяются наработки GERDA с использованием отдельных элементов дизайна капсул из эксперимента Majorana. Так, например, все медные детали будут изготовлены из специальной сверхнизкофоновой меди, произведенной в подземной лаборатории на мощностях Majorana. Это позволит снизить фон от материалов, расположенных около детекторов по сравнению с GERDA.
- Разработать и изготовить сверхнизкофоновые предусилители, первые каскады которых будут располагаться в непосредственной близости от детекторов. Первые каскады предусилителей созданы на базе конструкции, успешно

использованной в Majorana, в то время как вторые каскады усиления, также погруженные в жидкий аргон, но на расстоянии более 40 см от детекторов – адаптированные и модифицированные предусилители из GERDA. Подобная конфигурация позволит снизить уровень электронных шумов, и, как следствие, улучшить энергетическое разрешение и эффективность отбора полезных событий по форме сигнала по сравнению с GERDA.

- Разработать и изготовить новую систему погружения массива детекторов, способную оперировать с массой, в 5 раз превышающей массу детекторов в GERDA.
- Создать новую систему накопления данных с увеличенным числом каналов.
- Разработать и изготовить новую систему активного аргонового вето. Аргоновое вето LEGEND-200 базируется на концепции, предложенной и успешно реализованной в рамках эксперимента GERDA [1, 2]. Разрабатываемая объединенной группой специалистов ОИЯИ и Мюнхенского технического университета вето система LEGEND-200 состоит из двух концентрических цилиндров из спектросмещающих фибр, соединенных с кремниевыми фотоумножителями (Рис. 2).
- Разработать новый перчаточный бокс для операций с открытыми германиевыми детекторами. Бокс для LEGEND-200, включающий в себя систему автоматизации операций, разрабатывается специалистами ОИЯИ на основании опыта, полученного при организации операций с детекторами в эксперименте GERDA, а также при создании перчаточного бокса, недавно установленного в чистой комнате НЭОЯСиРХ ЛЯП ОИЯИ.
- Разработать и изготовить сверхнизкофонные нейлоновые кожухи со спектросмещающим покрытием, которые будут смонтированы вокруг германиевых детекторов, и позволят значительно снизить вклад в общий индекс фона от одного из доминирующих его источников, а именно ^{42}Ar . Эта оригинальная методика была разработана сотрудниками ОИЯИ и успешно применена в GERDA [3]. Все необходимые кожухи для LEGEND-200 будут изготовлены по усовершенствованной методике в специальном перчаточном боксе в чистой комнате НЭОЯСиРХ ЛЯП ОИЯИ.

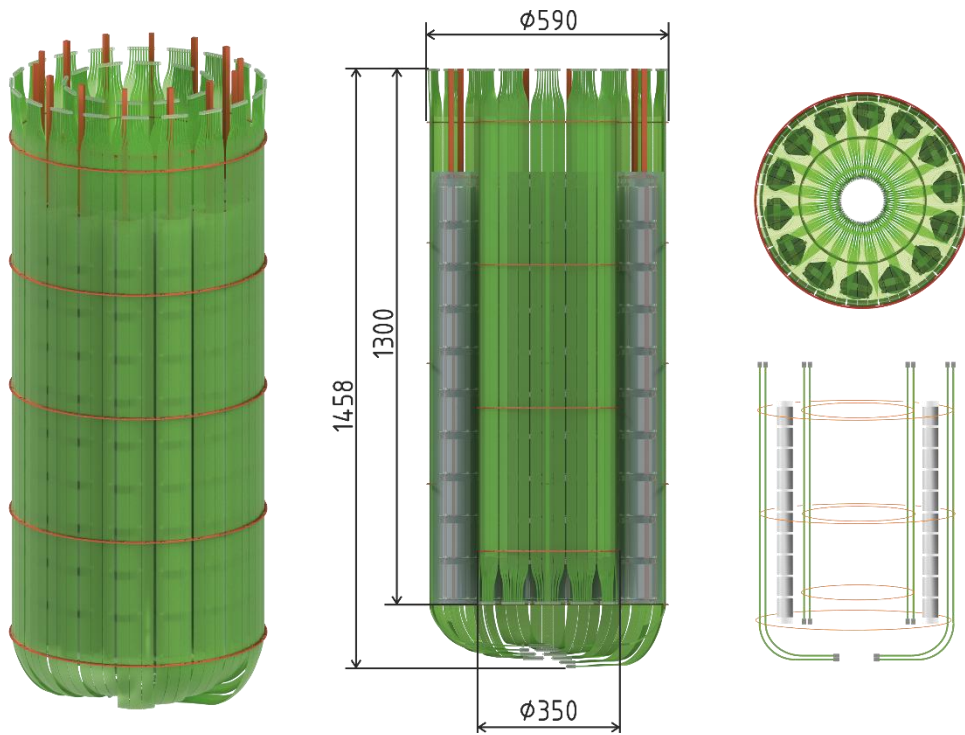


Рис. 2. Последний вариант дизайна системы активного аргонового veto для LEGEND-200, разработанный специалистами ОИЯИ и Мюнхенского технического университета.

Чувствительность эксперимента как функция экспозиции и уровня радиоактивного фона представлена на Рис. 3. В случае, если удастся достичь бесфонового режима набора данных, чувствительность линейно растет с экспозицией, если же в области интереса имеются фоновые события – то она пропорциональна квадратному корню из накопленной статистики. Из Рис. 3 видно, что даже при консервативной оценке возможного фона в 2×10^{-4} отсчета на кэВ на кг в год (или 0.6 отсчета на FWHM на тонну в год) LEGEND-200 сумеет достичь запланированной чувствительности в 10^{27} лет уже после 5 лет набора данных.

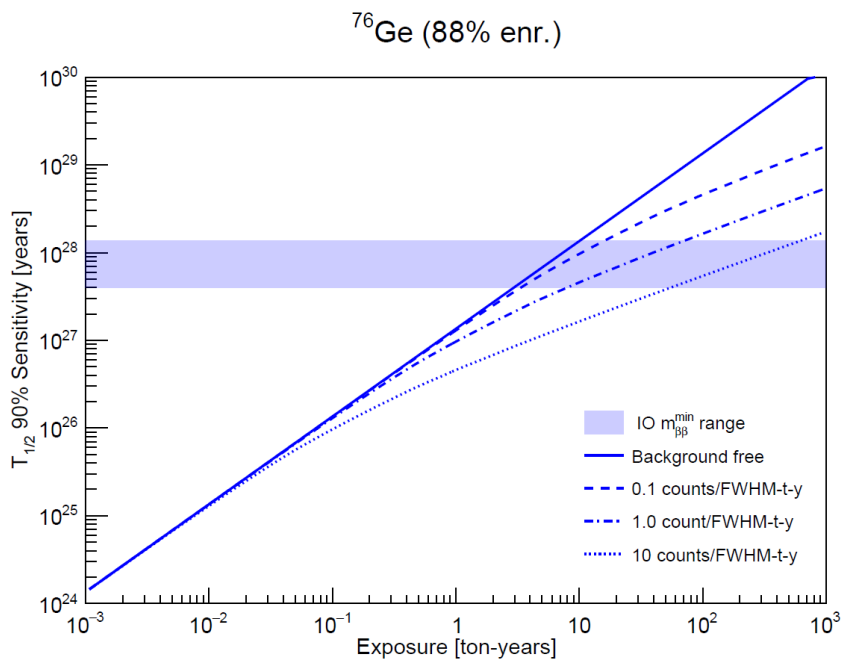


Рис. 3. Чувствительность германиевого эксперимента в зависимости от экспозиции и уровня фона.

Последние результаты:

Достигнутый недавно, при непосредственном участии группы ОИЯИ, финальный результат эксперимента GERDA в области поиска $0\nu\beta\beta$ распада ^{76}Ge открывает оптимистичные перспективы для германиевого проекта следующего поколения LEGEND, поэтому представляется целесообразным привести его здесь. Энергетический спектр, соответствующий полной статистике эксперимента GERDA Фаза II, представлен на Рис. 4. Достигнут беспрецедентный уровень фона в $5.2_{-1.3}^{+1.6} \times 10^{-4}$ отсчета 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 финального анализа, составила 127,2 кг лет (23,5 кг лет и 103,7 кг лет для первой и второй фаз эксперимента соответственно). Ни одного события вблизи $Q_{\beta\beta}$ обнаружено не было. Установлен лучший в мире предел на период полураспада ^{76}Ge по данному каналу $T_{1/2}^{0\nu} > 1,8 \times 10^{26}$ лет (90% CL) при беспрецедентной чувствительности $1,8 \times 10^{26}$ лет. Линейная зависимость чувствительности от экспозиции, продемонстрированная в GERDA (Рис. 5), подтверждает, что накопление данных в эксперименте проходило в бесфоновом режиме. Высокая компетентность сотрудников ЛЯП ОИЯИ обусловила их участие во всех ключевых этапах реализации проекта GERDA, а сейчас наши специалисты активно включились в работу над экспериментом нового поколения LEGEND.

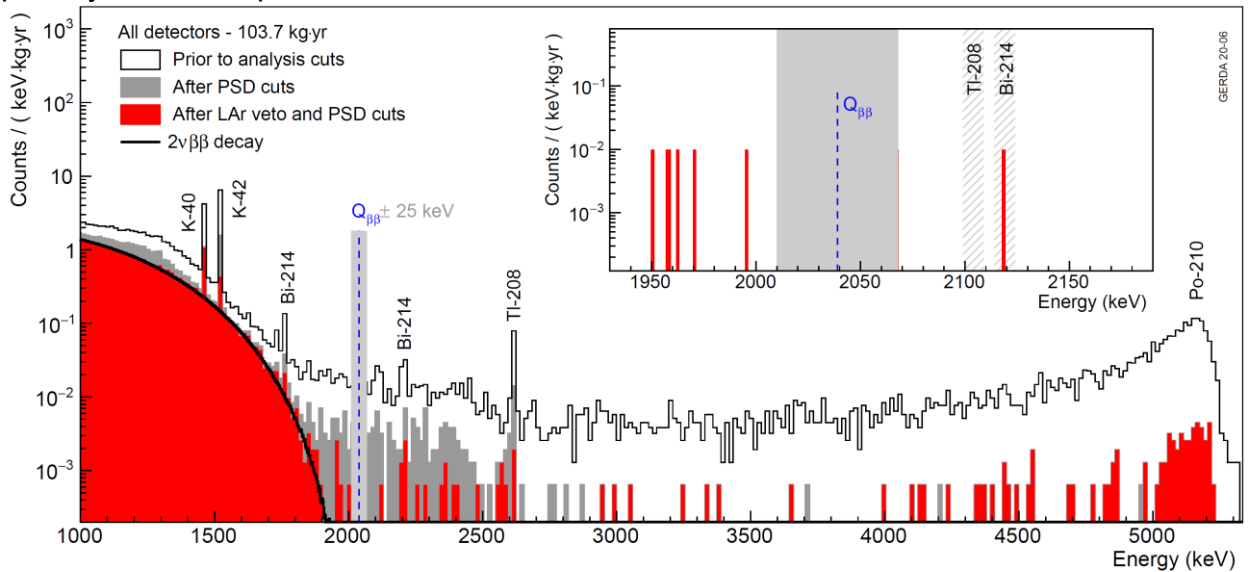


Рис. 4. Финальный энергетический спектр эксперимента GERDA Фаза II. На вставке: спектр в области интереса вблизи энергии $0\nu\beta\beta$ распада ^{76}Ge .

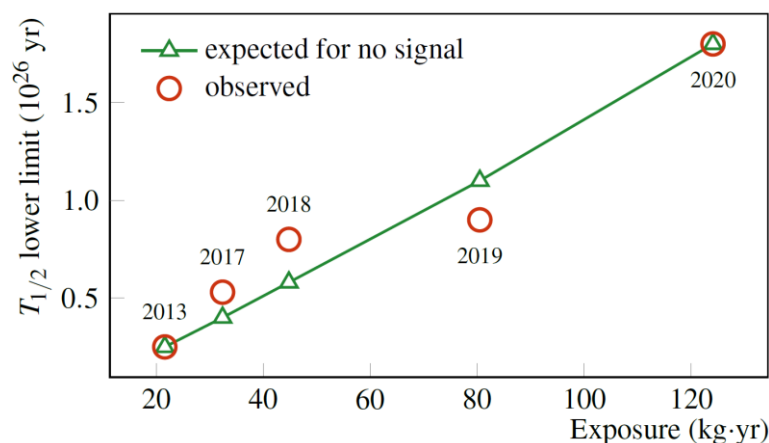


Рис. 5. Зависимость чувствительности от экспозиции, измеренная в эксперименте GERDA.

План выполнения проекта:

2021-2022 гг.: Подготовка и проведение модификации криостата GERDA для LEGEND-200. Инсталляция первых гирлянд детекторов и начало набора данных в эксперименте. Разработка дизайна второй фазы проекта – LEGEND-1000.

2022-2023 гг.: Набор данных в LEGEND-200. Завершение инсталляции LEGEND-200 путем добавления вновь произведенных обогащенных детекторов. Публикация первых результатов. Подготовка к LEGEND-1000 (закупка обогащенного ^{76}Ge , изготовление и тестирование новых детекторов, НИОКР в области низкофоновых материалов и электроники).

2023-2024 гг.: Набор данных в LEGEND-200. Добавление новых гирлянд детекторов в центральную часть массива. Публикация улучшенных результатов LEGEND-200. Завершение разработки дизайна LEGEND-1000. Продолжение подготовки к LEGEND-1000 (закупка обогащенного ^{76}Ge , изготовление и тестирование новых детекторов, НИОКР в области низкофоновых материалов и электроники).

Список публикаций

1. «Upgrade for Phase II of the GERDA Experiment», Eur. Phys. J. C 78 (2018) 388.
2. «LArGe: active background suppression using argon scintillation for the Gerda $0\nu\beta\beta$ -experiment», Eur. Phys. J. C 75 (2015) 506.
3. «Mitigation of $^{42}\text{Ar}/^{42}\text{K}$ background for the GERDA Phase II experiment», Eur. Phys. J. C 78 (2018) 15.
4. «The GERDA experiment for the search of $0\nu\beta\beta$ decay in ^{76}Ge », Eur. Phys. J. C 73 (2013) 2330.
5. «Results on Neutrinoless Double- β Decay of ^{76}Ge from Phase I of the GERDA Experiment», Phys. Rev. Lett 111 (2013) 122503.
6. «Pulse shape discrimination for GERDA Phase I data», Eur. Phys. J. C 73 (2013) 2583.
7. «The background in the $0\nu\beta\beta$ experiment GERDA», Eur. Phys. J. C 74 (2014) 2764.
8. «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.
9. « $2\nu\beta\beta$ decay of ^{76}Ge into excited states with GERDA Phase I», J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 42 (2015) 115201.
10. «The performance of the Muon Veto of the GERDA experiment», EPJC 76 (2016) 298.

11. «Flux modulations seen by the muon veto of the GERDA experiment», *Astroparticle Physics* 84 (2016) 29.
12. «Limit on the radiative neutrinoless double electron capture of ^{36}Ar from GERDA Phase I», *Eur. Phys. J. C* 76 (2016) 652.
13. «Limits on uranium and thorium bulk content in GERDA Phase I detectors», *Astroparticle Physics* 91 (2017) 15.
14. «Background-free search for neutrinoless double- β decay of ^{76}Ge with GERDA», *Nature* 544 (2017) 47.
15. «The Large Enriched Germanium Experiment for Neutrinoless Double Beta Decay (LEGEND)», *AIP Conference Proceedings* 1894 (2017) 020027.
16. «Improved Limit on Neutrinoless Double- β Decay of ^{76}Ge from GERDA Phase II», *Phys. Rev. Lett.* 120 (2018) 132503.
17. «Characterization of 30 ^{76}Ge enriched Broad Energy Ge detectors for GERDA Phase II», *Eur. Phys. J. C.* 79 11 (2019) 978.
18. «Probing Majorana neutrinos with double- β decay», *Science* 365 (2019) 1445.
19. «Modeling of GERDA Phase II data», *Journal of High Energy Physics* 03 (2020) 139.
20. «First Search for Bosonic Superweakly Interacting Massive Particles with Masses up to 1 MeV/c² with GERDA», *Phys. Rev. Lett.* 125 (2020) 011801.
21. «Final Results of GERDA on the Search for Neutrinoless Double- β Decay», accepted by *Physical Review Letters*, arXiv: 2009.06079.