

УДК 539.165.3, 539.16.07

*Н. С. Румянцева, К. Н. Гусев*

## Эксперименты по поиску двойного безнейтринного бета-распада

*Двойной безнейтринный бета-распад – это процесс, идущий с нарушением закона сохранения лептонного числа, вследствие чего запрещенный в Стандартной модели (СМ) электрослабого взаимодействия. Обнаружение данного процесса будет однозначным подтверждением существования Новой физики за пределами СМ. На сегодняшний день проводится множество экспериментов, направленных на поиск двойного безнейтринного бета-распада на различных изотопах ( $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{136}\text{Xe}$ ,  $^{130}\text{Te}$ ,  $^{100}\text{Mo}$  и др.). В предлагаемой работе представлены краткий обзор результатов некоторых из актуальных проектов, таких как GERDA, MAJORANA, KamLAND-Zen, EXO-200, CUORE и SuperNEMO, и планы по созданию экспериментов нового поколения.*

*Ключевые слова: двойной безнейтринный бета-распад, Стандартная модель, Новая физика, детекторы*

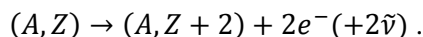
### Об авторах

**Румянцева Надежда Сергеевна** – ассистент, Кафедра нанотехнологий и новых материалов, государственный университет «Дубна», младший научный сотрудник, лаборатория ядерных проблем, Объединенный институт ядерных исследований, Дубна. *E-mail*: rumyantseva.nads@gmail.com. Московская обл., г. Дубна, пр-т Боголюбова, д. 16/2, кв. 73.

**Гусев Константин Николаевич** – старший научный сотрудник, лаборатория ядерных проблем, Объединенный институт ядерных исследований, Дубна.

На протяжении уже более семидесяти лет двойные бета-процессы (особенно в их безнейтринных модах) привлекают к себе повышенное внимание экспериментаторов. Этот интерес объясняется тем, что само существование двойных безнейтринных процессов непосредственно связано с такими принципиальными вопросами физики элементарных частиц, как не сохранение лептонного заряда, наличие у нейтрино массы и ее природа, существование правых токов в электрослабом взаимодействии, суперсимметрия и т.д.

Для 35 ядер обычный бета распад энергетически запрещен, однако может идти двойной двух- $(2\nu\beta\beta)$  или безнейтринный бета  $(0\nu\beta\beta)$  распад:



$2\nu\beta\beta$ -распад является процессом второго порядка по слабому взаимодействию и не запрещен законами сохранения, а его регистрация дает информацию о значениях ядерных матричных элементов (ЯМЭ) для  $2\beta$ -переходов. Безнейтринная мода двойного бета-распада идет с нарушением закона сохранения лептонного числа ( $\Delta L = 2$ ), поэтому запрещена в Стандартной модели электрослабо-

го взаимодействия, поскольку в этой модели лептонное число сохраняется. Таким образом, обнаружение  $0\nu\beta\beta$ -распада, каким бы механизмом он ни вызывался, однозначно свидетельствовало бы о проявлении Новой физики. Существование двойного безнейтринного бета-распада предполагает, что частица нейтрино является собственной античастицей (майорановским фермионом). И именно  $0\nu\beta\beta$ -распад является наиболее эффективным методом измерения майорановской массы нейтрино. На данный момент определены только ограничения на период полураспада для различных ядер и, соответственно, пределы на эффективную массу майорановского нейтрино. Кроме того, ограничения на вероятность двойного безнейтринного бета-распада позволяют установить пределы и на другие параметры теории, такие как, например, константы связи правых лептонных и кварковых токов в слабом взаимодействии и нейтрино с майороном, а также некоторые параметры суперсимметричных моделей.

В природе существует 35 ядер-кандидатов на возможный  $2\beta$ -распад, однако наибольший интерес представляют ядра с энергией  $2\beta$ -перехода  $Q_{\beta\beta} > 2$  МэВ, поскольку вероятность процесса сильно зависит от энергии перехода. Кроме того, чем выше энергия  $2\beta$ -перехода, тем меньше фон в области возможного сигнала.

Экстремально большое время жизни ядер, распадающихся по  $2\beta$ -каналу, осложняет осуществление любого прямого эксперимента по изучению  $2\beta$ -процессов. Наиболее значимым фактором здесь становится максимальное уменьшение радиоактивного фона. Перечислим основные источники фона: космическое излучение, радиоактивность окружающей среды, радиоактивные примеси в самом детекторе и в материалах установки, взаимодействие входящих в состав детектора ядер с фоновыми нейтронами. Кроме того, фон может быть обусловлен и электромагнитными помехами. Для подавления фона детекторы окружаются комбинированными активной и пассивной защитами от внешних излучений. Конструкционные материалы тщательно отбираются по радиационной чистоте. Измерения проводятся в подземных низкофоновых лабораториях для устранения мюонной компоненты космического излучения. В течение всего эксперимента проводится многоэтапный анализ и устранение источников фона. Типичный эксперимент по исследованию  $2\beta$ -распада предполагает непрерывное функционирование детекторов и вспомогательного оборудования в течение тысяч часов, что накладывает особые требования на стабильность и надежность работы аппаратуры.

Среди прямых экспериментов можно рассматривать отдельно эксперименты калориметрического типа, т.е. эксперименты с «активным  $2\beta$ -источником» (в состав материала детектора входит изотоп-кандидат на  $2\beta$ -распад) и с «пассивным источником» (тонкий слой источника помещается между регистрирующими детекторами). Каждый из этих классов имеет свои преимущества и недостатки. Так, в случае пассивного источника появляется возможность исследовать энергетические спектры одиночных электронов, излучаемых в  $2\beta$ -распаде, и существенно подавлять фон за счет использования схемы совпадений. Однако вследствие самопоглощения электронов (или рентгеновского излучения) источником и геометрического фактора эффективность регистрации искомым событиям в данном классе экспериментов невысока. Эффективность методики с активным источником приближается к 100%, но в данном случае детектор в большинстве случаев способен измерять лишь полную энергию, выделенную в  $2\beta$ -распаде.

В разрешенной моде  $2\beta$ -распада высвобождающаяся энергия  $Q_{\beta\beta}$  распределяется между четырьмя испускаемыми частицами и ее измеряемая часть (а именно, суммарная энергия двух электронов) имеет непрерывный спектр. В случае  $0\nu\beta\beta$ -распада почти вся энергия перехода распределяется между двумя электронами. Доля энергии, приходящаяся на отдачу ядра, пренебрежимо мала. Таким образом, спектр суммарной энергии электронов при экспериментальном обнаружении процесса должен иметь вид (в случае достаточного энергетического разрешения аппаратуры) узкого пика, положение которого на шкале энергий соответствует энергии распада. Поэтому энергетическое разрешение детектора для регистрации данного процесса имеет решающее значение. С этой точки зрения, эксперименты, в которых используются полупроводниковые детекторы, изготовленные из германия, обогащенного изотопом  $^{76}\text{Ge}$ , обладают несомненным преимуществом вследствие великолепного энергетического разрешения, присущего германиевым детекторам (рис. 1).

Однако существует множество перспективных экспериментов по поиску  $0\nu\beta\beta$ -распада, в которых применяются другие изотопы-кандидаты. Общая черта большинства современных проектов – использование методики с «активным» источником, но также реализуются и эксперименты с внешним источником. В данной статье рассмотрены наиболее чувствительные современные эксперименты. На сегодняшний день  $0\nu\beta\beta$ -распад не зарегистрирован, однако накопленные экспериментальные данные позволяют получить ограничение на эффективную массу майорановского нейтрино. Надежность и точность этого ограничения во многом определяется качеством расчетов ЯМЭ для  $0\nu\beta\beta$ -процесса, что является крайне сложной теоретической задачей. В настоящее время точность этих расчетов недостаточно высока, однако в последние годы и здесь достигнут заметный прогресс. Если еще 10 лет назад значения матричных элементов отличались в вычислениях разных авторов в 3 раза и более, то сегодня эти расхождения снизились до 1.5–2 раз. В любом случае, используя наиболее консервативные значения ЯМЭ ( $0\nu\beta\beta$ ), можно получить вполне надежное ограничение на массу нейтрино.

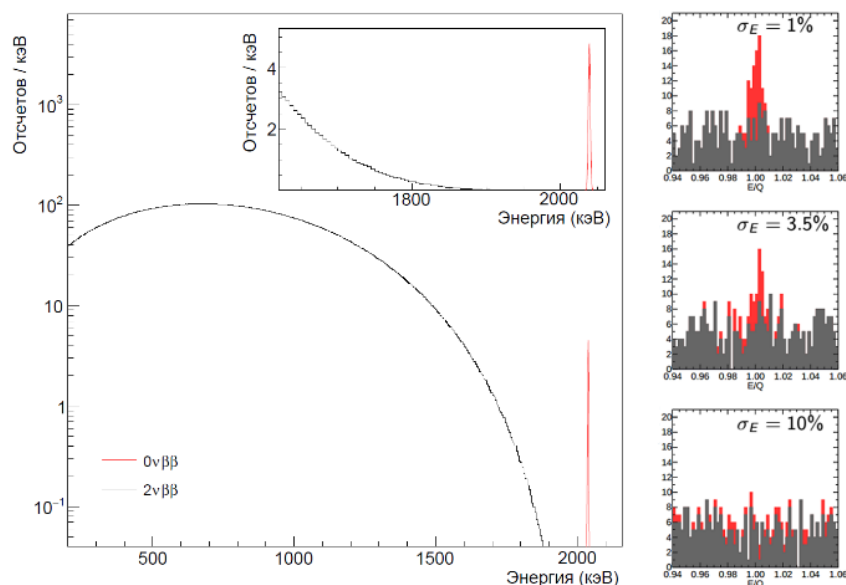


Рис. 1. Аппаратурный спектр двухнейтринной и безнейтринной мод двойного бета-распада и влияние энергетического разрешения на возможность выделения искомого сигнала из фона

### Эксперименты

*GERDA* [2] – эксперимент по поиску  $0\nu\beta\beta$ -распада  $^{76}\text{Ge}$ . В данном проекте используются полупроводниковые детекторы, изготовленные из обогащенного германия  $^{76}\text{Ge}$ . Эксперимент *GERDA* проводится в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия) на глубине 3500 метров водного эквивалента, что позволяет подавить поток космических мюонов до  $1,25 \mu$  на  $\text{м}^2$  в час. Главной особенностью данного проекта является использование открытых германиевых детекторов, погруженных непосредственно в жидкий аргон, который не только охлаждает детекторы до нужной температуры, но и является активной защитой от фоновое излучения. Криостат с жидким аргоном в свою очередь помещен в бак с чистой водой, играющей роль пассивной и активной защиты (посредством регистрации мюонов за счет черенковского излучения). На данном этапе (фаза 2) исследуется около 40 кг обогащенного германия в виде полупроводниковых германиевых детекторов. Экспериментальная установка *GERDA* представлена на рис. 2. Набор данных начат с декабря 2015 г. Авторы статьи являются непо-

средственными участниками данного эксперимента.

*MAJORANA* [7] – американский эксперимент, также как *GERDA*, избравший в качестве и источника, и детектора германий. Однако здесь полупроводниковые детекторы из  $^{76}\text{Ge}$  работают в стандартной конфигурации: они размещены в вакуумных криостатах, изготовленных из высококачественной меди (рис. 3). В *MAJORANA* исследуется 40 кг HPGe-детекторов (30 кг обогащенного германия и 10 кг натурального германия). Эксперимент расположен в подземной лаборатории *SURF* в США на глубине 4300 метров водного эквивалента. Набор данных в *MAJORANA* начат в декабре 2015 г. После достижения необходимой статистики и получения научных результатов планируется объединение коллабораций *MAJORANA* и *GERDA* для совместной реализации масштабного германиевого эксперимента *LEGEND*. Сначала планируется измерять 200 кг обогащенного германия  $^{76}\text{Ge}$  в проекте *LEGEND-200*, который будет запущен в 2020 г. [3], а в следующей фазе проекта измерять тонну  $^{76}\text{Ge}$ .



Рис. 2. Экспериментальная установка GERDA

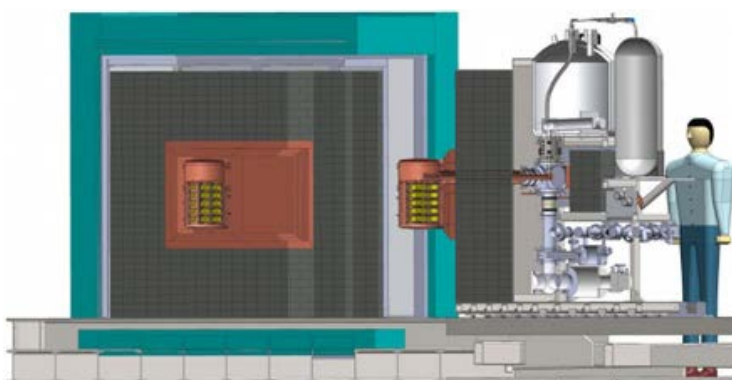


Рис. 3. Экспериментальная установка MAJORANA

Эксперименты *KamLAND-Zen* [1] и *EXO-200* [12] используют в качестве изотопа  $^{136}\text{Xe}$  в жидком виде. В эксперименте *KamLAND-Zen* детектор представляет собой сферу (внешний баллон), окруженную водной защитой (рис. 4). Внешний баллон содержит 1000 т жидкого сцинтиллятора, в центре детектора помещен дополнительный внутренний баллон, содержащий 13 т жидкого сцинтиллятора. В чувствительном объеме содержится 179 кг  $^{136}\text{Xe}$ . Проводится данный эксперимент в подземной лаборатории Камиока (Япония) на глубине 2700 метров водного эквивалента. В 2018 г. коллаборация установила новую сферу увеличенного размера, которую планируется заполнить ксенонсодержащим сцинтиллятором (~750 кг) в начале следующего года. В дальнейшем планируется проведение эксперимента *KamLAND2-Zen*, в котором масса  $^{136}\text{Xe}$  будет доведена до 1 тонны.

Эксперимент *EXO-200* проводится в подземной лаборатории *WIPP* (США) глубиной 1585 метров водного эквивалента, детектором служит времяпроекционная камера (TPC) на жидком ксеноне, которая окружена слоями пассивной и активной защиты. В чувствительном объеме содержится 79.4 кг  $^{136}\text{Xe}$ . Следующим шагом будет создание установки *nEXO* [8] с несколькими тоннами обогащенного ксенона в лаборатории *SNOLAB* (Канада) глубиной 6000 метров водного эквивалента. Экспериментальная схема установки представлена на рис. 5.

*CUORE* [9] – проект, разработанный для поиска двойного безнейтринного бета-распада изотопа  $^{130}\text{Te}$ . Данный эксперимент, как и *GERDA*, расположен в Национальной лаборатории Гран Сассо (Италия). В проекте применяются криогенные детекторы (болометры), изготовленные из диоксида теллура (рис. 6).

Всего в эксперименте используются 988 болометров полной массой 741 кг (206 кг обогащенного  $^{130}\text{Te}$ ). На сегодняшний день в эксперименте идет набор данных. Помимо этого, проводится активная подготовка к болометрическому эксперименту следующего поколения *CUPID* [10], в котором, помимо увеличения массы исследуемого изотопа, будут также применяться методики подавления фона посредством идентификации типа ионизирующего излучения за счет регистрации двойного сигнала (тепловой и сцинтилляционный).

Эксперимент *SuperNEMO* – это, пожалуй, единственный на сегодня эксперимент, использующий методику «пассивного» источника [6], позволяющую одновременно исследовать несколько изотопов-кандидатов на двойной бета-распад. Детектор имеет планарную геометрию

и состоит из 20 идентичных секций, в центр которых помещается источник. Экспериментальная установка показана на рис. 7. Данный проект является наследником успешного эксперимента *NEMO-3*, в котором, помимо пределов на периоды полураспада  $0\nu\beta\beta$ -распада для различных изотопов ( $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{116}\text{Cd}$ ,  $^{150}\text{Nd}$ ), получены важные экспериментальные результаты по двухнейтринным, а также экзотическим модам бета-распада. В настоящее время первый модуль установки *SuperNEMO (Demonstrator)* смонтирован в подземной лаборатории в Модане (Франция) и проходит последние тесты перед началом набора данных.

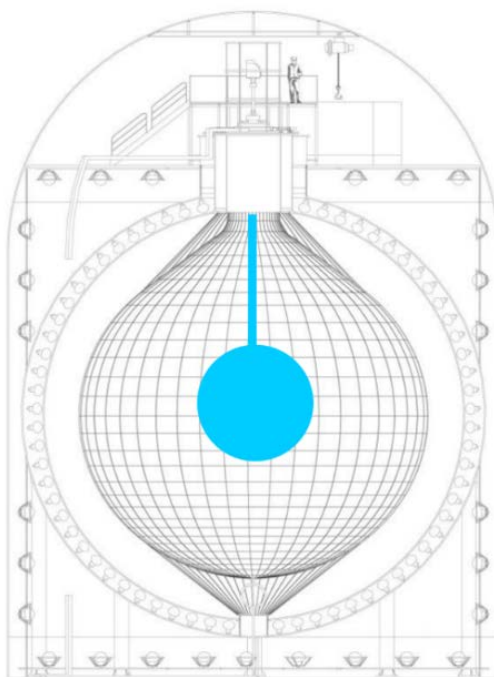


Рис. 4. Экспериментальная установка *KamLAND-Zen*

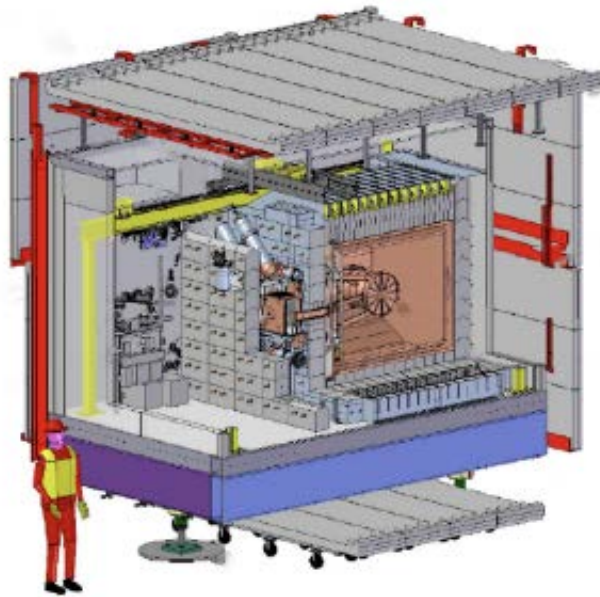


Рис. 5. Экспериментальная установка *EXO-200*

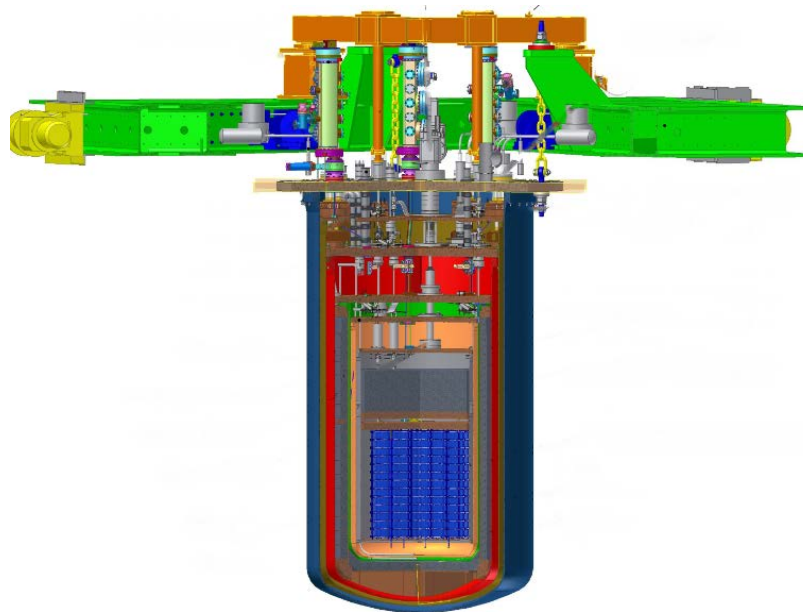


Рис. 6. Экспериментальная установка *CUORE*

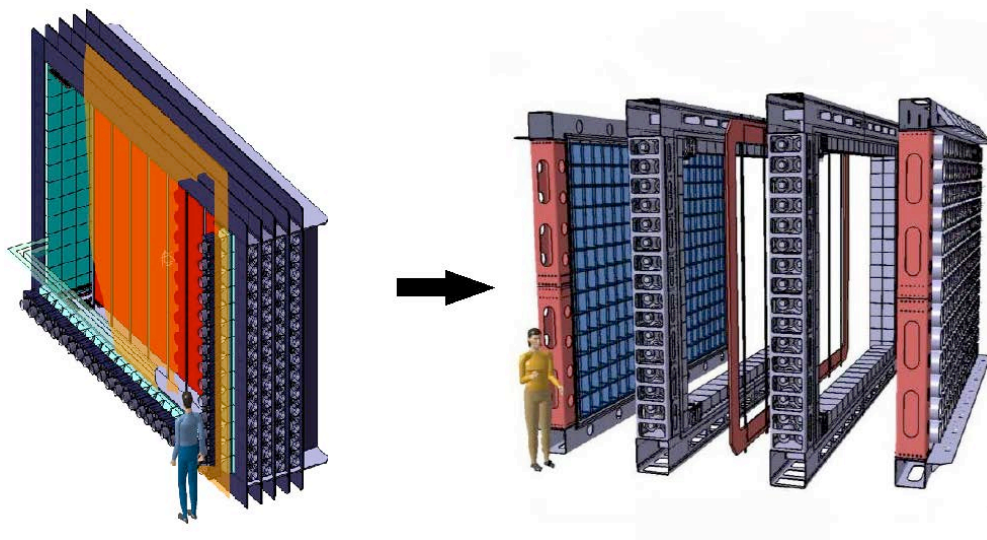


Рис. 7. Экспериментальная установка SuperNEMO

### Результаты

Как упоминалось выше, связь между периодом полураспада двойного безнейтринного бета-распада и эффективной массой майорановского нейтрино представлена следующей формулой [4], в которую входит ЯМЭ:

$$\frac{1}{T_{1/2}^{0\nu}} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 (m_{\beta\beta})^2.$$

На сегодняшний день лучший результат для  $^{76}\text{Ge}$  дает эксперимент GERDA:  $T_{1/2} > 9 \cdot 10^{25}$  лет (на 90% уровне достоверности) при беспрецедентной чувствительности  $11 \cdot 10^{25}$  лет (на 90% уровне достоверности). Кроме того, достигнут рекордный индекс фона при нормировании на энергетическое разрешение в области  $0\nu$ -распада:  $BI \sim 0.6 \cdot 10^{-4}$  событий/(кэВ·кг·год).

Для  $^{136}\text{Xe}$  лучший результат на период полураспада получен в эксперименте KamLAND-Zen:  $T_{1/2} > 10.7 \cdot 10^{25}$  лет при чувствительности  $5.6 \cdot 10^{25}$  лет. В таблице представлены последние результаты, полученные в описанных экспериментах, среди прочего также указаны ограничения на массу майорановского нейтрино, вычисленные с использованием ядерных матричных элементов, значения которых различаются в вычислениях разных авторов в 1.5–2 раза [5]. Проведя комбинированный анализ полученных ограничений на майорановскую массу из разных экспериментов, получим новое ограничение на эффективную майорановскую массу:  $m_{\beta\beta} > 65\text{--}158$  мэВ.

### Сравнение различных экспериментов по поиску двойного безнейтринного бета-распада

| Эксперимент | Исследуемый изотоп | Экспозиция, кг·лет | Предел $T_{1/2}, 10^{25}$ лет | Чувствительность $T_{1/2}, 10^{25}$ лет | Масса $m_{\beta\beta}$ , мэВ |
|-------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|---|------------------------------|
| GERDA       | $^{76}\text{Ge}$   | 82.4               | 9                             | 11                                      | 112–228                      |
| Majorana    | $^{76}\text{Ge}$   | 26.0               | 2.7                           | 4.8                                     | 169–346                      |
| KamLAND-Zen | $^{136}\text{Xe}$  | 593.5              | 10.7                          | 5.6                                     | 76–234                       |
| EXO-200     | $^{136}\text{Xe}$  | 177.6              | 1.8                           | 3.7                                     | 93–287                       |
| CUORE       | $^{130}\text{Te}$  | 24.0               | 1.5                           | 0.7                                     | 162–757                      |

### Заключение

Поиск двойного безнейтринного бета-распада – это одна из важнейших задач современной физики, что подтверждается значи-

тельным количеством проводимых и планируемых экспериментов, малая часть из которых освещена в данной работе. Однако создание крупномасштабного проекта нового поколения в этой области исследований является

грандиозной экспериментальной задачей, т.к. требуется проводить длительные измерения громадных количеств исследуемого изотопа при условии обеспечения практически нулевого фона. Несмотря на это, значительные успехи, достигнутые в актуальных экспериментах, позволяют рассчитывать на успешное решение такой задачи даже для нескольких изотопов. Крайне важно отметить, что последние расчеты вероятности открытия процесса двойного безнейтринного бета-распада показывают, что эта вероятность достаточно велика для большинства проектов нового поколения даже в случае нормальной иерархии нейтринных масс [11].

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Aalseth C.E. *et al.* [Majorana Collaboration] // *Phys. Rev. Lett.* – 2018. – V. 120. – P. 132502.
2. Abgrall N. *et al.* [LEGEND Collaboration]. arXiv:1709.01980
3. Agostini M.*et al.* [GERDA Collaboration] // *Eur. Phys. J. C V.* – 2018. – V. 78. – P. 388.
4. Agostini M., Benato G. and Detwiler J. A. // *Phys. Rev. D.* – 2017. – V. 96. – P. 053001.
5. Alduino C. *et al.* [CUORE Collaboration] // *Phys. Rev. C.* – 2018. – V. 97. – P. 055502.
6. Arnold R. *et al.* // *Eur. Phys. J. C.* – 2010. – V. 70. – P. 927.
7. Asakura K. *et al.* [KamLAND-Zen Collaboration] // *AIP Conf. Proc.* – 2015. – V. 1666. – P. 170003.
8. Azzolini O. *et al.*, arXiv:1802.07791
9. Dell’Oro S., Marcocci S., Vissani F. // *Phys. Rev. D.* – 2014. – V. 90. – P. 033005.
10. Leonard D.S. *et al.* [EXO-200 Collaboration] // *NIM in Physics Research A.* – 2017. – V. 871. – P. 169–179.
11. Licciardi C. [nEXO Collaboration] // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series.* – 2017. – V. 888. – P. 012237.
12. Simkovic F. *et al.* // *Phys. Rev. C.* – 2013. – V. 87. – P. 045501.

---

*Поступила в редакцию  
19.07.2019*