

Безнейтринный двойной бета-распад

Г. И. Быхало^{1,2*}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д.1 стр. 2

Безнейтринным $(0\nu)2\beta$ -распадом называют процессы двойного β -распада ядер без образования нейтрино в конечном состоянии: $A(Z, N) \rightarrow A(Z+2, N-2) + 2e^-$. Распад возможен, если лептонное число не сохраняется, то есть, нейтрино ν_e — истинно нейтральная майорановская частица. Необходимым условием также является смена спиральности нейтрино, что прямо связано с вопросом о массе этой частицы. Средняя оценка характерных периодов полураспада составляет более 10^{23} лет.

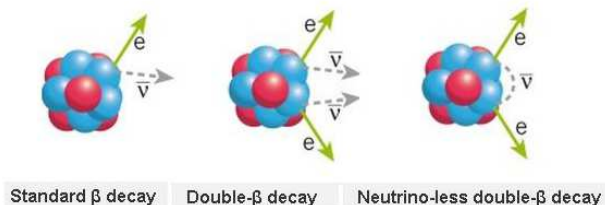
PACS: 23.40.-s

УДК: 539.16.

Ключевые слова: двойной бета-распад, безнейтринный двойной бета-распад, нейтрино.

ВВЕДЕНИЕ

Поиск безнейтринного двойного бета-распада и наблюдение этого типа ядерного распада имеют важные следствия для нашего понимания физики, указывая на возможное нарушение закона сохранения лептонного числа. Нарушение этого закона означает подтверждение идентичности нейтрино и антинейтрино и проливает свет на загадочный факт, состоящий в том, что в результате Большого взрыва образовалось больше материи, чем антиматерии.



$$A(Z, N) \rightarrow A(Z + 2, N - 2) + 2e^- + 2\bar{\nu}_e,$$

$$A(Z, N) \rightarrow A(Z - 2, N + 2) + 2e^+ + 2\nu_e.$$

2β -распад возможен только при определенном условии. Для его наблюдения необходимо, чтобы цепочка двух последовательных одиночных β -распадов

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 1) + e^- + \bar{\nu}_e \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^- + 2\bar{\nu}_e,$$

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z - 1) + e^+ + \nu_e \rightarrow (A, Z - 2) + 2e^+ + 2\nu_e.$$

была запрещена по энергии или сильно подавлена законом сохранения полного момента импульса (т.е., цепочка имеет малую вероятность). Такая ситуация возникает при слишком большой массе M промежуточного ядра $A(Z \mp 1, N \pm 1)$ или полном угловом моменте \mathbf{I} , сильно отличающемся от моментов начального или конечного ядер.

1. ДВОЙНОЙ БЕТА-РАСПАД

Двойной бета-распад (2β -распад, $\beta\beta$ -распад) — это общее название нескольких видов радиоактивного распада атомного ядра, которые обусловлены слабым взаимодействием и изменяют заряд ядра на две единицы. Впервые на этот особый вид бета-распада ядер обратила внимание М. Гепперт–Майер еще в 1935 г.

В случае сохранения лептонного числа 2β -распад атомного ядра (A, Z) сопровождается испусканием двух электронов или позитронов и двух электронных антинейтрино или нейтрино $\nu_e(2\nu)$. Происходит превращение в ядро-изобару (то же массовое число A) с электрическим зарядом $Z \mp 2$:

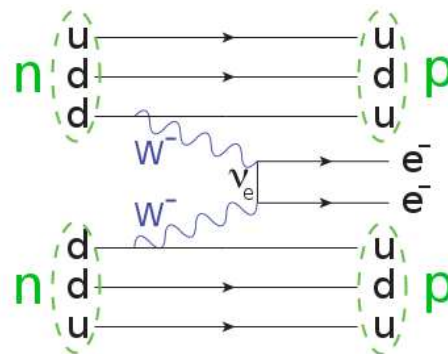


Рис. 1: Диаграмма Фейнмана двойного β -распада

Двойной β -распад является самым редким из всех процессов радиоактивного распада. Зафиксировать его

*E-mail: gi.bykhalo@physics.msu.ru

довольно сложно, и успеха физики добились только в 1986 г. Двойному бета-распаду подвержено совсем небольшое число изотопов, объединённых общим свойством: они имеют большую энергию связи ядра, чем их соседи по периодической таблице с увеличенным на единицу атомным номером, и меньшую энергию связи, чем ядра с атомным номером, сдвинутым на два. В такой ситуации «одинарный» бета-распад энергетически запрещён, тогда как двойной — допускается. Во всех случаях, когда достоверно установлен этот тип распада, периоды полураспада больше 10^{18} лет, что на несколько порядков превышает время существования Вселенной. Все 11 нуклидов, для которых этот процесс достоверно наблюдался, имеют период полураспада больше чем 7×10^{18} лет, а у ^{128}Te период полураспада составляет $(3.5 \pm 2.0) \cdot 10^{24}$ лет, что на сегодня является абсолютным рекордом среди всех радиоактивных изотопов.

2. БЕЗНЕЙТРИННЫЙ ДВОЙНОЙ БЕТА-РАСПАД

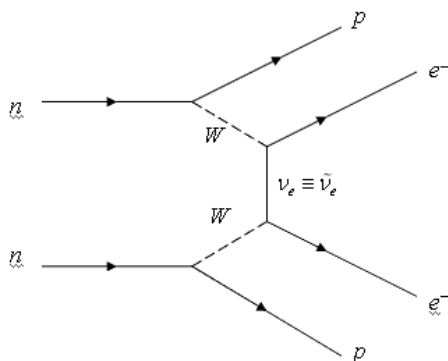


Рис. 2: Безнейтринный двойной β^- -распад

Рассмотрим, чем интересен безнейтринный $(0\nu)2\beta$ -распад — процессы двойного β -распада ядер без образования нейтрино в конечном состоянии:

$$A(Z, N) > A(Z + 2, N - 2) + 2e^-.$$

В этом случае нейтрино, образовавшееся при β -распаде одного из нейтронов ядра (A, Z) взаимодействует со вторым нейтроном образовавшегося ядра $(A, Z + 1)$:

$$n \rightarrow p + e^- + \nu_e,$$

$$n + \nu_e \rightarrow p + e^-.$$

В результате «рождаются» два электрона и заряд ядра увеличивается на две единицы (рис. 2). Распад такого типа возможен, если лептонное число не сохраняется, отчего нейтрино ν_e является истинно нейтральной

частицей, т. е. совпадает (тождественно) со своей античастицей $\bar{\nu}_e$.

$$\nu_e \equiv \bar{\nu}_e.$$

Безнейтринный вариант распада также реализуется только при условии смены спиральности (проекция спина на направление импульса) нейтрино. Возможность такого изменения, в свою очередь, прямо связана с вопросом о массе этой частицы. При ненулевой массе последняя должна двигаться со скоростью меньше скорости света, а это означает, что её всегда можно «обогнать», перейдя в новую систему отсчёта, которая перемещается быстрее; поскольку импульс в этой системе имеет направление, противоположное исходному, вслед за ним и сменится спиральность. Таким образом, если удастся определить, насколько часто происходит безнейтринный двойной бета-распад, возможно будет оценить и массу нейтрино.

Показано, что для осуществления $(0\nu)2\beta$ -распада необходимо, чтобы

- нейтрино являлось майорановской частицей (т. е. представляло собой собственную античастицу);
- нейтрино обладало массой.

Благодаря этому обстоятельству, $(0\nu)2\beta$ -распад является чувствительным показателем майорановской массы нейтрино.

Исследуя $\beta\beta$ -распад, можно найти ответ на один из фундаментальных вопросов физики нейтрино: является ли нейтрино дираковской или майорановской частицей. Дираковское нейтрино существует в двух формах: нейтрино ν_e и антинейтрино $\bar{\nu}_e$. Майорановское нейтрино — симметричная частица: нейтрино тождественно антинейтрино.

Если нейтрино является дираковской частицей, то при двойном β -распаде совместно с двумя электронами должно испускаться два антинейтрино. Расчёты Гепперт-Майер показали, что период полураспада в этом случае должен быть порядка 10^{23} лет.

Если нейтрино майорановская частица, то возможен $\beta\beta$ -распад без испускания нейтрино. Нейтрино, испущенное при распаде первого нейтрона, поглощается тем же ядром при испускании второго электрона (рис. 2).

Двойной β -распад, когда испускание двух электронов сопровождается испусканием двух антинейтрино, — разрешенный в рамках Стандартной модели процесс, но он сильно подавлен, т. к. по константе слабого взаимодействия имеет второй порядок. Характерные времена этого распада составляют 10^{18} – 10^{24} лет.

Итог: безнейтринный 2β -распад сопровождается испусканием только двух электронов, т. е. в этом распаде происходит нарушение закона сохранения лептонного числа L_e на две единицы. Однако такой процесс происходит для майорановского нейтрино $\nu_e \equiv \bar{\nu}_e$ с массой, не равной 0.

3. ПРИРОДА НЕЙТРИНО

Нейтрино — элементарные частицы, участвующие в одном из четырех фундаментальных взаимодействий, конкретно — в слабом взаимодействии. Оно лежит в основе радиоактивных распадов, и именно «непорядок» с физическим описанием одного из типов таких распадов заставил великого физика Вольфганга Паули в 1930 г. придумать новую частицу.

Прошло почти сто лет с момента открытия нейтрино, но до сих пор оно остается, наверное, самой загадочной из известных элементарных частиц. В отличие от лептонов и кварков нейтрино не имеет ни электрического, ни цветового заряда и взаимодействует с веществом только в слабых процессах за счет обмена заряженными и нейтральными промежуточными бозонами. Как единственный нейтральный фермион нейтрино может быть безмассовым.

Фундаментальных причин для требования нулевой массы нейтрино нет. Не нулевая, хоть и малая, масса нейтрино предполагается как основа в современных теоретических моделях, построенных на электрослабой теории, предполагающей кварк-лептонную универсальность.

Главные вопросы о природе нейтрино остаются или оставались до совсем недавнего времени открытыми:

1. Массивны ли нейтрино?
2. За счет какого механизма генерируются нейтринные массы?
3. Идентичны ли состояния по слабому взаимодействию собственным массовым состояниям или имеет место нейтринное смешивание.
4. Аналогичны ли нейтрино своим античастицам и являются истинно нейтральными (майорановскими) частицами или нет (дираковскими)?
5. Стабильно ли нейтрино?

Обнаружение массы нейтрино свидетельствовало бы о проявлении Новой физики, лежащей далеко за пределами Стандартной модели в области 10^{15} ГэВ. И вот это случилось! Такааки Кадзита и Артур Макдональд получили Нобелевскую премию по физике 2015 г. «за открытие нейтринных осцилляций, показывающих, что нейтрино имеют массу». Когда нейтрино путешествуют сквозь космос, квантово-механические флуктуации меняют их состояния, с электронного на мюонное или таонное. Группа Кадзиты проследила, как происходят осцилляции атмосферных нейтрино, а группа Макдональда выяснила, что нейтрино, летящие от Солнца, не исчезают на пути к Земле, а просто меняют свои состояния.

Нейтрино имеют ненулевую массу, но эта масса крайне мала. Верхняя экспериментальная оценка суммы масс всех типов нейтрино составляет всего 0,28 эВ. Разница квадратов масс нейтрино разных поколений,

полученная из осцилляционных экспериментов, не превышает $2.7 \cdot 10^{-3}$ эВ².

В современной астрофизике и космологии наличие массы нейтрино формирует наши взгляды на строение и эволюцию Вселенной.

4. СРАВНЕНИЕ НЕЙТРИННОГО И БЕЗНЕЙТРИННОГО ДВОЙНЫХ БЕТА-РАСПАДОВ

Достоверно установлено наличие только двухнейтринного двойного бета-распада, допускаемого классической теорией. Несмотря на многочисленные экспериментальные попытки, безнейтринный двойной β -распад все ещё не обнаружен. Обнаружение хотя бы одного процесса безнейтринной моды 2β -распада будет означать необходимость пересмотра положений Стандартной Модели физики элементарных частиц. Сложность экспериментального изучения 2β -распада обусловлена его чрезвычайно малой вероятностью. Поэтому пока были получены только оценки нижней границы периода полураспада для $(0\nu)2\beta$ -распад. Для сравнения в табл. I приведены экспериментальные результаты по периодам полураспада обычного 2β -распада и безнейтринного 2β -распада некоторых изотопов.

5. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПОИСКУ БЕЗНЕЙТРИННОГО ДВОЙНОГО БЕТА-РАСПАДА

Для того чтобы отличить нейтринный двойной бета-распад от безнейтринного, используются детекторы, фиксирующие энергию испускаемых электронов. При двойном бета-распаде часть энергии системы «уносится» нейтрино, поэтому энергия электронов всегда будет ниже теоретического минимума. Но если детекторы зафиксируют достаточное количество электронов с высокими энергиями — это может быть свидетельством существования безнейтринного двойного бета-распада.

Таблица I: Периоды полураспада $T_{1/2}(2\beta 2\nu)$ и $T_{1/2}(2\beta 0\nu)$ некоторых изотопов

Распад	$T_{1/2}(2\beta 2\nu)$, лет	$T_{1/2}(2\beta 0\nu)$, лет
$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	$4.2 \cdot 10^{21}$	$1.9 > \cdot 10^{25}$
$^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Cr}$	$9.2 \cdot 10^{19}$	$> 2.7 \cdot 10^{23}$
$^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$	$1.4 \cdot 10^{19}$	$> 3.9 \cdot 10^{19}$
$^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$	$8.0 \cdot 10^{18}$	$> 5.8 \cdot 10^{23}$
$^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$	$3.2 \cdot 10^{19}$	$> 1.7 \cdot 10^{23}$
$^{128}\text{Te} \rightarrow ^{128}\text{Xe}$	$7.7 \cdot 10^{24}$	$> 1.7 \cdot 10^{24}$
$^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	$0.9 \cdot 10^{21}$	$> 3 \cdot 10^{24}$
$^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$	$7 \cdot 10^{18}$	$> 3.6 \cdot 10^{21}$
$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$	$4.2 \cdot 10^{19}$	$> 1.7 \cdot 10^{22}$
$^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$	-	$> 4.6 \cdot 10^{23}$

Таблица II: Поиск безнейтринного двойного β^- -распада

Эксперимент	Изотоп	Масса мишени	Метод детектирования
CANDLES	^{48}Ca	несколько тонн	CaF_2 сцинтилляционный кристалл
CARVEL	^{48}Ca	1 тонна	CaWO_4 сцинтилляционный кристалл
COBRA	^{116}Cd	418 кг	CZT полупроводниковый детектор
CUORICINO	^{130}Te	40.7 кг	TeO_2 болометры
CUORE	^{130}Te	741 кг	TeO_2 болометры
DCBA	^{150}Nd	20 кг	обогащенные Nd фольги и трековые детекторы
EXO-200	^{136}Xe	200 кг	жидкие обогащенные Xe трековые сцинтилляционные детекторы
EXO	^{136}Xe	1–10 т	жидкие обогащенные Xe трековые сцинтилляционные детекторы
GEM	^{76}Ge	1 т	обогащенные Ge детекторы в жидком азоте
GENIUS	^{76}Ge	1 т	обогащенные Ge детекторы в жидком азоте
GERDA	^{76}Ge	35 кг	обогащенные Ge полупроводниковые детекторы
GSO	^{160}Cd	2 т	$\text{Gd}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ кристаллический сцинтиллятор в жидком сцинтилляторе
MAJORANA	^{76}Ge	120 кг	обогащенные Ge полупроводниковые детекторы
MOON	^{100}Mo	1 т	обогащенные Mo фольги/сцинтиллятор
SNO++	^{150}Nd	10 т	Nd в жидком сцинтилляторе
SuperNEMO	^{82}Se	100 кг	обогащенные Se фольги и трековые детекторы
Xe	^{136}Xe	1.56 т	обогащенные Xe в жидком сцинтилляторе
XMASS	^{136}Xe	10 т	жидкий Xe
HPXe	^{136}Xe	тонны	Xe газ при высоком давлении

В 2001 г. внимание ученых привлекло заявление группы физиков из Института Макса Планка (Германия), использовавших оборудование Гран-Сассо для экспериментов с изотопом германия-76, ядра которого — одни из немногих обладающих нужным для двойного бета-распада числом протонов и нейтронов. Исследователи утверждали, что получили свидетельства безнейтринного двойного бета-распада, однако их независимые коллеги оспорили чистоту эксперимента. По мнению оппонентов, не был исключен обычный радиоактивный распад, который также мог стать причиной подобного сигнала.

В настоящее время действуют, сооружаются и проектируются несколько десятков детекторов, предназначенных для наблюдения безнейтринного β^- -распада. Некоторые из крупных установок, имеющих в своей программе поиск $(0\nu)2\beta^-$ -распад, перечислены в табл. 2.

В ряде разработок исследуемые изотопы входят в состав рабочего вещества детектора. Например, использующие полупроводниковый детектор, обогащенный ^{76}Ge или сцинтилляционные кристаллы CaF_2 , CaWO_4 . Разработаны новые типы детекторов, использующие криогенные болометры, времяпролетные камеры и т. д.

Проект Majorana Demonstrator (MJD), предполагающий обнаружение безнейтринного двойного бета-распада, был запущен в «сверхчистой» лаборатории, расположенной в полутора километрах под землей, штат Южная Дакота, США, введен в эксплуатацию.

Для поисков безнейтринного двойного бета-распада германия-76 в эксперименте Majorana используются свыше 22 килограммов детекторов, сделанных из германия, обогащенного изотопом германий-76. В мае 2015 г. первый полный модуль, состоящий из 29 германиевых детекторов, был установлен внутри свинцово-медного цилиндра, играющего роль защитной оболочки, и в октябре введен в эксплуатацию. Глубокое расположение оборудования для эксперимента и повышенная чистота лаборатории требуются для того, чтобы избежать «фоновых» событий, которые могут быть ошибочно приняты за феноменально редкий $(0\nu)2\beta^-$ -распад.

Этот проект призван продемонстрировать, насколько низкий уровень «фона» может быть достигнут в лаборатории, чтобы доказать осуществимость более масштабных и чувствительных экспериментов, которые могут быть предложены в будущем.

Исследование безнейтринного двойного β^- -распада:

1. один из наиболее чувствительных методов проверки закона сохранения лептонного числа L_e ;
2. позволяет получить информацию о природе массы нейтрино, абсолютную шкалу массы нейтрино;
3. дает информацию о существовании правых токов в электрослабых взаимодействиях.

- [1] *Ишханов Б.С.* Радиоактивность. Учебное пособие. (Москва: Университетская книга, 2011, раздел 4). (<http://nuclphys.sinp.msu.ru/radioactivity/ract04.htm>)
- [2] http://femto.com.ua/articles/part_1/0920.html.
- [3] ru.wikipedia.org/wiki/Двойной_бета-распад
- [4] ru.wikipedia.org/wiki/Майорановский_фермион
- [5] *Шершаков В.В.* «Двойной бета-распад». Реферат. МГУ имени М. В. Ломоносова, кафедра общей ядерной физики. (<http://nuclphys.sinp.msu.ru/students/dbd.htm>)
- [6] ru.wikipedia.org/wiki/Нейтрино
- [7] Нейтрино — не фермион Майораны: Неуловимый безнейтринный двойной бета-распад. // Популярная механика. 18 июля. (2013). (<http://www.popmech.ru/science/14432-neutrino-ne-fermion-mayorany-neulovimyy-bezneytrinnyy-dvoynoy-beta-raspad/>).
- [8] Нобелевская премия за осцилляции нейтрино: что это и почему это важно? // Популярная механика. 6 октября. (2015). (<http://www.popmech.ru/science/217611-nobelevskaya-premiya-za-ostsilyatsii-neytrino-chto-eto-i-pochemu-eto-vazhno/#full>).
- [9] Пресс-релиз Нобелевского комитета. (2015). (http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2015/press.html).
- [10] Вскоре стартует эксперимент по проверке гипотезы о майорановской природе нейтрино. (<http://compulenta.computerra.ru/archive/physics/680367>).
- [11] Проект Majorana Demonstrator: запущен первый блок германиевых детекторов нейтрино. (<http://astronews.ru/cgi-bin/mngold.cgi?page=news&news=7836>).
- [12] Нейтрино могут стать последней каплей для Стандартной модели. (<http://www.atomic-energy.ru/smi/2014/05/08/48808>).

Neutrinoless double beta decay

G.I. Bykhalo^{1,2}

¹*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University*

²*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University Leninskie gory, GSP-1, Moscow 119991, Russia*
E-mail: gi.bykhalo@physics.msu.ru

Neutrinoless double beta decay is a type of double beta decay without emission of neutrinos in the final state: $A(Z, N) \rightarrow A(Z + 2, N - 2) + 2e^-$. The decay is possible when the lepton number is not conserved, ie, when neutrino ν_e is truly neutral Majorana particle. The change of the helicity of neutrino is also a necessary condition, it is directly linked to the issue of this particle's mass. The average estimate of characteristic half-lives is more than 10^{23} years. The study of neutrinoless double beta decay is one of the most sensitive methods to verify the law of conservation of lepton numbers L_e . Search and observation of this type of decay can provide information about the nature of neutrino mass and about the existence of right-handed currents in the electroweak interactions. It is important for our understanding of the physics, and clarifies the question of the predominance of matter over antimatter, formed as a result of the Big Bang.

PACS: 23.40.-s.

Keywords: double beta decay, neutrinoless double beta decay, neutrino.

Сведения об авторе

Быха́ло Галина Игоревна — студентка 4 курса кафедры общей ядерной физики физического факультета МГУ (отдел электромагнитных процессов в атомных ядрах НИИЯФ МГУ); тел.: (909) 663-34-42, e-mail: gi.bykhalo@physics.msu.ru.