

История развития предсказаний и открытие двойного бета распада; первые эксперименты. Общий обзор методов прямой регистрации двойного бета-распада

А. В. Дружинина^{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

История исследований двойного бета распада началась в 1934 г. и не окончена до сих пор. Физика данного процесса тесно связана с физикой нейтрино. Первые эксперименты по поиску двойного бета распада были неудачными. На данный момент двойной бета распад $2\beta 2\nu$ наблюдался, но даже современные эксперименты с помощью различных методов регистрации не могут подтвердить существование двойного безнейтринного бета-распада, возможность которого была теоретически показана в 1937 г.

PACS: 23.40.-s

УДК: 539.169

Ключевые слова: двойной бета-распад, история.

ВВЕДЕНИЕ

История двойного бета распада насчитывает более 80 лет и не окончена до сих пор. Физика данного процесса тесно связана с физикой нейтрино.

1. История развития предсказаний и открытие двойного бета распада; первые эксперименты



Рис. 1: Мария Гепперт-Майер

В 1934 г. Э. Ферми сформулировал теорию бета-распада [1]. Уже через год, в 1935 г. появилась работа

М. Гепперт-Майер [2], посвященная теоретическому исследованию возможных свойств нейтрино. В этой работе была указана возможность существования двойного бета-распада ($2\beta 2\nu$). Обычный бета-распад, связан с превращением исходного ядра, заряд которого меняется на единицу, в более легкое. В природе существует большое количество пар стабильных изобарных ядер с одинаковыми массовыми числами и с зарядовыми числами, отличающимися на две единицы. Преимущественно это четно-четные ядра. Существование таких изобар обычно обусловлено тем, что промежуточный изобар с зарядовым числом, отличающимся на единицу, обладает большей массой, вследствие чего превращение одного из крайних изобар в другой не может идти путем последовательных бета-распадов (рис. 2). В некоторых случаях, даже если масса промежуточного ядра лежит между массами крайних ядер, последовательный бета-распад практически невозможен из-за высокого порядка запрета.

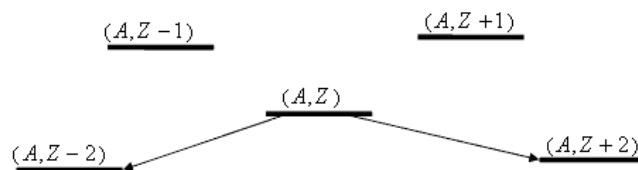


Рис. 2: Энергетическая диаграмма, поясняющая процесс двойного β -распада

Для описанных выше ядер, переходы в соседнее ядро не возможен, но возможен переход с изменением заряда сразу на две единицы, при котором испускается одновременно две бета-частицы и два нейтрино (антинейтрино). По расчетам Гепперт-Майер вероятность такого перехода очень мала, т.к. период полураспада ядра по отношению к двойному бета-распаду с испусканием двух нейтрино должен составлять величину порядка 10^{21} лет.

В 1937 г. Этторе Майорана теоретически показал,

*E-mail: alexdruzhinina@gmail.com



Рис. 3: Этторе Майорана

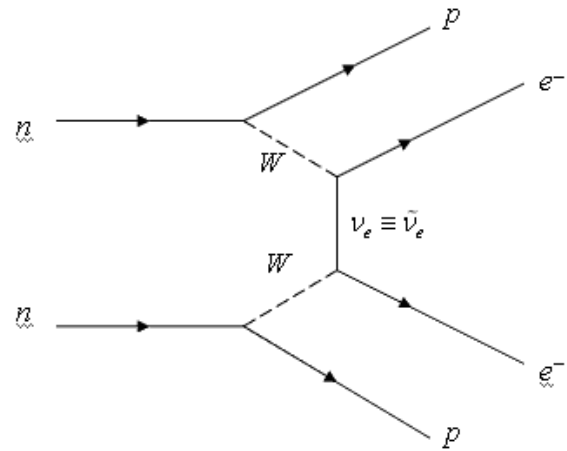
что если допустить существование лишь одного типа нейтрино, не имеющего античастицы (т.е. считать $\nu \equiv \bar{\nu}$), то выводы теории бета-распада не меняются [3]. Так было введено понятие «майорановского» нейтрино, в отличие от «дираковского», для которого античастица не тождественна частице. Хотя термин «майорановское» нейтрино появился позже. В том же году Дж. Рака [4] указал на возможность безнейтринного двойного бета-распада — процесса, при котором две бета частицы, испускаемые при превращении ядра (A, Z) в ядро $(A, Z \pm 2)$ не сопровождается испусканием нейтрино, возможного в случае «майорановского» нейтрино:



Для «дираковского» нейтрино такая реакция невозможна, так как в первом процессе испускается антинейтрино, в то время как в реакции (1) поглощается нейтрино. Таким образом, изучая бета-распад можно лучше понять природу нейтрино.

В 1938 г. В. Фарри, анализируя идеи Майораны и Рака, пришел к заключению о невозможности выбрать между «майорановской» и «дираковской» моделями нейтрино на основе эксперимента [5]. Но уже в 1939 г. Фарри исследовал процесс безнейтринного двойного бета-распада и предложил схему рассмотрения этого процесса [6]. Исходное ядро, испуская одну бета-частицу, переходит в виртуальное промежуточное ядро плюс виртуальное нейтрино, которое поглощается промежуточным ядром, вызывает его распад с излучением второй бета частицы (рис. 4). Оценка вероятности этого вида двойного бета-перехода данная Фарри была неверна. Более точную оценку сделал в 1950 г. Лев А. Слив [7].

Основной целью экспериментов по поиску двойного

Рис. 4: Безнейтринный двойной β -распад

бета-распада было определение природы нейтрино (кто был прав — Дирак или Майорана?).

Теоретические оценки тех лет давали совершенно разные значения времени жизни ядер для двух вариантов. Для «майорановского» нейтрино (безнейтринный распад) это 10^{15} лет, а для «дираковского» (2ν распад) это 10^{21} лет. И было понятно, что, если нейтрино имеет «майорановскую» природу, $2\beta(0\nu)$ распад может быть зарегистрирован существовавшими в то время детекторами.

Из-за второй мировой войны первый эксперимент по поиску 2β -распада был проведен только в 1948 г. Е. Файерманом. В первой статье [8] он только сообщил предел периода его полураспада $T_{1/2} > 3 \cdot 10^{15}$ лет. Файерман искал 2β -распад изотопа ^{124}Sn с помощью пропорциональных счетчиков и в этом эксперименте число событий с двумя электронами измерялось на основе совпадения сигналов от счетчиков в фольге, изготовленной из ^{124}Sn , а затем сравнивалось с числом таких событий в фольге из материала, не содержащего ядер ^{124}Sn . По отсутствию превышения в скорости счета для образца из ^{124}Sn был сделан вывод о ненаблюдении двойного бета-распада и вычислен предел периода полураспада. Но уже в 1949 г. во втором докладе Файерман сообщил об обнаружении двойного бета-распада в результате нового эксперимента с ^{124}Sn , с $T_{1/2} = (4-9) \cdot 10^{15}$ лет [9]. В этом эксперименте был использован обогащенный радиоактивным изотопом образец олова (25 г, степень обогащения 54), который сравнивался с эталонным образцом с естественной изотопной концентрацией. Этот результат не был подтвержден последующими, более чувствительными экспериментами, выполненными в 1951—1953 гг. Лучшее ограничение для ^{124}Sn составило $T_{1/2} = 2 \cdot 10^{17}$ лет. Эксперимент Файермана предопределил направление дальнейших экспериментов, в которых продолжался поиск якобы уже открытого двойного бета-распада олова, хотя ни одно из физических свойств ядра ^{124}Sn не делает его удачным объектом исследования. Сам ав-

тор впоследствии признал ошибочность своих результатов, приписав их загрязнению исследованного образца радиоактивными примесями.

В те годы довольно часто появлялись «положительные» результаты, которые позже не подтверждались последующими экспериментами. Так, «положительный» эффект наблюдался также в ^{100}Mo , ^{48}Ca и ^{96}Zr . Тогда же впервые были проведены поиски $2\beta^+$ и $\text{ЕС}\beta^+$ (двойной позитронный распад и электронный захват с одновременным испусканием позитрона) процессов. Для обнаружения 2β -процессов применялись самые современные по тем временам методики и детекторы: гейгеровские, пропорциональные и сцинтилляционные счетчики, камера Вильсона, ядерная фотоэмульсия. В качестве испытуемых образцов широко использовались обогащенные изотопами образцы (^{48}Ca , ^{94}Zr , ^{96}Zr , ^{124}Sn). Установки помещались глубоко под землей (для подавления фона от космических лучей), организовывалась пассивная и активная защита. Тем не менее, чувствительность экспериментов в то время не превышала по периоду полураспада 1017–1018 лет. В СССР первый эксперимент был проведен в 1956 г. Е.Н. Доброхотовым, В.Р. Лазаренко и С.Ю. Лукьяновым [10]. В 1951 Дж. Лоусон провел эксперимент с Sn [11]. Он поместил внутрь камеры Вильсона образец, содержащий 0.27 г олова, обогащенного изотопом ^{124}Sn до концентрации 83%.

В общей сложности было сделано 8794 снимка; полученные фотографии были дважды просмотрены. 39 снимков, на которых было обнаружено по два электронных следа, тщательно проанализированы с применением стереоскопической проекции. Однако наблюдаемые двойные следы нельзя было приписать двойному β -распаду по различным причинам (след не имел общего начала, был разного «возраста», принадлежал одному и тому же электрону, испытывавшему рассеяние). Учитывая геометрию опыта и чувствительное время камеры, автор пришел к выводу, что пяти наблюдаемым событиям должен соответствовать период полураспада близкий к 10^{16} лет. Но так как фактически не было зарегистрировано ни одного события, то период полураспада $> 10^{16}$ лет.

Стоит так же упомянуть геохимические эксперименты по исследованиям 2β -распада. В 1949 г. впервые был выполнен геохимический эксперимент для ^{130}Te , превращающегося в результате 2β -распада в ^{130}Xe :



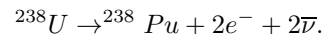
Методика была основана на выделении ксенона из древних минералов (возрастом до нескольких миллиардов лет) с их последующим изотопным анализом.

Обнаружение избыточного количества ^{130}Xe (с учетом возможного вклада в эффект различных ядерных реакций — под действием нейтронов, космических лучей и т.д.) свидетельствует о существовании 2β -распада исходного ядра и позволяет определять период его полураспада.

М. Ингрэм и Дж. Рейнольдс в своем эксперименте

использовали теллурид висмута (Bi_2Te_3), полученный в шведских рудных месторождениях; возраст этих теллуридов был известен и составлял $1.5 \pm 0.5 \cdot 10^9$ лет [12]. Образцы руд (с содержанием Bi_2Te_3 порядка 70%) были извлечены с глубины около 240 м. По мнению геологов, крайне маловероятно, что кристаллы подвергались позднейшим изменениям. Порция руды, содержавшая 124 г теллура, был измельчена, прогрета в вакууме до температуры, достаточной для разложения минерала и интенсивного кипения расплавленных висмута и теллура. Выделившиеся в результате кипения инертные газы (аргон и ксенон), были проанализированы (2.6 см^3 при атмосферном давлении). Содержание всех остальных изотопов, кроме ^{129}Xe , ^{131}Xe и ^{130}Xe , оказалось близким к нормальному. Содержание же трёх названных изотопов ксенона резко превышало естественно содержание. Избыток ^{129}Xe , ^{131}Xe может быть приписан процессам $^{128}\text{Te}(n, \gamma)^{129}\text{Xe}$ и $^{130}\text{Te}(n, \gamma)^{131}\text{Xe}$ (высокий поток нейтронов был обусловлен наличием вблизи от месторождения изучаемой руды залежей минералов, богатых ураном). По мнению авторов единственной причиной повышенного содержания ^{130}Xe мог быть только двойной β -распад ^{130}Te . На основании этой гипотезы период полураспада 10^{21} лет.

В 1949 г. был проведен и первый радиохимический эксперимент с ^{238}U (М. Левин, А. Джиорсо и Г. Сиборг) [13]). Сущность работы состояла в поисках ^{238}Pu ($T_{1/2} = 87.7$ года), который должен был образоваться в результате 2β -распада ^{238}U :



С этой целью из 14 кг очищенной окиси урана UO_3 , хранившейся в течение шести лет, выделялся плутоний и по счету α -частиц определялось присутствие ^{238}Pu . Счёт составлял 0.00 ± 0.01 импульс в минуту. Из эксперимента следует, что период полураспада ^{238}U $T_{1/2} > 6 \cdot 10^{18}$ лет.

В 1952 г. Дж. Фремлин и М. Уолтерс исследовали большое число различных веществ в отношении двойного бета-распада [14]. Для регистрации бета-частиц были применены специально приготовленные фотопластинки. Опыты проводились на глубине около 560 м под поверхностью земли, причём пластинки дополнительно защищались железными и свинцовыми экранами. В этих условиях удалось существенно снизить фон от космического излучения, а также от естественной радиоактивности горных пород (с 200 до 2.5 трек в день на 1 мм^2 эмульсии). Исследуемое вещество помещалось внутри соответствующего углубления графитового блока, который находился в непосредственном контакте с пластинкой. Специальными контрольными опытами было доказано, что графитовые блоки совершенно свободны от каких-либо радиоактивных загрязнений.

Пластинки экспонировались в течение двух месяцев, причём всё это время они находились в атмосфере азота под давлением, несколько большим атмосферного. Определённый уровень влажности поддерживался

с помощью фосфорного ангидрида. Это было необходимо для того, чтобы пластинки сохраняли высокую чувствительность и в них не появлялось случайное изображение. В экспонированных пластинках сравнивалось число электронных треков на соседних участках пластинок, расположенных напротив исследуемого образца и против графитового блока. Так как исследуемые образцы (кроме олова) обладали естественным изотопическим составом, наблюдавшееся превышение в числе треков не могло быть однозначно приписано какому-либо определенному изотопу. Помимо счёта электронных треков подсчитывалось также число треков от α -частиц, которое рассматривалось авторами как свидетельство радиоактивных загрязнений данного элемента. Среди 13 образцов лишь в случае молибдена наблюдаемое превышение в числе треков можно было приписать двойному бета-распаду ^{98}Mo или ^{100}Mo . Тогда для периода полураспада получается величина $1.5 \cdot 10^{16}$ лет. Для всех остальных элементов (кальций, хром, железо, никель, цинк, германий, стронций, кадмий, теллур, вольфрам, платина) полученные оценки периодов полураспада составляли больше 10^{16} – 10^{17} лет.

В 1950–1953 гг. проводились многочисленные эксперименты с целью обнаружения двойного бета-распада. Важно отметить, что обнаружение явлений, подобно двойному бета-распаду связанных с крайне малой вероятностью, возможно лишь при максимальном подавлении фона, маскирующего эффект. Основные причины возникновения фона: космическое излучение и естественная радиоактивность окружающей среды. Значительно снизить фон можно, окружив установку слоем тяжелых веществ (свинца, висмута, железа, ртути) достаточной толщины. Существенно снижение фона космического излучения достигается при помещении установки под землю. Следует отметить, что в большинстве из опубликованных попыток обнаружения двойного бета-распада все перечисленные условия строго не выполнялись.

2. ОБЩИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ ПРЯМОЙ РЕГИСТРАЦИИ ДВОЙНОГО БЕТА-РАСПАДА

Все эксперименты по двойному бета-распаду можно разделить на три группы:

1. обнаружение дочерних элементов распада ($A, Z \pm 2$) при исследовании источника, содержащего исследуемый изотоп (A, Z);
2. обнаружение в камере Вильсона или в фотоэмульсии треков бета-частиц, начинающихся в общей точке образца, содержащего исследуемый изотоп;
3. определение числа распадов, происходящих в образце, который содержит исследуемый изотоп, при помощи счетчиков элементарных частиц.

Методом 1. можно определить только скорость распада, в то время как остальные методы позволяют получить также и энергетические характеристики процесса. В этом методе из горных пород известного возраста и состава, содержащих исследуемый изотоп, или из чистого изотопа известного возраста выделялась смесь изотопов дочернего элемента, который мог образоваться в результате двойного бета-распада. Обнаружение дочернего изотопа проводилось либо путем массового анализа, либо, если он радиоактивен, измерением радиоактивности. Достоинством этого метода является возможность увеличить экспозиции опыта до геологических масштабов. Однако невозможность доказать, что обнаруженный дочерний изотоп возник именно в результате двойного бета-распада, а не является продуктом каких-либо других процессов, делает положительные результаты, полученные таким путем, сомнительными. Так, например, в случае с описанным выше опытом М. Ингрэма и Дж. Рейнольдса, исследовавший двойной бета-переход $^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$ вероятность последовательного процесса $^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{J} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$, как показали Е. Финберг и несколько других авторов [15], сравнима с вероятностью возможного двойного бета-распада.

Н. Такаока и К. Огата предложили способ повысить достоверность работ, выполненных этим методом [16]. Суть состоит в том, что при помощи масс-спектрометрии определяется концентрация дочерних продуктов двойного бета-распада для нескольких элементов, а затем сравнивается зависимость измеренных таким путем периодов полураспада от энергии распада с теоретически предсказанной. Такое сопоставление позволит сделать вывод о природе обнаруженной активности. Использование ядерных фотоэмульсий для обнаружения двойного бета-распада позволяет исследовать граммовые количества вещества со временем опыта в несколько месяцев. Однако этот метод обладает также существенными недостатками, такими как бездоказательность одновременности вылета двух бета-частиц из одной точки и невозможность исключить внешние причины появления электронных треков (обусловленных двойным комптоновским рассеянием, рождением пар и т.п.). Этим методом Дж. Фремлин и М. Уолтерес в 1952 г. исследовали большое количество изотопов, однако при обработке фотопластинок они подсчитывали лишь общее количество электронных треков на единице поверхности, не выделяя двойные треки, выходящие из одной точки. Это обстоятельство делает положительные результаты, полученные ими для переходов $^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$ и $^{92}\text{Mo} \rightarrow ^{92}\text{Zr}$, крайне сомнительными.

При использовании в эксперименте камеры Вильсона имеется возможность исключить целый ряд случаев, обязанных своим происхождением фону. Этот прибор позволяет идентифицировать бета-частицы, с достаточной точностью определять точку их рождения и энергию. Сравнивая «возраст» треков, можно установить совпадение двух событий во времени с точ-

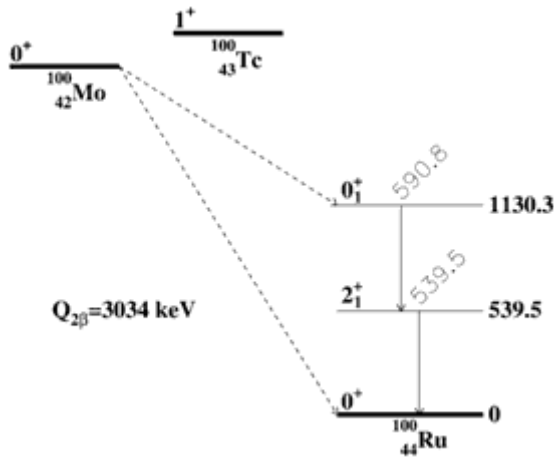
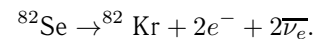


Рис. 5: Энергетическая диаграмма $2\beta^- 2\bar{\nu}_e$ -распада ^{100}Mo

ностью до 0.05 с. Но есть и свои недостатки камеры Вильсона в случае ее использования для исследования редких событий, таких как двойной бета-распад, связанные с малым временем чувствительности. В описанном выше опыте Дж. Лоусона с ^{124}Sn было сделано около 9000 снимков, а полное время чувствительности камеры составляло всего лишь немногим более одного часа (4000 с). В одном из опытов Р. Винтера (1955 г.) [17] 10 000 снимков соответствовали полному времени чувствительности 1400 с. Возможно, применить камеру Вильсона, срабатывающую лишь при наличии сигнала, вызванного появлением в ее рабочем объеме двух электронов, однако это трудно осуществить при использовании значительного количества вещества. Такая камера, управляемая двумя тонкостенными гейгеровскими счетчиками, помещенными по обе стороны образца, была использована в работе Е. Файермана и Д. Шварцера [18], проделанной с целью проверки положительного результата, полученного одним из авторов с ^{124}Sn в эксперименте с газовыми счетчиками. Авторы считают, что использование управляемой камеры позволило увеличить эффективное время измерения в 1500 раз. Но опыты по двойному бета-распаду с управляемой камерой Вильсона, защищенной от внешней радиации системой антисовпадений, скорее всего не проводились.

Переходя к рассмотрению методики счетчиков элементарных частиц, следует отметить, что только на первых порах в экспериментах использовались счетчики Гейгера. Пропорциональные счетчики могут быть использованы только при исследовании таких частных разновидностей двойных бета-процессов, как двойной захват электронов. Сцинтилляционные счетчики гораздо более удобны для исследований такого типа, так как они позволяют регистрировать энергию электро-

нов распада. Важной особенностью сцинтилляционных счетчиков является регистрация одновременности испускания двух электронов с высокой точностью, что дает заметное снижение фона. Дальнейшее снижение фона достигается погружением счетного устройства в жидкостный сцинтилляционный счетчик, включенный на антисовпадения с «рабочими» фотоумножителями. Немаловажное значение имеет правильный выбор оптимальной толщины сцинтиллятора у «рабочих» фотоумножителей. (Например, в работе Коуэна [19] с ^{150}Nd , использование сцинтиллятора в 7.5 см толщиной, вместо вполне достаточных 1.5–2 см, привело к значительному увеличению фона). К сожалению, метод счетчиков уступает камере Вильсона и методу фотоэмульсий, которые предоставляют больше информации о частице (позволяют локализовать в пространстве точку вылета частиц, определить их заряд и массу). Несмотря на это, большинство лучших работ выполнено именно на основе сцинтилляционных счетчиков. Стоит отметить, что первый прямой эксперимент, в котором был измерен двойной β -распад, был выполнен лишь в 1987 г. в Калифорнийском университете [20]. Измерялся 2β -распад изотопа ^{82}Se :



Эксперимент длился 21 тыс. часов, проводился с помощью время-проекционной камеры, в которую была помещена селеновая фольга массой 14 г, обогащенная до 97% изотопом ^{82}Se . Измерялись спектры электронов. Период полураспада относительно $2\beta 2\nu$ -распада оказался равным:

$$T_{1/2}^{2\beta 2\nu} (^{82}\text{Se}) = (1.08_{-0.06}^{+0.26}) \cdot 10^{20} \text{ лет.}$$

Этот результат хорошо согласуется с ранее полученными результатами геохимического анализа [21]:

$$T_{1/2}^{2\beta 2\nu} (^{82}\text{Se}) = (0.97_{-0.46}^{+0.36}) \cdot 10^{20} \text{ лет.}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, история двойного бета распада насчитывает более 80 лет и не окончена до сих пор [22]. Физика данного процесса тесно связана с физикой нейтрино. И если двойной бета распад $2\beta 2\nu$ наблюдался, то даже современные эксперименты не могут заявить об обнаружении двойного безнейтринного бета-распада. Понимание безнейтринного бета-распада, подтверждение его существования, даст нам дополнительную информацию о физике нейтрино, которая не вписывается в стандартную модель.

[1] Fermi E. Zeitschrift fur Physik. **88**. P. 161. (1934).

[2] Goepfert Mayer M. Phys. Rep. **48**. P. 512. (1935).

- [3] *Majorana E.* Nuovo Cimento. **14**. P. 171. (1937).
[4] *Racah G.* Nuovo Cimento. **14**. P. 322. (1937).
[5] *Furry W. H.* Phys. Rep. **54**. P. 56. (1938).
[6] *Furry W. H.* Phys. Rep. **56**. P. 1184. (1939).
[7] *Слив Л. А.* ЖЭТФ. **20**. P. 1035. (1950).
[8] *Fireman E. L.* Phys. Rep. **74**. P. 1238. (1948).
[9] *Fireman E. L.* Phys. Rep. **75**. P. 323. (1949).
[10] *Доброхотов Е. Н., Лазаренко В. Р., Лукьянов С. Ю.* ДАН СССР. **110**. С. 966. (1956).
[11] *Lowson J. S.* Phys. Rep. **81**. P. 299. (1951).
[12] *Inghram M. G., Reynolds J. H.* Phys. Rep. **78**. P. 822. (1950).
[13] *Levine C. B., Ghiorso A., Seaborg G. T.* Phys. Rep. **77**. P. 296. (1950).
[14] *Fremlin J. H., Walters M. C.* Proc. Phys. Soc. A **65**. P. 911. (1952).
[15] *Feenberg E.* Schell Theory of the Nucleos. **V**. P. 117. (1955).
[16] *Takaoka H., Ogata K. Z.* Naturforsch. **21a**. P. 84. (1966).
[17] *Winter R.* Phys. Rev. **100**. P. 142 (1955)
[18] *Fireman E. L., Schwarzer D.* Phys. Rev. **86**. P. 451. (1952).
[19] *Cowan C. L., Reines F.* Phys. Rev. **106**. P. 825. (1957).
[20] *Elliot S. R., Hahn A. A., Moe M. K.* Phys. Rev. Lett. **59**. P. 2020. (1987).
[21] *Marti K., Murty S. V. S.* Phys. Lett. **163**. P. 71. (1985).
[22] *Barabash A. S.* Phys. Atom. Nucl. **74**. P. 603. (2011).

The history of the predictions and the discovery of the double beta decay; early experiments. An overview of the methods of direct detection of double beta decay

A. Druzhinina^{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: alexdruzhinina@gmail.com

History of the study of the double beta decay began in 1934 and is not finished yet. The physics of this process is closely connected with neutrino physics. The first experiments of the search for double beta decay were unsuccessful. Nowadays double beta decay was observed, but even modern experiments using a variety of detection methods could not confirm the existence of neutrinoless double beta decay, the possibility of which was theoretically demonstrated in 1937.

PACS: 23.40-s

Keywords: double beta decay, history.

Сведения об авторе

Дружинина Александра Владимировна — студентка кафедры общей ядерной физики физического факультета МГУ; тел. (916) 095-10-15, e mail: alexdruzhinina@gmail.com.