

ПРОБЛЕМАТИКА БЕТА-РАСПАДА. НЕЙТРИНО

Горбачев Н. С.

Димитровградский инженерно-технологический институт – филиал НИЯУ МИФИ (ДИТИ НИЯУ МИФИ), Димитровград, e-mail: n-gorbachev@bk.ru

Аннотация: в статье обращено внимание на 3 основных типа радиоактивного распада. Определена основная проблема β -распада: непрерывный спектр электронов. Описаны этапы решения вопроса β -распада: гипотеза Н. Бора, открытие нейтрона и позитрона, предположение В. Паули, гипотеза β -распада Э. Ферми. Из теории Ферми был сделан вывод, что новая частица – нейтрино, способная решить проблему β -распада, имеет конечную массу. Описаны 2 косвенных метода подтверждения существования нейтрино: реакция обратного β -распада и наблюдение отдачи ядра в момент испускания нейтрино. Рассмотрен эксперимент Фредерика Райнеса и Клайда Коэна по поимке нейтрино (антинейтрино), а также теории существования мюонного и тау-нейтрино, которые в последствии получили экспериментальные подтверждения и которые помогли объяснить нехватку солнечного нейтрино. Были описаны методы определения массы нейтрино: кинематический подход и анализ осцилляций. Установлен верхний предел по массам всех трех типов нейтрино: электронного, мюонного и тау-нейтрино. Рассмотрены современные методы изучения нейтрино посредством возведения обсерваторий и специальных реакторов. Отдельно был отмечен эксперимент KATRIN, который располагается на юго-западе Германии. Данная установка, содержащая определенное количество трития, обеспечивает интенсивный поток нейтрино. После ряда экспериментов было определено, что предел массы электронного нейтрино составляет 1,1 эВ, что в 500 000 раз меньше массы электрона. В заключении сделаны выводы.

Ключевые слова: β -распад, антинейтрино, обратный β -распад, электронное нейтрино, тау-нейтрино, мюонное нейтрино, осцилляция, KATRIN.

PROBLEMS OF BETA-DECAY. NEUTRINO

Gorbachev N. S.

Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute (DITI MEPH), Dimitrovgrad, e-mail: n-gorbachev@bk.ru

Annotation: the article draws attention to three main types of radioactive decay. The main problem of β -decay is defined: a continuous spectrum of electrons. The stages of solving the question of β -decay are described: the N. Bohr's hypothesis, the discovery of the neutron and positron, the assumption of W. Pauli, the hypothesis of β -decay of E. Fermi. From Fermi's theory, it was concluded that a new neutrino particle capable of solving the problem of β -decay has a finite mass. Two indirect ways of confirming the existence of neutrinos are described: the reaction of reverse β -decay and the observation of the recoil of the nucleus at the moment of neutrino emission. The experiment of Frederick Reinis and Clyde Cohen on the capture of neutrinos (antineutrino), as well as the theory of the existence of muon and tau neutrinos, which later received experimental confirmation and helped explain the lack of solar neutrinos, is considered. Methods for determining the neutrino mass were described: kinematic approach and by means of oscillation analysis. There is an upper limit on the mass of all three types of neutrinos: electron, muon and tau neutrinos. Modern methods of studying neutrinos through the construction of observatories and special reactors are considered. Separately, the KATRIN experiment was noted, which is located in the South-West of Germany. This installation, which contains a certain amount of tritium, provides an intense neutrino flux. After a series of experiments, it was determined that the limit of the mass of an electron neutrino is 1.1 eV, which is 500,000 times less than the mass of an electron. In conclusion, conclusions are made.

Keywords: beta-decay, antineutrino, reverse beta-decay, electron neutrino, tau neutrino, muon neutrino, oscillation, KATRIN.

В конце 19 столетия человечество открыло для себя совершенно новое явление, которое заключается в самопроизвольном изменении состава атомного ядра посредством испускания частиц (ядра гелия, нейтроны, электроны, позитроны и т.д.) и лучистой энергии. Первооткрывателем стал французский ученый А. Беккерель. В последствии Мария Склодовская-Кюри определила такое поведение атомного ядра как радиоактивность [1].

С открытием радиоактивности главными объектами рассмотрения стали альфа (α)-, бета (β)- и гамма (γ)-распады. При α -распаде определённого радиоактивного изотопа испускаемые ядром α -частицы имеют, грубо говоря, одну и ту же энергию. Энергия, выделяющаяся при α -

распаде, делится между α -частицей и ядром в отношении, обратно пропорциональном их массам. Природа α -распада лежит в сильном взаимодействии [2].

При γ -распаде ядро испускает энергию в виде γ -квантов определенной энергии. Энергия может быть испущена непосредственно системой атома или же быть передана электронам, в результате чего они покидают электронную оболочку, вылетая из атома или переходя на более высокие орбиты [1].

С момента открытия радиоактивности ученые, занимающиеся изучением β -распада, ожидали увидеть картину, аналогичную α -распаду, то есть электрон (или позитрон) должен уносить строго определенную энергию (в пределах погрешности измерительных приборов) в случае распада конкретного ядра (см. рисунок 1 а). Однако все измерения показывали, что спектр энергий, которыми обладает вылетевший электрон, имеет вид продолговатого бугра (см. рисунок 1 б) [3]. Это говорит о том, что при β -распаде элементарная частица уносит с собой не строго определенную энергию, так еще и меньшую, чем та, которая получена при помощи теоретических расчетов.



Рисунок 1 – спектр электронов при β -распаде

Изначально схема β -распада выглядела так [4]:



Где Y_p – родительское ядро, m_p – масса родительского ядра, Y_d – дочернее ядро, m_d – масса дочернего ядра.

Цель данной работы – рассмотрение нейтрино как решение проблемы бета-распада; методов его детектирования; способов отыскания массы.

Из уравнения (1) видно, что при выполнении законов сохранения электрон должен принять на себя определенное значение энергии после реакции (при распределении энергии реакции

между двумя частицами почти вся кинетическая энергия достанется электрону, который в тысячи раз легче любого из ядер). Однако, как показано на рисунке, законы сохранения на практике не выполнимы при β -распаде. Перед физиками в 20-е годы 20 века встала серьезная проблема, которую необходимо было решить для лучшего понимания устройства микромира.

Первым предложил решение данной задачи Нильс Бор, который предположил, что элементарные частицы «имеют право» нарушать законы макромира. Данную гипотезу нельзя было проверить в то время, и она, скорее всего, была бы принята, если бы не предположение швейцарского физика Вольфганга Паули [4].

В. Паули выдвинул гипотезу, по которой в результате β -распада помимо электрона (позитрона) испускается и гипотетическая нейтральная частица, которую он назвал «нейтроном». Это предположение было высказано ученым в письме к конференции физиков в Тюбингенском университете в конце 1930 года [4]. Решение донести ученому сообществу о своей догадке В. Паули далось нелегко, так как в то время придумывание новых «мифических» частиц, чтобы объяснить результаты эксперимента, считалось «дурным тоном». И многие физики поначалу восприняли ее в штыки, однако открытие нейтрона в 1932 году Д. Чедвиком переубедило многих принять на веру существование загадочной частицы, которую нарекли уже нейтрино (итал. *neutrino* – нейтрончик).

Только в 1933 году В. Паули подвел итог своим размышлениям. 22 октября на самом представительном собрании физиков всего мира – Сольвеевском конгрессе он говорил: "...Я предложил следующую интерпретацию β -распада: законы сохранения имеют силу; эмиссия частицы происходит вместе с испусканием чрезвычайно проникающих нейтральных частиц, которые еще не наблюдались... Естественно, мы предполагаем не только сохранение энергии, но и сохранение импульса и углового момента... во всех элементарных процессах" [4].

По задумке В. Паули загадочная частица находится непосредственно в ядре и испускается при распаде, забирая с собой определенную часть энергии. В противовес Э. Ферми выдвинул гипотезу о распаде нейтрона в ядре, при котором образовывался протон, вылетал электрон и нейтрино. Также это справедливо и для протона, переходящего в нейтрон с образованием античастицы электрона (позитрона) и античастицы нейтрино. Данное предположение возымело силу после того, как американский физик К. Д. Андерсон открыл в 1932 году позитрон при наблюдении космического излучения в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле.

Исходя из изменения массового состава системы при β -распаде, было выдвинуто суждение, что новая частица либо не имеет массу, как фотон, или же обладает массой, на порядки меньшей массы электрона.

Все вопросы, накопившиеся у ученых, требовали решения. Главным из них являлся, конечно же, сам факт существования нейтрино.

В 1933-1934 годах Энрико Ферми сформулировал теорию β -распада, куда и включил новую частицу [5]. Теперь схема распада выглядит следующим образом [6]:



С помощью новой теории были рассчитаны теоретические формы спектров β -электронов. При сравнении с экспериментальной составляющей вопроса оказалось, что нейтрино имеет конечную массу, однако она на много порядков меньше массы электрона. Начались активные поиски следов нейтрино.

Было предложено два возможных способа отыскания частицы. Первый заключался в проведении реакции обратного β -распада, то есть нужно было добиться того, чтобы нейтрон вступил во взаимодействие с нейтрино, что в итоге должно привести к образованию протона и электрона [6]:



Обратный β -распад – реакция (существование которой вытекает из теории Э. Ферми), происходящая как на свободных, так и на связанных в ядрах нуклонах. Была оценена вероятность поглощения нейтрино: в твёрдом веществе нейтрино с энергией, характерной для β -распада, может пройти расстояние около сотни световых лет, прежде чем будет захвачено ядром. В 30-40-х гг. уровень технологий не позволял обнаружить таинственную частицу.

Иной путь заключался в наблюдении отдачи ядра в момент испускания нейтрино. Данный метод впервые был рассмотрен А. И. Лейпунским. Он заключается в измерении импульсов дочерних продуктов. Использовалась реакция [6]:



При условии покоящегося протона и отсутствия нейтрино модули импульсов бора и позитрона должны быть равны. Однако эксперименты показали обратное. Это является еще одним доказательством существования нейтрино [6].

Два данных пути являются косвенными доказательствами существования нейтрино. Необходимо было зафиксировать новую частицу во взаимодействии с веществом. Впервые это удалось сделать спустя 23 года после предположения В. Паули, когда Фредерик Райнес и Клайд Коэн зафиксировали результаты взаимодействия нейтрино, используя ядерный реактор деления в качестве источника частиц, а хорошо экранированный сцинтилляционный детектор - в качестве детектора [6].

Было подсчитано, что нейтрино с энергией 1 МэВ имеет колоссальную проникающую способность, равную 10^{15} км. В условиях эксперимента невозможно было создать столь большую толщину, поэтому решили увеличить поток частиц. Известно, что атомный реактор мощностью 300 тысяч киловатт испускает 10^{19} антинейтрино в секунду. Райнес и Коэн решили использовать реакцию взаимодействия антинейтрино с протоном [6]:



Вероятность этого процесса можно было рассчитать, и, регистрируя продукты реакции в эксперименте, одновременно проверить гипотезу существования нейтрино. Регистрация осуществлялась по гамма-квантам процесса аннигиляции электрона и позитрона фотоэлектронными (ФЭУ). Объем детектора (раствор $C_3H_5CdO_2$ и $CdCl_2$ в воде) равнялся 1200 л, в котором располагались 100 ФЭУ. Данные компоненты водного раствора были выбраны хорошего показателя сцинтилляции, то есть кратковременная световая вспышка (вспышка люминесценции), возникающая под действием ионизирующих излучений. Было зарегистрировано 567 событий, вызванных взаимодействием антинейтрино с протоном. Фон составил порядка 200 событий. Данное событие явилось триумфом теоретической и экспериментальной физики. За открытие нейтрино Фредерик Райнес был удостоен в 1995 году Нобелевской премии [6].

Впоследствии было доказано, что, как и электрон, нейтрино имеет свою античастицу – антинейтрино. Была создана лептонная теория, объединяющая частицы с полуцелым спином, которые не участвуют в сильном взаимодействии. По этой теории к лептонам причислялись электрон и нейтрино с лептонным числом 1, а также их античастицы с лептонным числом -1. Из многочисленных экспериментов следовало сохранение в реакции лептонного числа (лептонного заряда), то есть при реакции β -распада электрону сопутствовало антинейтрино, а позитрону – нейтрино.

Когда Райнес и Коуэн провели свой знаменитый эксперимент, ученые полагали, что все нейтрино одинаковы. Однако в конце 1950-х годов рядом ученых из США, СССР и Японии было высказано предположение, что нейтрино, сопровождающие рождение мюонов, могут отличаться. Так была выдвинута гипотеза о существовании мюонного нейтрино (и его антинейтрино). Экспериментально частица была обнаружена в 1962 году группой исследователей из Брукхейвенской национальной лаборатории под руководством Леона Ледермана, Мелвина Шварца и Джека Стейнбергера. За свое открытие они были удостоены Нобелевской премии в 1988 году [5].

Позднее теоретики поняли, а экспериментаторы подтвердили, что третий заряженный лептон, тау-частица, также имеет своё нейтрино. Поэтому современная физика имеет дело с нейтральными лептонами трех видов – это электронные, мюонные и тау-нейтрино [5].

Чтобы подробнее изучить все типы нейтрино, человечество начало строить нейтринные обсерватории по всему миру для их поимки. Установки располагались на значительной глубине, чтобы уменьшить влияние постороннего фона. Они представляли собой огромные резервуары, заполненные сверхчистой водой, имеющие порядка нескольких тысяч сверхчувствительных фотоэлектронных умножителей [5].

В конце 60-х, начале 70-х годов исследователи нейтрино установили, что до Земли от Солнца доходит только треть всех нейтрино, которые были предсказаны теорией. Этот факт мог заставить пересмотреть ход ядерных реакций, протекающих на нашей звезде, однако после открытия всех трех типов нейтрино стало ясно, что на Солнце всё-таки рождается нужное количество электронных нейтрино, однако на пути к Земле одна треть из них превращается в мюонные, а другая – в тау-нейтрино. Этот процесс называется нейтринной осцилляцией [5].

Наличие осцилляций имеет фундаментальное значение. Они становятся возможны только тогда, когда нейтрино во всех своих формах существования имеет не нулевой массой. Вывод о предположительном наличии массы у нейтрино явился катализатором для дальнейших исследований лептонов данного типа. Начался поиск путей нахождения массы нейтрино [5].

Непосредственное измерение массы нейтрино связано с бета-распадом. Поведение спектра β -распада вблизи его верхней границы зависит от массы нейтрино. Этот подход позволяет определить верхнюю границу, которую может иметь частица. Точные эксперименты по определению массы нейтрино проводят сейчас по всему миру [3].

Такого рода эксперименты проводят чаще всего с бета-распадом лития (см. формула 6). Первые работы в этой области провел еще Б. М. Понтекорво, в результате чего был установлен первый верхний предел для массы нейтрино. С каждым опытом верхняя граница отодвигается все к меньшим значениям масс, но до сих пор достоверного доказательства наличия массы у нейтрино таким способом не было получено [3].



Оценить массу нейтрино можно и кинематически, используя подходящие реакции. Распад пиона, к примеру, позволяет наложить ограничение на массу мюонного нейтрино, а распад собственно тау-лептона позволил проанализировать соответствующее нейтрино. Однако все эти эксперименты также, как и непосредственное определение массы, дают значения только верхней границы. Таким образом, сложно судить о массе нейтрино. Ясно одно – она очень мала [3].

На данный момент существуют следующие пределы масс: электронное нейтрино: $m < 3,8$ эВ, мюонное нейтрино: $m < 0,19$ МэВ, таонное нейтрино: $m < 18,2$ МэВ. Исследования осцилляций способны наложить более строгие ограничения [3].

После последних исследований осцилляций нейтрино было установлено, что, если самое легкое массовое состояние новой частицы электронной природы равно нулю, то самое тяжелое должно быть не менее 0,0495 эВ. Это где-то в 5 раз меньше, чем показывают эксперименты по непосредственному измерению [7].

Хочется отдельно упомянуть об Эксперименте Karlsruhe Tritium Neutrino (KATRIN), который располагается на юго-западе Германии, строительство которого велось 18 лет [7].

Ядро эксперимента – десятиметровая емкость, в которой находится 25 грамм радиоактивного трития, охлажденного до сверхнизкой температуры. Тритий претерпевает β -распад (см. формула 7), в результате которого один из нейтронов превращается в протон, рождая дополнительный электрон и электронное антинейтрино, масса последнего соответствует массе обычного электронного нейтрино [7].



Продукты β -распада попадают в активную область датчика-спектрометра, который позволяет измерить энергию электронов. Суть эксперимента заключается в следующем: электрон и нейтрино всегда получают некоторую часть энергии, выделившейся во время реакции распада. Это количество может колебаться от акта к акту, но пропорция распределения энергии между электроном и нейтрино всегда остается одинаковой. В результате работы датчика получается график, форма которого позволяет вычислить максимальную энергию для каждого «массового состояния» нейтрино [7].

Измерив энергию наиболее энергичных электронов, можно получить массу (взвешенное среднее из трех массовых состояний) электронного нейтрино.

Проведя ряд экспериментов в 2019 году, ученые установили новый предел массы нейтрино на уровне 1,1 эВ, что в 500 000 раз меньше массы электрона. Данный проект планируют продолжать и совершенствовать, чтобы максимально приблизиться к определению точной массы нейтрино, для того чтобы снять с нее клеймо частицы с неопределенной массой [7].

Подводя итог вышесказанному, можно сделать вывод, что изучение нейтрино всех поколений продолжаются до сих пор. Остается широкий ряд нерешенных вопросов, связанных с новой частицей, ставящих вызов перед физиками 21ого века. Все известные характеристики новой частицы можно свести в таблицу (см. таблица 1).

Таблица 1. Характеристики нейтрино [6]:

Характеристика:	Значение:
Спин J	1/2
Четность P	не определена
Электрический заряд Q	0
Время жизни t	$\rightarrow \infty$ (стабильно)
Барионный заряд B	0
Участие во взаимодействии	Участвует в слабом и гравитационном взаимодействии
Лептонный заряд	Нейтрино (1), антинейтрино (-1)

Масса $m c^2$	Электронное $<1,1$ эВ ($<0,0495$ эВ); мюонное $<0,19$ МэВ; таонное $<18,2$ МэВ
---------------	---

Изучение новых частиц, это не только вопрос мировоззрения отдельного человека, но и фундаментальный, помогающий составить цельное представление о мире, его свойствах; являющийся достоянием науки в целом. Интерес к нейтрину не утихает и по сей день, так как остается еще много вопросов, на которые нет ответа. Многие ученые со всего мира занимаются проблемой нейтринно, так как данная задача имеет огромный фундаментальный смысл, позволяющий пересмотреть большинство взглядов на устройство современного мира и заглянуть в прошлое и с максимальной точностью определить, что происходило в первые мгновения Большого взрыва и какую роль сыграла данная частица в становлении Вселенной. Хотя нейтринно – это всего лишь маленький кирпичик в устройстве нашего мира, но он породил и продолжает подбрасывать множество загадок.

Библиографический список:

1. Бекман И. Н. Радиоактивность и радиация. Радиохимия [Текст] / И.Н. Бекман // Том 1: учебное пособие – Щёлково: Издатель Мархотин П. Ю. – 2011. – 398 с.
2. Альфа-распад [Электронный ресурс]. URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/031/565.htm> (дата обращения: 25.02.2020)
3. Нейтринно [Электронный ресурс]. URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/dbd/dbd03.htm> (дата обращения: 25.02.2020)
4. Нейтринно [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/6592/> (дата обращения: 25.02.2020)
5. Частица-призрак: нейтринно [Электронный ресурс]. URL: https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/430999/Chastitsa_prizrak_neytrino(дата обращения: 26.02.2020)
6. Поиск и открытие нейтринно [Электронный ресурс]. URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/neutrino1/neutino01.htm> (дата обращения: 26.02.2020)
7. Лаборатория Katrin [Электронный ресурс]. URL: <https://hightech.fm/2019/12/04/katrin> (дата обращения: 26.02.2020)