

УДК 539.165

І.В. Могильний

Сумський державний педагогічний університет ім. А.С.Макаренка

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК β -РОЗПАДУ

Мета даної роботи:

- Проаналізувати стан дослідження бета-розпаду та подвійного бета-розпаду на основі сучасних уявлень про будову ядра.
- Дослідити експериментальним шляхом основні характеристики β -розпаду.
- Розглянути різні типи β -розпаду, включаючи подвійний бета-розпад та його різновиди (з випусканням антинейтрино та безнейтринний (проблема існування маси у нейтрино)).

На відміну від α - та γ -випромінювань, що випускаються радіоактивними ядрами, β -випромінювання характеризується неперервним енергетичним спектром. Типовий розподіл енергії зображено на рис. 1.

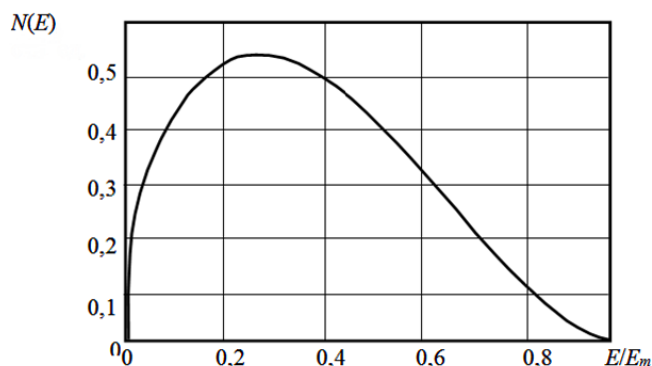


Рис. 1. Типовий бета-спектр

Спектри всіх β -випромінювачів подібні і відрізняються лише максимальним значенням енергії, або верхньою межею, яка для різних ізотопів знаходиться від 18 кеВ до 16,6 МеВ.

Відомо, що викидання β -частинки є результатом квантового переходу протона в нейтрон або нейтрона в протон, подібно до того, як випромінювання фотона атомом є результатом переходу електрона між двома квантовими станами. Особливість β -розпаду полягає в утворенні поряд з електроном (позитроном) нейтрино, яке забирає частину енергії, що вивільнилась в акті розпаду. Якщо β -перетворення відбувається з нормального енергетичного стану материнського ядра на нормальний рівень дочірнього ядра, то спектр називають простим. У багатьох випадках дочірнє ядро утворюється в збудженому стані і його перехід у нормальний стан завершується випусканням γ -фотона. Крім того, існують ядра у яких при β -перетворенні виявляються два канали розпаду, кожний з яких веде до свого певного енергетичного рівня дочірнього ядра. Отже β -спектри дають змогу

вивчати енергетичні рівні ядер. У випадку β -спектрів внаслідок утворення двох частинок для визначення рівнів ядер треба користуватись значенням максимальної енергії спектра. Граничну енергію можна визначити методами поглинання [5].

Один з методів поглинання ґрунтується на аналізі кривої поглинання β -частинок у речовині. Якщо через поглинач пропускати потік частинок, то внаслідок розсіювання електронів з низькою енергією та вибування їх з потоку розподіл електронів по товщині шару поглинача має досить складний характер. У першому наближенні залежність інтенсивності потоку β -частинок від товщини поглинача дається експоненціальною залежністю:

$$I_x = I_0 e^{(-\mu \rho d)}, \quad (1)$$

де I_0 – інтенсивність падаючого на поглинач потоку; I_x – інтенсивність потоку після проходження шару поглинача товщиною d ; μ – масовий коефіцієнт послаблення; ρ – густина речовини [2].

Величину ρd (кг/м²) називають масовою товщиною поглинаючого шару. Вона є досить зручною мірою відстаней у поглинаючому середовищі. При повному поглинанні потоку β -випромінювання у даній речовині значення d_{\max} називають пробігом частинки. Пробіг d_{\max} визначається максимальною енергією спектра частинок та фізико-хімічними особливостями поглинаючої речовини. Величину ρd_{\max} називають ефективним масовим пробігом. Вона майже не залежить від роду поглинача і зручна для визначення граничної енергії β -спектра. Їх зв'язок дається такими емпіричними залежностями:

$$R = 0,54 E_{\max} - 0,13 \text{ для } 0,8 < E < 3 \text{ MeV} \quad (2)$$

$$R = 0,41 E_{\max} - 1,4 \text{ для } 0,15 < E < 0,8 \text{ MeV}, \quad (3)$$

В цих залежностях R вимірюється в грамах на квадратний сантиметр, а E – в мегаелектронвольтах.

Для експериментального визначення E_{\max} між джерелом β -випромінювання та лічильником Гейгера-Мюллера розміщують алюмінієві або мідні пластини певної товщини і при досягненні $d = d_{\max}$ інтенсивність бета-потіку стає рівною нулю і лічильник фіксує лише фон. Побудувавши криву залежності між швидкістю лічби частинок і товщиною шару поглинача, можна визначити R . Визначення R ускладнюється тим, що форма β -спектра поблизу граничного значення енергії наближається до осі d , тобто не має чіткої межі. Для усунення цього варто побудувати графік у напівлогарифмічному масштабі: $\lg n = f(d)$ [3].

Більш точний метод визначення E_{\max} полягає у визначенні товщин шару поглинача, при яких інтенсивність потоку β -частинок зменшується у 2^n разів ($n=1,2,3..$). Гранична енергія визначається за допомогою номограми. Вздовж осі абсцис відкладено товщину шару алюмінію, яка зменшує інтенсивність потоку в $2^1, 2^2, 2^3, \dots, 2^n$ разів, а вздовж осі ординат – граничну енергію. Для визначення граничної енергії цим методом треба знайти (за допомогою кривої поглинання) товщини, при яких інтенсивність спадає у 2, 4, 8... разів, і за графіком знайти значення E_{\max} . Використовуючи ці значення, будують графік і дістають криву з

горизонтальною асимптотою. Ордината цієї асимптоти і визначає граничне значення енергії β -спектра.

	N фон	0	0,43	0,68	0,93	1,62	2,27	2,73	3,14
імп. за 100 с.	319	17218	5540	3580	2659	1413	603	522	410
	279	17659	5475	3560	2598	1417	565	528	417
	314	17541	5505	3542	2765	1438	649	505	387
	348	18131	5243	3509	2849	1466	700	434	377
	387	18004	5388	3594	2900	1497	758	410	420
Середнє	329,4	17710,6	5430,2	3557	2754,2	1446,2	655	479,8	402,2
Імп. за с.	3,294	177,106	54,302	35,57	27,542	14,462	6,55	4,798	4,022
	Ln	5,18	3,99	3,57	3,32	2,67	1,88	1,57	1,39

Рис. 2. Експериментально отримані результати

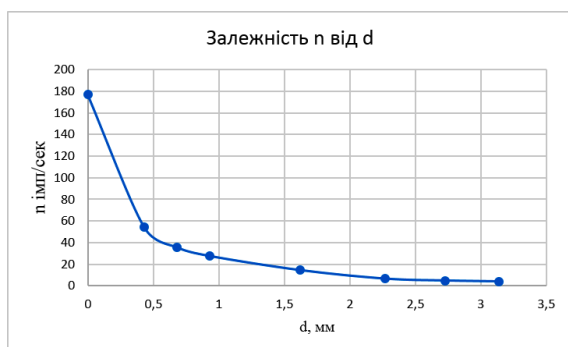


Рис. 3. Експериментально отриманий графік залежності n від d

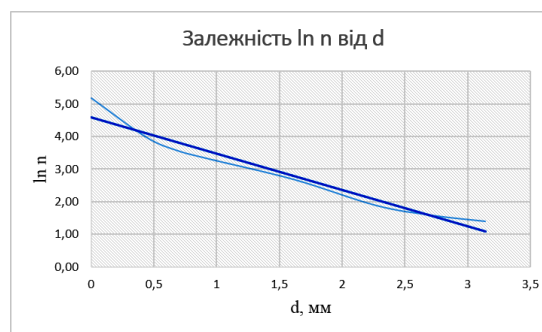


Рис. 4. Експериментально отриманий графік залежності ln n від d

Бета-розпад і всі його різновиди цікаві самі по собі своїм механізмом – проявом слабких ядерних сил взаємодії. У сучасному представленні схема розпаду показана на рис. 5.

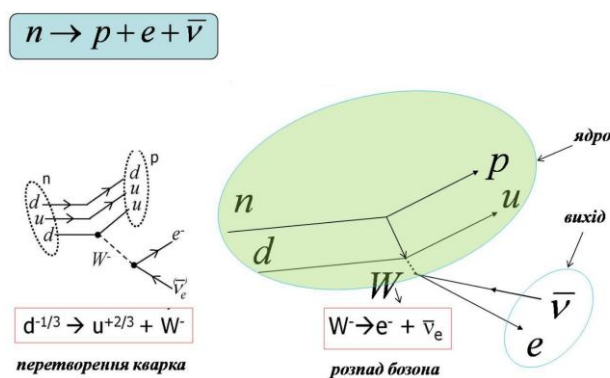


Рис. 5. Сучасне уявлення бета-розпаду

Теорія β -розпаду була створена в 1933 році Е. Фермі, який використав гіпотезу В. Паулі про народження в β -розпаді нейтральної частинки, що має близьку до нуля масу спокою і названої нейтрино ν . Фермі показав, що β -розпад зумовлений новим типом взаємодії частинок в природі – «слабкою» взаємодією і пов'язаний з процесами перетворення в материнському ядрі нейтрона в протон з випусканням електрона e^- і антинейтрино $\bar{\nu}$ (β^- -розпад), протона в нейтрон з

випусканням позитрона e^+ і нейтрино $\bar{\nu}$ (β^+ -розпад), а також із захопленням протоном атомного електрона і випусканням нейтрино (електронне захоплення).

До 1958 року ця теорія була узагальнена в універсальну чотирьохферміонну теорію слабких взаємодій, згідно якої, елементарний процес слабкої взаємодії є локальною взаємодією чотирьох ферміонів, тобто частинок з напівцілими спінами. На даний момент процеси, як слабкої, так і електромагнітної взаємодії знаходять пояснення в новій теорії – об'єднаній теорії електрослабких взаємодій. Згідно цієї теорії, слабка взаємодія здійснюється шляхом обміну віртуальними проміжними бозонами. Взаємодія, що призводить до β -розпаду мала, в порівнянні з взаємодією, яка формує стани ядра.

В рамках цієї роботи ми також розглянемо подвійний бета-розпад.

У 1933 році Е. Фермі сформулював теорію бета-розпаду. Вже через рік М. Гепперт-Майєр вказала на можливість існування подвійного бета-розпаду [1;6]. Подальший розвиток ядерної фізики показав, що якщо число ядер, які розпадаються по звичайних каналах поодиноких електронного і позитронного бета-перетворень дуже велике, то прикладів подвійного бета-розпаду, відомих до цього часу, всього декілька.

В деяких випадках, коли для парно-парних ядер неможливий бета-розпад на непарно-непарне ядро, виявляється енергетично можливим перехід із зміною Z на дві одиниці – подвійний бета-розпад. Очікувалося, що радіонукліди, що розпадаються по подвійному бета-розпаду матимуть дуже великі періоди напіврозпаду. Експеримент підтвердив це припущення.

Так у ізотопів ^{128}Te і ^{130}Te (їх вміст в природній суміші цього елемента 31.7% і 33.8% відповідно) імовірність подвійного бета-розпаду дуже мала, періоди напіврозпаду $T_{1/2}(^{128}\text{Te}) = 7.7 \cdot 10^{28}$ років, $T_{1/2}(^{130}\text{Te}) = 2.7 \cdot 10^{21}$ років.

Теорія передбачає можливість двох видів подвійного β -розпаду. Перший – звичайний тип з випусканням антинейтрино: ${}^AZ \rightarrow {}^A(Z-2) + 2e^- + 2\bar{\nu}$

Другий – більш екзотичний – безнейтринний: ${}^AZ \rightarrow {}^A(Z-2) + 2e^-$

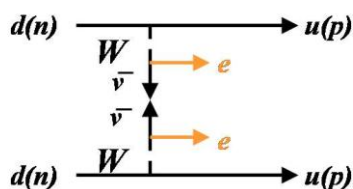


Рис. 6. Схема безнейтринного розпаду

На сьогоднішній день достовірно встановлена наявність лише двонейтринного подвійного бета-розпаду, що допускається класичною теорією і тому не представляє особливого інтересу. До теперішнього часу $2\beta 2\nu$ розпад виявлений в 10 ядрах: ^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{96}Zr , ^{100}Mo , ^{116}Cd , ^{128}Te , ^{130}Te , ^{150}Nd , ^{238}U [7].

Достовірних спостережень безнейтринних 2β -процесів на сьогодні не існує, проте нижні обмеження на період напіврозпаду по цьому каналу для різних

ядер досягають 10^{25} років. Це відповідає верхньому обмеженню на майоранівську масу нейтрино близько 0,4 еВ. Крім того, обмеження на імовірність безнейтринного 2β -розпаду дозволяють встановити обмеження на інші параметри теорії, наприклад на константи зв'язку правих лептонних і кваркових струмів в слабкій взаємодії, константи зв'язку нейтрино з майораном, деякі параметри суперсиметричних моделей.

У світі діє або будуються близько десятка великих підземних детекторів, призначених для пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду: NEMO-3, Genius, Cuore, Majorana і т. д.

Виявлення хоч би одного прикладу безнейтринної моди означатиме необхідність перегляду положень стандартної моделі. Доведено, що для здійснення безнейтринного 2β -розпаду необхідно, щоб нейтрино було майоранавською частинкою (тобто було власною античастинкою), і нейтрино мало масу.

Значна увага до цього питання існує з наступних причин:

Вивчення подвійного бета-розпаду – один із способів встановлення наявності, або відсутності маси спокою у нейтрино. Цей фактор дуже важливий для вибору космологічного сценарію еволюції нашого всесвіту у далекому майбутньому, тісно зв'язаного з проблемою прихованої маси, питанням про гравітаційну стійкість скупчень галактик і рядом інших. Необхідно відмітити, що існування маси спокою у нейтрино потрібне для можливості осциляцій нейтрино, що можуть, зокрема, пояснити менший потік сонячних електронних нейтрино, ніж теоретично передбачуваний, якщо виходити з безмасовості цих частинок.

Досліджуючи безнейтринний подвійний бета-розпад, можна перевірити закон збереження лептонного заряду. Тільки через цю моду розпаду можна виявити природу маси нейтрино, якщо така є. Якісне питання про цю масу не менш важливе, ніж кількісне.

Одними з найбільш продуктивних вважаються експерименти з ізотопом ^{76}Ge . В 1994 році була зроблена спроба виявлення безнейтринного подвійного бета-розпаду згаданого вище ізотопу ^{130}Te . [1]

В 2001 році, після ретельного аналізу даних і тривалих самоперевірок, професор Клапдор-Кляйнротхауз показав всьому світу перший сигнал від безнейтринного подвійного бета-розпаду германію і тим самим першим висловив твердження про те, що нейтрино – це масивні майоранівські частинки і повне лептонне число не зберігається. Важливість цих тверджень неможливо переоцінити. Після трьох років додаткових і ще ретельніших досліджень в 2004 році рівень достовірності сигналу був доведений до величини в 6 стандартних відхилень (значно більше того, що було отримано в перших експериментах по виявленню нейтринних осциляцій). Значення ефективної маси нейтрино було оцінене рівним $0,22 \pm 0,02$ еВ. Тут слід підкреслити, що воно було отримане в припущенні про масовий механізм безнейтринного подвійного бета-розпаду і

повній відсутності яких-небудь інших механізмів, таких, наприклад, як вклад правих струмів, лептокварків або суперсиметрії.

Унікальні за своїми параметрами германієві детектори експеримента Гейдельберг-Москва дуже добре підходили для проведення прямого пошуку частинок темної матерії в наземних умовах. Завдяки цьому професор Клапдор став займатися експериментальними і теоретичними дослідженнями з проблем темної матерії. Більше того, в 1997 році він запропонував нову концепцію експерименту GENIUS (Germanium in Nitrogen Underground Search), який мав велику масу, низький фон, займав великий об'єм і був націлений на одночасний пошук безнейтринного бета-розпаду, темної матерії і реєстрацію сонячних нейтрино низьких енергій. Ця ідея була виключно нова, і для її перевірки в Гран Сассо в 2003 році був запущений експеримент GENIUS-TF (прототип проекту GENIUS) з шістьма германієвими детекторами абсолютно нової конфігурації в рідкому азоті.

Інший невеликий експеримент Клапдора – HDMS (Heidelberg Dark Matter Search) також проводився в Гран Сассо з 2000 по 2005 роки. Його особливістю було використання, з метою подавлення фону, в одній установці двох різних ізотопів германію (високоспінового Ge-73 і натурального германію). Завдяки своїй унікальній архітектурі і ретельності проведеного аналізу цей експеримент довгий час був першим по чутливості до залежної від спіна ядра взаємодії частинок темної матерії з нейтронами.

Не дивлячись на величезний інтерес до цього питання і прикладені зусилля, даних із виявлення безнейтринного бета-розпаду немає [4].

Література

1. Бекман И.Н. Ядерная физика. Явление радиоактивности, лекции 7-9.
2. Дущенко В.П. Фізичний практикум під редакцією, ч.2. – К.: Вища школа, 1984. – С. 238-241.
3. Загальна фізика. Лабораторний практикум. – К.: Вища школа, 1992. – С. 467-471, 477-480.
4. Коваленко В.Э. Исследование процессов двойного бета-распада ^{100}Mo в эксперименте NEMO3. – Дубна, 2006.
5. Кучерук І.М., Дущенко В.П., Загальна фізика, Оптика, Квантова фізика. Розділ 15. – К.: Вища школа, 1991.
6. Шершаков В.В. Двойной бета-распад: реферат. [Электронный ресурс] / МГУ им. М.В. Ломоносова. Кафедра общей ядерной физики. Режим доступа: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/students/dbd.htm>, свободный.
7. Double beta decay experiments: past and present achievements by A.S. Varabash IYEP, Moscow, 2006.

Анотація. Могильний І.В. Експериментальне дослідження характеристик β -розпаду. Робота присвячена дослідженню основних характеристик бета-

розпаду, а також аналізу стану дослідження бета-розпаду та подвійного бета-розпаду на основі сучасних уявлень про будову ядра.

Ключові слова: бета-спектр, гранична енергія бета-спектра, стандартна модель, метод поглинання, нейтрино.

Аннотація. Могильный И.В. Экспериментальное исследование характеристик β -распада. Работа посвящена исследованию основных характеристик бета-распада, а также анализу состояния исследования бета-распада и двойного бета-распада на основе современных представлений о строении ядра.

Ключевые слова: бета-спектр, предельная энергия бета-спектра, стандартная модель, метод поглощения, нейтрино.

Summary. Mogilny I. Experimental research of the characteristics of the β -decay. The work is devoted to the research of the basic characteristics of beta decay, and analysis of research of beta decay and double beta decay based on modern concepts of the structure of the nucleus.

Key words: beta spectr, the maximum energy of the beta spectrum, the standard model, the method of absorption, neutrino.