

М. Ф. Митрохович

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

КОРЕЛЬОВАНІСТЬ РУХУ ЕЛЕКТРОНА АВТОІОНІЗАЦІЇ З ПОЗИТРОНОМ ПРИ β^+ -РОЗПАДІ

Дослідження корельованості електрона автоіонізації (як супутньої частинки) із позитроном (як основної частинки) проведено для розпаду ^{152}Eu на установці вимірювання подвійних, потрійних та четверних збігів γ -квантів з β^\pm -частинками, електронами та з низькоенергетичними електронами, включаючи e_0 -електрони вторинної електронної емісії. Корельованість $\Upsilon = (4\pi/P)dp/d\Omega$ електрона «струсу» з позитроном вимірювалась відносно корельованості електрона «струсу» з β^- -частинкою на основі проведення вимірювань γ , $\gamma\beta$, $\gamma(e_0 + \beta^-)$, $\gamma\beta e_0$, $\gamma\beta\gamma_{511}$ - і $\gamma\beta\gamma_{511}e_0$ -спектрів. Установлено, що супутня частинка сильно скорельована по напрямку вперед з основною частинкою (β^\pm -частинка), причому корельованість Υ руху з позитроном в 1,6 раза перевищує корельованість руху з β^- -частинкою і становить 5,2(20) при вимірюваннях у розпаді ^{152}Eu . Дискутується можливий якісний механізм сильної корельованості руху супутньої частинки з основною у процесах β^- -розпаду та внутрішньої конверсії як зумовленою струмовими компонентами електрон-електронної прямої взаємодії частинок.

Ключові слова: β^\pm -розпади, електрон конверсії, електрон Оже, електрон "shake-off", ^{152}Eu .

Вступ

$KVK = \Upsilon/P_0$,

Ці дослідження виконані в рамках вивчення корельованості руху супутньої частинки з основною (головною) частинкою у процесах β^- -розпаду і внутрішньої конверсії. Супутня частинка - електрон автоіонізації (далі - електрон «струсу» ("shake-off")), електрон Оже. Головна частинка - β^- -частинка, електрон внутрішньої конверсії.

Основна мета робіт спрямована на вирішенні задач ядерної спектроскопії, що виникли з вимірювань на спектрометрі $\pi\sqrt{2}$ спектрів конверсійних електронів у збігах із супутнім випромінюванням. Тоді був виявлений інтенсивний близьконульовий e_0 -пік із «тонкого» ($< 30 \text{ мкг/см}^2$) радіоактивного джерела за рахунок вторинної електронної емісії від електронів Оже. По e_0 -електронах, але вже від зовнішнього емітера, були реалізовані вимірювання повних значень коефіцієнтів внутрішньої конверсії (КВК) на окремій установці.

У найпростішому випадку цих вимірювань, без відбору електрона конверсії

де Υ - експериментальні значення виходу e_0 -електронів на акт заселяючого розпаду; P_0 - вихід e_0 -електронів на акт конверсії, який можна поміряти окремо по відомому КВК чи при електронному захваті (при наявності цієї гілки розпаду). При вимірюваннях КВК по супутньому випромінюванню з відбором основної частинки (у збігах із нею) необхідні дані про наявність корельованості $\Upsilon(\Omega)$, де $\Upsilon(\Omega) = (4\pi/P)dp/d\Omega$, для всіх супутніх випромінювань (електрони «струсу», електрони Оже) з основною частинкою. $P = \int dp$ - повна ймовірність випускання супутньої частинки на акт розпаду в кут 4π ; $dP(\Omega)$ - імовірність реєстрації супутньої частинки в кут $d\Omega$ по відношенню до основної частинки. Таким чином, $\Upsilon(\Omega)$ - це відношення ймовірності $dP(\Omega)$ з відбором основної частинки до середнього її значення, рівному $Pd\Omega/4\pi$, вимірюваному без відбору основної частинки. Напрямок Ω визначається детекторами De_{ac} і De_m супутньої та основної частинки по відношенню до джерела S . При відсутності корельованості $\Upsilon = 1$ (рис. 1).

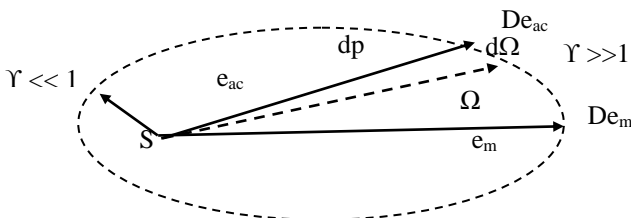


Рис. 1. Корельованість $\Upsilon(\Omega)$ напрямку руху супутньої частинки e_{ac} із джерела S відносно головної частинки e_m , що реєструються детекторами De_{ac} і De_m .

За нашими даними [1 - 6], при β^- -розпаді та внутрішній конверсії спостерігається сильна корельованість напрямку руху частинок, супутньої (електрони «струсу» ("shake-off"), електрони

Оже) з основною (β^- -частинка, електрон конверсії). Вони рухаються разом з основною частинкою, головним чином у передню напівсферу. Корельованість $\Upsilon \sim E^{1/2}$, отримана нами раніше [3],

© М. Ф. Митрохович, 2016

є пропорційною імпульсу-швидкості електрона «струсу» і не залежить від енергії-імпульсу основної частинки (електрона) [4]. Це дає деяку підставу на припущення про те, що просторова кореляція напрямку руху супутньої частинки з основною зумовлена струмовими компонентами взаємодії від руху заряджених частинок [6]. Якщо це так, тоді корельованості в русі електрона «струсу» та основної частинки при β^- і β^+ -розпадах [6] повинні бути схожими. У цьому випадку сильна просторова корельованість імпульсів руху $\Upsilon = (4\pi/P)dp/d\Omega$ електронів «струсу» при β^+ -розпаді в напрямку руху позитрона зробленому припущенню відповідає. В іншому разі питання залишається відкритим.

Методика вимірювань та результати

Вимірювання корельованості Υ_{β^+} руху електрона «струсу» з позитроном проведено для β^+ -розпаду ^{152}Eu , фрагмент розпаду якого показано на рис. 2.

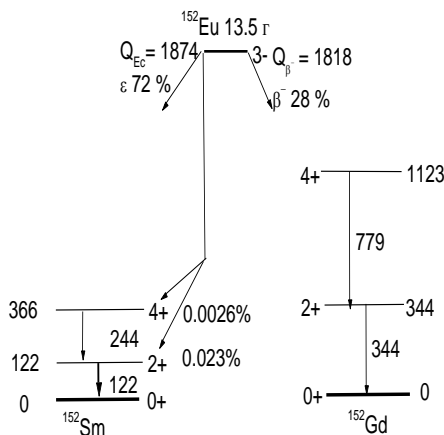


Рис. 2. Фрагмент схеми розпаду ^{152}Eu із $\text{EC}+\beta^+$ і β^- -гілками розпаду. Інтенсивність β^+ -компонента мала і визначення корельованості Υ_{β^+} проведено відносно корельованості Υ_{β^-} . Енергії γ -переходів наведено в кеВ.

Вимірювання виконано на установці вимірювання подвійних, потрійних та четверних збігів γ -квантів із β -частинками, електронами та з низькоенергетичними електронами, включаючи e_o -електрони вторинної електронної емісії (ВЕЕ) (рис. 3). В установці є два сцинтиляційні NaJ(Tl) γ -детектори, на одному з яких (верхньому) вимірюються γ -спектри збігів, на іншому, великого об'єму, виділяється вікно реєстрації кванта 511 кеВ від двофотонної анігіляції позитрона. Два детектори на основі мікроканальних пластин (МСП) реєструють електрони. Правий детектор реєструє β^\pm -частинку, що проходить через емітер E_m , лівий детектор реєструє e_o -електрони вторинної електронної емісії від електронів «стру-

су» e_{Sh} з емітера. Електрони e_{Sh} «струсу» рухаються за напрямком руху β -частинки і створюють на емітері E_m e_o -електрони, які при потенціалах $U_S > U_L$ і $E_m = 0$ В реєструються тільки від емітера E_m (алюміній 78 мк) і тільки лівим МСП-детектором.

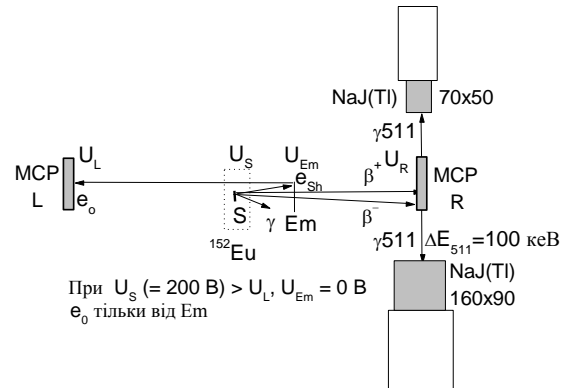


Рис. 3. Методика визначення корельованості Υ руху електрона «струсу» e_{Sh} з β^\pm -частинкою при реєстрації e_{Sh} по e_o -електронах ВЕЕ. Корельованість Υ_{β^+} відносно корельованості Υ_{β^-} визначається за вимірюваннями $\gamma\gamma_{511}\beta^+$ і $\gamma\gamma_{511}\beta^+e_o$ -збігів. Позитрони ^{152}Eu після реєстрації правим МСП-детектором відбираються по двофотонному анігіляційному випромінюванню двома γ -детекторами.

Оскільки інтенсивність β^+ -компонента розпаду ^{152}Eu всього 0,026 %, то корельованість електрона «струсу» з позитроном Υ_{β^+} вимірювалась відносно корельованості Υ_{β^-} електрона «струсу» з β^- -частинкою. Υ_{β^-} визначалась за Υ -виходами e_o -компонента на акт розпаду з відбором основної частинки та без її відбору з вимірювань γ -, $\gamma\beta^-$ -, $\gamma(e_o + \beta^-)$ -, $\gamma\beta^-e_o$ -спектрів (рис. 4). Вихід Υ_{β^+} з відбором основної β^- -частинки відповідає руху електрона «струсу» e_{Sh} (реєстрованому по e_o -електронах) по напрямку руху β^- -частинки. Вихід $\Upsilon_{\gamma e}$ без відбору β^- -частинки відповідає довільному напрямку руху електрона e_{Sh} .

$$\Upsilon_{\beta^+} = \frac{Y_{\gamma\beta e}}{Y_{\gamma e}} = \frac{N_{\gamma_{344}\beta e_o} / N_{\gamma_{344}\beta}}{N_{\gamma_{344}e_o} / N_{\gamma_{344}}} = \frac{0,00855(19)}{0,00265(8)} = 3,22(12).$$

Υ_{β^+} визначалась на основі проведення вимірювань $\gamma\beta_{\gamma_{511}}$ і $\gamma\beta_{\gamma_{511}e_o}$ -спектрів (рис. 5), в яких вимірювалась інтенсивність піка γ_{511} кеВ по відношенню до γ_{344} ; γ -спектр $\gamma\gamma_{511}\beta^+$ -збігів відповідає довільному напрямку руху електрона «shake-off» e_{Sh} по відношенню до позитрона. Четверні $\gamma\gamma_{511}\beta^+e_o$ -збіги відповідають руху електрона «shake-off» e_{Sh} , (реєстрованому по e_o -електронах) уздовж напрямку руху позитрона.

$$\Upsilon_{\beta^+} = \Upsilon_{\beta^-} \frac{(N\gamma_{511} / N\gamma_{344}) \gamma\beta\gamma_{511}e_0}{(N\gamma_{511} / N\gamma_{344}) \gamma\beta\gamma_{511}} = 3,22(12) \frac{17(6) / 201(9)}{244(30) / 4651(42)} = 5,2(20).$$

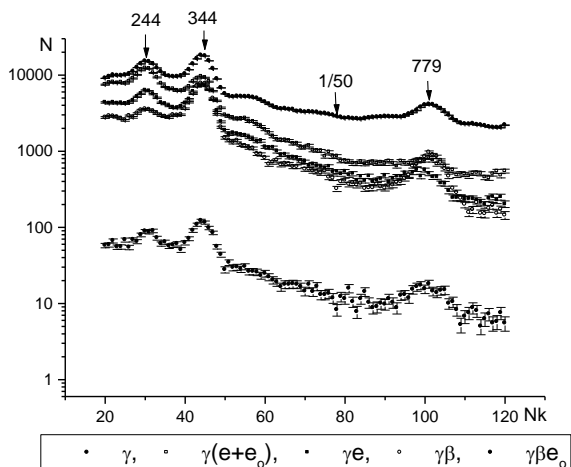


Рис. 4. Спектри, з яких вимірюються Υ -виходи e_0 -компонента на акт γ_{344} - чи $\gamma_{344}\beta$ -розпаду для визначення корельованості Υ_{β^+} , як $\Upsilon_{\beta^+}/\Upsilon_{\gamma e}$.

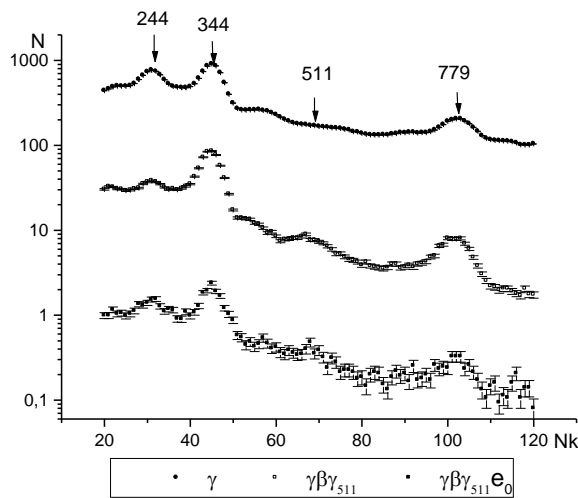


Рис. 5. Вимірювання корельованості Υ_{β^+} руху електрона «струсу» із позитроном при β^+ -розпаді відносно корельованості Υ_{β^-} руху електрона «струсу» з електроном при β^- -розпаді по відносній інтенсивності піків 511 і 344 кеВ у спектрах $\gamma\beta\gamma_{511}e_0$ - і $\gamma\beta\gamma_{511}$ -збігів.

Висновки

Таким чином, дані отримані по β^\pm -розпадах, указують на сильну корельованість Υ напрямку руху супутньої частинки при її русі з основною частинкою, головним чином у передню напівсферу, причому корельованість руху з позитроном в 1,6 раза перевищує корельованість її напрямку руху з β^- -частинкою і становить 5,2(20) при вимірюваннях у розпаді ^{152}Eu . Це відповідає зробленому в [6] припущенню про можливість сильної корельованості руху супутньої частинки з основною у процесах β -розпаду та внутрішньої конверсії за рахунок струмових компонентів електрон-електронної взаємодії частинок, хоча й не доводить їхньої ролі як основного механізму корельованості. Можливо, це відбувається за рахунок механізму прямої взаємодії частинок. Про присутність прямої взаємодії свідчать теоретичні розрахунки [7], за якими внесок від прямої взаємодії β -частинки з електроном атомної оболонки

значний (до 35 %). Але в основному діє механізм раптового збурення [8] (уперше введений разом із механізмом прямої взаємодії Фейнбергом і Мігдалом ще в 1941 р.), оскільки «струс» (автоіонізація) в основному відбувається із зовнішніх оболонок атома [9] і енергія β -частинки на декілька порядків перевищує енергію зв'язку електронів у цих оболонках. Проте припущення про сильну корельованість супутньої частинки із основною за рахунок струмових компонентів електрон-електронної взаємодії легше всього пояснюється присутністю механізму прямої взаємодії β^\pm -частинки з електроном атомної оболонки.

Вивчення механізму сильної корельованості руху супутньої частинки з основною важливе для використання корельованості супутньої частинки з основною в точних вимірюваннях коефіцієнтів внутрішньої конверсії відповідною методикою. Воно важливе й у загальному плані для задачі про корельований рух заряджених частинок в імпульсному та спіновому просторі [8].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Mitrokhovich N.F.* Correlation β -particle with "shake off" electrons under β -decay ^{152}Eu // Proc. Intern. Conf. "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy" (Kyiv, May 29 - June 03, 2006) - К., 2007. - P. 412 - 416.
2. *Mitrokhovich N.F., Kupryashkin V.T.* Correlation electron internal conversion with "shake-off" electrons under ε -decay ^{152}Eu // Nucl. Phys. At. Energy. - 2007. - No.1 (19). - P. 61 - 66.
3. *Mitrokhovich N.F.* Energy and correlation properties of "shake-of" electrons at β -decay // Nucl. Phys. At. Energy. - 2010. - Vol. 11, No. 2. - P. 136 - 140.
4. *Митрохович Н.Ф.* Спектры энергий электронов автоионизации и их коррелированность по направлению вылета β -частицы // Ядерна фізика та енергетика. - 2012. - Т. 13, № 1. - С. 17 - 21.
5. *Митрохович Н.Ф., Купряшкин В.Т., Сидоренко Л.П.* Коррелированность направления движения электронов Оже с направлением движения электрона внутренней конверсии // Ядерна фізика та енергетика. - 2013. - Т. 14, № 2. - С. 129 - 134.
6. *Митрохович Н.Ф.* Корреляционные свойства движения сопутствующей частицы относительно движения основной частицы в процессах радиоактивно-

- го распада и внутренней конверсии // Ядерна фізика та енергетика. - 2014. - Т. 15, № 2. - С. 126 - 131.
7. *Баткин И.С., Копытин И.В., Смирнов Ю.Г., Чуракова Т.А.* Ионизация внутренних оболочек атома в процессе β -распада // Ядерная физика. - 1981. - Т. 33, вып. 1. - С. 48.
8. *Матвеев В.И., Парилис Э.С.* Встряска при электронных переходах в атомах // Успехи физических наук. - 1982. - Т. 138, вып. 4. - С. 573 - 602.
9. *Kochur A.G., Popov V.A.* Shake up and shake off probabilities for L-, M-, and N-electrons in atoms with $Z = 3$ to 60 // Radiation Physics and Chemistry. - 2006. - Vol. 75. - P. 1525 - 1528.

Н. Ф. Митрохович

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

КОРЕЛИРОВАННОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНА АВТОИОНИЗАЦИИ С ПОЗИТРОНОМ ПРИ β^+ -РАСПАДЕ

Исследования коррелированности электрона «встряски» (как сопутствующей частицы) с позитроном (как основной частицы) проведены для распада ^{152}Eu на установке измерения двойных, тройных и четверных совпадений γ -квантов с β^+ -частицами, электронами и с низкоэнергетичными электронами, включая e_o -электроны вторичной электронной эмиссии. Коррелированность $\Upsilon = (4\pi/P)d\rho/d\Omega$ электрона «встряски» с позитроном измерялась относительно коррелированности электрона «встряски» с β^- -частицей на основе проведения измерений γ , $\gamma\beta$, $\gamma(e_o+\beta)$ -, $\gamma\beta e_o$ -, $\gamma\beta\gamma_{511}$ - и $\gamma\beta\gamma_{511}e_o$ -спектров. Установлено, что сопутствующая частица (электрон «встряски») сильно скоррелирована в направлении вперед с основной частицей (β^+ -частица), причем коррелированность Υ движения с позитроном в 1,6 раз превышает коррелированность движения с β^- -частицей и составляет 5,2(20) при измерениях в распаде ^{152}Eu . Обсуждается возможный качественный механизм сильной коррелированности движения сопутствующей частицы с основной в процессах β -распада и внутренней конверсии как обусловленной токовыми компонентами прямого взаимодействия частиц.

Ключевые слова: β^\pm -распады, электрон конверсии, электрон Оже, электрон "shake-off", ^{152}Eu .

M. F. Mitrokhovich

Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

CORRELATION MOTION OF THE AUTOIONIZATION ELECTRON WITH POSITRON AT β^+ -DECAY

Correlation study of the "shake-off" electron (as accompanying particle) with positron (as main particle) have been performed for ^{152}Eu decay on installation for measure double, triple, fourth γ -quanta coincidences with β^\pm -particles, electrons and with low energy electrons, including e_o -electrons of the secondary electron emission. Correlation $\Upsilon = (4\pi/P)d\rho/d\Omega$ of "shake-off" electron with positron was measured regarding correlation of "shake-off" electron with β^- -particle on the basis of the measurements of γ , $\gamma\beta$, $\gamma(e_o+\beta)$ -, $\gamma\beta e_o$ - and $\gamma\beta\gamma_{511}$ -, $\gamma\beta\gamma_{511}e_o$ -spectra. It was established that accompanying particle "shake-off" electron) is strongly correlated forward with the main particle (β^\pm -particle) and correlation of Υ motion with positron is 1.6 times greater than correlation motion with β^- -particle and is 5.2(20) at the measurement in ^{152}Eu decay. Possible qualitative mechanism of strong correlation motion of the accompanying particle with the main in β -decay processes and internal conversion, caused by current components of the direct interaction of particles is discussed.

Keywords: β^\pm -decays, conversion electron, Auger electron, "shake-off" electron, ^{152}Eu .

REFERENCES

- Mitrokhovich N.F.* Corelation β -particle with "shake off" electrons under β -decay ^{152}Eu // Proc. Intern. Conf. "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy" (Kyiv, May 29 - June 03, 2006) - Kyiv, 2007. - P. 412 - 416.
- Mitrokhovich N.F., Kupryashkin V.T.* Correlation electron internal conversion with "shake-off" electrons under ε -decay ^{152}Eu // Yaderna fizyka ta atomna energetyka. (Nucl. Phys. At. Energy). - 2007. - No. 1 (19). - P. 61 - 66.
- Mitrokhovich N.F.* Energy and correlation properties of "shake-of" electrons at β -decay // Yaderna fizyka ta atomna energetyka. (Nucl. Phys. At. Energy). - 2010. - Vol. 11, No. 2. - P. 136 - 140.
- Mitrokhovich N.F.* // Yaderna fizyka ta atomna energetyka. (Nucl. Phys. At. Energy). - 2012. - Vol. 13, No. 1. - P. 17 - 21. (Rus)
- Mitrokhovich N.F., Kupryashkin V.T., Sidorenko L.P.* // Yaderna fizyka ta atomna energetyka. (Nucl. Phys. At. Energy). - 2013. - Vol. 14, No. 2. - P. 129 - 134. (Rus)
- Mitrokhovich N.F.* // Yaderna fizyka ta atomna energetyka. (Nucl. Phys. At. Energy). - 2014. - Vol. 15, No. 2. - P. 126 - 131. (Rus)
- Batkin I.S., Kopytin I.V., Smirnov Yu.G., Churakova T.A.* // Yadernaya fizika. - 1981. - Vol. 33, Iss. 1. - P. 48. (Rus)
- Matveev V.I., Parilis E.S.* // Uspekhi fizicheskikh nauk. - 1982. - Vol. 138, Iss. 4. - P. 573 - 602. (Rus)
- Kochur A.G., Popov V.A.* Shake up and shake off probabilities for L-, M-, and N-electrons in atoms with $Z = 3$ to 60 // Radiation Physics and Chemistry. - 2006. - Vol. 75. - P. 1525 - 1528.

Надійшла 11.02.2016

Received 11.02.2016