

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОНОВ “ВСТРЯСКИ” ПРИ β -РАСПАДЕ

© 2010 Н. Ф. Митрохович

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

Проведены измерения энергетического спектра электронов “встряски” при β -распаде ^{152}Eu и их скоррелированности по направлению вылета с импульсом β -частицы. Измерения выполнены в диапазоне 150 - 2000 эВ на установке совпадений γ -квантов и β -частиц с низкоэнергетичными электронами, включая e_0 -электроны вторичной электронной эмиссии ($\gamma\beta e_0$ -совпадения). Регистрация электронов “встряски” осуществлялась по создаваемым ими e_0 -электронам. По полученным данным 70 % электронов “встряски” в измеренной части спектра находится до 500 эВ, а сами электроны “встряски” сильно скоррелированы по направлению вылета с β -частицей, причем их скоррелированность с энергией электрона “встряски” возрастает, качественно подчиняясь зависимости $\sim E^{1/2}$

Ключевые слова: электроны “встряски”, β -распад, ^{152}Eu .

Введение

При β -распаде резко изменяется заряд ядра на 1, что вызывает сильную встряску атомной оболочки, сопровождается ее возбуждением или ионизацией [1]. Эффект на внешних оболочках значителен [2], но именно для них изучен мало. Эффекты “встряски” при β -распаде по вероятности сопоставимы с вероятностью основного процесса и их необходимо учитывать при изучении атомно-ядерных процессов. Сами электроны “встряски” сильно скоррелированы с β -частицами, испускаясь вместе с ними в ту же полусферу [3]. Это обстоятельство, важное в конкретных измерениях низкоэнергетичных электронов с участием β -частиц, является также важным для решения общей задачи о корреляционном движении частиц в импульсном и спиновом пространстве [1], поскольку изучение корреляционных эффектов при “встряске”, например при β -распаде, двойной фотоионизации или внутренней конверсии дают информацию о электрон-электронном взаимодействии и конкретных механизмах, ответственных за наблюдение этих явлений. Данная работа является непосредственным продолжением предыдущей работы [4] по “встряске” при β -распаде и является также продолжением работ [3 - 7] по “встряске” при β -распаде и внутренней конверсии в распаде $^{152,154}\text{Eu}$. В ней продолжено изучение энергетического спектра электронов “встряски” и проведены измерения зависимости скоррелированности направления испускания электрона “встряски” и β -частицы от энергии электрона “встряски” при β -распаде ^{152}Eu .

Методика измерений и результаты

Работа выполнена на установке [8] для измерения временных и энергетических спектров

совпадений γ -квантов с β -частицами и низкоэнергетичными электронами, включая e_0 -электроны вторичной электронной эмиссии ($\gamma(\beta + e_0)$ - и $\gamma\beta e_0$ -совпадения). Использовался источник ^{152}Eu на тонкой подложке с толщиной радиоактивного слоя 30 мкг/см². Значительное самопоглощения низкоэнергетичной части спектра в таком радиоактивном слое позволило изучать электроны “встряски” при β -распаде, начиная со 150 эВ. β -распад ^{152}Eu отбирался по $\gamma 344$ (рис. 1) и, таким образом, электроны “встряски” регистрировались в совпадениях с $\gamma 344$.

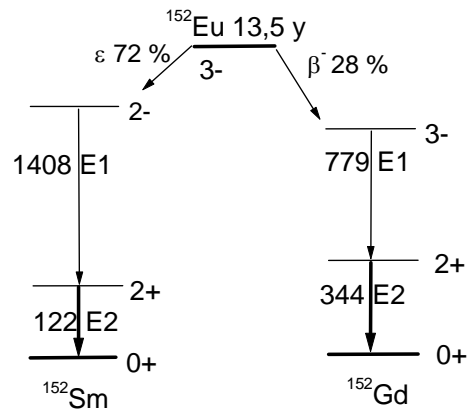


Рис. 1. Фрагмент схемы распада ^{152}Eu . Весь β -распад ^{152}Eu проходит через состояние 344 кэВ 2+. Интенсивный $\gamma 344$ является изолированным в γ -спектре и не маскируется интенсивными γ -переходами из ϵ -ветви распада.

Геометрия измерений представлена на рис. 2.

В данной методике измерений осуществлена регистрация электронов “встряски” по e_0 -электронам вторичной электронной эмиссии. Электроны “встряски” e_{Sh} , испускающиеся в узком телесном угле из источника S, образуют на алюминиевой фольге E e_0 -электроны. Конструкция источника (активность находится на тонкой

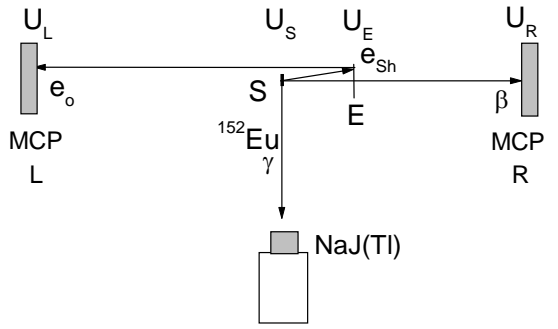


Рис. 2. MCP – детекторы (L и R) на основе микроканальных пластин для регистрации e_0 -электронов вторичной электронной эмиссии от электронов “встряски” e_{Sh} и β -частиц от источника S. NaJ(Tl) – сцинтилляционный детектор для регистрации γ -квантов. E – фольга Al 0,07 мм. $U_E = 0$, $U_S > U_L$, $U_R = 0$.

0,5 мм алюминиевой полоске) и всех электродов формирует при подаче на них электрических потенциалов достаточно однородное электрическое поле, которое при $U_E = 0$, $U_S > U_L$, $U_R = 0$ вытягивает почти все e_0 -электроны от фольги E в сторону левого детектора и, таким образом, e_0 -электроны регистрируются только левым детектором и только от E. Фольга E с толщиной 0,07 мм поглощает интенсивные электроны конверсии перехода 122 кэВ E2, но пропускает более высокоэнергетичные β -частицы, которые регистрируются правым детектором. Таким образом, в совпадениях γ_{344} с e_0 -электронами регистрируются электроны “встряски” e_{Sh} , энергия которых $E_{eSh} > eU_S$ и которые в $\gamma_{344}\beta e_0$ -совпадениях движутся в том же телесном угле, что и β -частица. При изменении напряжения на источнике доступно измерение интегрального энергетического спектра электронов “встряски”. Дифференциальный энергетический спектр электронов “встряски” получается после численного дифференцирования интегрального спектра.

В такой методике проводились измерения γ -спектров в γe_0 - и $\gamma\beta e_0$ -совпадениях. Энергетические спектры в γe_0 - и $\gamma\beta e_0$ -совпадениях измерялись для временного интервала Δt (рис. 3), которым выделялся e_0 -компонент временного спектра совпадений и от которого формировались импульсы для управляющего входа анализатора.

На рис. 4. приведены γ -спектры в $\gamma(\beta + e_0)$ - и $\gamma\beta e_0$ -совпадениях, измеренные при смещении на источнике 200 эВ. В измерениях такого типа, проведенных при различных напряжениях на источнике, определялась интенсивность фотопиков γ_{344} , относящаяся к e_0 -компоненту. В $\gamma(\beta + e_0)$ -совпадениях для получения этой интенсивности вычитался $\gamma\beta$ -компонент, который был измерен при

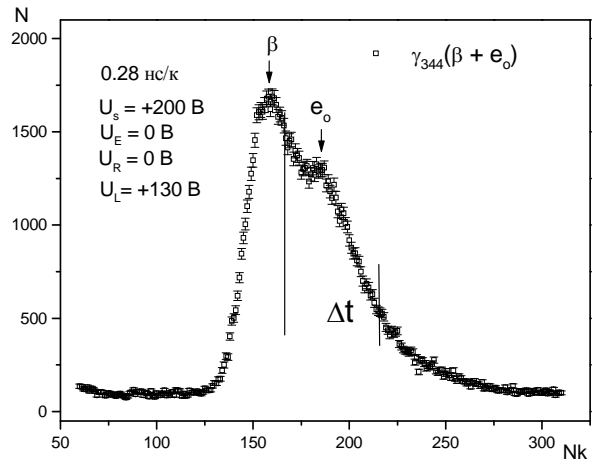


Рис. 3. Временной интервал Δt , выделяющий e_0 -компонент во временном спектре $\gamma_{344}(\beta + e_0)$ -совпадений, в котором проводились измерения энергетического спектра γe_0 - и $\gamma\beta e_0$ -совпадений.

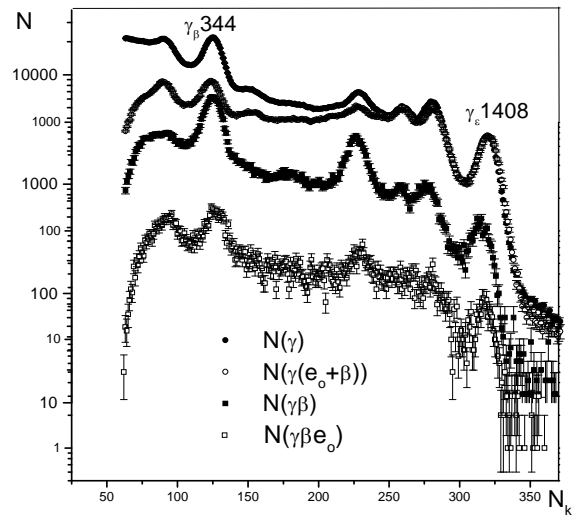


Рис. 4. γ -спектр ^{152}Eu (верхний) и ниже – спектры $\gamma(\beta + e_0)$ -, $\gamma\beta$ - и $\gamma\beta e_0$ -совпадений γ -квантов с частицами и e_0 -электронами вторичной электронной эмиссии от фольги E. $\gamma\beta$ -спектр измерялся при расположении перед L-детектором алюминиевой фольги толщиной 0,07 мм. $U_S = 200$ В.

помещении перед L-детектором алюминиевой фольги толщиной 0,07 мм, поглощающей интенсивные электроны конверсии перехода 122 кэВ E2, проходящие через подложку источника и e_0 -электроны от фольги E. Поглощенная часть β -спектра, уменьшающая на 20 % интенсивность $\gamma\beta$ -компонента, вычислялась по хорошо известному β -спектру ^{152}Eu и специально разработанной для этого программы. По полученной интенсивности фотопиков γ_{344} , из одиночного спектра и спектров совпадений с вычетом случайного фона (определяемого по избыточному присутствию в спектрах совпадений γ_{1408}) определялись экспериментально регистрируемые выходы электронов “встряски” (Y) на акт β -распада. При произволь-

ной взаимной ориентации направления испускания электрона “встряски” e_{Sh} и β -частицы, что имеет место при проведении γe_0 -совпадений, это $Y^{\Omega=4\pi} = N(\gamma_{344}e_0)/N(\gamma_{344})$, а при испускании e_{Sh} и β -частицы в один и тот же телесный угол в направлении вперед, что имеет место при проведении $\gamma\beta e_0$ -совпадений, это $Y^{\Omega=0} = N(\gamma_{344}\beta e_0)/N(\gamma_{344}\beta)$, где $N(\)$ – интенсивности соответствующих фотопиков.

Вводится величина скоррелированности Υ направления испускания электрона “встряски” по направлению испускания β -частицы, определяемая как $\Upsilon = Y^{\Omega=0}/Y^{\Omega=4\pi}$.

Основные результаты приведены в таблице, которая содержит экспериментальные и исправленные на самопоглощение P в источнике [7] (для пробега $\sim (E/2000)^{1.4}$) Y -выходы электронов “встряски”, их скоррелированность Υ по направлению испускания с β -частицей и дифференциальные спектры от дифференцирования инте-

гральных выходов $Y_{\gamma e} \equiv Y^{\Omega=4\pi}$ и $Y_{\gamma\beta e} \equiv Y^{\Omega=0}$ из измерений в двойных и тройных совпадениях.

Обсуждение результатов и выводы

Как можно видеть из таблицы, Y выходы электронов “встряски” на акт β -распада при измерении в $\gamma\beta e_0$ -совпадениях примерно на порядок выше, чем в γe_0 -совпадениях. Это указывает на наличие сильной корреляции направления испускания электрона “встряски” и β -частицы, поскольку при отсутствии такой корреляции Y выходы электронов “встряски” на акт β -распада при измерении в γe_0 - и $\gamma\beta e_0$ -совпадениях были бы одинаковыми. Однако, в соответствии со скоррелированностью Υ , они сильно различаются и, как можно видеть Υ , приведенная в таблице для интегрального энергетического спектра электронов “встряски”, с возрастанием энергии электронов “встряски” возрастает.

U_S	$Y_{\gamma e}$	$Y_{\gamma\beta e}$	P	$Y_{\gamma e}^P$	$Y_{\gamma\beta e}^P$	Υ	$\left(\frac{DY_{\gamma e}}{DE}\right) \cdot 10^4$	$\left(\frac{DY_{\gamma\beta e}}{DE}\right) \cdot 10^3$
150	0,00173(10)	0,0222(14)	0,131	0,0132(8)	0,169(11)	12,8(11)	21(10)	40(14)
200	0,00186(10)	0,0215(14)	0,167	0,0111(6)	0,129(10)	11,6(11)	22(9)	37(12)
250	0,00179(10)	0,0186(14)	0,202	0,00886(5)	0,092(7)	10,4(10)	10(7)	11(10)
300	0,00185(10)	0,0190(14)	0,235	0,00787(40)	0,081(6)	9,8(9)	16(6)	0(8)
350	0,00166(10)	0,0215(17)	0,266	0,00624(40)	0,081(6)	12,9(13)	13(5)	19(7)
400	0,00147(10)	0,0185(13)	0,297	0,00495(32)	0,0623(44)	12,6(12)	8,7(20)	9(3)
500	0,00114(10)	0,0158(16)	0,355	0,00321(30)	0,0445(45)	13,9(19)	3,1(9)	2,8(13)
700	0,00091(11)	0,0155(13)	0,462	0,00197(23)	0,0335(28)	16,5(24)	1,0(5)	1,8(6)
1000	0,00084(10)	0,0137(13)	0,605	0,00139(16)	0,0226(21)	16,3(24)	0,5(2)	0,4(2)
1500	0,00073(10)	0,0148(10)	0,815	0,00090(12)	0,0182(12)	20,2(30)	0,0(4)	0,5(5)
1700	0,00071(9)	0,0146(13)	0,892	0,00103(13)	0,0164(15)	15,9(25)	0,3(3)	0,7(3)
2000	0,00084(9)	0,0124(12)	1,000	0,00084(9)	0,0124(12)	14,8(21)		

Дифференциальный энергетический спектр электронов “встряски” приведен в таблице в двух последних колонках для скорректированных на самопоглощение в источнике значений Y -выходов электронов “встряски” из измерений в γe_0 - и $\gamma\beta e_0$ -совпадениях.

Качественные зависимости характеристик “встряски” с энергией в работе получены из усредненных значениях величин и приведены на рис. 5.

По полученным в работе результатам спектр электронов “встряски” при β -распаде ^{152}Eu является низкоэнергетичным и для измеренной части спектра с $E > 150$ эВ 70 % электронов “встряски” находится до 500 эВ. В районе 300 эВ наблюдается нерегулярность в виде некоторого пика. Этот пик в спектре из $\gamma\beta e_0$ -совпадений из-за возрастания Υ с энергией несколько смещен в сторону больших энергий.

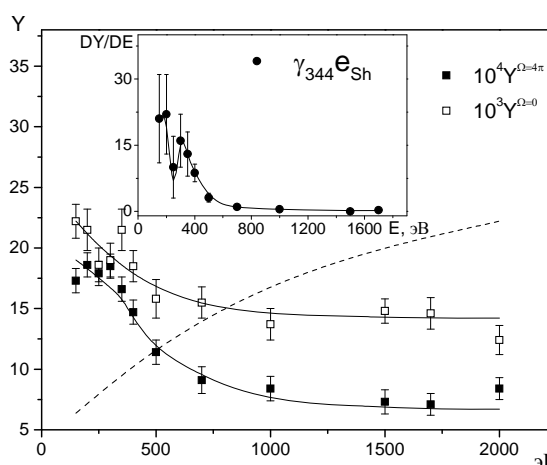


Рис. 5. Выходы электронов “встряски” на акт β -распада для произвольного направления испускания электронов “встряски” ($Y^{\Omega=4\pi}$) и скоррелированного с β -частицей ($Y^{\Omega=0}$). На вставке их дифференциальный спектр. Пунктиром показана качественная зависимость скоррелированности Υ от энергии.

Спектр электронов “встряски” качественно такой же, как и в предыдущей работе [4], но дополняет его более низкоэнергетичной частью и более подробной энергетической шкалой измерений.

Выход $Y^{\Omega=0}$ при совместном движении электрона “встряски” и β -частицы вперед для интегрального спектра в 10 - 20 раз выше, чем выход $Y^{\Omega=4\pi}$ при их произвольном направлении испускания. Усредненные значения Y с вычетом высокоэнергетичной части дают для скоррелированности Y значения от 6 до 22 при изменении энергии электронов “встряски” от 150 до 2000 эВ. Это соответствует качественной зависимости $Y \sim E^{1/2}$, т.е. скоррелированность направления вылета электрона “встряски” и β -частицы пропорциональна импульсу электрона “встряски”.

Такие результаты по корреляции направлений испускания электрона “встряски” и β -частицы и полученная зависимость для нее от энергии электрона “встряски” указывают на присутствие прямого взаимодействия β -частицы с “вытряхиваемым” электроном атомной оболочки и дают определенную характеристику взаимодействия, ответственного за наблюдаемое корреляционное движение электрона “встряски” и β -частицы.

Недостаточность одного механизма “встряски” для описания полученных данных следует также из того, что в приближении внезапности спектр электронов “встряски” при β -распаде описывается интегралом перекрытия волновых функций начального Z и конечного $Z + 1$ состояния, является быстро падающим с максимумом при нуле [1] и локальный максимум при 300 эВ не описывает. Более строгие расчеты [9], учитывающие компонент от внезапного изменения заряда и компонент от прямого взаимодействия β -частицы с электроном атомной оболочки, который по этим расчетам оказался значительным (до 55 %), также дают быстро падающий спектр электронов “встряски”, но они выполнены для значительно более высоких энергий электронов “встряски” (более 5 кэВ) и для сравнения с измеренным спектром, к сожалению, не подходят.

Результаты, полученные в данной работе, согласуются с предыдущими данными из исследований по β -распаду и конверсии [3 - 7] и качественно согласуются с работами по “встряске” при двойной фотоионизации [10 - 12], выполненными на лазерных пучках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеев В. И., Парилис Э. С. Встряска при электронных переходах в атомах // Успехи физических наук. - 1982. - Т. 138. - Вып. 4. - С. 573 - 602.
2. 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.
3. Митрохович Н. Ф. Корреляция β -частиц с электронами “встряски” при β -распаде ^{152}Eu // Материалы Междунар. конф. “Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy”. - К., 2006. - С. 412 - 416.
4. Митрохович Н. Ф. Энергетическое распределение электронов “встряски” при β -распаде ^{152}Eu // Ядерна фізика та енергетика. - 2008. - № 1 (23) - С. 24 - 28.
5. Митрохович Н. Ф. Электроны “встряски” при β -распаде $^{152,154}\text{Eu}$ // 36. наук. праць Ін-ту ядерних досл. - 2004. - № 2 (13). - С. 52 - 60.
6. Митрохович Н. Ф., Купряшкин В. Т. Корреляция электронов внутренней конверсии с электронами “встряски” при ε -распаде ^{152}Eu // Ядерна фізика та енергетика. - 2007. - № 1 (19) - С. 61 - 66.
7. Митрохович Н. Ф. Энергетическое распределение электронов “встряски” атомной оболочки при внутренней конверсии // Там же. - 2009. - Т. 10, № 3 - С. 263 - 268.
8. Купряшкин В. Т., Митрохович Н. Ф. Установка для измерения временных и энергетических спектров $\gamma\beta(e + e_0)$ -совпадений // Там же. - 2006. - № 1 (17) - С. 90 - 94.
9. 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.
10. Weber TH., Giessen H., Weckenbrock M. et al. Correlated electron emission in multiphoton double ionization // Nature. - 2000. - Vol. 405. - P. 658 - 661.
11. Weckenbrock M., Hattas M., Gzasch A. et al. Experimental evidence for electron repulsion in multiphoton double ionization // J. Phys. B. : At. Mol. Opt. Phys. - 2001. - Vol. 34. - P. 449 - 455.
12. Moshhammer R., Ulrich J., Fisher D. Strongly directed electron emission in non-sequential double ionization of Ne by intense laser pulses // J. Phys. B. : At. Mol. Opt. Phys. - 2003. - Vol. 36. - P. 113 - 119.

ЕНЕРГЕТИЧНІ ТА КОРЕЛЯЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОНІВ “СТРУСУ” ПРИ β -РОЗПАДІ

М. Ф. Митрохович

Проведено вимірювання енергетичного спектра електронів “струсу” при β -розпаді ^{152}Eu та їхні скорельованості за напрямком вильоту з імпульсом β -частинки. Вимірювання виконано в діапазоні 150 - 2000 еВ на установці збігів γ -квантів та β -частинок з низкоенергетичними електронами, включаючи e_0 -електрони вторинної

електронної емісії ($\gamma\beta e_0$ -збіги). Реєстрація електронів "струсу" здійснювалася по створюваних ними e_0 -електронах. За отриманими даними 70 % електронів "струсу" у вимірній частині спектра знаходиться до 500 eV, а самі електрони "струсу" сильно скорельовані за напрямком вильоту з β -частинкою, причому їхня скорельованість з енергією електрона "струсу" зростає, якісно підлягаючи залежності $\sim E^{1/2}$

Ключові слова: електрони "струсу", β -розпад, ^{152}Eu .

ENERGY AND CORRELATION PROPERTIES OF "SHAKE-OFF" ELECTRONS AT β -DECAY

M. F. Mitrokhovich

Measurements of energy spectrum of "shake-off" electrons at the decay of ^{152}Eu and their correlatings according to outgoing direction with a momentum of β -particle are conducted. The measurements are performed in the range of 150 - 2000 eV on the installation of coincidences of γ -quanta and β -particles with low energy of electrons, including e_0 -electrons of the secondary electron emission ($\gamma\beta e_0$ -coincidences). Registration of "shake-off" electrons was implemented on e_0 -electrons, created by them. Under the obtained data 70 % of "shake-off" electrons in the measured part of the spectrum is arranged up to 500 eV, and "shake-off" electrons their selves are heavy correlated according to outgoing direction with a β -particle, herein their correlating with the energy of "shake-off" electron is increasing, qualitatively subjected to $\sim E^{1/2}$ relation.

Keywords: electrons of "shake-off", β -decay, ^{152}Eu .

Поступила в редакцію 10.02.10,
после доработки - 16.04.10.