

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ “ВСТРЯСКИ” ПРИ β -РАСПАДЕ ^{152}Eu

Н. Ф. Митрохович

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

Впервые исследован в диапазоне 200 - 1700 эВ энергетический спектр электронов “встряски” при β -распаде ^{152}Eu на специальной вакуумной 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” осуществлена по создаваемым ими e_0 -электронам вторичной электронной эмиссии. Был измерен интегральный спектр и на этой основе вычислен дифференциальный спектр. Установлено, что непрерывный спектр электронов “встряски” низкоэнергетичный и практически заканчивается при 400 эВ. В районе 300 эВ наблюдается максимум энергетического распределения.

Введение

Как известно, при β -распаде, вследствие резкого изменения заряда ядра, происходит “встряски” атомной оболочки [1], которая сопровождается испусканием одного или нескольких электронов, в основном из внешних оболочек. Хотя их спектр и низкоэнергетичен (практически не превосходит несколько сот электрон-вольт), сам эффект “встряски” значителен - сопоставим с вероятностью основного процесса. Это требует его детального изучения для полноты описания самого атомно-ядерного процесса. Во многих случаях его нужно учитывать (например, при измерениях коэффициентов внутренней конверсии, особенно для внешних оболочек, при точных измерениях формы β -спектров и др.) или можно использовать (например, при планировании опытов с ядрами отдачи после β -распада). Эффекты “встряски” обусловлены наличием электронных корреляций, всестороннее изучение которых представляет постоянный интерес для современной атомной и ядерной физики как в теоретических исследованиях, так и в экспериментальных при изучении корреляционного движения частиц в импульсном, спиновом и зарядовом пространстве. В данной работе продолжены начатые работы по “встряске” при β -распаде $^{152,154}\text{Eu}$ [2 - 4] исследованиями энергетического распределения электронов “встряски” при β -распаде ^{152}Eu .

Методика эксперимента и измерения

Измерения низкоэнергетичного спектра электронов “встряски” на фоне интенсивного и жесткого β -спектра требует адекватного метода измерений, в котором регистрация β -спектра влияет мало. В данной работе такая регистрация электронов “встряски” осуществлена по образуемым ими e_0 -электронам вторичной электронной эмиссии, при которой электроны “встряски” регист-

рируются с высокой эффективностью, а β -частицы e_0 -электронов практически не образуют. Работа выполнена на установке (рис. 1) для измерения временных спектров в $\gamma\beta(e + e_0)$ -совпадениях γ -квантов с β -частицами и e_0 -электронами вторичной электронной эмиссии. Поскольку e -компонент во временных спектрах, как эмиссионный, сдвинут по временной шкале от β -компонента, можно отдельно от β -компонента определить его интенсивность. Проводя измерения зависимости его интенсивности от напряжения на источнике, являющимся пороговым для регистрации электронов “встряски”, можно получить по e_0 -электронам экспериментальный интегральный спектр электронов “встряски” при β -распаде ^{152}Eu , из которого вычисляется затем дифференциальный спектр.

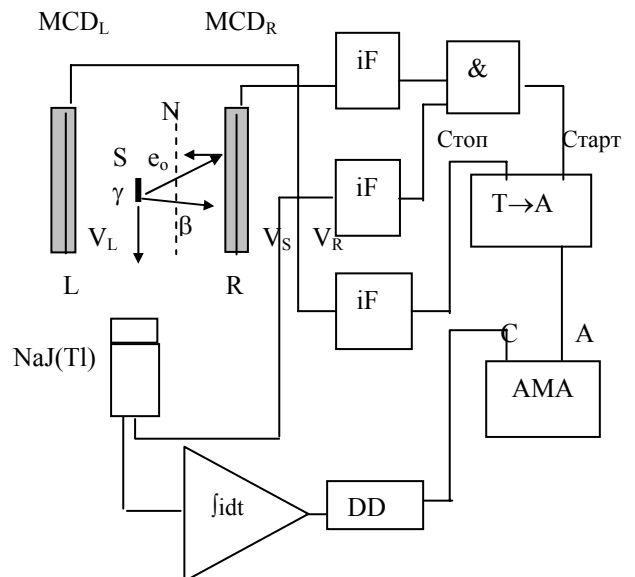


Рис. 1. Геометрия эксперимента и блок-схема электроники для измерения временных спектров $\gamma(\beta + e_{sh} + e_0)$ - и $\gamma\beta(e_{sh} + e_0)$ -совпадений при проведении пороговой регистрации электронов “встряски” при $U_S = U_N > U_L$, $U_R = 0$, $U_L = +190$ В.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: MCD_L и MCD_R – беспороговые детекторы электронов на основе шевронов микроканальных пластин; S – радиоактивный источник, ориентированный подложкой к детектору L ; N – сетка; $NaJ(Tl)$ – сцинтилляционный детектор γ -квантов; iF – блоки, осуществляющие преобразование импульсов тока детекторов в сигналы NIM для $T \rightarrow A$ – конвертера “время - амплитуда” и уровни напряжения для блока логики $\&$, осуществляющего функцию “И” логического умножения (совпадения); $\int dt$ – входной интегрирующий каскад; DD – дифференциальный дискриминатор для выбора энергетического окна и управления по входу C амплитудным многоканальным анализатором импульсов АМА, на аналоговый вход A которого подаются импульсы от конвертера “время - амплитуда”.

Установка подробно описана в работе [5]. Здесь отметим только, что для управления регистрацией и отбором e_o -электронов источник и детекторы находятся под регулируемыми потенциалами $U_S = U_N, U_L, U_R$. При $U_S = U_N > U_L, U_R = 0, U_L = +190$ В происходит регистрация левым детектором MCD_L e_o -электронов, образовавшихся на правом детекторе от электронов с $E > eU_S$ эВ и можно проводить пороговые измерения для получения интегрального спектра электронов (“встряски”) примерно с 200 эВ. Для отбора β -канала распада ^{152}Eu DD -дискриминатором в γ -спектре выделялось окно ΔE (рис. 2).

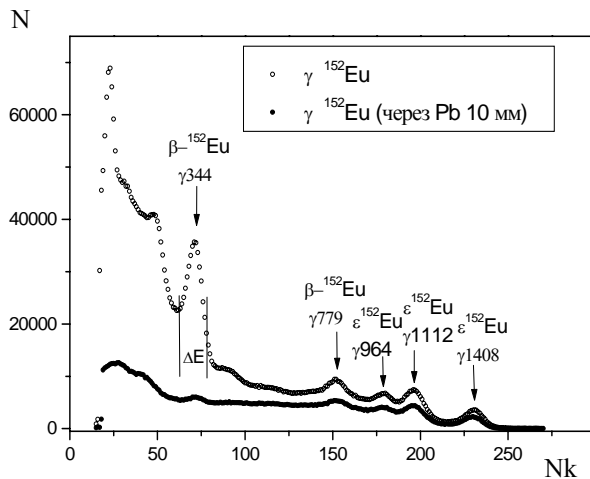


Рис. 2. Выделение энергетического интервала ΔE для измерения совпадений γ -квантов с e_o -электронами от электронов “встряски” при β -распаде ^{152}Eu и учет комптоновской подставки в ложную регистрацию совпадений.

В проведенных измерениях это окно в 50 кэВ было настроено на регистрацию изолированного фотопика 344 кэВ, через который происходит весь β -распад ^{152}Eu , энергетический спектр “встряски” которого в данной работе изучался по

e_o -электронам при измерении временных $\gamma_{344}(\beta + e_{oSh})$ - и $\gamma_{344}\beta e_{oSh}$ -совпадений. В выделенном окне ΔE (см. рис. 2), кроме самого фотопика 344 кэВ, регистрируются комптоновские участки от высокоэнергетичных γ -квантов, в основном из ε -ветви распада ^{152}Eu , с которыми связано интенсивное образование электронов Оже, и от высокоэнергетичных γ -квантов из β -ветви распада ^{152}Eu . Электроны “встряски”, энергетический спектр которых низкоэнергетичен, эффективно регистрируются по e_o -электронам вторичной электронной эмиссии в отличие от β -частиц, которые e_o -электроны практически не создают и, таким образом, в измерениях фон в e_o -компонент не привносят. А электроны Оже, в особенности M - и N -серий, образующиеся при внутренней конверсии и ε -распаде ^{152}Eu , фон ложных совпадений создают и его нужно учитывать. По этой причине, кроме основных измерений $\gamma_{344}(\beta + e_{oSh})$ - и $\gamma_{344}\beta e_{oSh}$ -совпадений, проводились фоновые измерения с использованием перед γ -детектором 10 мм свинца для учета $\gamma_{1408}(e_{IC122} + e_{oAuger})$ - и $\gamma_{1408}e_{IC122}e_{oAuger}$ -совпадений. Таким образом, из временных спектров после вычитания ложной фоновой части совпадений определялась интенсивность чистого e_o -компонента от электронов “встряски” и по ее зависимости от напряжения на источнике измерялся интегральный энергетический спектр электронов “встряски” при β -распаде ^{152}Eu .

На рис. 3 и 4 приведены временные спектры, измеренные при напряжении на источнике 200 В, и показаны компоненты медленных и задержанных e_o -электронов от электронов “встряски” и электронов Оже и “быстрые” компоненты от β -частиц и электронов конверсии перехода 122 кэВ мультипольности $E2$.

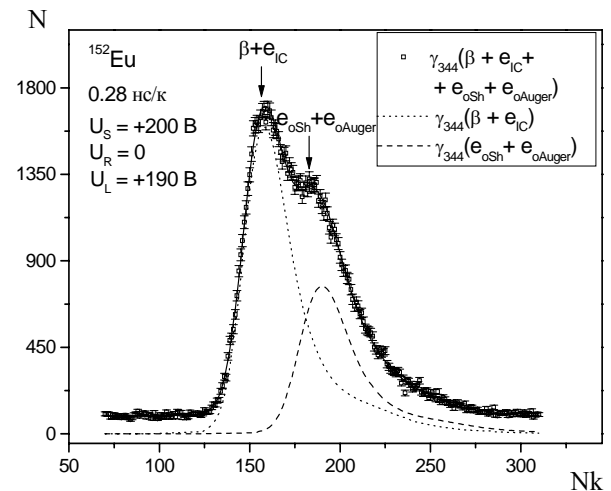


Рис. 3. Компоненты временного спектра $\gamma_{344}(\beta + e_{IC} + e_{oAuger} + e_{oSh})$ -совпадений при отборе участка ΔE γ -спектра ^{152}Eu γ -детектором $NaJ(Tl)$.

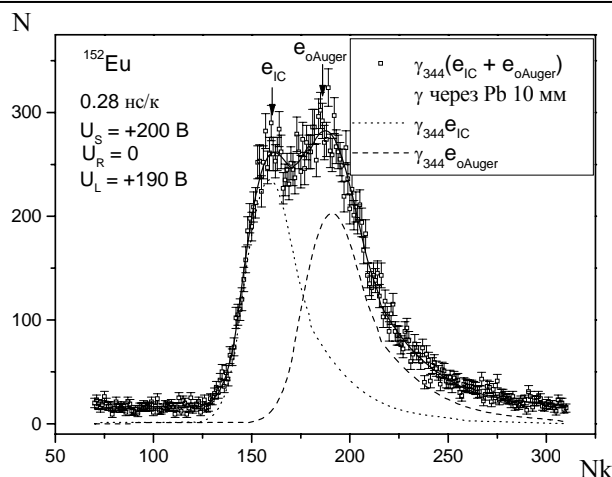


Рис. 4. Компоненты фонового временного спектра $\gamma_{344}(e_{IC122} + e_{oAuger})$ -совпадений из-за регистрации комптоновской подставки под интервалом ΔE .

В работе проводились различные измерения (двойные и тройные совпадения) и применялись разные способы определения интенсивности e_o -компонента от электронов “встряски” ($N_{\gamma(\beta+e_o)}$ - $N_{\gamma\beta}$ и $N_{\gamma e_o}/N_{\gamma\beta}$) в зависимости от экспериментальной ситуации. В итоге по ее зависимости от напряжения на источнике был измерен экспериментальный интегральный спектр электронов “встряски” в диапазоне 200 - 1700 эВ. Вследствие сильного поглощения низкоэнергетичных электронов в самом источнике необходимо для получения истинного спектра “встряски” ввести поправку на самопоглощение P , которая была сде-

лана следующим образом. Используя зависимость пробега d низкоэнергетичных электронов в среде $d \sim E^{1.4}$ [6], который по оценке меньше толщины $d_s \sim 30$ мкг/см² использованного источника ¹⁵²Eu, можно за меру самопоглощения взять отношение d/d_s и, учитывая, что спектр не моноэнергетический, то для спектра $\sim 1/E^2$ можно получить приближенную взвешенную поправку на самопоглощение в источнике для интегрального спектра электронов “встряски”, который имеет зависимость, близкую к $1/E^2$:

$$P = \frac{\int \left(\frac{E}{1700} \right)^{1.4} \frac{dE}{E^2}}{\int \frac{dE}{E^2}}$$

Полученные в данной работе из различных измерений интегральные спектры электронов “встряски” при β -распаде ¹⁵²Eu вместе с исправленными их интенсивностями и сама поправка на самопоглощение P приведены в таблице. В таблице также приведен интегральный спектр электронов Оже, измеренный при настройке ΔE на фотопик γ -перехода 1408 кэВ, относящегося к ϵ -ветви распада ¹⁵²Eu с интенсивным Оже-спектром. В таблице под номером 4 приведен спектр фона (измерения через Pb).

Экспериментальные и скорректированные (с индексом °) на самопоглощение в источнике интегральные спектры электронов “встряски” при β -распаде ¹⁵²Eu в измерениях: 1 - $N_{\gamma_{344}(\beta + e_o)} - N_{\gamma_{344}\beta}$; 2, 4 - $N_{\gamma_{344}e_o}/\gamma_{344}\beta$ и $N_{\gamma_{344}\beta e_o}/\gamma_{344}\beta e_{sh}$; 3 - спектр электронов Оже в измерениях $N_{\gamma_{1408}e_o}/\gamma_{1408}e_{Auger}$

U_s	1	2	3	4	P	1°	2°	3°	4°
200	679(7)	400(42)	1670(37)	393(6)	0,21	3233(33)	1905(200)	7950(164)	1871(29)
250	824(24)	452(23)	1526(38)	394(6)	0,253	3257(36)	1787(91)	6032(150)	1557(24)
300	706(20)	410(23)	1330(36)	402(8)	0,295	2393(68)	1390(78)	4508(124)	1363(27)
350	496(20)	281(42)	1076(35)	293(6)	0,334	1485(60)	841(126)	3223(105)	877(18)
400	389(20)	270(23)	894(34)	232(4)	0,372	1046(54)	726(62)	2404(91)	624(11)
500	322(19)		819(33)	159(5)	0,445	724(43)		1841(73)	357(11)
600	303(27)		685(33)	62,4(40)	0,514	589(53)		1333(64)	121(8)
700	267(21)		542(31)	30,8(36)	0,58	460(36)		935(53)	53(6)
800	185(20)		472(31)	31,6(32)	0,642	288(31)		735(48)	49(5)
1000	172(21)		387(30)	23,6(36)	0,76	226(28)		510(64)	31(5)
1200	114(21)		322(30)	22,4(44)	0,87	131(24)		371(34)	26(5)
1400	61(22)		226(29)	28,0(48)	0,97	63(23)		233(30)	29(5)
1700	21(23)		113(29)	20,0(56)	1,0	21(23)		113(29)	20(6)

Из скорректированных на самопоглощение в источнике интегральных энергетических спектров были получены после дифференцирования искомые энергетические распределения (рис. 5) электронов “встряски” при β -распаде ¹⁵²Eu в различных измерениях.

Обсуждение результатов и выводы

Получены энергетические спектры электронов “встряски” при β -распаде ¹⁵²Eu и проведено сравнено их со спектром электронов Оже и со спектром в фоновых измерениях при отборе γ -квантов в ΔE окне через свинцовый фильтр. За

счет регистрации комптоновского участка от высокоэнергетических γ -квантов этот спектр (вставка на рис. 5) содержит компонент от Оже-спектра, dN/dE

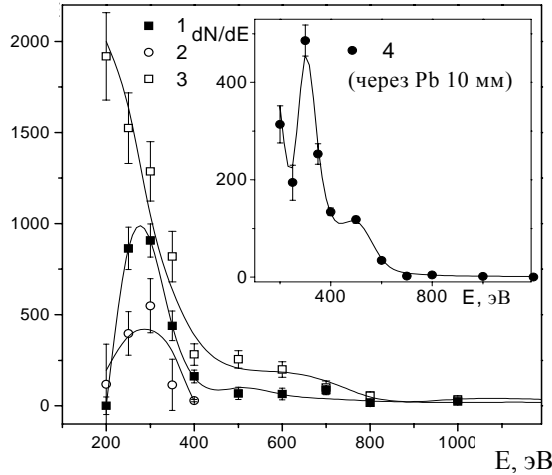


Рис. 5. Энергетические распределения электронов “встряски” 1, 2, полученные дифференцированием различных интегральных спектров (см. таблицу), спектр электронов Оже 3 и спектр из фоновых измерений через свинцовый фильтр 4.

Из приведенных результатов видно (см. рис. 5), что спектр электронов “встряски” при β -распаде ^{152}Eu низкоэнергетичный и практически заканчивается уже при 400 эВ. Такой характер быстро падающего энергетического спектра электронов “встряски” качественно подтверждается только имеющимися теоретическими оценками спектра “встряски”, выполненными в работе [7], поскольку экспериментальные данные от-

компонент “встряски” от низкоэнергетичной ветви β -распада ^{152}Eu и компонент “встряски” от конверсионного перехода IC122 кэВ E2 (рис. 6).

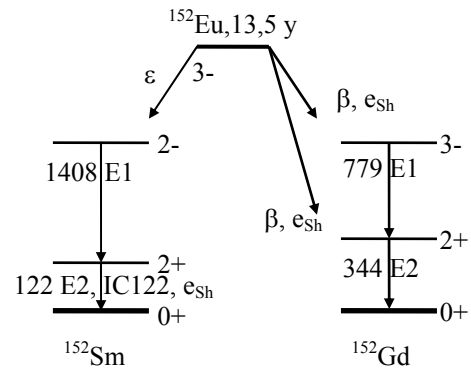


Рис. 6. Фрагмент схемы распада ^{152}Eu и излучения, регистрируемые детекторами в данной работе: β -частицы, γ -кванты, электроны конверсии перехода 122 кэВ, электроны “встряски” e_{Sh} при β -распаде, электроны “встряски” e_{Sh} при конверсии IC122 (фон-вые).

сутствуют. Однако и эти оценки относятся к автоионизации на К-оболочке и описывают спектр электронов “встряски” выше 5 кэВ. В районе 300 эВ, по полученным в данной работе данным, наблюдается максимум энергетического распределения (см. рис. 5 и вставку). Незначительный высокоэнергетичный хвост выше 400 эВ, по видимому, обусловлен δ -электронами (это вторичные электроны с $E > 100$ эВ).

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. Митрохович Н. Ф. Электроны “встряски” при β -распаде $^{152,154}\text{Eu}$ // Зб. наук. праць Ін-ту ядерних досл. - 2004. - № 2(13). - С. 52 - 60.
3. Митрохович Н. Ф. Корреляция β -частиц с электронами “встряски” при β -распаде ^{152}Eu // Матеріали Міжнар. конф. “Current Problems in Nuclear Physics and Atomic energy”. - К., 2006. - С. 412 - 416.
4. 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.
5. 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.
6. Вятский А. И., Махов А. Ф. Торможение электронов в металлах и полупроводниках // ЖТФ. - 1958. - Т. 28, № 4. - С. 690 - 697.
7. Баткин В. Т., 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.

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗПОДІЛ ЕЛЕКТРОНІВ “СТРУСУ” ПРИ β -РОЗПАДІ ^{152}Eu

М. Ф. Митрохович

На спеціальній вакуумній установці збігів γ -квантів і β -частинок із низкоенергетичними електронами, включаючи e_0 -електрони вторинної електронної емісії ($\gamma\beta e_0$ -збіги), уперше було досліджено в діапазоні 200 - 1700 еВ енергетичний спектр електронів “струсу” при β -розпаді ^{152}Eu . Реєстрацію електронів “струсу” здійсню-

но по створюваних від них e_0 -електронах вторинної електронної емісії. При проведенні порогових вимірювань було отримано інтегральний спектр і на цій основі було обчислено диференціальний спектр. Установлено, що безперервний спектр електронів "струсу" низькоенергетичний і практично закінчується при 400 еВ. Близько 300 еВ спостерігається максимум енергетичного розподілу.

ENERGY DISTRIBUTION OF THE "SHAKE OFF" ELECTRONS AT THE ^{152}Eu DECAY

N. F. Mitrokhovich

On the special vacuum installation of coincidences of γ -quanta and β -particles with low energy electrons, including e_0 -electrons of the secondary electron emission ($\gamma\beta e_0$ -coincidences) for the first time the energy spectrum of "shake off" electrons at ^{152}Eu decay is investigated in the range of 200 - 1700 eV. Registration of electrons of "shake off" is carried out on e_0 -electrons of the secondary electron emission, created by them. By realization of threshold measurements the integral spectrum was obtained and on this basis the differential spectrum is computed. It is established, that the continuum of "shake off" electrons is low energy and practically finishes at 400 eV. In the region of 300 eV the maximum energetic distribution is observed.

Поступила в редакцію 31.01.08,
после доработки – 08.04.08.