

Н. Ф. Митрохович

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев***СПЕКТРЫ ЭНЕРГИЙ ЭЛЕКТРОНОВ АВТОИОНИЗАЦИИ И ИХ КОРРЕЛИРОВАННОСТЬ ПО НАПРАВЛЕНИЮ ВЫЛЕТА β -ЧАСТИЦЫ**

Изучалась автоионизация атомной оболочки при β -распаде ^{152}Eu . Была исследована зависимость энергии электронов автоионизации и их коррелированности по направлению вылета β -частицы от граничной энергии вылетающей β -частицы. Измерения выполнены на установке совпадений γ -квантов и β -частиц с низкоэнергетичными электронами при регистрации электронов автоионизации по создаваемым ими e_0 -электронам вторичной электронной эмиссии ($\gamma\beta e_0$ -совпадения). По полученным данным протяженность энергетического спектра электронов автоионизации пропорциональна граничной энергии β -спектра. Коррелированность направления испускания электрона автоионизации по направлению вылета β -частицы не зависит от энергии β -частицы.

Ключевые слова: электроны автоионизации, β -распад, ^{152}Eu .

Введение

Известно, и довольно давно, что вследствие резкого изменения заряда ядра при β -распаде на 1 атомная оболочка испытывает сильную встряску, которая сопровождается ее возбуждением или ионизацией [1]. Эффект на внешних оболочках наиболее значителен [2], но именно на них изучен недостаточно. Поскольку эффекты автоионизации при β -распаде по вероятности сопоставимы с вероятностью основного процесса, их необходимо изучать для полноты картины атомно-ядерного процесса, происходящего с большой вероятностью. Необходимо учитывать эти эффекты при изучении других атомно-ядерных процессов, например при измерении спектров электронов внутренней конверсии, при определении КВК, при прецизионных измерениях формы β -спектров и во многих других случаях. Когда энергия β -спектра (максимальная или средняя, далее имеется в виду граничная энергия β -спектра и для простоты изложения не уточняется) намного превосходит энергию связи атомной оболочки, тогда для описания встряски с этой оболочки обычно используется приближение внезапного возмущения. В этом приближении (приближение “shake-off”) спектр электронов “встряски” описывается интегралом перекрытия волновых функций начального Z и конечного $Z + 1$ состояния, вследствие чего он является в основном низкоэнергетичным, быстропадающим с увеличением энергии. Вероятность автоионизации от энергии β -частицы не зависит [1]. Сами электроны автоионизации сильно коррелированы по направлению вылета с β -частицами, испускаясь вместе с ними в ту же полусферу [3, 4, 7]. Данная работа является непосредственным продолжением предыдущей работы [4] по встряске при β -распаде, а также работ [5 - 8]

по аналогичной встряске, включая внутреннюю конверсию. В ней, в дополнение к выполненным в этих работах исследованиям энергетических и корреляционных свойств электронов встряски (здесь и далее имеется в виду электроны автоионизации), предпринято изучение их свойств в отношении зависимости их энергетического спектра и коррелированности направления испускания по направлению испускания основной частицы (в данной работе β -частицы) от энергии β -частицы.

Методика измерений и результаты

Изучение зависимости энергетического спектра электронов автоионизации от энергии β -частиц и той же зависимости их коррелированности по направлению вылета β -частицы осуществлено по электронам встряски, образуемым от хорошо изученных ветвей распада, связанных с β -спектром распада ^{152}Eu (рис. 1).

Для изучения спектра электронов встряски $N(E_{\text{Sh}}, E_{\beta\text{max}})$ от отдельных β -ветвей с граничными энергиями $E_{\beta\text{max}}$ требовалось измерение их совпадений с γ -квантами и β -частицами только для фиксированной области энергий электронов встряски, поскольку одновременное измерение их спектра во всем диапазоне энергий электронов встряски от электрон-вольт до мегаэлектрон-вольт не представлялось возможным. В качестве такой ΔE_{Sh} области была взята низкоэнергетичная часть спектра электронов встряски как наиболее интенсивная.

Работа выполнена на установке [9] для измерения 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).

Методика изучения автоионизации при β -распаде ^{152}Eu представлена на рис. 2.

© Н. Ф. Митрохович, 2012

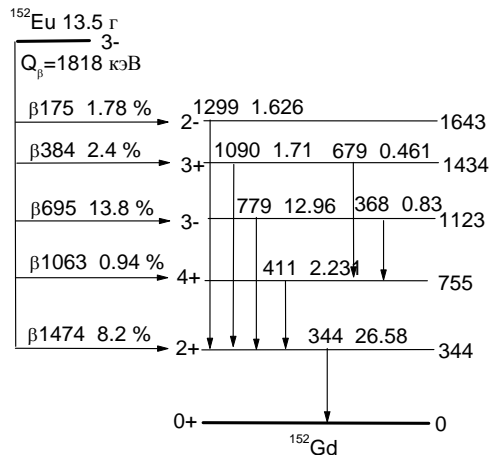


Рис. 1. Фрагмент схемы распада ^{152}Eu . Приведены основные β -компоненты распада, заселяющие состояния дочернего ядра ^{152}Gd и основные γ -переходы, разряжающие эти состояния. Интенсивности γ -переходов приведены рядом со значением энергии γ -переходов. Все энергии приведены в килоэлектрон-вольтах.

В данной методике измерений осуществлена регистрация низкоэнергетичной части спектра электронов автоионизации по e_o -электронам вторичной электронной эмиссии. Этим определен некоторый эффективный интервал измерений ΔE_{Sh} , обусловленный эффективностью выхода e_o -электронов из поверхности эмиттера E_m . Электроны встряски e_{Sh} , испускающиеся из источника S , образуют на поверхности эмиттера E_m e_o -электроны. Конструкция источника (активность находится на тонкой (0,5 мм) алюминиевой полоске) и всех электродов формирует при подаче на них электрических потенциалов достаточно однородное электрическое поле, которое при $U_{E_m} = 0$, $U_S (= 250 \text{ В}) > U_L$, $U_R = 0$ вытягивает почти все e_o -электроны от эмиттера E_m к детектору L и, таким образом, e_o -электроны регистрируются только детектором L и только от E_m . Эмиттер E_m , из алюминия толщиной 0,07 мм, поглощает интенсивные электроны конверсии перехода 122 кэВ E_2 из ε -ветви распада ядра ^{152}Eu , но пропускает более высокоэнергетичные β -частицы из β -ветви ^{152}Eu , которые регистрируются детектором R . Таким образом, в совпадениях γ_β с e_o -электронами регистрируются электроны встряски e_{Sh} , энергия которых $E_{e_{\text{Sh}}} > 250 \text{ эВ}$ и которые в $\gamma_\beta e_o$ -совпадениях движутся в том же самом телесном угле, что и β -частица. Верхнее значение $E_{e_{\text{Sh}}}$ определяется эффективностью образования в эмиттере E_m e_o -электронов вторичной электронной эмиссии, и интервал регистрации ΔE_{Sh} оценивается примерно в 1 кэВ.

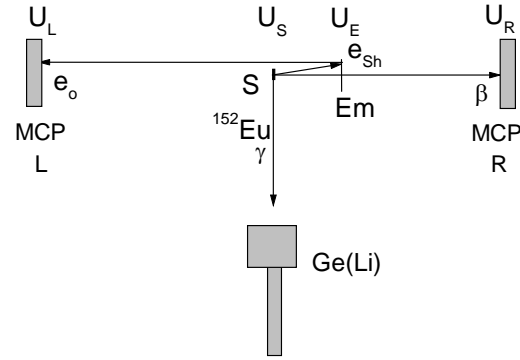


Рис. 2. MCP – детекторы (L и R) на основе микроканальных пластин для регистрации e_o -электронов вторичной электронной эмиссии (от электронов встряски e_{Sh}) и β -частиц из источника S . $\text{Ge}(\text{Li})$ – полупроводниковый детектор для регистрации γ -квантов. E_m – алюминиевая фольга толщиной 0,07 мм, эмиттер e_o -электронов. $U_{E_m} = 0$, $U_S > U_L$, $U_R = 0$ (см. подробнее в тексте).

В такой методике проводились измерения γ -спектров в $\gamma(\beta + e_o)$, $-\gamma e_o$ - и $\gamma\beta e_o$ -совпадениях, из которых определялись e_o -компоненты $\gamma_\beta^i e_o$ - и $\gamma_\beta^i \beta e_o$ -совпадений, где β_i – β -компоненты, а γ_β^i – γ -переходы, ей соответствующие. На рис. 3 приведены некоторые γ -спектры в $\gamma(\beta + e_o)$ - и $\gamma\beta e_o$ -совпадениях, измеренные при смещении на источнике 250 В. В измерениях определялась интенсивность фотопиков γ -переходов, относящаяся к e_o -компоненту. В $\gamma(\beta + e_o)$ -совпадениях для получения этой интенсивности вычитался $\gamma\beta$ -компонент, который был измерен при $U_S = U_{E_m} = 250 \text{ В}$. По полученной интенсивности фотопиков из одиночного спектра и спектров совпадений определялись экспериментально регистрируемые относительные выходы электронов автоионизации (обозначаемые Y) на один акт β -распада. При произвольной взаимной ориентации направления испускания электрона автоионизации e_{Sh} и β -частицы ($\Omega = 4\pi$), что имеет место при проведении γe_o -совпадений, $Y^{\Omega=4\pi}$ определяется выражением

$$Y^{\Omega=4\pi}_i = N(\gamma_\beta^i e_o) / N(\gamma_\beta^i). \quad (1)$$

При испускании e_{Sh} и β_i -частицы в один и тот же телесный угол Ω в направлении вперед ($\Omega = 0$), что реализуется методикой при проведении $\gamma\beta e_o$ -совпадений, $Y^{\Omega=0}$ определяется выражением

$$Y^{\Omega=0}_i = N(\gamma_\beta^i \beta_i e_o) / N(\gamma_\beta^i \beta_i), \quad (2)$$

где $N(\dots)$ – интенсивности фотопиков в соответст-

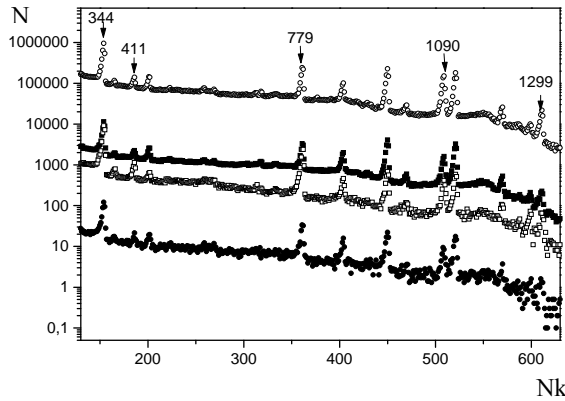


Рис. 3. γ -спектр ^{152}Eu (верхний) и спектры $\gamma(\beta + e_0)$ -, $\gamma\beta$ - и $\gamma\beta e_0$ -совпадений γ -квантов с β -частицами и e_0 -электронами вторичной электронной эмиссии от электронов встряски (автоионизации) при β -распаде. $\gamma\beta$ -спектр измерялся с R-детектором при $U_S = U_{Em} = 250$ В. Все спектры приведены к одному часу измерений.

вующих γ -спектрах тройных совпадений, двойных совпадений или в одиночном спектре. Еще раз

отметим, что выражения Υ -выходов дают зарегистрированный выход электронов встряски (автоионизации) на один акт $\gamma\beta$ или $\gamma\beta^i\beta_i$ произошедшего β -распада, но относятся к разной экспериментальной ситуации: к их произвольному направлению испускания по направлению β_i -частицы или одновременному испусканию в один и тот же телесный угол в направлении вперед.

Как и в предыдущих работах [4, 7], вводится “коррелированность” Υ направления испускания электрона автоионизации по направлению испускания β -частицы, определяемая при малых телесных углах Ω как $\Upsilon = Y^{\Omega=0}/Y^{\Omega=4\pi}$, см. формулы (1) и(2).

Основные результаты приведены в таблице, которая содержит площади $S_{(\dots)}$ фотопиков, время измерений (минуты, часы), вычисленные $Y_{(\dots)}$ -выходы электронов встряски на один акт β -распада и коррелированность Υ электронов встряски по направлению испускания с β -частицей, полученная из измерений в двойных и тройных совпадениях.

E_γ , кэВ (E_β)	S_γ (10 мин)	$S_{\gamma(\beta+e_0)}$ (4 ч)	$S_{\beta\gamma}^{\varepsilon+\beta}$ (4 ч)	$S_{\beta\gamma}$ (4 ч)	$Y_{\gamma e_0}$	$S_{\beta\gamma e_0}$ (40 ч)	$Y_{\beta\gamma e_0}$	Υ
344 ($\beta 1474$)	28821(11)	8766(66)	7864(59)	8014(57)	0,00252(19)	998(22)	0,0125(28)	5(1)
411 ($\beta 1063$)	2133(50)	741(33)	625(25)	619(22)	0,0036(7)	65(8)	0,0105(12)	4,5(5)
779 ($\beta 695$)	7838(60)	2569(38)	2382(32)	2410(30)	0,00235(37)	288(11)	0,0120(5)	5,1(2)
1085(ε) 1090 ($\beta 384$)	5683(51) 836	1395(29)	497(19)	398(15)	0,00658(32)	77(7)	0,0194(21)	
1299 ($\beta 175$)	738(19)	195(12)	115(9)	67(6)	0,052(10)	15(3)	0,057(50)	4,3(9)
1408(ε)	8786(10)	3873(35)	1703(23)	719(15)		216(8)		

Для определения выхода электронов встряски Y_{β_i} на один акт β_i -распада необходимо из полученных значений Y_{γ_i} вычесть вклад от вышерасположенных β_j -компонент за счет заселения i -го состояния вышерасположенными γ_j -переходами, связанными с этими компонентами (см. рис. 1) с учетом всех интенсивностей $I_{(\dots)}$ γ -переходов:

$$Y_{\beta_i} = Y_{\gamma_i} - (\sum_j Y_{\beta_j} I_j) / I_{\gamma_i}$$

Полученные таким образом значения выхода электронов автоионизации на один акт β -распада от различных компонент β -спектра ^{152}Eu приведены на рис. 4.

Обсуждение результатов и выводы

Выходы электронов автоионизации от встряски атомной оболочки на акт β -распада,

представленные в таблице и на рис. 4, определены при эффективной регистрации не всего спектра электронов встряски по e_0 -электронам а только некоторой его узкой части (в проведенных измерениях – низкоэнергетичной). Эти выходы зависят от характеристики самого β -спектра, а именно от его граничной энергии $E_{\beta\max}$. С уменьшением граничной энергии β -спектра интенсивность низкоэнергетичной области спектра электронов автоионизации возрастает и в первом приближении эта зависимость линейная. Это указывает на пропорциональное сжатие спектра электронов встряски (автоионизации) при уменьшении энергии $E_{\beta\max}$, или пропорциональное растяжение спектра электронов автоионизации при увеличении энергии $E_{\beta\max}$, соответственно.

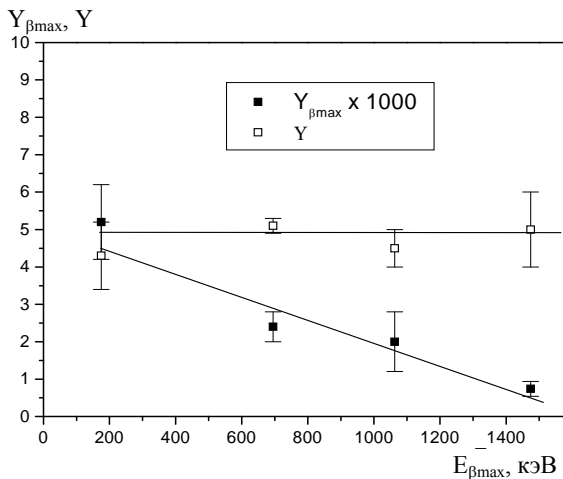


Рис. 4. Зависимость низкоэнергетической части ΔE_{Sh} (~ 1 кэВ) спектра электронов автоионизации, измеренная по e_0 -электронам вторичной электронной эмиссии (сплошные квадраты), и зависимость коррелированности Y направления вылета электрона автоионизации с направлением вылета β -частицы от граничной энергии $E_{\beta_{\max}}$ компонент β -спектра ^{152}Eu (открытые квадраты).

Выходы электронов встряски Y на акт β -распада при измерении в γe_0 -совпадениях примерно в 5 раз выше, чем в γe_0 -совпадениях. При увеличении на 40 % телесного угла, в котором происходит испускание и регистрация электронов встряски, интенсивность γe_0 -совпадений увеличивается только на 4 %. Это указывает на наличие сильной корреляции ($Y \sim 10$) направления испускания электрона автоионизации и β -частицы, поскольку при отсутствии такой корреляции Y -выходы электронов встряски на акт β -распада в γe_0 - и γe_0 -совпадениях были бы одинаковыми. Это соответствует результатам, полученным ранее [10, 11]. Величина коррелированности Y направления испускания электрона встряски и β -частицы, по полученным данным, от энергии β -частицы в первом приближении не зависит. Это свидетельствует в пользу выводов [10, 11] о

том, что коррелированность направления вылета электрона встряски и β -частицы, пропорциональная импульсу электрона встряски, вызвана электрон-электронным взаимодействием, в частности взаимодействием токов, обусловленным движением заряженных частиц – электрона автоионизации и β -частицы. Действительно, токи, создаваемые движением β -частиц, практически одинаковые, поскольку их скорости, в отличие от относительно малых скоростей электронов встряски (автоионизации), близки к скорости света. При этом зависимости коррелированности Y при фиксированном значении энергии-импульса электрона автоионизации от энергии-импульса β -частицы не наблюдается. Величина Y постоянна, в отличие от ситуации, рассмотренной в [10, 11], когда энергия электрона встряски не фиксирована и коррелированность Y изменяется пропорционально импульсу автоионизационного электрона.

Такие результаты по корреляции направлений испускания электрона автоионизации при встряске атомной оболочки и β -частицы и ее зависимость от энергии электрона автоионизации указывают на присутствие взаимодействия β -частицы с автоионизационным электроном. При этом проявляется прямое электрон-электронное взаимодействие токов частиц, которое, по-видимому, в основном и ответственно за наблюдение скоррелированного движения электрона автоионизации и β -частицы. О присутствии прямого взаимодействия свидетельствуют также теоретические расчеты [12], по которым вклад от прямого взаимодействия β -частицы с электроном атомной оболочки значительный (до 55 %).

Результаты, полученные в данной работе, согласуются с нашими предыдущими результатами [3 - 8, 10, 11] и качественно согласуются с работами по встряске при двойной фотоионизации [13 - 15] (сходному с β -распадом по теоретическому описанию встряски процессу), 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 // Proc. of the Int. Conf. “Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy” (Kyiv, May 29 - June 03, 2006). - Kyiv, 2007. - P. 412 - 416.
4. Митрохович Н.Ф. Энергетические и корреляционные свойства электронов “встряски” при β -распаде // Ядерна фізика та енергетика. - 2010. - Т. 11, № 2 - С. 136 - 140.
5. Митрохович Н.Ф. Энергетическое распределение электронов “встряски” при β -распаде ^{152}Eu // Там же. - 2008. - № 1 (23) - С. 24 - 28.
6. 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.

7. Митрохович Н.Ф., Купряшкин В.Т. Корреляция электронов внутренней конверсии с электронами “встряски” при ϵ -распаде ^{152}Eu // Ядерная физика та енергетика. - 2007. - № 1 (19) - С. 61 - 66.
8. Митрохович Н.Ф. Энергетическое распределение электронов “встряски” атомной оболочки при внутренней конверсии // Там же. - 2009. - Т. 10, № 3 - С. 263 - 268.
9. 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.
10. Mitrokhovich N.F. // Book of Abstracts. The 3-rd Int. Conf. “Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy” (Kyiv, June 07 - 12, 2010). - Kyiv, 2011. - P. 84.
11. Mitrokhovich N. F. Energy and correlation properties of “shake-off” electrons at β -decay and internal conversion // Annual Report - 2010. Institute for Nuclear Research. - Kyiv, 2011. - P. 46.
12. 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.
13. Weber Th., Giessen H., Weckenbrock M. et al. Correlated electron emission in multiphoton double ionization // Nature. - 2000. - Vol. 405. - P. 658 - 661.
14. Weckenbrock M., Hattas M., Gzash 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.
15. 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.

М. Ф. Митрохович

СПЕКТРИ ЕНЕРГІЙ ЕЛЕКТРОНІВ АВТОІОНІЗАЦІЇ ТА ЇХНЯ КОРЕЛЬОВАНІСТЬ ЗА НАПРЯМКОМ ВІЛЬОТУ β -ЧАСТИНКИ

Вивчалась автоіонізація атомної оболонки при β -розпаді ^{152}Eu . Було досліджено залежність енергетичного спектра електронів автоіонізації та їхньої корельованості за напрямком вильоту з β -частинкою від граничної енергії вилітаючої β -частинки. Вимірювання виконано на установці збігів γ -квантів та β -частинок із низькоенергетичними електронами при реєстрації електронів автоіонізації за створюваними ними e_0 -електронами вторинної електронної емісії ($\gamma\beta e_0$ -збіги). За отриманими даними протяжність енергетичного спектра електронів автоіонізації пропорційна граничній енергії β -спектра. Корельованість напрямку вильоту електрона струсу (автоіонізації) за напрямком вильоту β -частинки не залежить від енергії β -частинки.

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

M. F. Mitrokhovich

THE SPECTRA ENERGIES OF ELECTRONS AUTOIONIZATION AND THEIR CORRELATION ON β -PARTICLE EMISSION DIRECTION

The study of autoionization of atomic shell at β -decay ^{152}Eu was performed. Relation of energy of autoionization electrons and their correlation on outgoing direction with a β -particle from boundary energy of β -particle was investigated. Measurements are executed on the installation of coincidences of γ -quanta and β -particle with low energy electrons at registration of autoionization electrons created by e_0 -electrons of the secondary electron emission ($\gamma\beta e_0$ -coincidences). Due to obtained data the expansion of a energy spectrum of autoionization electrons is proportional to boundary energy of β -spectrum. Correlation direction of emitting of autoionization electron on outgoing directions of β -particle does not depend on energy β -particle.

Keywords: autoionization electrons, β -decay, ^{152}Eu .

Поступила в редакцію 11.02.2011.