

Н. Ф. Митрохович, В. Т. Купряшкин, Л. П. Сидоренко

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев***КОРРЕЛИРОВАННОСТЬ НАПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ОЖЕ С НАПРАВЛЕНИЕМ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНА ВНУТРЕННЕЙ КОНВЕРСИИ**

На установке совпадений γ -квантов с электронами и с низкоэнергетичными электронами околонулевой области исследована пространственная корреляция направления испускания электронов Оже и электрона внутренней конверсии e_{IC} перехода 122 кэВ E2 в распаде ^{152}Eu . Электроны Оже регистрировались по e_0 -электронам вторичной электронной эмиссии в $\gamma e_{IC} e_0$ -совпадениях. Было установлено, что электроны Оже М-серии, как и электроны “встряски” при β^- -распаде и внутренней конверсии, сильно коррелированы по направлению движения с направлением движения основной частицы (β^- -частица, электрон конверсии), двигаясь вместе с ней преимущественно в переднюю полусферу. Интенсивность коррелированного М-Оже излучения в диапазоне энергий 1000 - 1700 эВ примерно равна интенсивности коррелированного излучения электронов “встряски” от электронов внутренней конверсии в том же диапазоне. Сделано предположение, что наличие пространственной коррелированности электрона Оже и электрона конверсии обусловлено токовыми компонентами электрон-электронного взаимодействия частиц в конечном состоянии.

Ключевые слова: электроны Оже, электроны конверсии, электроны автоионизации, ^{152}Eu .

Введение

Эти исследования коррелированности являются продолжением аналогичных исследований по “встряске” (автоионизации) атомной оболочки [1, 2], проведенных нами для внутренней конверсии и β^- -распаду [3 - 8]. Они возникли из результатов наших измерений на β^- -спектрометре $\pi\sqrt{2}$ спектров конверсионных электронов в совпадениях с сопутствующим низкоэнергетичным излучением Оже-электронов и излучением от “встряски” при конверсии и β^- -распаде. Сопутствующее излучение регистрировалось по e_0 -электронам вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ). В дальнейшем был разработан метод определения коэффициентов внутренней конверсии (КВК) на основе двойных и тройных γe_0 - и $\gamma e_{IC} e_0$ -совпадений e_0 -электронов с конверсионным электроном и γ -квантом [9 - 10]. Для определения КВК по этому методу потребовались данные о наличии (или отсутствии) коррелированности направления движения электрона “встряски” и конверсионного электрона. Было установлено, что неучет их коррелированности приводит к ошибке в 6 %, что ограничивает, например, изучение аномалий в КВК, вызванных эффектом проникновения.

Кроме ядерно-спектроскопического интереса и других подобных аспектов таких исследований существует более общий, состоящий в изучении корреляционного движения частиц в импульсном и спиновом пространстве [1].

Эффекты “встряски” и Оже значительны по вероятности. В частности, вероятность самоионизации атома для внешних оболочек [2] сопоставима с вероятностью основного процесса, а излучение электронов Оже при заполнении вакансий в атомной оболочке после конверсии еще в 5 - 10 раз выше. Учитывая, что наблюдается сильная коррелированность движения электронов “встряски” с основной частицей в направлении вперед [3, 4, 7], необходимо изучение наличия корреляционных свойств и для электронов Оже.

По нашим данным [11] коррелированность Υ (отношение вероятностей испускания электрона “встряски” в направлении β^- -частицы и в произвольном по отношению к ней направлении) пропорциональна импульсу электрона “встряски” и не зависит от энергии основной частицы (электрона). Эти свойства Υ отнесены к влиянию токовых компонент электрон-электронного взаимодействия частиц. Отсутствие такой коррелированности при β^- -распаде [12] только это подтверждает, а изучение коррелированности движения электрона Оже с конверсионным электроном может служить дополнительной проверкой.

Методика измерений и результаты

Изучение коррелированности направления вылета электрона Оже по направлению вылета электрона внутренней конверсии проведено по интенсивному конверсионному переходу 122 кэВ E2 в ϵ -ветви распада ^{152}Eu (рис. 1).

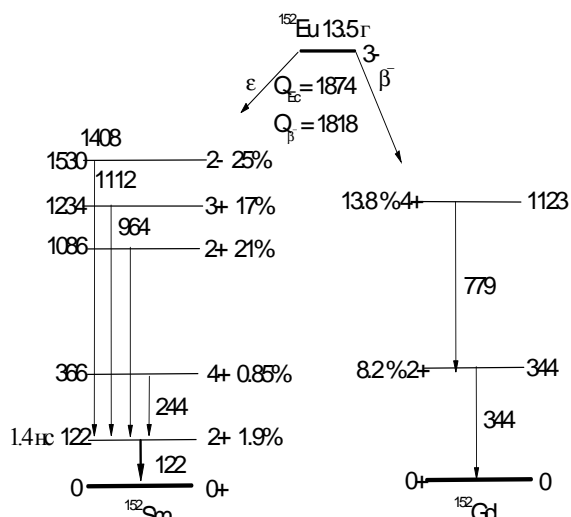


Рис. 1. Фрагменты схемы распада ^{152}Eu через электронный захват и β^- -распад, содержащие сильно конвертированный переход 122 кэВ E2 ($\alpha = 1,167$ [13]) и основные γ -переходы, заселяющие состояния дочерних ядер. Все энергии приведены в килоэлектрон-вольтах.

Схема распада ^{152}Eu сложна. Она содержит две ветви распада, что допускает возможность изучения корреляционных свойств Оже-электронов с конверсионным электроном в сравнении с такими свойствами при “встряске” (автоионизации) атомной оболочки в процессах β^- -распада и внутренней конверсии, что нами сделано ранее.

Работа выполнена на установке [14] для измерения спектров совпадений γ -квантов с электронами и с низкоэнергетичными электронами, включая e_0 -электроны вторичной электронной эмиссии (γe_0 - и $\gamma e_0 e_0$ -совпадения). Методика измерений представлена на рис. 2.

Геометрия измерений такова (см. рис. 2), что при измерении тройных $\gamma e_0 e_0$ -совпадений Оже-электрон e_{Auger} от конверсии может двигаться только в направлении движения электрона внутренней конверсии e_{IC} , поскольку последний проходит через эмиттер Em, прежде чем регистрируется детектором R, а e_0 -электроны от Оже-электрона e_{Auger} , которые регистрируются левым детектором, образуются только от эмиттера Em. Определенный в такой геометрии измерений выход электронов Оже на акт конверсии в тройных совпадениях будет соответствовать вероятности их испускания в направлении движения электрона конверсии ($\Omega = 0$), в отличие от вероятности для произвольного направления испускания электронов Оже ($\Omega = 4\pi$) по отношению к конверсионному электрону при измерении двойных γe_0 -совпадений.

В такой методике проводились измерения γ -спектров в ($\gamma(e_{\text{IC}} + e_0)$)-, γe_{IC} - и $\gamma e_{\text{IC}} e_0$ -совпадениях

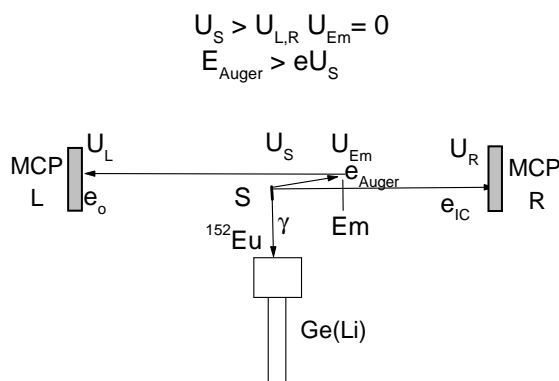


Рис. 2. Методика определения коррелированности движения Оже-электрона e_{Auger} с конверсионным электроном e_{IC} при регистрации Оже-электронов по e_0 -электронам ВЭЭ в γe_0 - и $\gamma e_{\text{IC}} e_0$ -совпадениях. При потенциалах $U_S > U_{L,R}$, $U_{Em} = 0$ регистрация Оже-электронов происходит для $E_{\text{Auger}} > eU_S$ только от эмиттера Em и только левым МСР-детектором электронов. При $U_S = U_{Em} \gg U_{L,R}$ оба детектора (L и R), собранные на основе микроканальных пластин, регистрируют только высокоэнергетичные (много выше e_0) электроны с $E > e(U_{L,R} - U_S)$. Ge(Li)-детектор γ -квантов. Em – алюминиевая фольга толщиной 0,01 мм, эмиттер e_0 -электронов.

и определялись интенсивности γ -переходов, находящихся в совпадении с конвертируемым переходом 122 кэВ E2. Измерения были выполнены при различных напряжениях U_S на источнике, соответствующих регистрации электронов “встряски” и электронов Оже с энергиями $E > eU_S$. Разность от результатов измерений интенсивностей γ -переходов при $U_S = 1000$ В и 1700 В относится к регистрации электронов Оже М-серии в диапазоне 1000 - 1700 эВ, а разность для результатов с $U_S = 1700$ В и 2500 В определяет фоновую регистрацию для них от электронов “встряски” (автоионизации атомной оболочки) при внутренней конверсии в диапазоне 1700 - 2500 эВ.

В разностных результатах измерений вклад вторичных электронов, образующихся в небольших количествах на эмиттере Em от электронов конверсии и β^- -распада, вычитается и дополнительную фоновую регистрацию не создает.

На рис. 3 приведены некоторые серии измерений, выполненные при смещении на источнике 1000 В.

По полученным интенсивностям γ -переходов в одиночном спектре и спектрах совпадений и вычислении необходимых разностей для измеряемого диапазона энергий, а также при вычитании фоновой регистрации “встряски” от конверсии определялись экспериментально регистриру-

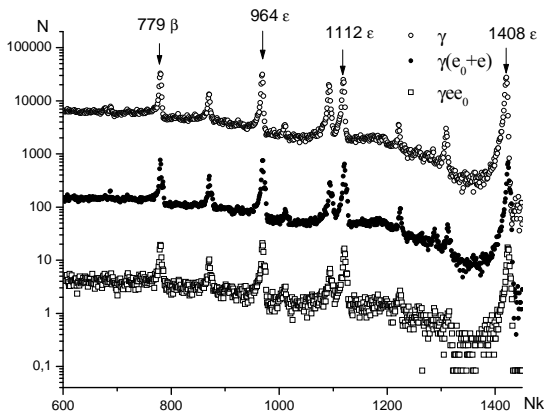


Рис. 3. γ -спектр ^{152}Eu (верхний) и спектры $\gamma(e + e_0)$ - и γe_0 -совпадений γ -квантов с электронами (электроны конверсии, β -частицы) и e_0 -электронами ВЭЭ от излучений автоионизации (при β -распаде и конверсии), а также от электронов Оже. Все спектры приведены к одному часу измерений.

емые Y выходы электронов Оже на один акт конверсии. При произвольной взаимной ориентации направления испускания электрона Оже e_{Auger} и конверсионного электрона e_{IC} ($\Omega = 4\pi$), что имеет место при проведении γe_0 -совпадений, $Y^{\Omega=4\pi}$ определяется выражением

$$Y^{\Omega=4\pi} = \sum_i N(\gamma_i e_0) / N(\gamma_i) (1 + \alpha / (1 + \alpha)), \quad (1)$$

где i - один из переходов 964, 1112 и 1408 кэВ, результаты по которым суммируются для улучшения статистики. Множитель $(1 + \alpha / (1 + \alpha))$ в знаменателе выражения (1) учитывает дополнительное образование электронов Оже от электронного захвата и выделяет их образование только от конверсии. Он также исключает вклад электронного захвата во “встряску” при определении Y для самоионизации от конверсии. α - коэффициент внутренней конверсии перехода 122 кэВ E_2 . При испускании e_{Auger} и конверсионного электрона e_{IC} в один и тот же телесный угол Ω в направлении вперед ($\Omega = 0$), что реализуется методикой при проведении $\gamma e_{\text{IC}e_0}$ -совпадений, $Y^{\Omega=0}$ определяется выражением

$$Y^{\Omega=0} = \sum_i N(\gamma_i e_{\text{IC}} e_0) / N(\gamma_i e_{\text{IC}}), \quad (2)$$

Y -выходы электронов Оже при внутренней конверсии и Y -выходы электронов автоионизации при β -распаде и внутренней конверсии и коррелированности Y электронов Оже и электронов автоионизации по направлению движения основной частицы в распаде ^{152}Eu

Процесс	$Y(\Omega = 4\pi)$	$Y(\Omega = 0)$	Y
Оже-переходы М-серии	0,00181(33)	0,0188(29)	10,4(25)
Внутренняя конверсия	0,00261(16)	0,0147(11)	5,6(11)
β -распад	0,00073(17)	0,00499(71)	6,8(19)

где $N(\dots)$ в выражениях (1) и (2) – это интенсивности γ -переходов в соответствующих γ -спектрах тройных совпадений, двойных совпадений или в одиночном γ -спектре.

Выражения Y -выходов в формулах (1) и (2) дают зарегистрированный выход электронов Оже (или выход электронов “встряски” (автоионизации) от внутренней конверсии) на один акт произошедшего события с образованием электрона конверсии, но относятся к разной экспериментальной ситуации: к их произвольному направлению испускания по отношению к конверсионному электрону (выражение (1)) или к одновременному их испусканию в один и тот же телесный угол в направлении вперед (выражение (2)).

При определении Y -выходов от электронов Оже М-серии выходы электронов “встряски” (автоионизации) от конверсии необходимо вычесть. Эти Y -выходы электронов “встряски” от конверсии определены для области 1700 – 2500 эВ с учетом характера энергетического спектра электронов автоионизации при конверсии в этой области энергий [8, 16]. При этом сами электроны Оже в области энергий 1700 - 2500 эВ отсутствуют, поскольку их серии N, O ... находятся намного ниже, а K- и L-серии намного выше и фоновый фактор не создают.

На основании этих данных определялась коррелированность Y направления испускания электрона Оже (или электрона автоионизации после “встряски” при конверсии) по направлению испускания конверсионного электрона, определяемая при малых телесных углах Ω как

$$Y = Y^{\Omega=0} / Y^{\Omega=4\pi}. \quad (3)$$

Аналогичным образом определяются $Y^{\Omega=0}$, $Y^{\Omega=4\pi}$ и Y для β -распада, но фактор $(1 + \alpha / (1 + \alpha))$ отсутствует. При этом в выражениях (1) и (2) символ i соответствует переходам 344 и 779 кэВ.

Основные результаты приведены в таблице, которая содержит Y -выходы электронов Оже и их коррелированность Y по направлению движения электрона конверсии, а также аналогичные данные по “встряске” (автоионизации) при внутренней конверсии и β -распаде, полученные в измерениях.

Обсуждение результатов и выводы

Как можно видеть из таблицы, электроны Оже М-серии сильно коррелированы с электроном внутренней конверсии по направлению движения, испускаясь вместе с ним, в основном в переднюю полусферу. Величина их коррелированности Υ в пределах экспериментальной ошибки соответствует коррелированности направления движения электрона “встряски” и β^- -частицы и близка к такому значению для коррелированности электрона “встряски” и электрона конверсии. Несколько меньшее значение Υ для конверсии объясняется малым присутствием в тройных совпадениях с конверсионным электроном электронов “встряски” от электронного захвата. Эта часть “встряски” с электронами конверсии не коррелирована, поскольку происходит намного раньше процесса внутренней конверсии. Время жизни состояния $122\text{ кэВ } 2+$ порядка 2 нс и электрон Оже от электронного захвата за это время покидает не только пределы атома, но и радиоактивный источник, прежде чем появится конверсионный электрон. Методика этого времени не различает, но при отборе тройных совпадений Оже-электроны от электронного захвата, хотя и не коррелированы с электронами конверсии, могут привносить некоторый вклад, поскольку их интенсивность велика.

Наличие сильной коррелированности в движении электрона Оже и электрона конверсии, близость ее величины Υ к значениям Υ для “встрясок” при внутренней конверсии и β^- -распаде, а также одинаковость конечного состояния системы (два движущиеся электрона) указывают на схожесть механизмов возникновения пространственных корреляций в движении частиц во всех трех процессах. Сделано предположение, что механизм, определяющий зависимость \sqrt{E} [11, 15, 16] от энергии (импульса) электрона “встряски” для его коррелированности с β^- -частицей как токовый [11], для корреляции электрона Оже и электрона конверсии (а также для корреляции электрона “встряски” и электрона конверсии) тот же: он обусловлен токовыми компонентами электрон-электронного взаимодействия частиц в конечном состоянии. В этом случае, если это действительно так, при движении обоих электронов в одном направлении взаимодействие

их “токов” является взаимодействием притяжения, при движении в противоположном направлении – взаимодействием отталкивания, что в конечном итоге и определяет наблюдаемые свойства коррелированности Υ . Для β^+ -распада ситуация противоположная. Отсутствие коррелированности направления движения вперед электрона “встряски” с позитроном [12] не противоречит полученным результатам и укладывается в механизм токовых компонент взаимодействия частиц в конечном состоянии, как, возможно, доминирующий над другими.

Предполагаемый механизм для объяснения наблюдающихся пространственных корреляций в движении заряженных частиц является качественным и не претендует на полноту описания. Он только подчеркивает влияние скоростей заряженных частиц как “токов”. Полное описание движения заряженных частиц должно включать потенциалы их электромагнитного взаимодействия, зависящие от координат и скоростей частиц, но уже далеко выходит за пределы данной статьи.

Следует также отметить, что ситуация с электроном Оже и электроном конверсии в плане их коррелированности отличается от ситуации со “встряской” при β^- -распаде. Если в последнем случае из-за присутствия прямого взаимодействия атомного электрона с β^- -частицей “токовый” механизм представляется возможным, поскольку частицы возникают практически одновременно, то в случае конверсии испускание электрона Оже М-серии происходит с заметным опозданием после возникновения электрона конверсии. Поэтому предложенный качественный механизм является менее убедительным для этого процесса, хотя другой наглядный механизм, вскрывающий сущность явления, пока не ясен.

В рамках предложенного механизма должна также наблюдаться коррелированность электронов Оже К- и L-серий с направлением движения электрона внутренней конверсии, но для ее изучения необходимо подавать большие напряжения на источник и нужна уже другая методика. Сильная пространственная корреляция частиц наблюдается также в работах по “встряске” при двойной фотоионизации [17 - 19], выполненных на лазерных пучках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Матвеев В. И., Паршиц 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). -

- Київ, 2007. - Р. 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 $^{152,154}\text{Eu}$ // Зб. 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 // Ядерна фізика 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. Митрохович Н.Ф. Определение коэффициента внутренней конверсии в измерениях со вторичными электронами околунолеуевой энергии // Изв. РАН. Сер. физ. - 2000. - Т. 64, № 3. - С. 567 - 571.
 10. Митрохович Н.Ф. Определение коэффициентов внутренней конверсии по вторичному электронному излучению при внутренней конверсии и бета-распаде // Зб. наук. праць Ін-ту ядерних досл. - 2001. - № 1(3). - С. 67 - 70.
 11. 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.
 12. Mitrokhovich N.F., Kupryashkin V.T., Sidorenko L.P. Correlation researches of an outgoing directions “shake-off” electron and positron at β^+ -decay // Proc. of the 4-th Int. Conf. “Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy” (Kyiv, Sept. 3 - 7, 2012). Part 1. - Kyiv, 2013. - P. 311.
 13. Nuclear Data Sheets. - 1989. - Vol. 58, No. 1. - P. 93.
 14. Купряшкин В. Т., Митрохович Н. Ф. Установка для измерения временных и энергетических спектров $\gamma\beta(e + e_0)$ -совпадений // Ядерна фізика та енергетика. - 2006. - № 1(17). - С. 90 - 94.
 15. Mitrokhovich N.F. // Book of Abstracts of the 3rd Int. Conf. “Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy” (Kyiv, June. 7 - 12, 2010). - Kyiv, 2010. - P. 84.
 16. 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.
 17. Weber Th., Giessen H., Weckenbrock M. et al. Correlated electron emission in multiphoton double ionization // Nature. - 2000. - Vol. 405. - P. 658 - 661.
 18. 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.
 19. 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, В. Т. Купряшкін, Л. П. Сидоренко

КОРЕЛЬОВАНІСТЬ НАПРЯМКУ РУХУ ЕЛЕКТРОНІВ ОЖЕ З НАПРЯМКОМ РУХУ ЕЛЕКТРОНА ВНУТРІШНЬОЇ КОНВЕРСІЇ

На установці збігів γ -квантів з електронами та з низькоенергетичними електронами близько нульової області досліджено просторову кореляцію напрямку руху електронів Оже та електрона внутрішньої конверсії при розпаді ^{152}Eu . Електрони Оже реєструвались по e_0 -електронах вторинної електронної емісії ($\gamma e_{1c}e_0$ -збіги). Було встановлено, що електрони Оже М-серії, так як і електрони “струсу” при β -розпаді та внутрішньої конверсії, сильно корельовані по напрямку руху з напрямком руху основної частинки (β -частинка, електрон конверсії), рухаючись разом з нею головним чином у передню напівсферу. Інтенсивність корельованого М-Оже випромінювання в діапазоні енергій 1000 - 1700 еВ приблизно дорівнює інтенсивності корельованого випромінювання електронів “струсу” від електронів внутрішньої конверсії в тому ж діапазоні. Зроблено припущення, що наявність просторової корельованості електрона Оже з електроном конверсії зумовлена струмовими компонентами електрон-електронної взаємодії часток у кінцевому стані.

Ключові слова: електрони Оже, електрони конверсії, електрони автоіонізації, ^{152}Eu .

M. F. Mitrokhovich, V. T. Kupryashkin, L. P. Sidorenko

CORRELATION OF THE AUGER ELECTRONS DIRECTION OF MOVEMENT WITH THE INTERNAL ELECTRON CONVERSION DIRECTION OF MOVEMENT

On installation of coincidences of γ -quanta with electrons and with low energy electrons about zero area the spatial correlation of the direction emitting Auger-electrons and electron of internal conversion was investigated at the ^{152}Eu decay. Auger-electrons were registered on e_0 -electrons of the secondary electron emission ($\gamma e_{1c}e_0$ -coincidences). It was established, that Auger-electrons of M-series, as well as electrons “shake-off” at β -decay and internal conversion, are strongly correlated at the direction of movement with the direction of movement of basic particle (β -particle, conversion

electron), moving together mainly in the forward hemisphere. The intensity of correlated M-Auger radiation in range energy 1000 - 1700 eV is equal to intensity of correlated radiation “shake-off” electron from internal conversion in this range. The assumption, that the presence of spatial correlating Auger-electron and conversion electron caused by current components of electron-electron interaction of particles in the final state is made.

Keywords: Auger-electron, conversion electron, “shake-off” electron, ^{152}Eu .

Надійшла 14.03.2013
Received 14.03.2013