

КОРРЕЛЯЦІЯ ЕЛЕКТРОНОВ ВНУТРІНЬОЇ КОНВЕРСИЇ
С ЕЛЕКТРОНАМИ “ВСТРЯСКИ” В ϵ -РАСПАДЕ ^{152}Eu

Н. Ф. Митрохович, В. Т. Купряшкин

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

На специальной вакуумной установке совпадений γ -квантов и электронов с низкоэнергетичными электронами, включая e_0 -электроны вторичной электронной эмиссии (γe_0 -совпадения), исследована корреляция электронов конверсии с электронами “встряски” в ϵ -распаде ^{152}Eu . Для участка электронов с энергиями 200 - 1750 эВ впервые получено, что интенсивность низкоэнергетического электронного излучения, сопутствующего конверсии в ϵ -распаде ^{152}Eu (электроны “встряски”), в направлении испускания электрона конверсии в 8 (1) раз превосходит интенсивность этого излучения в направлении, противоположном испусканию электрона конверсии. Измерение выходов e_0 -электронов для той же области энергий электронов (электроны “встряски”) показывает увеличение выхода при измерениях γe_0 -совпадений по сравнению с γe_0 -совпадениями в 7.4 (7) раза. Все это указывает на преимущественное испускание электронов “встряски” в ту же полусферу, что и электронов конверсии, обусловленное наличием сильной корреляции направлений вылета электронов конверсии и электронов “встряски”.

Введение

Как известно, при радиоактивном распаде или переходах во внутренних оболочках атома происходит “встряска” атомной оболочки [1], которая сопровождается испусканием одного или нескольких электронов, в основном из внешних оболочек. Хотя их спектр низкоэнергетичен (практически не превосходит несколько сот электрон-вольт), “встряску” во многих случаях нужно учитывать (при измерениях коэффициентов внутренней конверсии, как в данных работах, 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, изучение которых представляет постоянный интерес для современной атомной и ядерной физики как в теоретических исследованиях, так и экспериментальных, при изучении корреляционного движения частиц в импульсном, спиновом и зарядовом пространстве. В данной работе продолжены начатые исследования по “встряске” при β -распаде $^{152,154}\text{Eu}$ [2 - 4]. Они дополнены исследованиями по “встряске” при внутренней конверсии перехода 122 кэВ в ϵ -ветви распада ^{152}Eu .

Методика эксперимента и измерения

Измерения выполнены на установке γe_0 -совпадений γ -квантов с электронами и низкоэнергетичными электронами, включая e_0 -электроны вторичной электронной эмиссии [5], которая в использованной конфигурации и функциональных обозначениях для электроники приведена на рис. 1.

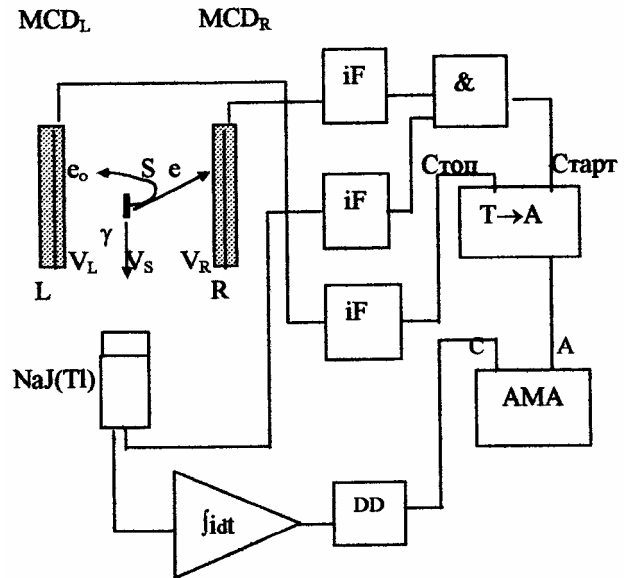


Рис. 1. Геометрия эксперимента и блок-схема электроники для измерения временных спектров γ ($e + e_0$) и γe_0 -совпадений.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: MCD_L и MCD_R – беспороговые детекторы электронов на основе шевронов микроканальных пластин; S – радиоактивный источник ^{152}Eu ~ 20 мкг/см², ориентированный подложкой к детектору L; 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 логического умножения (совпадения); $\int idt$ – входной интегрирующий каскад; DD – дифференциальный дискриминатор для выбора энергетического окна и управления по входу C амплитудным многоканальным анализатором импульсов AMA, на ана-

логовый вход А которого подаются импульсы от конвертера “время - амплитуда”.

Поскольку установка уже подробно описана в работе [5], остановимся на методике вкратце. Два детектора электронов, регистрирующих низкоэнергетичное электронное излучение, включая e_0 -электроны вторичной электронной эмиссии, находятся внутри откачиваемой камеры, а детектор γ -лучей расположен извне этой камеры. Для управления регистрацией и отбором e_0 -электронов источник и детекторы находятся под регулируемыми потенциалами V_S, V_L, V_R . Сформированные импульсы от γ -детектора прямо (в этом случае на электронный вход блока “&” подается уровень соответствующий логической единице) при измерениях $\gamma (e + e_0)$ -совпадений или после отбора по совпадениям с импульсами от детектора электронов MCD_R при измерениях γe_0 -совпадений подаются на старт конвертера “время - амплитуда”. Сформированные импульсы от детектора электронов MCD_L подаются на стоп конвертера “время - амплитуда”. Временной спектр от конвертера поступает на аналоговый вход многоканального амплитудного анализатора. На вход управления анализатора подаются импульсы с дифференциального дискриминатора выбора энергетического окна. В проведенных измерениях окно в 100 кэВ было настроено на регистрацию изолированного фотопика 1408 кэВ, находящегося в каскаде с сильноконвертированным E2 переходом 122 кэВ в ϵ -ветви распада ^{152}Eu , при внутренней конверсии которого в данной работе и изучалась “встряска” при измерении временных $\gamma_{1408}(e + e_0)$ - и $\gamma_{1408}ee_0$ -совпадений.

Электроны “встряски” при внутренней конверсии в ϵ -распаде ^{152}Eu , спектр которых низкоэнергетичный, изучались в диапазоне 200 - 1750 эВ по эффективно создаваемым ими в этой области энергий e_0 -электронам вторичной электронной эмиссии. Измерялись временные спектры совпадений γ_{1408} (относящегося к ϵ -ветви распада ^{152}Eu) с электронами (электроны конверсии + электроны Оже + электроны “встряски” e_{Sh}), формирующими быстрый пик спектра и e_0 -электронами, формирующими медленный и задержанный пик спектра в двойных $\gamma_{1408}(e_{IC122} + e_{Auger} + e_{Sh} + e_{oSh})$ совпадениях и тройных $\gamma_{1408}e_{IC122}(e_{Sh} + e_{Auger} + e_{oSh})$ совпадениях. При выборе соответствующей конфигурации электрического поля и потенциалах $V_L = +400$ В, $V_S = +450$ В и $V_R = +250$ В левым детектором MCD_L регистрировались только e_0 -электроны, образующиеся на поверхности правого детектора MCD_R . Таким образом, при отборе электронов конверсии правым детектором в тройных

$\gamma e_{IC122}(e_{Sh} + e_{Auger} + e_{oSh})$ совпадениях создавалось выделенное направление регистрации, когда электрон конверсии и электрон “встряски” e_{Sh} движутся в одну сторону, в то время как в двойных $\gamma_{1408}(e_{IC122} + e_{Auger} + e_{Sh} + e_{oSh})$ совпадениях направление испускания e_{Sh} по отношению к электрону конверсии произвольно. Это позволяет по выходам e_0 -электронов и по относительной интенсивности e_0 -компонента проверить наличие корреляции электронов конверсии с электронами “встряски”.

Поскольку при отборе γ_{1408} NaJ(Tl)-детектором комптоновская подставка от γ -переходов из β -ветви распада ^{152}Eu отсутствует, то отсутствует и вклад во “встряску” от β -распада ^{152}Eu , а присутствуют только совпадения с участием электронов конверсии перехода γ_{122} , электронов Оже M- и N-групп, электронов “встряски” и e_0 -электронов от всех их для дипазона $200 < E_e < 1750$ эВ, если вклад от $E_e > 1750$ эВ из измерений с $U_s = 2000$ В вычесть.

Основные результаты измерений представлены на рис. 2 - 5.

На рис. 2 и 3 показана регистрация e_0 -электронов, образовавшихся на правом MCD_R -детекторе, левым детектором MCD_L . В зависимости от того, включен ли правый детектор электронов или выключен, интенсивность e_0 -компонента различна. Обычно MCD_R включен.

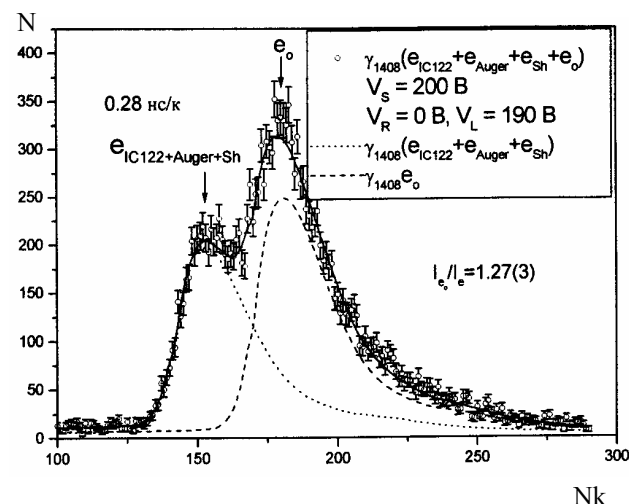


Рис. 2. Образование e_0 -электронов на поверхности правого MCD_R -детектора и регистрация их левым MCD_L -детектором, Правый детектор выключен, $V_R = 0$ В.

На рис. 4 и 5 представлены временные спектры $\gamma_{1408}e_{IC122}(e + e_0)$ -совпадений с их быстрыми $\gamma_{1408}e_{IC122}(e_{Auger} + e_{Sh})$ и медленными $\gamma_{1408}e_{IC122}e_0$ -компонентами, измеренные при подаче на источник напряжения +450 В и +2000 В, что с учетом напряжения на поверхности правого детектора + 250 В соответствует регистрации им

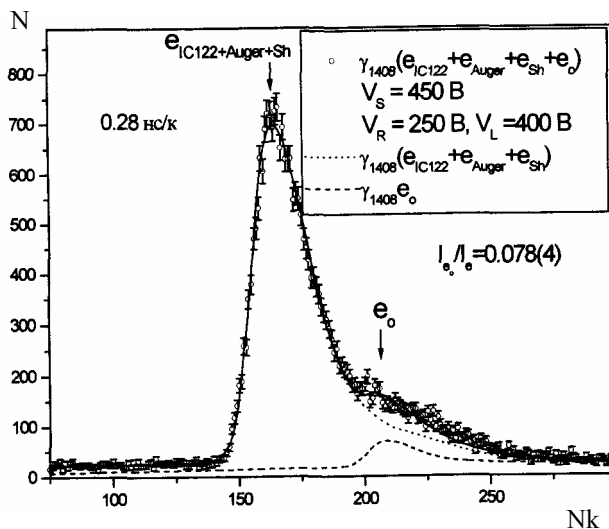


Рис. 3. Образование e_0 -электронов на поверхности правого MCD_R -детектора и регистрация их левым MCD_L -детектором, Правый детектор включен, $V_R = 250$ В. Интенсивность e_0 -компонента подавлена в 16 (1) раз.

электронов с энергией >200 эВ и >1750 эВ. Таким образом, разностный эффект от измерений с напряжением на источнике $+450$ В и $+2000$ В соответствует регистрации во временных $\gamma_{1408} e_{IC122}(e_{Auger} + e_{Sh} + e_0)$ -спектрах быстрой компоненты от электронов с энергиями $200 - 1750$ эВ и образованной от них на поверхности правого MCD_R -детектора медленной вторично-эмиссионной e_0 -компоненты, регистрируемой MCD_L -детектором.

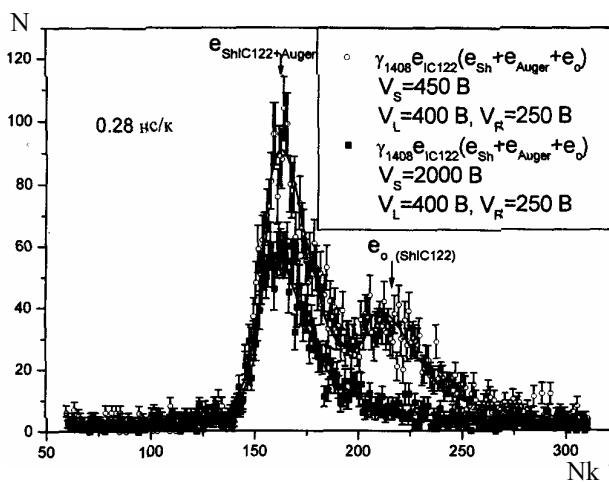


Рис. 4. Временные спектры $\gamma_{1408} e_{IC122}(e + e_0)$ -совпадений, измеренные при разных напряжениях на источнике. Полые точки – $U_S = 450$ В, в спектре присутствуют электроны Оже К – N-групп, электроны “встряски” и e_0 -электроны (в основном от электронов “встряски”). Квадратные точки – $U_S = 2000$ В, присутствуют только электроны Оже К- и L-групп.

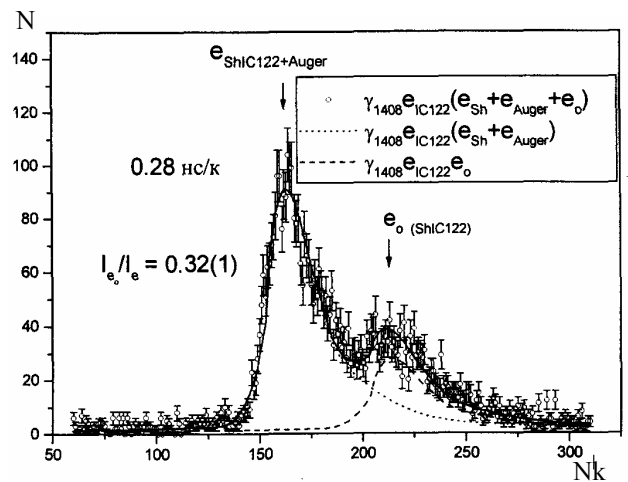


Рис. 5. Разложение временного спектра $\gamma_{1408} e_{IC122}(e + e_0)$ -совпадений при $U_S = 450$ В, на быструю электронную (электроны Оже К – N-групп и электроны “встряски”) и медленную e_0 -компоненту в основном от электронов “встряски”, поскольку вклад от электронов Оже, как видим (рис. 4 и таблица далее), не большой.

Результаты измерений и обсуждение

Основные результаты измерений приведены в таблице, в которой содержатся интенсивности I_e и I_{e_0} соответственно быстрой электронной и медленной e_0 -компоненты, образующейся на поверхности правого детектора от электронов с $E_e > 200$ эВ ($U_S = 450$ В, результаты с индексом “d”) и от электронов с $E_e > 1750$ эВ ($U_S = 2000$ В, результаты с индексом “o”). Для оценки вклада от электронов Оже М- и N-групп приведены результаты с $E_e > 500$ эВ ($U_S = 750$ В, индекс “m”) и $E_e > 300$ эВ ($U_S = 550$ В, индекс “n”). Как можно видеть из таблицы, вклад от электронов Оже М- и N-групп в быструю компоненту (результаты “m” - “o” плюс результаты “d” - “n”) за вычетом вклада от самих электронов “встряски” (получаемого из экстраполяции результатов “n” - “m”) не превышает 10 % от интенсивности компоненты “встряски” и быстрой компоненты в целом, что позволяет вкладом этих групп (M + N, как и K + L-групп) в образования e_0 -электронов пренебречь и пренебречь их присутствием в быстрой компоненте для области $200 < E_e < 1750$ эВ.

В таком приближении для получения искомого корреляционного отношения интенсивностей испускания электронов “встряски” вдоль движения электрона конверсии и против его движения необходимо отношение интенсивностей компонент временного спектра $\gamma_{1408} e_{IC122}(e + e_0)$ -совпадений поправить на отношение $(\epsilon_0)^{U_{\Gamma=0}} / (\epsilon_0)^{U_{\Gamma}} = 16$ (1), указывающее уменьшение эффективности регистрации e_0 -электронов от

Измерения	$I_e^d / I_{e_0}^d$	$I_e^n / I_{e_0}^n$	$I_e^m / I_{e_0}^m$	$I_e^o / I_{e_0}^o$
$\gamma_{1408}(e + e_0)$	365.0 (25) / 28.5 (15)	365.0 (30) / 41.0 (15)	329 (4) / 19 (2)	319.0 (25) / 0(1)
	355 (3) / 36.6 (12)		344 (4) / 10.3 (17)	333 (3) / 0(1)
$\gamma_{1408} e_{IC122}(e + e_0)$	30.0 (7) / 9.6 (3)	25.8 (4) / 9.6 (4)	15.5 (6) / 4.0 (6)	14.4 (3) / 0 (3)
	22.4 (5) / 8.2 (3)		13.3 (5) / 1.9 (3)	12.9 (3) / 0.2 (2)

Примечание. “d” - $U_s = 450$ В; “n” - $U_s = 550$ В; “m” - $U_s = 750$ В; “o” - $U_s = 2000$ В.

правого детектора при подаче на него напряжения, а также на отдельно измеренное отношение $(\epsilon_0)_{LR} / \epsilon_R = 1.4$ (1). Оно определяет эффективность регистрации левым MCD_L-детектором e_0 -электронов, образовавшихся на правом детекторе от электронов 200 - 1750 эВ, относительно эффективности регистрации этих электронов правым детектором. Таким образом, из измерений $\gamma_{1408} e_{IC122}(e + e_0)$ -совпадений, представленных в таблице, с учетом поправок на эффективности регистрации определяется отношение I_{e_0}/I_e для электронов с энергиями $200 < E_e < 1750$ эВ и e_0 -электронов от них, являющееся корреляционным отношением для испускания электронов “встряски” вдоль и против движения электрона конверсии:

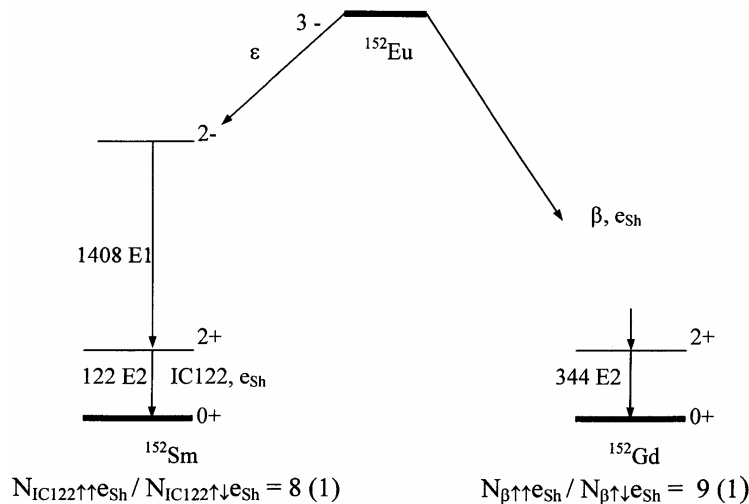
$$\frac{I_{e_0}}{I_e} = \frac{I_{e_0}^d - I_{e_0}^o}{I_e^d - I_e^o} \cdot \frac{\epsilon_0^{Ur=0}}{\epsilon_0^{Ur}} \cdot \frac{(\epsilon_e)_R}{(\epsilon_{e_0})_{LR}} = 8.0(12). \quad (1)$$

Из тщательно проведенных измерений выхода (Z) e_0 -электронов на акт конверсии в $\gamma_{1408}e_0$ -совпадениях, определяемого как $Z = N_{\gamma_{1408}e_0} / \alpha_{\gamma_{122}} N_{\gamma_{1408}}$, где $\alpha_{\gamma_{122}}$ – КВК γ_{122} , и в $\gamma_{1408}e_{IC122}e_0$ -совпадениях, определяемого как $Z = N_{\gamma_{1408}e_{IC122}e_0} / N_{\gamma_{1408}e_{IC122}}$, установлено отношение

$$\frac{Z_{\gamma_{1408}e_{IC122}e_0}}{Z_{\gamma_{1408}e_0}} = 7.4(7). \quad (2)$$

Отношения (1) и (2) указывают на наличие сильной корреляции в движении электрона конверсии и электрона “встряски” преимущественно в одну полусферу.

Можно сопоставить полученные результаты по “встряске” при внутренней конверсии γ_{122} в ϵ -распаде ^{152}Eu с ранее полученными [4] результатами по “встряске” при β -распаде того же самого источника ^{152}Eu . Они хорошо согласуются между собой, подтверждая наличие сильной корреляции в движении частиц при “встряске”:



Отношения (1) и (2) получены для электронов в диапазоне энергий 200 - 1750 эВ. Кроме электронов “встряски” и электронов Оже в диапазон 100 - 1750 эВ в своей основной массе (более 95 % по данным [6]) попадает некоторое количество вторичных δ -электронов (это вторичные электроны с $E_e > 100$ эВ), еще менее влияющих на результаты, чем электроны Оже, испускаю-

щиеся на акт конверсии на порядки в большем количестве, а на результаты влияющие мало. Сами δ -электроны испускаются под углом, близким к 90° по отношению к первичной частице, поэтому в $\gamma_{1408}e_{IC122}(e + e_0)$ -совпадениях с выделением направления регистрации электрона вдоль направления регистрации электрона конверсии практически не регистрируются [6]. В $\gamma_{1408}(e +$

+ e_0)-совпадениях, когда направление регистрации электрона по отношению к электрону конверсии не выделено, они приносят вклад в эффект, но незначительный, поскольку использованный в работе источник ($20 - 30 \text{ мкг/см}^2$) имел толщину 500 \AA , а расстояние между точками образования δ -электронов составляет 10000 \AA [6]. При этом выход δ -электронов из источника на один конверсионный электрон для диапазона $200 - 1750 \text{ эВ}$ с учетом длины пробега можно оценить величиной не более 1 %. Реально регистрируемый MCD-детектором выход e_0 -электронов от δ -электронов будет при этом во много раз меньшим и не соответствует получаемым значениям $0,04 - 0,06$ регистрируемого детектором выхода e_0 -электронов на одну частицу в двойных совпадениях. В тройных совпадениях e_0 -электроны от δ -электронов, как уже указывалось, не регистрируются вообще.

Таким образом, отношения (1) и (2) указывают на наличие сильной корреляции в движении электрона “встряски”, движущегося преимущественно в ту же сторону, что и связанный с ним электрон конверсии, поскольку e_0 -электрон в $\gamma_{1408}e_{IC122}(e + e_0)$ -совпадениях образован именно от такого электрона “встряски”. Быстрая компо-

нента спектра $\gamma_{1408}e_{IC122}(e + e_0)$ -совпадений обусловлена совпадениями электрона конверсии, регистрируемым левым детектором, с движущимся в противоположном направлении и регистрируемым правым детектором электроном “встряски”. Интенсивность этой компоненты в 8 (1) раз меньшая.

Результаты работы подтверждают наличие сильной корреляции направлений вылета электрона “встряски” относительно направления испускания электрона внутренней конверсии, что находится в согласии с ранее полученными данными о корреляции при “встряске” при β -распаде [4]. Они также согласуются с литературными данными [7 - 9], полученными из экспериментов по двойной фотоионизации.

Полученные результаты о наличии сильной корреляции в движении электрона и связанного с ним электрона от “встряски” атомной оболочке при β -распаде и внутренней конверсии γ -лучей представляют интерес не только для атомной или ядерной спектроскопии, а имеют общезначимое значение для изучения корреляционных явлений в движении нескольких электронов в импульсном и спиновом пространстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеев В. И., Парилис Э. С. Встряски 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}Eu // Зб. наук. праць Ін-ту ядерних досл. - 2003. - № 1 (9). - С. 24 - 31.
3. Митрохович Н. Ф. Электроны “встряски” при β -распаде $^{152,154}\text{Eu}$ // Там же. - 2004. - № 2 (13). - С. 52 - 60.
4. 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” (NPAE-Kyiv2006). Part 1. - Kyiv, 2007. - P. 412 - 416.
5. 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.
6. Медведев М. Н. Сцинтилляционные детекторы. - М: Атомиздат, 1977. - С. 19, 21, 22.
7. Weber TH., Giessen H., Weckenbrock M. et al. Correlated electron emission in multiphoton double ionization // Nature. - 2000. - Vol. 405. - P. 658 - 661.
8. Weckenbrock M., Hattas M., Gzash M. et al. Experimental evidence for electron repulsion in multiphoton double ionization // J. Phys. B.: At. Mol. Opt. Phys. - 2001. - Vol. 34. - L449 - L455.
9. 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. -L113 - L119.

КОРЕЛЯЦІЯ ЕЛЕКТРОНІВ ВНУТРІШНЬОЇ КОНВЕРСІЇ З ЕЛЕКТРОНАМИ “СТРУСУ” В ϵ -РОЗПАДІ ^{152}Eu

М. Ф. Митрохович, В. Т. Купряшкін

На спеціальній вакуумній установці збігів γ -квантів та електронів з низькоенергетичними електронами, включаючи e_0 -електрони вторинної електронної емісії (γe_0 -збіги), досліджено кореляцію електронів внутрішньої конверсії з електронами “струсу” при ϵ -розпаді ^{152}Eu . Для ділянки електронів з енергіями $200 - 1750 \text{ еВ}$ уперше отримано, що інтенсивність низькоенергетичного електронного випромінювання, що супроводжує внутрішню конверсію ^{152}Eu (електрони “струсу”), у напрямку вильоту у 8 (1) разів перевершує інтенсивність цього випромінювання в напрямку, протилежному вильоту електрона конверсії. Вимірювання виходів e_0 -електронів для тієї ж області енергій електронів (електрони “струсу”) показує збільшення виходу в

7.4 (7) рази при вимірюваннях γe_0 -збігів порівняно з γe_0 -збігами. Усе це вказує на переважне випускання електронів “струсу” в ту ж півсферу, що й електронів конверсії, зумовлене наявністю сильної кореляції напрямків вильоту електронів внутрішньої конверсії та електронів “струсу”.

**CORRELATION ELECTRON INTERNAL CONVERSION WITH “SHAKE OFF”
ELECTRONS UNDER ϵ -DECAY ^{152}Eu**

N . F. Mitrokhovich, V. T. Kupryashkin

On special vacuum coincidences installation γ -quanta and electrons with electrons, including the e_0 -electrons of second electronic emission (γe_0 -coincidences), explored correlation conversion electron with “shake off” electron in ϵ -decay ^{152}Eu . For electrons area with energies 200 - 1750 eV for the first time received, that intensity of low power electronic radiation, accompanied ϵ -decay ^{152}Eu (“shake off” electrons), in direction of emitting conversion electron in 8 (1) once excels intensity of this radiation in direction, opposed to emitting conversion electron. The e_0 -electrons yield measuring for electrons (“shake off” electrons) area with that energy region shows such increase yield at measuring γe_0 -coincidences on comparison with γe_0 -coincidences. All that indicates on predominantly emitting of “shake off” electrons in such half sphere as conversion electron, caused strong flight directions correlation between conversion electron and “shake off” electron.

Поступила в редакцію 01.02.07,
после доработки – 30.03.07.