

**КОРРЕЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ВНУТРЕННЕЙ КОНВЕРСИИ С ЭЛЕКТРОНАМИ  
“ВСТРЯСКИ” В  $\epsilon$ -РАСПАДЕ  $^{152}\text{Eu}$** **Н. Ф. Митрохович, В. Т. Купряшкин***Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

На специальной вакуумной установке совпадений  $\gamma$ -квантов и электронов с низкоэнергетичными электронами, включая  $e_0$ -электроны вторичной электронной эмиссии ( $\gamma e_0$  – совпадения), исследована корреляция электрон конверсии - электрон “встряски” в  $\epsilon$ -распаде  $^{152}\text{Eu}$ . Для участка электронов с энергиями 200 – 1750 эВ впервые получено, что интенсивность низко энергетического электронного излучения, сопутствующего конверсии в  $\epsilon$ -распаде  $^{152}\text{Eu}$  (электроны “встряски”), в направлении испускания электрона конверсии в 8(1) раз превосходит интенсивность этого излучения в направлении, противоположном испусканию электрона конверсии. Измерения выходов  $e_0$ -электронов для той же области энергий электронов (электроны “встряски”) показывает увеличение выхода при измерениях  $\gamma e_0$ -совпадений по сравнению с  $\gamma e_0$ -совпадениями в 7.4(7) раз. Все это указывает на преимущественное испускание электронов “встряски” в ту же полусферу, что и электрон конверсии, обусловленное наличием сильной корреляции направлений вылета электрон конверсии – электрон “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 электронвольт), “встряску” во многих случаях нужно учитывать (при измерениях коэффициентов внутренней конверсии, как в данных работах, при точных измерениях формы  $\beta$ -спектров и др.), или можно использовать (например, при планировании опытов с ядрами отдачи после  $\beta$ -распада). Эффекты “встряски” обусловлены наличием электронных корреляций, 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 исследования по “встряске” при  $\beta$ -распаде  $^{152,154}\text{Eu}$  [2 - 4]. Они дополнены исследованиями по “встряске” при внутренней конверсии перехода 122 кэВ в  $\epsilon$ -ветви распада  $^{152}\text{Eu}$ .

## Методика эксперимента и измерения

Измерения выполнены на установке  $\gamma e e_0$ -совпадений  $\gamma$ -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.

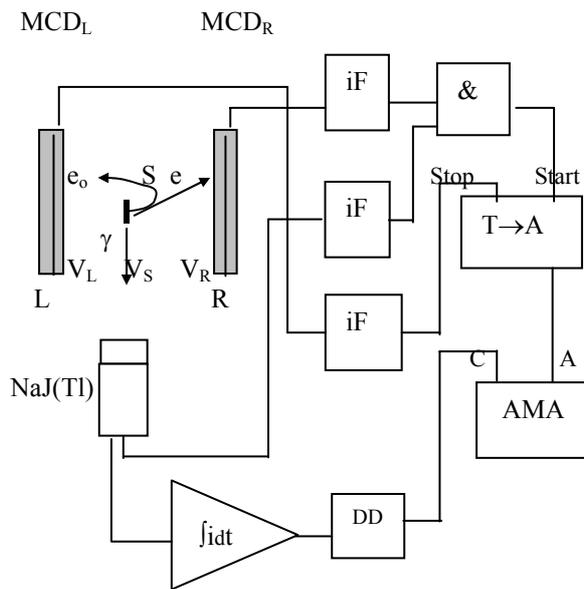


Рис. 1. Геометрия эксперимента и блок-схема электроники для измерения временных спектров  $\gamma(e + e_0)$ - и  $\gamma e e_0$ -совпадений

На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $MCD_L$  и  $MCD_R$  – беспороговые детекторы электронов на основе шевронов микроканальных пластин;  $S$  – радиоактивный источник  $^{152}Eu \sim 20 \text{ мкг/см}^2$ , ориентированный подложкой к детектору  $L$ ,  $NaJ(Tl)$  – сцинтилляционный детектор  $\gamma$ -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 АМА, на аналоговый вход  $A$  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  $\gamma$ -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 гамма-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  $\gamma e_0$ - 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 сильно-конвертированным E2 переходом 122 кэВ в  $\epsilon$ -ветви распада  $^{152}\text{Eu}$ , при внутренней конверсии которого в данной работе и изучалась “встряска” при измерении временных  $\gamma_{1408}(e + e_0)$ - и  $\gamma_{1408}e_0$  - совпадений.

Электроны “встряски” при внутренней конверсии в  $\epsilon$ -распаде  $^{152}\text{Eu}$ , 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  $\gamma_{1408}$  (относящегося к  $\epsilon$ -ветви распада  $^{152}\text{Eu}$ ) 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 электрон конверсии – электрон “встряски”.

Поскольку при отборе  $\gamma_{1408}$  NaJ(Tl)-детектором комптоновская подставка от  $\gamma$ -переходов из  $\beta$ -ветви распада  $^{152}\text{Eu}$  отсутствует, то отсутствует и вклад во “встряску” от  $\beta$ -распада  $^{152}\text{Eu}$ , а присутствуют только совпадения с участием электронов конверсии перехода  $\gamma_{122}$ , электронов Оже М- 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 – 7.

На рис 2 –3 показана регистрация  $e_0$ -электронов, образовавшихся на правом  $\text{MCD}_R$ -детекторе, левым детектором  $\text{MCD}_L$ . В зависимости от того включен правый детектор электронов или выключен интенсивность  $e_0$ -компонента различна. Обычно  $\text{MCD}_R$  включен.

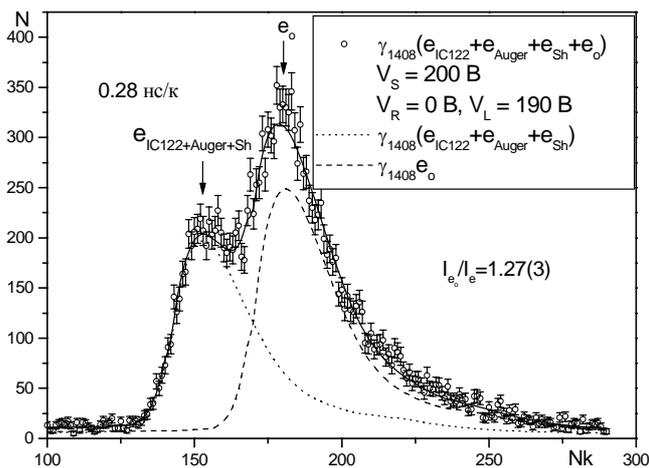


Рис. 2. Образование  $e_0$ -электронов на поверхности правого  $\text{MCD}_R$  - детектора и регистрация их левым  $\text{MCD}_L$ - детектором, Правый детектор выключен,  $V_R = 0$  В

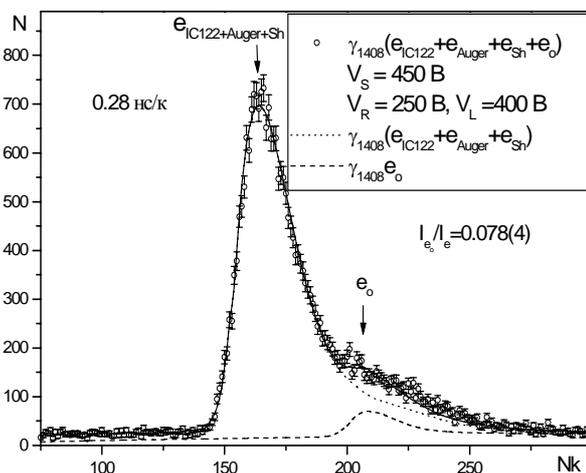


Рис. 3 . Образование  $e_0$ -электронов на поверхности правого  $\text{MCD}_R$  - детектора и регистрация их левым  $\text{MCD}_L$ - детектором, Правый детектор включен,  $V_R = 250$  В Интенсивность  $e_0$ -компонента подавлена в 16(1) раз.

На рис. 4 – 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 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<sub>R</sub>-детектора медленной вторично-эмиссионной  $e_0$ -компоненты, регистрируемой MCD<sub>L</sub>- детектором.

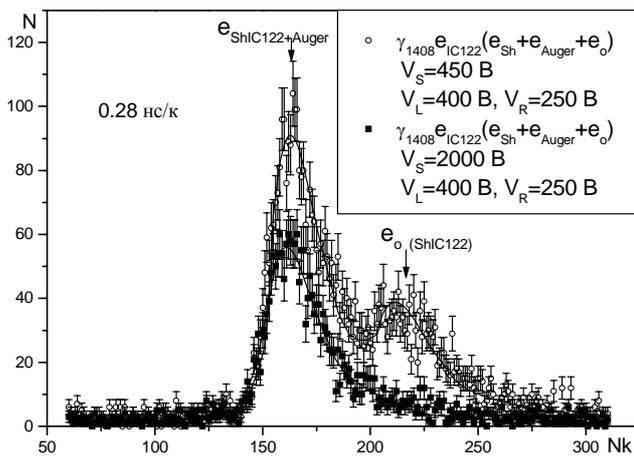


Рис. 4. Временные спектры  $\gamma_{1408}e_{IC122}(e + e_0)$ - совпадений, измеренные при разных напряжениях на источнике. Полые точки -  $U_s = 450$  В, в спектре присутствуют электроны Оже К – N групп, электроны “встряски” и  $e_0$ -электроны (в основном от электронов “встряски”). Квадратные точки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

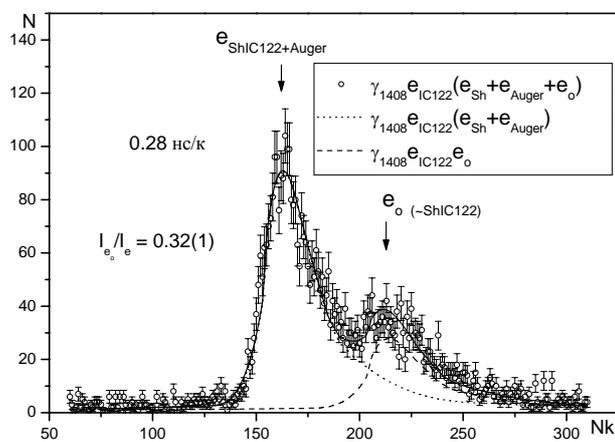


Рис. 5. Разложение временного спектра  $\gamma_{1408}e_{IC122}(e + e_0)$ - совпадений при  $U_s = 450$  В, на быструю электронную (электроны Оже К – N групп и электроны “встряски”) и медленную  $e_0$ -компоненту в основном от электронов “встряски”, поскольку вклад от электронов Оже как видим ( см. Рис.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

## 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 быстрый компонент (результаты “m” - “o” плюс результаты “d” - “o”) за вычетом вклада от самих электронов “встряски” (получаемого из экстраполяции результатов “n”- “m”) не превышает 10 % от интенсивности компонента “встряски” и быстрого компонента в целом, что позволяет вкладом этих групп (М + N, как и К + L групп) в образования  $e_0$ -электронов пренебречь и пренебречь их присутствием в быстрой компоненте для области  $200 < E_e < 1750$  эВ.

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

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  $(\epsilon_0)^{Ur=0} / (\epsilon_0)^{Ur} = 16$  (1), указывающее уменьшение эффективности регистрации  $e_0$ -электронов от 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<sub>L</sub>-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:

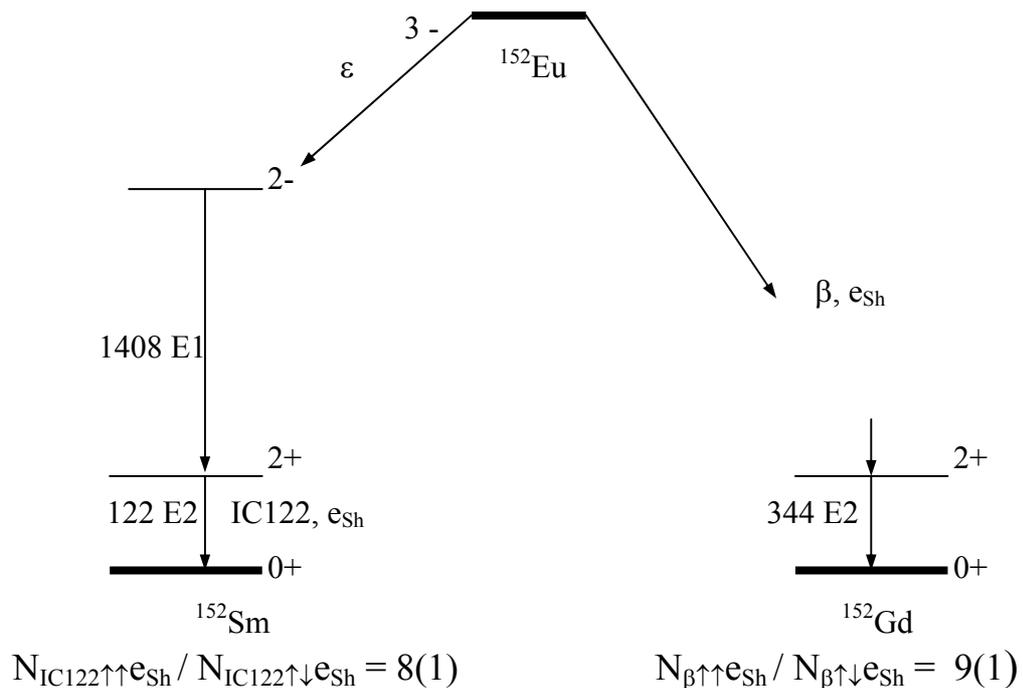
$$\frac{I_{e_0}}{I_e} = \frac{I_{e_0}^d - I_{e_0}^o}{I_e^d - I_e^o} \cdot \frac{\varepsilon_0^{Ur=0}}{\varepsilon_0^{Ur}} \cdot \frac{(\varepsilon_e)_R}{(\varepsilon_{e_0})_{LR}} = 8.0(12) \quad (1)$$

Из тщательно проведенных измерений Z-выходов  $e_0$ -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  $\gamma_{122}$ , 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  $Z_{\gamma_{1408}e_{IC122}e_0} / Z_{\gamma_{1408}e_{IC122}}$  :

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

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  $\gamma_{122}$  в  $\varepsilon$ -распаде  $^{152}\text{Eu}$  с ранее полученными [4] результатами по “встряске” при  $\beta$ -распаде того же самого источника  $^{152}\text{Eu}$ . 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  $\delta$ -электронов (это вторичные электроны с  $E_e > 100$  эВ), еще менее влияющих на результаты, чем электроны Оже, испускающиеся на акт конверсии на порядки в большем количестве, а на результаты влияющие мало. Сами  $\delta$ -электроны испускаются под углом, близким к  $90^\circ$  по отношению к первичной частице и в  $\gamma_{1408}\epsilon_{IC122}(e + e_0)$ -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 мкг/см<sup>2</sup>) имел толщину 500 Å, а расстояние между точками образования  $\delta$ -электронов составляет 10000 Å [ 6 ]. При этом выход  $\delta$ -электронов из источника на один конверсионный электрон для диапазона 200 – 1750 эВ с учетом длины пробега можно оценить величиной не более 1 %. Реально регистрируемый MCD-детектором выход  $e_0$ -электронов от  $\delta$ -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  $\delta$ -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  $\gamma_{1408}\epsilon_{IC122}(e + e_0)$ -совпадениях образован именно от такого электрона “встряски”. Быстрый компонент спектра  $\gamma_{1408}\epsilon_{IC122}(e + e_0)$ -совпадений обусловлен совпадениями электрона конверсии, регистрируемым левым детектором, с движущимся в противоположном направлении и регистрируемым правым детектором электроном “встряски”. Интенсивность этого компонента в 8(1) раз меньшая.

Результаты работы подтверждают наличие сильной корреляции направлений вылета электрон “встряски” - электрон внутренней конверсии, что находится в согласии с ранее полученными данными о корреляции при ”встряске” при  $\beta$ -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  $\beta$ -распаде и внутренней конверсии гамма-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. Встряска при электронных переходах в атомах // Успехи физических наук. – 1982. - Т. 138. - Вып. 4. - С. 573 - 602.
2. Митрохович Н.Ф. Электроны “встряски” при  $\beta$ -распаде  $^{152}\text{Eu}$  // Збірник наукових праць інституту ядерних досліджень. - 2003- №1(9). – С. 24 –31
3. Митрохович Н. Ф. , Электроны “встряски” при  $\beta$ -распаде  $^{152,154}\text{Eu}$  //Збірник наукових праць інституту ядерних досліджень.–2004. –№ 2(13). –С. 52 - 60.
4. Митрохович Н. Ф. , Корреляция  $\beta$ -частиц с электронами “встряски” при  $\beta$ -распаде  $^{152}\text{Eu}$  //Збірник наукових праць інституту ядерних досліджень.–2007. (в печати).
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., Gzasch 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 $\beta$ -РОЗПАДІ $^{152}\text{Eu}$

**М. Ф. Митрохович, В. Т. Купряшкін**

На спеціальній вакуумній установці збігів  $\gamma$ -квантів і електронів з низькоенергетичними електронами, включаючи  $e_0$ -електрони вторинної електронної емісії ( $\gamma e_0$  - збіги), досліджена

кореляція електрон внутрішньої конверсії - електрон "струсу" при  $\varepsilon$ -розпаді  $^{152}\text{Eu}$ . Для ділянки електронів з енергіями 200 - 1750 eV вперше отримано, що інтенсивність низько енергетичного електронного випромінювання, що супроводжує внутрішню конверсію  $^{152}\text{Eu}$  (електрони "струсу"), у напрямку вильоту у 8(1) разів перевершує інтенсивність цього випромінювання в напрямку, протилежному вильоту електрону конверсії. Виміри виходів  $e_0$ -електронів для тієї ж області енергій електронів (електрони "струси") показує збільшення виходу у 7.4(7) разів при вимірах  $\gamma e_0$  збігів у порівнянні з  $\gamma e_0$ -збігами. Все це вказує на переважне випускання електронів "струсу" у ту ж півсферу, що і електрон конверсії, обумовлене наявністю сильної кореляції напрямків вильоту електрон внутрішньої конверсії - електрон "струсу"

### **CORRELATION ELECTRON INTERNAL CONVERSION WITH "SHAKE OFF" ELECTRONS UNDER $\varepsilon$ -DECAY $^{152}\text{Eu}$**

**N . F. Mitrokhovich, V. T. Kupryashkin**

On special vacuum coincidences installation  $\gamma$ -quanta and electrons with electrons, including the  $e_0$ -electrons of second electronic emission ( $\gamma e_0$ -coincidences), explored correlation conversion electron with "shake off" electron in  $\varepsilon$ -decay  $^{152}\text{Eu}$ . For electrons area with energies 200 - 1750 eV for the first time got, that intensity of low power electronic radiation, accompanied  $\varepsilon$ -decay  $^{152}\text{Eu}$  ("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 those energy region shows such increase yield at measuring  $\gamma e_0$ -coincidences on comparison with  $\gamma e_0$ -coincidences. All that indicates on predominantly emitting of "shake off" electrons in such half sphere as conversion electron, conditioned strong flight directions correlation between conversion electron and "shake off" electron