

КОРРЕЛЯЦИЯ β -ЧАСТИЦ С ЭЛЕКТРОНАМИ “ВСТРЯСКИ” ПРИ β -РАСПАДЕ ^{152}Eu

Н. Ф. Митрохович

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

На специальной вакуумной установке совпадений γ -квантов и β -частиц с электронами, включая e_0 -электроны вторичной электронной эмиссии ($\gamma\beta(e + e_0)$ -совпадения), исследована корреляция β -частица – электрон “встряски” в β -распаде ^{152}Eu . Для участка электронов с энергиями 200 - 1750 эВ впервые получено, что интенсивность низко энергетического электронного излучения, сопутствующего β -распаду ^{152}Eu (электроны “встряски”), в направлении испускания β -частицы в 9 раз превосходит интенсивность этого излучения в направлении, противоположном испусканию β -частицы. Измерения выходов e_0 -электронов для той же области энергий электронов (электроны “встряски”) показывает такое же увеличение выхода при измерениях $\gamma\beta(e + e_0)$ -совпадений по сравнению с $\gamma(e + e_0)$ -совпадениями. Все это указывает на преимущественное испускание электронов “встряски” в ту же полусферу, что и β -частица, обусловленное наличием сильной корреляции направлений вылета β -частица - электрон “встряски”.

Введение

Изменение заряда ядра при радиоактивном распаде, или эффективного заряда при переходах во внутренних оболочках атома, является для атомных электронов внезапным, сопровождается встряской атомной оболочки и вылетом одного или нескольких электронов. “Встряски” многочисленны и эффекты не всегда малы [1]. Они обусловлены наличием электронных корреляций, изучение которых представляет постоянный интерес для современной атомной и ядерной физики.

В приближении внезапного возмущения вероятность “встряски” описывается квадратом интеграла перекрытия волновых функций встряхиваемого электрона, спектр электронов “встряски” низкоэнергетичен, а вероятность “встряски” не зависит от энергии β -частицы.

Продолжены начатые работы по “встряске” [2, 3], в которых получена информация о корреляции β -частица – электрон “встряски” только для низкоэнергетичных β -компонент ^{152}Eu . В данной работе предприняты исследования для всего β -спектра ^{152}Eu , которые проведены на специально созданной для этих целей установке [4].

Методика эксперимента и измерения

Измерения выполнены на установке $\gamma\beta(e + e_0)$ -совпадений γ -квантов с β -частицами и низкоэнергетичными электронами, включая e_0 -электроны вторичной электронной эмиссии [4], которая в использованной конфигурации и функциональных обозначениях для электроники приведена на рис. 1.

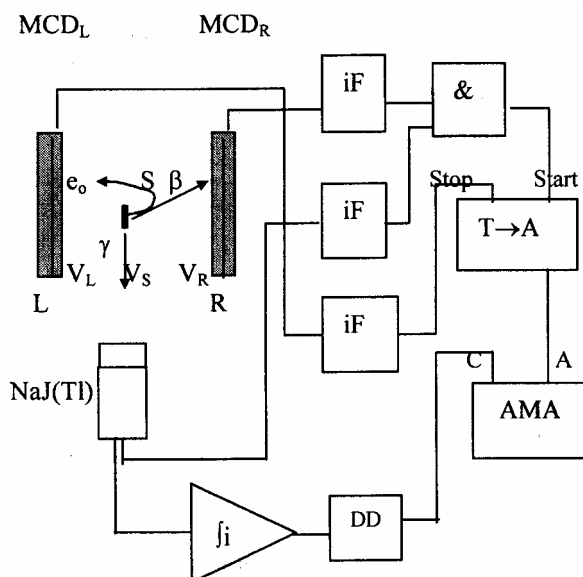


Рис. 1. Геометрия эксперимента и блок-схема электроники для измерения временных спектров $\gamma(e + e_0)$ - и $\gamma\beta(e + e_0)$ -совпадений.

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

Поскольку установка уже подробно описана в работе [4], остановимся на методике вкратце. Два детектора электронов, регистрирующих низко-

энергетичное 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 “И” 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 $\gamma\beta(e + e_0)$ -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 60 кэВ было настроено на регистрацию фотопика 344 кэВ для отбора β -спектра ^{152}Eu , “встряска” от которого в данной работе и изучалась при измерении временных $\gamma_{344}(e + e_0)$ - и $\gamma_{344}\beta(e + e_0)$ -совпадений.

Электроны “встряска” при β -распаде ^{152}Eu , как обладающие низкоэнергетичным спектром, изучалась в диапазоне 200 - 1750 эВ по эффективно создаваемым ими в этой области энергий e_0 -электронам вторичной электронной эмиссии на основе измерения временных спектров совпадений γ_{344} (относящегося к β^- -ветви распада ^{152}Eu) с электронами (β -частицы + электроны “встряски” e_{Sh}) в двойных $\gamma_{344}(\beta + e_{Sh} + e_{oSh})$ -совпадениях и тройных $\gamma_{344}\beta(e_{Sh} + e_{oSh})$ -совпадениях. С использованием специальных условий измерений (при выборе потенциалов $V_L = +400$ 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 β -частиц правым детектором в тройных $\gamma_{344}\beta(e_{Sh} + e_{oSh})$ -совпадениях создавалось выделенное направление регистрации, когда β -частица и электрон “встряски” e_{Sh} движутся в одну сторону, в то время как в двойных $\gamma_{344}(\beta + e_{Sh} + e_{oSh})$ -совпадениях направление испускания e_{Sh} по отношению к β -частице произвольно. Это позволяет по относительной интенсивности e_0 -компонента проверить наличие корреляции β -частица – электрон “встряски”.

Поскольку при отборе γ_{344} NaJ(Tl)-детектором регистрируется комптоновская подставка от γ_{1408} , который находится в каскаде с сильно конвертируемым γ_{122} , будут совпадения $\gamma_{1408}e_{IC122}e_{oAuger}$ с участием электронов конверсии, электронов Оже и e_0 -электронов от электронов Оже. С целью вычитания этого вклада проводились фоновые измерения через слой свинца толщиной 10 мм.

Основные результаты измерений представлены на рис. 2 - 7.

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 правый детектор электронов или выключен интенсивность e_0 -компонента различна. Обычно MCD_R включен.

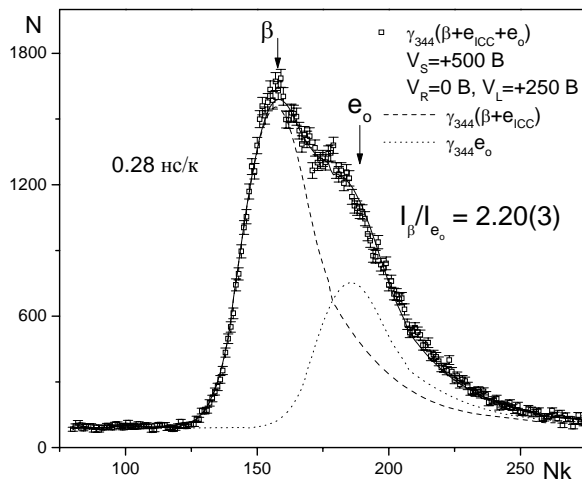


Рис. 2. Образование e_0 -электронов на поверхности правого MCD_R -детектора и регистрация их левым MCD_L -детектором. Правый детектор выключен, $V_R = 0$ В.

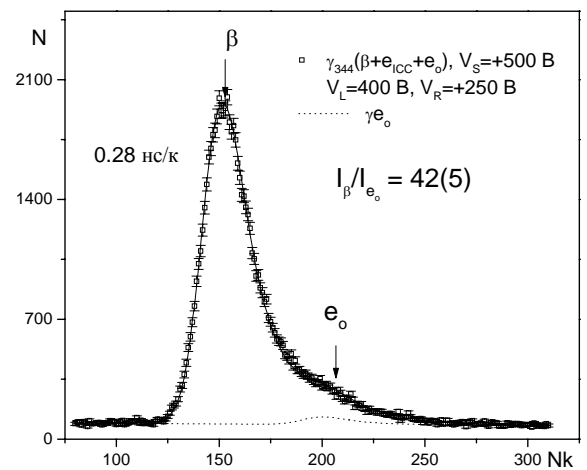


Рис. 3. Образование e_0 -электронов на поверхности правого MCD_R -детектора и регистрация их левым MCD_L -детектором. Правый детектор включен, $V_R = 250$ В. Интенсивность e_0 -компонента подавлена в 19(2) раз.

На рис. 4 и 5 представлены временные спектры $\gamma_{344}(e + e_0)$ - и $\gamma_{344}\beta(e + e_0)$ -совпадений и их быстрые $\gamma_{344}e$ - и $\gamma_{344}\beta e$ -компоненты, измеренные при подаче на источник напряжения +2000 В, что с учетом напряжения на поверхности правого детектора + 250 В соответствует регистрации им электронов с энергией 1750 эВ. Таким образом, разностный эффект от измерений с напряжением на источнике +450 В и +2000 В соответствует регистрации во временных $\gamma_{344}\beta(e + e_0)$ -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.

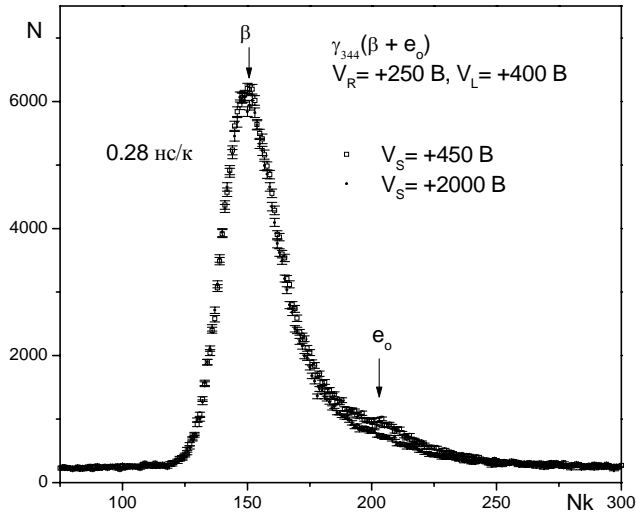


Рис. 4. Временные спектры $\gamma_{344}(e + e_0)$ - и $\gamma_{344}e$ -совпадений, показанные на рисунке полыми квадратами и точками соответственно.

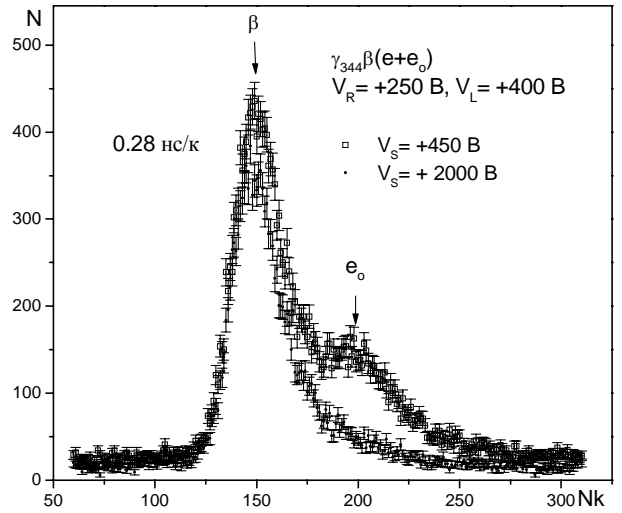


Рис. 5. Временные спектры $\gamma_{344}\beta(e + e_0)$ - и $\gamma_{344}\beta e$ -совпадений, показанные на рисунке полыми квадратами и точками соответственно.

На рис. 6 и 7 представлены временные спектры $\gamma_{344}(e + e_0)$ - и $\gamma_{344}\beta(e + e_0)$ -совпадений вместе с аналогичными измерениями через слой свинца 10 мм, являющимися фоновыми, из которых определяют-ся фоновые значения для быстрой электронной компоненты и медленной e_0 -компоненты.

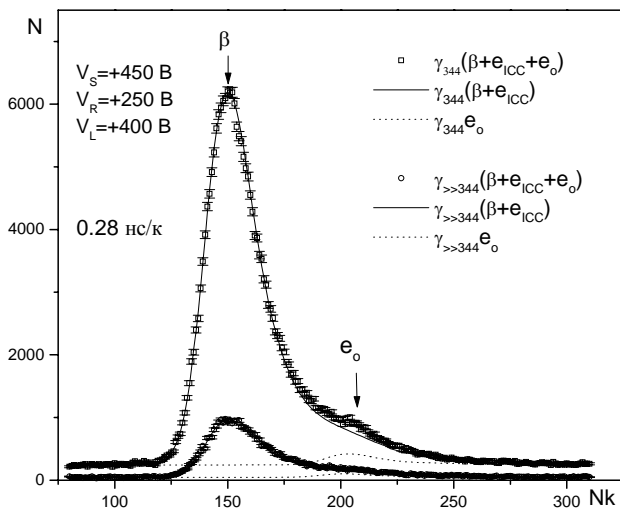


Рис. 6. Временной спектр $\gamma_{344}(e + e_0)$ -совпадений (верхние кривые) и фоновый спектр из измерений через слой свинца 10 мм (нижние кривые). Сплошными линиями показаны быстрые электронные компоненты спектров, а точечными – медленные и задержанные вторично-эмиссионные e_0 -компоненты.

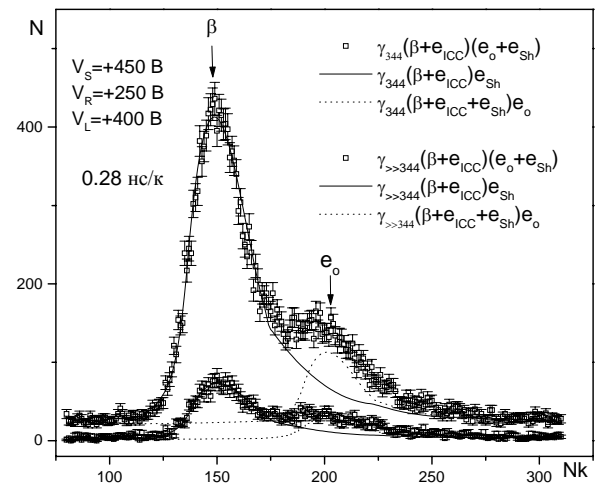


Рис. 7. Временной спектр $\gamma_{344}\beta(e + e_0)$ -совпадений (верхние кривые) и фоновый спектр из измерений через слой свинца 10 мм (нижние кривые). Сплошными линиями показаны быстрые электронные компоненты спектров, а точечными – медленные и задержанные вторично-эмиссионные e_0 -компоненты.

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 (результаты с индексом d) и от электронов с $E_e > 1750$ эВ (результаты с индексом o), а также измеренные без свинцового фильтра и с ним (результаты с индексом f). В таблице содержится отношение $(\varepsilon_0)^{Ur=0}/(\varepsilon_0)^{Ur}$, указывающее уменьшение эффективности регистрации e_0 -электронов от правого детектора при подаче на него напряжения. Отношение $(\varepsilon_0)_{LR}/\varepsilon_R$ определяет отдельно измеренную эффективность регистрации левым MCD_L-детектором e_0 -электронов, образовавшихся на правом детекторе от электронов 200 - 500 эВ, относительно эффективности регистрации этих электронов правым детектором.

	$(I_e)^d$	$(I_e)^o$	$(\varepsilon_0)^{Ur=0}/(\varepsilon_0)^{Ur}$	$(\varepsilon_0)_{LR}/\varepsilon_R$
	$(I_{e_0})^d$	$(I_e)^o_f$		
$\gamma_{344}(e + e_0)$	6001(15)	5794(14)	19(2)	1,4(1)
	224(9)			
$\gamma_{344}(e + e_0)_f$	968(6)	940(6)		
	74(4)			
$\gamma_{344}\beta(e + e_0)$	420(4)	336(3)		
	73(3)			
$\gamma_{344}\beta(e + e_0)_f$	74(2)	60(1)		
	24(1)			

Из измерений $\gamma_{344}\beta(e + e_0)$ - и $\gamma_{344}\beta(e + e_0)_f$ -совпадений, представленных в таблице, поправленное на эффективность регистрации определяется отношение I_{e_0}/I_e для электронов с энергиями $200 < E_e < 1750$ эВ и e_0 -электронов от них:

$$\frac{I_{e_0}}{I_e} = \frac{I_{e_0}^d - (I_{e_0}^d)_f}{I_e^d - I_e^o - ((I_e^d)_f - (I_e^o)_f)} \cdot \frac{\varepsilon_0^{Ur=0}}{\varepsilon_0^{Ur}} \cdot \frac{(\varepsilon_e)_R}{(\varepsilon_{e_0})_{LR}} = 9,5(20) \quad (1)$$

Из тщательно проведенных измерений Z-выходов e_0 -электронов на $\gamma_{344}(e + e_0)$ -совпадениях, как $N_{\gamma_{344}e_0}/N_{\gamma_{344}}$, и на $\gamma_{344}\beta(e + e_0)$ -совпадениях, как $N_{\gamma_{344}\beta e_0}/N_{\gamma_{344}\beta}$, определено отношение $Z_{\gamma_{344}\beta e_0}/Z_{\gamma_{344}e_0}$:

$$\frac{Z_{\gamma_{344}\beta e_0}}{Z_{\gamma_{344}e_0}} = 9(2) \quad (2)$$

Обсуждение результатов и выводы

Отношения (1) и (2) получены для электронов в диапазоне энергий 200 - 1750 эВ. Кроме электронов “встряски” в этот диапазон в своей основной массе (более 95 % по данным [5]) попадает некоторое количество вторичных δ -электронов, но они испускаются под углом, близким к 90° , и в $\gamma_{344}\beta(e + e_0)$ -совпадениях с выделением направления регистрации электрона вдоль направления регистрации β -частицы почти не регистрируются [5]. В $\gamma_{344}(e + e_0)$ -совпадениях, когда направление регистрации электрона по отношению к β -частице не выделено, они приносят вклад в эффект, но небольшой, поскольку использованный в работе 20 - 30 мкг/см² источник имел толщину 500 Å, а расстояние между точками образования δ -электронов составляет 10000 Å [5]. Таким образом, выход δ -электронов из источника на одну вызывающую их частицу даже без учета самопоглощения (которое значительно) для диапазона 200 - 1750 эВ оценивается примерно в 1 %. Реально регистрируемый MCD-детектором выход e_0 -электронов от δ -электронов будет во много раз меньше и не соответствует получаемым значениям 0,04 - 0,06 регистрируемого детектором выхода e_0 -электронов на одну частицу на двойных совпадениях. На 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 вызвавшая его β -частица, поскольку e_0 -электрон в $\gamma_{344}\beta(e + e_0)$ -совпадениях образован именно от такого электрона “встряски”. Быстрый компонент спектра $\gamma_{344}\beta(e + e_0)$ -совпадений обусловлен совпадениями β -частицы, регистрируемой левым детектором, с движущимся в противоположном направлении и регистрируемым правым детектором электроном “встряски”, и интенсивность этого компонента в 9,5 раз меньшая.

Полученный результат о наличии сильной корреляции направлений вылета электрон “встряски” - β -частица находится в согласии с аналогичными данными о корреляциях при “встряске” [6 - 8], полученными из экспериментов по двойной фотоионизации.

Наблюдаемое наличие корреляции в движении β -частицы и электрона от “встряске” атомной оболочке при β -распаде представляет интерес не только для атомной или ядерной спектроскопии, а имеет 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 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. 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.
5. Медведев М. Н. Сцинтилляционные детекторы. М.: Атомиздат, 1977. - С. 19, 21, 22.
6. Weber T.H., Giessen H., Weckenbrock M. et al Correlated electron emission in multiphoton double ionization // Nature. 2000. - Vol. 405. - P. 658 - 661.
7. 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. - P. L449 - L455.
8. Moshhammer R., Ulrich J., Fisher D. Strongly directed electron emission in non-sequential double ionization of Ne by intense laser pulses // Ibid. - 2003. - Vol. 36. - P. L113 - L119.

CORRELATION β -PARTICLES WITH “SHAKE OFF” ELECTRONS UNDER β -DECAY ^{152}Eu

N. F. Mitrokhovich

On special vacuum coincidences installation γ -quanta and β -particles with electrons, including the e_0 -electrons of second electronic emission ($\gamma\beta(e+e_0)$ -coincidences), explored correlation β -particle with “shake off” electron in β -decay ^{152}Eu . For electrons area with energies 200 - 1750 eV for the first time got, that intensity of low power electronic radiation, accompanied β -decay ^{152}Eu (“shake off” electrons), in direction of emitting β -particle in 9 once exceeds intensity of this radiation in direction, opposed to emitting β -particle. The e_0 -electrons yield measuring for electrons (“shake off” electrons) area with those energy region shows such increase yield at measuring $\gamma\beta(e+e_0)$ -coincidences on comparison with $\gamma(e+e_0)$ -coincidences. All that indicates on predominantly emitting of “shake off” electrons in such half sphere as β -particle, conditioned strong flight directions correlation between β -particle and “shake off” electron.

КОРЕЛЯЦІЯ β -ЧАСТИНОК З ЕЛЕКТРОНАМИ “СТРУСУ” ПРИ β -РОЗПАДІ ^{152}Eu

М. Ф. Митрохович

На спеціальній вакуумній установці збігів γ -квантів і β -частинок з електронами, включаючи e_0 -електрони вторинної електронної емісії ($\gamma\beta(e+e_0)$ -збіги), досліджено кореляцію β -частинка – електрон “струсу” у β -розпаді ^{152}Eu . Для ділянки електронів з енергіями 200 - 1750 eV уперше отримано, що інтенсивність низькоенергетичного електронного випромінювання, що супроводжує β -розпад ^{152}Eu (електрони “струсу”), у напрямку вильоту β -частинки в 9 разів перевершує інтенсивність цього випромінювання в напрямку, протилежному вильоту β -частинки. Вимірювання виходів e_0 -електронів для тієї ж області енергій електронів (електрони “струсу”) показує таке ж збільшення виходу при вимірах $\gamma\beta(e+e_0)$ -збігів порівняно з $\gamma(e+e_0)$ -збігами. Все це вказує на переважне випускання електронів “струсу” в ту ж півсферу, що й β -частинка, обумовлене наявністю сильної кореляції напрямків вильоту β -частинка – електрон “струсу”.