

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ “ВСТРЯСКИ” АТОМНОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ВНУТРЕННЕЙ КОНВЕРСИИ

Н. Ф. Митрохович

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

Проведены исследования энергетического спектра электронов “встряски” при внутренней конверсии перехода 122 кэВ E2 в ε-распаде <sup>152</sup>Eu. Измерения выполнены в диапазоне 200 - 1000 эВ на установке совпадений γ-квантов и электронов с низкоэнергетичными электронами, включая e<sub>0</sub>-электроны вторичной электронной эмиссии (γe<sub>0</sub>-совпадения). Регистрация электронов “встряски” осуществлялась непосредственно, а также по создаваемым ими e<sub>0</sub>-электронам. Измерен интегральный спектр и на этой основе вычислен дифференциальный спектр.

Ключевые слова: электроны “встряски”, внутренняя конверсия.

Введение

Резкое изменение заряда ядра (или эффективного заряда) при распадах или переходах во внутренних оболочках вызывает сильную встряску атомной оболочки [1], сопровождается ее возбуждением (процессы “shake-up”) или ионизацией (процессы “shake-off”). Эффект на внешних оболочках более значителен, чем на внутренних, его вероятности P<sub>up</sub> и P<sub>off</sub> составляют 0,10 и 0,05 для N-оболочки в области Z ≈ 50 [2], но для внешних оболочек экспериментально изучен мало. Его детальное изучение необходимо для понимания самого атомно-ядерного процесса. “Встряску”, как значительный эффект, во многих случаях нужно учитывать (например, при измерениях коэффициентов внутренней конверсии, особенно для внешних оболочек, 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, всестороннее изучение которых представляет постоянный интерес для современной атомной и ядерной физики, в частности при изучении корреляционного движения частиц в импульсном и спиновом пространстве. Данная работа является непосредственным продолжением предыдущей работы [3], в которой изучался энергетический спектр электронов “встряски” при β-распаде, а также продолжением предпринятого цикла работ [3 - 6] по “встряске” при β-распаде <sup>152,154</sup>Eu. Она дополняет эти работы исследованиями энергетического распределения электронов “встряски” при внутренней конверсии, которые выполнены для интенсивного конверсионного перехода 122 кэВ E2 в ε-ветви распада <sup>152</sup>Eu.

Методика эксперимента и измерения

Энергетическое распределение электронов “встряски” при внутренней конверсии измерялось в ε-распаде <sup>152</sup>Eu для интенсивного конверсионного перехода 122 кэВ в совпадениях с интенсивным каскадным переходом γ1408 кэВ. Регистрация электронов “встряски”, спектр которых низкоэнергетичен, осуществлена непосредственно и по образуемым ими e<sub>0</sub>-электронам вторичной электронной эмиссии, при которой электроны “встряски” регистрируются с высокой эффективностью, а высокоэнергетические электроны нет. Работа выполнена на установке для измерения временных и энергетических спектров в γe<sub>0</sub>-совпадениях γ-квантов с электронами и e<sub>0</sub>-электронами вторичной электронной эмиссии [7]. Геометрия измерений представлена на рис. 1.

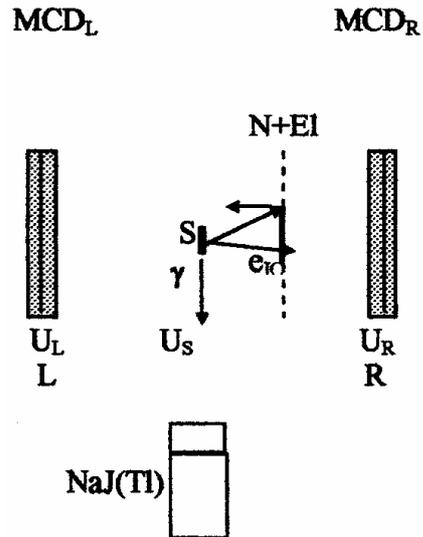


Рис. 1. Детекторы и геометрия эксперимента для измерения временных спектров γ(e<sub>IC</sub> + e<sub>Sh</sub> + e<sub>0</sub>)- и γe<sub>IC</sub>(e<sub>Sh</sub> + e<sub>0</sub>)-совпадений γ-квантов с электронами конверсии e<sub>IC</sub>, электронами “встряски” e<sub>Sh</sub> и e<sub>0</sub>-электронами при проведении пороговой регистрации электронов “встряски” по e<sub>0</sub>-электронам от электрода EI левым детектором при U<sub>S</sub> > U<sub>L</sub>, U<sub>EI</sub> = 0, U<sub>L</sub> = +190 В, U<sub>R</sub> = +250 В.

Поскольку медленный и задержанный (как эмиссионный)  $e_0$ -компонент во временных спектрах сдвинут по временной шкале от быстрого электронного компонента, можно, разлагая временной спектр, отдельно определить его интенсивность. Проводя измерения зависимости этой интенсивности от напряжения на источнике, являющимся пороговым для регистрации электронов “встряски”, можно получить по  $e_0$ -электронам экспериментальный интегральный спектр электронов “встряски” при внутренней конверсии, из которого затем вычисляется дифференциальный спектр.

На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $MCD_L$  и  $MCD_R$  – беспороговые детекторы электронов на основе шевронов микроканальных пластин; S – радиоактивный источник  $^{152}\text{Eu}$  30 мкг/см<sup>2</sup> на Al подложке толщиной 10 мкм, ориентированный подложкой к детектору L; N – сетка; E1 – Al толщиной 10 мкм; NaJ(Tl) – сцинтилляционный детектор  $\gamma$ -квантов.

Временной спектр формируется конвертором время-амплитуда по старту от  $\gamma$ -канала, отдельно или в совпадениях с правым (R) детектором, и по стопу от левого (L) детектора. Методика измерений электронов “встряски” при внутренней конверсии содержит тонкий электрод E1 из Al толщиной 10 мкм, на котором происходит образование  $e_0$ -электронов и от которого они при выбранных потенциалах  $U_S > U_L$ ,  $U_{E1} = 0$ ,  $U_R = +250$  В,  $U_L = +190$  В регистрируются только левым детектором  $MCD_L$ . Правым детектором отбираются и регистрируются электроны конверсии. Таким образом можно, изменяя потенциал  $U_S$  на источнике и проводя пороговые измерения, получить интегральный спектр электронов (“встряски”) в двойных и тройных совпадениях, начиная примерно с 200 эВ.

Для изучения “встряски” от конверсионного перехода 122 кэВ в распаде  $^{152}\text{Eu}$  методикой в  $\gamma$ -спектре от NaJ(Tl)-детектора отбирался каскадный переход  $\gamma_{1408}$  кэВ, заселяющий значительно конвертированный ( $\alpha = 1,17$ ) переход  $\gamma_{122}$  кэВ E2 для регистрации акта конверсии при отборе  $\gamma_{1408}(e_{IC122} + e_0)$ - и  $\gamma_{1408}e_{IC122}(e + e_0)$ -совпадений во временных спектрах. В измерениях необходимо учесть, что временной спектр, кроме изучаемого компонента “встряски” от конверсии, содержит также интенсивный компонент от Оже-спектра, всегда сопровождающих конверсию. Эту ложную фоновую регистрацию, которая имеет место и в двойных и в тройных совпадениях необходимо устранить или уменьшить. Вследствие наличия сильной пространственной корреляции электрон конвер-

сии – электрон “встряски” [6], обусловленной электрон-электронным взаимодействием (наблюдаемой также в сходном процессе двойной фотоионизации и при  $\beta$ -распаде [5, 10 - 12]), при которой обе частицы движутся в одну сторону, регистрация  $e_{0Sh}$ -электронов от электронов “встряски”  $e_{Sh}$  по отношению к  $e_{0Auger}$ -электронам является в тройных совпадениях в несколько раз предпочтительней, чем в двойных совпадениях. Вследствие этого измерения в двойных совпадениях могут служить фоновыми для измерений в тройных совпадениях. В качестве привязки при обработке данных может служить компонент рассеяния от электронов Оже, измеренный при смещении на источнике (порог регистрации) +2000 В, при котором по данным [3] интенсивность спектра электронов “встряски” уже мала, но при рассеянии еще регистрируются электроны Оже KLL- и LMM-групп.

Как показали измерения временных спектров в двойных и тройных совпадениях при различных потенциалах на источнике и электроде E1, во временных спектрах присутствует несколько компонент: от электронов конверсии, от низкоэнергетичных рассеянных электронов (в этот энергетический и временной диапазон попадают и электроны “встряски”) и от  $e_0$ -электронов.  $e_0$ -электроны образуются от электронов Оже и электронов “встряски”. На рис. 2 - 5 приведены отдельные серии измерений, на которых показаны эти компоненты и приведены результаты разложения спектров по этим компонентам, выполненные с помощью вычислительной программы обработки спектров.

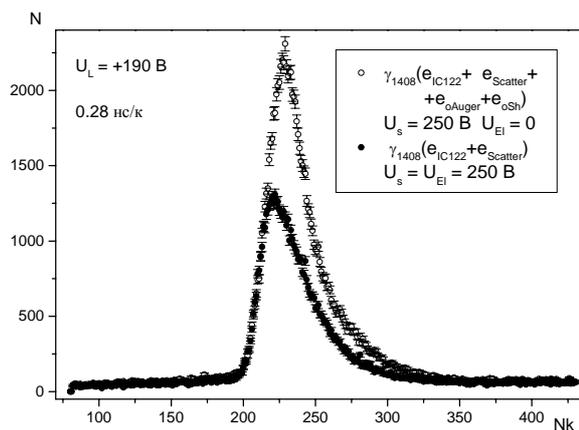


Рис. 2. Временные спектры в двойных совпадениях  $\gamma$ -квантов 1408 кэВ с электронами конверсии  $e_{IC122}$  из распада  $^{152}\text{Eu}$  (быстрый компонент, черные точки) и низкоэнергетичными электронами (медленный компонент, светлые точки). Медленная часть формируется рассеянными электронами  $e_{Scatter}$  и  $e_0$ -электронами, образующимися от электронов Оже и электронов “встряски”.

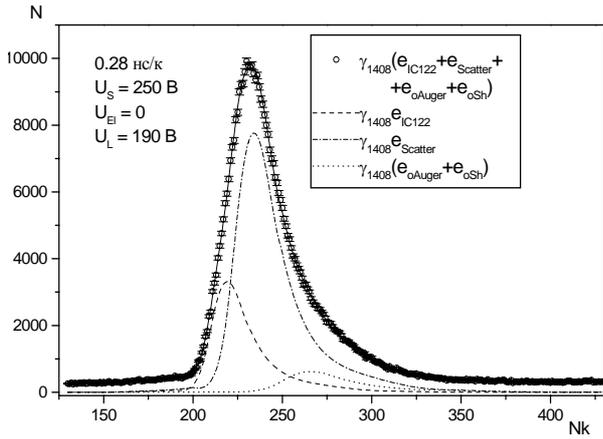


Рис. 3. Компоненты временного спектра  $\gamma_{1408}(e_{IC122} + e_{Scatter} + e_{oAuger} + e_{oSh})$ -совпадений с электронами конверсии  $e_{IC122}$ , рассеянными электронами  $e_{Scatter}$  и  $e_o$ -электронами в основном от низкоэнергетичных электронов Оже  $e_{oAuger}$  и электронов “встряски”  $e_{oSh}$ .

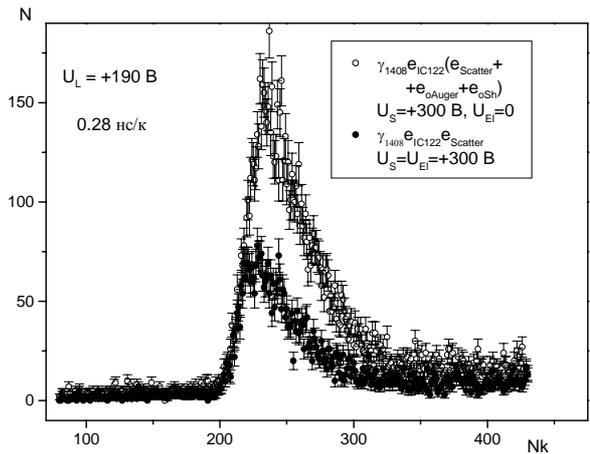


Рис. 4. Временные спектры в тройных совпадениях  $\gamma$ -квантов 1408 кэВ и электронов конверсии 122 кэВ из распада  $^{152}\text{Eu}$  с низкоэнергетичными электронами от рассеяния  $e_{Scatter}$  и  $e_o$ -электронами от электронов Оже  $e_{oAuger}$  и электронов “встряски”  $e_{oSh}$ .

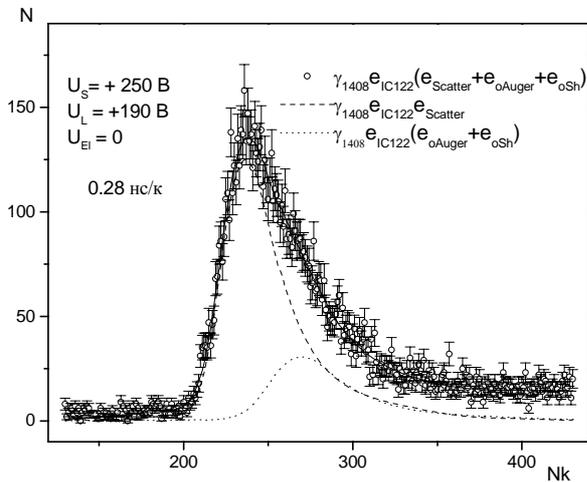


Рис. 5. Компоненты временного спектра  $\gamma_{1408}e_{IC122}(e_{Scatter} + e_{oAuger} + e_{oSh})$  от рассеянных электронов  $e_{Scatter}$  (низкоэнергетичные электроны Оже и электроны “встряски”) и от  $e_o$ -электронов ( $e_{oAuger}$  и электроны “встряски”  $e_{oSh}$ ).

Идентификация компонент осуществлена на основе изучения положения компонент временных спектров по мере увеличения порогового напряжения на источнике. В этом случае (и при  $U_{EI} = 0$ ) пик от рассеянных электронов сдвигается влево к пику от конверсии, уменьшается по интенсивности, а при  $U_s = U_{EI}$  его вклад в быстрый компонент минимальный. При тройных совпадениях компонент спектра от конверсионных электронов отсутствует, а  $e_o$ -компонент с изменением напряжения на источнике положения не меняет (как и при двойных совпадениях).

Временные спектры в тройных совпадениях  $\gamma$ -квантов 1408 кэВ и электронов конверсии перехода 122 кэВ с электронами и  $e_o$ -электронами, в которых эффект “встряски” из-за корреляций усилен, содержат две компоненты: от низкоэнергетичных рассеянных электронов (электроны Оже и электроны “встряски”) и от  $e_o$ -электронов, образующихся от электронов Оже и электронов “встряски”  $e_o$ -компонента в этом спектре более

**Интенсивности  $e_{IC}$ ,  $e$ ,  $e_o$ -компонент временного спектра в интегральных измерениях  $e_{IC}$ -компонент от электронов конверсии,  $e$  – от электронов Оже,  $e_o$  – от электронов Оже в  $\gamma e_o$ -измерениях и от электронов “встряски” и Оже в  $\gamma e_{IC}(e + e_o)$ -измерениях**

$U_s$ , eВ	$e_{IC}$	$e$			$e_o$			$\Sigma(e + e_o)$		P
		$\gamma e_o$	$\gamma ee_o$	$\gamma ee_o - \gamma e_o$	$\gamma e_o$	$\gamma ee_o$	$\gamma ee_o - \gamma e_o$	$\gamma e_o$	$\gamma ee_o - \gamma e_o$	
200	157,8(11)	408,2(16)	446(8)	37,8(82)	36,4(9)	85(8)	48,6(81)	445(2)	87(10)	0,21
250	155,5(9)	396,0(14)	399(4)	4,0(42)	37,5(7)	101(4)	64,8(41)	436(2)	64(6)	0,25
300	161,4(16)	378,6(20)	404(6)	5,4(63)	38,9(9)	90(6)	51,1(61)	418(2)	85(8)	0,30
350	158,7(16)	318,5(11)	344(6)	25,5(61)	29,2(11)	54(6)	25(6)	348(2)	50(8)	0,33
400	162,8(20)	321,4(23)	325(6)	3,6(64)	12,7(9)	46(5)	33,3(51)	334(2)	37(7)	0,37
500	175,9(16)	310,1(16)	311(6)	0,9(62)	7,0(5)	34(4)	27(4)	317(2)	28(7)	0,45
700	161,2(23)	256,3(23)	280(4)	23,7(46)	16,7(5)	29(4)	27,3(43)	258(2)	51(7)	0,58
1000	166,1(23)	215,0(23)	232(4)	17,0(46)	18,7(7)	22(4)	20,1(40)	217(2)	37(7)	0,76
1700	172,0(29)	171,6(29)	213(4)	41,4(49)	7(7)	24(3)	23(3)	172(3)	65(6)	1,0
2000	161,8(34)	184(4)	184(4)	0	7(7)	32(4)	31(4)	185(4)	30(60)	1,0

чем в два раза превосходит по интенсивности эту компоненту во временном спектре на двойных совпадениях, что указывает на большой вклад в ней от электронов “встряски”. Этот вклад определялся при вычитании фонового спектра, за который был принят временной спектр, измеренный в двойных совпадениях. В качестве привязки использовался компонент от рассеянных электронов, который выше 2000 эВ составляют электроны Оже и который одинаковым образом формируется и в двойных и в тройных совпадениях.

Основные результаты измерений приведены в таблице.

Таблица содержит значения интенсивностей компонент, измеренных в диапазоне 200 - 2000 эВ интегрального спектра. Результаты для электронов “встряски” и  $e_0$ -электронов от электронов “встряски” содержатся в колонках  $\gamma e_0$ ,  $\gamma e_0$ . Основной результат приведен в подколонке  $\gamma e_0 - \gamma e_0$  к колонке  $\Sigma(e + e_0)$ , в которой интенсивности электронов “встряски” и  $e_0$ -электронов от них просуммированы.

Измеренный интегральный спектр электронов “встряски” является очень низкоэнергетичным и искажен поглощением электронов в самом источнике  $^{152}\text{Eu}$  с поверхностной плотностью активного слоя 30 мкг/см<sup>2</sup>. Для получения экспериментального интегрального спектра необходимо ввести поправку на самопоглощение  $P$  в источнике, которая была получена в предыдущей работе [3] с учетом зависимости пробега низкоэнергетичных электронов в среде  $\sim E^{1.4}$  [8]:

$$P = \frac{\int \left( \frac{E}{1700} \right)^{1.4} \frac{dE}{E^2}}{\int \frac{dE}{E^2}}.$$

### Обсуждение результатов и выводы

Как можно видеть из таблицы, интенсивности  $e_0$ -компоненты “встряски” по данным  $\gamma e_0$  (с вычетом  $\gamma e_0$ ) в диапазоне 200 - 1700 эВ вследствие корреляции “электрон конверсии – электрон “встряски”” увеличены в 1,3 - 3 раза по сравнению с  $\gamma e_0$ -данными. При этом происходит относительное увеличение интенсивности  $e_0$ -компоненты “встряски” примерно в 2,5 раза, в то время как части от “встряски” (оцениваемые по  $e$ -компоненте в  $\gamma e_0$ -измерениях, где они при 200 и 1700 эВ составляют примерно 0,093 и 0,14) возрастают в 1,5 раза. Хотя экспериментальный разброс отдельных значений велик, эти данные дают некоторое указание на то, что скоррелиро-

ванность импульсов “электрон конверсии – электрон “встряски”” с возрастанием энергии электрона “встряски” возрастает.

Сам энергетический спектр электронов “встряски” был определен следующим образом. Сначала экспериментальные интегральные энергетических спектров были скорректированы поправкой  $P$  на самопоглощение в источнике. Затем, после дифференцирования, был получен энергетический спектр электронов “встряски” при внутренней конверсии от конверсионного перехода IC122 кэВ E2 в  $\epsilon$ -распаде  $^{152}\text{Eu}$ , который представлен на рис. 6.

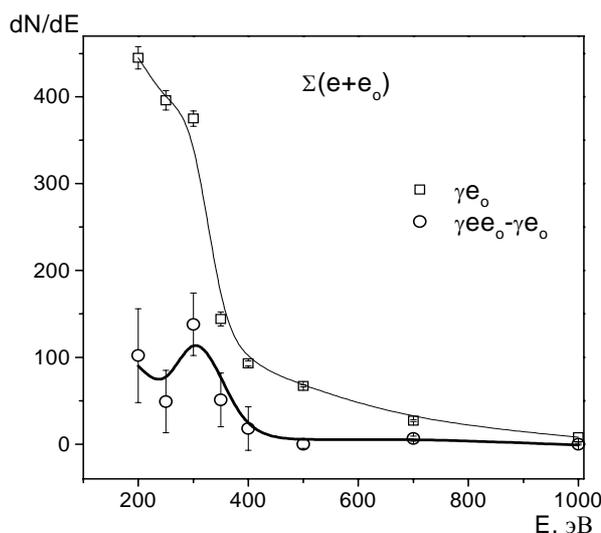


Рис. 6. Дифференциальные спектры электронов Оже ( $\gamma e_0$ -измерения) после внутренней конверсии и электронов “встряски” ( $\gamma e_0 - \gamma e_0$ -измерения) при внутренней конверсии перехода 122 кэВ E2 в  $\epsilon$ -распаде  $^{152}\text{Eu}$ .

На этом же рисунке представлен спектр электронов Оже, которые испускаются при заполнении вакансий в атомной оболочке после прошедших актов конверсии.

Спектр электронов “встряски” в  $\epsilon$ -распаде  $^{152}\text{Eu}$  (см. рис. 6) качественно такой же, как и в  $\beta$ -распаде  $^{152}\text{Eu}$ , полученный в предыдущей работе [3]. Он низкоэнергетичный, практически заканчивается в районе 400 - 500 эВ, а в районе 300 эВ наблюдается максимум энергетического распределения. Регистрируемый выход электронов “встряски” на акт конверсии составляет 0,037(4). Измеренный в той же геометрии измерений регистрируемый выход электронов “встряски” на акт  $\beta$ -распада составляет 0,049(3). С учетом эффективности регистрации низкоэнергетичных электронов и  $e_0$ -электронов, оцениваемой для использованной геометрии измерений с детекторами на МКП в 0,3, выходы электронов “встряски” на элементарный акт конверсии и  $\beta$ -распада составляют 0,111(12) и 0,147(9).

Близость значений выходов указывает на схожесть механизмов образования. Эта схожесть определена тем, что и при  $\beta$ -распаде и при внутренней конверсии “встряска” на внешних оболочках атома (где она основная) вызвана внезапным изменением заряда ядра на единицу при  $\beta$ -распаде или эффективного заряда на близкую величину при внутренней конверсии. При внутренней конверсии это происходит вследствие изменения экранировки ядра при конверсионных переходах, происходящих в основном на внутренних оболочках. Таким образом, волновые функции начального состояния системы в обоих случаях близки. А в приближении внезапности вероятность “встряски” пропорциональна квадрату интеграла перекрытия волновых функций начального и конечного состояния системы, который пропорционален встрясочному параметру  $\Delta Z/Z$ . Вследствие этого вероятности “встряски” при внутренней конверсии и  $\beta$ -распаде связаны соотношением  $P_{IC} = (\Delta Z)^2 P_{\beta}$  [1]. Все это определяет быстро падающий энергетический спектр,

сходство спектров “встряски” при конверсии и  $\beta$ -распаде и близость выходов электронов “встряски” на элементарный акт в обоих процессах. Полученное значение 0,111(12) выхода “встряски” при внутренней конверсии относится суммарно ко всем атомным оболочкам, в основном внешним. По-видимому это О- и Р-оболочки, поскольку теоретические расчеты выхода “встряски” (процесс “shake off”) от возникновения внутренней вакансии, выполненные в приближении внезапного возмущения в работе [2] для N-оболочки, дают на порядок меньшую величину, а вычислений для О- и Р-оболочек нет.

По энергетическому спектру электронов “встряски” при внутренней конверсии данных нет, ни теоретических, ни экспериментальных. Есть теоретические оценки спектра “встряски” при  $\beta$ -распаде на К-оболочке [9], которые описывают быстро падающий энергетический спектр электронов “встряски”, но они выполнены для более энергий электронов (выше 5 кэВ).

#### 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.* Энергетическое распределение электронов “встряски” при  $\beta$ -распаде  $^{152}\text{Eu}$  // Ядерна фізика та енергетика. - 2008. - № 1 (23) - С. 24 - 28.
4. *Митрохович Н. Ф.* Электроны “встряски” при  $\beta$ -распаде  $^{152,154}\text{Eu}$  // 36. наук. праць Ін-ту ядерних досл. - 2004. - № 2 (13). - С. 52 - 60.
5. *Митрохович Н. Ф.* Корреляция  $\beta$ -частиц с электронами “встряски” при  $\beta$ -распаде  $^{152}\text{Eu}$  // Current Problems in Nuclear Physics and Atomic energy: Proc. of the Int. Conf. (Kyiv, May 29 - June 03, 2006). - К., 2006. - С. 412 - 416.
6. *Митрохович Н. Ф., Купряшкин В. Т.* Корреляция электронов внутренней конверсии с электронами “встряски” при  $\varepsilon$ -распаде  $^{152}\text{Eu}$  // Ядерна фізика та енергетика. - 2007. - № 1 (19) - С. 61 - 66.
7. *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.
8. *Вятский А. И., Махов А. Ф.* Торможение электронов в металлах и полупроводниках // ЖТФ. - 1958. - Т. 28, № 4. - С. 690 - 697.
9. *Баткин И. С., Копытин И. В., Смирнов Ю. Г., Чуракова Т. А.* Ионизация внутренних оболочек атома в процессе  $\beta$ -распада // Ядерная физика. - 1981. - Т. 33, вып. 1. - С. 48.
10. *Weber TH., Giessen H., Weckenbrock M. et al.* Correlated electron emission in multiphoton double ionization // Nature. - 2000. - Vol. 405. - P. 658 - 661.
11. *Weckenbrock M., Hattas M., Gzsch 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.
12. *Moshammer 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.

#### ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗПОДІЛ ЕЛЕКТРОНІВ “СТРУСУ” АТОМНОЇ ОБОЛОНКИ ПРИ ВНУТРІШНІЙ КОНВЕРСІЇ

**М. Ф. Митрохович**

Проведено дослідження енергетичного спектра електронів “струсу” при внутрішній конверсії переходу 122 кеВ E2 у  $\varepsilon$ -розпаді  $^{152}\text{Eu}$ . Вимірювання виконано в діапазоні 200 - 1000 еВ на установці збігів  $\gamma$ -квантів та електронів з низькоенергетичними електронами, включаючи  $e_0$ -електрони вторинної електронної емісії ( $\gamma e_0$ -збіги). Реєстрацію електронів “струсу” здійснено безпосередньо, а також по створюваним ними  $e_0$ -електронах вторинної електронної емісії. Виміряно інтегральний спектр і на цій основі обчислено диференціальний спектр.

*Ключові слова:* електрони “струсу”, внутрішня конверсія.

**ENERGY DISTRIBUTION OF THE "SHAKE OFF" ELECTRONS OF THE ATOMIC SHELL  
AT INTERNAL CONVERSION**

**N. F. Mitrokhovich**

Researches of the energy spectrum of electrons of "shake off" are conducted at internal conversion of transition 122 keV E2 in the decay of  $^{152}\text{Eu}$ . The measurements are executed in the range of 200 - 1000 eV on the installation of coincidences of  $\gamma$ -quanta and electrons with low energy electrons, including a  $e_0$ -electrons of the secondary electron emission ( $\gamma e_0$ -coincidences). The registration of electrons of "shake off" implemented directly, and also on  $e_0$ -electrons, created by them. Integral spectrum was measured and on this basis the differential spectrum is calculated.

*Keywords:* "shake off" electrons, internal conversion.

Поступила в редакцию 05.02.09,  
после доработки – 01.07.09.