

ЭЛЕКТРОНЫ “ВСТРЯСКИ” ПРИ β -РАСПАДЕ ^{152}Eu

Н. Ф. Митрохович

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

На основании проведенных измерений двойных и тройных совпадений γ -квантов, конверсионных электронов (СЕ) и β -частиц на различных участках спектра $\Delta\beta$ с электронами (включая электроны околонулевой энергии e_0 -совпадения (γ , СЕ, $\Delta\beta$)-(e, e_0) и совпадения $\gamma\beta e_0$) измерен выход электронов “встряски” на акт β -распада ^{152}Eu для участков β -спектра с энергиями 77, 125, 300 и 350 кэВ. Для этих энергий приведены значение интенсивности электронов “встряски” (энергетический спектр электронов “встряски”) и выход вторично-эмиссионных e_0 -электронов от электронов “встряски” на акт β -распада. Установлено, что β -частицы и вызываемые ими электроны “встряски” скоррелированы в направлении вылета, испытывая преимущественное испускание в одну полусферу.

1. Введение

Изменение заряда ядра при α - и β -распадах воспринимается сравнительно медленными электронами как внезапное и сопровождается “встряской” электронных оболочек, их возбуждением и ионизацией [1]. Такая “встряска” происходит не только при ядерных переходах, а в той или иной степени при всех электронных переходах в атомах и наблюдаемые эффекты не всегда являются малыми [2]. Необходимость изучения эффектов типа “встряски” (“shake-off”, “shake-up”, “shake-down”) в различных процессах связана не только с тем, что без них невозможно изучать элементарные процессы в атомных оболочках, а еще с тем, что они указывают на наличие многоэлектронных корреляций в атомах [3], что дополнительно обуславливает большой экспериментальный и теоретический к ним интерес, но об этом несколько ниже.

Для описания процессов “встряски” используются модели внезапных возмущений и прямых соударений, введенные Мигдалом и Фейнбергом для описания ионизации атома при α - и β -распаде в 1941 г. В приближении внезапных возмущений строится теория возмущений, где малым параметром является не величина возмущения, а отношение времени изменения внешнего возмущения к характерному периоду квантовой системы. Таким временем может служить время пролета β -частицы через “встряхируемую” оболочку атома. Вероятность “встряски” при мгновенном изменении гамильтониана пропорциональна квадрату интеграла перекрытия волновых функций встряхиваемого электрона, а он пропорционален $\Delta Z^*/Z^*$, где ΔZ^* - изменение эффективного заряда ядра Z^* . Это приводит к монополярным правилам отбора по орбитальному моменту и его проекции $\Delta l = \Delta m = 0$ (которые электронные корреляции нарушают) и к тому, что, поскольку интеграл перекрытия довольно быстро убывает с ростом энергии “встряхиваемых” электронов, их энергетический спектр имеет максимальное значение при нулевой энергии [4]. Другой важной особенностью “встряски” является то, что в приближении внезапных возмущений (приближение “shake-off”) вероятность “встряски” не зависит от энергии β -частицы [5, 6]. Нужно также отметить то обстоятельство, что процесс ионизации атома при β -распаде имеет много общего с процессом двухэлектронной ионизации (при поглощении фотона или электронном ударе) [2, 7]. Это позволяет расширить область анализа данных по “встряске” при β -распаде, например, данными по двойной фотоионизации, которые указывают [8, 9], что оба электрона вылетают в одну полусферу, в то время как таких данных по β -распаду нет, а они нужны.

Наблюдение и изучение в процессах типа “встряски” корреляционного движения нескольких электронов в импульсном и спиновом пространстве представляет фундаментальный интерес и изучается в кинематически полном эксперименте в современной методике COLTRIMS [14]. Измерения, в основном, проводятся при двухэлектронной фотоионизации

(γ , $2e$) с синхротронными и лазерными источниками света, при электронном ударе в экспериментах (e , $3e$) и при бомбардировке атомной системы ионами. Исследования же по “встряске” рассматриваемого типа при β -распаде не многочисленны и не точны.

В данной работе исследования эффекта “встряски” в β -распаде ^{152}Eu предприняты как с целью изучения самого эффекта “встряски”, так и с целью изучения влияния неучета этого эффекта на точность измерения коэффициентов внутренней конверсии (КВК) по методике совпадений вторичных электронов околонулевой энергии (e_0) от излучения вакансии с γ -квантами [10, 11]. Поскольку по ранее проведенным оценкам [12] неучет образования e_0 -электронов от “встряски” может приводить к значительной экспериментальной ошибке (6 % и более), то для прецизионных измерений КВК существенно поточнее знать, во-первых, какая часть e_0 -электронов происходит от электронов “встряски” (e_{0sh}). Во-вторых - скоррелированы ли e_0 -электроны от электронов “встряски” с β -частицами, как электроны в (γ , $2e$) процессах [8, 9], и насколько, так как определяемыми Z -выходами e_0 -электронов (впервые введенные автором именно как Z от “Zero” для обозначения регистрируемой детектором интенсивности e_0 -электронов на акт β -распада) могут быть не только $Z = N_{\gamma e_0}/N_{\gamma}$ из γe_0 -совпадений, а и $Z = N_{\gamma \beta e_0}/N_{\gamma \beta}$ из $\gamma \beta e_0$ -совпадений, которые используются для снижения вклада в e_0 -компонент от β -частиц. Эти измерения важны также и для изучения свойств “встряски”, так как обнаружение корреляции направления вылета β -частицы и e_0 -электрона указывает на наличие и корреляции направлений вылета β -частицы – электрон “встряски”, поскольку e_0 -электроны могут образоваться только от низкоэнергетичных электронов “встряски”, вылетающих в полусферу наружу от радиоактивного источника. Измерения выхода e_0 -электронов от различных участков β -спектра в $\gamma \beta e_0$ -совпадениях, проводимые при определении КВК, дают также информацию об интенсивности низкоэнергетичного компонента спектра электронов “встряски” при β -распаде ^{152}Eu , поскольку вероятность образования электронов вторичной электронной эмиссии (e_0 -электроны) достигает больших значений при низких энергиях первичного электронного компонента (< 1 кэВ).

В данной работе исследования по “встряске” проведены на ядерно-спектроскопических установках, предназначенных для измерения спектров электронов внутренней конверсии и коэффициентов внутренней конверсии.

2. Методики измерений и результаты

Измерения по “встряске” при β -распаде ^{152}Eu проводились на спектрометре $\pi\sqrt{2}$ с позиционно-чувствительным детектором в фокальной плоскости, оснащенным NaJ(Tl) каналом совпадений с γ -квантами и каналом совпадений с e_0 -электронами от источника на беспороговом (МСР) детекторе электронов (рис. 1, а). Для выделения e_0 -компонента от электронов “встряски” (e_{0sh}) при β -распаде от других e_0 -компонентов и определения его величины измерялись временные спектры e_0 - $\gamma 1408$, e_0 - $\gamma 344$, e_0 -(К, L)(122, 344) совпадений e_0 -электронов с γ -квантами, электронами конверсии, совпадения e_0 -электронов с β -частицами на различных участках β -спектра ^{152}Eu , и в этих спектрах выделялся задержанный компонент. Для определения выхода самих электронов “встряски” от β -распада (e_{sh}) измерялись совпадения β -частиц с сопутствующим β -распаду электронным излучением “ненулевой” области при подаче на источник запирающего напряжения. На рис. 2 и 3 приведены некоторые измерения с поясняющими подписями и ниже по тексту даны определения основных величин, методы их измерения и учета фонового фактора, которому в работе было уделено особое внимание. Для e_0 - $\gamma 344$ совпадений таковым, в частности, является необходимость учета компонента совпадений e_0 - $\gamma 1408$ от комптоновского участка $\gamma 1408$ под фотопиком $\gamma 344$. Для e_0 - β совпадений (и в меньшей степени для e_{sh} - β) необходимо учитывать фон от рассеяния γ -квантов в геометрии $\pi\sqrt{2}$, который различен на разных участках β -спектра, формируется γ -квантами различной энергии по-разному (резко убывая с

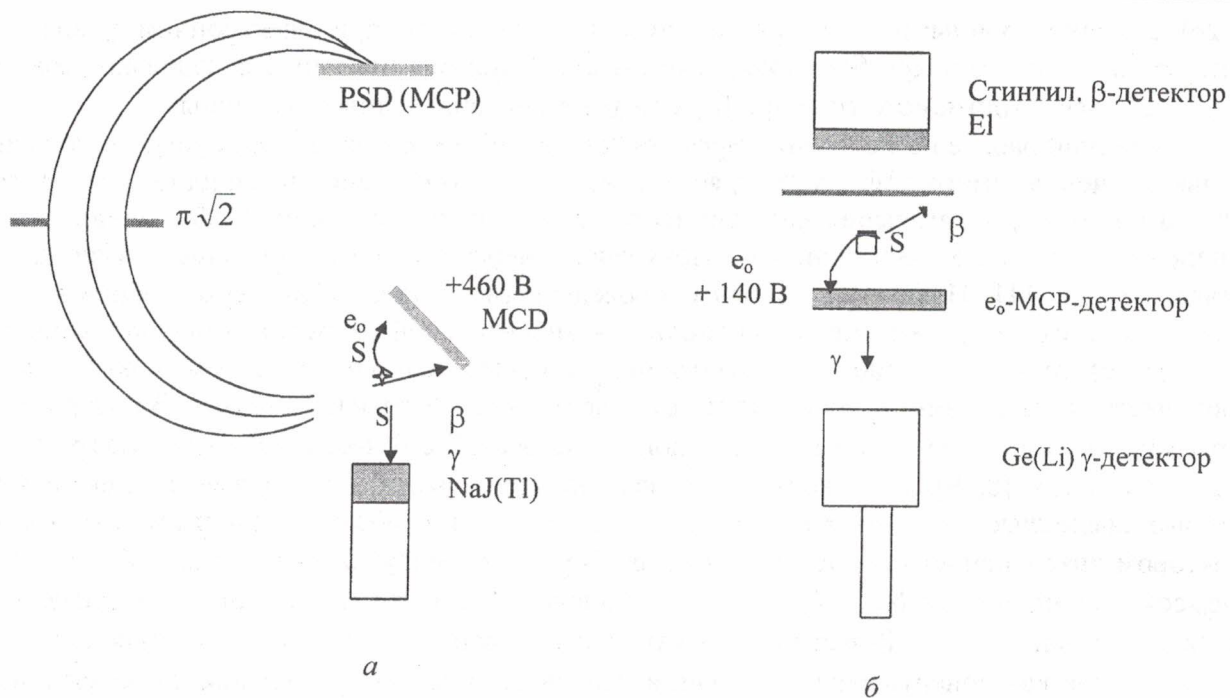


Рис. 1. Геометрии измерений совпадений конверсионных электронов, β -частиц и γ -квантов с e_0 -электронами: *a* - $(CE, \Delta\beta_{IC}, \gamma)-(e + e_0)$ совпадения на магнитном β -спектрометре $\pi\sqrt{2}$ высокого разрешения с позиционно-чувствительным детектором (PSD) в фокальной плоскости и регистрацией электронного (MCD) и γ -излучения (NaJ(Tl)) источника (S); *б* - $\gamma\beta e_0$ -совпадения в установке с регистрацией e_0 -электронов микроканальными пластинами (MCP), β -частиц – сцинтилляционным детектором, γ -квантов – Ge(Li) детектором, EI – Al фольга 10 мкм.

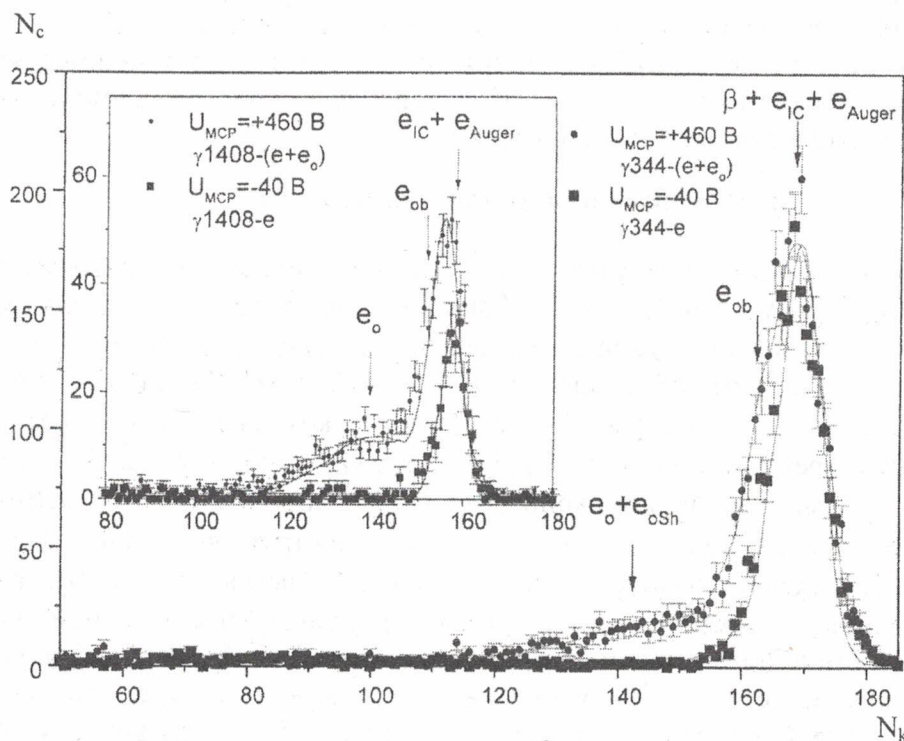


Рис. 2. Временные спектры $\gamma_{1408}-(e + e_0)$, $\gamma_{344}-(e + e_0 + e_{0sh})$ совпадений в распаде ^{152}Eu . e_0 , e_{0sh} , e_{ob} – “околонулевые” компоненты вторичной электронной эмиссии от вакансии, “встряски”, из подложки. e_0 , e_{0sh} образуются от поверхности источника вне действия собирающего электрического поля и задержаны. Подложка источника находится в электрическом поле (см. рис. 1, *a*) и e_{ob} -компонент мало задержан. e_{IC} , e_{Auger} , β - компоненты от электронов конверсии, Оже, β -частиц. Шкала 0,55 нс/канал.

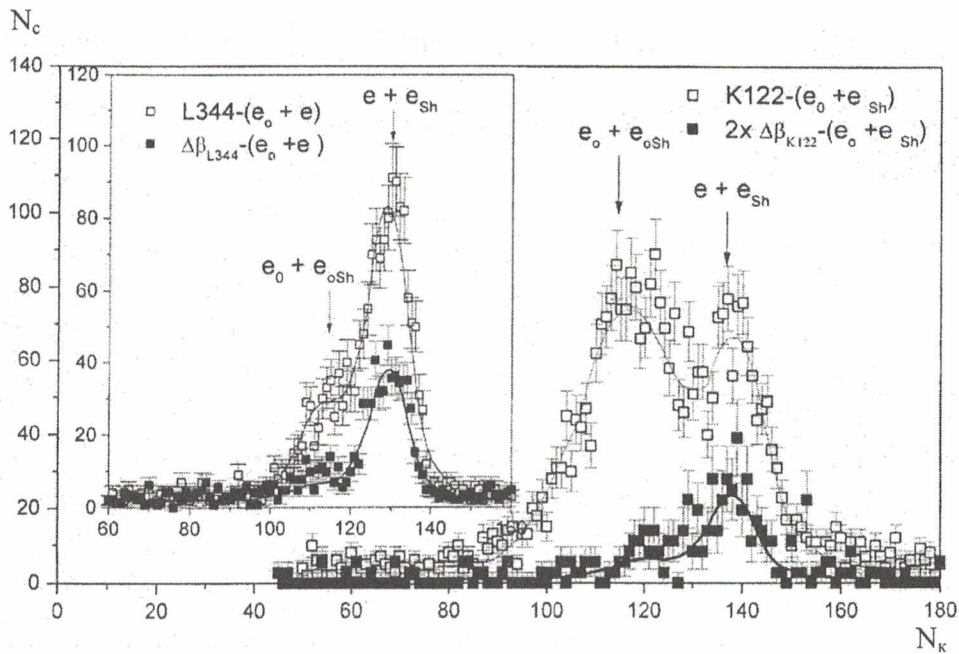


Рис. 3. Временные спектры совпадений конверсионных линий и участков $\Delta\beta$ -спектра с e_0 , e_{0Sh} -компонентами от вакансии, “встряски” и с электронами в распаде ^{152}Eu . Электроны вторичной электронной эмиссии e_0 , e_{0Sh} образуются от поверхности источника вне действия собирающего электрического поля детектора MCD (см. рис. 1, а) и задержаны. В незадержанный пик $e + e_{Sh}$ из-за ложных совпадений входит e_0 -компонента от подложки источника от прошедших через нее электронов. Шкала 0,55 нс/канал.

большого значения для γ_{122} с увеличением энергии) и создает ложные e_0 - γ и e - γ , как e_0 - β и e - β , совпадения. При этом наибольший фон имеет место в совпадениях e_0 -электронов с низкоэнергетичной частью β -спектра, где большой вклад от γ_{122} из ϵ -ветви ^{152}Eu создает ложные совпадения с e_0 -электронами от распада вакансии. Величина этого фона определена из зарегистрированного значения числа отсчетов в измеряемом интервале и ожидаемого его значения, исходя из значения КВК, формы β -спектра ^{152}Eu , интенсивности конверсионной линии над экспериментальным участком $\Delta\beta$, а также из интенсивности γ -линии измеряемого конверсионного перехода и интенсивности β^- -ветви в схеме распада ^{152}Eu . В отдельных измерениях определено содержание в источнике ^{154}Eu , присутствовавшего как примесь.

2.1. Измеряемые величины

$E_{\Delta\beta}$ - энергия измеряемого участка β -спектра ^{152}Eu $\Delta\beta$ (2 % по Вр). $(N_{\Delta\beta})^c$ - зарегистрированное (вместе с фоном) число отсчетов в измеряемом участке $\Delta\beta$ рядом с конверсионной линией, $(N_{\Delta\beta})^c = (\Delta\beta/\beta)(I_\beta N_{CE}/\alpha I_\gamma)$ - его ожидаемое по N_{CE} (число отсчетов в конверсионной линии), КВК α и интенсивностям в схеме распада I_β и I_γ значение в измеряемом участке $\Delta\beta$ под конверсионной линией; $(\Delta\beta/\beta)$ - доля участка $\Delta\beta$ в полном β -спектре, вычисляемая программно для β -спектра ^{152}Eu . $N_{\beta e}$ - получаемое после вычитания фона число совпадений β -частиц с электронами “встряски” (e_{Sh}), $(N_{\beta e})^c$ - его экспериментальное значение вместе с фоном. $N_{CE-(e_0, e)}$ - обозначает число совпадений конверсионных электронов с электронами (или с e_0 -электронами). $N_{\gamma(\beta, e_0)}$ - обозначает число совпадений γ -квантов с β -частицами или e_0 -электронами (или с e_{0Sh} -электронами). $N_{\gamma\beta e_0}$ - “околонулевой” компонент $\gamma\beta(e + e_0)$ -совпадений. $N_{\Delta\beta e_0}$ - задержанный компонент совпадений β -частиц с e_0 -электронами (с e_{0Sh} -электронами, без ложных совпадений) от сопутствующего β -распаду излучения “встряски” (e_{Sh}), испускаемого в ту же полусферу ($\Omega = 2\pi+$), что и β -частица. $(N_{\Delta\beta e})^{LE}$ - незадержанный компонент от совпадения β -частиц с e_0 -электронами из подложки от излучения “встряски” в полусферу $\Omega = 2\pi-$ и от совпадений β -частиц с низкоэнергетичными

электронами “встряски” e_{Sh} , испускаемыми в полусферу $\Omega = 2\pi+$, но регистрируемыми МСР (см. рис. 4).

2.2. Получаемые величины

$P_{Sh} = N_{\beta e}/N_{\Delta\beta}$ - вероятность “встряски” на акт распада (для собираемой части (<100 эВ) “shake-off” в угол $\Omega = 2\pi+$ и прошедшей через источник части (>30 кэВ) “shake-off” в угол $\Omega = 2\pi-$). $(dN/dE)^{Sh} = N_{\beta e}/(\Delta V\rho)\epsilon$ - спектр электронов “встряски”, исправленный на $\Delta V\rho$ и эффективность ϵ регистрации детектора МСР. $Z_{Sh}^{\Omega=2\pi+} = N_{\Delta\beta e_0}/N_{\Delta\beta}$ - выход e_0 -электронов от электронов “встряски” (e_{Sh}) в $\Omega = 2\pi+$. $Z_{Sh}^{\Omega=2\pi-} = (N_{\Delta\beta e})^{LE}/N_{\Delta\beta}$ - выход e_0 -электронов от электронов “встряски” в $\Omega = 2\pi-$ плюс часть (<100 эВ) “shake-off” в $\Omega = 2\pi+$ для интервала β -спектра $\Delta\beta$.

2.3. Данные эксперимента и параметры измерений

$\Delta\beta/\beta$ - программно определяемая часть измеряемого участка спектра $\Delta\beta$ от всего β -спектра; $P_{\Delta\beta}^{(152,154)}$ - доля β -спектра ^{152}Eu или ^{154}Eu в измеряемом участке спектра $\Delta\beta$; $\Delta P_{\gamma e}$ - доля избытка в $\Delta\beta$ -участке от рассеяния γ -квантов, создающих ложные βe -совпадения; P_e - оцененная доля в общем фоновом избытке от γ -квантов ΔP_{γ} ($\Delta P_{\gamma} = 100 - P_{\Delta\beta} - P_{\Delta\beta}^{154}$) для e -ветви распада ^{152}Eu ; $F(\sim V\rho)$ - частота настройки магнитного поля спектрометра $\pi\sqrt{2}$; ϵ_{ff} - эффективность регистрации детектора МСР.

В табл. 1 приведены данные интенсивностей e_0 - γ , e - γ и e_0 - e совпадений для $\gamma(344, 1408)$ и $(K, L)(122, 344)$. По ним определялся выход e_0 -электронов от электронов “встряски” для

Таблица 1. Интенсивности совпадений γ - и конверсионных переходов с e_0 -электронами в распаде ^{152}Eu

(CE, γ)	$N_{(CE,\gamma)}$	$N_{(CE,\gamma)-e_0}$	$N_{(CE,\gamma)-e_0\beta}$	$N_{(CE,\gamma)-(e+ed)}$	$N_{(CE,\gamma)-e}$
K122	48150(380)	746(21)		352(16)	221(11)
L122	55650(290)	995(20)		341(13)	295(10)
K344	8225(120)	141(7)		400(10)	361(10)
L344	1988(37)	53(4)		161(6)	135(4)
$\gamma 344$		482(31)	398(46)	1974(60)	1691(46)
$\gamma 1408$		270(11)	89.5(10)	474(15)	230(15)

Таблица 2. Экспериментальные данные по участкам $\Delta\beta$ β -спектра ^{152}Eu (частота настройки поля $\pi\sqrt{2}$, эффективность регистрации детектора ϵ_{ff}), по фоновым условиям измерений $\Delta P_{\gamma e}$ (ΔP_{γ}) и P_e , по регистрируемым и вычисляемым значениям основных величин: числа отсчетов $N_{\Delta\beta}$, числа совпадений β -частиц с электронами “встряски” $N_{\beta e}$ и с e_0 -электронами $N_{\beta(e+e_0)}$

$E_{\Delta\beta}$, кэВ	77	125	300	350
$(N_{\Delta\beta})^e$	1300(60)	1800(100)	4134(200)	4500(200)
$(N_{\Delta\beta})^c$	486(6)	1337(7)	3680(50)	3849(72)
$(N_{\beta(e+e_0)})^e$	26,3(38)	35,5(26)	78,8(33)	65,9(20)
$(N_{\beta e})^e$	15(4)	35,0(22)	68,9(33)	57,8(13)
$N_{\beta e}$	13(4)	26(2)	60(3)	44(1)
$\Delta\beta/\beta$, %	3,75	3,61	3,27	3,19
$P_{\Delta\beta}$, %	37,4(20)	74,3(35)	89(4)	85,5(43)
$(P_{\Delta\beta})^{154}$, %	8,6(4)	7,8(4)	4,80(25)	4,60(23)
$\Delta P_{\gamma e}$ (ΔP_{γ}), %	21,4(50) (54(5))	17,9(20)	6,20(60)	9,9(1)
P_e	~0,8	~0,3	~0,4	~0,4
$F(\sim V\rho)$, Гц	16406	21400	35777	39206
ϵ_{ff} МСР	0,21	0,53	0,97	1

β^- -спектра ^{152}Eu , фоновый вклад в незадержанный e_0 -компонент от ложных совпадений (из-за рассеяния γ -квантов в геометрии $\pi\sqrt{2}$) электронов, прошедших через подложку источника (e_{ob} на рис. 2), а также определялся выход e_0 -электронов от излучения распада вакансии и эффективность регистрации МСР детектора, требуемые при определении вклада ложных совпадений. В табл. 2 приведены экспериментальные данные для участков измерения $\Delta\beta$, их ожидаемые или вычисляемые значения и другие данные эксперимента. В табл. 3 приведены основные экспериментальные результаты для выхода электронов “встряски” $P_{Sh} = N_{\beta e}/N_{\Delta\beta}$ на акт β -распада, для спектра электронов “встряски” $(dN_{\beta e}/dE)_{Sh}$, а также данные для выходов e_0 -электронов $Z_{Sh}^{\Omega=2\pi^+}$ и $Z_{Sh}^{\Omega=2\pi^-}$ на акт β -распада от “встряски” ($Z_{Sh} = (N_{\beta-e_0})_{Sh}/N_{\Delta\beta}$) в полусферы $\Omega = 2\pi^+$ и $\Omega = 2\pi^-$ для участков β -спектра 77, 125, 300, 350кэВ. Выход $Z_{Sh}^{\Omega=2\pi^-}$ содержит также вклад от низкоэнергетичных электронов “встряски” (<100 эВ), испускаемых в полусферу $\Omega = 2\pi^+$.

2.4. Определяющие соотношения

$N_{\beta e}^{152,154} = (N_{\beta e})^c - (N_{\Delta\beta})^c (\Delta P_{\gamma e}/100)(P_{\epsilon}(\Delta P_{\gamma 1408-e_0}/\Delta P_{\gamma e})I_{\gamma 122}\alpha_{\gamma 122}\epsilon_{IC\gamma 122} + (1 - P_{\epsilon})\epsilon_{\beta})$. – Из зарегистрированного числа совпадений $(N_{\beta e})^c$ вычитается ложный вклад от регистрации γ -квантов в совпадениях с конверсионными электронами от $\gamma 122$ (для ϵ -ветви ^{152}Eu) и β -частицами (для β -ветви ^{152}Eu); $\epsilon_{IC\gamma 122} = (\epsilon_{74}\alpha_K + (\alpha_{tot}-\alpha_K)\epsilon_{115})\alpha_{tot} = 0,0158$; $\epsilon_{\beta} = N_{K344-e}/N_{K344} = 0,0359$, $\epsilon_{\beta 695} = 0,0349$, принятое среднее $\epsilon_{\beta} = 0,0355$.

$N_{\beta e} = N_{\beta e}^{152,154} - (P_{\Delta\beta})^{154}\epsilon_{IC\gamma 122}/100$. – Вычитается вклад от ^{154}Eu .

$P_{Sh} = N_{\beta e}/N_{\Delta\beta}$. – Выход электронов “встряски” на акт β -распада.

$(dN/dE)_{Sh} = N_{\beta e}/\Delta(B\rho)\epsilon_{\Delta\beta}$. – Характеризует энергетический спектр электронов “встряски” при β -распаде ^{152}Eu в произвольных единицах.

$Z_{Sh}^{\Omega=2\pi^+} = N_{\beta-e_0}/N_{\Delta\beta}$. – Выход e_0 -электронов от электронов “встряски” в полусферу $\Omega = 2\pi^+$, $N_{\beta-e_0}$ – задержанный компонент βe_0 -совпадений.

$(Z_{Sh})^{2\pi^+} = 100(N_{\Delta\beta-e_0} - (1 - P_{\Delta\beta}/100)P_{\epsilon}Z_{\epsilon})/P_{\Delta\beta}$, вычитается ложный вклад от совпадений с e_0 -электронами распада вакансии для ϵ -ветви ^{152}Eu , $Z_{\epsilon} = Z_{K122}/2$. $Z_{\epsilon} = 0,00747(22)$.

$Z_{Sh}^{\Omega=2\pi^-} = (N_{\beta-e_0})^{LE}/N_{\Delta\beta}$. $(N_{\beta-e_0})^{LE}$ – незадержанный компонент βe_0 -совпадений (см. п. 2.2), из которого исключен ложный e_0 -компонент совпадений от электронов, прошедших через подложку источника ($Z_{ob} = 0,0050(14)$).

3. Обсуждение результатов и выводы

Основные результаты измерений по электронам “встряски” и образующимся от них электронах околонулевой энергии при β -распаде ^{152}Eu , совместно с результатами выполненных автором $\gamma\beta e_0$ -совпадений [12] на установке с $\text{Ge}(\text{Li})$ детектором (см. рис. 1, б), приведены в табл. 3. Таблица содержит данные по “встряске” из измерений с участками спектра $\Delta\beta$ на спектрометре $\pi\sqrt{2}$ и из измерений с отдельными β -компонентами ^{152}Eu (две нижние строчки табл. 3). Компоненты $Z_{Sh}^{\Omega=2\pi^+}$ и $Z_{Sh}^{\Omega=2\pi^-}$ просуммированы для сравнения со значением $Z_{Sh}^{\Omega=4\pi}$ из $\gamma\beta e_0$ -совпадений. Для объяснения геометрий $\Omega = 2\pi^+$ и $\Omega = 2\pi^-$ при отборе совпадений β -частиц с электронами “встряски” и с e_0 -электронами и для объяснения того, какие излучения при этом формируют $N_{\beta-e_0}$ -совпадения, приводится рис. 4.

Как можно видеть из табл. 3, результаты измерений в двух различных методиках согласуются между собой, показывая что выход e_0 -электронов от электронов “встряски” при малых энергиях резко возрастает, оставаясь при больших энергиях в пределах экспериментальных погрешностей примерно постоянным. Это можно объяснить характером измеренного спектра $(dN/dE)_{Sh}$ электронов “встряски”, который в области малой энергии резко возрастает. Такой характер энергетического спектра электронов “встряски” подтверждается теоретическими оценками спектра “встряски”, выполненными в работе [13].

Таблица 3. Основные экспериментальные результаты по выходу электронов “встряски” P_{Sh} , их спектру $(dN/dE)_{Sh}$ и выходу e_o -электронов от электронов “встряски” на акт β -распада ^{152}Eu

$E_{\Delta\beta}$, кэВ	77	125	300	350
$^*P_{Sh}$	0,0265(80)	0,0228(15)	0,0173(9)	0,0129(4)
$^*(dN/dE)_{Sh}$	148(53)	89(7)	63,8(34)	41,5(10)
$^*Z_{Sh}^{\Omega=2\pi+}$	0,0165(80)	0,0024(10)	0,00116(34)	0,00187(35)
$^*Z_{Sh}^{\Omega=2\pi-}$	0,0183(80)	0,00(1)	0,0021(9)	0,0015(10)
$^*Z_{Sh}^{\Omega=4\pi}$	0,035(11)	0,0024(10)	0,00326(90)	0,0034(10)
$^{**}E_{\beta}$, кэВ	175	384	695	1063
$^{**}Z_{Sh}^{\Omega=4\pi}$	0,031(7)	0,0023(30)	0,0026(4)	0,0037(20)

* Измерения в геометрии 1а, $(Z_{\beta})_{Sh} = 0,0045(3)$.

** Измерения в геометрии 1б.

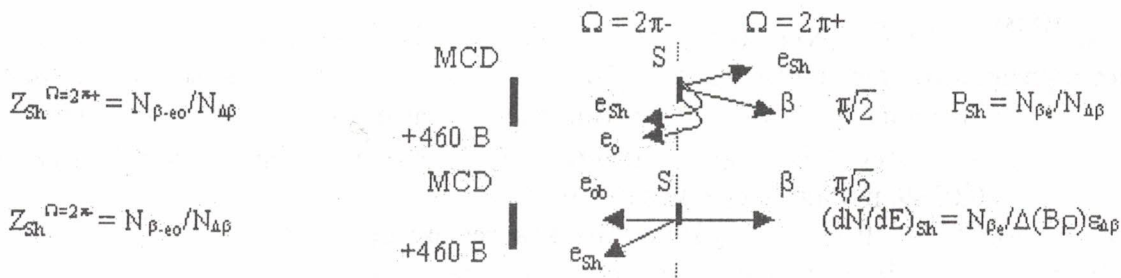


Рис. 4. Связь основных измеряемых величин с геометрией $\Omega = 2\pi+$ и $\Omega = 2\pi-$ при отборе совпадений β -частиц с электронами “встряски” (e_{sh}) и с e_o -электронами от электронов e_{sh} .

Это также подтверждается экспериментальными данными работы [15], в которой измерена энергетическая зависимость выхода электронов околонулевой энергии от энергии β -частицы, хотя в этой работе e_o -компонент вторичной электронной эмиссии от электронов “встряски” и собственно электроны “встряски” не различаются. Других экспериментальных данных по энергетическому спектру (именно спектру, а не выходу) электронов “встряски” нет. Экспериментально регистрируемый выход P_{Sh} электронов “встряски”, как и $(dN/dE)_{Sh}$, с уменьшением энергии также возрастает. Учитывая, что выход электронов “встряски” в приближении внезапных возмущений, как свидетельствуют экспериментальные и теоретические данные [5 - 7] от энергии β -частицы не зависит, такая зависимость P_{Sh} означает, что с уменьшением энергии интенсивность низкоэнергетической части “встряски”, собираемой полем детектора (см. рис. 4), возрастает. Это подтверждается и характером спектра $^*(dN/dE)_{Sh}$. Значения P_{Sh} , сравнимы с вероятностью регистрации β -спектра детектором MCD и это означает, что β -частицы, вызывающие “встряску”, и электроны “встряски” испускаются в одну полусферу. Такой вывод подтверждается результатами по двойной фотоионизации [8, 9]. Он указывает на существование корреляции направлений вылета β -частицы и “вытряхнутого” ею электрона, испускающихся в одну полусферу, дополняя таким образом соответствующую, не очень обширную, информацию данными из β -распада.

Учет полученных в данной работе результатов важен также при проведении ядерно-физических исследований с участием вторичных электронов от β -распада, например при измерениях КВК γ -лучей [11, 12], при которых неучет эффекта “встряски” при β -распаде может приводить к экспериментальной ошибке в 6 % и более [12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Альфа-, бета- и гамма-спектроскопия* / Под ред. К. Зигбана. - М., 1969. - Вып. 4. - С. 222.
2. *Матвеев В. И., Парилис Э. С.* // *Успехи физических наук.* - 1982. - Т. 138, вып. 4. - С. 573 - 602.

3. *Kheifets A.* // J. Phys. B.: At. Mol. Opt. Phys. - 2001. - Vol. 34. - L247 - L252.
4. *Krause M. O., Carlson T. A., Dismukes R. D.* // Phys. Rev. - 1968. - Vol. 140. - P. 37
5. *Mateosian E.* // Phys. Rev. A. - 1971. - Vol. 3. - P. 573 - 577.
6. *Isozumi Y., Shimuzu S.* // Phys. Rev. C. - 1971. - Vol. 4. - P. 522 - 535.
7. *Шияновский В. И.* // ЖЭТФ. - 1989. - Т. 95, вып. 2. - С. 467.
8. *Weber T., Giessen H., Weckenbrock M. et al.* // Nature. - 2000. - Vol. 405. - P. 658 - 661
9. *Weckenbrock M., Hattas M., Czash A. et al.* // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. - 2001. - Vol. 34. - L449 - L455.
10. *Митрохович Н. Ф.* // Изв. РАН. Сер. физ. - 2000. - Т. 64, № 3. - С. 567 - 571.
11. *Митрохович Н. Ф.* // Збірник наукових праць Інституту ядерних досліджень. - 2001. - № 1(3). - С. 67 - 70.
12. *Митрохович Н. Ф.* // Там же. - 2002. - № 2(8) - С. 70 - 74.
13. *Баткин И. С., Копытин И. В., Смирнов Ю. Г., Чуракова Т. А.* // Ядерная физика. - 1981. - Т. 33, вып. 1. - С. 48.
14. *Dorner R., Mergel V., Jagutski O. et al.* // Physics Report - 2000. - Vol. 330. - P. 95 - 192.
15. *Куприяшкін В. Т., Сидоренко Л. П., Феоктистов О. І., Шаповалова І. П.* // Укр. фіз. журн. - 2001. - Т. 46, № 8. - С. 820 - 824.

ЕЛЕКТРОНИ “СТРУСУ” ПРИ β -РОЗПАДІ ^{152}Eu

М. Ф. Митрохович

На основі проведених вимірювань подвійних і потрійних збігів γ -квантів, конверсійних електронів (СЕ) і β -частинок на різних ділянках спектра $\Delta\beta$ з електронами (включаючи електрони близьконульової енергії e_0 -збіги (γ , СЕ, $\Delta\beta$)-(e, e_0) і збіги $\gamma\beta e_0$) виміряно вихід електронів “струсу” на акт β -розпаду ^{152}Eu для ділянок β -спектра з енергіями 77, 125, 300 і 350 кеВ. Для цих енергій наведено значення інтенсивності електронів “струсу” (енергетичний спектр електронів “струсу”), а також вихід вторинно-емісійних e_0 -електронів від електронів “струсу” на акт β -розпаду. Встановлено, що β -частинки та електрони “струсу”, що викликаються ними, сильно скорельовані в напрямі вильоту, зазнаючи переважного вильоту в одну напівсферу.

“SHAKE-OFF” ELECTRONS IN THE β -DECAY ^{152}Eu

N. F. Mitrokhovich

Based on measuring of double and triple coincidences γ -quants, conversion electrons (CE) and β -particles on different spectrum parts $\Delta\beta$ with electrons (including the electrons of near-zero energy e_0 -coincidence (γ , CE, $\Delta\beta$)-(e, e_0) and coincidence $\gamma\beta e_0$) the output of “shake-off” electrons is measured per on act β -decay ^{152}Eu for parts β -spectrum with energies 77, 125, 300 and 350 keV. Intensity value of “shake-off” electrons (energetic spectrum of “shake-off”-electrons), and also the output of secondly-emissive e_0 -electrons from “shake-off”-electrons on act β -decay is given for these energies. It is proved that β -particles and “shake-off” electrons evoked by them are strongly correlated in direction of flight, demonstrating predominantly emitting to the same half sphere.

Поступила в редакцію 28.01.03,
после доработки - 13.03.03.