

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
НАУЧНЫЙ ЦЕНТР "ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ"

На правах рукописи
УДК 539.163

Казисвецкий Александр Борисович

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ЭЛЕКТРОНОВ ОЖЕ
В РАДИОАКТИВНОМ РАСПАДЕ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНОГО
БЕТА-СПЕКТРОМЕТРА ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Специальность 01.04.16 физика ядра и
элементарных частиц.

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико - математических наук

КИЕВ - 1996

Диссертацией является рукопись.
Работа выполнена в НЦ "Институт
УКРАИНЫ.

АВ 36.844
ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00761098 (V)

Научные руководители: доктор ф

Феокистов Алексей Иванович
доктор физико-математических наук
Куприяшкин Владимир Тихонович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Шевченко Валерий Андреевич
кандидат физико-математических наук
Гаврилюк Виктор Иванович

Ведущая организация - Харьковский Государственный Университет

Защита состоится "30" января 1997г. в 16⁰⁰ часов на заседании
специализированного совета Д 01.68.01 при НЦ "Институт ядерных
исследований" НАН Украины по адресу: г. Киев, пр. Науки, 47.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ АН Украины.

Автореферат разослан "30" декабря 1996 г.

Учелны секретарь специализированного
совета

Чеснокова В.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Достоверную информацию о структуре и свойствах атомных ядер, энергиях и интенсивностях γ -переходов, их мультипольностях, эффекте проникновения, квантовых характеристиках состояний позволяют получить исследования электронов внутренней конверсии (ЭВК) с помощью магнитных бета-спектрометров высокого разрешения. Для улучшения работы таких спектрометров требуется разработка новых методов измерений.

Процессы, происходящие в атомном ядре, могут вызвать ионизацию внешних оболочек атома. Она приводит к изменению энергии связи электронов на внутренних оболочках и вызывает смещение конверсионных и оже-линий, изменение их интенсивностей. Такие эффекты очень слабы и требуют прецизионных измерений, которые можно выполнить только на бета-спектрометрах высокого разрешения. При этом относительные интенсивности конверсионных и оже-линий необходимо измерять с точностью 1%, а их относительное положение — с точностью 1 эВ.

Такие высокие требования вызвали необходимость усовершенствования некоторых узлов бета-спектрометра и автоматизации процесса измерения спектров конверсионных и оже-электронов. Высокая точность экспериментальных данных позволила провести проверку существующих теорий оже-процессов и обнаружить очень слабый эффект в атомах — изменение энергии оже-линии при различных способах возбуждения атома.

Цель работы. Поставлено несколько конкретных практических задач:

Создать автоматизированную систему управления источниками питания спектрометра на базе разработанных функциональных узлов и стандартных модулей КАМАК.

Провести точные измерения энергии и относительных интенсивностей линий оже-переходов KLL, KLM и KLN-групп в атоме Lu (лютеция) из распада ^{175}Lu (гафния). Полученные экспериментальные данные сравнить с результатами других исследований и теоретическими расчетами.

Разработать методику точных измерений и обработки результатов на ЭВМ для определения точных значений энергий и относительных интенсивностей оже-линий.

Исполн. В. Стефаник
АН України

Исследовать линии KLL-группы Оже-электронов L₁ из распада изотопа ¹⁷⁵Yb и сравнить значения энергий и относительных интенсивностей с данными, полученными нами из распада ¹⁷⁶Hf, а также с данными теоретических расчетов для атома L₁. Выяснить есть ли смещения оже-линий от способа образования вакансии для этого атома.

Провести измерение линий KLL-группы Оже-электронов для атома Ir (иридия) из распада изотопов ¹⁹¹Os и ¹⁹¹Pt. Сравнить полученные экспериментальные данные с теоретическими расчетами.

Исследовать зависимость энергии оже-электронов в атомах L₁ и Ir от способа образования вакансии .

Научная новизна работы.

Разработана и создана автоматизированная система управления источниками питания магнитного бета-спектрометра на базе разработанных узлов и стандартных модулей КАМАК. Она позволяет задавать оптимальный режим размагничивания, что повышает надежность проведения эксперимента и поддерживает необходимое разрешение прибора на высоком уровне. Создан функциональный узел развертки напряжения на радиоактивном источнике бета-спектрометра и автоматизирован процесс регистрации и считывания экспериментальных данных на ЭВМ типа IBM PC.

Проведены измерения L-линий внутренней конверсии $\gamma_{100.1}$ кэВ из распада ¹⁸²Ta для проверки характеристик спектрометра. Эти измерения показали, что автоматизированная система управления источниками питания спектрометра позволяет определять относительное положение линий с точностью ~ 1 эВ, а относительные интенсивности линий с точностью ~ 1 %.

Разработана методика измерений и обработки результатов на ЭВМ для точного определения значений энергий и относительных интенсивностей оже-линий.

Определены с высокой точностью энергии и относительные интенсивности оже-линии KLL-группы L₁. Полученные значения энергий линий KLL-группы Оже-электронов, отличается на 13 - 20 эВ от теоретических расчетов, что указывает на необходимость уточнения теоретических расчетов. Впервые проведены экспериментальные исследования KLM, KLN-групп Оже-электронов L₁, получены значения энергий и относительных интенсивностей для 14 линий этих групп оже-переходов.

Измерено смещение оже-линий KLL-группы Lu при электронном захвате в ^{176}Hf относительно оже-линий этой группы при β -распаде ^{176}Yb .

Определено экспериментальным путем смещение линий для KLL-группы Оже-электронов Ig при различных способах образования вакансии (электронный захват в ^{191}Pt и β -распад в ^{191}Os).

На основании полученных экспериментальных данных построена зависимость энергии взаимодействия между двумя электронными вакансиями на L-подоболочках от Z для области $60 < Z < 80$.

Научная и практическая ценность работы.

Созданная автором автоматизированная система управления источниками питания магнитного бета-спектрометра успешно используется для измерения спектров электронов внутренней конверсии, оже- и β -спектров, обеспечивая при этом основу для дальнейшей модернизации и усовершенствования спектрометра.

Полученные в работе экспериментальные значения энергий были измерены с точностью порядка 1 эВ, а относительные интенсивности линий KLL-группы оже-спектра Lu с точностью порядка 1% и могут быть использованы для уточнения теоретических расчетов.

Измеренные экспериментальные данные для энергий и относительных интенсивностей оже-линий KLM, KLN-групп могут быть использованы для уточнения теоретических расчетов, а также для идентификации линий в конверсионном спектре.

Методика измерений и обработки результатов на ЭВМ применяется для точного определения значений энергий и относительных интенсивностей оже-линий.

Впервые обнаруженный эффект смещения оже-линий в атомах Lu и Ig позволяет лучше понять природу зависимости энергии Оже-электронов от способа возбуждения атома.

Полученная зависимость энергии взаимодействия между двумя вакансиями на L-подоболочках от Z позволяет судить о механизмах динамики оже-процессов при перестройке электронной оболочки атома.

Апробация работы.

Изложенные в диссертации результаты исследований докладывались на 40-44 Международном Собрании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, на 8 (Ужгород, 1990), 9 (Дубна, 1992) и 10 (Валдай, 1994) Семинарах по точным измерениям в

ядерной спектроскопии, на ежегодных конференциях ИЯИ АН Украины. Основные результаты диссертации опубликованы в работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 122 страницы машинописного текста, в том числе 9 таблиц, 31 рисунок. Список литературы содержит 101 наименование на 10 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ.

Во введении обосновывается актуальность создания автоматизированной системы управления источниками питания магнитного бета-спектрометра и исследований выполненных на нем. Здесь сформулированы цель и основные задачи работы, а также результаты, которые выносятся на защиту.

Первая глава посвящена описанию созданной нами автоматизированной системы управления источниками питания магнитного бета-спектрометра. Создание автоматизированной системы связано с необходимостью управления работой спектрометра с помощью ЭВМ. Это позволило в автоматическом режиме проводить размагничивание бета-спектрометра. По заданной программе задавать напряжение на радиоактивном источнике спектрометра, а также проводить в автоматическом режиме считывание и обработку результатов измерений на ЭВМ. В связи с этим нами были разработаны высокостабильные источники питания управляемые от ЭВМ.

Структурная блок-схема автоматизированной системы управления бета-спектрометром показана на рис.1. Она состоит из следующих функциональных узлов:

1. Из крейта КАМАК N1 с модулем автономного контроллера крейта (КА), двух модулей скоростной передачи данных (МСПД).
2. Узла автоматизированного управления напряжением развертки на радиоактивном источнике бета-спектрометра.
3. Узла автоматизированной регистрации данных бета-спектрометра.
4. Функционального измерительно-вычислительного узла, состоящего из ЭВМ типа СМ-4 и ПМ РС, отдельного крейта КАМАК N2.
5. Узла автоматизированного размагничивания бета-спектрометра.

Программное обеспечение специально разработанное для управления бета-спектрометром хранится на жестком диске ЭВМ типа ПМ РС АР. При запуске оно переносится в память автономного

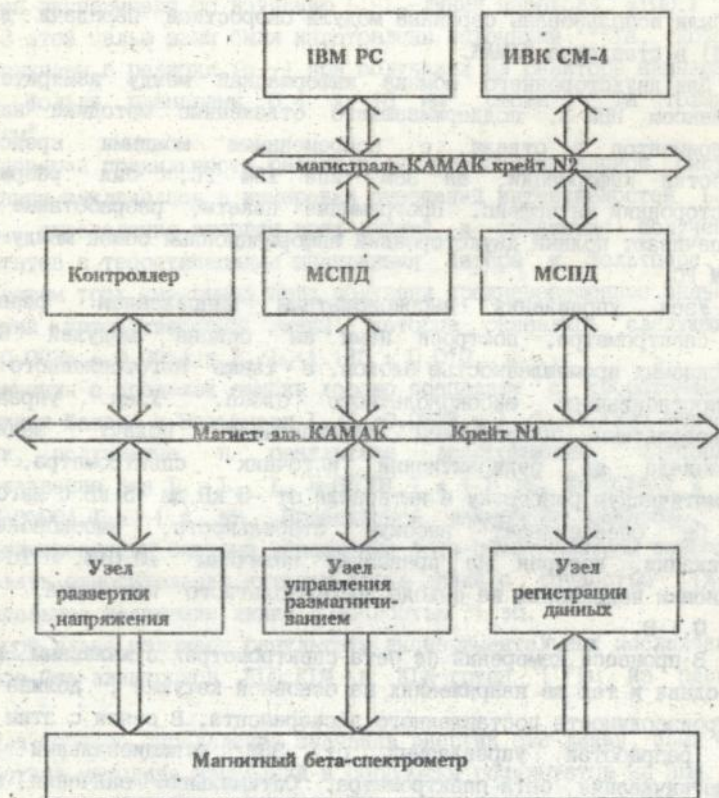


Рис. 1 Блок-схема автоматизированной системы управления бета-спектрометром.

контроллера крейта N1, который управляет работой всех функциональных узлов. Для организации связи бета-спектрометра с ЭВМ были использованы серийные модули скоростной передачи данных (МСПД) в стандарте КАМАК.

Для двухстороннего обмена информацией между измерительным комплексом ИВК-3, поддерживающего отлаженные методики научных экспериментов в отделе, с современными мощными средствами обработки информации, на ЭВМ типа IBM PC, был разработан двухсторонний интерфейс. Программные пакеты, разработанные нами обеспечивают полный двухсторонний информационный обмен между ИВК-3 и IBM PC.

Узел управления высоковольтным напряжением развертки бета-спектрометра, построен нами на основе модулей КАМАК, выпускаемых промышленностью блоками, а также изготовленного нами высокостабильного высоковольтного блока. Узел управления высоковольтным напряжением обеспечивает подачу заданного потенциала на радиоактивный источник спектрометра, его автоматическую развертку в интервале от -5 кВ до +5 кВ с шагом 0,1 В. Он обеспечивает высокую стабильность высоковольтного напряжения, которая не превышает величины $\pm 0,01\%$. Точность установки напряжения на выходе высоковольтного источника, не хуже 0,1 В.

В процессе измерений на бета-спектрометрах с железным ярмом, при одних и тех же напряжениях на основной катушке, должна быть воспроизводимость поставленного эксперимента. В связи с этим нами был разработан управляемый от ЭВМ функциональный узел размагничивания бета-спектрометра. Оптимальные значения циклов размагничивания задаются программно при помощи ЭВМ. Они записываются в память автономного контроллера крейта N1, который управляет работой блоков узла размагничивания бета-спектрометра.

Узел регистрации данных магнитного бета-спектрометра выполнен в стандарте КАМАК. Управление узлом регистрации данных осуществляется автономным контроллером. Измерения спектров электронов внутренней конверсии, оже и бета-спектров по выбранным в соответствии с заданной программой точкам производятся при постоянном магнитном поле путем снятия зависимости скорости счета импульсов счетчиков Гейгера-Миллера от величины электрического напряжения, приложенного между источником и камерой спектрометра.

Для определения точности, которую обеспечивает автоматизированная система управления бета-спектрометром, нами был проведен эксперимент по изучению L_1-L_3 -линий перехода $\gamma 100.1$ кэВ ^{182}W . С этой целью нами были изготовлены источники ^{182}Ta , которые были получены в реакции (n, γ) при облучении на реакторе напыленных на Al фольги размерами $0.4 \times 18 \text{ мм}^2$ слоев ^{181}Ta толщиной 30 мкг/см^2 .

Проверка правильности работы всей автоматизированной системы управления заключалась в измерении отношений интенсивностей L_1/L_2 и L_2/L_3 , определения энергии этих линий и сравнение полученных результатов с теоретическими значениями Хагера и Зельтцера. По результатам трех измерений были получены средневзвешенные значения отношений интенсивностей линий, которые оказались следующими: $L_1/L_2 = 0.0836 \pm 0.0014$ и $L_2/L_3 = 1.125 \pm 0.010$.

Эти значения в пределах ошибки хорошо совпадают с теоретическими значениями Хагера и Зельтцера $L_1/L_2 = 0.0828$ и $L_2/L_3 = 1.123$. Значения энергии, полученные в результате эксперимента, составляют соответственно для L_1 , L_2 , L_3 $E = 88007,7 \pm 1.5 \text{ эВ}$, $E = 88564,7 \pm 1.5 \text{ эВ}$ и $E = 89904,7 \pm 1.4 \text{ эВ}$. Проведенное измерение показало, что автоматизированная система управления бета-спектрометром позволяет определять относительную интенсивность линий с точностью $\sim 1\%$, а относительное положение линий с точностью $\sim 1 \text{ эВ}$.

Во второй главе изложены результаты экспериментальных исследований спектров Оже-электронов KL_1, KL_2 и KL_3 -групп ^{176}Lu из распада ^{176}Lu .

Для точного определения значения энергии оже-линий, нами была разработана методика измерений и обработки результатов на ЭВМ. Она заключалась в следующем. Чтобы определить энергии линий KL_1 -группы Lu необходимо в данном спектре иметь по крайней мере одну линию, которая известна с высокой точностью. Однако вблизи оже-спектра Lu такой линии нет. Поэтому, для энергетической привязки KL_1 -спектра Оже-электронов Lu был приготовлен специальный источник, в котором к ^{174}Lu был добавлен ^{169}Yb в весовом соотношении $47 : 1$. Полученная смесь изотопов напылялась в вакууме на алюминиевую подложку и облучалась на реакторе в (n, γ) -реакции. При распаде ^{169}Yb возникал KL_1 -спектр Tm, который был измерен ранее с высокой точностью. В ходе измерений мы определили энергию KL_2, L_3 -линии Lu с максимально возможной точностью и использовали ее в качестве

репера при определении энергии остальных линий KLL-группы Lu. В оже-спектре KL_2L_3 -линия наиболее интенсивная и одиночная, поэтому она удобная для этих целей. Нами были проведены измерения участка оже-спектра, содержащего KL_2L_3 -линии Lu и Tm, определена разность энергий между ними, она составляет $2589,8 \pm 1,8$ эВ. Значение энергии KL_2L_3 -линии Tm было определено ранее в нашем отделе с высокой точностью и составляет $40919,8 \pm 1,6$ эВ. Полученное в результате измерений абсолютное значение энергии KL_2L_3 -линии Lu составило $43509,6 \pm 1,8$ эВ. После определения энергии KL_2L_3 -линии атома Lu, мы провели измерение KLL-спектра Lu используя источник ^{176}Hf . Источник ^{176}Hf был приготовлен путем облучения на реакторе нейтронами мишени из тонких ($20-40$ мкг см^{-2}) слоев фторидов гафния HfF_4 . При обработке полученных данных, мы определили разность Δ энергий между KL_2L_3 -линией и линиями оже-спектра. Прибавляя или вычитая от значения энергии KL_2L_3 -линии соответствующие точные значения разностей Δ , мы определили значения энергий остальных линий KLL-спектра.

Методика обработки результатов измерений на ЭВМ, заключалась в следующем: одна из наиболее интенсивных линий в оже-спектре измерялась по возможности с максимальной статистической точностью. Затем вычитается фон, а сама линия описывалась в промежутках между экспериментальными точками методом кубических сплайнов. Эта линия использовалась в качестве приборной (табличной) линии, которая определяет экспериментальную форму линии. В нашем случае за приборную принималась KL_2L_3 -линия. Вписывание одной линии оже-спектра в другую проводилось на ЭВМ по специально разработанным программам. Обработка проводилась по методу наименьших квадратов. При этом варьировались параметры, фона под линиями, отношения амплитуд линий, положения линий в каналах и отношения полуширин линий. Исходные приближенные значения всех параметров и их приращения вводились с монитора ЭВМ. Искомые значения получались в результате минимизации величины:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{Y_i - Y_1}{\sigma_i} \right)^2,$$

где Y_i - наблюдаемая скорость счета в точке i , σ_i - ее неопределенность, N - количество точек на участке спектра.

Погрешности всех параметров α_i получают из параболической

зависимости $\lambda^2 = \lambda^2(\alpha_1)$, где α_1 — исследуемый параметр. Стандартные ошибки $\Delta\alpha_1$ определяются с помощью соотношения:

$$\lambda^2(\alpha_{\text{ОПТ}} \pm \Delta\alpha) = \lambda^2 + 1,$$

где $\alpha_1^{\text{ОПТ}}$ — оптимальное значение параметра α_1 , минимизирующее величину λ^2 .

Погрешность каждой линии оже-спектра складывалась из погрешности определения расстояния Δ между линиями оже-спектра и KL_2L_3 -линией, погрешности связанной с неточностью определения цены канала и погрешности в значении энергии KL_2L_3 -линии.

На рис. 2. представлен оже-спектр Lu , полученный в одной из серий измерений. Результаты измерений значений энергий линий KLL -группы оже-спектра Lu и относительных интенсивностей приведены в таблице 1. Сопоставляя полученные значения энергии KLL -линий с теоретическими значениями Ларкинса мы получили, что расчеты дают систематически заниженные на 13–20 эВ значения энергии для всех компонентов спектра, кроме KL_2L_3 -линии. Для нее расчет превышает эксперимент на 9 эВ. Проведенное измерение энергии KLL -группы оже-электронов имеет точность в 5–10 раз выше, чем в работах других авторов.

В таблице также проводится сравнение полученных относительных интенсивностей линий KLL -группы с результатами релятивистских расчетов Чена и др., которые в целом удовлетворительно согласуются с расчетными.

Нами были проведены измерения энергий и относительных интенсивностей линий оже спектра KIM и KIN -группы Lu . Оже-спектр этих групп линий Lu наблюдался в распаде ^{176}Rf . Для определения энергии линий этих групп оже-электронов, мы воспользовались тем обстоятельством, что в спектре оже-линий находится конверсионная линия $K113$ ^{176}Lu . Значение энергии этого γ -перехода составляет 113805 ± 4 эВ. Энергия связи K -электронов в Lu известна с высокой точностью из работы Бирдена и Бура. Ее значение составляет 63313.8 ± 0.5 эВ. Зная эти величины мы определили значение E_K -энергии $K113$, оно составляет 50490 ± 4 эВ.

В начале мы установили расстояние между конверсионной линией $K113$ и линией KL_1M_1 и определили ее абсолютную энергию 49874.2 ± 4.2 эВ. После вычитания фона KL_1M_1 -линия этого спектра использовалась в качестве приборной (табличной) линии, которая определяла форму экспериментальной линии в дальнейшей обработке по методу

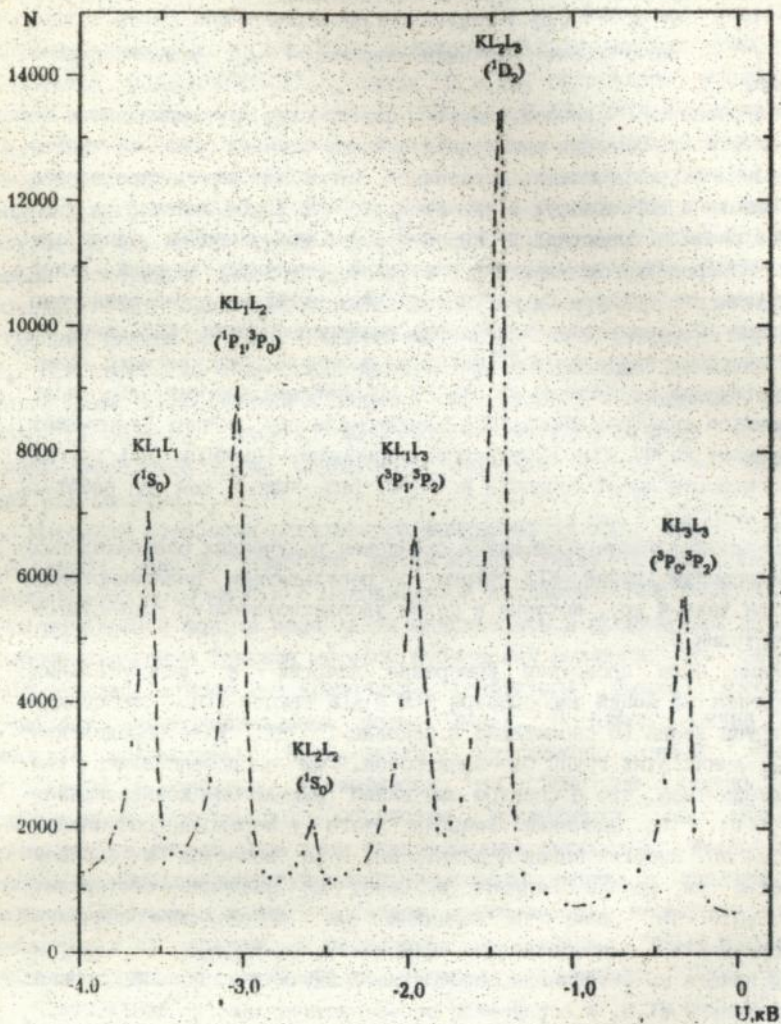


Рис. 2. Спектр KLL - линий Оже - электронов Lu.

Таблица 1.

Энергии и относительные интенсивности линий
KLL-группы оже-спектра Lu.

Линии оже-спектра	Энергия оже-линий, эВ		Относительная интенсивность		
	Наша работа	Теория Ларкинса	Наша работа	Расчет Чена и др.	
KL_1L_1 (1S_0)	41381,4(20)	41368,1	0,448(6)	0,459	
KL_1L_2	(1P_1)	41911,9(18)	41897,7	0,505(5)	0,436
	(3P_0)	41952,4(18)	41939,6	0,173(6)	0,269
KL_1L_3	(3P_1)	42990,5(20)	42968,8	0,341(5)	0,366
	(3P_1)	43060,4(25)	43044,1	0,132(4)	0,151
KL_2L_2 (1S_0)	42373 (3)	42383,3	0,079(4)	0,076	
KL_2L_3 (1D_2)	43509,6(18)	43490,0	1,00 (1)	1,00	
KL_3L_3	(3P_0)	44589 (4)	44560,6	0,072(4)	0,0764
	(3P_2)	44638,1(19)	44607,4	0,351(5)	0,381

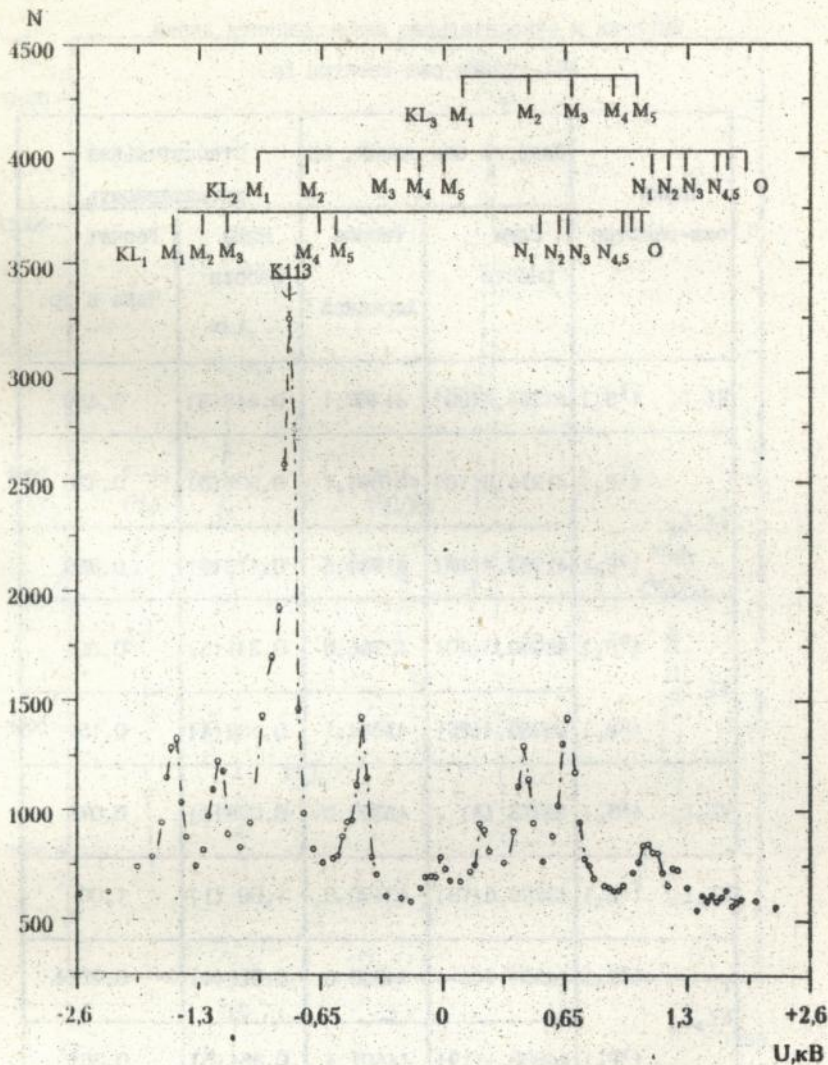


Рис.3. Спектр K LX-линий Оже-электронов Lu.

Таблица 2.

Энергии и относительные интенсивности
линий KIX-группы оже-спектра Lu.

Линии оже-спектра	Энергии оже-линий, эВ			Относительные интенсивности		
	Наша работа	Работа Гизона	Расчет Ларкинс	Наша работа	Работа Гизона	Расчет Бабенков
KL ₁ M ₁	49874(4)	49875	49865,2	100	100	100
KL ₁ M ₂	50110(4)	50118	50108,3	79(4)	78	79(5)
KL ₁ M ₃	50352(4)	50374	50343,4	68(3)	130	67(5)
KL ₂ M ₁	50409(4)		50399,2	80(9)		50(6)
KL ₂ M ₂	50592(4)	50950	50606,0	10(3)	110	13(3)
KL ₁ M ₄	50719(5)		50724,5	29(6)		19(4)
KL ₁ M ₅	50795(5)		50775,4	50(6)		48(4)
KL ₂ M ₃	50880(5)		50862,3	125(6)		120(5)
KL ₂ M ₄	51240(9)	51290	51232,7	8(6)	22	24(2)
KL ₂ M ₅	51312(8)		51291,7	14(6)		
KL ₃ M ₁	51513(5)	51512	51500,4	50(5)	35	44(5)
KL ₃ M ₂	51732(4)	51734	51727,9	110(5)	110	95(5)
KL ₁ N ₁	51910(5)	51966	-	30(5)	140	25(5)
KL ₃ M ₃	51971(4)		51941,0	106(5)		96(5)
KL ₁ N ₂	52009(5)	52060	-	36(5)	12	27(6)
KL ₁ N ₃	52044(7)		-	16(5)		
KL ₃ M ₄	52374(6)		52340	24(3)		32(5)
KL ₃ M ₅	52438(8)		52401,3	46(4)		32(5)

наименьших квадратов.

На рис.3: представлен участок оже-спектра, содержащий линии KLM и KLN-групп, полученный в одной из серий измерений. Из экспериментальных данных о положении линий в спектре мы определили значения разностей $\Delta E = E_{K_{L_{11}}} - E_{K_{L_{12}}}$, а затем по изложенной выше методике и значения энергии KLM и KLN-линий оже-спектра.

В таблице 2 приведены значения абсолютной энергии оже-линий после проведения обработки результатов измерения. Полученные нами значения энергии сравниваются с расчетами энергии KLM-линий выполненными Ларкинсом. Из таблицы 2 видно, что энергии наиболее интенсивных одиночных линий $K_{L_1}M_2$ и $K_{L_2}M_2$, хорошо совпадают с теоретическими. Для остальных линий оже-спектра значения энергии имеют расхождения с теоретическими расчетами от 5 эВ до 30 эВ.

Относительные интенсивности KLM и KLN-линий, полученные в наших измерениях, сравниваются с теоретическими значениями, приведенными в работе Бабенкова и удовлетворительно согласуются с нашими значениями.

Следует отметить, что KLM и KLN-переходы плохо исследованы для всей области Z. Всего KLN-спектр исследовался в 18 атомах. Нами впервые экспериментально определены значения энергии 14 линий переходов этой группы оже-электронов.

В третьей главе описаны эксперименты по исследованию зависимости энергии оже-электронов от способа образования вакансии на K-оболочке.

При измерении оже-спектров W было обнаружено, что энергии KLL-линий при β^- -распаде $^{182,183}\text{Ta}$ на $(4,5 \pm 1,5)$ эВ меньше, чем при электронном захвате $^{183,184}\text{Re}$. В последующих исследованиях были проведены измерения оже-спектров Eu. Оказалось, что при сравнении энергии оже-линий из распада ^{153}Gd (электронный захват) и ^{153}Sm (β^- -распад), при электронном захвате энергии KLL-линий на $(11,6 \pm 1,0)$ эВ больше чем при β^- -распаде. В данной работе продолжены исследования этого эффекта для атома Lu при β^- -распаде ^{176}Yb и электронном захвате в ^{176}Hf , а также для атома Ir при β^- -распаде ^{191}Os и электронном захвате в ^{191}Pt .

С этой целью нами были проведены измерения энергии $K_{L_2}L_3$ -линии оже-электронов Ir на магнитном бета-спектрометре. Радиоактивные источники ^{191}Pt и ^{191}Os были получены в (n, γ) -реакции при облучении на реакторе мишеней из тонких напыленных на

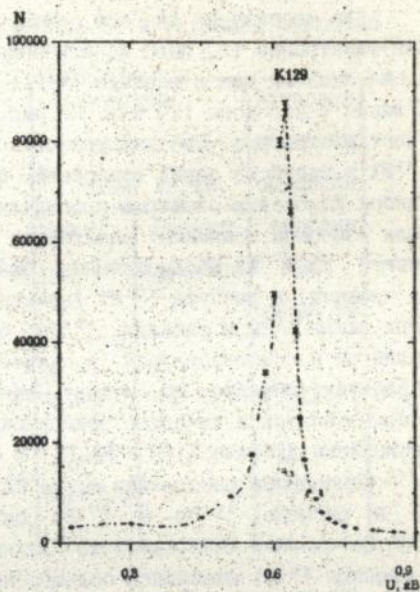
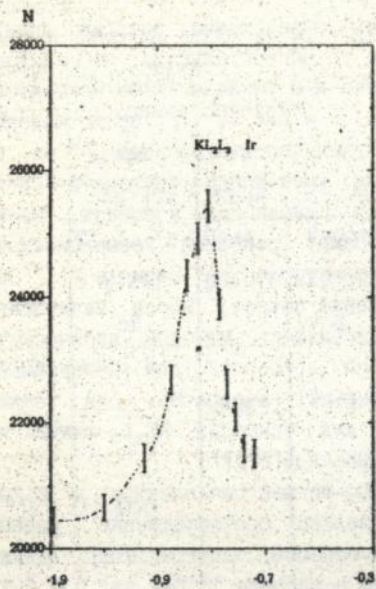


Рис.4. Участок спектра Γ в распаде ^{191}Os .

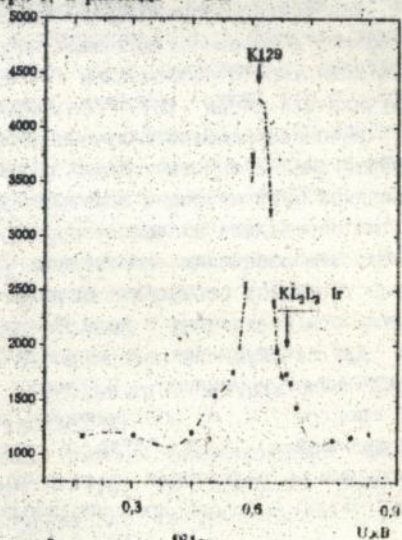
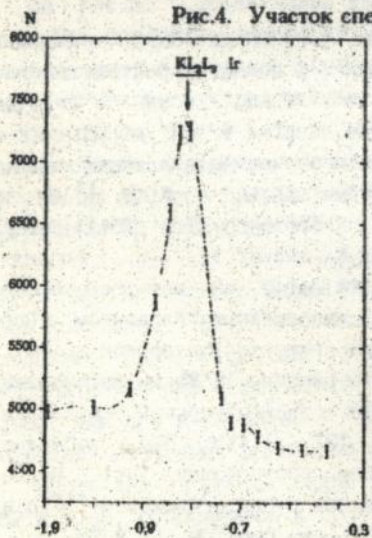


Рис.5. Участок спектра Γ в распаде ^{191}Pt .

алюминевую фольгу слоев ($30-50 \text{ мкг} \cdot \text{см}^{-2}$) ^{190}Pt и ^{190}Os .

Для достижения высокой точности определения энергии линий оже-электронов Iг , было использовано то обстоятельство, что рядом с оже-линиями как в распаде ^{191}Pt , так и в распаде ^{191}Os находится K -линия γ -перехода 129 кэВ. На рис.4. и рис.5. представлены участки спектров, оже-электронов полученные из распада ^{191}Os и ^{191}Pt в одной из серий измерений. Для уменьшения систематических ошибок измерения спектров проводили в одинаковых условиях. Нами были измерены взаимные расстояния между реперной конверсионной линией $\text{K}129$ и KL_2L_3 -линиями оже-электронов в распаде ^{191}Os (β^- -распад) и распаде ^{191}Pt (электронный захват). После вычитания фона линия $\text{K}129$ в распаде ^{191}Os описывалась методом кубических сплайнов и использовалась в качестве приборной для дальнейшей обработки спектра по методу наименьших квадратов, она также использовалась в качестве приборной для описания KL_2L_3 -линии и разложения дублета $\text{K}129 + \text{KL}_3\text{L}_3$ в распаде ^{191}Pt .

Измеренные расстояния между KL_2L_3 -линией оже-спектра и $\text{K}129 \text{ Iг}$ в распаде ^{191}Os и ^{191}Pt оказались соответственно равны $1506,8 \pm 1,5 \text{ эВ}$ и $1503,2 \pm 1,5 \text{ эВ}$. Таким образом, энергия KL_2L_3 -линии в распаде ^{191}Pt оказалась больше, чем в распаде ^{191}Os на $3,6 \pm 2,1 \text{ эВ}$.

Для точного определения энергии $\gamma 129$ нами было проведено измерение по разработанной нами методике. С помощью рентгеновского НРGe -детектора с разрешением 490 эВ на γ -линии 122 кэВ ^{57}Co , мы получили для линии $\gamma 129$ ^{191}Os значение энергии $129432 \pm 1 \text{ эВ}$.

Воспользовавшись полученным точным значением для линии $\gamma 129$, измеренными энергетическими разностями $\text{KL}_2\text{L}_3 - \text{K}129$ ^{191}Os и величиной энергии связи электрона на K -оболочке Iг : $76111,0 \pm 0,5 \text{ эВ}$, мы определили значение энергии KL_2L_3 -линии Iг в распаде ^{191}Os . Это значение составляет $51814,2 \pm 1,9 \text{ эВ}$ которое хорошо согласуется с расчетным значением выполненными Ларкинсом. Все результаты полученные в ходе измерений приведены в таблице 3.

Для исследования оже-спектра Lu в распаде ^{175}Yb мы изготовили специальные источники. В них для энергетической привязки KL -спектра Lu к обогащенному до 13% ^{174}Yb был добавлен обогащенный до 20,6% ^{169}Yb в весовом соотношении 13:1. После облучения на реакторе в (n, γ) -реакции при распаде изотопов ^{175}Yb и ^{169}Yb можно было одновременно наблюдать оже-спектры Lu и Tm .

Таблица 3.

Значение энергий линии γ_{129} , $K_{L_2L_3}$ -линии $I\gamma$ и величины смещения энергии $K_{L_2L_3}$ -линии.

Изотоп	Расстояние между линиями $K_{L_2L_3}$ $I\gamma$ и K_{129} , эВ	Значение энергии линии γ_{129} , эВ		Значение энергии $K_{L_2L_3}$ линии $I\gamma$, эВ		Значение величины смещения энергии $K_{L_2L_3}$ линий, эВ
		Наша работа	Работа Бирдена и Бура	Наша работа	Расчет Ларкинса	
^{191}Os	1503,2 (1,5)	129432	129431,0	51814,2	51815,7	3,6(2,1)
^{191}Pt	1506,8 (1,5)	(1,0)	(5,0)	(1,9)	51817,8	
				(1,5)		

На рис.6. представлен участок спектра, содержащий обе эти линии. При обработке измерений по программам $K_{L_2L_3}$ -линии ^{169}Tm использовалась в качестве приборной. Полученное в результате таких измерений взаимное расстояние между $K_{L_2L_3}$ -линиями в спектрах оже-электронов Lu и Tm оказалось равным $2584,1 \pm 0,9$ эВ. Воспользовавшись этой разностью энергии, а также величиной энергии $K_{L_2L_3}$ -линии Tm , составляющей $40919,8 \pm 1,1$ эВ, мы определили энергию $K_{L_2L_3}$ -линии Lu в распаде ^{176}Yb . Она оказалась равной $43503,9 \pm 1,4$ эВ. Это значение на 14 эВ превышает расчетное значение Ларкинса $43490,0$ эВ. Расстояние между $K_{L_2L_3}$ -линиями оже-спектра содержащего смесь изотопов $^{175}\text{Hf} + ^{169}\text{Yb}$, было определено ранее (см.гл.2) и составляет $2589,8 \pm 1,2$ эВ. Таким образом, энергия $K_{L_2L_3}$ -линии оже-спектра Lu при K -захвате в ^{175}Hf оказалась на $5,7 \pm 1,5$ эВ больше, чем при β -распаде ^{176}Yb . Результаты полученные в ходе проведения измерений приведены в таблице 4.

Кроме них на рис.6. видны также слабые конверсионные линии L_{252} и M_{46} , относящиеся к распаду ^{183}Ta . Мы измерили энергии линий L_{252} и M_{46} для ^{183}W значения их соответственно равны $41050,2 \pm 1,2$ эВ и $43663,9 \pm 1,3$ эВ. Они хорошо согласуются с

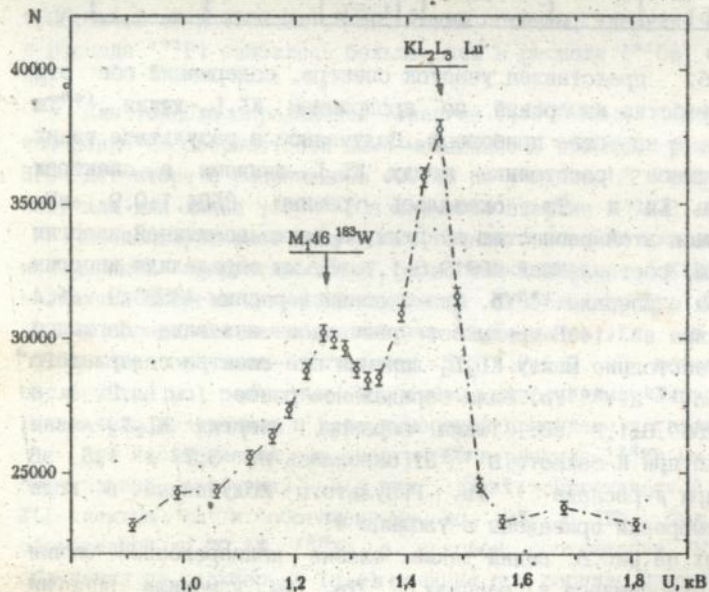
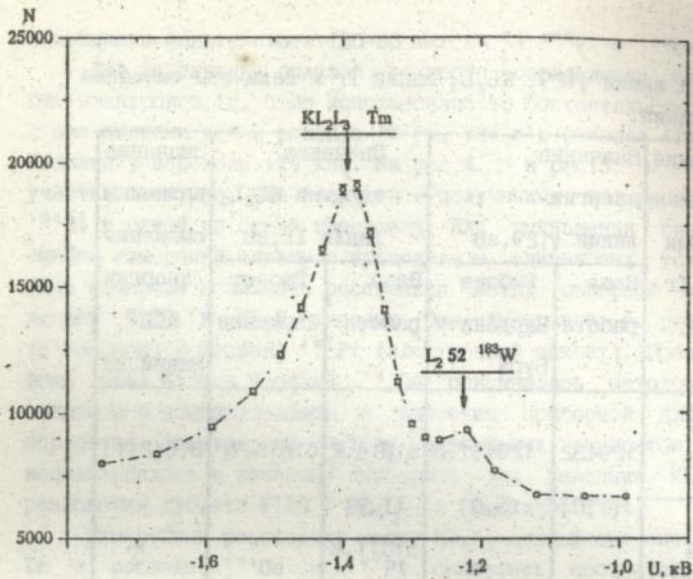


Рис.6. Участок спектра Оже электронов Lu, Tm из распада ${}^{175}Yb$ и ${}^{169}Yb$.

известными из других работ значениями. Точное определение энергий этих конверсионных линий является дополнительной проверкой правильности нашей энергетической привязки.

Таблица 4. Значение энергии KL_2L_3 -линии Lu и величины смещения.

Изотоп	Расстояние между линиями KL_2L_3 Lu и Tm , эВ	Значение энергии KL_2L_3 линии Lu , эВ		Значение величины смещения энергии KLL линий, эВ
		Наша работа	Расчет Ларкинса	
^{175}Yb	$2584,1 \pm 0,9$	$43503,9 \pm 1,4$	43490,0	$5,7 \pm 1,5$
^{175}Lu	$2589,8 \pm 1,2$	$43509,6 \pm 1,8$		

Проведенные измерения оже-спектров для различных атомов, позволили нам обнаружить эффект зависимости энергии KLL -линий от способа возбуждения атома. Эффект заключается в том, что энергии линий KLL -группы оже-электронов оказываются больше, если вакансия на K -оболочке образуется в результате предшествующего K -захвата, чем в случае, когда эта вакансия образуется благодаря внутренней конверсии на K -оболочке. Мы предполагаем, что этот эффект связан с наличием "лишнего" электрона в оболочке атома при оже-переходе. Когда вакансия на K -оболочке при оже-переходе образуется после K -захвата, в оболочке атома имеется "лишний" электрон. Следует отметить, что для атомов в которых преобладает электронный захват вакансия на K -оболочке может образоваться, как в результате K -захвата, так и другим способом. Поэтому под "чистым" K -захватом мы понимаем 100 % электронный захват.

При рассмотрении конфигурации внешних электронов атомов мы имеем следующее. Для случая K -захвата в Re конфигурация внешних электронов будет $5d^56s^2$, а конфигурация внешних электронов W - $5d^46s^2$. В случае K -захвата в ^{153}Gd конфигурация внешних электронов будет $4f^75d^16s^2$, а конфигурация внешних электронов Eu - $4f^76s^2$. В

обоих случаях "лишним" электроном является 5d-электрон. При этом в Bi он вызывает более сильное смещение энергии, чем в W. Возможно, это связано с тем что 5d-электрон в Gd является единственным на внешней оболочке.

В наших измерениях энергии KLL-линий в распаде ^{191}Pt оказались больше, чем в распаде ^{191}Os на $3,6 \pm 2,1$ эВ. Поскольку в ^{191}Pt количество дырок, образующихся в результате K-захвата составляет 64,4% от общего числа дырок на этой оболочке. Смещение энергии линий Оже-электронов в случае "чистого" K-захвата относительно внутренней конверсии на K-оболочке будет составлять $5,6 \pm 3,3$ эВ. Качественно этот эффект мы объясняем различием конфигурации внешних электронов Ir- $5d^7 6s^2$ и Pt- $5d^9 s^1$. Мы предполагаем, что до оже-перехода один 5d-электрон успевает заполнить вакансию на 6s-оболочке и "лишним" электроном после K-захвата оказывается восьмой 5d-электрон.

Измеренные нами значения энергии KLL-линий для спектра Оже-электронов Lu из распада ^{175}Hf оказались больше, чем из распада ^{175}Yb . Из сравнения следует, что энергии KLL-линий оже-спектра Lu при K-захвате ^{175}Hf оказались на $5,7 \pm 1,5$ эВ больше, чем в распаде ^{175}Yb после внутренней конверсии на K-оболочке. Поскольку количество образующихся K-дырок, в результате K-захвата составляет в ^{175}Hf 83%, то при "чистом" K-захвате эта разность будет иметь значение $6,9 \pm 1,8$ эВ. Конфигурация внешних электронов для этих атомов будет Hf- $5d^2 6s^2$ и Yb- $4f^{14} 6s^2$. Для атома Lu конфигурация внешних электронов $5d^1 6s^2$. Отсюда следует, что в этих случаях при K-захвате "лишними" оказываются соответственно второй 5d- электрон и четырнадцатый 4f-электрон. Полученное различие качественно объясняется нами присутствием "лишнего" второго 5d-электрона при K-захвате ^{175}Hf по сравнению со случаем внутренней конверсии в ^{175}Yb .

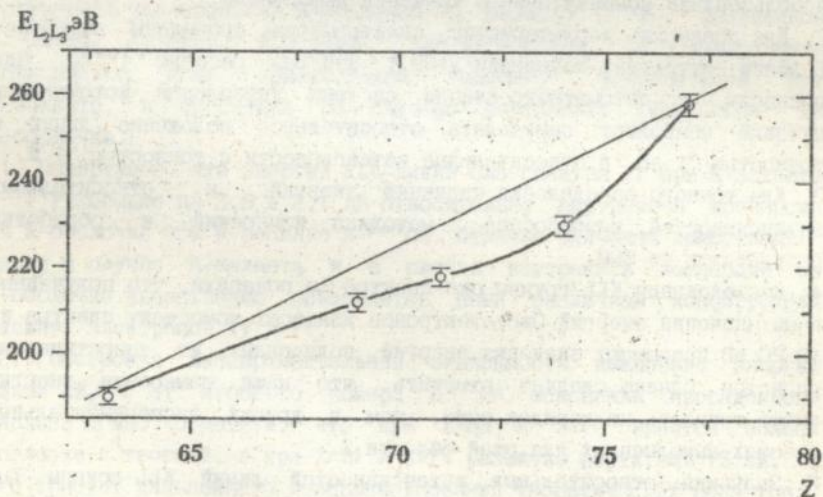
В таблице 5. приведены значения величины смещения энергий оже-линий для различных атомов полученных в результате наших измерений.

Проведенные нами экспериментальные исследования позволяют нам построить теоретическую зависимость энергии взаимодействия между двумя электронными вакансиями на L-подобных оболочках ΔE от атомного номера Z. На рис.7 показана расчетная и экспериментальная зависимости $E_{L_2 L_3}$ от Z. Теоретическая линия представлена прямой

Таблица 5.

Значение величины смещения энергии оже-линии для различных атомов.

Оже спектр атома	Изотопы		Значение величины смещения энергии оже-линии, эВ	Число 5d электронов
	β -распад	K-захват		
W	$^{182}, ^{183}\text{Ta}$	$^{183}, ^{184}\text{Re}$	$5,6 \pm 1,9$	5
Eu	^{153}Sm	^{153}Gd	$20,4 \pm 1,8$	1
Tm	^{171}Er	^{169}Yb	$7,2 \pm 6,6$	-
Lu	^{176}Yb	^{176}Hf	$6,9 \pm 1,8$	2
Ir	^{191}Os	^{191}Pt	$5,6 \pm 3,3$	8

Рис.7. Зависимость $E_{L_2L_3}$ от атомного номера Z .

линией, а экспериментальная линия полученная из наших измерений пунктирной кривой (значения взяты для "чистого" К-захвата). Из рассмотрения рисунка следует, что если при $Z=63$ и $Z=77$ мы имеем полное согласие с теорией, то при $Z=69, 71$ и 74 различие достигает ~ 15 эВ. Наблюдаемое расхождение требует уточнения существующих расчетов.

В заключении приводятся основные результаты, полученные в настоящей работе. Их можно сформулировать следующим образом:

1. Разработана и создана автоматизированная система управления источниками питания магнитного бета-спектрометра на базе модулей КАМАК и изготовленных нами блоков, которая позволяет:
 - а) Проводить измерения Оже-спектров и спектров электронов внутренней конверсии.
 - б) По заданной программе проводить размагничивание бета-спектрометра в оптимальном режиме после сведения его поля к нулю.
 - в) Автоматизировать подачу высокого напряжения на радиоактивный источник магнитного бета-спектрометра, проводить диагностику отдельных узлов бета-спектрометра с помощью ЭВМ.
 - г) Передавать измеренные спектры непосредственно в ЭВМ без использования промежуточного хранения информации.
2. Для проверки характеристик спектрометра проведены измерения L-линий внутренней конверсии $\gamma_{100.1}$ кэВ из распада ^{182}Ta . Они показали, что автоматизированная система управления источниками питания позволяет определять относительное положение линий с точностью ~ 1 эВ, а относительные интенсивности с точностью $\sim 1\%$.
3. Для точного определения значений энергий и относительных интенсивностей разработана методика измерений и обработки результатов на ЭВМ.
4. Исследования KLL-группы оже-спектра Lu показали, что полученные нами значения энергий Оже-электронов для всех компонент спектра на 13-20 эВ превышают значения энергий полученных из теоретических расчетов. Однако, следует отметить, что наши измерения энергии имеют точность на порядок выше, чем в других экспериментальных работах выполненных для этой области Z.
5. Значения относительных интенсивностей линий KLL-группы Lu , полученные в ходе исследований удовлетворительно согласуются с теоретическими расчетами.
6. Из экспериментальных исследований KLM, KLN- групп Оже-электронов

Из установлено, что полученные нами значения энергий одиночных линий KL_1M_1 , KL_1M_2 и KL_2M_1 , KL_2M_2 удовлетворительно согласуются с результатами других экспериментальной работ и теоретическими расчетами. Энергии остальных линий KLM и KLN -групп имеют расхождения с теоретическими вычислениями от 5 эВ до 20 эВ. Нами впервые экспериментально определены значения энергии для 14 линий этой группы Оже-электронов.

7. Полученные в наших измерениях значения относительных интенсивностей для линий оже-спектра KLM и KLN -групп, удовлетворительно согласуются с теоретическими расчетами.

8. Измерение энергии KL_2L_3 -линии Оже-электронов Lu из распада ^{175}Yb показало, что энергия KL_2L_3 -линии на 14 эВ превышает значение теоретических расчетов.

9. Значение энергии KL_2L_3 -линии Оже-электронов Ig в распаде ^{191}Os в пределах экспериментальной погрешности согласуется с теоретическим значением.

10. Получено убедительное подтверждение существования эффекта зависимости энергии Оже-электронов Lu от способа возбуждения атома. При этом значения энергии KLL -линий оже-спектра Lu в случае K -захвата в ^{175}Yb оказались на $5,7 \pm 1,5$ эВ больше, чем при внутренней конверсии на K -оболочке в распаде ^{175}Yb . Полученное различие энергии KLL -линий Оже-электронов Lu качественно объясняется нами присутствием "лишнего" $5d$ -электрона при K -захвате, в сравнении со случаем внутренней конверсии на K -оболочке.

11. Обнаружено, что энергии KLL -линий оже-спектра Ig при K -захвате в ^{191}Pt больше на $3,6 \pm 2,1$ эВ относительно внутренней конверсии на K -оболочке при β -распаде в ^{191}Os . Отличие значений энергии KLL -линии в случае K -захвата и в случае внутренней конверсии на K -оболочке качественно объясняется нами различием конфигураций внешних электронов Ig и Pt .

12. Построена экспериментальная зависимость изменения энергии связи $\Delta E_{KL_2L_3}$ от атомного номера Z . На основании проведенного анализа можно отметить, что при $Z=63$ и $Z=77$ имеется полное согласие с теорией, а при $Z=71$ и $Z=74$ различие достигает 15 эВ, а это требует дальнейшего совершенствования теоретических расчетов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Казновецкий А.Б., Киришук В.И., Коваленко С.А., Купряшкин В.Т. и др. - Программируемый двухполярный высоковольтный источник напряжения β -спектрометра $\pi/2$. Тезисы 43 Собрания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра.-РАН, Санкт-Петербург, 1993, с.346.
2. Казновецкий А.Б., Коваленко С.А., Купряшкин В.Т. и др. Блок автоматизированной подачи напряжения на радиоактивный источник β -спектрометра. Тезисы 44 Собрания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра.-РАН, Санкт-Петербург, 1994, с.301.
3. Булгаков В.В., Казновецкий А.Б., Киришук В.И. и др. Спектр Оже-электронов KLL-группы Tm. Изв. АН СССР, сер.физ., 1990, т.54, N11, с.2154.
4. Булгаков В.В., Казновецкий А.Б., Киришук В.И. и др. Точные измерения KLL-группы Оже-электронов в области $63 < Z < 74$. В кн. Вопросы точности ядерной спектроскопии., -Вильнюс, изд. Института физики АН Литовской ССР, 1990, с.7-14.
5. Булгаков В.В., Казновецкий А.Б., Киришук В.И. и др. Энергии и относительные интенсивности KLL-группы оже-спектра Tm. Тезисы докладов 40-го собрания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра.-Л.: Наука, 1990, с.235.
6. Булгаков В.В., Казновецкий А.Б., Купряшкин В.Т. и др. Точные измерения энергии KLL-группы Оже-электронов Tg и Tm. В кн. Вопросы точности ядерной спектроскопии.- Вильнюс, Изд. Института физики АН Литовской ССР, 1992, с.5-11.
7. Булгаков В.В., Казновецкий А.Б., Киришук В.И. и др. Исследование зависимости энергии Оже-электронов Tg и Tm KLL-группы от способа возбуждения атома.-Изв.АН СССР, сер.физ., т.55, 1991, с.2147.
8. Казновецкий А.Б. Купряшкин В.Т. и др. К вопросу о точности определения γ -квантов с помощью HPGe-детектора. В кн.: Точные измерения в ядерной спектроскопии. Изд. Санкт-Петербург, 1994, с.23.
9. Булгаков В.В., Казновецкий А.Б., Киришук В.И., Коваленко С.А., Стрельчук Н.В., Фелксистов А.И. - Определение энергии $K_{L_2}L_{23}$ -линии Оже спектра Tg в распаде ^{191}Os и ^{191}Pt . Тезисы докладов 41-го собрания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра.-Л.:Наука, 1991, с.200.

Казновецький О.Б. Експериментальне дослідження електронів Оже в радіоактивному розпаді за допомогою магнітного бета-спектрометра високої роздільної здатності.

Дисертація (рукопис) на здобуття вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.16 – фізика ядра та елементарних частинок, НЦ ІЯД АН України, Київ, 1996 р.

Описана розроблена автоматизована система управління джерелами напруги магнітного бета-спектрометра. За допомогою якої на бета-спектрометрі виміряні спектри Оже-електронів KLL, KLM та KLN-груп Lu. Описана методика вимірювань та обробки результатів. Приводяться вперше результати вимірюваного зсуву Оже-ліній KLL-груп Ir та Lu при різних засобах створення вакансій на K-оболонці (K-захоплення і β -розпад). Отримані результати порівнювалися з іншими експериментальними результатами і теоретичними розрахунками.

Ключеві слова: бета-спектрометр, джерела напруги, спектри Оже-електронів, електронний захват, β -розпад, зсув Оже-ліній.

Kaznovetsky A.B. Experimental investigation of Auger electrons in radioactive decay with high resolution magnetic beta spectrometer.

The dissertation (manuscript) for the candidate degree in physical and mathematical sciences on the speciality 01.04.16- physics of a nucleus and elementary particle, Institute for Nuclear Research of Ukrainian Academy Sciences, Kiev, 1996.

Automatic system of beta spectrometer control is described. Auger electrons KLL, KLM and KLN-groups Lu spectra are measured with the help of this spectrometer. Methods of measurements and the results of computer processing are presented. The results of the measured Auger-lines of KLL-groups Ir and Lu shift in different ways of vacancies building on K-shell (electron capture and β -decay) are given for the first time. The obtained results are compared both with experimental results of other authors and with the theoretical calculations.

Подписано к печати: 16.12.96 г. Формат 60x84 1/16

Печать офсетная. Заказ 61 Тираж 100 экз. Усл. печ. л. 1,5

СКТБ с ЭП Института ядерных исследований НАН Украины.
252028, Киев-28, Проспект Науки, 47

442481

AB 36.844

AB 36.844