

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

ДРАПЕЙ СЕРГІЙ СТАНІСЛАВОВИЧ

УДК 539.163

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОНИКНЕННЯ Й СТРУШУВАННЯ ЕЛЕКТРОНІВ
У ПРОЦЕСІ ВНУТРІШНЬОЇ КОНВЕРСІЇ ГАММА-ПРОМЕНІВ**

01.04.16 - фізика ядра, елементарних частинок
і високих енергій

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ —2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі фізики структури ядра Інституту ядерних досліджень
Національної академії наук України

Науковий керівник: доктор фіз.-мат. наук
Желтоножський Віктор Олександрович,
провідний науковий співробітник
відділу структури ядра
Інституту ядерних досліджень НАН України

Офіційні опоненти: доктор фіз.-мат. наук, професор
Аушев Володимир Єгорович,
професор кафедри ядерної фізики
фізичного факультету
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка

кандидат фіз.-мат. наук, доцент
Лещенко Борис Юхимович,
доцент кафедри атомних електростанцій і інженерної
теплофізики, теплоенергетичного факультету
Національного технічного університету України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського"

Захист відбудеться 03 грудня 2020 р. о 14⁴⁵ на засіданні спеціалізованої вченої ради
Д 26.167.01 Інституту ядерних досліджень НАН України за адресою: 03028, м. Київ,
проспект Науки, 47.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту ядерних досліджень НАН
України, 03028, м. Київ, проспект Науки, 47.

Автореферат розісланий «29» жовтня 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

кандидат фізико-математичних наук



Хоменков В.П.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Досліджувані ефекти, обумовлені взаємодією ядра з електронами атомної оболонки, відкривають нові канали розпаду збуджених станів ядер та впливають на їх ймовірність. Їхнє вивчення дозволяє одержати багато нової, а в окремих випадках і унікальної інформації про властивості ядер. Наприклад, дослідження ефектів проникнення, тобто впливу проникнення хвильових функцій електронів в область ядра, на ймовірність внутрішньої конверсії γ -променів, дозволяє одержати таку унікальну інформацію як знак та величину константи спінь-мультипольних сил, величини перехідних торойдних моментів. При вивченні ефектів проникнення може проявитись й таке фундаментальне явище як незбереження парності в електромагнітних моментах. Можна також відмітити, що данні про спінь-мультипольні сили для переходів з мультипольністю $L > 1$ можна отримати тільки при вивченні ефектів проникнення.

Необхідно також відзначити, що експериментальна інформація про такі процеси, як струшування у процесі внутрішньої конверсії, отримана в одиничних роботах. У той же час результати теоретичних розрахунків із застосуванням різних підходів відрізняються на кілька порядків. Це вказує на важливість саме експериментального дослідження таких процесів.

Також, ці експериментальні данні мають велике значення для узгодження теорій в квантовій електродинаміці. До цього часу існує проблема перенормування в квантовій електродинаміці. Найбільш якісно ці питання можуть бути вивчені при дослідженні радіаційних поправок. І саме в атомно-ядерних процесах можна досліджувати ці радіаційні поправки. Крім того, не дивлячись на мізерність цих величин у порівнянні з процесами на мезоядрах, вимірювання таких поправок при радіоактивних розпадах в багатьох випадках простіше та доступніше, ніж в процесах з елементарними частинками.

Вивчення цих процесів є актуальним напрямком і при розробці нових методів створення гамма-лазерів. Саме взаємодія атомних станів з ядерними, в принципі, забезпечує умови для появи індукованого випромінювання. Все це вказує на актуальність та важливість проведених дослідів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами й темами.

Дисертаційна робота виконана у відділі структури ядра Інституту ядерних досліджень НАН України, при підтримці гранту INTAS-2000-00463 та, як складова частина державних бюджетних тем №0105U001049 "Дослідження збудження атомних ядер і механізмів ядерних реакцій в районі низьких енергій", виконаної в 2005-2007 рр. , №0108U002915 "Дослідження структури збуджених атомних ядер на пучках частинок і в радіоактивному розпаді", виконаної в 2008-2010 рр. та виконаної в 2011-2013 рр. Результати роботи використано в звітах по темах.

Мета й завдання дослідження. Метою даних досліджень було одержання нових експериментальних даних про властивість атомних ядер шляхом вивчення

ефектів проникнення й струшування, в процесі внутрішньої конверсії гамма-променів та автоіонізації атомів.

Для досягнення поставленої мети було необхідно вирішити наступні питання:

- розробити методику основу на вимірюваннях багатомірних збігів, що забезпечить необхідну точність вимірювань;
- підібрати та адаптувати програмне забезпечення, що дозволяє визначати інтенсивності окремих ліній у складних K_{α} - і γ -спектрах з високою точністю;
- вивчити ефекти проникнення в процесі внутрішньої конверсії в переходах різної мультипольності на різних ядрах;
- вивчити ефекти струшування в процесі внутрішньої конверсії та електронного захоплення;

Об'єкт дослідження – дослідження проникнення й струшування електронів та кореляційних ефектів у процесі внутрішньої конверсії гамма-променів.

Порівняння теоретичних розрахунків коефіцієнтів КВК та оцінених досліджуваних експериментальних ефектів, обґрунтування експериментальних практичних результатів.

Предмет дослідження - атомні ядра в збуджених станах та аномалії в коефіцієнтах внутрішньої конверсії.

Методи дослідження – напівпровідникова рентгенівська і γ -спектроскопія, математична обробка та аналіз даних рентгенівських та γ -спектрів.

Наукова новизна отриманих результатів. За допомогою розроблених методик вперше виміряні КВК на К-оболонці в М1-переході ^{115}In та була отримана величина λ для переходу з енергією 35 кеВ в ^{115}In .

Вперше виміряно з високою точністю КВК на К оболонці для γ -переходів з енергіями 67 та 79 кеВ в ^{44}Sc і вперше спостерігався та був обґрунтований ефект проникнення в М1-переході.

З високою точністю було виміряно КВК в М4-переходах ^{117}Sn і ^{125}Te , показано, що узгодження теоретичних та експериментальних даних досягається з врахуванням ефектів проникнення з $\lambda=1\pm 2$.

З високою точністю виміряні відносні інтенсивності гамма-переходів і K_{α} -випромінення з розпаду ^{120}Sb . З отриманих даних визначені повні КВК і КВК на К-оболонці загальмованих $E1$ - та $E2$ -переходів з енергією 89.9 кеВ та 197.3 кеВ, відповідно.

Вперше виявлений вклад ефектів проникнення у загальмованому $E1$ -переході з фактором заборони $F_W=18000$, уточнений вклад ефектів проникнення в загальмований $E2$ -перехід. Вперше був визначений вклад спінових токів для $E1$ -переходу.

Проведено комплексне дослідження по збудженню атома в процесі внутрішньої конверсії γ -променів і електронному захопленню.

Вперше була виміряна ймовірність автоіонізації в процесі внутрішньої конверсії в ^{109}Ag .

Вперше були отримані значення ймовірності виникнення процесу струшування електрону з оболонки атома при розпаді ^{123m}Te . Також, були отримані

експериментальні данні щодо ймовірності автоіонізації в процесі внутрішньої конверсії γ_{81} кеВ на К-оболонці ядра ^{133}Cs , з вильотом електронів з кінетичною енергією менше 5 кеВ. В роботі продемонстровано, що одним з можливих рішень обґрунтування цих процесів є врахування "прямої" взаємодії К-електрона з сусіднім К-електроном.

Вперше виміряні збудження атому при електронному захопленні з випроміненням кінетичних електронів з граничною енергією 8,4 кеВ і показано що процес описується за рахунок миттєвої зміни кулонівського поля.

Досліджено вплив кореляційних ефектів на процес внутрішньої конверсії γ -променів. Було продемонстровано значний вплив кореляційних процесів на внутрішню конверсію в ^{234}Ra для переходів, в яких кінетична енергія електронів є 192 еВ. Для цього було вперше виміряно енергію цього гамма-переходу з точністю 2 еВ.

Практичне значення отриманих результатів. У ході виконання роботи були розроблені нові методики й створені установки для вимірювання багатомірних $\gamma\gamma$ -збігів, вимірювання збігів методом піків сумувань.

Були створені нові модулі програм та доопрацьовані існуючі, що дозволило керувати вимірами, записувати як одиночні спектри, так і спектри багатомірних збігів з наступним їхнім сортуванням за виділеними енергетичними вікнами, з високою точністю обробляти складні спектри з рентгенівськими та γ -лініями, проводити калібрування спектрометра за енергією та ефективністю, визначати ізотопний склад спектра.

Отримані нові данні про ефекти проникнення та струшування, що відкрило нові можливості у вдосконаленні деяких теоретичних підходів в цій галузі.

Особистий внесок. Автор приймав участь в усіх розробках, що складають зміст дисертації. Усі експерименти, на основі яких були отримані результати дисертації, проводились автором безпосередньо. Обробка та аналіз спектрів виконувалось з використанням програм NetSpectrum та Winspectrum здійснювалось безпосередньо дисертантом.

Дисертант брав участь у наукових диспутах, щодо можливості виникнення аномалій КВК в атомних ядрах, які перебувають у збуджених станах. Проводив теоретичну оцінку виникнення таких процесів та вибір необхідних спектрометричних схем багатомірних збігів.

Автор дисертації провів збір вимірювальних установок, калібрування та обробку отриманих даних на германієвих та сцинтиляційних спектрометрах у схемах збігів та антизбігів. На програмному та технічному рівні здобувач формував енергетичні вікна необхідні, для отримання «чистих» результатів вимірювань. Дисертантом було виконано обробку спектрів та визначення вкладу досліджуваних ефектів у загальний КВК.

Крім цього, дисертанту належить підготовка тексту статей за результатами дослідження.

У наукових працях, виконаних у співавторстві, дисертанту належить обробка експериментальних даних та аналіз результатів, підготовка графічних матеріалів, участь у написанні тексту статей.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідались на 53, 55, 57, 62, 63, 65 Міжнародних нарадах з ядерної спектроскопії та структури атомного ядра, на 2-й, 3-й та 4-й Міжнародних конференціях «Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy», щорічних конференціях ІЯД НАН України 2005–2017 років, семінарах відділу структури ядра та на об'єднаних семінарах відділів ІЯД.

Публікації. Всього за темою дисертації опубліковано 15 робіт, з них: 7 – статей у реферованих наукових журналах, що індексуються наукометричними базами [1,2,3,4,5,6,7] та 8 – статей за матеріалами конференцій [8,9,10,11,12,13,14,15]. Всі публікації виконані у співавторстві, особистий внесок здобувача вказаний вище.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 105 найменувань (на 9 стор.), 41 рисунок, 9 таблиць. Загальний обсяг дисертації становить 144 стор. (з них основного тексту 115 с.).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** дисертаційної роботи висвітлено актуальність тематики дослідження, мета та задачі, наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, зв'язок роботи з науковими програмами та темами, зазначено особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** розкрито сучасний стан досліджень внутрішньої конверсії при розрядці збуджених атомних ядер та аномалії що мають місце в експериментальних дослідженнях цих процесів, наведені бібліографічні посилання на основні теоретичні та експериментальні роботи.

Другий розділ описує методики й устаткування що використовувалось для дослідження атомно-ядерних процесів, даної роботи, за допомогою напівпровідникової γ -спектроскопії.

Як нам відомо, в результаті внутрішньої конверсії на К-оболонці утвориться вакансія на цій оболонці, заповнення якої супроводжується рентгенівським випромінюванням. Визначивши інтенсивність цього рентгенівського випромінювання (I_{Kx}) і інтенсивність відповідного γ -випромінювання (I_γ), можна визначити коефіцієнт внутрішньої конверсії (КВК) на К-оболонці α_K :

$$\alpha_K = \frac{I_{Kx}}{I_\gamma \cdot \omega_K} = \frac{N_{Kx}}{N_\gamma \cdot \omega_K} \cdot \frac{\varepsilon_\gamma}{\varepsilon_{Kx}} \quad (1)$$

де ω_K – вихід флуоресценції з К-оболонки, N , ε – відповідно виміряна інтенсивність і ефективність реєстрації рентгенівської й γ -лінії.

Варто відмітити, що при цьому виміряються відносні величини, а виходять абсолютні значення α_K . Це дуже важливо з методичної точки зору, тому що дозволяє

в багатьох випадках легко позбутися від впливу таких параметрів, як "мертвий час" в електронному тракті, часової нестабільності і т.п.

Для вимірювання КВК можна також використати метод піків сумування. Ідеологія даного методу аналогічна методу визначення ефективності γ -спектрометрів, за винятком того, що в цьому випадку ефективність вважається відомою, а визначається інтенсивність рентгенівського випромінювання.

Експерименти, проводилися на спектрометрах з детекторами із кремнію й надчистого германію, а також на антикомptonівському спектрометрі з детектором з надчистого германію й активним захистом на основі сцинтиляційних детекторів з NaI(Tl). Електронний тракт спектрометрів складався із блоків виробництва фірм "ORTEC" і "CANBERRA". Для керування вимірюванням й обробкою результатів використалися сучасні ПК. Основні характеристики використовуваних спектрометрів наведені в Таблиці. 1.

Табл. 1. Основні характеристики спектрометрів.

Детектор	Відносна. ефф., %	Енергія (E) / Роздільна здатність $\Delta(E)$, кеВ					
		E	ΔE	E	ΔE	E	ΔE
Si(Li)		6.4	0.15	13.8	0.19	59.5	0.40
Ge	15	59.5	0.45	198.0	0.69	307	0.82
Ge*	40	59.5	0.82	208.0	0.99	661.6	1.33

* у складі антикомptonівського спектрометра

Багато вимірів проводилися в режимі $\gamma\gamma$ -збігів. Керування вимірами здійснювалося за допомогою програми NetSpectrum, розробленої у відділі структури ядра.

У випадках, коли необхідно було придушити комptonівську підкладку, використовувався антикомptonівський спектрометр.

Гарні характеристики напівпровідникових γ -спектрометрів дали можливість використати їх для вивчення тонких атомно-ядерних ефектів описаних в роботі. Однак при цьому зростають вимоги до якості обробки γ -спектрів. У більшості випадків необхідно мати дані про інтенсивність γ -ліній з точністю близько 1%. При цьому вже недостатньо описувати форму лінії в спектрі простим розподілом Гауса - доводиться використати складну функцію, що стає особливо очевидним при великій статистиці спектру.

Для цих цілей була адаптована програма WinSpectrum, яка використовувалась для вимірювання інтенсивностей K_x та γ -переходів з високою точністю, що дозволило:

- керувати вимірами через буфер AIM, підключений до мережевої плати ПК;
- здійснювати набір і запис як одиночного спектра, так і двовимірного спектра збігів;

- працювати зі спектрами, записаними в розповсюджених форматах фірм ORTEC і CANBERRA (*.cnf, *.chn, *.mca);
- проводити пошук, ідентифікацію та обробку піків;
- обробляти одночасно декілька γ -спектрів;
- використати для опису форми лінії модифікований Гаусіан з “хвостами” або еталонну лінію, а для підкладки - квадратичну функцію зі "сходиною";
- розраховувати й зберігати у файлі калібрування по енергії, ефективності й формі лінії;
- проводити за результатами обробки ізотопний аналіз;
- зберігати результати аналізу у форматі, зручному для використання в текстових формах і електронних таблицях.

Для проведення точних γ -спектроскопічних вимірювань, необхідних в роботі, найважливіше значення має точне калібрування спектрометра по ефективності реєстрації γ - або рентгенівського випромінювання.

Для калібрування спектрометрів по ефективності використовувалися ізотопи ^{241}Am , ^{182}Tm і $^{152,154,155}\text{Eu}$. Це дозволило отримати калібрування в діапазоні енергій від 10 до 1600 кеВ. Деякі вимірювання виконувалися методом піків сумувань, при якому джерело розташовувалося на лицьовій поверхні детектора для забезпечення максимально ефективного тілесного кута, а, отже, і ефективності реєстрації піків сумувань. Відповідно при калібруванні спектрометра по ефективності в тій же геометрії необхідно було враховувати піки сумувань. Для цього була розроблена програма, алгоритм якої описаний у роботі.

У **третьому розділі описані** дослідження ефектів проникнення в М1 та М4 – переходах. По-перше було вивчено ефект проникнення в М1-загальмованому переході з енергією 35 кеВ ядра ^{115}In , схема розпаду якого показана на рис.1. Це внутрішньо-мультипольний М1 перехід і він, як правило, сильно-загальмований за одночастковими оцінками.

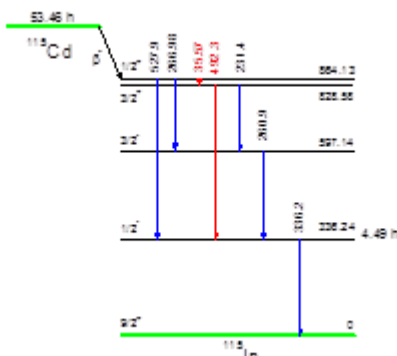


Рис.1. Схема розпаду ^{115}Cd .

Вимірювання були виконані на Ge-NaI (Т1) установці збігів. При проведенні таких досліджень вирішальне значення має точність значень параметрів кривої ефективності. Для цих вимірювань крива ефективності була виміряна за джерелами ^{109}Cd і ^{133}Ba . Були отримані величини з точністю $\leq 1\%$ в області енергій 22-360 кеВ.

Параметри проникнення також досліджувались і для Е1 і М1-переходів ^{44}Sc . У розпаді ^{44}Ti (Рис.2.) збуджуються два стани ^{44}Sc , розпад яких обумовлюється сильно загальмованим за одночастковими оцінкам М1 і Е1 переходами.

Фактор загальмованості для Е1- переходу $F_w = 10^5$, а для М1 $F_w = 106$.

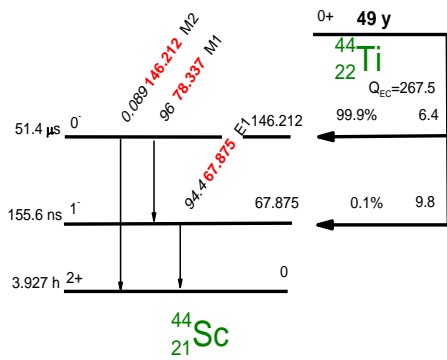


Рис.2. Схема розпаду ^{44}Ti .

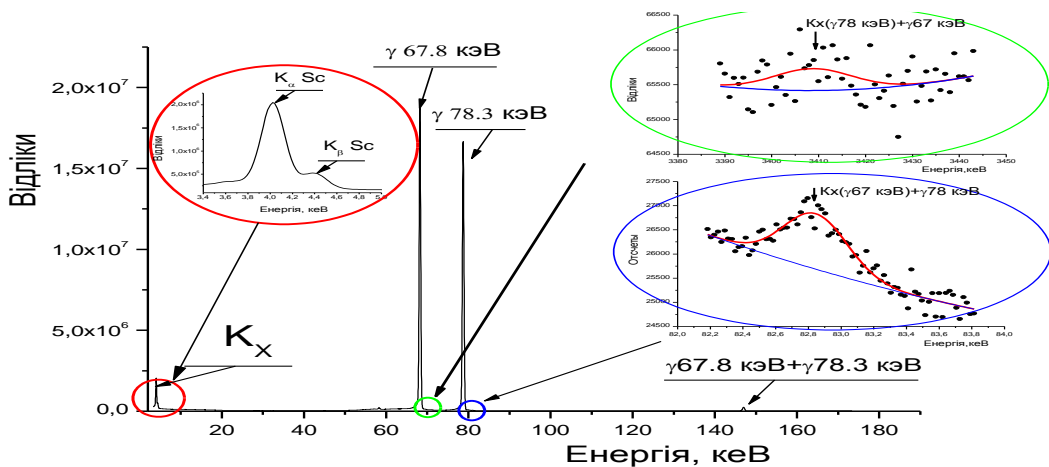


Рис.3. γ -спектр ^{44}Ti і ділянки з піками сумувань.

Як видно Рис.3, з високою статистичною точністю виміряно пік сумувань K_x ($\gamma 67\text{keV}$) + $\gamma 78\text{ keV}$ і $\gamma 68\text{ keV}$ + $\gamma 78\text{ keV}$. Відношення інтенсивностей цих піків сумувань відносно I_{K_x} (67 keV) ε_1/I_γ (67 keV) ε_2 , де ε_i - відносні ефективності реєстрації K_x - і γ - випромінювання. З цих даних було отримано, що α_K ($\gamma 67\text{ keV}$) = $0,076 \pm 0,004$. Через високий фон за рахунок Комптон-ефекту $\gamma 78\text{ keV}$ виміряти піки сумувань K_x (78 keV) і γ (67 keV) з високою точністю неможливо. Було проведено вимірювання спектрів збігів на установці багатовимірних збігів з Ge- і Si (Li) - детекторами.

З спектрів збігів були отримані данні для визначення α_K (67 keV) = $0,077 \pm 0,003$ і α_K (78 keV) = $0,014 \pm 0,001$. Причому точність величини α_K (67 keV) обумовлено похибкою в ω_K рівній 2% і в ε_i також рівної 2-2,5%. Помилки в α_K (78 keV), в основному, визначаються ймовірністю електронного захоплення в стані з енергією 67 keV , яке нами оцінено рівним $0,1 \pm 0,1\%$.

Для E1 переходу спостерігається співпадання величини отриманого значення α_K з табличним. Це знаходиться в істотному протиріччі з раніше отриманими даними, де $\alpha_K^E = 0,123 \pm 0,023$. У той же час величина α_K (M1)-переходу значно відрізняється від α_K^T , причому в меншу сторону. Тому ми можемо зробити висновок про значний внесок ефектів проникнення в процес внутрішньої конверсії M1-переходу і про їх відсутність в E1-переході.

Для M1-переходу це один з рідкісних випадків, який обумовлений великим фактором загальмованості переходу. Складність поставленого завдання в тому, що процес внутрішньої конверсії γ -променів на легких ядрах мало ймовірний і ефекти проникнення через значно більшу віддаленості K-оболонки від ядра при тих же параметрах, що характеризують це явище, також менші.

Використовуючи отримані данні, отримуємо значення для проникнення $\lambda = -260 \pm 30$. Отримане значення λ для розпаду ^{44}Ti , значно виходить з систематики параметрів проникнення для M1-загальмованих переходів. Отримані дані, вказують на перспективність пошуку ефектів проникнення для внутрішньо-мультиплетних M1-переходів. Це дозволить розширити наші знання про це явище, а також розробити теорію яка описує такі переходи.

З високою точністю, також, визначено КВК на K-оболонці для M4-переходів в $^{117\text{m}}\text{Sn}$ і $^{125\text{m}}\text{Te}$.

Як результат аналізу та обробки отриманих спектрів було отримано результат який склав величини: для $^{117\text{m}}\text{Sn}$ $\alpha_{\text{K}}(156)=30,8\pm 0.6$ і $\alpha_{\text{tot}}(156)=46,44\pm 0.05$ та для ^{125}Te $\alpha_{\text{K}}(109)=181,3\pm 3.6$. Необхідно відзначити що отримані данні значно уточнюють раніше отримані результати.

Дослідження розпаду ^{120}Sb представляє рідку можливість дослідження ефектів проникнення в E1- та E2-переходах, тому що, в цьому розпаді заселяються збуджені стани ^{120}Sn , які розпадаються загальмованими E1- та E2-переходами.

Було проведено дослідження розпаду ^{120}Sb на збуджений стан ^{120}Sn , ряд який розпадається з випроміненням загальмованих E1- та E2-переходів. Проведені виміри одиночного γ -спектру і спектрів $\gamma\gamma$ - та $K_X\gamma$ -збігів. З цих даних були отримані повні коефіцієнти внутрішньої конверсії (КВК) та КВК на K-оболонці для загальмованих E1- та E2-переходів.

Вимірювання інтенсивностей γ -ліній (I_γ) одиночного спектру з розпаду ^{120}Sb дозволяє визначити повні КВК ($\alpha_{\text{П}}$) загальмованих E1- та E2-переходів з енергією 89.9 кеВ та 197.3 кеВ, відповідно.

Досліджені було виконано в двох режимах вимірювань: збігів та антизбігів.

З вимірів одиночного γ -спектру з врахуванням вкладу $K_X\text{Sb}$ були визначені відносні параметри ефективності реєстрації променів антикомптонівського спектрометра в геометрії досліду. Похибка цих параметрів визначається в основному точністю даних про K_X -випромінення ($\sim 3\%$).

В Таблиці.2. наведені отримані данні про КВК та їх відносні відхилення від табличних значень $\delta\alpha = |\alpha_{\text{експ}} - \alpha_{\text{табл}}| / \alpha_{\text{табл}}$.

Таблиця.2. КВК і їх відносні відхилення від табличних значень

E_γ , кеВ	I_γ , %	α_{K}	$\delta\alpha_{\text{K}}$, %	$\alpha_{\text{повн}}$	$\delta\alpha_{\text{повн}}$, %
89	78.1 (5)	0.232 (9)	8.9 (42)	0.268 (8)	8.5 (32)
197	86.2 (5)	0.136 (7)	13.8 (58)	0.161 (7)	9.9 (48)

З врахуванням того, що відхилення отриманих значень КВК від табличних виміряно з похибкою $\leq 6\%$, ми отримаємо значення для параметрів проникнення Таблиця 3.

Таблиця. 3 Значення параметрів проникнення

E_γ , кеВ	F_W	λ_1	λ_2
89	18000	3.6 ± 1.6	~ 100
197	260	6 ± 2	$\sim (100 - 200)$

Для E1-переходу вперше були виявлені аномалії в КВК. Табличні значення електронних параметрів A_i для K-оболонки і повних КВК співпадають в межах 5%.

Як можна бачити з Таблиці 2, відносні відхилення $\delta\alpha$ співпадають значно краще, ніж похибки проведеного експерименту. Для $E1$ -переходу для визначення параметра проникнення λ_1 оцінка проводилась з врахуванням зміни вкладу конвекційних токів в діапазоні $\lambda_2 \sim 100$.

У **четвертому розділі** описані результати дослідження процесу струшування що виникає в процесі внутрішньої конверсії коли утворюється вакансія на внутрішніх електронних оболонках атома, при цьому електрон переходить в стан безперервного спектра, або в незаповнений зв'язаний стан а відсутність електрона викликає миттєву зміну заряду, що приводить до виникнення досліджуваного механізму.

Такі вимірювання були виконані на ^{109m}Ag , що заселяється при електронному захопленні ^{109}Cd (рис.4).

Для експериментального визначення ймовірності подвійної іонізації К-оболонки при внутрішній конверсії $\gamma_{88\text{keV}}$ використовувалось вимірювання збігів між рентгенівськими K_{α} -квантами, які випромінюються в процесі заповнення К-оболонки.

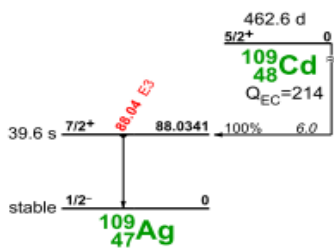


Рис.4. Схема розпаду ^{109}Cd

Дослідження збудженого ядра ^{109m}Ag виконувалось на антикомptonівському спектрометрі в режимі збігів та антизбігів. При цьому формувались та вирізались енергетичні вікна на NaI(Tl)-детекторі. Часова роздільна здатність складала 50нс.

В результаті вимірювань отримані спектри збігів для різних енергетичних вікон і відповідні спектри антизбігів (Рис.5.).

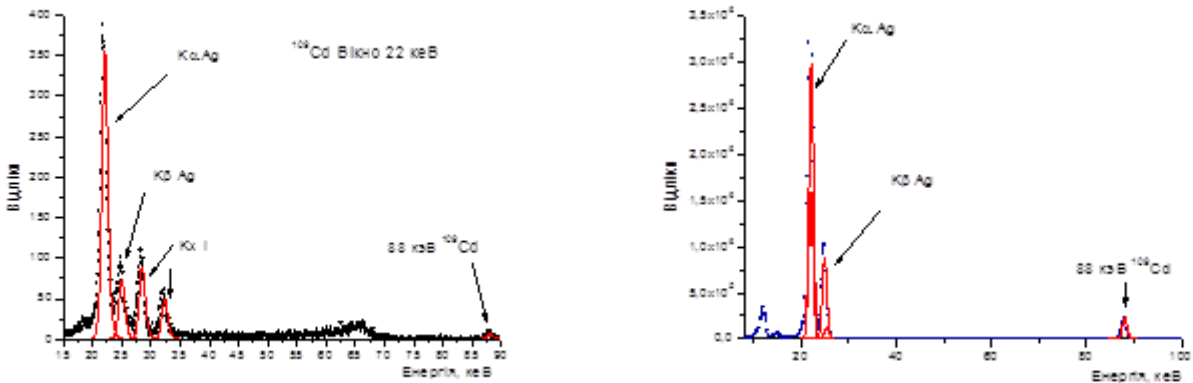


Рис.5. Спектр збігів та антизбігів

При розрахунку ймовірності подвійної іонізації К-оболонки необхідно ввести деякі поправки на випадкові збіги, на внутрішній комптон-ефект, на внутрішнє і зовнішнє гальмівне випромінювання.

Поправки на випадкові збіги можна отримати, порівнявши інтенсивності γ -ліній з енергією 88кеВ в спектрі збігів і в одиночному спектрі, оскільки як видно із схеми розпаду, такі збіги можуть бути лише випадковими.

З наших досліджень витікає, що ймовірність утворення двох вакансій на К-оболонці рівна $P_{KK} = (2.5 \pm 0.2) \cdot 10^{-4}$. Відзначимо, що статистична похибка наших вимірів не перевищує (2-3)%, але наявність великого вкладу від фонових каналів і

погана роздільна здатність NaI(Tl) – детектору, не дозволив цей вклад виміряти з достатньою точністю, що призвело до погіршення вимірювань.

Тому, було проведено вимірювання ймовірності струшування за допомогою Ge-Si- спектрометру за схемою збігів, вимірювались багатомірні $\gamma\gamma$ -збіги.

На рис.6. представлено одиночний γ -спектр і спектр K_{α} - K_{α} – збігів. В одиночному спектрі видно піки від $K_{\alpha}^{109}\text{Ag}$ і $\gamma_{88}\text{keV}$, а також K_{α} -випромінення Ge, викликаний фотопоглинанням $K_{\alpha}^{109}\text{Ag}$ атомами детектора. Отриманні данні співпадають з попередніми дослідженнями.

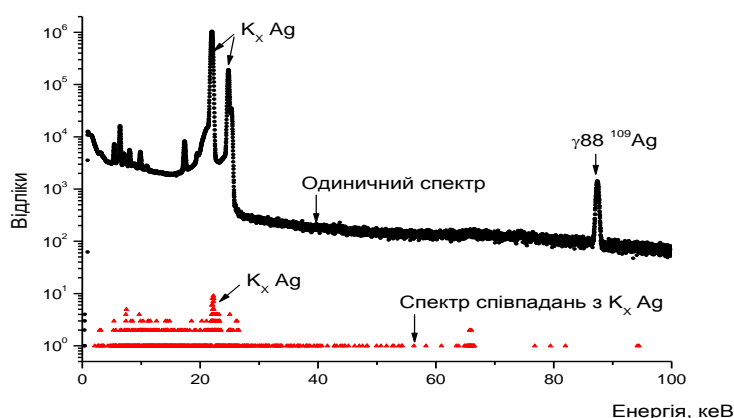


Рис.6 . Одиночний спектр і спектр співпадінь з $K_{\alpha}^{109m}\text{Ag}$

Отримані результати ми порівняли з теоретичними значеннями подвійної іонізації. Таб.4.

Таб.4. Експериментальні і теоретичні ймовірності подвійної іонізації атомів Ag. (значення $P_{KK} * 10^{-5}$)

Ядро	Z	$E_{\gamma}, \text{кеВ}$	$E_K, \text{кеВ}$	$E_e, \text{кеВ}$	$P_{KK}^{\text{експ}}$	$P_{KK}^{T_1}$	$P_{KK}^{T_2}$	P_{KK}^{Σ}
^{109}Ag	47	88	25.5	37	25(2)	4.2	30	34

E_K -енергія зв'язку K-електронів; E_e -максимальна енергія електронів в процесі подвійної іонізації, $P_{KK}^{T_1}$ - теоретична оцінка ймовірності подвійної іонізації за рахунок струшування, $P_{KK}^{T_2}$ -теоретична оцінка «прямого» процесу, P_{KK}^{Σ} -сумарна теоретична оцінка ймовірності процесу подвійної іонізації.

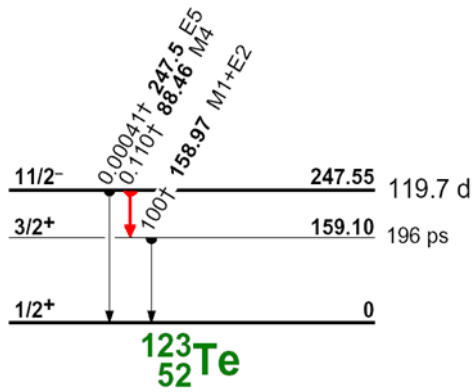


Рис. 7. Схема розпаду ^{123m}Te .

ситуація спостерігається, коли обидва каскадних γ - переходи γ 88 кеВ і γ 159 кеВ розряджаються за допомогою процесу внутрішньої конверсії. Для виключення цього процесу необхідно вимірювати потрійні $\gamma\gamma$ -збіги. Реєстрація γ 159 кеВ свідчить про те, що перехід не конвертований.

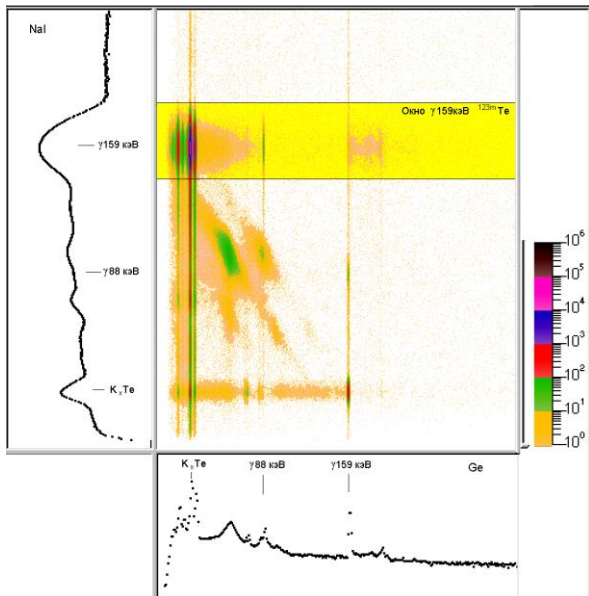


Рис.8. Двовимірний спектр з вікном збіги

спостерігаються γ 88 кеВ і рентгенівське випромінювання, пов'язане з конверсією γ 88 кеВ. Ділянка спектру з піком сумувань $\text{K}_\alpha\text{Te} + \text{K}_\alpha\text{Te}$ показаний на Рис.9.б. Цей пік відповідає подвійній іонізації К-оболонки. Після вирахування внесків конкуруючих процесів, які становлять близько 1% для випадкових збігів і 3% для випадкових сумувань, отримана інтенсивність лінії $\text{K}_\alpha + \text{K}_\alpha$, обумовлена струшуванням К-електронів.

Ізомерний стан ^{123m}Te розпадається каскадом γ -переходів (див. Рис 7.), перший з яких, γ 88 кеВ сильно конвертований з $\alpha_K \sim 500$. В результаті процесу внутрішньої конверсії цього переходу утворюється вакансія на К-оболонці. В результаті заповнення цих вакансій можемо спостерігати одночасний виліт двох рентгенівських променів. Один з променів викликаний внутрішньою конверсією, другий – струшуванням. Але аналогічна

Після сортування накопичених даних з вікном, відповідним піку миттєвих збігів, був отриманий двовимірний спектр $\gamma\gamma$ - збігів, представлений на Рис. 8

Вісь ординат відповідає інтегральному спектру, вимірювання з використанням NaI детектора, абсцис – з використанням германієвого детектора. На малюнку виділена область вікна γ 159 кеВ, яка використовувалася для отримання спектру збігів з γ 159 кеВ.

На рис.9.а. представлений одиночний γ -спектр і спектр збігів з γ 159 кеВ. В одиночному спектрі видно піки сумувань $\text{K}_\alpha\text{Te} + \text{K}_\alpha\text{Te}$, що відповідає випадку, коли обидва каскадних γ -промені конвертовані і піки підсумовування γ 159 + K_αTe .

В спектрі збігів в основному

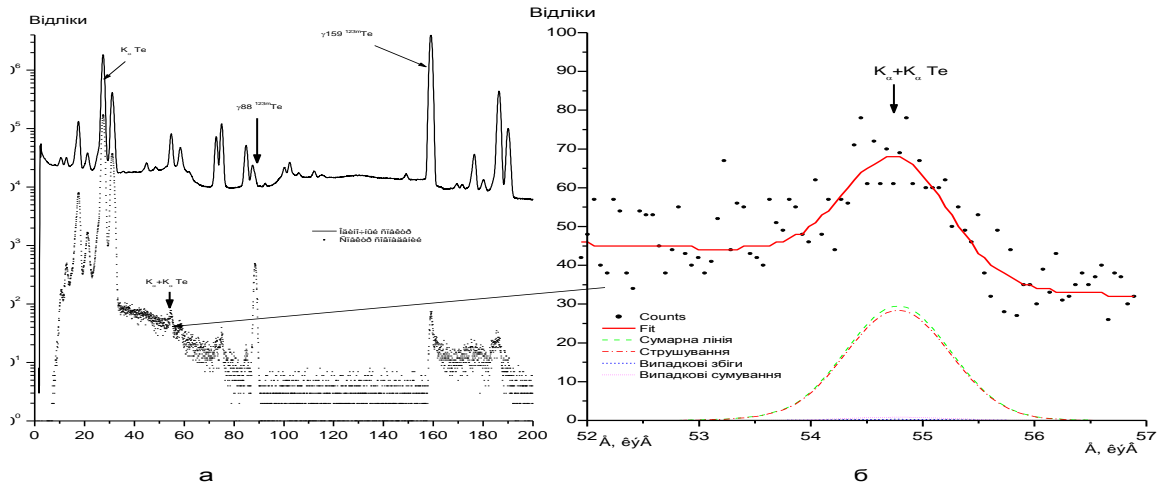


Рис.9. Одиночний спектр і спектр збігів при розпаді ^{123m}Te (а) і ділянка спектру з лінією сумування $K_\alpha\text{Te} + K_\alpha\text{Te}$ (б).

З даних наших вимірів величина $P_{KK} = (6,6 \pm 0,7) \cdot 10^{-4}$

Окремий інтерес для теорії внутрішньої конверсії представляють дані, які можна отримати врахувавши процес електронного захоплення на К-оболонці (К-захоплення). Через те, що при К-захопленні вся енергія передається нейтрину, процес струшування повністю зв'язується зі зміною кулонівського поля і ймовірність автоіонізації атома при К-захопленні повинна добре описуватися класичними теоріями.

Однак, експериментальна інформація про автоіонізацію атомів при К-захопленні є тільки для декількох атомів, при цьому у них енергія К-захоплення більше 100кеВ.

Важливим є і отримання нової інформації про одночасне випускання двох електронів в процесі внутрішньої конверсії γ -променів при малій кінетичній енергії вилітаючого електрону.

У даному досліді проведено вимірювання одночасного випускання двох К-електронів атомом Cs в процесі внутрішньої конверсії γ -променів і при К-захоплення, причому максимальна кінетична енергія електронів, що вилітають після автоіонізації 8-9 кеВ.

Для вивчення цих процесів були проведені вимірювання збігів γ і K_α -променів при розпаді ^{133}Ba (рис.10.). Вимірювання були виконані на чотиривимірній установці швидко-повільних збігів.

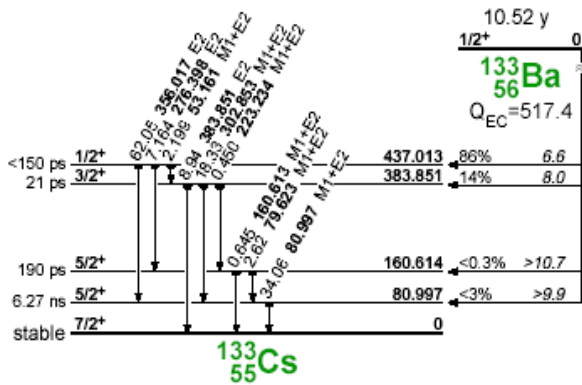


Рис.10.Схема розпаду ^{133}Ba

Для реєстрації ефекту автоіонізації на ^{133}Cs використовувалися три HPGe детектора, і сцинтиляційний NaI(Tl). Для реєстрації рентгенівських низькоенергетичних променів і для розділення цих піків необхідно мати гарну енергетичну роздільну здатність. Тому використовувалися два напівпровідникових детектора з берилієвими вхідними вікнами і сцинтиляційний детектор з тонким

вхідним вікном. Для реєстрації високоенергетичних γ -променів використовували HPGe детектор великого об'єму. Набір спектру відбувався протягом 500 годин.

На рис.11 (а,б) наведені спектри в збігах з «енергетичними вікнами»

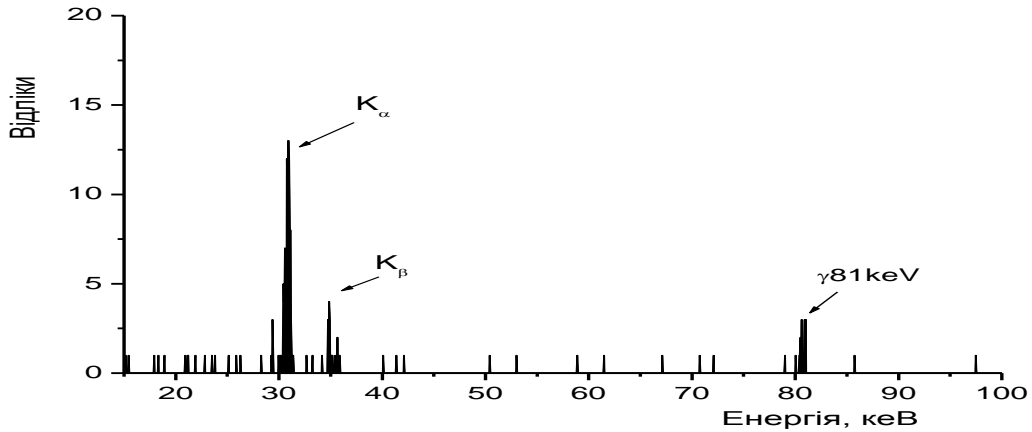


Рис.11(а) Спектр збігів з «енергетичними вікнами» K_{α} , K_{β} , $\gamma 81\text{keV}$ і $\gamma 356\text{keV}$

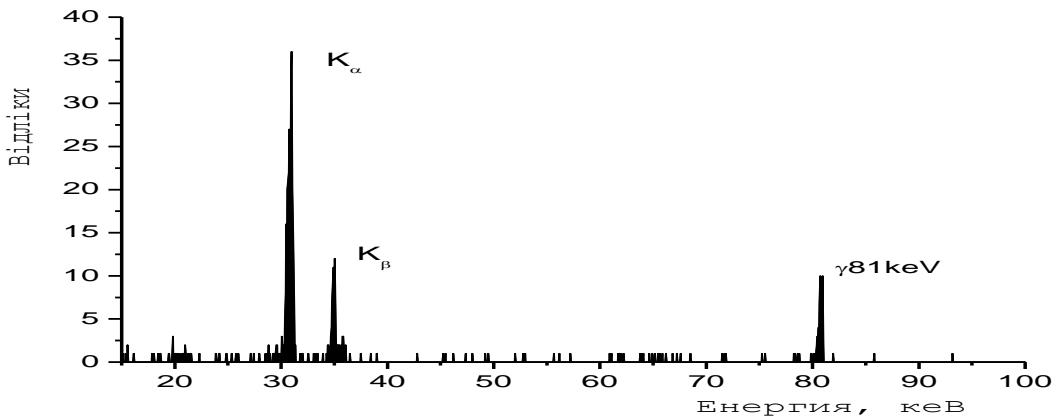


Рис.11.(б) Спектр збігів з «енергетичними вікнами» 356keV , 30keV і 30keV

Отримане значення ймовірності автоіонізації при К-захопленні: $P_{\text{КК}}^{\text{E}} = (6.0 \pm 1.2) \cdot 10^{-3}$.

Цей результат береться без врахування внутрішнього гальмівного випромінювання.

Для дослідження ймовірності струшування електронів при конверсії γ -променів, ми виділяли такі енергетичні вікна, які дозволяють очистити отриманий спектр від тих результатів, які не представляють ніякої цінності, а можуть створювати лише серію фонових відліків і випадкових збігів. Для цього, в спектрі збігів ми виділяли «вікна» 356 кеВ, 30 кеВ і 30 кеВ. Вимірюваний спектр зображений на Рис.11.(б.)

Було отримано, що ймовірність автоіонізації в процесі внутрішньої конверсії γ 81 кеВ на К-оболонці дорівнює: $P_{KK}^K = (14 \pm 5) \cdot 10^{-3}$

Було досліджено, також, аномалії що можуть спостерігатись в КВК з малою кінетичною енергією конверсійного електрону в ядрі ^{234}Pa . У нього існує рівень, який розряджається γ -переходом $E_\gamma - 112.8$ кеВ, енергія якого всього на ≈ 0.2 кеВ більша енергії зв'язку К-електронів $E_K(\text{Pa}) = 112.598$ кеВ. При внутрішній конверсії цього переходу на К-оболонці вилітаючий електрон буде мати дуже малу кінетичну енергію ≈ 0.2 кеВ і можна чекати значні аномалії в КВК зв'язаних з кореляційними ефектами.

Вимірювання $\alpha_K \gamma$ 112.8кеВ ^{234}Pa проводились з джерелом з природнього U, продуктом розпаду якого є ^{234}Th (рис.12.) Розпад ^{238}U проходить ланцюгом $^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{Th} \rightarrow ^{234}\text{Pa}$. Характеристичне випромінювання ^{234}Pa зумовлено внутрішньою конверсією γ 112.8 кеВ. В K_x - спектрах Pa присутні також компонент K_x – випромінювання ^{231}Pa , відповідний ланцюгу $^{235}\text{U} \rightarrow ^{231}\text{Th} \rightarrow ^{231}\text{Pa}$.

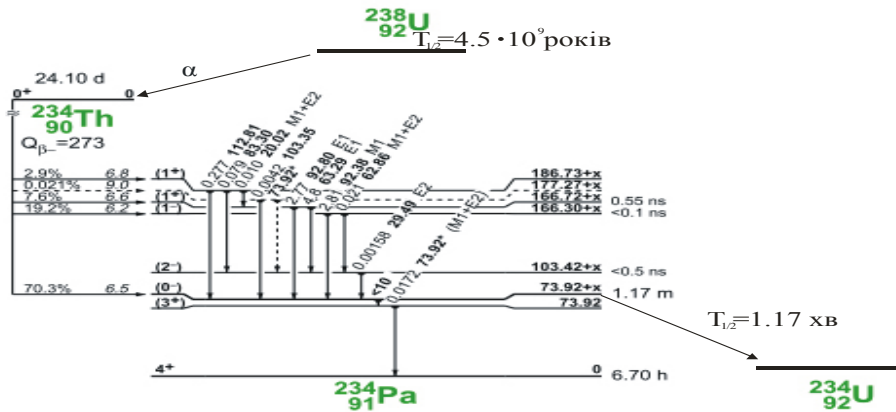


Рис.12.Схема розпаду ^{234}Th

Розпад активності мішені з природнього урану товщиною $100\text{мг}/\text{см}^2$ вимірювався на протязі 10 днів. За цей час було досягнуто статистичну похибку вимірювання $K_{\alpha 1}$ -лінії Pa $\leq 1\%$. Характерні ділянки K_x і γ -спектрів на рис.13. Активність ^{234}Pa ідентифікується по лінії γ 92, а ^{231}Pa по γ 84кеВ.

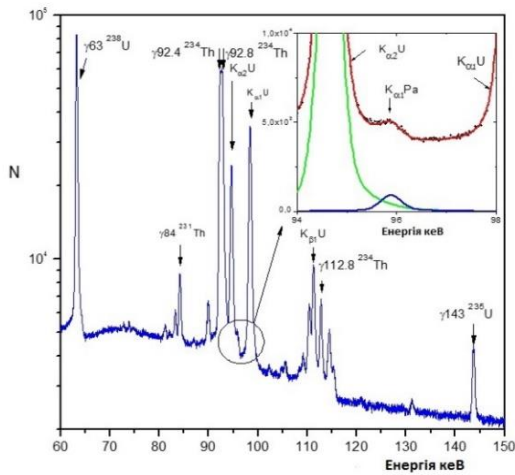


Рис.13. Фрагмент γ -спектру ^{234}Th виміряний на Ge-спектрометрі

При визначенні величини коефіцієнта внутрішньої конверсії допускалось, що K_{α} -лінія ^{234}Pa зв'язана з внутрішньою конверсією тільки для $\gamma 112.8\text{keV}$. Весь комплекс цих даних показує, що всі γ -кванти, крім $\gamma 112.8$, мають енергію меншу, чим енергія зв'язку К-електронів (112,6 кеВ). Частка K_x – випромінення, що утворюється при розпаді ^{231}Th , враховується за інтенсивністю $\gamma 84\text{keV}$ Використовуючи отримане значення I_{Kx} і виміряну інтенсивність I_{γ} γ -лінії $E_{\gamma}=112.8\text{keV}$, було отримане значення коефіцієнта внутрішньої конверсії $\alpha_K=0.220(11)$. Див. Таб.5.

Таб.5. Значення коефіцієнта внутрішньої конверсії

E_{γ} , кеВ	$E_{\gamma} - E_K$, кеВ	Γ , еВ	$\alpha_K^{\text{експ}}$	$\alpha_K^{\text{теор}}$
112.790	192	82	0.220(11)	0.277

В даній таблиці Γ -природня ширина К-лінії (розрахунок виконаний без врахування природньої ширини L-лінії); $\alpha_K^{\text{теор}}$ –табличне значення α_K , $\alpha_K^{\text{експ}}$ – значення отримане під час експерименту.

Як видно спостерігається значна різниця між теоретичним і експериментальним значенням. Так як $\alpha_K^{\text{експ}}$ значно менше $\alpha_K^{\text{теор}}$, домішка M2-компоненти, як і неврахованих γ -квантів високої енергії, тільки збільшить розбіжність, тому ці фактори можна не аналізувати. Роль ефектів проникнення в γ -переходах безпосередньо оцінити неможливо. Однак з аналізу схеми рівнів Pa, що заселяється при β - розпадах ^{234}Th витікає, що γ -переходи з енергією 92.4 кеВ і 112.8 кеВ розряджають стани однакової природи на один і той же низько лежачий стан. Данні про коефіцієнти внутрішньої конверсії 92.4 кеВ показують, що цей E1-перехід, в процес внутрішньої конверсії якого не дає значний вклад в ефекти проникнення. Тому можна зробити припущення, що у випадку $\gamma 112.8$ кеВ ефекти проникнення не можуть впливати на зміну величини α_K . Для розрахунку КВК при таких енергіях вирішальне значення має точність вимірювань енергії γ -переходу. Тому нами вперше була виміряна енергія $\gamma 112.8$ кеВ з точністю 2еВ і вона виявилась рівною $E_{\gamma}(\text{Pa})=112.790(2)\text{кеВ}$.

Для теоретичних розрахунків було зроблено припущення, що процес внутрішньої конверсії при кінетичних енергіях конверсійних електронів $< 1\text{кеВ}$ аналогічний фотоіонізації атомних станів і з врахування кореляційних ефектів. При використанні такого ж підходу до процесів внутрішньої конверсії γ -променів аналогічно атомним, приводить до виникнення додаткової складової в ймовірності внутрішньої конверсії.

З врахуванням цього нами розраховано $P^{\text{теор}}(Pa)=0.21$, $P^{\text{експ}}(Pa)=0.23(4)$ з врахуванням вакансій і $P^{\text{експ}}(Pa)=0.21(4)$ без врахування вакансій на К-оболонці відповідно. Як видно спостерігається гарна узгодженість експериментальних та розрахункових даних.

Тому, з усього вище сказаного можна зробити висновок, що спостережені відхилення експериментальних коефіцієнтів внутрішньої конверсії від табличних можна трактувати як прояв кореляційних ефектів в процесі внутрішньої конверсії γ -променів, при малих кінетичних енергіях електронів.

ВИСНОВКИ

Для дослідження атомно-ядерних ефектів при розпаді збуджених станів ядер методом напівпровідникової γ -спектроскопії були розроблені методики, створені установки і розроблений пакет програм, що забезпечують проведення тривалих експериментів і аналіз отриманих спектрометричних даних з точністю, необхідною для вивчення процесів, що протікають з малою імовірністю.

1. За допомогою розроблених методик вперше виміряно КВК на К-оболонці і доведено наявність ефекту проникнення в загальмованому М1-переході ^{115}In . Для цього переходу $\alpha_K^{\text{я}} = 8,74 \pm 0,09$ $\alpha_K^{\text{маб}} = 9,21$ і була отримана величина λ для переходу з енергією 35 кеВ в ^{115}In , $\lambda = 4,6 \pm 0,9$.

2. Вперше виміряно з високою точністю КВК на К оболонці для γ -переходів з енергіями 67 та 79 кеВ в ^{44}Sc і вперше спостерігався ефект проникнення в М1-переходах з $\lambda = 260 \pm 30$.

3. З високою точністю було виміряно КВК в М4-переходах $^{117,119}\text{Sn}$ і ^{125}Te , отримані данні: для ^{117}Sn $\alpha_K(156) = 30,8 \pm 0,6$, ^{125}Te $\alpha_K(109) = 181,3 \pm 3,6$, показано, що узгодження теоретичних та експериментальних даних досягається з врахуванням ефектів проникнення з $\lambda = 1 \pm 2$.

4. З високою точністю виміряні відносні інтенсивності гамма-переходів з розпаду ^{120}Sb . З отриманих даних визначені повні КВК і КВК на К-оболонці загальмованих $E1$ - та $E2$ -переходів з енергією 89.9 кеВ та 197.3 кеВ, відповідно.

З цих даних був вперше виявлений вклад ефектів проникнення у загальмованому $E1$ -переході з фактором заборони $F_W = 18000$, уточнено вклад ефектів проникнення в загальмований $E2$ -перехід. Вперше був визначений вклад спінових токів для $E1$ -переходу.

5. Вперше проведено комплексне дослідження по збудженню атома в процесі внутрішньої конверсії γ -променів і електронному захопленню. Було показано величину вкладу у збудження атомів Ag внутрішнього гальмівного випромінення конверсійного електрону та внутрішнього комптон-ефекту. Визначено ймовірність іонізації К-оболонки в процесі внутрішньої конверсії на К-оболонці γ -променів $P_{\text{КК}} = (2,46 \pm 0,12) \cdot 10^{-4} P_K$.

Вперше були отримані данні про виникнення процесу струшування електрону з електронної оболонки ядра в розпаді $^{123\text{m}}\text{Te}$. Імовірність подвійної іонізації атомів, згідно даних наших вимірів для ядра $^{123\text{m}}\text{Te}$ склав величину $P_{\text{КК}} = (6,6 \pm 0,7) \cdot 10^{-4}$.

Отримана величина знаходиться в гарному узгодженні з оцінками прямої взаємодії конверсійного електрона з сусіднім електроном.

6. Вперше були отримані експериментальні данні щодо ймовірності автоіонізації в процесі внутрішньої конверсії γ 81 кеВ на К-оболонці ядра ^{133}Cs , з вильотом електронів з кінетичною енергією менше 5 кеВ, який склав:

$$P_{KK}^K = (14 \pm 5) * 10^{-3}$$

Показано, що домінуючим механізмом для конверсійних електронів з низькою кінетичною енергією електронів є врахування «прямої» взаємодії К-електрона з сусіднім К-електроном.

7. Вперше виміряно збудження атому при електронному захопленні з випроміненням кінетичних електронів з граничною енергією 8,4 кеВ і показано що процес описується за рахунок миттєвої зміни кулонівського поля.

8. Проведено дослідження впливу кореляційних ефектів, для електронів з малою кінетичною енергією, на процес внутрішньої конверсії γ -променів на прикладі ядра ^{234}Pa . Виявлено, що вплив кореляційних процесів на процес внутрішньої конверсії в ^{234}Pa для переходів в яких кінетична енергія електронів є 192 еВ складає 23%. Для цього вперше було виміряно енергію γ 112.8 кеВ з точністю 2еВ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

Статті у реферованих фахових виданнях:

1. Вишневский И.М., Желтоножский В.О., Стрильчук М. В., Драпей С. С. Дослідження одночасного випущення двох К-електронів на ядрі $^{123\text{m}}\text{Te}$. // Збірник науковий праць Інституту ядерних досліджень.- Київ.-2003.-№1(9).-С.14-18.
2. Vishnevsky I.N., Drapey S.S., Zheltonozhsky V.A., Strilchuk N.V. / Search for ICC anomalies in nuclear transitions of ^{115}In , ^{117}In , and ^{125}Te // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, Volume 70, Issue 11, Pages 1842-1845, 2006.
3. Вишневський І.М., Желтоножський В. О., Стрильчук М. В., Зелінський О. Г, Драпей С. С. / Вивчення аномалій у процесі внутрішньої конверсії γ -променів ^{234}Pa // Збірник науковий праць Інституту ядерних досліджень.- Київ.-2006.-№1(17).- С.16-19.
4. Drapey S.S., Zheltonozhsky V.A., Sadovnikov L.V., Strilchuk N.V., Shkulkova O.G. / Study of penetration effects in the E1 and M1 transitions in ^{44}Sc // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, Volume 71, Issue 6, Pages 887-889, 2007.
5. Vishnevsky I.N., Drapey S.S., Zheltonozhsky V.A., Kochergina E.O., Strilchuk N.V. / Investigation of excitation of Ag atoms in internal conversion of γ rays.// Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, Volume 71, Issue 6, Pages 890-893.2007.
6. Vishnevsky I.N., Drapey S.S., Zheltonozhsky V.A., Zheltonozhskaya M.V., Strilchuk N.V. / Hypersatellites at ^{109}Ag , ^{123}Te , and ^{147}Pm autoionization during internal electron conversion // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, Volume 72, Issue 11, Pages 1559-1562, 2008.
7. Vishnevsky I.N., Drapey S.S., Zheltonozhsky V.A., Savrasov A.N., Khomenkov V.P. / Decay of ^{120}Sb // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, Volume 78, Issue 7, Pages 576-580, 2014.

Статті за матеріалами конференцій:

8. Драпей С.С., Желтоножский В.А., Садовников Л.В., Стрильчук Н.В., Шкулькова О.Г. / Исследование эффектов проникновения в E1- и M1-переходах ^{44}Sc // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов, №2.-С.45-47. 2006 г.
9. Вишневский И.Н., Желтоножский В.А., Драпей С.С., Кочергина Е.О., Стрильчук Н.В. / Исследование возбуждения атомов Ag в процессе внутренней конверсии γ -лучей // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов, №2.-С.41-44.2006 г.
10. Вишневский И.Н., Желтоножский В.А., Стрильчук Н.В., Драпей С.С. / Исследование возбуждения атома ^{133}Cs в процессе электронного захвата и внутренней конверсии γ -лучей в распаде ^{133}Ba // Известия РАН, Серия физическая, том 68, № 11, ст. 1538-1540, 2004 г.
11. Вишневский И.Н., Драпей С.С., Желтоножский В.А., Стрильчук Н.В. / Исследование аномалий в квк переходов в ядрах ^{115}In , ^{117}Sn и ^{125}Te // Известия Российской академии наук. Серия физическая, том 70, №11, ст 1608-1610. 2006г.
12. Драпей С.С., Желтоножский В.А., Садовников Л.В., Стрильчук Н.В., Шкулькова О.Г. / Исследование эффектов проникновения в E1- и M1-переходах ^{44}Sc // Известия Российской академии наук. Серия физическая, том 71, № 6, с. 915-917. 2007 г.
13. Вишневский И.Н., Драпей С.С., Желтоножский В.А., Кочергина Е.О., Стрильчук Н.В. / Исследование возбуждения атомов Ag в процессе внутренней конверсии γ -лучей // Известия Российской академии наук. Серия физическая, том 71, № 6, с. 918-921. 2006 г.
14. Вишневский И.Н., Драпей С.С., Желтоножский В.А., Желтоножская М.В., Стрильчук Н.В. / Гиперсателиты при автоионизации атомов ^{109}Ag , ^{123}Te и ^{147}Pm в процессе внутренней конверсии гамма-лучей // Известия Российской академии наук. Серия физическая, том 72, № 11, с. 1645-648, 2008 г.
15. Вишневський І. М., Желтоножский В. О., Драпей С. С., Саврасов А.М., Хоменков В.П. / Распад ^{120}Sb // Известия РАН, Серия физическая, том 78, №7, ст. 790-794, 2014 г..

АНОТАЦІЯ

Драпей С.С. Дослідження проникнення й струшування електронів у процесі внутрішньої конверсії гамма-променів. – На правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук (доктора філософії) за спеціальністю 01.04.16 – Фізика ядра, елементарних частинок та високих енергій. Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України, Київ, 2020.

В дисертації представлені експериментальні дослідження аномалій в процесі внутрішньої конверсії гамма променів. Спроектовано та реалізовано установки багатомірних збігів та антизбігів для виділення досліджуваних ефектів на загальному фоні конверсійних процесів. Розроблено математичний апарат та створено спеціальне програмне забезпечення для обробки отриманих практичних даних.

В роботі показано важливість врахування ефектів проникнення в M1-переходах, продемонстровано значне відхилення значень λ , від систематики

параметрів проникнення для M1-загальмованих переходів. Отримані дані, вказують на перспективність пошуку ефектів проникнення для внутрішньо-мультиплетних M1-переходів. Було проведено, з урахуванням поліпшеної технічної бази та спеціальних програмних пакетів, уточнення даних для КВК M1 та M4-переходів

Був вперше виявлений вклад ефектів проникнення у загальмованому E1-переході з фактором заборони $F_W = 18000$, уточнений вклад ефектів проникнення в загальмований E2-перехід. Вперше був визначений вклад спінових токів для E1-переходу.

Було проведено комплексне дослідження по збудженню атома в процесі внутрішньої конверсії γ -променів і електронному захопленню

Вперше отримані данні з автоіонізацією атомів ^{109}Ag , ^{123}Te і ^{133}Cs в процесі внутрішньої конверсії гама-променів і при автоіонізації Cs при електронному захопленні з низькою кінетичною енергією електронів. Показано домінування прямих процесів при автоіонізації атомів в процесі внутрішньої конверсії γ -променів.

Досліджено кореляційні ефекти в процесі внутрішньої конверсії γ -променів для γ -переходів з кінетичною енергією 0,2кеВ.

Ключові слова: Ефекти проникнення, струшування електронів, подвійна іонізація, переходи з фактором заборони, кореляційні ефекти, «пряма» взаємодія К-електрона з сусіднім К-електроном, автоіонізація в процесі внутрішньої конверсії.

ABSTRACT

Drapey S.S. Research of penetration and shaking of electrons in the process of gamma ray internal conversion. - On the rights of a manuscript. The thesis for the degree of Candidate of Science (PhD) in specialty 01.04.16 - Nuclear and elementary particles and high energies. Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2020.

The dissertation presents experimental studies of anomalies in the process of gamma ray internal conversion. There were designed and implemented installations of multidimensional coincidences and anticoincidence to highlight the studied effects against the general background of conversion processes. A mathematical apparatus was developed and special software was created for processing the obtained practical data.

This work shows the importance of taking into account the effects of penetration in M1-transitions, demonstrates a significant deviation, the values of λ , from the systematics of penetration parameters for M1-braked transitions. The obtained data indicate the prospects of finding penetration effects for internal multiple M1-transitions.

Taking into account the improved technical base and special software packages, the data clarification for ICR (internal conversion ratio) M1- and M4-transitions were provided. For ^{44}Sc and ^{120}Sn E1-transition, anomalies in ICR were detected for the first time.

The contribution of penetration effects in a braked E1-transition with a prohibition factor $F_W = 18000$ was detected for the first time, and the contribution of penetration effects to a braked E2-transition was specified. For the first time, the contribution of spin currents to the E1-transition was determined. A comprehensive study of the excitation of the atom in the process of internal conversion of γ -rays and electron capture was provided.

The process of double ionization as an interaction due to changes in the Coulomb field is studied, a simple analytical formula $P_{KK} = 0,093/Z^2$ is obtained, i.e. for nuclei with $Z \sim 50$ $P_{KK} \sim 4 \cdot 10^{-5}$ such values are good consistent with estimates of direct interaction of the conversion electron with neighboring electron.

The correlation effects in the process of internal conversion of γ -rays for γ -transitions with a kinetic energy of 0.2 keV have been studied.

Keywords: Penetration effects, electron shaking, double ionization, transitions with a prohibition factor, correlation effects, "direct" interaction of a K-electron with a neighboring K-electron, autoionization in the process of internal conversion.