

НЕПРУЖНІ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОНІВ ІЗ ЗБУДЖЕНИМИ АТОМАМИ

І.І. Шафраньош

Ужгородський національний університет, 294000, Ужгород, вул.Волошина, 54

Приведені ідея та результати досліджень непружних взаємодій електронів із збудженими атомами, які були виконані у 1972-2003рр.

У 1969 році з ініціативи Іллі Сергійовича Алексахіна в Проблемній науково-дослідній лабораторії фізики електронних зіткнень (ПНДЛ ФЕЗ) Ужгородського державного університету були розпочаті пошукові наукові дослідження процесів збудження атомів із метастабільних станів. На той час ця проблема була дуже актуальною, що було пов'язано із створенням нових технічних пристроїв з використанням плазми. В умовах плазми значна кількість атомів знаходиться у збуджених станах, які ефективно взаємодіють із електронами. Для розрахунку енергетичного балансу плазми необхідно було знати константи цих взаємодій та закономірності їх перебігу. У той же час потрібних даних практично не було. На цю проблему виділялися великі госпдоговірні кошти і вона була однією із базових мотивацій при відкритті ПНДЛ ФЕЗ.

Як науковий керівник Ілля Сергійович сформулював мені тему кандидатської дисертації, де йшлося про дослідження процесів збудження та іонізації атомів із збуджених станів електронним ударом. Практична спроба реалізації цих досліджень виявила низку труднощів експериментального характеру, які здавалися нездоланими. Серед них головними виявилися такі: приготування достатніх концентрацій атомів у збуджених станах, вимірювання їх величин і реєстрація малих світлових потоків на високому рівні фізичних шумів.

Прогрес у дослідженнях процесів збудження та іонізації атомів електронами із збуджених станів намітився лише на четвертому році напружених пошуків. Перші

результати були просто вражаючими і повністю компенсували нагромаджений негатив. Йдеться про наступне. Досліджувався процес збудження спектрального переходу $5^3P_2 - 6^3D_j$ ($\lambda = 403,2\text{нм}$) атома Sr (див. рис. 1).

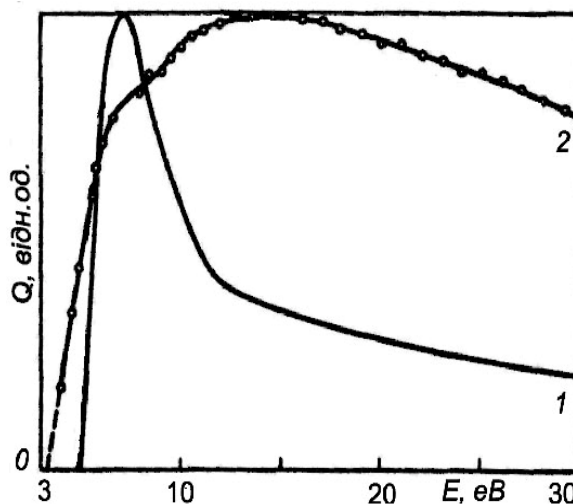


Рис. 1. Енергетична залежність перерізу збудження спектрального переходу із метастабільних (2) та основного (1) станів.

Із основного стану енергетична залежність ефективного перерізу збудження цього переходу має різке зростання біля порогу і стрімкий спад при більших енергіях. Зовсім інша картина спостерігається при збудженні цього переходу із збудженого, метастабільного стану. Таку відмінність ми пояснили тим, що у процесі збудження із метастабільного стану має місце явище обміну між бомбардуючим і атомним електроном із зміною спінового стану атому. Таким чином, ми вперше показали як поводить переріз збудження спектрального переходу із метастабільного стану. Це, по-перше. А по-друге, ми експеримен-

тально наглядно показали вплив явища електронного обміну із зміною спіна на енергетичну залежність перерізу збудження спектрального переходу. І.С. Алексахін запропонував негайно направити отриманий результат разом із його поясненням у журнал "Письма в ЖЭТФ", що і було зроблено [1].

Отриманий результат, попри свою важливість, становив лише половину розв'язку проблеми. Другу половину становило визначення абсолютної величини ефективного перерізу збудження спектрального переходу. Для цього необхідним було виконати виміри концентрації метастабільних атомів у пучку. Відомо, що метастабільні атоми відносяться до фізично нестабільних мішеней, і тому більшість відомих методів для визначення їх концентрації є непридатними. Винятком є абсорбційний метод у його різних модифікаціях. Однак, на той час вважалося аксіомою те, що явище поглинання випромінювання в атомному пучку є нехтовно малим з причини малих концентрацій атомів, а тому виміряти поглинання неможливо. Цю аксіому сповідували як на кафедрі квантової електроніки Ужгородського університету, так і в цитаделі радянської спектроскопії-Ленінградському університеті. Коефіцієнт поглинання χ_0 для центру спектральної лінії має вигляд

$$\chi_0 = \frac{2}{\Delta v_g} \cdot \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \cdot \frac{\pi e^2}{m_0 c} \cdot f_v \cdot N$$

де f_v -сила осцилятора спектральної лінії, N -концентрація поглинаючих атомів; e та m_0 – заряд та маса електрону відповідно; Δv_g – півширина доплерівського контуру поглинання. Науковці залишили поза увагою той факт, що при заданій температурі півширина контуру поглинання у пучку може бути суттєво меншою і буде визначатися геометричними параметрами системи формування атомного пучка. Таким чином, в атомних пучках із малою кутковою апертурою коефіцієнт поглинання для центру спектральної лінії суттєво збільшується, що дозволяє виміряти величину поглинання, а відповідно

визначити концентрацію атомів у пучку. На базі таких міркувань були поставлені експерименти, які принесли успіх. Виявилося, що уже при концентраціях 10^9 см^{-3} величина відносного поглинання становить – 30% для резонансних ліній, і 7% для спектральних ліній, нижній рівень яких є метастабільним. Це і був шуканий розв'язок. Із врахуванням цього розробка базової блок-схеми експерименту для дослідження процесів збудження атомів із метастабільних станів була завершена (див. рис. 2).

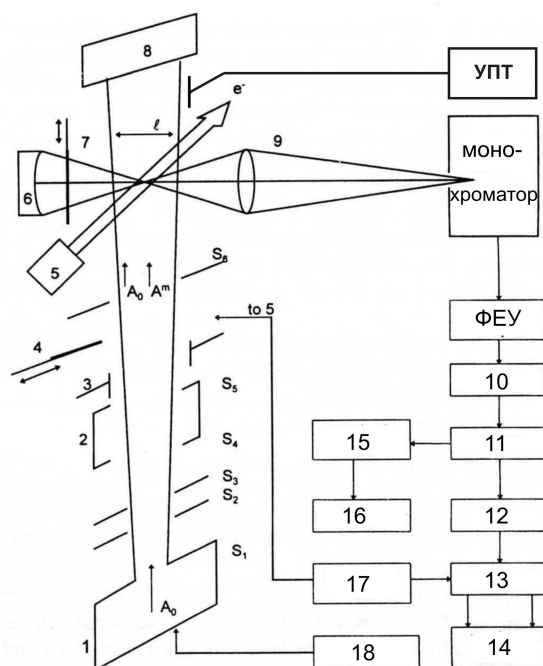


Рис. 2. Блок-схема експериментів для досліджень процесів збудження із метастабільних станів: 1-ефузійне джерело атомного пучка; S_1 - S_6 – колімуючі щілини; 2-розрядна камера – розрядна камера; 3- конденсатор; 4- засувка ; 5- джерело електронного пучка; 6-дзеркало; 7- закривка дзеркала; 8- колектор атомів; 9- конденсорна лінза; 10, 11- широкосмугові підсилювачі; 12- формувач імпульсів; 13- комутатор; 14- реверсивний лічильник; 15- інтенсиметр; 16- самописець; 17- блок модуляції електронного пучка; 18- джерело нагріву ефузійної камери; УПТ- система реєстрації іонів.

В подальшому експеримент та методика досліджень удосконалювались [2]. Це дозволило виконати дослідження процесів збудження для широкого класу хіміч-

них елементів. Зокрема, це елементи Mg, Ca, Sr, Ba, Tl, Cu, Cd, Na. Для останнього елементу були вперше виконані дослідження процесів збудження із резонансного $^2P_{3/2}$ -стану. Але ці дослідження були виконані нами уже в Ризі. Взагалі, І.С. Алексахіну був властивий широкий погляд на наукові дослідження. Уже тоді він бачив перспективи кооперації зусиль різних наукових груп. Так, я працював у Ризі, а Г.Г. Богачов у Новосибірську.

Процеси іонізації із метастабільних станів були вивчені для атомів Mg, Ca, Sr, Ba. Була отримана нова інформація про ці процеси. Для прикладу на рис.3 приведена енергетична залежність перерізу іонізації (функція іонізації) метастабільних атомів кальцію. Для порівняння приведена також і енергетична залежність перерізу іонізації із основного стану кальцію. Дані рис. 3 демонструють ряд відмінностей у перебігу процесів іонізації із метастабільних та із основних станів атомів. Зокрема, це стосується енергетичних положень максимумів перерізів іонізації, абсолютних величин цих перерізів, наявність структурних особливостей у перерізах процесів. Вказані відмінності детально проаналізовані у роботі [3].

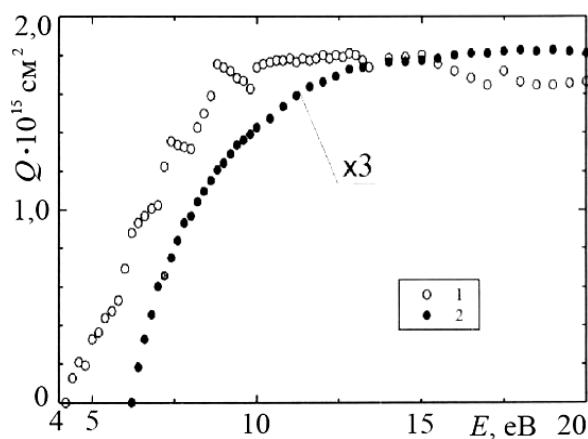


Рис. 3. Ефективні перерізи іонізації кальцію: 1 – із триплетних метастабільних станів; 2 – із основного стану.

Розроблені та добре апробовані апаратурні і методичні новинки дозволили розпочати вивчення іншого виду електрон-атомних взаємодій – зіткнень II-го роду електронів із метастабільними атомами

(надпружне розсіяння електронів). На рис.4 приведена блок-схема вимірювань енергетичних спектрів надпружно розсіяних електронів.

Відповідні дослідження були виконані для атомів Mg, Sr, Ba [4]. Детальне вивчення цих процесів дозволило зробити важливий висновок про те, що надпружне розсіяння електронів супроводжується утворенням збуджених станів негативних іонів.

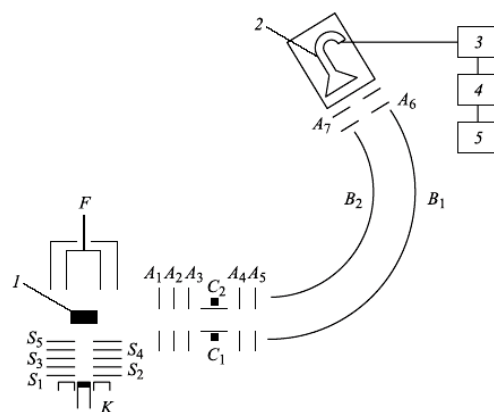


Рис. 4. Блок-схема вимірів спектрів втрат енергій: К-катод; $S_1 - S_5$ – електроди електронної гармати; F- приймач електронів; $A_1 - A_7$ – електроди 127° -ного циліндричного конденсатора; C_1, C_2 – пластини коректуючого конденсатора; B_1, B_2 – пластини 127° -ного циліндричного конденсатора; 1-атомний пучок; 2-вторинний електронний помножувач; 3-широкосмуговий підсилювач; 4-інтенсиметр; 5-двокоординатний самописець.

Отримані результати виконаних досліджень процесів непружних взаємодій електронів із збудженими атомами дозволили встановити ряд нових закономірностей, які збагатили фізику електронних зіткнень.

1. Встановлено, що перерізи збудження спектральних переходів із збуджених станів суттєво (в 10-400 разів) перевищують перерізи збудження цих же переходів із основних станів. При цьому найбільші перерізи характерні для спектральних переходів з нижніх рівнів, процес збудження яких іде при зміні квантових чисел початкових і кінцевих станів: $\Delta n = 0$; $\Delta J = \pm 1$;

$\Delta L = \pm 1$; $\Delta S = 0$. Ці перерізи збудження досягають за порядком величину $\sim 10^{-15} \text{ см}^2$ та більше, а для окремих атомів перевищують перерізи збудження резонансних переходів із основних станів. Значно меншими перерізами характеризуються переходи з рівнів, процес збудження яких іде із зміною орбітального квантового числа на $\Delta L = \pm 2$. Для спектральних переходів з рівнів, які збуджуються з $\Delta L = \pm 0$, характерні найменші перерізи збудження.

2. Встановлено, що для атомів Mg, Ca, Sr, Ba із метастабільних станів ефективно збуджуються спектральні переходи із рівнів двоелектронного збудження таких конфігурацій p^2 , dp , d^2 . При цьому збудження рівнів цих конфігурацій проходить шляхом одноелектронних переходів (на відміну процесів прямого збудження).

3. Показана явна залежність відношення перерізів збудження спектральних переходів із основних та із метастабільних станів (σ^m/σ^0) від енергетичного положення метастабільного стану. Чим вище розташований метастабільний стан, тим більше значення приймає відношення σ^m/σ^0 .

4. Виявлено, що функції збудження спектральних переходів із збуджених та із основних станів суттєво відрізняються за своєю формою. Такі відмінності пояснюються різними механізмами взаємодії електронів з початковими станами атома.

5. Вивчено новий клас функцій збудження спектральних переходів, верхні рівні яких збуджуються внаслідок міжоболонкових переходів із повністю заповненої оболонки в частково заповнену оболонку. Показано, що такі переходи мають обмінний характер, внаслідок чого функції збудження спектральних переходів з цих рівнів характеризуються гостро вираженими максимумами біля порогу збудження.

6. На функціях збудження спектральних переходів знайдено структурні особливості резонансного характеру. У окремих випадках (мідь, талій) структурні особливості мають вигляд домінуючих максимумів на функціях збудження.

7. Вперше досліджено процеси іонізації із метастабільних станів атомів лужноземельних елементів. Показано, що перерізи утворення однозарядних іонів із метастабільних станів досягають за порядком величин $\sim 10^{-15} \text{ см}^2$ і помітно перевищують (у 3 – 6 разів) перерізи іонізації із основних станів атомів.

8. Виявлено, що максимуми перерізів іонізації із метастабільних станів у порівнянні з іонізацією із основних станів зміщуються у область менших енергій. На енергетичних залежностях перерізів іонізації виявлена структура, яка обумовлена додатковими каналами утворення іонів шляхом іонізації більш глибокого s-електрону, а також через автоіонізаційні процеси.

9. Встановлено, що ефективність процесу іонізації, на відміну від процесу збудження, менш чутлива до квантово-механічних характеристик початкового стану.

10. Вперше визначено ефективні перерізи надпружньо розсіяних електронів, максимальні значення яких становлять $3 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ для магнію та $20 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ для стронцію. На енергетичних залежностях перерізів надпружнього розсіяння виявлена резонансна структура, для пояснення якої пропонується двоканальна модель перебігу процесу: потенціальне розсіяння електронів на полі атома; розсіяння через проміжну ланку — утворення та розпад збуджених станів негативного іона.

Пропонована модель дістала своє експериментальне підтвердження.

Виконані дослідження стимулювали розвиток і удосконалення теоретичних методів досліджень.

На завершення слід сказати, що у викладених вище дослідженнях група дослідників відділу електронних процесів Проблемної науково-дослідної лабораторії фізичної електроніки має незаперечний світовий пріоритет. І тут приходять на думку пророчі слова І.С. Алексахіна, сказані ще у 1969 році: „Якщо буде розв’язана ця проблема, то нас чекають чудові наукові перспективи”.

ЛІТЕРАТУРА

1. І.І.Шафраньош, И.С. Алексахин, И.П. Запесочный, Письма в ЖЭТФ, 19, вып.5, 271 (1974).
2. I.I. Shafranyosh, T.A. Snegyrskaya., N.A.Margitich, S.P.Bogacheva, V.I.Lengyel, O.I.Zatsarinny, J.Phys.B: At. Mol. Opt. Phys.30, 2261 (1997).
2. I.I.Shafranyosh, N.A.Margitich, Zeit. für Phys.D. 37, No.2., 97 (1996).
3. И.И.Шафраньош, В.И.Марушка, Письма в ЖТФ. 29, вып.22, 162, (2003).

**ELECTRON INELASTIC INTERACTION WITH
EXCITED ATOMS**

I.I.Shafranyosh

Uzhgorod National University, 88000, Uzhgorod, Voloshin, 54

Investigation idea and experimental results of the electron inelastic interaction with excited atoms, which were realized through 1972-2003, are presented.