

# ЕЛЕМЕНТАРНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ПОВІЛЬНИХ ІОН-АТОМНИХ ЗІТКНЕННЯХ – НОВИЙ НАУКОВИЙ НАПРЯМОК, ЗАПОЧАТКОВАНИЙ У ЛАБОРАТОРІЇ ПРОФЕСОРА І. П. ЗАПІСОЧНОГО

**А. М. Завілопуло**

Інститут електронної фізики НАН України

У статті викладено основні етапи розвитку наукових досліджень повільних іон-атомних зіткнень, які були виконані в проблемній лабораторії фізики електронних зіткнень Ужгородського університету. Вони були започатковані проф. С.С.Попом за рекомендацією проф. В.М.Дукельського, а далі продовжені та розгорнуті іншими працівниками кафедри квантової електроніки і проблемної лабораторії. Дано аналіз наукових праць, що стосуються вивчення елементарних процесів збудження, іонізації та резонансної і нерезонансної перезарядки, які опубліковані у відомих наукових журналах (УФЖ, ЖЭТФ, ЖТФ та інші). Обговорено різні аспекти взаємодії частинок, описані нові явища та аспекти, наведено перелік наукових праць. Окремо виділено дослідження різних елементарних процесів і вказано авторів, що їх вивчали. Наголошено на ролі засновника ужгородської школи з фізики елементарних зіткнень проф. І.П.Запісочного.

Особливою ознакою початку 70-х років минулого століття був бурхливий, цілеспрямований розвиток тих напрямків фізичної науки, в яких була потреба при розв'язанні проблем керованого термоядерного синтезу, фізики і техніки іонних та плазмових двигунів, фізики космосу та хімії високих енергій. Характерною рисою Івана Прохоровича Запісочного було вміння вийти на передовий рубіж наукових пошуків зі своїм власним обличчям. Якщо в більшості наукових центрів дослідження взаємодії важких частинок проводились у діапазоні великих енергій (сотні кеВ), то в лабораторії І.П. Запісочного [1] вони з самого початку були зосереджені на найважчій, але водночас найбільш цікавій ділянці – області низьких енергій зіткнень іонів з атомами. Саме такі результати являють суттєвий інтерес як для атомної фізики, так і для суміжних наук та їх технічних застосувань. У таблиці 1 наведено основний склад ужгородських науковців, які досліджували елементарні процеси при взаємодії важких частинок.

Перші роботи в Ужгороді з цього напрямку досліджень здійснено з ініціа-

тиви Степана Степановича Попа. Було експериментально і теоретично вивчено [2–5] збудження випромінювання при зіткненнях іонів лужних металів  $K^+$  і  $Cs^+$  з атомами гелію, неону й аргону. Позитивні іони утворювалися за допомогою джерела, що працювало в режимі поверхневої іонізації, і формувалися системою щільних електродів в інтенсивний пучок. Спектри випромінювання досліджувались у видимій області оптичного діапазону. Виявилось, що найбільш інтенсивними були спектральні лінії бомбардуючих іонів з рівнів конфігурації  $ns^2np^5(n+1)p$ . Для цих ліній і було виміряно абсолютні перерізи функції збудження (ФЗ) у діапазоні енергій взаємодії партнерів від порогу до 30 кеВ. Встановлено, що експериментальні значення порогів збудження ліній значно перевищують кінематичні пороги, які визначаються законами збереження енергії-імпульсу. Цей експериментально встановлений факт дозволив зробити висновок, обґрунтований потім теоретично, що збудження подібних іон-атомних систем відбувається при малих між'ядерних відстанях.

## Елементарні процеси при повільних іон-атомних зіткненнях

Склад наукової групи	Процеси (енергія)	Взаємодіючі частинки	
		іон, атом	мішень
Поп С.С., Кривський І.Ю., Балецька М.В. [2–6]	збудження іонів (поріг – 30 KeV)	$K^+$ , $Cs^+$	He, Ne, Ar
Шпеник О.Б., Завілопуло А.М. [8–12, 14, 22, 23]	збудження мішені, перезарядка зі збудженням (5 – 1200 eV)	$Zn^+$ , $Cd^+$ , $Na^+$ , $Li^+$ , $K^+$ , $Rb^+$ , $Cs^+$ , $Mg^+$ , $Ca^+$ , $Sr^+$ , $Ba^+$	Zn, Cd, Na, Rb, Cs
Шпеник О.Б., Овчинников В.Л., Волович П.Н. [13, 15–16]	перезарядка зі збудженням (10 – 2500 eV)	$Mg^+$ , $Ca^+$ , $Sr^+$ , $Ba^+$	He, Ne, Ar, Kr, Xe
Шевера В.С., Соскида М.-Т.І., Феннич П.А. [24–26]	перезарядка зі збудженням (2 – 400 eV)	$He^+$ , $Ne^+$ , $Ar^+$	Zn, Cd
Шпеник О.Б., Завілопуло А.М., Панев Г.С., Ксаверій Ю.О. [17–21]	перезарядка зі збудженням, резонансна перезарядка (3 – 1500 eV)	$Mg^+$ , $Ca^+$ , $Sr^+$ , $Ba^+$	Na, Rb, Cs, K, Mg, Ca, Sr, Ba
Завілопуло А.М., Шкоба Б.В., Шпеник О.Б., Контрош Є.Є. [28–31]	пружне розсіювання, збудження метастабільних станів мішені (20 – 1500 eV)	$Mg^+$ , $Na^+$	He, Ne, Ar, $N_2$ , $CO_2$
Завілопуло А.М., Снігурський О.В., Жуков О.І., Шпеник О.Б. [32–37]	утворення атом- молекулярних комплексів	Na, Li, Ca	$O_2$ , $N_2$ , $CO_2$

Подальший прискіпливий теоретичний аналіз [6] одержаних даних дозволив зробити важливий висновок, що широко вживаний у фізиці важких зіткнень “критерій Мессі” не враховує динаміки процесу збудження в області малих енергій взаємодії. Що стосується загального ходу енергетичних залежностей перерізів збудження досліджених рівнів, то вони задовільно узгоджувались з кривими, розрахованими у тритермовому наближенні теорії Ландау-Зінера [6].

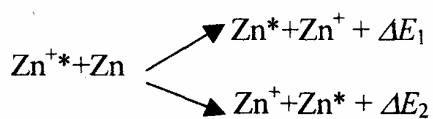
Логічним розвитком нового напрямку іон-атомних зіткнень був цикл досліджень започаткований у відділі Отто Бартоломійовича Шпеника, виконаний при ще нижчих енергіях бомбардуючих іонів (див. табл.1). Складність цих експериментів полягала в тому, що як мішені використовувалися атоми металів. Тут доречно зупинитися на конструкції ефективного джерела іонів [7], яке сконструйоване спеціально для досліджень повільних іон-атомних зіткнень і використовується вже

понад 35 років. Це компактне, малогабаритне, з високим імпедансом джерело, запропоноване Шпеником О.Б. та Завілопуло А.М. у 1967 році, на відміну від відомих на той час конструкцій, стабільно працювало з металевими атомами з різною температурою насичених парів, а іонний струм при цьому сягав 100 мкА, густина струму – 27 мА/см<sup>2</sup>.

Як вже згадувалося вище, адіабатична гіпотеза (критерій Мессі) стверджувала, що непружні процеси зіткнень важких часток поблизу порогу малої ймовірності, їх ефективністю можна знехтувати. Однак, перші дослідження перезарядки зі збудженням повільних іонів цинку на атомах цинку, кадмію та натрію [8] вказали на достатньо ефективну біляпорогову поведінку цих процесів. Вперше було простежено залежність процесів перезарядки зі збудженням від дефекту енергії реакції взаємодії та знайдено, що для резонансного екзотермічного процесу (від’ємний дефект енергії реакції) відбувається

ся різке зменшення ефективного перерізу. Наступним етапом цих досліджень [9–11, 22, 23] було вимірювання ФЗ резонансних інтеркомбінаційних та одиночних ліній атомів кадмію і цинку, а також ліній з перших збуджених триплетних S, D й одиночних D рівнів кадмію і перших збуджених триплетних S та одиночного D рівнів цинку. Крім того, вперше зроблено порівняння абсолютних перерізів збудження 13 спектральних ліній атомів цинку й кадмію з теоретичними розрахунками та з даними дослідження процесів збудження цих же ліній електронним ударом. Експерименти проводилися на установці, що була в основних рисах аналогічна пристрою з попередньої роботи, але суттєво модернізована. Так, іонно-оптичну систему було доповнено 127-градусним циліндричним електростатичним конденсатором, а конструкція джерел живлення дозволяла “перестроювати” джерело іонів у режим роботи як джерела електронів. Це давало можливість в однакових умовах провести порівняння ефективності збудження атомів електронним та іонним ударом.

Особливої уваги заслуговує вперше спостережений ефект передачі енергії збудження для процесу резонансної перезарядки іонів цинку на власних атомах ( $Zn^+ + Zn$ ). Суть цього явища полягає в тому, що ефективний переріз збудження деяких спектральних ліній різко (майже резонансно) зростає біля порогу, а величина максимуму залежить від кількості збуджених іонів у іонному пучку (енергії в розрядній камері джерела іонів). Ефект передачі енергії збудження яскраво проявився при збудженні лінії ZnI 481.1 нм [11]. ФЗ в інтервалі енергій від порогу до 900 еВ має декілька максимумів, і лише величина та природа першого залежить від стану іонів у джерелі. Тобто внесок у цей максимум давали такі процеси з практично рівними дефектами енергії  $\Delta E$ :



Природа інших максимумів на енергетичних залежностях ФЗ не залежить від наведених вище реакцій і пов’язана з процесом прямого збудження атомів іонним ударом.

Розробка новітньої концепції підходу до дослідження іонно-атомних взаємодій дозволила розвинути новий науковий напрям у фізиці електронних зіткнень та провести цілу низку цікавих досліджень, які разом з дослідженнями відомої групи Бобашева С.В. (ФТІ ім. А.Ф.Йоффе) внесли суттєвий внесок у розуміння процесів внутрішнього перерозподілу енергії між двома взаємодіючими атомними системами – „іон-атом”.

Так, у наступній серії експериментів [12, 13] вперше виконано ґрунтовні дослідження збудження випромінювання, що виникає при повільних зіткненнях іонів лужноземельних елементів ( $Mg^+$ ,  $Ca^+$ ,  $Sr^+$ ,  $Ba^+$ ) з атомами інертних газів (He, Ne, Ar, Kr і Xe). Шляхом вивчення випромінювання при зіткненнях різних пар частинок встановлено такі особливості: у всіх випадках найбільш ефективно збуджуються бомбардуючі іони; має місце досить сильний процес нерезонансної перезарядки іонів  $Ca^+$ ,  $Sr^+$ ,  $Ba^+$  на атомах Ar, Kr і Xe з одно- і двоелектронним збудженням атомів Ca, Sr та Ba, що утворюються внаслідок перезарядки; атоми мішені інтенсивно збуджуються лише в одному випадку пари:  $Mg^+ + Ne$ . Особливо детально були досліджені ФЗ в області енергій від порогів до 2,5 KeV і визначені перерізи збудження резонансних ліній як бомбардуючих іонів, так і нейтральних атомів, які виникають за рахунок перезарядки.

На ряді ФЗ ліній спостерігається структура (чергування максимумів і мінімумів). Особливо виразна вона у випадку ліній, що випромінюються внаслідок перезарядки. Зроблено припущення, що осцилюючий характер структури перерізів збудження є результатом конкуренції енергетично рівновигідних каналів перебігу реакції взаємодії партнерів.

Подальшим розвитком досліджень з вивчення оптичного каналу дисипації енергії при взаємодії іонів з атомами був

великий цикл робіт, у якому досліджено процеси збудження при зіткненнях іонів лужних ( $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Rb}^+$  і  $\text{Cs}^+$ ), лужноземельних елементів ( $\text{Mg}^+$ ,  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Sr}^+$ ,  $\text{Ba}^+$ ) та іона  $\text{Zn}^+$  з атомами кадмію [14]. Одноразово започатковано дослідження збудження спектрів при зіткненнях іонів  $\text{Mg}^+$ ,  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Sr}^+$ ,  $\text{Ba}^+$  з атомами інертних газів та ртуті [15, 16] у більш широкому інтервалі енергій взаємодії іонів з атомами.

У цих дослідах суттєво модернізовані установки збагатилися новими елементами. Так, запроваджено універсальне і стабільне джерело іонів малих енергій, яке, залежно від робочої речовини, може працювати у трьох режимах: з поверхневою іонізацією, з низьковольтним розрядом та, особливо, з електронним бомбардуванням. У методичному плані новим було те, що абсолютні виміри інтенсивностей ліній (видимого та ультрафіолетового діапазону) здійснювалися трьома незалежними методами, а саме класичним методом порівняння з еталонним джерелом, шляхом екстраполяції за відомими теоретичними розрахунками та порівнянням з відомими абсолютними перерізами електронним ударом (для цього, як вказано вище, джерело іонів працювало в режимі джерела електронів).

Таким чином, дослідження процесів збудження логічно розподілилося за трьома такими класами:

*перший клас* – збудження при зіткненнях різноманітних іонів з однією і тією ж мішенню. Тут простежено всі можливі канали дисипації енергії налітаючих іонів, вивчено поведінку ФЗ тих самих спектральних ліній залежно від характеру електронної оболонки іона і виявлено причини появи екстремумів на ФЗ;

*другий клас* – особливість будови зовнішніх оболонок атомів мішені (благородні гази) і бомбардуючих іонів (лужноземельні елементи) дозволила вивчити процеси збудження енергетично ізольованих рівнів та зрозуміти механізми непружних процесів поблизу їх порогів;

*третій клас* – визначення співвідношення між екзо- та ендотермічними реакціями, що дозволило виявити причини виникнення регулярної осциляційної структури в повних перерізах непружних іонно-атомних взаємодій.

У результаті цих досліджень вдалося виявити основні канали дисипації кінетичної енергії бомбардуючих іонів, з'ясувати характер збудження одних і тих же енергетичних рівнів атомів (іонів) залежно від енергій взаємодії. Зокрема, встановлено, що реакція взаємодії є багатоканальною, а ефективність проходження у тому чи іншому каналі безпосередньо прямо залежить від природи частинок, що зіткнулися.

Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що ФЗ тих спектральних ліній, верхні рівні яких є енергетично ізольованими, мають гладку (плавну) форму. І, навпаки, за наявності двох або більше енергетично близьких конкуруючих каналів, за якими відбуваються реакції, на ФЗ з'являється структура. Далі знайдено, що вклад каскадних переходів на вхідні рівні спектральних ліній у більшості випадків незначний. Експериментально знайдені порогові збудження ліній, за винятком пари  $\text{Mg}^+$  –  $\text{Cd}$ , перевищують кінематичні, тобто порогові, обчислені, виходячи з законів збереження енергії та імпульсу. Виявлено також, що ФЗ компонент резонансних дублетів іонів лужноземельних елементів співпадають.

При ретельній класифікації форм ФЗ досліджуваних спектральних ліній (а їх понад 250!) було визначено два найбільш характерних їх типи. Перший тип – це ФЗ більшості ліній бомбардуючих іонів, у яких відсутній чіткий поріг та незначна швидкість росту перерізу у біляпороговій ділянці енергій взаємодії. Такі криві добре апроксимуються експоненціальними залежностями згідно з адіабатичною теорією збурень. Другий тип ФЗ ліній має чіткий поріг, швидкий ріст перерізу біля порогу. Ці енергетичні залежності перерізів збудження добре описуються модифікованою моделлю Ландау-Зінера, яка допускає порушення адіабатичності вже при значних між'ядерних відстанях. Останнє

пов'язане з різким наближенням (псевдоперетинанням) термів квазімолекули, яке утворюється при зіткненні іона з атомом.

До появи згаданих вище робіт з прецизійним визначенням біляпорогової поведінки ФЗ вважалося, що при зіткненнях важких частинок заселення атомних рівнів поблизу кінематичного порогу мало ймовірно. Результати робіт [9–11, 22] дозволили зробити висновок, що збудження біля порогу визначається двома процесами: заселення вихідних рівнів відбувається шляхом тунельних (підбар'єрних) переходів або за рахунок перетину термів квазімолекули. Ці два механізми заселення енергетичних рівнів поблизу порогу наочно проявилися на ФЗ резонансного дублету іона барію в процесі  $Ba^+ + Cd$  [14].

Іншим важливим результатом цієї серії досліджень було спостереження тонкої структури ФЗ у вигляді регулярних (в шкалі зворотних швидкостей) осциляцій перерізів непружних процесів. Встановлено два різних механізми їх походження. Перший тип регулярних осциляцій пов'язаний з неадиабатичною взаємодією термів на великих між'ядерних відстанях. Теоретично цей тип було розглянуто лєнінградськими вченими С.В.Бобашовим і В.І.Перелєм (ЖЭТФ, 1971) на основі гіпотези Н.Розенталя (1969) про фазову інтерференцію квазімолекулярних станів. Другий тип інтерференції термів квазімолекули було знайдено у ході досліджень при зіткненнях лужноземельних іонів з атомами інертних газів. У цьому випадку інтерферують квазімолекулярні терми, які заселяють компоненти одного й того ж дублетного рівня іона. Нарешті, у цих же дослідках при вивченні поляризації було відкрито ще один тип інтерференції випромінювання при зіткненні важких частинок. Він є результатом взаємодії термів квазімолекули, які заселяють зеєманівські підрівні одного й того ж стану атомної системи.

Додамо, що деякі енергетичні залежності мають яскраво виражений "резонансний" вигляд, що "не вкладається" в рамки відомих теоретичних моделей. Однак, зіставлення отрима-

них у цих роботах результатів з даними про спектри електронів, що звільняються при іон-атомних зіткненнях, дозволяє припустити, що ці "резонанси" зумовлені утворенням і розпадом короткоживучих станів негативних іонів, що виникають у процесі зіткнень.

Авторам цієї серії робіт також належить честь відкриття ще двох ефектів. Перший – це регулярні осциляції протилежних фаз (з однаковими амплітудами) на ФЗ лінії з рівня  $4^3S_1$  атома Mg (518,4 нм) та резонансної лінії атома Rb (780 нм) у процесі  $Mg^+ + Rb$  [18]. Другий ефект спостережено для пари  $Mg^+ + Cs$ . Тут ФЗ того ж самого переходу  $3^3P_{012} - 4^3S_1$  атома Mg, який перезарядився, зазнає дві регулярні осциляції з різними періодами еквідистантності. Такі регулярні осциляції з двома модами коливань обумовлені взаємодією трьох термів квазімолекули [6, 19].

Цікавим продовженням у розумінні природи зіткнення важких частинок була серія експериментів, у яких досліджувалися повні перерізи резонансної перезарядки іонів лужноземельних елементів на власних атомах [20, 21]. На спеціальній установці було застосовано оригінальну систему (захищену авторським свідоцтвом на винахід [17]) витягування та реєстрації повільних іонів, що утворюються в процесі резонансної перезарядки. Основою цієї системи є квадрупольний конденсатор. Оригінальність його використання полягала в тому, що навколо осі квадруполя електричне поле практично відсутнє. Це дає можливість пропускати через нього пучок бомбардуючих іонів з дуже низькою енергією (аж до 1–2 еВ), що дозволяло, на відміну від інших методів, вивчати процес перезарядки практично з самого порогу.

У підсумку досліджено особливості процесу резонансної перезарядки іонів  $Mg^+$ ,  $Ca^+$ ,  $Sr^+$ ,  $Ba^+$  на власних атомах в області енергій від 3 до 1000 еВ. Показано, що її перерізи зростають із

зменшенням енергії взаємодії, а також від пари  $Mg^+ + Mg$  до пари  $Ba^+ + Ba$ . При мінімальній енергії бомбардуючих іонів ( $\sim 3$  eВ) ефективні перерізи мають величини від  $1,5 \cdot 10^{-14}$  до  $4 \cdot 10^{-14}$  см<sup>2</sup> відповідно. У той же час, якщо для пари  $Mg^+ + Mg$  переріз монотонно зменшується із зростанням енергії, то для решти пар вперше спостережено і ретельно досліджено чітко виражену осциляцію перерізів резонансної перезарядки. Було знайдено емпіричну формулу, яка описує ці регулярні (в шкалі зворотних швидкостей) осцилюючі компоненти повних перерізів перезарядки, визначено частоту і фази осциляцій. Природа осцилюючої структури повністю відповідає теорії Розенталя-Бобашова-Переля, яка заснована на фазовій інтерференції відповідних термів квазімолекули, що утворюється при таких зіткненнях.

Поява іонних газових лазерів, активне середовище яких складається з двокомпонентної суміші інертного газу і пари металів, спонукала до необхідності експериментального вивчення зіткнень іонів інертних газів з атомами металевих елементів, тобто основних компонент суміші. Ці дослідження було виконано для випромінювальних переходів іонних ліній цинку та кадмію, що виникають при взаємодії атомів Zn і Cd з однорідними за енергією пучками іонів  $He^+$ ,  $Ne^+$  і  $Ar^+$  [24–26].

Експериментальна установка складалася з традиційних для даного типу досліджень вузлів. При цьому пучки іонів інертних газів утворювались у плазмотроні і формувались у високому вакуумі в однорідний іонний пучок за допомогою 127-градусного циліндричного електростатичного конденсатора. Виміри проводилися в області енергій пучків іонів 2–400 eВ, що відповідає діапазону швидкостей  $(1,0-14,0) \cdot 10^6$  см/с для  $He^+$ ,  $(0,4-6,0) \cdot 10^6$  см/с для  $Ne^+$  і  $(0,3-4,4) \cdot 10^6$  см/с для  $Ar^+$ .

У ході виконання робіт встановлено, що для пар  $He^+ + Zn$ ,  $Cd$  більшість спектральних ліній збуджується

за рахунок екзотермічної перезарядки (коли дефект енергії більше нуля). Для випадку іона  $Ne^+$  лише частина ліній збуджується в екзотермічній реакції, інша частина – в ендотермічній перезарядці. При зіткненні іона  $Ar^+$  з атомами Zn і Cd збуджуються іонні лінії останніх за рахунок лише ендотермічної перезарядки. Встановлено, що ефективність збудження спектрів в екзотермічній реакції істотно вища, ніж в ендотермічній перезарядці. Також вперше досліджено нерезонансну перезарядку частинок мішені у підоболонці  $(n-1)d^{10}ns^2$  з відривом внутрішнього d-електрона. При цьому одержано досить великі перерізи збудження відповідних бейтлерівських ліній  $Zn^+$  і  $Cd^+$ .

На ФЗ ліній  $Cd^+$  (231,2 і 232,1 нм) у реакції  $Ar^+ + Cd$  вперше спостережено складну осциляційну структуру [26]. Обидві криві осцилюють у фазі з високою частотою, яка раніше ніколи не спостерігалась у повних перерізах збудження ліній при іон-атомних зіткненнях. Авторами обґрунтовано припущення, що такі осциляції обумовлені інтерференцією в квазімолекулі на великих між'ядерних відстанях трьох збуджених термів конфігурації  $4d^9 2D_{5/2}$  та  $5p^2 P_{1/2,5/2}$  іона кадмію. Саме ці рівні є верхніми і нижніми робочими рівнями, з яких можлива генерація лазерного випромінювання.

У другій половині 70-х років з ініціативи І.П.Запісочного було розроблено і створено першу в Україні й одну з перших у СРСР багатоцільову експериментальну установку нового типу з газодинамічним джерелом молекулярного (атомного) пучка. Вона відрізняється від звичайних пристроїв, які використовуються у фізиці електронних і атомних зіткнень, високою інтенсивністю пучків як нейтральних атомів, так і простих молекул, малою кутовою розбіжністю взаємодіючих частинок та високим кутовим і енергетичним розділенням. Їй також притаманна універсальність відносно об'єктів досліджень, що відкриває нові можливості вивчення процесів при парних зіткненнях електронів, іонів, атомів і простих молекул в пучках,

що перетинаються. Дозволю собі процитувати з монографії відомих російських вчених М.Л.Александрова та Ю.С.Куснера оцінку ужгородської установки з газодинамічним джерелом [27]:

Анализируя нетрадиционные применения (газодинамических пучков-А.З.), не следует забывать, что высокая моноэнергетичность и интенсивность, свойственные газодинамическим пучкам, по-прежнему останутся необходимыми при измерениях сечений столкновений, как в молекулярных пучках, так и в струях, и все возможности для подобных измерений никоим образом не следует считать исчерпанными. Эти преимущества газодинамических пучков атомов и молекул позволили, например, разработать совершенно новый метод исследований в физике электронных столкновений — метод метастабиль-спектроскопии, которым получены новые интересные данные по ион-атомным взаимодействиям. В частности, указан один из существенных и ранее не изученных каналов диссипации энергии в интерференционной картине рассеяния в системе  $\text{Na}^+ + \text{Ne}$ . Исследованы дифференциальные и полные сечения образования метастабильных состояний при высокой моноэнергетичности электронного и нейтральных пучков атомов инертных газов и двухатомных молекул. В этих работах с пересекающимися пучками впервые обнаружены кинетические и динамические эффекты в сечениях электрон-атомных столкновений, выявлены особенности и резонансы в сечениях, свидетельствующие о тонких деталях процессов взаимодействия, происходящих на непростых путях к конечному возбужденному состоянию через ряд промежуточных, — автоотрывных, автоионизационных, отрицательных ионов. Вся эта картина превращений отображается в виде сложной резонансной картины сечений, возможность измерения которой появилась благодаря газодинамическим пучкам. По энергетическим положениям резонансов, вероятно, удастся установить эволюцию процесса

Недавно, используя упомянутые свойства газодинамических пучков, при взаимодействии атомов щелочных и щелочноземельных металлов с кислородсодержащими молекулами удалось обнаружить образование сложных молекулярных комплексов типа разноатомных кластеров. Показано, что в этих случаях эффективность обменных реакций резко возрастает по сравнению с конкурирующими механизмами.

У першій серії праць з газодинамічним джерелом було розроблено методика та проведено дослідження з пружного розсіювання та утворення атомів у метастабільних станах при зіткненні іонів  $\text{Mg}^+$  і  $\text{Na}^+$  з атомами гелію, неону та аргону, а також нерезонансної перезарядки при зіткненнях цих іонів з молекулами азоту і вуглекислоти [28–34].

За новою методикою (вимірювання кутів зносу частинок мішені) було визначено перерізи пружного розсіювання іонів  $\text{Mg}^+$  на атомах  $\text{Ne}$  і  $\text{Ar}$  в інтервалі енергій іонного пучка 20–1500 еВ. Вперше досліджено процеси утворення метастабільних атомів  $\text{He}$ ,  $\text{Ne}$ ,  $\text{Ar}$  в зіткненнях з іонами  $\text{Na}^+$  при низці фіксованих енергій в області 300–1500 еВ. З'ясовано при цьому, що перерізи збудження метастабільних атомів гелію і неону мають пороговий характер.

Структура на ФЗ метастабільних станів атомів неону в процесі  $\text{Na}^+ + \text{Ne}$  складається з чітких, регулярних (у масштабі зворотної швидкості) осцилюючих максимумів. Доведено, що походження цих осциляцій є результатом великого вкладу каскадних переходів з десяти Зр-рівнів  $\text{Ne}$  на  $2^1\text{P}$ -метастабільний рівень неону. Осциляційна структура ФЗ  $2^1\text{P}$ -метастабільного рівня зумовлена квазімолекулярним механізмом збудження під дією іонів. Подальше більш детальне дослідження пари  $\text{Na}^+ + \text{Ne}$  при енергіях 20–25 еВ дозволило з'ясувати, що в утворюваній у процесі зіткнення квазімолекулі ( $\text{NaNe}^+$ ) основний терм перетинається з термами, які відповідають збудженим Зр-рівням  $\text{Na}$  і Зр-рівням  $\text{Ne}$ , що і призводить до їх когерентного заселення [35]. При розлітанні частинок ці збуджені терми взаємодіють на великих між'ядерних відстанях, що й породжує осциляцію повних перерізів збудження всіх десяти Зр-рівнів  $\text{Na}$  та Зр-рівнів  $\text{Ne}$ . У свою чергу спонтанний розпад цих станів у фотонному каналі обумовлює регулярні осциляції на ФЗ метастабільних  $1s_3$  і  $1s_5$ -рівнів атома неону (за класифікацією Пашена).

На цій же установці вперше вимірювалися диференціальні перерізи розсіювання метастабільних атомів аргону на атомах магнію. Доведено, що природа першого максимуму зумовлена райдужним розсіюванням.

Широкі експериментальні можливості установки дозволили провести цикл досліджень кисневмісних молекул з атомами металів. Встановлена висока ефективність цих реакцій взаємодії, які супроводжуються виходом довгоживучих асоційованих комплексів [36].

Згодом на базі установки з газодинамічними молекулярними пучками нейтральних частинок уперше в СРСР створено апаратурні засоби [37], що дозволяють проводити лабораторні дослідження та калібрування бортових (на космічних апаратах) манометричних та мас-спектрометричних датчиків, імітуючи потоки газу на навколосемній орбіті Землі. Встановлено вплив метастабільних частинок на мас-спектрометричні виміри складу атмосфери Землі. Всі ці дані використовувалися при обробці результатів натурних експериментів на космічних апаратах типу "Салют" за програмою АСТРА-1.

Закінчуючи короткий огляд наукового напрямку, біля коліски якого стояв Іван Прохорович Записочний, хотілося б наголосити, що він спочатку без

ентузіазму сприйняв перші роботи цього напрямку (точніше, був проти, тому перші досліди в групах С.С.Попа та О.Б.Шпеника велися "нелегально"), оскільки вважав, що основним пріоритетом для ужгородських фізиків мають бути лише електрон-атомні, електрон-іонні та електрон-молекулярні дослідження. Але, будучи людиною далекоглядною, Іван Прохорович інтуїтивно відчував, що й зіткнення за участю важких частинок мають хороше майбутнє, а кваліфікація ужгородців дозволяє їм конкурувати з відомими науковими школами – такими як знаменитий ленінградський ФТІ ім. А.Й. Йоффе. Життя підтвердило його передбачення: з тематики іон-атомних взаємодій захищено чотири докторських та вісім кандидатських дисертацій. Про рівень та наукову значимість робіт у цьому напрямку свідчить той факт, що вони багатократно друкувались (див. наведений нижче список літератури) у провідних фізичних журналах, таких як "Журнал теоретической и экспериментальной физики", "Журнал технической физики", "Письма в журнал теоретической и экспериментальной физики", "Письма в журнал технической физики", "Оптика и спектроскопия", та доповідалися на міжнародних конференціях, а також увійшли в оглядові статті і монографії.

### Література

1. І.П.Записочний Біобібліографія учених України. – Київ: Наукова думка, 1997. 105 с.
2. Поп С.С., Кривський І.Ю., Записочний І.П., Балецька М.В. Абсолютные измерения функций возбуждения линий КII при столкновении ионов  $K^+$  с атомами гелия // ЖЭТФ. – 1970. – Т.58, вып.3. – С. 810–816.
3. Поп С.С., Кривський І.Ю., Записочний І.П., Балецька М.В. Абсолютные измерения функций возбуждения линий КII при столкновении ионов  $K^+$  с атомами неона // ЖЭТФ. – 1970. – Т. 59, вып.3. – С.696–699.
4. Поп С.С., Записочний І.П. Возбужде-
- ние ионов калия при столкновениях с атомами аргона // Опт.и спектр. – 1971. – Т. 31, вып.1. – С.8–13.
5. Записочний І.П., Поп С.С. Сечения возбуждения линий CsII при столкновениях ионов  $Cs^+$  с атомами He, Ne и Ar // Опт.и спектр. – 1971. – Т. 33, вып.3. – С.419–424.
6. Кривський І.Ю., Балецька М.В., Поп С.С., Записочний І.П. Про застосовність тритермової моделі для опису структури перерізів збудження при іонно-атомних зіткненнях // УФЖ. – 1972. – Т. 17, № 4. – С.528–531.
7. Шпеник О.Б., Завілопуло А.М. Плазatron – джерело іонів металів // Матеріали



- XII наук. конф. Ужгородського університету (серія фізична) – 1968. – С.99–102.
8. Шпенник О.Б., Завилопуло А.Н., Запесочный И.П. Перезарядка с возбуждением медленных ионов на атомах Zn, Cd и Na // *Опт. и спектр.* – 1970. – Т. 29, вып.5. – С.1018–1020.
  9. Шпенник О.Б., Запесочный И.П., Завилопуло А.Н. Возбуждение атомов при медленных ионно-атомных столкновениях // *ЖЭТФ.* – 1971. – Т.60, вып.2. – С.513–520.
  10. Шпенник О.Б., Запесочный И.П., Завилопуло А.Н., Овчинников В.Л. Исследование процессов возбуждения при столкновениях ионов малых энергий с атомами // I Всес. симпозиум по плазмохимии. Тезисы докладов. Москва. – 1971. – С.107.
  11. Запесочный И.П., Завилопуло А.Н., Шпенник О.Б. О передаче энергии возбуждения при взаимодействии ионов с атомами // *Опт. и спектр.* – 1970. – Т. 28, вып.5. – С.856–858.
  12. Ovchinnikov V.L, Panev G.S., Zavilopulo A.N., Zapesochny I.P., Shpenik O.B. Excitation processes in collisions between alkali-earth ions and atoms of the inert gases and alkali metals // VIII Intern. Conf. on the Physics of Electr. and Atom. Collisions. Abstr. of Papers. – P.661–662.
  13. Овчинников В.Л, Шпенник О.Б., Запесочный И.П., Процессы возбуждения при столкновениях ионов магния с атомами инертных газов // *ЖТФ.* – 1974. – Т. 44, вып.3. – С.612–616.
  14. Шпенник О.Б., Завилопуло А.Н., Запесочный И.П. Неупругие столкновения медленных ионов щелочных и щелочно-земельных элементов с атомами кадмия // *ЖЭТФ.* – 1972. – Т. 62, вып. 3. – С.879–891.
  15. Шпенник О.Б., Овчинников В.Л., Запесочный И.П. Збудження резонансного випромінювання при повільних зіткненнях іонів лужноземельних елементів з атомами інертних газів // *УФЖ.* – 1974. – Т.19, №12. – С.1943–1948.
  16. Овчинников В.Л, Волович П.Н., Запесочный И.П., Шпенник О.Б. Процессы возбуждения при столкновении ионов Mg с атомами ртути // VI Всес. конф. по физике электронных и атомных столкновений. Тезисы докладов. Тбилиси. – 1975. – С.171.
  17. Панев Г.С., Запесочный И.И., Шпенник О.Б., Завилопуло А.Н. Устройство для регистрации ионов, возникающих в процессе перезарядки // А.С.469371 (СССР) от 7.01.1975.
  18. Завилопуло А.Н., Панев Г.С., Шпенник О.Б., Скалко О.А., Запесочный И.П. Интерференционные эффекты при столкновениях ионов магния с атомами рубидия и цезия // *Письма в ЖЭТФ.* – 1973. – Т. 18, вып.7. – С.417–420.
  19. Завилопуло А.Н., Запесочный И.П., Ксаверий Ю.А., Панев Г.С., Шпенник О.Б. Исследование процессов возбуждения и перезарядки при медленных столкновениях ионов  $Mg^+$  с атомами Na, K, Rb и Cs // *Опт. и спектр.* – 1977. – Т. 42, вып.6. – С.316–326.
  20. Панев Г.С., Завилопуло А.Н., Запесочный И.П., Шпенник О.Б. Исследование резонансной структуры перезарядки ионов щелочно-земельных элементов // *ЖЭТФ.* – 1974. – Т. 67, вып. 1. – С. 47–53.
  21. Панев Г.С., Завилопуло А.Н., Запесочный И.П., Шпенник О.Б. Процессы возбуждения при бомбардировке атомов Na и K ионами магния // *Болг. физ. журн.* – 1974. – Т. 1, №2. – С.198–201.
  22. Завилопуло А.Н., Шпенник О.Б., Запесочный И.П. Возбуждение атомов кадмия медленными ионами Cd // *Опт. и спектр.* – 1972. – Т.32, вып.4. – С.641–644.
  23. Завилопуло А.Н., Запесочный И.П., Шпенник О.Б. Возбуждение резонансных уровней CdI, MgI и MgII при столкновении ионов магния с атомами кадмия // *Опт. и спектр.* – 1977. – Т. 32, вып.5. – С.1051–1052.
  24. Соскида М.-Т.И., Шевера В.С., Феннич П.А., Билей В.М., Запесочный И.П. Изучение процессов столкновений в He-Cd лазере // V Всес. конференция по физике электронных и атомных столкновений. Тезисы докладов. Ужгород. – 1972 – С.182.
  25. Soskida M.-T.I., Shevera V.S., Zapesochny I.P. Charge-exchange excitation of argon ions in collisions with cadmium atoms // IX Intern. Conf. on the Physics of Electr. and Atom. Collisions. Abstr. of papers. V.I. Seattle, USA. – 1975. – P. 179–180.
  26. Соскида М.-Т.И., Шевера В.С., Запесочный И.П. Перезарядка с возбуждением медленных ионов  $He^+$ ,  $Ne^+$  и  $Ar^+$  на атомах цинка // VI Всес. конферен-

- ция по физике электронных и атомных столкновений. Тезисы докладов. Тбилиси. – 1975. – С.173.
27. Александров М.Л., Куснер Ю.С. Газодинамические молекулярные, ионные и кластерные пучки. – Ленинград: Наука. – 1989. – 271 с.
28. Zavilopulo A. N., Zapesochny I.P., Mauscop E.M., Shkoba B.V. Experimental apparatus with molecular beam generator for investigation of double collision processes in low energy range // VI Intern, symposium on the molecular beams. Abstr. of Papers. Amsterdam. – 1977. – P. 269–272.
29. Завилопуло А.Н., Шкоба Б.В., Запесочный И.П. Применение время-пролетной методики для определения энергетических параметров сопловых молекулярных пучков // ЖТФ. – 1978. – Т. 48, вып.9. – С.1885–1889.
30. Завилопуло А.Н., Шпеник О.Б., Шкоба Б.В., Запесочный И.П. Новые данные об интерференции квазимолекулярных состояний в системе  $\text{Na}^+ + \text{Ne}$  // Письма в ЖЭТФ. – 1980. – Т.6, №9. С.534–538.
31. Контрош Е.Э., Шкоба Б.В., Завилопуло А.Н. Процессы образования метастабильных состояний атомов инертных газов при медленных ион-атомных столкновениях // В сб.: Метастабильные состояния атомов и молекул и методы их исследования. – 1980. Чебоксары. С. 121–138.
32. Завилопуло А.Н., Романовский Ю.А., Жуков А.И., Снегурский А.В., Шпеник О.Б. Исследование процессов взаимодействия щелочных и щелочноземельных атомов с молекулами  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2\text{O}$  // Киев. 1986 (Препринт ИЯИ АН УССР 5:36). – 36 с.
33. Завилопуло А.Н. Исследование парных столкновений с использованием газодинамических молекулярных пучков // В сб.: Физика электронных и атомных столкновений. – Ленинград, 1987. – С.113–121.
34. Завилопуло А.М., Ремета Є.Ю., Снігурський О.В., Шпеник О.Б. Метастабільні атоми і молекули. – Львів: Євросвіт. – 2001. – 440 с.
35. Завилопуло А.Н., Снегурский А.В., Жуков А.И., Шпеник О.Б., Романовский Ю.А. Обнаружение долгоживущих молекулярных комплексов при атом-молекулярных взаимодействиях // Письма в ЖТФ. – 1987. – Т. 13, №2. – С. 66–90.
36. Завилопуло А.Н., Снегурский А.В., Жуков А.И., Романовский Ю.А., Белоцерковский М.Б. Масс-спектрометрическое исследование образования атом-молекулярных комплексов при тепловых столкновениях // В сб.: Физика кластеров. – Новосибирск, 1987. – С.17–22.
37. Завилопуло А.Н., Шпеник О.Б., Снегурский А.В. Источник возбужденных частиц с газодинамическим ускорением // Труды X ВК ДРГ. – Москва, 1989. – С.133–143.

## ELEMENTARY PROCESSES AT SLOW ION-ATOMIC COLLISIONS – A NEW TREND IN SCIENCE, ORIGINATING FROM THE LABORATORY OF PROF. I.P.ZAPESOCHNY

A.N.Zavilopulo

Institute of Electron Physics, Ukr. Nat. Acad. Sci.

The main stages of development of the investigation of slow ion-atom collisions, performed in the Electron Collision Laboratory of Uzhhorod University, are outlined. They were initiated by S.S.Pop after the recommendation of Prof. V.M.Dukelsky, and then continued and evolved by other collaborators. The papers concerning the processes of excitation, resonant and non-resonant recharging, published in the known journals, are analyzed. Different aspects of the particle interactions are discussed, the list of publications is given. The studies of different elementary processes are set separately, the authors being indicated. The role of Prof. I.V.Zapesochny, the founder of the Uzhhorod school of the physics of elementary collisions, is emphasized.