УДК 539.18

Г.М. Гомонай
Інститут електронної фізики НАН України
88017, Ужгород, вул. Університетська, 21
e-mail: annagomonai@rambler.ru

РЕЗОНАНСНІ ЯВИЩА В НЕПРУЖНИХ ПРОЦЕСАХ ЗІТКНЕНЬ ЕЛЕКТРОНІВ З ІОНАМИ МЕТАЛІВ

Досліджено непружні процеси, що мають місце при зіткненні електронів з іонами II і III груп Періодичної системи хімічних елементів. Показано, що механізми цих процесів значно ускладнюються в залежності від складності електронної будови іонів. В електронних оболонках багатоелектронних іонів зростає роль релятивістських і кореляційних ефектів, і, як наслідок, змінюється співвідношення ймовірності радіаційного та електронного каналів розпаду автоіонізаційних станів, збільшується вплив резонансних процесів (резонансного збудження та діелектронної рекомбінації) на перебіг непружних процесів.

Ключові слова: автоіонізаційний стан, резонансне збудження, діелектронна рекомбінація, кореляційна взаємодія.

Вступ

Дослідження в області фізики газового розряду, фізики плазми, фізичної електроніки, а також квантовотеоретичний розгляд зіткнень між зарядженими частинками привели на межі 50-их та 60-их років 20 століття до виникнення нової гілки фізичної науки – фізики електронних та іонних зіткнень. При цьому теоретичні та експериментальні дослідження розвивалися паралельно, взаємно доповнюючи та збагачуючи один одного.

У дослідженні електрон-іонних зіткнень можуть бути виділені два основних аспекти: 1) постійний інтерес людства до структури та властивостей матерії в її різноманітних формах – *загальнонауковий аспект*; 2) необхідність в інформації про кількісні та якісні характеристики процесів зіткнень для розв'язання задач фізики лабораторної та природної плазми – *прикладний аспект*. У практиці вивчення процесів зіткнень ці два аспекти фактично завжди співіснують. Актуальність дослідження процесів зіткнень має постійну складову, пов'язану з загальнонауковим (фундаментальним) аспектом, та змінну, яка залежить від темпів науково-технічного прогресу в різних областях прикладних наук та від постановки конкретних задач, які ними вирішуються.

Всебічне вивчення різноманітних типів плазми стимулювало експериментальні та теоретичні дослідження процесів непружних зіткнень електронів з іонами (рекомбінації, збудження та іонізації). У різних плазмових і газових середовищах ці процеси відіграють суттєву роль у нагріванні, охолодженні, енергетичних втратах, діагностиці та моделюванні цих середовищ. Перерізи процесів потрібні в спектроскопічних дослідженнях, при моделюванні та при вивченні основних процесів зіткнень і властивостей лабораторної та астрофізичної плазми [1].

Слід зауважити, що експериментальне дослідження процесів при зіткненнях електронів з іонами є набагато важчим, ніж при їх зіткненнях з нейтральними атомами. Це пов'язано, перш за все, з необхідністю працювати при відносно низьких $(10^6 \div 10^7)$ $см^{-3}$ концентраціях взаємодіючих частинок і, відповідно, з дуже малими корисними сигналами.

З іншого боку, фізична картина розсіювання електронів на іонах є набагато складнішою і багатшою за змістом, ніж аналогічні процеси за участю нейтральних атомів. Важливою характеристикою іона є нескомпенсоване електронами дальнодіюче кулонівське поле ядра, яким обумовле-

но цілий ряд специфічних властивостей іонів, що проявляються слабо або взагалі відсутні у нейтральних атомів. Однією з найважливіших особливостей кулонівського поля тяжіння є можливість збудження системи "електрон+іон" ($e+A^+(\alpha_0)$) до порогів закритих каналів в нескінченне число автоіонізаційних станів (АІС) атома, які збігаються до кожного іонного рівня. Якщо енергія системи ($e+A^+$) співпадає з енергією рівня атомарного АІС $A^{**}(\alpha nl)$, то в процесі зіткнення поряд з прямим збудженням переходу ($\alpha_0 \to \alpha_1$)

$$A^+(\alpha_0) + e \to A^+(\alpha_1) + e, \qquad (1)$$

відбувається і його резонансне збудження через АІС $A^{**}(\alpha nl)$

$$A^+(\alpha_0) + e \to A^{**}(\alpha nl) \to A^+(\alpha_1) + e \qquad (2)$$

Процес (2) є двоетапним. На першому етапі відбувається захоплення налітаючого електрона іоном з одночасним збудженням одного з електронів іона. При цьому процес захоплення носить резонансний характер і можливий лише в межах ширини рівня, що відповідає АІС $A^{**}(\alpha nl)$ при заданій енергії налітаючого електрона. На другому етапі відбувається автоіонізація чи електронний розпад АІС (безвипромінювальний розпад з ежектуванням електрона), який призводить до складної резонансної структури перерізів розсіювання та до значної добавки в ефективний переріз прямого збудження послідовності вузьких резонансів, що збігаються до порога відкриття нового каналу. Однак, в реальних умовах експерименту через наявну енергетичну неоднорідність електронів резонансний внесок проявляється на енергетичних залежностях перерізів збудження у вигляді більш широких максимумів, що є результатом усереднення множини резонансів по кінцевому інтервалу енергії.

Конкуренцію другому етапу процесу (2) становлять безвипромінювальні розпади АІС по іншим каналам, відмінним від вказаного, а, головне, випромінювальні (радіаційні) переходи в стабільні зв'язані стани атома – процес діелектронної рекомбінації (ДР):

$$A^+(\alpha_0) + e \to A^{**}(\alpha nl) \to A(\alpha^1 nl) + h\nu \qquad (3)$$

Як бачимо, ДР – це не елементарний процес, а сукупність захоплення електронів у всі можливі АІС і наступних переходів у зв'язані стани атома з ежектуванням електромагнітного випромінювання (радіаційна стабілізація АІС).

Метою даної роботи було експериментально дослідити взаємодію повільних моноенергетичних електронів з іонами металів II та III груп Періодичної системи хімічних елементів та на основі отриманих результатів виявити роль резонансних явищ, пов'язаних з утворенням та розпадом атомарних АІС, у процесах збудження та рекомбінації іонів, а також проаналізувати вплив релятивістських та кореляційних ефектів на механізми досліджуваних процесів.

Експеримент

Дослідження були проведені на високовакуумній установці із застосуванням спектроскопічного методу, в умовах пучків, що перетинаються під кутом 90^o, який є одним з найбільш надійних і ефективних методів вимірювання перерізів процесів при зіткненнях електронів з іонами [2]. Експериментальна апаратура, процедура вимірювання енергетичних залежностей ефективних перерізів збудження та параметри вимірювань детально описані в [3-5]. Розробка нової конструкції джерела іонів [5] надала можливість отримати стабільні пучки іонів хімічно-агресивних металів та металів з низькою пружністю насичених парів при високих робочих температурах протягом тривалого часу (2000–3000 годин) без додаткових змін параметрів налаштування роботи джерела. Для одержання електронного пучка використовувалася низькоенергетична трианодна електронна гармата. Для спектрального розділення випромінювання у видимій області спектра використовувався світлосильний дифракційний монохроматор МДР-2, а у ВУФ області – 70°-ий

вакуумний монохроматор ВМ-70. Вдосконалення модуляційної системи реєстрації надслабких фотонних потоків дозволило надійно детектувати корисний сигнал при співвідношенні сигнал/фон ~1/100.

Результати досліджень

Якщо на початковому етапі основною метою досліджень було визначення загальних закономірностей збудження іонів та отримання абсолютних перерізів, то прогрес у техніці експерименту дав змогу проводити більш прецизійні дослідження з використанням електронних пучків з підвищеною моноенергетичністю (~0.1-0.5) еВ і зосередити увагу на вивченні тонкої структури в перерізах збудження та іонізації іонів електронним ударом.

Перші прецизійні експерименти з моноенергетичністю електронного пучка 0.1-0.3 еВ дозволили виявити чітку структуру на енергетичних залежностях ефективних перерізів збудження резонансних ліній іонів Mg^+ [6], а згодом і Ca^+, Sr^+ та Ba^+ [7] електронним ударом.

Отримані експериментальні дані та їх аналіз з залученням теоретичних розрахунків показали, що у збудженні зв'язаних станів іонів лужноземельних металів визначальною є взаємодія налітаючого електрона з валентним *ns*-електроном. Вплив субвалентної np^6-оболонки у цих процесах проявляється вже за потенціалом іонізації іона, однак її роль незначна. Відносна величина резонансного збудження залежить від величини ефективного перерізу прямого збудження. Так, наприклад, на фоні ефективного перерізу прямого збудження лужноземельних іонів (~10^{-15}) $см^2$ внесок резонансного збудження досить невеликий. Однак при переході від іона Be^+ до іона Ba^+ цей внесок значно збільшується і проявляється у досить глибоких резонансних максимумах структури на функціях збудження. Але при енергіях, близьких до потенціалів іонізації цих іонів, структура згасає (див. рис. 1).

Зовсім інша картина спостерігається у випадку збудження іонів металів підгрупи цинку, які суттєво відрізняються будовою електронних оболонок від іонів лужноземельних металів, у яких на валентній оболонці знаходиться тільки *1s* електрон поверх заповненої (досить глибокої) субвалентної p^6 оболонки. Для них переважно характерні переходи, пов'язані зі збудженням валентного *s* електрона і утворенням "простого" спектра збуджених рівнів. Іони підгрупи цинку, окрім аналогічного "простого" спектра, характеризуються також так званим "складним" спектром, пов'язаним з ефективним збудженням наявної у них субвалентної nd^{10} оболонки.

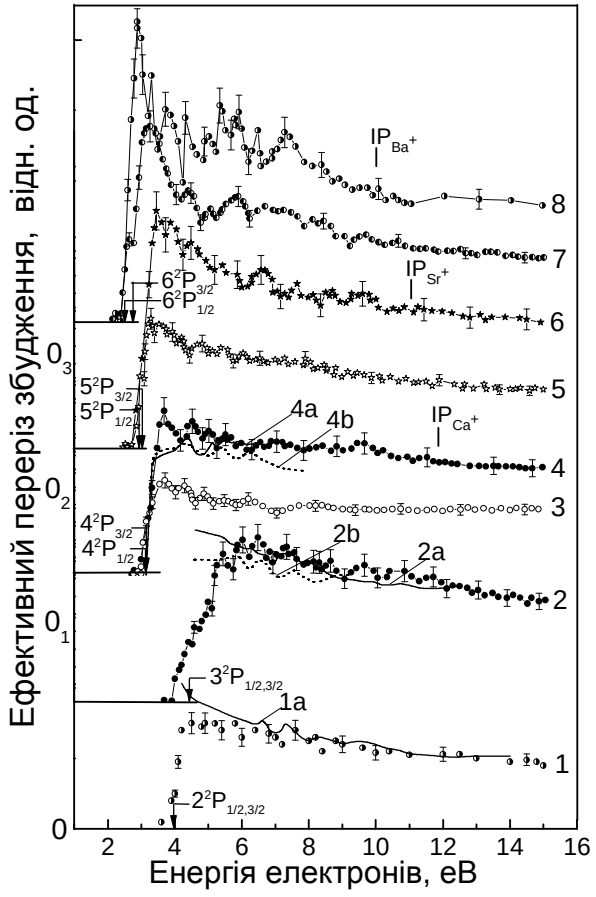

Рис. 1. Енергетичні залежності ефективних перерізів електронного збудження резонансних ліній іонів Be^+ (1 – λλ313.0 нм [8], 1a – розрахунок методом R-матриці [9]), Mg^+ (2 – λλ(279.5+280.3) нм [6], 2a – розрахунок методом R-матриці [9], 2b – розрахунок діагоналізаційним методом [6]), Ca^+ (3 – λ396.8 нм, 4 – λ393.4 нм [7], 4a – розрахунок діагоналізаційним методом [10], 4b – розрахунок методом сильного зв'язку [11]), Sr^+ (5 – λ421.5 нм, 6 – λ407.8 нм [7]), Ba^+ (7 – λ493.4 нм, 8 – λ455.4 нм [7]).

Той факт, що в іонів Zn^+ і, особливо, Cd^+ енергії зв'язку валентної і субвалентної оболонок близькі за величиною, призводить до суттєвої кореляції між цими оболонками. Тому, якщо "простий" спектр складається із порівняно малого числа ліній, однак доволі інтенсивних, то "складний" спектр вирізняється великим різноманіттям електронних конфігурацій енергетичних рівнів і численними відповідними спектральними переходами, які безпосередньо чи через каскади розпадаються на резонансні рівні. Ця обставина суттєвим чином впливає на механізми збудження резонансних ліній цих іонів. А відповідні їм енергетичні залежності ефективних перерізів збудження електронним ударом характеризуються чіткою структурою як у порозі, так і за потенціалом іонізації іонів (див. рис. 2).

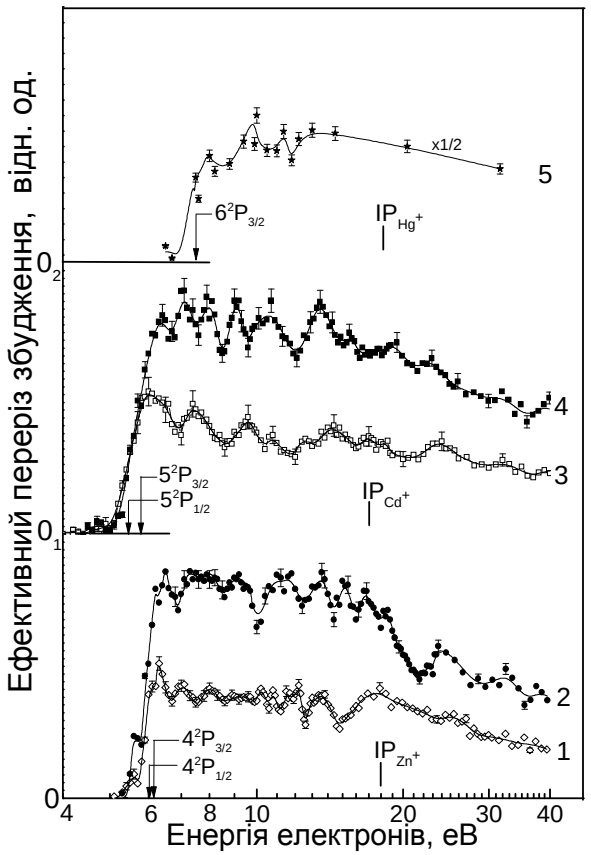

Рис. 2. Енергетичні залежності ефективних перерізів електронного збудження резонансних ліній іонів Zn^+ (1 – λ206.2 нм, 2 – λ202.5 нм) [3], Cd^+ (3 – λ226.5 нм, 4 – λ214.4 нм) [4], Hg^+ (5 – λ165.0 нм) [12].

Прецизійні дослідження біляпорогового інтервалу енергій у процесі збудження резонансних ліній Zn^+ [13], Cd^+ [14], In^+ [15] і Tl^+ [16] показали, що у цьому інтервалі енергій механізми збудження суттєво ускладнюються резонансними явищами, пов'язаними як з радіаційним (діелектронні сателіти), так і електронним розпадом АІС (резонансне збудження через ефект Костера-Кроніга, тобто, коли переходи з АІС відбуваються в межах однієї оболонки без зміни квантових чисел n і l збудженого електрона). Причому основним механізмом збудження сателітів спектральних ліній є процес ДР. Встановлено, що для багатоелектронних іонів за рахунок значного конфігураційного змішування рівнів суттєво зростає ймовірність радіаційного розпаду АІС. Перерізи збудження діелектронних сателітів та відповідних резонансних ліній виявилися одного порядку. У порозі збудження іонних ліній через енергетичну неоднорідність електронів енергетичні залежності перерізів ДР та збудження експериментально не розділені, що є причиною викривлення істинного характеру висхідної ділянки функції збудження. Тобто, процес радіаційного розпаду АІС, яким, як правило, нехтують у теоретичних задачах по розсіюванню, призводить до суттєвої деформації перерізу збудження в порозі і зменшує внесок резонансного збудження біля порогу процесу. В енергетичному інтервалі спін-орбітального розщеплення рівнів виявлено домінуючий резонансний внесок в ефективні перерізи збудження АІС, що розпадаються у процесі Костера-Кроніга.

У складних багатоелектронних систем зростає роль релятивістських ефектів, суттєвим є також вплив кореляційних ефектів. У відповідності з цим змінюються правила відбору для випромінювання, тип зв'язку кутових і спінових моментів суттєво відрізняється від LS зв'язку, багато ліній, які були заборонені для атомів і простих іонів мають вже велику інтенсивність у спектрах важких іонів. Поряд з дипольними переходами суттєвими є переходи інших мультиплетностей, збільшується масштаб розщеплення рівнів, тощо. Так, у ряді теоретичних робіт передбачалося збільшення ефективних перерізів

збудження інтеркомбінаційних та оптично-заборонених переходів за рахунок резонансного вкладу у багато разів (≥ 6), тобто вклад резонансів є суттєвим у тих випадках, коли переріз прямого збудження по тій чи іншій причині малий. Експериментально це було нами показано при дослідженні електронного збудження інтеркомбінаційних nsnp $^3P^o_1 \rightarrow ns^2\ ^1S_0$ переходів іонів In^+ [17] та Tl^+ [18]. Як бачимо з рис. 3, ефективні перерізи збудження цих ліній за величиною складають ~10^{-16} см^2, тобто є одного порядку з перерізами збудження резонансних ліній, що випромінюють в результаті дипольно-дозволених переходів. Більше того, енергетичні залежності ефективних перерізів збудження інтеркомбінаційних ліній при досить великих енергіях електронів не спадають за законом E^{-3}, що є характерним для збудження зі зміною спіну. Це пов'язано

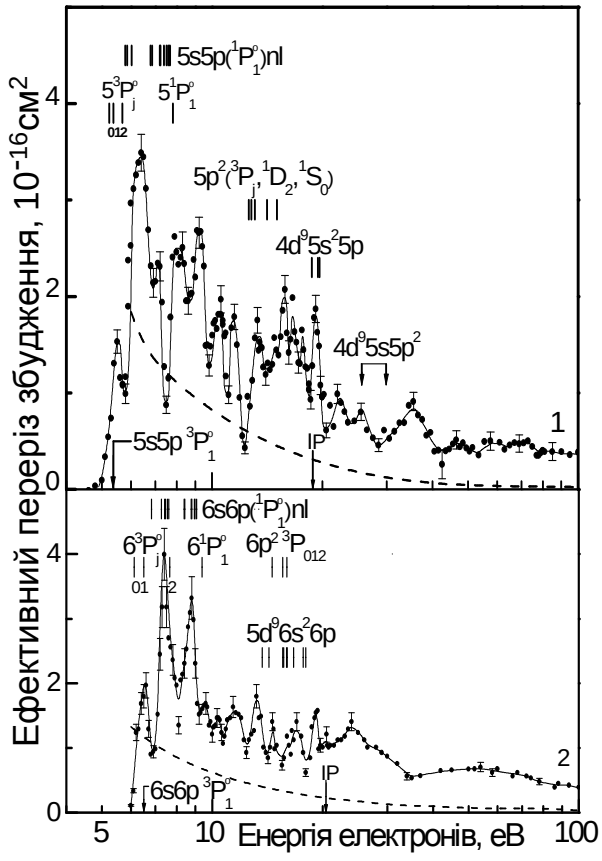

Рис. 3. Енергетичні залежності ефективних перерізів електронного збудження інтеркомбінаційних резонансних ліній іонів In^+ (1 – λ230.6 нм) [17] та Tl^+ (2 – λ190.8 нм) [18]. Пунктирна лінія – теоретичний розрахунок з використанням таблиць борновських перерізів у наближенні Бейтса-Дамгаарда.

переважно з ефективним заселенням nsnp $^3P^o_1$ рівня зі зміщених np^2 та бейтлерівських $(n\text{-}1)d^9nsnp$ рівнів, а також з АІС, що збігаються до них. Тобто, у випадку іонів In^+ та Tl^+ також дуже велика роль багатоступінчастих процесів.

Висновки

Ускладнення будови електронних оболонок іона, їх багатоелектронний характер призводить до значного збільшення впливу резонансних ефектів на перебіг непружних процесів зіткнень електронів з іонами. Це є наслідком своєрідного розташування атомних та іонних рівнів, яке полягає у тому, що значна частина атомних АІС лежить за енергією вище іонних. Все це створює сприятливі умови для перебігу не лише багатоканальних автоіонізаційних, але й послідовності багатоступінчастих процесів.

Релятивістські ефекти, а також кореляційна взаємодія як всередині оболонок, так і між оболонками мають значний вплив на автоіонізаційну ширину рівнів і призводять до перерозподілу співвідношення між імовірностями електронного та радіаційного розпаду АІС. Внаслідок цього суттєву конкуренцію електронному розпаду АІС складають їх радіаційні розпади у стабільні зв'язані стани (чи АІС) атома у процесі ДР, яка є основним механізмом збудження сателітних ліній, що займають вузький діапазон довжин хвиль поблизу іонних ліній.

Для більш глибокого розуміння механізмів непружних процесів зіткнень електронів з іонами, їх взаємного впливу, вияснення кількісного внеску резонансних процесів у прямі процеси необхідно проводити ще більш прецизійні експерименти з малим кроком за енергією в поєднанні з детальними теоретичними розрахунками ефективних перерізів цих процесів та різних атомних констант, які характеризують радіаційний чи електронний розпад АІС.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Müller A. Electron-ion collisions: Fundamental processes in the focus of applied research // Advances In Atomic, Molecular, and Optical Physics. – 2008. – V. 55. – P. 293-417.
2. Phaneuf R.A. Colliding-beams experiments for studying fundamental atomic processes // J. Phys.: Conf. Ser. – 2007. – V.58. – P. 1-8.
3. Имре А.И., Гомонай А.Н., Вукстич В.С., Немет А.Н. Возбуждение резонансных линий иона Zn^+ электронным ударом // Опт. и спектр. – 2000. – Т.89, №2. – С. 200-206.
4. Гомонай А.Н. Возбуждение резонансных линий иона кадмия моноэнергетическими электронами // Опт. и спектр. – 2003. – Т. 94, №4. – С. 538-545.
5. Ovcharenko E.V., Imre A.I., Gomonai A.N., Hutych Yu.I. Emission cross-sections of the In^{2+} ion VUV laser transitions at electron-In^+-ion collisions // J. Phys. B: Atom. Mol. Opt. Phys. – 2010. – V. 43. – P. 175206 (8pp).
6. Запесочный И.П., Дащенко А.И., Фронтов В.И. и др. Исследование резонансной структуры сечения возбуждения $3p\ ^2P$ уровня иона магния электронным ударом // Письма в ЖЭТФ. – 1984. – Т.39, в.2. – С. 45-47.
7. Запесочный И.П., Имре А.И., Дащенко А.И., Фронтов В.И. Структура в сечениях возбуждения ионов щелочноземельных элементов моноэнергетическими электронами // ЖЭТФ. – 1991. – Т.100, в. 1(7). – С.113-124.
8. Taylor P.O., Phaneuf R.A., Dunn G.H. Absolute cross sections and polarization for electron-impact excitation of the resonance multiplet of the Be^+ ion // Phys. Rev. A. – 1980. – V.22. – P. 435-444.
9. Pan Xiaochuan. Electron-ion collisions by the R-matrix method with multichannel quantum-defect theory // Phys. Rev. A. – 1991. – V.44. – P. 7269-7282.
10. Zatsarinny O.I., Lengyel V.I. and Masalovich E.A. Resonance structure in the electron-impact excitation of Ca^+ below the 5s threshold // Phys. Rev. A. – 1991. – V.44. – P. 7343-7354.
11. Mitroy J., Griffin D.C. and Norcross D.W. Electron-impact excitation of the resonance transition in Ca^+ // Phys. Rev. A. – 1988. – V.38. – P. 3339-3350.
12. Crandall D.H., Phaneuf R.A., Dunn G.H. Electron impact excitation of Hg^+ // Phys. Rev. A. – 1975. – V.11. – P. 1223-1232.
13. Имре А.И., Гомонай А.Н., Вукстич В.С., Немет А.Н. О резонансных процессах в околопороговом возбуждении резонансных линий иона Zn^+ при электрон-ионных столкновениях // Письма в ЖЭТФ. – 1998. – Т.68, в.8. – С. 614-618.
14. Gomonai A.N., Imre A.I. Excitation of dielectronic satellites of resonance lines of Cd^+ ions in electron-ion collisions // Ukr. J. Phys. – 2004. – V.49, №2. – P. 110-117.
15. Gomonai A.N., Imre A.I., Ovcharenko E.V., Hutych Yu.I. Near-threshold excitation of the resonance λ 158.6 nm line in electron-indium ion collisions // Journal of Physical Studies. – 2009. – V.13, No 2. – P. 230X(5p.)
16. Гомонай А.Н., Имре А.И., Контрош Е.Э. Диэлектронная рекомбинация иона таллия // Опт. и спектр. – 1996. – Т.81, №1. – С. 29-32.
17. Ovcharenko E.V., Imre A.I., Gomonai A.N., Hutych Yu. I. Role of autoionizing states in electron-impact excitation of λ230.6 nm intercombination line of indium ion // Ukr. J. Phys. – 2005. – V.50, №10. – P. 1111-1116.
18. Запесочный И.П., Имре А.И., Контрош Е.Э., Запесочный А.И., Гомонай А.Н. Резонансы при возбуждении интеркомбинационного $6\ ^1S_0 - 6\ ^3P_1$ перехода иона таллия в электрон-ионных столкновениях // Письма в ЖЭТФ. – 1986. – Т. 43, в.10. – С. 463-465.

Стаття надійшла до редакції 30.09.2012

A.N. Gomonai
Institute of Electron Physics, National Academy of Sciences of Ukraine
88017, Uzhhorod, Universytetska Str., 21

RESONANCE PHENOMENA AT INELASTIC PROCESSES OF ELECTRON-METAL ION IMPACTS

Inelastic processes occurring under electron impact with ions of II and III groups of the Periodic Table of the Chemical Elements were investigated. The mechanisms of these processes are shown to become essentially complicated depending on the complexity of the ion electron structure. The role of relativistic and correlation effects in the multielectron ion electron shells increases, and as a result the probability ratio of the radiative and electron channels of the autoionizing states decay is changed, the role of resonance processes (resonance excitation and dielectronic recombination) in the course of inelastic processes increases as well.

Keywords: autoionizing state, resonance excitation, dielectronic recombination, correlation interaction.

А.Н. Гомонай
Институт электронной физики НАН Украины
88017, Ужгород, ул. Университетская, 21

РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В НЕУПРУГИХ ПРОЦЕССАХ СТОЛКНОВЕНИЙ ЭЛЕКТРОНОВ С ИОНАМИ МЕТАЛЛОВ

Исследованы неупругие процессы, протекающие при столкновениях электронов с ионами II и III групп Периодической системы химических элементов. Показано, что механизмы этих процессов значительно усложняются в зависимости от сложности электронного строения ионов. В электронных оболочках многоэлектронных ионов возрастает роль релятивистских и корреляционных эффектов, и, как следствие, изменяется соотношение вероятностей радиационного и электронного каналов распада автоионизационных состояний, а также увеличивается роль резонансных процессов (резонансного возбуждения и диэлектронной рекомбинации) в протекании неупругих процессов.

Ключевые слова: автоионизационное состояние, резонансное возбуждение, диэлектронная рекомбинация, корреляционное взаимодействие.