

УЖГОРОДСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

УДК 539.186

ГОРВАТ ПЕТРО ПЕТРОВИЧ

**НЕАДІАБАТИЧНА АСИМПТОТИЧНА ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ
ОДНО- І ДВОЕЛЕКТРОННОЇ ПЕРЕЗАРЯДКИ ПРИ АТОМНИХ ЗІТКНЕННЯХ**

Спеціальність 01.04.02 - теоретична фізика

Автореферат

*дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук*

УЖГОРОД - 1994

АВ 29.317

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі теоретичної фізики фізичного факультету Ужгородського державного університету.

ЛНБ України ім. В. Стефаника
00777788 (1)

Науковий керівник - кандидат фізико-математичних наук, доцент Лазур В.Д.

Офіційні опоненти : доктор фізико-математичних наук, професор Хімич І.В.
кандидат фізико-математичних наук, Шевелько В.П.

Провідна установа - Інститут математики АН України (м. Київ)

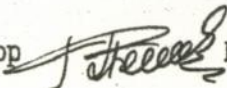
Захист відбудеться " " 1994 р. в на засіданні спеціалізованої вченої ради К 068.07.02 по фізико-математичним наукам в Ужгородському державному університеті (ауд. No).

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотечі Ужгородського державного університету.

Автореферат розісланий "10" лютого 1994 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

доктор фізико-математичних наук, професор  БЛЕШКАН Д.І.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

AB - 29.377
ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ. З часу свого створення і до цих пір фізика атомних зіткнень відіграє фундаментальну роль як в розвитку квантової теорії, так і в її багаточисленних додатках. Відомості про елементарні процеси в атомних зіткненнях необхідні при розв'язуванні багатьох задач ядерної фізики і астрофізики, фізики і хімії плазми та керованого термоядерного синтезу, фізики верхніх шарів атмосфери, квантової електроніки та ін. Поява в багатьох лабораторіях світу сучасних потужних іонних прискорювачів дозволила одержати унікальний експериментальний матеріал, особливо по високозарядним іонам та багатоелектронним іон-атомним процесам і одночасно стимулююче вплинула на теорію атомних зіткнень. Ряд її розділів розвинуто до такого стану, що дозволяє передбачати результати поточного експерименту з великою точністю. До них, перш за все, відносяться дослідження одноелектронних процесів при повільних зіткненнях атомних частинок [1,2]. Інші напрямки досліджень, зокрема реакцій з перерозподілом частинок при середніх і великих енергіях, багатоелектронних процесів при іон-атомних та іон-іонних зіткненнях, потребують створення адекватних методів аналізу та розрахунку, які за своєю точністю задовільняють вимогам сучасного експерименту з використанням техніки збігів і найбільш ефективно ведуть до кінцевої мети для різних задач.

Характерною рисою сучасного рівня теорії атомних зіткнень є широке використання засобів обчислювальної техніки і в першу чергу потужних ЕОМ, при допомозі яких проведено вже велику кількість трудомістких розрахунків. Незважаючи на бурхливий розвиток обчислювальної техніки і чисельних методів фізика атомних зіткнень (так само як і будь-яка інша область фізики) не може розвиватись без використання

аналітичного підходу. Аналітичні дослідження (у випадку їх успіху) дозволяють розкрити фізичну картину процесу, котра в чисельних розрахунках може виявитись прихованою. Навіть наявність точних результатів, одержаних досконалими чисельними методами, не усуває потреби в менш точних, але зручних аналітичних підходах; скоріше всього між цими методами існує своєрідне співвідношення доповнювальності.

Мета роботи:

- розробка асимптотичних методів дослідження одно- і двоелектронних іон-атомних та іон-іонних процесів перезарядки при довільних швидкостях зіткнення;

- вивчення принципів особливостей та основних механізмів таких процесів, дослідження впливу на їх характеристики різних фізичних факторів - кулонівських, кореляційних, бар'єрних, релятивістських, переносу імпульсу та ін.

Наукова новизна найбільш важливих результатів, одержаних в дисертації:

1. Поставлена і розв'язана задача про вплив взаємозв'язку електронного і ядерного рухів на потенціал одно- та двоелектронної обмінної взаємодії іона зі своїм атомом.

2. Введено поняття динамічного (тобто залежного від швидкості) потенціалу обмінної взаємодії, з допомогою якого досліджено основні особливості резонансної перезарядки при іон-атомних та іон-іонних зіткненнях.

3. Побудовано асимптотичну (по великим прицільним параметрам) неадиабатичну теорію одноелектронної перезарядки з кулонівськими граничними умовами в обох каналах реакції.

4. Одержано аналітичну формулу для асимптотики амплітуди одноелектронної перезарядки, яка коректно описує граничні випадки

повільних та швидких зіткнень.

5. Одержано явні аналітичні вирази для асимптотики амплітуди перезарядки в релятивістському випадку, які узагальнюють відповідні нерелятивістські формули.

Наукова та практична цінність роботи визначається з одного боку важливістю розглядуваних процесів, яка зв'язана з їх значною ефективністю, а з іншого - рядом конкретних розрахунків. Процеси перезарядки з участю багатозарядних іонів відіграють важливу роль в утворенні інверсної заселеності іонів в плазмі, завдяки чому існує можливість створення нових лазерних засобів. Розроблений в останній час спосіб діагностики α -компоненти плазми заснований на подвійній перезарядці атомів гелію на α -частинках.

В роботі досліджено загальні закономірності в поведінці перерізів одно- і двоелектронної перезарядки ($Cs^+ + Cs \rightarrow Cs + Cs^+$, $He^{2+} + He \rightarrow He + He^{2+}$, $He^{2+} + He^+ \rightarrow He^+ + He^{2+}$, $Li^{3+} + Li^+ \rightarrow Li^+ + Li^{3+}$, $p + H \rightarrow H + p$), які можуть бути використані для моделювання роботи різних пристроїв. Одержані асимптотичні формули зображуються в замкненому аналітичному вигляді, що дозволяє застосовувати їх для масових розрахунків конкретних процесів, а також в якості граничних умов при чисельних розрахунках.

Основні положення, що виносяться автором на захист:

1. Аналітичні співвідношення для матричного елемента одноелектронної обмінної взаємодії, які забезпечують правильну асимптотичну залежність перерізів перезарядки від енергії в борнівській області.

2. Асимптотичні формули для динамічного потенціалу двоелектронної обмінної взаємодії. Встановлення експоненціальної залежності потенціалу обмінної взаємодії від швидкості поступального руху ядер.

3. Неадіабатична асимптотична теорія одноелектронної перезарядки

ки з кулонівськими граничними умовами.

4. Асимптотичні (по великому прицільному параметру) результати для амплітуди нерезонансної перезарядки, які коректно описують граничні випадки повільних і швидких зіткнень.

5. Асимптотична теорія одноелектронної перезарядки з кулонівськими граничними умовами для релятивістських швидкостей та енергій зв'язку.

Апробація роботи і публікації. Результати, викладені в дисертації, доповідались і обговорювались на XVIII Міжнародній конференції по фізиці електронних і атомних зіткнень (Орхус, 1993 р.), на XXV Європейській конференції по атомній спектроскопії (Канни, 1993 р.), на наукових семінарах в ФІРАН, МІФІ та УжДУ і опубліковані в 7 роботах.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, трьох глав, що містять оригінальні результати, заключення і списку літератури із 95 найменувань. Математичні деталі, що не носять принципового характеру, винесено в Додатки 1-2. Робота містить 119 сторінок машинописного тексту, в тому числі 6 рисунків і 2 таблиці.

З М І С Т Р О Б О Т И.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету дисертаційної роботи і коротко викладено її зміст по главам.

Перша глава присвячена вивченню процесів резонансної одно- і двоелектронної перезарядки при іон-атомних та іон-іонних зіткненнях. Ймовірність таких процесів в рамках стаціонарної асимптотичної теорії може бути визначена, якщо відомий потенціал обмінної взаємодії іона і атома $\Delta(R)$. При швидкостях зіткнення v , менших за орбітальні швидкості зв'язаних електронів v_0 , переходи відбуваються при великих

міжядерних відстанях R , тому задача теорії полягає в обчисленні асимптотично точного значення потенціалу $\Delta(R)$ при $R \rightarrow \infty$.

Впродовж тривалого часу розвиток асимптотичної теорії [1-3] обмежувався випадком повільних зіткнень, коли можна використовувати адіабатичне наближення і теорія додатково є асимптотичною ще по одному параметру - малій швидкості зіткнення v . Електронні хвильові функції в цьому наближенні не враховують тієї обставини, що при русі ядер захоплені ними електрони несуть додатковий імпульс, який дорівнює добутку швидкості ядра на масу електронів; при повільних швидкостях цей ефект малий і ним можна знехтувати. При цьому основне припущення теорії пов'язане з тим, що переходи електронів здійснюються з "хвоста" їх хвильових функцій.

В рамках такого припущення в § 1.2 дисертації поширено результати асимптотичної теорії одноелектронної перезарядки [1,2] і на випадок великих швидкостей. Це вдалося зробити шляхом включення в канонічний вираз для потенціалу обмінної взаємодії трансляційних факторів, які враховують перенос імпульсу електроном при переході від одного атома до іншого. Асимптотика введеного таким чином динамічного (тобто залежного від швидкості) потенціалу обмінної взаємодії $\Delta^{(1)}(R, v)$ обчислюється методом багатомірної стаціонарної фази. Для головного члена асимптотики $\Delta^{(1)}(R, v)$ одержано наступний вираз (у випадку коли електронні оболонки іона та атомного залишку замкнені):

$$\Delta^{(1)}(R, v) = \frac{(2l+1)(l+m)! \alpha A^2 D}{m!(l-m)!(2\chi)^{m+1} R^m} \left[\frac{\alpha R}{2\chi} \right]^{2Z/\alpha-1} e^{-\chi(v)R}, \quad (1)$$

$$D = 2^{2Z/\alpha} e^{-Z/\chi(v)}, \quad \chi(v) = (\alpha^2 + v^2/4)^{1/2}.$$

Тут Z - заряд атомних залишків, в полі яких рухається електрон; $\alpha^2/2$ - перший потенціал іонізації атома; l, m - орбітальний момент елек-

трона і його проекція на міжядерну вісь; A - асимптотичний коефіцієнт; D - поправочний множник, який враховує збурення хвильових функцій електрона в результаті його взаємодії з чужим іоном; $x(v)$ - параметр Мессі. Формулу (1) узагальнено і на випадок, коли атом та іон містять по декілька валентних електронів; при цьому в кінцевому результаті змінюється лише вигляд передекспоненти.

Одержаний вираз (1) має вигляд природного динамічного узагальнення аналогічного виразу в адиабатичній теорії [1,2], відтворюючи останній як граничний випадок ($v \rightarrow 0$). Ця обставина підтверджує правильність інтерпретації його як динамічної обмінної взаємодії і відкриває можливості для подальших узагальнень асимптотичної теорії, не зв'язаних із додатковим припущенням про адиабатичний характер процесу. Зформульоване поняття динамічного потенціалу обмінної взаємодії $\Delta^{(1)}(R, v)$ застосовується далі в § 1.2 для аналізу осциляційного характеру повного перерізу одноелектронної перезарядки у випадку, коли фаза перезарядки проходить через екстремум при малих прицільних параметрах ρ . Розрахунки за одержаними для цих осциляцій загальними формулами приводять до кількісного узгодження з експериментальними даними для реакції $Cs^+ + Cs \rightarrow Cs + Cs^+$.

В області застосовності теорії збурень ($v \gg v_0$) формула (1) забезпечує правильну залежність перерізу перезарядки від швидкості: $\sigma(v) \sim v^{-12}$, в той час як адиабатичний підхід дає ту ж залежність для перезарядки, що і для збудження: $\sigma(v) \sim v^{-2}$. Таким чином, запропонований в дисертації підхід дає можливість неперервного переходу в розрахунках перерізів перезарядки від теплових енергій зіткнення до швидкостей, які перевищують швидкість електрона на орбіті атома.

Динамічний потенціал двоелектронної обмінної взаємодії $\Delta^{(2)}(R, v)$ вводиться в § 1.3 дисертації аналогічно одноелектронному випадку.

Основним механізмом двоелектронної резонансної перезарядки є корельоване одночасне захоплення: електрон із зовнішньої (внутрішньої) орбіти атома А переходить на внутрішню (зовнішню) орбіту атома В. При цьому величина $\Delta^{(2)}(R, \nu)$ визначається як матричний елемент від міжелектронної взаємодії r_{12}^{-1} з двоцентровими хвильовими функціями. Для обчислення $\Delta^{(2)}(R, \nu)$ необхідно знати хвильову функцію φ_{ab} зовнішнього атомного електрона поблизу налітаючого іона. З цією метою в роботі використовується асимптотика двоцентрової функції φ_{ab} , одержана Чібісовим в квазікласичному наближенні [4].

Обчислення одержаного для $\Delta^{(2)}(R, \nu)$ багатомірного інтеграла методом контурного інтегрування Нордсіка приводить до наступної асимптотичної формули (у випадку коли два валентні електрони належать з-підоболонці атома):

$$\begin{aligned} \Delta^{(2)}(R, \nu) &= B_1^2 B_2^2(\nu) R^{(4Z-2)/\alpha-5} e^{-2x(\nu)R}, \\ B_1 &= 2^4 A Z^{5/2} (Z-\alpha) \Gamma(1-Z/\alpha) (2/e)^{Z/\alpha} \alpha^{(2Z-1)/\alpha-1}, \\ B_2(\nu) &= [x(\nu)]^{1-(Z-1)/\alpha} (\omega_2 + \alpha^2/2) \omega_1^{Z/\alpha-3} \omega_2^{-Z/\alpha-1}, \\ \omega_1 &= Z^2 - \alpha^2 + \nu^2/4, \quad \omega_2 = (Z+\alpha)^2 + \nu^2/4, \end{aligned} \quad (2)$$

де використано ті ж позначення, що і в (1). В границі $\nu \rightarrow 0$ формула (2) переходить у відомий результат для $\Delta^{(2)}(R, \nu)$, обчислений в рамках адабатичної теорії [3].

Одержаний вираз (2) може бути використаний для розрахунку перерізів резонансної двоелектронної перезарядки, якщо процес проходить на достатньо великих міжядерних відстанях R між взаємодіючими частинками. Такі розрахунки виконані в § 1.3 для реакції $\text{He}^{2+} + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{He}^{2+}$. Як і слід було чекати, уточнення величини потенціалу обмінної взаємодії $\Delta^{(2)}(R, \nu)$ у зв'язку із врахуванням вкладу поступального руху ядер приводить до пониження перерізів перезарядки у порівнянні з розрахунками в адабатичному наближенні. Цей факт від-

повідает загальній тенденції зменшення ймовірності резонансних процесів при врахуванні різного роду неадіабатичних ефектів. Використання неадіабатичної асимптотики для $\Delta^{(2)}(R, v)$ приводить до кількісного узгодження результатів з даними експериментальних досліджень у всьому розглядуваному діапазоні швидкостей відносного руху атомів.

В § 1.4 асимптотична теорія, викладена в § 1.2 і § 1.3, узагальнюється на випадок іон-іонних зіткнень, коли виникає необхідність враховувати кулонівське відштовхування між частинками, що приймають участь у зіткненні. Одержано загальні формули, які виражають переріз іон-іонної перезарядки через динамічні потенціали обмінної взаємодії (1) і (2). Конкретні розрахунки проведено для реакцій $\text{He}^{2+} + \text{He}^+ \rightarrow \text{He}^+ + \text{He}^{2+}$ і $\text{Li}^{3+} + \text{Li}^+ \rightarrow \text{Li}^+ + \text{Li}^{3+}$. Встановлено, що врахування міжядерного відштовхування приводить до якісної зміни залежності перерізів від v при малих енергіях відносного руху (експоненціальне зменшення перерізу при іон-іонних зіткненнях замість логарифмічного зростання в іон-атомних).

В главі II побудовано нестационарну асимптотичну (по великим прицільним параметрам ρ) теорію одноелектронної перезарядки з кулонівськими граничними умовами. На відміну від стаціонарної теорії, тут визначенню підлягає амплітуда перезарядки $A_{1f}(\rho)$ для всіх можливих траєкторій частинок, котрі для периферійних зіткнень можна вважати прямолінійними. В аналізі виділяються чотири основні моменти, найбільш принципові для розвитку теорії:

1. Зображення точних розв'язків нестационарної задачі у вигляді добутку одноцентрових атомних хвильових функцій на поправочну функцію, яка враховує наявність рухомого "чужого" ядра з його кулонівським потенціалом. Цей далекодіючий потенціал враховується граничною умовою, яка накладається на хвильову функцію системи і виражається

через логарифмічну фазу розсіяння на цьому ядрі. Поправочна функція визначається в § 2.3 як розв'язок диференціального рівняння першого порядку в частинних похідних з врахуванням кулонівських асимптотичних умов.

2. Використання галілеєвського перетворення хвильових функцій при переході від системи координат, зв'язаної з атомом, до нерухокої системи.

3. Зображення шуканої амплітуди перезарядки у вигляді багатомірного інтеграла Демкова-Островського [5]

$$A_{1r}(\rho) = \frac{i}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int dS [\psi_r^-(\vec{n} \vec{v}) \psi_1^+ - \psi_1^-(\vec{n} \vec{v}) \psi_r^+], \quad (3)$$

де S - поверхня в конфігураційному просторі, яка розділяє області початкового V_1 та кінцевого V_r знаходження електрона; \vec{n} - внутрішня у відношенні до V_1 нормаль до S .

4. Обчислення багатомірного інтеграла (3) за стандартною методикою багатомірного методу перевалу.

В результаті обчислень в § 2.4 знайдено провідний член асимптотики амплітуди $A_{1r}(\rho)$ для переходів електрона між S -станами атомів (іонів)

$$A_{1r}(\rho) = \frac{i}{v} \left(\frac{\pi}{32} \right)^{1/2} \frac{\alpha_a \alpha_b}{\chi^{5/2}} A_a A_b D_a D_b \left(\frac{\alpha_a \rho}{2\chi} \right)^{2\alpha_a/\alpha_a - 1} \left(\frac{\alpha_b \rho}{2\chi} \right)^{2\alpha_b/\alpha_b - 1} \quad (4)$$

$$(\rho v/2)^{-1(Z_a + Z_b)/v} (\rho v)^{2(Z_a Z_b)/v} \rho^{3/2} e^{-X(v)\rho},$$

$$D_i = 2^{Z_j} (\alpha_j^2 + 4Z_j \chi / \alpha_j \rho)^{-1/2} \exp \left[-\frac{Z_j}{v} \arcsin \frac{v^2 + \alpha_j^2 - \alpha_i^2}{2v\chi} \right], \quad i \neq j = a, b,$$

$$X(v) = (1/2v) \{ [(\alpha_a + \alpha_b)^2 + v^2] [(\alpha_a - \alpha_b)^2 + v^2] \}^{1/2}.$$

Тут $-\alpha_a^2/2$ ($-\alpha_b^2/2$) - енергія електрона в розглядуваному стані атома (іона) $A_{(Z_a-1)^+}$ ($B_{(Z_b-1)^+}$); Z_a (Z_b) - ефективний заряд іонного остова $A_{Z_a^+}$ ($B_{Z_b^+}$); A_a (A_b) - асимптотичний коефіцієнт. В § 2.5 одержані співвідношення узагальнено на більш складні випадки переходів між довільними атомними станами, в т.ч. між атомами із незаповненими електронними оболонками.

Відзначимо, що подібне дослідження вже проводилось в роботі [5], але без врахування кулонівських асимптотичних умов. Важливою рисою формули (4) є те, що спотворення хвильових функцій електрона, яке виникає в результаті його взаємодії з ядром налітаючої частинки у вхідному каналі та із залишковим іоном мішені - у вихідному, описується незалежними один від одного множниками D_a і D_b , що зображуються у замкненому вигляді. Це істотно спрощує аналіз впливу спотворень на амплітуду електронного захоплення і робить формулу (4) зручною при використанні її для розрахунків різноманітних процесів.

В § 2.6 проводиться порівняння одержаних результатів з даними різних наближень (адіабатичного, борнівського, наближення Опенгеймера-Брінкмана-Крамєрса (ОБК), асимптотичного підходу Демкова - Островського). Показано, що аналітичні співвідношення (4) для амплітуди перезарядки в асимптотичній області великих прицільних параметрів ρ (нижчі члени в розкладі за степенями $1/\rho$) справедливі для будь-яких швидкостей, переходячи в адіабатичній границі ($v \ll v_0$) у відомі результати О.Б.Фірсова [6] і в границі високих швидкостей ($v \gg v_0$) - у формули борнівського наближення.

Принциповий інтерес до дослідження асимптотики амплітуди $A_{if}(\rho)$ викликаний можливістю одержання строгих результатів в напівкласичній задачі трьох кулонівських частинок. Точна асимптотика амплітуди перезарядки (4) може виявитись корисною для перевірки різних наближе-

них методів розрахунку. Крім того, в деяких випадках знання асимптотики дозволяє знайти диференціальний переріз розсіяння на малі кути, а також оцінити повний переріз. Останнє стосується широкого і практично важливого класу задач, які дозволяють застосовувати наближення "щільної" мішені. Запропонований формалізм апробовано на прикладі розрахунку ймовірності резонансної перезарядки протона на атомі водню ($p + H(1s) \rightarrow H(1s) + p$). Одержані результати при великих ρ кількісно узгоджуються з даними набагато складнішого підходу на основі тричастинкових рівнянь Альта-Грассбергера-Сандхаса.

В останні роки завдяки розвитку техніки прискорення і все більш широкому застосуванню релятивістських пучків заряджених частинок стали актуальними дослідження реакцій перезарядки в релятивістських зіткненнях. В главі III асимптотична теорія узагальнюється на випадок релятивістських швидкостей зіткнення і релятивістських енергій зв'язку захопленого електрона. Основні етапи розрахунку аналогічні до використовуваних в нерелятивістській задачі (глава II). Електрони мішені описуються рівнянням Дірака, а поле налітаючої частинки - потенціалами Брейта-Паулі. Поправочні функції розраховуються в § 3.3 методом, подібним до квазікласичного, з використанням рівняння Клейна-Гордона, котрому, як відомо, задовільняє кожна із компонент діраківської біспінорної хвильової функції. Серед розв'язків останнього є, звичайно, також і "зайві", які не задовільняють вихідному рівнянню Дірака. Відбір потрібних розв'язків проводиться за допомогою граничних умов, які накладаються на хвильові функції системи і враховують далекодіючу природу кулонівської взаємодії між частинками у вхідному та вихідному каналах реакції.

Для амплітуди перезарядки використовується точне зображення [7] у вигляді інтеграла по поверхні і по часу від змішаної густини стру-

му через поверхню, яка розділяє області знаходження електрона в початковому і кінцевому станах. Хвильові функції переводяться в єдину систему координат релятивістським оператором переводу. Обчислення одержаного для асимптотики амплітуди $A_{1f}^{(P)}(\rho)$ інтегрального зображення багатомірним методом перевалу у випадку $1s_{1/2} \rightarrow 1s_{1/2}$ проведено в § 3.4. Одержаний результат допускає просту інтерпретацію: повна амплітуда перезарядки зображується у вигляді добутку трьох співмножників:

$$A_{1f}^{(P)}(\rho) = d_a(Q) d_b(Q) A_{1f}^{(PEN)}(\rho), \quad (5)$$

одні з яких, $A_{1f}^{(PEN)}(\rho)$, - відтворює асимптотику амплітуди перезарядки в рамках звичайного релятивістського ейконального наближення (PEN) [8], а два інших - $d_a(Q)$ і $d_b(Q)$ - дозволяють досить просто врахувати залежність ефектів спотворення електронних хвильових функцій від квантових чисел станів складових частинок у вхідному та вихідному каналах реакції. Формула (5) дозволяє судити про точність звичайного PEN. Для ілюстрації в § 4.5 наведено значення відношення $A_{1f}^{(P)}(\rho)/A_{1f}^{(PEN)}(\rho)$ для різних Z_a , Z_b , ρ і ν . Аналіз результатів показує, що поправки d_a і d_b приводять до збільшення вкладу периферійних амплітуд, які відповідають великим прицільним параметрам ρ і малим кутам розсіювання θ . Звідси випливає, що амплітуди $A_{1f}^{(PEN)}(\rho)$ [8] можуть значно відрізнятись від $A_{1f}^{(P)}(\rho)$. Остання обставина приводить до необхідності врахування поправочних факторів d_a і d_b при розрахунках перерізів реакцій перезарядки.

В нерелятивістській границі ($c \rightarrow \infty$) одержані результати для асимптотики $A_{1f}^{(P)}(\rho)$ переходять у відповідні результати глави II (формула (4)). Аналіз співвідношення $A_{1f}^{(P)}(\rho)/A_{1f}(\rho)$, показує, що при фіксованому прицільному параметрі релятивістські ефекти зменшують амплітуду перезарядки.

В заклученні зформульовано основні результати проведеного дослідження:

1. Досліджено вклад швидкості відносного руху ядер в одноелектронну обмінну взаємодію іона зі своїм атомом. Знайдені у явному аналітичному вигляді співвідношення для обмінного матричного елемента забезпечують правильну асимптотичну залежність перерізів перезарядки від енергії в борнівській області.

2. Вперше поставлена і розв'язана задача про вплив взаємозв'язку електронного і ядерного рухів на потенціал двоелектронної обмінної взаємодії. Показано, що послідовне врахування ефектів, пов'язаних з поступальним рухом ядер, приводить до сильної (експоненціальної) залежності потенціалу обмінної взаємодії від швидкості відносного руху.

3. Побудовано асимптотичну теорію одноелектронної перезарядки для довільних, але нерелятивістських швидкостей зіткнення. В ній відсутні труднощі з кулонівськими граничними умовами, які характерні для добре відомої асимптотичної теорії Демкова-Островського.

4. Одержано в аналітичному вигляді асимптотичні (по великому прицільному параметру) результати для амплітуди нерезонансної перезарядки, які справедливі для довільних швидкостей і переходять в адиабатичному наближенні у відомі результати О.Б.Фірсова і у високоенергетичній границі - у формули борнівського наближення.

5. Розвинуто асимптотичну теорію одноелектронної перезарядки з кулонівськими граничними умовами для релятивістських швидкостей та енергій зв'язку. Обчислено головний член асимптотики амплітуди для переходів $1s_{1/2} \rightarrow 1s_{1/2}$.

Основні результати, що увійшли до дисертації,
опубліковані у роботах:

1. Горват П.П., Лазур В.Ю. Учет эффекта переноса импульса в процессах резонансной перезарядки положительного иона на атоме // УФЖ.-1991.-Т.36, N 11.-С.1619-1626.
2. Лазур В.Ю., Горват П.П. Влияние взаимосвязи электронного и ядерного движений на потенциал обменного взаимодействия иона и атома // Хим.физика.-1992.-Т.11, N 3.-С.326-335.
3. Горват П.П., Лазур В.Ю., Пресняков Л.П., Усков Д.Б. Асимптотическое поведение амплитуды перезарядки // ТМФ.-1992.-Т.91, N 1.-С.66-82.
4. Горват П.П., Лазур В.Ю. Асимптотическое поведение амплитуды перезарядки при релятивистских скоростях и энергиях связи // ТМФ.-1993.-Т.95, N 3.-С.451-477.
5. Lazur V.Yu., Horvat P.P. Asymptotic charge exchange theory with Coulomb boundary conditions for arbitrary velocities // XXVIII ICPEAC. Book of Abstracts, vol.2.-Aarhus Univ., Denmark, 1993.-P.567.
6. Lazur V.Yu., Horvat P.P. Asymptotic charge exchange theory with Coulomb boundary conditions for arbitrary velocities // Abstracts pap. XXV EGAS.-Caen, 1993.-P.215.
7. Горват П.П., Лазур В.Ю. Эффекты взаимосвязи электронного и ядерного движений в процессах резонансной двухэлектронной перезарядки // УФЖ.-1993.-Т.38, N 9.-С.1299-1306.

Література:

1. Смирнов Б.М. Асимптотические методы в теории атомных столкновений.-М:Атомиздат, 1973.-294 с.
2. Никитин Е.Е., Смирнов Б.М. Медленные атомные столкновения.-М: Энергоатомиздат, 1990.-254 с.
3. Chibisov M.I., Janev R.K. // Phys.Repts.-1988.-Vol.166, N 1.-

Р. 1-87.

4. Чиби́сов М.И. //ЖЭТФ.-1975.-Т.69, вып.2.-С.457-469.

5. Демков Ю.Н., Островский В.Н. //ЖЭТФ.-1975.-Т.69, вып.5.-С.1582-1593.

6. Фирсов О.Б. //ЖЭТФ.-1951.-Т.21, вып.3.-С.1001-1008.

7. Демков Ю.Н., Островский В.Н., Шевченко С.И. //ЯФ.-1983.-Т.37, вып.1.-С.94-104.

8. Eichler J. //Phys.Rev.A.-1987.-Vol.35, N 8.-P.3248-3255.

ЛНБ

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

1. ...
2. ...
3. ...
4. ...
5. ...
6. ...
7. ...

Підписано до друку 2.02.1994. Формат 60x84/16
Замовлення 171. Тираж 100
ВВК "Патент", м.Ужгород, вул. Гагаріна, 101

В. Стефанів
А. Ужгород

460660

AB 29.317

AB 29.317