

УДК 539.186

PACS 34.80.Dp, 34.80.Gs

DOI: 10.24144/2415-8038.2017.42.121-127

С.В. Гедеон, В.Ф. Гедеон, В.Ю. Лазур, Є.А. Нодь

Ужгородський національний університет, вул. Волошина, 54, 88000, Ужгород

e-mail: sergej.gedeon@uzhnu.edu.ua, viktor.gedeon@uzhnu.edu.ua, volodymyr.lazur@uzhnu.edu.ua, elizabeth.nagy@uzhnu.edu.ua

ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ 3D-ПЕРЕРІЗИ РОЗСІЯННЯ ЕЛЕКТРОНІВ НА АТОМІ ФТОРУ

У рамках методу R -матриці з B -сплайнами (БСР) розраховані диференціальні перерізи (ДП) розсіяння електронів на атомі фтору в області енергій до 110 еВ. Розклад сильного зв'язку включав 39 зв'язаних станів атома F. Отримані енергетично-кутові залежності ДП і побудовані відповідні 3D-поверхні для перерізів пружного розсіяння та збудження п'яти нижчих станів атома F. Обговорено зв'язок енергетично-кутових 3D-залежностей ДП від типу спектральних переходів у атомі F.

Ключові слова: атом F, розсіяння електронів, метод R -матриці з B -сплайнами, диференціальні перерізи розсіяння, 3D-поверхні.

Вступ

Фтор є достатньо поширеним елементом у Всесвіті. При проходженні багатьох процесів у плазмі атоми фтору використовуються в якості домінуючих присадок. Перерізи електронних зіткнень у газах фтору необхідні в якості вхідних даних для розрахунків хімічних і електричних властивостей технологічної плазми та лазерів на інертних газах і фторі. Атомарні перерізи можуть бути також використані для передбачення перерізів різних сполук фтору. Проте, висока реактивність цього елемента робить важким отримання надійних значень перерізів електронних зіткнень шляхом прямих вимірювань. З наявних у літературі перерізів для атомарного фтору експериментально були визначені тільки перерізи іонізації [1]. Необхідні ж для застосувань моделювання перерізи пружного розсіяння, переносу імпульсу та збудження електронним ударом повинні братися з теоретичних оцінок. Огляд теоретичних праць з дослідження розсіяння низькоенергетичних електронів атомами фтору можна знайти в нашій недавній роботі [2].

Зрозуміло, що прогрес в області фізики електрон-атомних зіткнень залежить як від багатьох взаємозв'язаних факторів. Не

останню роль відіграє використання в розрахунках нових теоретичних ідей та наявність у дослідника відповідних обчислювальних інструментів і засобів. Упродовж останнього десятиріччя нами, разом зі співавторами, детально вивчено процеси пружного і непружного зіткнення електронів з рядом атомних систем: Ca [3, 4], Mg [5], Sr [6], Si [7], F [2], Al [8, 9], B [10] і здійснено попередні розрахунки для ряду інших атомів та іонів. Вказані процеси електрон-атомних (ЕА) зіткнень [2-10] були розраховані нами у різних версіях методу R -матриці з B -сплайнами (БСР) [11]. У розрахунках структури мішеней були задіяні також одно- і багатоконфігураційний методи Хартрі-Фока (БКХФ) [10, 11].

Використання методу БСР [9] у розрахунках характеристик ЕА-розсіяння для нейтрального фтору [2] дозволило нам отримати інтегральні (ІП) та диференціальні (ДП) перерізи зіткнення з точністю, наразі недоступною для інших методів дослідження. У праці [2] основна увага була приділена дослідженню енергетичних залежностей ІП зіткнення e -F, зокрема збіжності розкладів сильного зв'язку в залежності від числа врахованих станів мішені та псевдостанів. У даній статті

ми акцентуємо увагу на дослідженні енергетично-кутових залежностей ДП розсіяння $e-F$, які мають вигляд 3D-поверхонь. Ці 3D-поверхні фактично містять найбільш повну і детальну інформацію про процеси ЕА-зіткнення. Проте трудність отримання цих поверхонь та складність їх подальшого аналізу наразі обмежує їх використання в науковій літературі. В даному дослідженні ми обмежилися розглядом переходів з основного стану $2p^5\ ^2P^o$ атома F у п'ять нижчих збуджених станів: $2p^4(^3P)3s\ ^4,2P$, $2p^4(^3P)3p\ ^4P^o, ^4,2D^o$.

Таблиця 1. Енергії зв'язку (в еВ) для 39 нижніх станів мішені атома F. Дані БСР39 [2] порівняні з даними NIST [14] *. Тут $\Delta E = E_{\text{БСР39}} - E_{\text{NIST}}$

№	Стан	$E_{\text{БСР39}}$ [2]	E_{NIST} [14]	ΔE
1	$2p^5\ ^2P^o$	-17.367	-17.406	0.039
2	$2p^4(^3P)3s\ ^4P$	-4.549	-4.706	0.157
3	$2p^4(^3P)3s\ ^2P$	-4.275	-4.424	0.149
4	$2p^4(^3P)3p\ ^4P^o$	-2.985	-3.041	0.056
5	$2p^4(^3P)3p\ ^4D^o$	-2.848	-2.899	0.051
6	$2p^4(^3P)3p\ ^2D^o$	-2.783	-2.827	0.044
7	$2p^4(^3P)3p\ ^2S^o$	-2.697	-2.742	0.045
8	$2p^4(^3P)3p\ ^4S^o$	-2.694	-2.740	0.046
9	$2p^4(^3P)3p\ ^2P^o$	-2.639	-2.671	0.032
10	$2p^4(^1D)3s\ ^2D$	-1.871	-2.059	0.188
11	$2p^4(^3P)4s\ ^4P$	-1.807	-1.827	0.020
12	$2p^4(^3P)4s\ ^2P$	-1.739	-1.753	0.014
13	$2p^4(^3P)3d\ ^4D$	-1.540	-1.541	0.001
14	$2p^4(^3P)3d\ ^2D$	-1.531	-1.532	0.001
15	$2p^4(^3P)3d\ ^4F$	-1.515	-1.500	-0.015
16	$2p^4(^3P)3d\ ^2F$	-1.514	-1.500	-0.014
17	$2p^4(^3P)3d\ ^4P$	-1.501	-1.487	-0.014
18	$2p^4(^3P)3d\ ^2P$	-1.499	-1.472	-0.027
19	$2p^4(^3P)4p\ ^4P^o$	-1.366	-1.373	0.007
20	$2p^4(^3P)4p\ ^4D^o$	-1.326	-1.331	0.005
21	$2p^4(^3P)4p\ ^2D^o$	-1.304	-1.297	-0.007
22	$2p^4(^3P)4p\ ^2S^o$	-1.281	-1.286	0.005
23	$2p^4(^3P)4p\ ^4S^o$	-1.280	-1.277	-0.003
24	$2p^4(^3P)4p\ ^2P^o$	-1.268	-1.254	-0.014
25	$2p^4(^3P)5s\ ^4P$	-0.968	-0.968	0.000
26	$2p^4(^3P)5s\ ^2P$	-0.941	-0.924	-0.017
27	$2p^4(^1D)3p\ ^2F^o$	-0.287		
28	$2p^4(^1D)3p\ ^2P^o$	-0.235		
29	$2p^4(^1D)3p\ ^2D^o$	-0.156	-0.226	0.070
30	$2p^4(^1D)4s\ ^2D$	0.802	0.762	0.040
31	$2p^4(^1S)3s\ ^2S$	0.955	0.791	0.164
32	$2p^4(^1D)3d\ ^2P$	1.055	1.043	0.012
33	$2p^4(^1D)3d\ ^2G$	1.059	1.047	0.012
34	$2p^4(^1D)3d\ ^2D$	1.078	1.066	0.012

35	$2p^4(^1D)3d\ ^2F$	1.088	1.076	0.012
36	$2p^4(^1S)3s\ ^2S$	1.100	1.074	0.026
37	$2p^4(^1S)3p\ ^2P^o$	2.747		
38	$2p^4(^1S)4s\ ^2S$	3.692		
39	$2p^4(^1S)3d\ ^2D$	4.057		

*) енергії триплетів усереднені по терму

Методи розрахунку

Особливості методики розрахунку структурних характеристик атома F достатньо детально висвітлені у вищезгаданій праці [2]. При цьому в розкладі сильного зв'язку для випадку F було враховано у різних варіантах наближення БСР від 39 станів мішені (БСР39), і до 39 станів мішені плюс 651 пседостан (великомасштабний розклад БСР690). Розрахунки структури атома F здійснювалися з використанням як пакету MCHF [10, 11], так і пакету BSR [9]. Переваги розрахунку структури мішені в рамках методу R-матриці з B-сплайнами (пакет BSR) у порівнянні з багатоконфігураційним методом Хартрі-Фока (пакет MCHF) висвітлені в [9]. Там же наведена загальна теорія БСР-розрахунків ЕА-розсіяння та опис комп'ютерних програм пакету BSR.

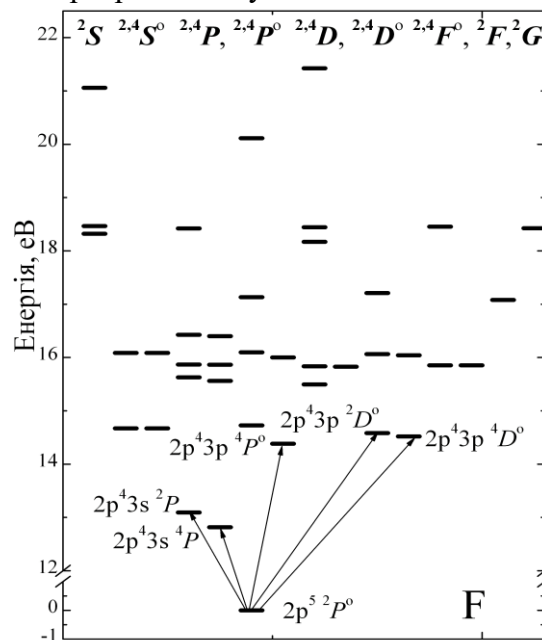


Рис. 1. Схема розміщення врахованих у БСР39-розрахунках $e-F$ -розсіяння нижчих рівнів атома F [2]. Показано розглянуті в даній праці переходи з основного рівня $2p^5\ ^2P^o$ атома F у п'ять нижчих збуджених станів: $2p^4(^3P)3s\ ^4,2P$, $2p^4(^3P)3p\ ^4P^o, ^4,2D^o$

У таблиці 1 показані результати БСР39-розрахунків енергій 39 нижніх рівнів атома F

[2], які порівняні з даними NIST [14]. Похибки в обчисленні як енергій рівнів, так і хвильових функцій (сил осциляторів), отримані нами, є меншими за ті, що мали місце в розрахунках структури мішеней атома F іншими авторами (див. [2]).

На рис. 1 показана схема розміщення врахованих у даній праці станів атома F, їх розподіл за термами, а також розглянуті нами збудження з основного стану. Звернемо увагу на дуже великий проміжок між енергією основного стану і енергією нижчого порогу збудження, яка перевищує 12 еВ. Подібний енергетичний зазор має місце ще тільки для двох елементів Періодичної таблиці, а саме інертних газів гелію та неону. Очевидно, що подібна обставина повинна якимось чином відбитися і на характері 3D-поверхонь енергетично-кутових залежностей ДП для процесів $e\text{-F}$ -розсіяння.

Щодо параметрів розрахунків ($N+1$)-електронної задачі EA-розсіяння у внутрішній області ($r \leq a$) для атома F, зокрема числі використовуваних при цьому B -сплайнів порядку 8, R -матричному радіусі та чисельно розрахованих парціально-хвильових вкладках, можна дізнатися з праці [2]. Зауважимо також, що розрахунки у зовнішній R -матричній області були здійснені нами з використанням розпаралеленої версії пакету STGF [15].

Результати й обговорення

На рис. 2 представлені енергетично-кутові залежності ДП пружного $e\text{-F}$ -розсіяння та збудження з основного стану атома F п'яти нижчих вище розміщених станів: Кінцеві стани згаданих переходів вказані у відповідних графічних вікнах. На рис. 3 показані кутові залежності ДП при кількох фіксованих енергіях для чотирьох вибраних переходів. Звернемо увагу як на повну відмінність у характері енергетично-кутових залежностей кожної з 3D-поверхонь, наведених на рис. 2, так і значну розмаїтість кутових залежностей при різних енергіях для одних і тих же переходів (рис. 3). З рис. 2 також видно, що 3D-поверхні містять локалізовані в енергетично-кутовій площині особливості, які можна трактувати як „топологічні

резонанси”, або як „критичні мінімуми”. У рамках методу BSR39 нами була досліджена поведінка енергетично-кутових залежностей ДП (і відповідних їм 3D-поверхонь) для окремих переходів в атомі фтору під дією електронного удару. Як зазначалося вище, ці 3D-поверхні містять практично повну інформацію про енергетично-кутові параметри ДП розсіяння і слугують чутливим тестом для оцінювання точності здійснених обчислень. Для прикладу, розглянемо зображений на рис. 2 один з можливих ракурсів такої 3D-поверхні для збудження $2p^5\ ^2P^o - 2p^4(^3P)3s\ ^4P$. Гладкість 3D-поверхні ДП свідчить про достатню кількість врахованих членів у парціально-хвильовому розкладі. Навпаки, наявність збрижень і дрібних складчастих структур на 3D-поверхні (перехід $2p^5\ ^2P^o - 2p^4(^3P)3s\ ^2P$) сигналізує про необхідність збільшення числа врахованих парціальних хвиль. Для $2p^43s\ ^4P$ -збудження на рис. 2 також відмічені точки т. з. критичних мінімумів: $\min 1$ ($E = 30.46$ еВ, $\theta = 110.35^\circ$) та $\min 2$ ($E = 29.60$ еВ, $\theta = 180.00^\circ$).

З абсолютної несхожості наведених на рис. 2 енергетично-кутових залежностей ДП випливає, що загальний характер різних спектроскопічних переходів, розглянутих нами для процесів $e\text{-F}$ -розсіяння, у значній мірі визначає структуру і характер поведінки 3D-поверхонь ДП. Фактично, кожна з наведених на рис. 2 3D-поверхонь ДП збудження містить всю інформацію про енергетичні і кутові залежності цих перерізів для даного переходу в атомі F. Аналіз поздовжніх (по енергії) структур („хребтів”, „впадин-жолобів”, „вирв” і т.п.) на 3D-поверхнях ДП збудження містить дані не тільки про фізичні процеси, які привели до появи вказаних особливостей поверхні, але й про характер обчислювальних процесів, у результаті яких були розраховані ці ДП. Зокрема, очевидно, що для сильних дипольних переходів, таких як $2p^5\ ^2P^o - 2p^4(^3P)3s\ ^2P$, варто було врахувати в R -матричному розкладі значно більше парціальних хвиль (як це і було зроблено в оригінальних розрахунках енергетичних залежностей ДП [2] у наближенні BSR690), щоб отримати гладкі поверхні ДП. На жаль, здійснення таких же обчислень для всього 3D-

масиву енергій і кутів поки що впирається в брак обчислювальних ресурсів.

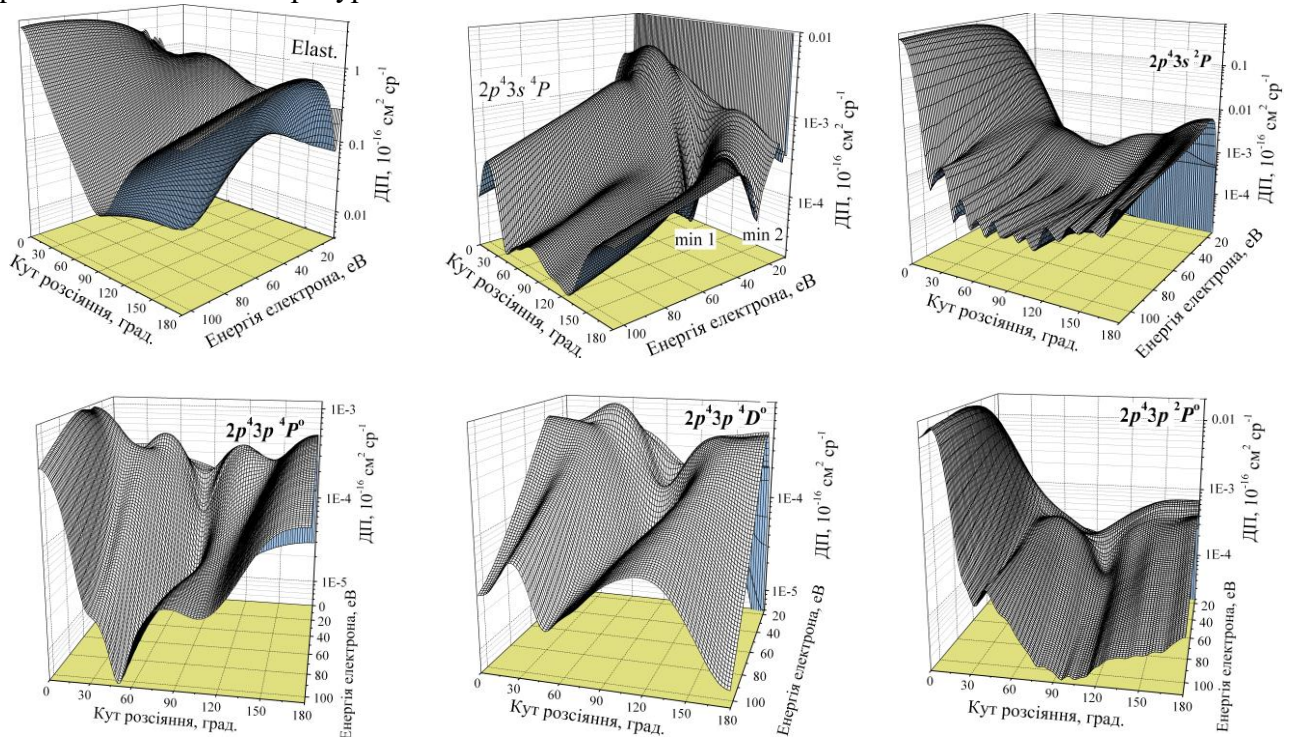


Рис. 2. 3D-поверхні ДП пружного розсіяння $e-F$ та збудження електронним ударом п'яти нижчих станів атома F.

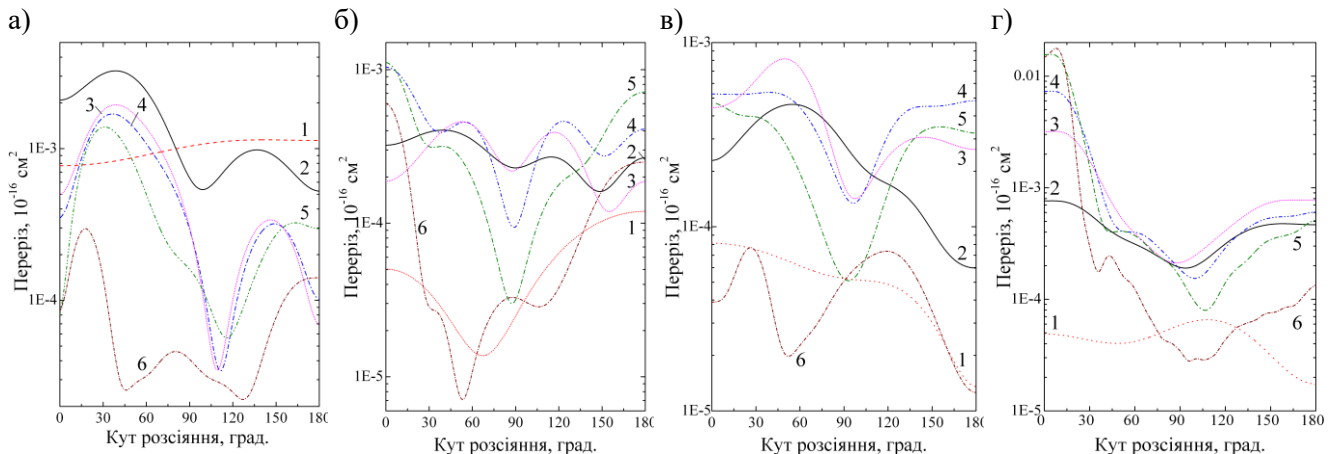


Рис. 3. Кутові залежності ДП збудження станів атома F при різних енергіях налітаючого електрона:
 а) ДП стану $2p^4 3s^4 P$ при енергіях: 1 – 13.14 еВ, 2 – 18.10 еВ, 3 – 29.80 еВ, 4 – 31.31 еВ, 5 – 43.54 еВ, 6 – 95.78 еВ;
 б) ДП стану $2p^4 3p^4 P^o$ при енергіях: 1 – 14.56 еВ, 2 – 18.10 еВ, 3 – 20.27 еВ, 4 – 29.80 еВ, 5 – 43.54 еВ, 6 – 95.78 еВ;
 в) ДП стану $2p^4 3p^4 D^o$ при енергіях: 1 – 14.69 еВ, 2 – 18.10 еВ, 3 – 23.69 еВ, 4 – 29.80 еВ, 5 – 43.54 еВ, 6 – 95.78 еВ;
 д) ДП стану $2p^4 3p^2 P^o$ при енергіях: 1 – 14.69 еВ, 2 – 18.10 еВ, 3 – 23.69 еВ, 4 – 29.80 еВ, 5 – 43.54 еВ, 6 – 95.78 еВ.

Висновки

Нами показано, що характер енергетично-кутових залежностей ДП пружного $e-F$ -розсіяння та збудження електронним ударом нижчих станів атома F визначається в основному типом спектроскопічного переходу між початковим і кінцевим станами атома-мішені. Аналіз характеру куткових залежностей ДП при фіксованих енергіях збудження для вибраних переходів підтверджує вказаний

висновок. Для процесу $2p^4 3s^4 P$ -збудження нами виявлені точки т. з. критичних мінімумів: min 1 ($E = 30.46$ еВ, $\theta = 110.35^\circ$) та min 2 ($E = 29.60$ еВ, $\theta = 180.00^\circ$), які свідчать про складну структуру досліджуваних 3D-поверхонь ДП.

Автори висловлюють подяку своїм спів-авторам [2] за допомогу у проведенні розрахунків та продуктивні обговорення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hayes T.R., Wetzel R.C., Freund R.S. Absolute electron-impact-ionization cross-section measurements of the halogen atoms // *Phys. Rev. A.* – 1987. – V. 35. – Iss. 2. – P. 578 – 584.
2. Gedeon V., Gedeon S., Lazur V., Nagy E., Zatsarinny O., Bartschat K. *B*-spline *R*-matrix-with-pseudostates calculations for electron-impact excitation and ionization of fluorine // *Phys. Rev. A.* – 2014. – V. 89. – Iss. 5. – P. 052713 (9).
3. Zatsarinny O., Bartschat K., Gedeon S., Gedeon V., Lazur V. Low-energy electron scattering from Ca atoms and photodetachment of Ca^- // *Phys. Rev. A.* – 2006. – V. 74. – Iss. 5. – P. 052708 (10).
4. Zatsarinny O., Bartschat K., Bandurina L., Gedeon S. Electron-impact excitation of calcium // *J. Phys. B.* – 2007. – V. 40. – No 20. – P. 4023 – 4031.
5. Zatsarinny O., Bartschat K., Gedeon S., Gedeon V., Lazur V., Nagy E. Cross sections for electron scattering from magnesium // *Phys. Rev. A.* – 2009. – V. 79. – Iss. 5. – P. 052709 (10).
6. Нодь Є.А. Перерізи розсіяння електронів на атомі Sr // Науковий вісник Ужгородського університету, серія “Фізика”. – 2009. – Вип. 25. – С. 148-153.
7. Gedeon V., Gedeon S., Lazur V., Nagy E., Zatsarinny O., Bartschat K. Electron scattering from silicon *Phys. Rev. A.* – 2012. – V. 85. – Iss. 2. – P. 022711 (7).
8. Gedeon V., Gedeon S., Lazur V., Nagy E., Zatsarinny O., Bartschat K. *B*-spline *R*-matrix-with-pseudostates calculations for electron collisions with aluminum // *Phys. Rev. A.* – 2015. – V. 92. – Iss. 5. – P. 052701 (7).
9. Gedeon V., Gedeon S., Lazur V., Nagy E., Zatsarinny O., Bartschat K. Low-energy outer-shell photo-detachment of the negative ion of aluminum // *J. Phys. B.* – 2018. – V. 51. – No 3. – P. in press.
10. Бандурина Л.О., Гедеон С.В. Диференціальні перерізи розсіяння електронів на атомі бору // Науковий вісник Ужгородського університету, серія “Фізика”. – 2015. – Вип. 37. – С. 49 – 56.
11. Zatsarinny O. BSR: *B*-spline atomic *R*-matrix codes // *Comput. Phys. Commun.* – 2006. – V. 174. – No 4. – P. 273 – 356.
12. Froese Fischer C. The MCHF atomic-structure package // *Comput. Phys. Commun.* – 1991. – V. 64. – P. 369 – 398.
13. Froese Fischer C., Brage T., Jonsson O. *Computational Atomic Structure. An MCHF Approach.* – London: Institute of Physics Publishing, Bristol, 1997. – 279 p.
14. Ralchenko Yu., Kramida A.E., Reader J., and NIST ASD Team. NIST Atomic Spectra Database, version 3.1.5 // National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2008.
15. Badnell N.R. A perturbative approach to the coupled outer-region equations for the electron-impact excitation of neutral atoms // *J. Phys. B.* – 1999. – V. 32. – No 23. – P. 5583 – 5591.

Стаття постуила до редакції 10.07.2017.

С.В. Гедеон, В.Ф. Гедеон, В.Ю. Лазур, Е.А. Нодь,
Ужгородский национальный университет, Украина, 88000, Ужгород, ул. Волошина, 54

ДИФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ 3D-СЕЧЕНИЯ РАССЕЙЯНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ НА АТОМЕ ФТОРА

В рамках метода *R*-матрицы с *B*-сплайнами (БСР) рассчитаны дифференциальные сечения (ДС) рассеяния электронов на атоме фтора в области энергий до 110 эВ. Разложение сильной связи включало 39 связанных состояний атома F. Получены энергетические и угловые зависимости ДС и построены соответствующие 3D-поверхности для

сечений упругого рассеяния и возбуждения пяти низших состояний атома F. Обсуждена связь энергетических и угловых 3D-зависимостей ДС от типа спектральных переходов в атоме F.

Ключевые слова: атом F, рассеяние электронов, метод R -матрицы с B -сплайнами, дифференциальные сечения рассеяния, 3D-поверхности.

PACS 34.80.Dp, 34.80.Gs

DOI: 10.24144/2415-8038.2017.42.121-127

S.V. Gedeon, V.F. Gedeon, V.Yu. Lazur, E.A. Nagy,

Uzhgorod National University, Ukraine, 88000, Uzhgorod, Voloshina Str., 54

THE 3D DIFFERENTIAL CROSS SECTIONS OF ELECTRON SCATTERING ON FLUORINE ATOM

Background: Progress in the field of physics of electron-atom collisions is dependent on two main factors: a) the availability of new studies of individual atomic systems; b) the clarify, systematize and generalize of results, obtained in previous studies. In the last decade we, together with co-authors, investigate in detail the elastic and inelastic electron scattering on neutral atomic systems Ca, Mg, Sr, Si, F, Al, and B. The purpose of this paper is to systematize and summarize the results of studies of F atom, and is to continue the investigation of the scattering differential cross sections of electrons on the fluorine atom, begun in our previous work.

Methods: The atomic structure for F, as well as the excitation cross sections for e^- F scattering processes were obtained by the B -spline R -matrix method. The multiconfiguration Hartree-Fock method with nonorthogonal orbital sets was employed for an accurate representation of the targets wave functions. The close coupling expansions include 39 spectroscopic states of neutral fluorine. The scattering calculations was then carried out in the same way as in standard R -matrix calculations.

Results: In this paper we summarize our earlier data with electron-atom scattering on F. The subject of the study are energy and angular dependences of differential cross sections (DCS) of e^- F elastic scattering and electron impact excitation of the lower levels of this atom. We reviewed the transitions from the ground state $2p^5\ ^2P^o$ in the five lowest excited states $2p^4(^3P)3s\ ^4P$, $2p^4(^3P)3p\ ^4P^o$, $^4D^o$ for F atom.

Conclusions: The energy and angular dependences of the DCS were obtained and corresponding 3D surfaces for the elastic scattering cross sections and excitations of the five lowest states of the F atom were constructed. The relationship between the energy and angular 3D dependences of the DCS on the type of spectral transitions in the F atom is discussed.

Key words: F atom, electron scattering, B -splines R -matrix method, differential scattering cross-sections, 3D surfaces.

PACS NUMBER: 34.80.DP, 34.80.GS

REFERENCES

1. Hayes T.R., Wetzel R.C., Freund R.S. (1987), "Absolute electron-impact-ionization cross-section measurements of the halogen atoms", Phys. Rev. A., Vol. 35, Iss. 2, pp. 578-584.
2. Gedeon V., Gedeon S., Lazur V., Nagy E., Zatsarinny O., Bartschat K. (2014), " B -spline R -matrix-with-pseudostates calculations for electron-impact excitation and ionization of fluorine", Phys. Rev. A., Vol. 89, Iss. 5, pp. 052713 (9).
3. Zatsarinny O., Bartschat K., Gedeon S., Gedeon V., Lazur V. (2006), "Low-energy electron scattering from Ca atoms and photodetachment of Ca", Phys. Rev. A., Vol. 74, Iss. 5, pp. 052708 (10).
4. Zatsarinny O., Bartschat K., Bandurina L., Gedeon S. (2007), "Electron-impact excitation of calcium", J. Phys. B., Vol. 40, No 20, pp. 4023-4031.
5. Zatsarinny O., Bartschat K., Gedeon S., Gedeon V., Lazur V., Nagy E. (2009),

- “Cross sections for electron scattering from magnesium”, *Phys. Rev. A.*, Vol. 79, Iss. 5, pp. 052709 (10).
6. Nagy E.A. (2009) “The cross sections of electron scattering on Sr atom” [“Pererizy rozsiannia elektroniv na atomi Sr”], *Scientific Herald of Uzhhorod University. Series Physics*, No. 25, pp. 148-153.
 7. Gedeon V., Gedeon S., Lazur V., Nagy E., Zatsarinny O., Bartschat K. (2012), “Electron scattering from silicon”, *Phys. Rev. A.*, Vol. 85, Iss. 2, pp. 022711 (7).
 8. Gedeon V., Gedeon S., Lazur V., Nagy E., Zatsarinny O., Bartschat K. (2015), “B-spline *R*-matrix-with-pseudo-states calculations for electron collisions with aluminum”, *Phys. Rev. A.*, Vol. 92, Iss. 5, pp. 052701 (7).
 9. Gedeon V., Gedeon S., Lazur V., Nagy E., Zatsarinny O., Bartschat K. (2018), “Low-energy outer-shell photo-detachment of the negative ion of aluminum”, *J. Phys. B.*, Vol. 51, No. 3, pp. in press.
 10. Bandurina L.O., Gedeon S.V. (2015) “The differential cross sections of electron scattering on B atom” [“Dyferentsialni pererizy rozsiannia elektroniv na atomi boru”], *Scientific Herald of Uzhhorod University. Series Physics*, No. 37, pp. 49-56.
 11. Zatsarinny O. (2006), “B-spline atomic *R*-matrix codes”, *Comput. Phys. Commun.*, Vol. 174, No 4, pp. 273-356.
 12. Froese Fischer C. (1991), “The MCHF atomic-structure package”, *Comput. Phys. Commun.*, Vol. 64, pp. 369-398.
 13. Froese Fischer C., Brage T., Jonsson O. (1997), *Computational Atomic Structure. An MCHF Approach*, London: Institute of Physics Publishing, Bristol, 279 p.
 14. Ralchenko Yu., Kramida A.E., Reader J., and NIST ASD Team (2008). *NIST Atomic Spectra Database*, version 3.1.5, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
 15. Badnell N.R. (1999), “A perturbative approach to the coupled outer-region equations for the electron-impact excitation of neutral atoms”, *J. Phys. B.*, Vol. 32, No 23, pp. 5583-5591.