

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОННОЇ ФІЗИКИ



РОБОТА
на здобуття премії Президента України
для молодих вчених 2024 р.

**“СПЕКТРОСКОПІЯ ЗБУДЖЕНИХ СТАНІВ АТОМІВ ТА ІОНІВ У
ПЛАЗМІ НА ПАРІ МЕТАЛІВ: МЕХАНІЗМИ ЕЛЕМЕНТАРНИХ
ПРОЦЕСІВ”**

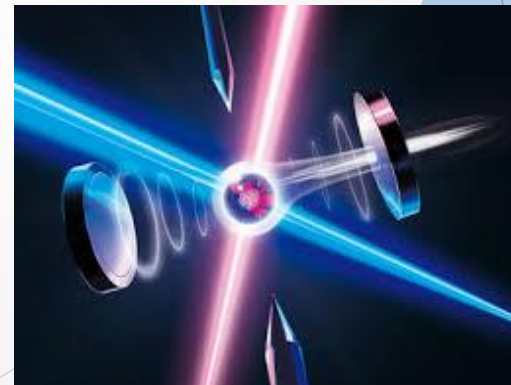
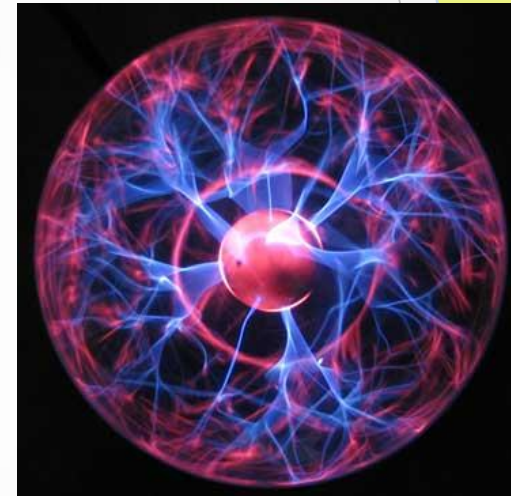
**РОМАН Вікторія Іванівна – кандидат фіз.-мат. наук,
старший дослідник,
завідувач відділу
електронних процесів і
елементарних взаємодій
Інституту електронної фізики
НАН України
11.06.1988 р.н.**

ВСТУП

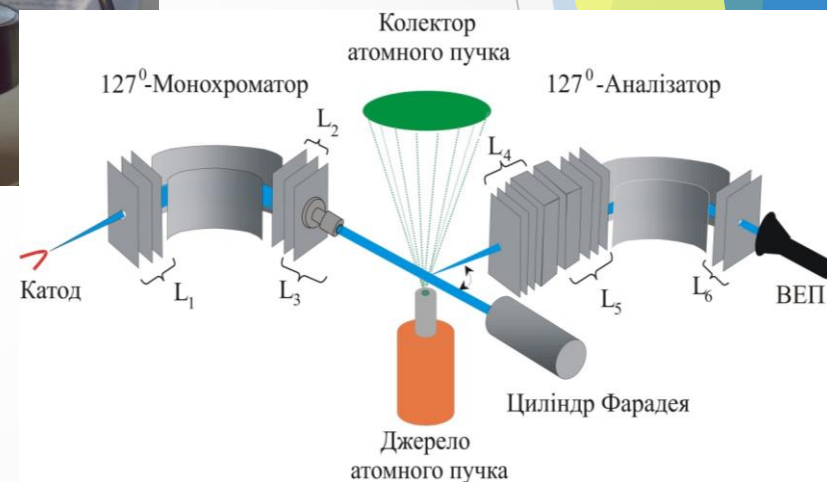
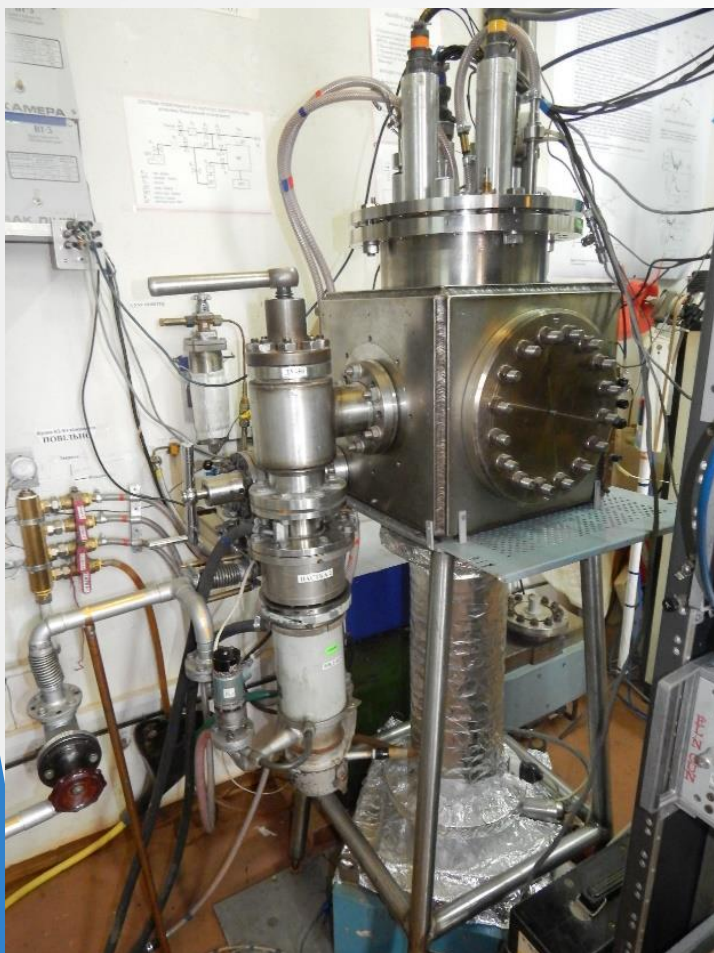


Властивості різного роду плазмових середовищ в значній мірі залежать від ефективності елементарних процесів, що відбуваються при зіткненнях електронів з атомами та іонами. Зокрема, зарядовий склад і енергетичний баланс плазми визначається в основному двома процесами - *прямою іонізацією* та *автоіонізацією*.

Одержання базових характеристик, таких як перерізи збудження та канали розпаду автоіонізаційних станів, перерізи іонізації є дуже важливими, так як вони використовуються при проведенні теоретичних оцінок та розрахунках у фізиці плазми, лазерній спектроскопії, у фізиці керованого термоядерного синтезу, у рентгенівській астрономії і астрофізиці, у фізиці твердого тіла, при розробці технологічних методів розділення ізотопів на атомарному рівні, конструюванні генераторів когерентного ультрафіолетового та рентгенівського випромінювання, а також інших областях фізики. Найбільш плідним вважаються комплексний експериментально-теоретичний аналіз таких процесів.



Експериментальні дослідження атомів Rb, K, Ba, здійснені на установці «Електронний спектрометр»



Діапазон енергій зіткнень: $E_0 = 15-600$ eV.

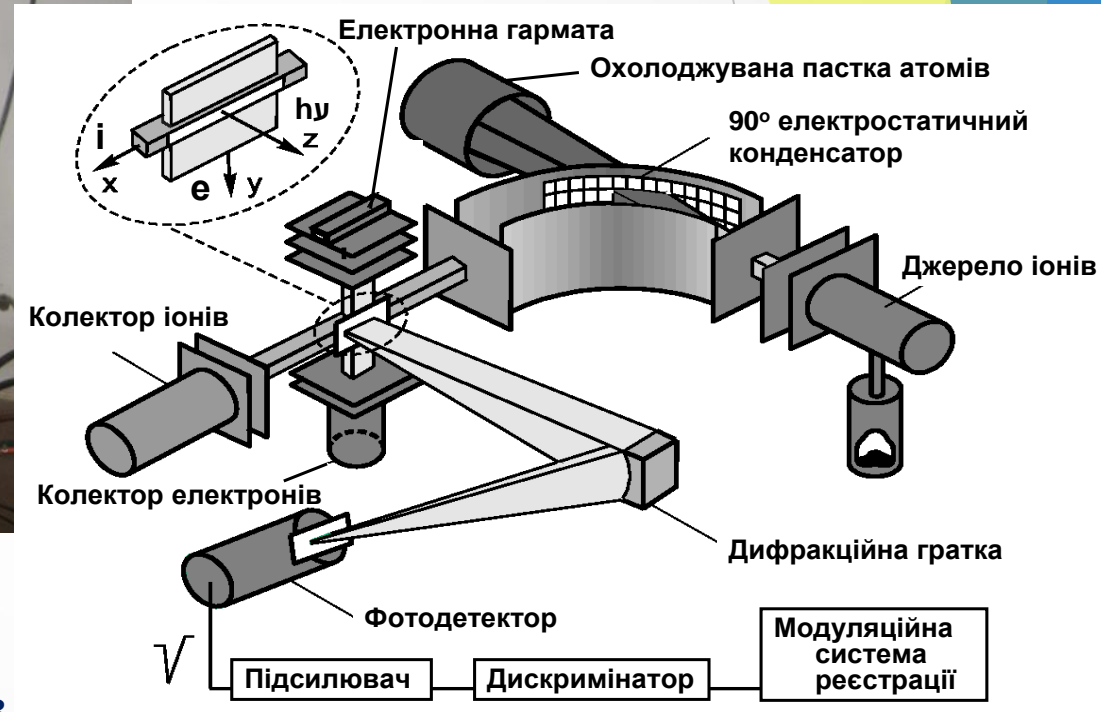
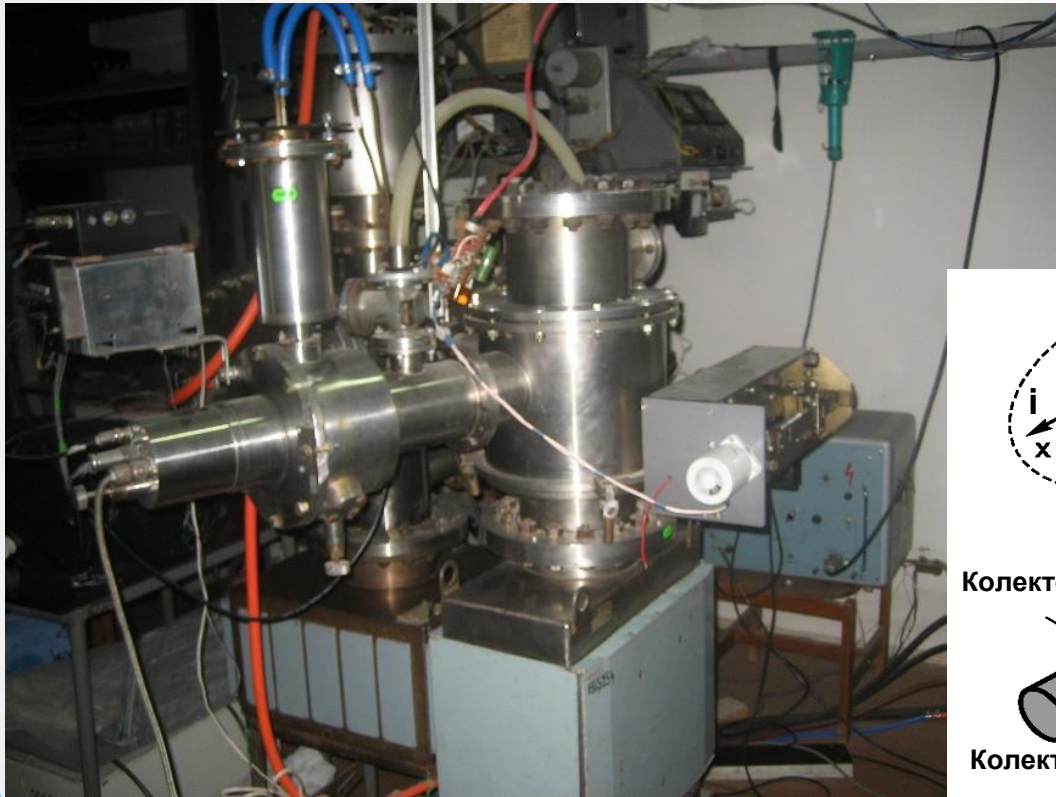
Монохроматор: $I_0 = 0.1-0.2$ мкА, $\Delta E_{1/2} \leq 0.2$ eV.

Аналізатор: $\Delta E_{1/2} \leq 0.05$ eV.

Атомний пучок: $T = 120^\circ$ C, $n \sim 10^{11}-10^{12}$ ат/см³.

Вакуум: $P \leq 2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Експериментальна установка «ІОН», на якій проведені експериментальні дослідження збудження іонів Pb^+ та Tl^+



Іонний струм $(0,5 - 1,2) \times 10^{-6}$ А при $E_i = 800$ еВ

Електронний струм $(6 - 50) \times 10^{-5}$ А

Енергія електронів $(6 - 300)$ еВ

Моноенергетичність ел. пучка $\Delta E_{1/2}$ $(0,3-0,6)$ еВ

Геометричні розміри іонного пучка 2,5 мм x 2,5 мм

Геометричні розміри електронного пучка 1,0 мм x 8,0 мм

Співвідношення сигнал / фон 1:10 – 1:20

Тиск залишкових газів у камері зіткнень $P = 10^{-7}$ Па

Програмний пакет для розрахунків перерізів збудження та іонізації атомів (іонів) FAC (Flexible Atomic Code)

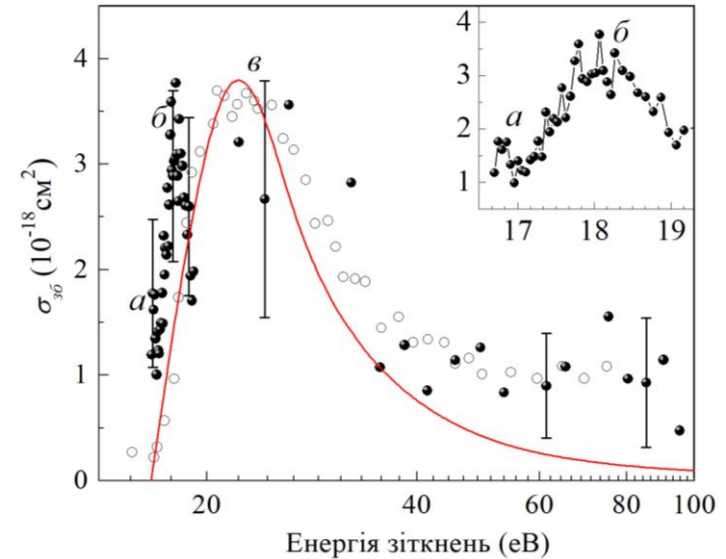
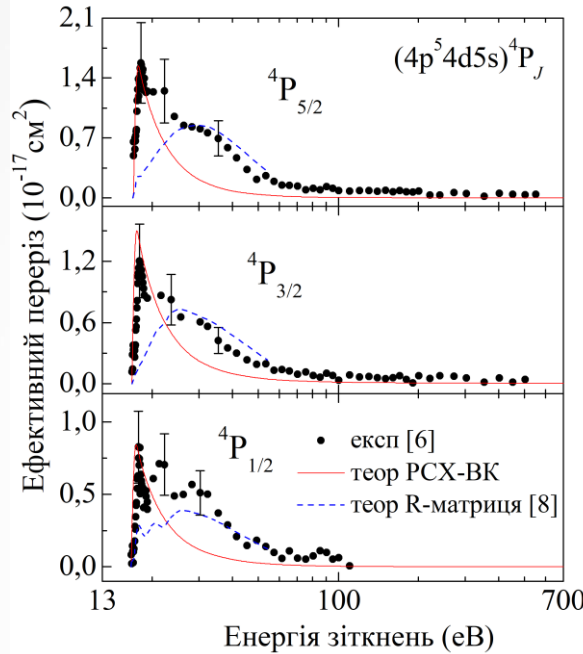
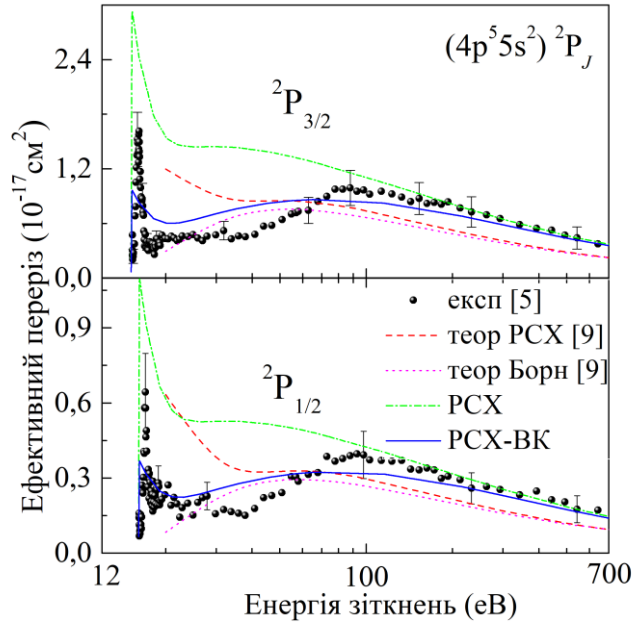


```
File Edit View Search Terminal Help
File: Ba.ce Line 28 Col 0 2055694 bytes
UTYPE = 1
NUSR = 6
 9.42118405E-01
 1.57284179E+01
 3.85140543E+01
 7.36266411E+01
 1.27735016E+02
 2.11115834E+02
 0 0 27 0 1.5661E+01 1
-1.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
 9.4212E-01 1.0671E-04 7.6930E-01
 1.5728E+01 1.3112E-05 4.9998E-02
 3.8514E+01 8.0140E-06 1.7705E-02
 7.3627E+01 3.2166E-06 4.3117E-03
 1.2774E+02 1.0912E-06 9.1071E-04
 2.1112E+02 4.3996E-07 2.3216E-04
 0 0 28 2 1.5687E+01 1
 7.1739E-07 7.1044E-07 2.6389E+03
 9.4212E-01 6.8994E-04 4.9659E+00
 1.5728E+01 8.3292E-05 3.1733E-01
 3.8514E+01 5.1001E-05 1.1262E-01
 7.3627E+01 2.1426E-05 2.8711E-02
 1.2774E+02 8.7545E-06 7.3051E-03
 2.1112E+02 5.1625E-06 2.7239E-03
 0 0 29 4 1.5738E+01 1
-1.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
 9.4212E-01 9.4491E-04 6.7803E+00
 1.5728E+01 1.1201E-04 4.2607E-01
 3.8514E+01 6.3737E-05 1.4061E-01
 7.3627E+01 2.4521E-05 3.2840E-02
 1.2774E+02 8.0890E-06 6.7474E-03
 2.1112E+02 3.2673E-06 1.7236E-03
 0 0 30 6 1.5815E+01 1
 0.0000E+00 6.3328E-05 2.6389E+03
 9.4212E-01 5.1341E-04 3.6672E+00
 1.5728E+01 8.5773E-05 3.2546E-01
 3.8514E+01 6.1869E-05 1.3630E-01
1Help 2UnWrap 3Quit 4Hex 5Line 6
```

```
mc [jano@localhost.localdomain]:~/Uzgorodas/Viktoria/excitation
File Edit View Search Terminal Help
File: ne.lev Line 1 Col 0 21198 bytes
FAC 1.1.0
Endian = 0
TSess = 1413360941
Type = 1
Verbose = 1
Rb Z = 37.0
NBlocks = 1
E0 = 0, -8.10088275E+04
NELE = 37
NLEV = 186
 ILEV IBASE ENERGY P VNL 2J
 0 -1 0.00000000E+00 0 500 1 1*2 2*8 3*18 4*8 5*1 5s1 5s+1(1)1
 1 -1 1.52221190E+01 1 500 3 1*2 2*8 3*18 4*7 5*2 4p5 4p+3(3)3
 2 -1 1.61665132E+01 1 500 1 1*2 2*8 3*18 4*7 5*2 4p5 4p-1(1)1
 3 -1 1.80493836E+01 1 600 5 1*2 2*8 3*18 4*7 5*1 6*1 4p5 5s1 6s1 4p+3(3)3 5s+1(1)4 6s+1(1)5
 4 -1 1.81733983E+01 1 600 3 1*2 2*8 3*18 4*7 5*1 6*1 4p5 5s1 6s1 4p+3(3)3 5s+1(1)4 6s+1(1)3
 5 -1 1.82191539E+01 0 501 1 1*2 2*8 3*18 4*8 5*1 4p5 4d1 5p1 4p+3(3)3 4d-1(3)0 5p-1(1)1
 6 -1 1.82831245E+01 1 600 1 1*2 2*8 3*18 4*7 5*1 6*1 4p5 5s1 6s1 4p+3(3)3 5s+1(1)2 6s+1(1)1
 7 -1 1.82901206E+01 0 501 3 1*2 2*8 3*18 4*8 5*1 4p5 4d1 5p1 4p+3(3)3 4d-1(3)2 5p-1(1)3
 8 -1 1.84024157E+01 0 501 5 1*2 2*8 3*18 4*8 5*1 4p5 4d1 5p1 4p+3(3)3 4d-1(3)2 5p+1(3)5
 9 -1 1.84620578E+01 0 501 7 1*2 2*8 3*18 4*8 5*1 4p5 4d1 5p1 4p+3(3)3 4d-1(3)6 5p-1(1)7
 10 -1 1.84868874E+01 0 501 9 1*2 2*8 3*18 4*8 5*1 4p5 4d1 5p1 4p+3(3)3 4d-1(3)6 5p+1(3)9
 11 -1 1.85132812E+01 0 601 3 1*2 2*8 3*18 4*7 5*1 6*1 4p5 5s1 6p1 4p+3(3)3 5s+1(1)4 6p-1(1)3
 12 -1 1.85386717E+01 0 601 7 1*2 2*8 3*18 4*7 5*1 6*1 4p5 5s1 6p1 4p+3(3)3 5s+1(1)4 6p+1(3)7
 13 -1 1.85574934E+01 0 501 11 1*2 2*8 3*18 4*8 5*1 4p5 4d1 5p1 4p+3(3)3 4d+1(5)8 5p+1(3)11
 14 -1 1.85642467E+01 0 501 7 1*2 2*8 3*18 4*8 5*1 4p5 4d1 5p1 4p+3(3)3 4d+1(5)4 5p+1(3)7
 15 -1 1.85680953E+01 0 601 5 1*2 2*8 3*18 4*7 5*1 6*1 4p5 5s1 6p1 4p+3(3)3 5s+1(1)4 6p-1(1)5
 16 -1 1.85916893E+01 0 501 5 1*2 2*8 3*18 4*8 5*1 4p5 4d1 5p1 4p+3(3)3 4d-1(3)4 5p-1(1)5
 17 -1 1.86179994E+01 1 600 3 1*2 2*8 3*18 4*7 5*1 6*1 4p5 5s1 6s1 4p+3(3)3 5s+1(1)2 6s+1(1)3
 18 -1 1.86356658E+01 0 601 3 1*2 2*8 3*18 4*7 5*1 6*1 4p5 5s1 6p1 4p+3(3)3 5s+1(1)4 6p+1(3)3
 19 -1 1.86364345E+01 0 601 5 1*2 2*8 3*18 4*7 5*1 6*1 4p5 5s1 6p1 4p+3(3)3 5s+1(1)4 6p+1(3)5
 20 -1 1.86700511E+01 0 501 3 1*2 2*8 3*18 4*8 5*1 4p5 4d1 5p1 4p+3(3)3 4d-1(3)2 5p-1(1)3
 21 -1 1.86945283E+01 0 601 1 1*2 2*8 3*18 4*7 5*1 6*1 4p5 5s1 6p1 4p+3(3)3 5s+1(1)4 6p+1(3)1
 22 -1 1.87001358E+01 0 501 5 1*2 2*8 3*18 4*8 5*1 4p5 4d1 5p1 4p+3(3)3 4d+1(5)4 5p+1(3)5
 23 -1 1.87100363E+01 0 501 7 1*2 2*8 3*18 4*8 5*1 4p5 4d1 5p1 4p+3(3)3 4d-1(3)4 5p+1(3)7
 24 -1 1.87417154E+01 0 501 1 1*2 2*8 3*18 4*8 5*1 4p5 4d1 5p1 4p+3(3)3 4d-1(3)2 5p+1(3)1
1Help 2UnWrap 3Quit 4Hex 5Line 6 7Search 8Raw 9Format 10Quit
```

Теоретичні розрахунки спектроскопічних параметрів складних атомних систем проводилися з використанням сучасних квантово-механічних релятивістських методів Кулон-Борна (КБ), спотворених хвиль (СХ) та дипольних бінарних зіткнень (БЗ) у рамках програмного пакету FAC (Flexible Atomic Code).

Перерізи збудження електронним ударом автоіонізаційних станів атома Rb



Scientific Herald of Uzhhorod University. Series "Physics"
ISSN 2415-8038 e-ISSN 2786-6688

Home Articles & Issues About For Authors Ethics & Policies Search Contacts

Theoretical Calculations of Electron Excitation of the Lowest Autoionization States of the Rb Atom

Issue 48, 2020

V.I. Roman, Oksana Pop, I.V. Pylypchynets

Received 28.08.2020, Revised 30.11.2020, Accepted 24.12.2020

<https://doi.org/10.54919/2415-8038.2020.48.58-66>

Перерізи збудження дублетних та кватетних АІС атома рубідію: ● – наші експериментальні дані, — — наші теоретичні розрахунки в наближенні СХ, - - - - - наші теоретичні розрахунки в наближенні РБ, - - - - - наші теоретичні розрахунки в наближенні СХ

Енергетична залежність перерізів збудження $5s(^3P)5p\ ^4S_{3/2}$ стану атома рубідію: ● – наші дані; ○ – оптичні дані [16], — — наші теоретичні розрахунки в наближенні СХ. На вставці показано припорогову область енергій 16.7-19.2 eV

PAPER • OPEN ACCESS

Electron-impact excitation of the $(4p^5 5s 5p)^4S_{3/2}$ quasimetastable state in Rb

V Roman¹ and S Demes²

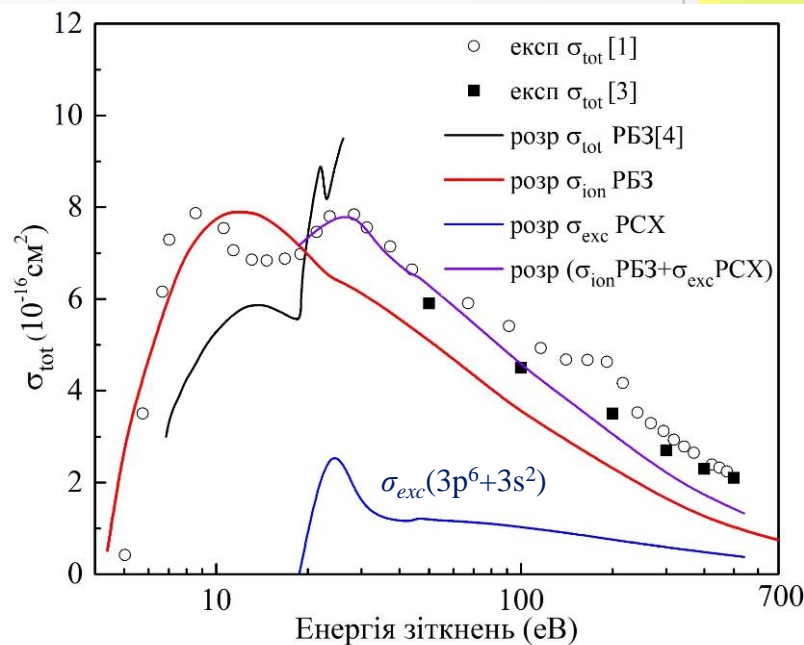
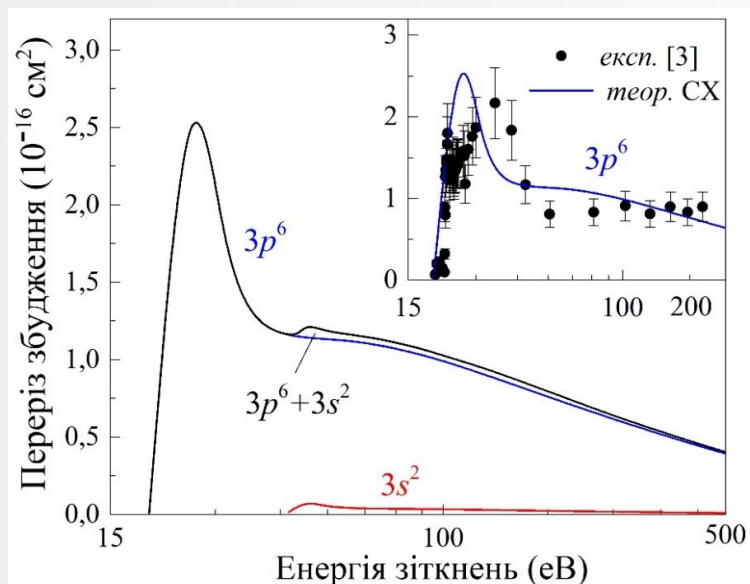
Published under licence by IOP Publishing Ltd

[Journal of Physics: Conference Series, Volume 1412, Structure / Spectroscopy](#)

Citation V Roman and S Demes 2020 *J. Phys.: Conf. Ser.* 1412 132012

DOI 10.1088/1742-6596/1412/13/132012

Розрахунки перерізів збудження та перерізів іонізації атома К електронним ударом



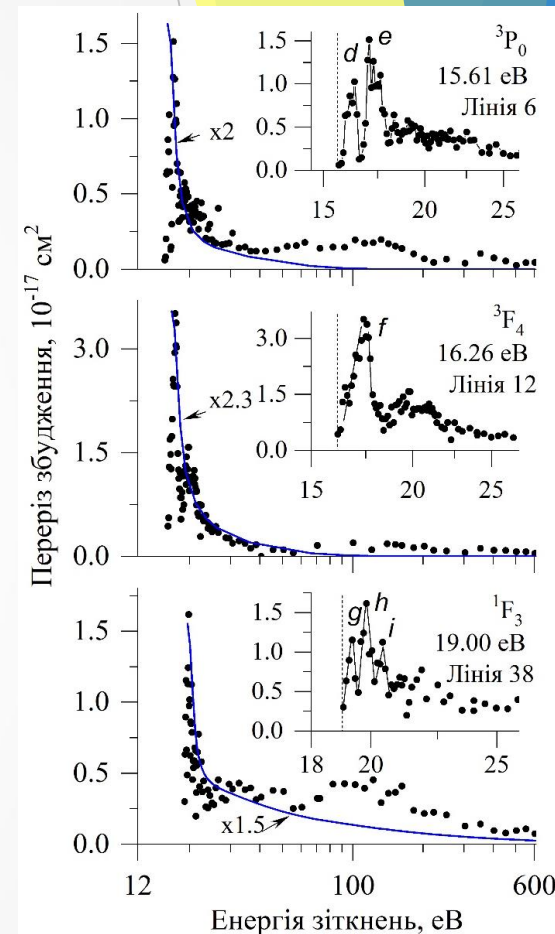
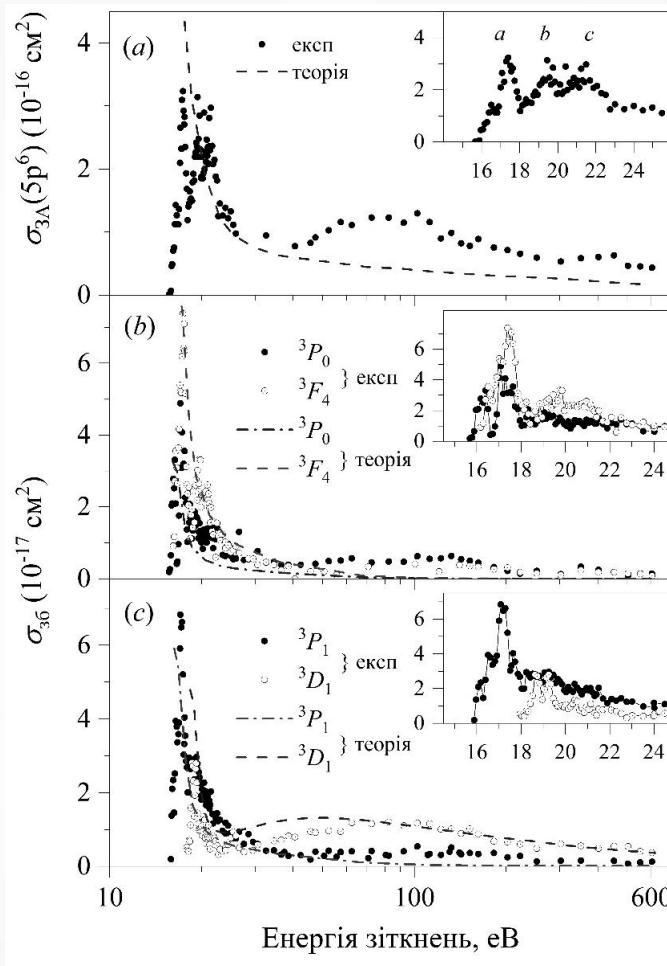
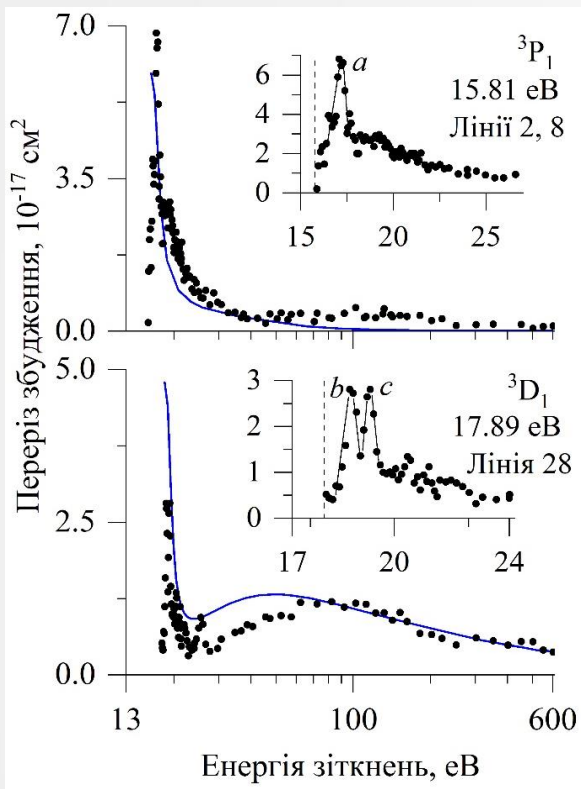
Переріз збудження $3p^6$ оболонки був отриманий як сума перерізів збудження **96** автоіонізаційних станів конфігурацій $3p^5 4s^2$, $3p^5 3d4s$, $3p^5 4s4p$, $3p^5 4s5s$, $3p^5 3d5s$, $3p^5 4d4s$. Аналогічно, переріз збудження $3s^2$ оболонки є сумою **38** розрахованих перерізів збудження автоіонізаційних станів конфігурацій $3s 4s^2$, $3s 4s4p$, $3s 4s4d$, $3s 4s5s$, $3s 4s3d$, $3s 5s5p$, $3s 4s6s$.

Рис.2 Повний переріз σ_{tot} однократної іонізації атома калію: точки - експериментальні дані; — — сумарний теоретичний переріз $\sigma_{tot} = \sigma_{ion}(4s+3p^6+3s^2) + \sigma_{exc}(3p^6+3s^2)$

- [1] J. Tate, P. Smith // *Phys. Rev.* – 1934. – V. 46. – P. 773
- [2] P. Bartlett // *At. Data and Nuc. Data Tab* – 2004 – V.86, – P. 235.
- [3] R. Mcfarland, et al // *Phys. Rev.* – 1965 – V.137. – P.1058.
- [4] B. Roy, D. Rai // *Phys. Rev. A.* – 1973 – V.8. – P.849.

Наше дослідження показало, що збудження $3s^2$ оболонки дає вклад 7% у переріз автоіонізації та $\approx 1,5\%$ у повний переріз іонізації атома К. Разом з тим, показано, що збудження $3p^6$ оболонки є основним процесом автоіонізації атома К і дає вклад 29% у його повний переріз однократної іонізації.

Розрахунки перерізів збудження та перерізу автоіонізації атома Ва електронним ударом



Перерізи $\sigma_{3A}(5p^6)$ (a) і σ_{36} дипольно заборонених (b) і дипольно дозволених (c) АІС з конфігурації $5p^55d6s^2$ атомів барію. На вставках показані припорогові частини експериментальних перерізів

Home > The European Physical Journal D > Article

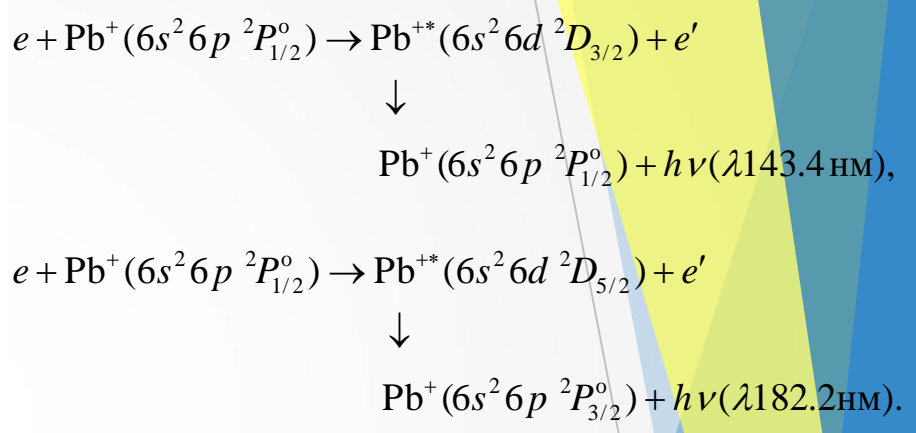
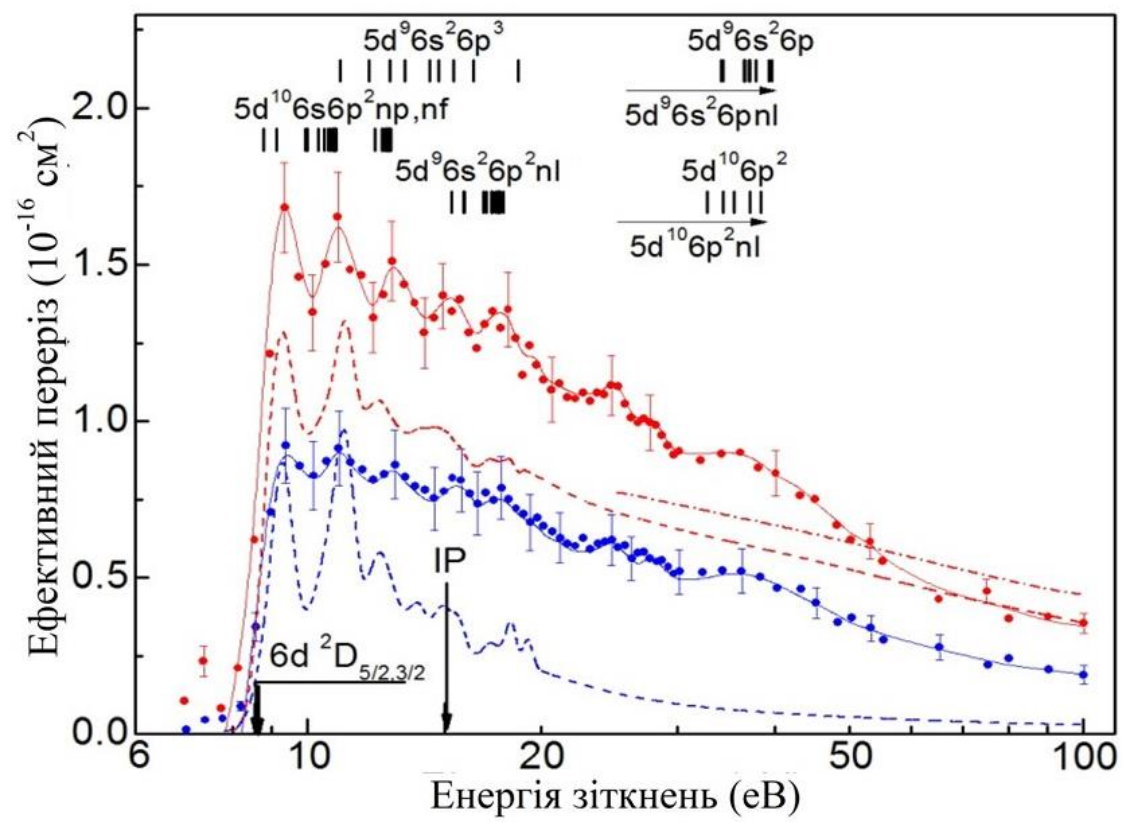
Excitation-autoionization of the $5p^6$ subshell in Ba atoms

Regular Article | Published: 21 February 2019

Volume 73, article number 43, (2019) [Cite this article](#)

Vladimir Borovik, Viktorija Roman, Alicija Kupliauskienė, Ivan Shafranyosh & Oleksandr Borovik

Ефективний переріз збудження електронним ударом спектральних ліній $\lambda 182.2$ та $\lambda 143,4$ нм іона Pb^+



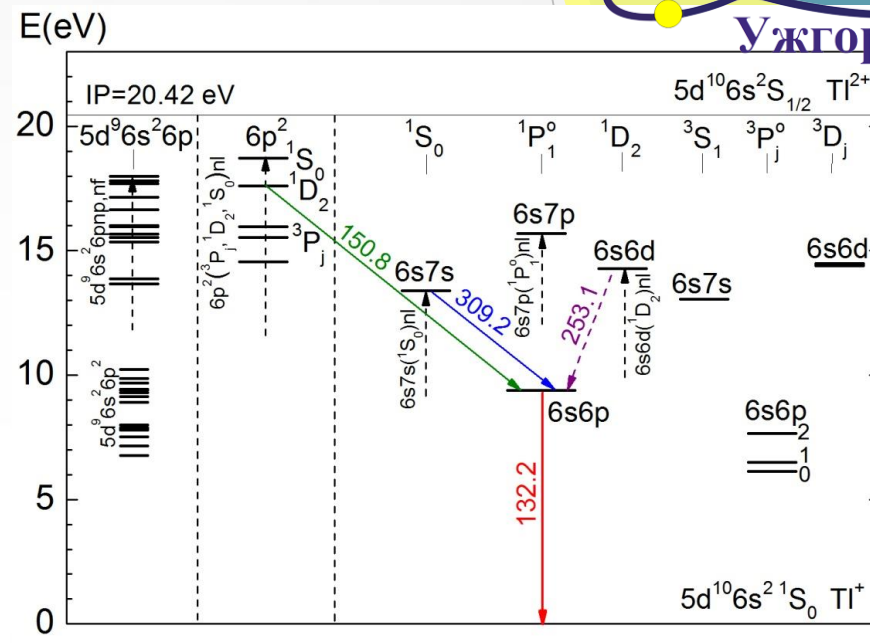
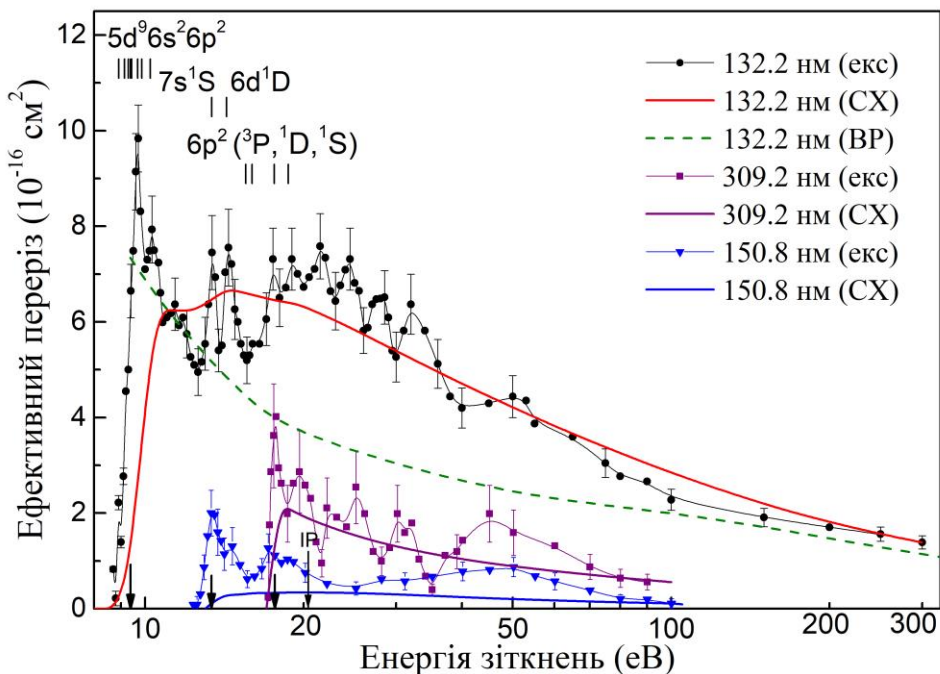
Експериментальні дані були нормовані на теоретичні та проаналізовані з точки зору кореляційних ефектів. Встановлено, що абсолютні значення перерізів для досліджуваних ліній при 100 еВ становлять $(0,35 \pm 0,17) \times 10^{-16} \text{ см}^2$ ($\lambda 143,4$ нм) та $(0,19 \pm 0,09) \times 10^{-16} \text{ см}^2$ ($\lambda 182,2$ нм).

Асолютні перерізи збудження резонансних ліній $\lambda 182.2$ нм – синій колір і $\lambda 143.4$ нм - червоний колір іона Pb^+ .
(Точки – експеримент; штрихові криві – наш розрахунок FAC; точка-штрихові криві – розрахунок [S. Bharti, et al. (2019)])

Excitation of the $6d \ ^2D \rightarrow 6p \ ^2P^o$ Radiative Transitions in the Pb^+ Ion by Electron Impact †

by Viktoriya Roman ¹ Valdas Jonauskas ² Sigitas Kučas ² Anna Gomoni ¹ Aleksandr Gomoni ^{1,*} and Yuriy Hutych ¹

Ефективні перерізи збудження електронним ударом спектральних ліній $\lambda_{132,2}$ нм, $\lambda_{309,2}$ нм і $\lambda_{150,8}$ нм іона Tl^+



Абсолютні ефективні перерізи збудження для ліній $\lambda_{132,2}$ нм, $\lambda_{309,2}$ нм і $\lambda_{150,8}$ нм (екс – експеримент, CX – перерізи збудження розраховані в наближенні спотворених хвиль, BP - розрахунок за формулою Ван Регемортера, IP – потенціал іонізації Tl^+ , вертикальні стрілки – пороги збудження ліній).

Electron impact excitation of the Tl^+ ion: resonance and cascade transitions

Viktoria Roman¹ , Aleksandr I Gomonai¹ , Lalita Sharma² , Aloka Kumar Sahoo² and Anna N Gomonai^{3,1}

Published 25 July 2022 • © 2022 IOP Publishing Ltd

[Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, Volume 55, Number 16](#)

Citation Viktoria Roman et al 2022 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **55** 165203

DOI 10.1088/1361-6455/ac7924

Electron-Impact Excitation of the $\lambda_{190.8}$ nm and $\lambda_{179.9}$ nm Intercombination Lines in the Tl^+ Ion

by Anna Gomonai^{1,*} , Viktoria Roman¹ , Aleksandr Gomonai¹, Aloka Kumar Sahoo² and Lalita Sharma²

¹ Institute of Electron Physics, Ukrainian National Academy of Sciences, 21 Universitetska Str., 88017 Uzhhorod, Ukraine

² Indian Institute of Technology Roorkee, Roorkee 247667, India

* Author to whom correspondence should be addressed.

Atoms **2022**, *10*(4), 136; <https://doi.org/10.3390/atoms10040136>



ВИСНОВКИ

Даний цикл наукових досліджень присвячено отриманню цілого ряду науково-обґрунтованих експериментально-теоретичних результатів, які є важливими для розуміння механізмів елементарних процесів при взаємодії електронів з атомними системами, а також резонансних і автоіонізаційних явищ, що супроводжують ці процеси.

Майже всі результати наукових досліджень, що представлені у даному циклі робіт, одержані **вперше у світовій практиці**. Практичне значення одержаних результатів полягає в широкому застосуванні металів як основної або додаткової компоненти різноманітних плазмових середовищ, у тому числі оптичних стандартів частоти та лазерів ультрафіолетового діапазону. Одержані в роботі дані з абсолютних перерізів електронного збудження та іонізації будуть використані для діагностики енергетичного та зарядового складу різних видів лабораторної плазми, а також для аналізу спектрального розподілу випромінювання плазми в газорозрядних пристроях.

Кількість публікацій за роботою: 6 статей у Scopus/WoS та 20 тез доповідей на міжнародних конференціях (у т.ч. 5 одноосібних).

Список статей за темою подання на премію

- [1] Roman V.I., Pop O.M., Pylypchynets I.V. Theoretical Calculations of Electron Excitation of the Lowest Autoionization States of the Rb Atom. *Scientific Herald of Uzhhorod University. Series "Physics"* – 2020. – V. 48, P.58-66. **(Scopus, Q2)**
- [2] Roman V., Demesh Sh. Electron-impact excitation of the $(4p^55s5p)^4S_{3/2}$ quasimetastable state in Rb. *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – V. 1412. – P. 132012. **(Scopus, Q3)**
- [3] Borovik V., Roman V., Kupliauskiene A., Shafranyosh I., and Borovik O. Excitation-autoionization of the $5p^6$ subshell in Ba atoms. *The European Physical Journal D*. – 2019. – V. 73. – P. 43 (5 pp.) **(Scopus, Q3)**
- [4] Roman V., Jonauskas V., Kučas S., Gomoni A., Gomoni A., Hutych Y. Excitation of the $6d\ ^2D \rightarrow 6p\ ^2P^o$ Radiative Transitions in the Pb^+ Ion by Electron Impact. *Atoms* – 2021, – V. 9, – N. 4. – P. 102-110. **(Scopus, Q2)**
- [5] Roman V., Gomoni A.I., Sharma L., Sahoo A.K., Gomoni A.N. Electron impact excitation of the Tl^+ ion: resonance and cascade transitions *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* - 2022. – V. 55, – N. 16. – P. 165203-165208 **(Scopus, Q2)**.
- [6] Gomoni A.N., Roman V., Gomoni A.I., Sahoo A.K., Sharma L. Electron-impact excitation of the $\lambda_{190.8}$ nm and $\lambda_{179.9}$ nm intercombination lines in the Tl^+ ion. *Atoms* – 2022, – V. 10, N. 4. – P.136 (12pp). **(Scopus, Q2)**.

*Висловлюю вдячність за плідну співпрацю двом
експериментальним групам Інституту електронної фізики
НАН України:*

*Гомонай Г.М., Гомонаю О.І., Гутичу Ю.І. та Боровику О.О.
Та двом теоретичним групам з Інституту теоретичної фізики
та астрономії Вільнюського університету (Литва) та
Індійського технологічного інституту Руркі (Індія)*



Г. Гомонай (Україна)
Керівник установки
«ІОН»



О. Боровик (Україна)
Керівник установки
«Електронний спектрометр»



V. Jonauskas (Lithuania)
Керівник литовської
теоретичної групи



L. Sharma (India)
Керівник індійської
теоретичної групи



Дякую за Увагу!