

В. К. Гарг¹, М. Гупта¹, М. К. Тіварі², А. Шарма^{1,*}¹ Школа інженерії та технологій Читкара, Університет Читкара, Хімачал-Прадеш, Індія² Центр передових технологій імені Раджі Раманні, Індор, Індія*Відповідальний автор: ajay.sharma@chitkarauniversity.edu.in**ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ АНІЗОТРОПІЇ ТА ПОЛЯРИЗАЦІЇ L-РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ З ВИСОКИМ АТОМНИМ НОМЕРОМ Z**

Представлено комплексне теоретичне дослідження кутової анізотропії та лінійної поляризації характеристичного рентгенівського випромінювання L-оболонки атомів з високим Z (тантал, вольфрам, реній, іридій, золото та талій), що виникає внаслідок фотоіонізації неполяризованими фотонами. Розрахунки виконано в межах недипольного наближення з використанням трьох альтернативних моделей атомного потенціалу: (i) точкове кулонівське поле, (ii) екрановане кулонівське поле та (iii) аналітичний підхід на основі теорії збурень. Для дослідження виключно прямої флуоресценції L-оболонки енергію падаючих фотонів обмежено діапазоном від порога поглинання на L-підоболонках до межі K-оболонки; це дало змогу усунути внески від іонізації K-оболонки, переходів Костера–Кроніга та процесів міжоболонкового перенесення вакансій. Розраховано ступінь лінійної поляризації для спектральних ліній L_ℓ , $L_{\alpha 1}$ та $L_{\alpha 2}$ в діапазоні енергій до 60 кеВ з метою визначення залежності цих параметрів від енергії збудження. Результати свідчать, що вирівнювання вакансій досягає максимуму поблизу порога іонізації, де відбуваються суттєві зміни амплітуд іонізації підоболонки та парціальних хвильових компонент фотоелектронів. Зі збільшенням енергії фотонів ступінь вирівнювання поступово зменшується, що призводить до зниження анізотропії та поляризації, а згодом наближається до граничного значення, яке повільно змінюється в області високих енергій. Перехід L_ℓ демонструє вищу анізотропію порівняно з лініями L_α , тоді як значення поляризації для ліній L_ℓ , $L_{\alpha 1}$ та $L_{\alpha 2}$ залишаються специфічними для кожного переходу через відмінності у зв'язку кутових моментів та матричних елементах радіаційних переходів. Для всіх досліджуваних елементів спостерігається закономірна залежність від атомного номера, причому важчі атоми демонструють відносно більші зміни характеру поляризації. Ця тенденція, ймовірно, відображає сукупний вплив релятивістських ефектів, спин-орбітальної взаємодії та ефектів електронної кореляції, характерних для важких атомних систем. Хоча всі три теоретичні підходи передбачають схожі загальні тенденції залежності від енергії, отримано помітні кількісні розбіжності у значеннях поляризації, що демонструє чутливість результатів до обраної моделі потенціалу та методу врахування вирівнювання вакансій. Проведене порівняння з раніше опублікованими результатами досліджень Kämpfer et al., а також Özdemir et al. підтверджує узгодженість виконаних розрахунків і забезпечує глибше теоретичне розуміння сукупного впливу вирівнювання вакансій, змішування мультиполів та релятивістської динаміки на рентгенівське випромінювання L-оболонки.

Ключові слова: рентгенівське випромінювання L-оболонки, поляризація, анізотропія, фотоіонізація, атоми з високим Z.

V. K. Garg¹, M. Gupta¹, M. K. Tiwari², A. Sharma^{1,*}¹ Chitkara School of Engineering and Technology, Chitkara University, Himachal Pradesh, India² Raja Ramanna Centre for Advanced Technology, Indore, India*Corresponding author: ajay.sharma@chitkarauniversity.edu.in**THEORETICAL INSIGHTS INTO L X-RAY EMISSION ANISOTROPY AND POLARIZATION IN HIGH-Z ELEMENTS**

A comprehensive theoretical study of the angular anisotropy and linear polarization of characteristic L-shell X-ray emission from high-Z atoms (tantalum, tungsten, rhenium, iridium, gold, and thallium) produced by photoionization with unpolarized photons is reported. The calculations are performed within the non-dipole approximation employing three alternative descriptions of the atomic potential: (i) point Coulomb field, (ii) screened Coulomb field, and (iii) analytical perturbative treatment. To examine only direct L-shell fluorescence, the incident photon energy is limited to the range extending from the L_3 absorption threshold to the K-shell edge, thereby eliminating contributions from K-shell ionization, Coster–Kronig transitions, and inter-shell vacancy transfer processes. The degree of linear polarization for the L_ℓ , $L_{\alpha 1}$, and $L_{\alpha 2}$ spectral lines is calculated up to 60 keV to determine their variation with excitation energy. The results indicate that vacancy alignment reaches its maximum close to the threshold, where great changes in subshell ionization amplitudes and photoelectron partial-wave components occur. As the photon energy increases, the alignment progressively decreases, leading to reduced anisotropy and polarization, and gradually approaches a slowly varying high-energy limit. The L_ℓ transition consistently shows greater anisotropy than the L_α lines, while the polarization

values of L_ℓ , L_{α_1} , and L_{α_2} remain transition-specific because of differences in angular momentum coupling and radiative transition matrix elements. A systematic dependence on atomic number is observed throughout the investigated elements, with heavier atoms exhibiting comparatively greater changes in the polarization behaviour. While this trend may reflect the combined influence of relativistic effects, spin-orbit coupling, and electron-correlation effects commonly associated with heavier atomic systems. Although all three theoretical approaches predict similar overall energy-dependent trends, noticeable quantitative differences are obtained in the polarization magnitudes, demonstrating the sensitivity of the results to the adopted potential model and alignment treatment. Comparison with previously published results of Kämpfer et al. and Özdemir et al. confirms the consistency of the present calculations and L_α offers a deeper theoretical understanding of the combined influence of vacancy alignment, multipole mixing, and relativistic dynamics in L -shell X-ray emission.

Keywords: L -shell X-ray emission, polarization, anisotropy, photoionization, high- Z atoms.

REFERENCES

1. A. Sharma, R. Mittal. Experimental and theoretical anisotropy studies for tungsten. [Nucl. Instrum. Methods A 619 \(2010\) 55](#).
2. Y. Özdemir et al. L -shell polarization and alignment of heavy elements induced by 59.54 keV photons. [Appl. Radiat. Isot. 69 \(2011\) 991](#).
3. W. Jitschin, U. Werner. X-ray and Auger-electron yields for quantitative element analysis. [J. Vac. Sci. Technol. A 5 \(1987\) 1203](#).
4. Z.-W. Wu, J. Jiang, C.-Z. Dong. Influence of Breit interaction on the polarization of radiation following inner-shell electron-impact excitation of highly charged beryllium-like ions. [Phys. Rev. A 84 \(2011\) 032713](#).
5. I. Han, L. Demir. Angular dependence of L_3 -subshell X-ray emission following photoionisation. [J. X-Ray Sci. Technol. 19 \(2011\) 13](#).
6. T. Kämpfer et al. Linear polarization of the characteristic x-ray lines following inner-shell photoionization of tungsten. [Phys. Rev. A 93 \(2016\) 033409](#).
7. G. Singh et al. Alignment of L_3 subshell vacancy states created without Coster–Kronig decay through selective photoionization in ^{82}Pb , ^{90}Th and ^{92}U and effect of external magnetic field. [Eur. Phys. J. D 71 \(2017\) 248](#).
8. A. Sharma. Inner shell alignment of atoms in photon impact ionization. [J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 225 \(2018\) 1](#).
9. D.H. Zhang, C.Z. Dong, Z.W. Wu. Angular distribution and polarization of characteristic x-ray lines following inner-shell photoionization of tungsten by linearly polarized light. [J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 244 \(2020\) 106844](#).
10. V.K. Garg, R. Mittal, A. Sharma. Theoretical angular dependence of L_3 sub-shell X-rays following photoionization. [J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 248 \(2021\) 147054](#).
11. V.K. Garg, R. Mittal, A. Sharma. Non-relativistic dipole approximation based angular dependence of L_3 sub-shell X-rays following photoionization. [AIP Conf. Proc. 2357 \(2022\) 070009](#).
12. Z.W. Wu, W. Liu, S. Fritzsche. Angular and polarization properties of characteristic x-ray radiation following inner-shell $2p_{3/2}$ photoionization of high- Z atoms. [Phys. Rev. A 108 \(2023\) 053115](#).
13. T. Luo et al. Linear polarization of x rays emitted in radiative recombination into the K and L shells of Kr, Xe, Bi, and U ions. [Phys. Rev. A 109 \(2024\) 012822](#).
14. V.K. Garg et al. Linear polarization of L_3 sub-shell X-ray lines for some high- Z elements. [Indian J. Phys. 98 \(2024\) 3445](#).
15. S. Käbisch et al. Polarity driven morphology of zinc oxide nanostructure. [Appl. Phys. Lett. 103 \(2013\) 103106](#).
16. M. Al-Qadi et al. L -shell X-ray fluorescence relative intensities for elements with $64 \leq Z \leq 83$ at 21 keV and 25 keV by synchrotron radiation. [J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 338 \(2025\) 109398](#).
17. L. Ábrók et al. Non-dipole anisotropy parameters in the photoionization of Kr in the region of deep inner shell excitations. [J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 258 \(2022\) 147209](#).
18. K. Verma et al. Experimental determination of L -subshells x-ray yields and production cross sections of thick lead ($Z=82$) element by impact of 15–30 keV electrons. [J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 280 \(2025\) 147541](#).
19. K.S. Kahlon et al. Linear polarization of L_{α_1} and L_{α_2} x-ray lines of gold. [Phys. Rev. A 48 \(1993\) 1701](#).

Надійшла / Received 05.05.2026