



Streszczenie

Procesy rekombinacyjne odgrywają kluczową rolę w zderzeniach elektronów z jonami. Przebadanie i zrozumienie tych procesów umożliwia opracowanie teorii, która jest niezbędna m.in. dla diagnostyki plazmy. Znaczenie tych procesów jest podkreślane zarówno przy opisie obiektów astrofizycznych [1, 2], jak również w przypadku fuzji jądrowej [3, 4]. Bardzo często oddziaływanie elektronów i jonów dotyczy procesów z udziałem kilku elektronów. W tych przypadkach, kluczowym aspektem jest wpływ oddziaływania elektron-elektron. Niniejsza rozprawa doktorska skoncentrowana jest na eksperymentalnym i, do pewnego stopnia, teoretycznym opisie rzadkich procesów atomowych, w szczególności rekombinacji z udziałem kilku elektronów.

W 2012 roku w Laboratorium Ciężkich Jonów w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego została zainstalowana pułapka jonów z wiązką elektronową (ang. Electron Beam Ion Trap, UJ-EBIT). Jest to kompaktowa pułapka ciężkich jonów zbudowana z użyciem magnesów pracujących w temperaturach pokojowych (Dresden EBIT [5, 6], DREEBIT Co.). Została ona wyposażona w detektor promieniowania rentgenowskiego, co poszerza możliwości badania zarówno produkcji jonów, jak i zachodzących w nich procesów radiacyjnych.

Celem niniejszej pracy doktorskiej było zebranie, z wykorzystaniem UJ-EBIT, danych eksperymentalnych oraz ich analiza. Wyniki analizy porównano z obliczeniami teoretycznymi wykonanymi przy pomocy programu Flexible Atomic Code (FAC [7]). Pierwszym badanym procesem była radiacyjna rekombinacja (RR). Jest to proces wychwytu swobodnego elektronu do stanu związanego jonu [8, 9, 10], któremu towarzyszy emisja fotonu. Warto zaznaczyć, iż fakt zaobserwowania, w prezentowanych eksperymentach, procesu RR charakteryzującego całkowicie zjonizowany argon (Ar^{18+}), zdiagnozował możliwość produkcji i badania przy użyciu UJ-EBIT wysoko zjonizowanych jonów (HCI). Następnie omówione zostały procesy rekombinacyjne, w których udział bierze więcej niż jeden elektron. Najprostszym procesem rezonansowym tego typu jest dwuelektronowa rekombinacja (DR). W przypadku DR swobodny elektron zostaje wychwycony do stanu związanego jonu przy równoczesnej ekscytacji jednego z uprzednio związanych elektronów [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]. W ten sposób, w procesie rezonansowym produkowane są stany wzbudzone jonów, które relaksują poprzez emisję promieniowania charakterystycznego. Złożone widma DR, zebrane dla argonu, pozwoliły na rozróżnienie fragmentów pochodzących od jonów w różnych stanach ładunkowych, od He-podobnych do C-podobnych [8, 18, 19]. Analiza ta była możliwa dzięki optymalnej zdolności rozdzielczej używanego detektora X. Ponadto, podczas badania procesu DR zaobserwowano proces wewnątrz powłokowej rekombinacji trójelektronowej (intrashell TR [8]).

Ostatnia część niniejszej rozprawy poświęcona jest badaniom wielopowłokowego procesu TR (multishell TR [18]). W szczególności, rozważano proces KK TR. W tym przypadku dwa elektrony powłoki K są transferowane do wyższej powłoki w wyniku rezonansowego wychwytu swobodnego elektronu. Produkowany jest w ten sposób podwójnie wzbudzony jon, który w większości przypadków stabilizuje się poprzez sukcesyjną emisję dwóch fotonów. Pierwszy foton powstaje w wyniku transferu elektronu do pustej powłoki K. Takie promieniowanie nazywane jest promieniowaniem hipersatelitarnym (K^h) i charakteryzuje się wyższą energią niż następujące po nim promieniowanie satelitarne (K^s). W przedstawionej pracy omówiony został rezonansowy charakter zaobserwowanego wzmocnienia intensywności promieniowania K_α^h w stosunku do K_α^s . Według mojej wiedzy niniejsze badania stanowią pierwszą udaną próbę obserwacji tego procesu w badaniach ciężkich jonów [20].

Przedstawione wyniki badań zostały uzupełnione o metodę określenia rozkładu stanów ładunkowych jonów w UJ-EBIT w oparciu o analizę profilu linii promieniowania rentgenowskiego emitowanego w badanych procesach [21].

Autor: Weronika Biela-Nowaczyk

Opiekun naukowy: prof. dr hab. Andrzej Warczak

Literatura

- [1] C. Shah, H. Jörg, S. Bernitt, S. Dobrodey, R. Steinbrügge, C. Beilmann, P. Amaro, Z. Hu, S. Weber, s. Fritzsche, A. Surzhykov, J. Crespo López-Urrutia, and S. Tashev, “Erratum: Polarization measurement of dielectronic recombination transitions in highly charged krypton ions,” *Physical Review A*, vol. 94, 08 2016.
- [2] A. Burgess, “Dielectronic Recombination and the Temperature of the Solar Corona.” *The Astrophysical Journal*, vol. 139, pp. 776–780, Feb. 1964.
- [3] M. Bitter, H. Hsuan, C. Bush, S. Cohen, C. J. Cummings, B. Grek, K. W. Hill, J. Schivell, M. Zarnstorff, P. Beiersdorfer, A. Osterheld, A. Smith, and B. Fraenkel, “Spectra of heliumlike krypton from tokamak fusion test reactor plasmas,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 71, pp. 1007–1010, Aug 1993. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.71.1007>
- [4] K. Widmann, P. Beiersdorfer, V. Decaux, S. R. Elliott, D. Knapp, A. Osterheld, M. Bitter, and A. Smith, “Studies of he-like krypton for use in determining electron and ion temperatures in very-high-temperature plasmas,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 66, no. 1, pp. 761–763, 1995. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.114628>
- [5] G. Vorobjev, A. Sokolov, A. Thorn, F. Herfurth, O. Kester, W. Quint, T. Stöhlker, and G. Zschornack, “Demonstration of charge breeding in a compact room temperature electron beam ion trap,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 83, no. 5, p. 053302, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.471966>

-
- [6] M. Schmidt, A. Thorn, and G. Zschornack, “Electron beam ion sources,” 2014. [Online]. Available: <http://cds.cern.ch/record/1965922>
- [7] M. F. Gu, “The flexible atomic code,” *Canadian Journal of Physics*, vol. 86, no. 5, pp. 675–689, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1139/p07-197>
- [8] C. Beilmann, P. H. Mokler, S. Bernitt, Z. Harman, C. H. Keitel, O. Postavaru, J. Ullrich, and J. R. C. López-Urrutia, “Higher-order resonant inter-shell electronic recombination for heavy highly charged ions,” *Physica Scripta*, vol. T144, p. 014014, jun 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/0031-8949/2011/t144/014014>
- [9] Y. Zou, J. R. Crespo López-Urrutia, and J. Ullrich, “Observation of dielectronic recombination through two-electron–one-photon correlative stabilization in an electron-beam ion trap,” *Phys. Rev. A*, vol. 67, p. 042703, Apr 2003. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.67.042703>
- [10] K. Yao, Z. Geng, J. Xiao, Y. Yang, C. Chen, Y. Fu, D. Lu, R. Hutton, and Y. Zou, “KLL dielectronic recombination resonant strengths of he-like up to o-like xenon ions,” *Phys. Rev. A*, vol. 81, p. 022714, Feb 2010. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.81.022714>
- [11] C. Brandau, C. Kozhuharov, A. Müller, D. Bernhardt, D. Banas, F. Bosch, F. J. Currell, C. Dimopoulou, A. Gumberidze, S. Hagmann, P.-M. Hillenbrand, M. Heil, M. Lestinsky, Y. A. Litvinov, R. Märtin, F. Nolden, R. Reuschl, S. Sanjari, S. Schippers, D. Schneider, D. Shubina, H. Simon, U. Spillmann, Z. Stachura, M. Steck, T. Stöhlker, G. Weber, M. Wiedeking, N. Winckler, and D. F. A. Winters, “Probing nuclear properties by resonant atomic collisions between electrons and ions,” *Physica Scripta*, vol. T156, p. 014050, sep 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/0031-8949/2013/t156/014050>
- [12] J. C. Berengut, V. A. Dzuba, V. V. Flambaum, and S. G. Porsev, “Proposed experimental method to determine α sensitivity of splitting between ground and 7.6 eV isomeric states in ^{229}Th ,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 102, p. 210801, May 2009. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.102.210801>
- [13] S. Schippers, E. W. Schmidt, D. Bernhardt, D. Yu, A. Müller, M. Lestinsky, D. A. Orlov, M. Grieser, R. Repnow, and A. Wolf, “Storage-ring measurement of the hyperfine induced $^{47}\text{Ti}^{18+}(2s2p^3p_0 \rightarrow 2s^2s_0)$ transition rate,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 98, p. 033001, Jan 2007. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.98.033001>
- [14] F. Nolden, P. Hülsmann, Y. Litvinov, P. Moritz, C. Peschke, P. Petri, M. Sanjari, M. Steck, H. Weick, J. Wu, Y. Zang, S. Zhang, and T. Zhao, “A fast and sensitive resonant schottky pick-up for heavy ion storage rings,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 659, no. 1, pp. 69–77, 2011. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890021101182X>
- [15] S. Schippers, “Electron–ion merged-beam experiments at heavy-ion storage rings,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 350, pp. 61–65, 2015.
- [16] M. Schnell, G. Gwinner, N. Badnell, M. Bannister, S. Böhm, J. Colgan, S. Kieslich, S. Loch, D. Mitnik, A. Müller et al., “Observation of trielectronic recombination in Be-like Cl ions,” *Physical review letters*, vol. 91, no. 4, p. 043001, 2003.
-

-
- [17] A. Müller, “Electron–ion collisions: fundamental processes in the focus of applied research,” *Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics*, vol. 55, pp. 293–417, 2008.
- [18] W. Biela, A. Warczak, A. Mucha, and A. Malarz, “Enhanced ar-k x-ray emission observed in ebit at electron energies around 6,500 ev,” *X-Ray Spectrometry*, vol. 48, no. 6, pp. 696–699, 2019. [Online]. Available: <https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/xrs.3110>
- [19] P. Beiersdorfer, T. W. Phillips, K. L. Wong, R. E. Marrs, and D. A. Vogel, “Measurement of level-specific dielectronic-recombination cross sections of heliumlike fe xxv,” *Phys. Rev. A*, vol. 46, pp. 3812–3820, Oct 1992. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.46.3812>
- [20] K. E. Zaharakis, R. R. Haar, O. Voitke, M. Zhu, J. A. Tanis, and N. R. Badnell, “Recombination in $\text{kr}^{34+} + \text{h}_2$ collisions,” *Phys. Rev. A*, vol. 52, pp. 2910–2914, Oct 1995. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.52.2910>
- [21] W. Biela-Nowaczyk, A. Warczak, A. Mucha, and A. Malarz, “Charge state evolution in electron beam ion trap,” *Acta Physica Polonica. B, Proceedings Supplement*, vol. 13, no. 4, pp. 975–983, 2020.
-