Spektroskopische Untersuchungen hochgeladener Krypton-Ionen im Röntgen-Bereich

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

doctor rerum naturalium
(Dr. rer. nat.)

im Fach Physik

eingereicht an der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät I
der Humboldt-Universität zu Berlin

von

Dipl. Phys. Tino Fuchs
geboren am 17. Juli 1970 in Suhl

Präsident der Humboldt-Universität zu Berlin
Prof. Dr. Dr. hc. H. Meyer

Dekan der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät I
Prof. Dr. J. P. Rabe

Gutachter:
1. Prof. Dr. Gerd Fußmann
2. Prof. Dr. Thomas Hebbeker
3. Prof. Dr. Karl-Heinz Schartner

Eingereicht am: 24. Februar 2000.
Tag der mündlichen Prüfung: 23. Juni 2000.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung **1**

1 Hochgeladene Ionen **5**
1.1 Atomare Struktur und Spektren 6
1.2 Elektron-Ion-Stoßprozesse 10
1.3 Erzeugung 12

2 Die Berliner EBIT **15**
2.1 Elektronenstrahloptik 18
2.1.1 Erzeugung freier Elektronen 18
2.1.2 Strahlführung und -kompression im Magnetfeld 22
2.1.3 System der Driftröhren 28
2.1.4 Elektronen-Kollektor 30
2.1.5 Elektronendichte 31
2.1.6 Raumladungseffekt 33
2.1.7 Energie der Elektronen 39
2.2 Injektion von Ionen 41
2.2.1 Gasinjektor-System 41
2.2.2 MeVVA-Ionenquelle 47
2.3 Das EBIT-Vakuum-System 49
2.4 Die elektrische Steuerung von EBIT 49

3 Untersuchungen zur dielektronischen Rekombination **53**
3.1 Einführung 53
3.2 Theoretische Beschreibung der DR 57
3.2.1 DR-Ratenkoeffizient im Plasma 57
3.2.2 Quantenmechanische Behandlung 61
3.3 Messung der DR mit einer EBIT 76
3.3.1 Experimentelles Vorgehen 76
3.3.2 Datenaufnahmesystem 80
3.3.3 Röntgendetektor 83
3.4 DR-Experimente mit hochgeladenen Kr-Ionen 85

3.4.1 Vorbetrachtungen 85
3.4.2 Übersichtsmessung der KLn-Resonanzen 87
3.4.3 Untersuchung der KLL-Resonanz 93
3.4.4 Resultate zu KLM bis KLO 103
3.4.5 DR-Resonanzen als EBIT-Diagnostik 114
3.5 Resümee der Untersuchungen 123

4 Messung der Strahlungsrate von Krypton 127
4.1 Einführung 127
4.1.1 Plasmaphysikalischer Hintergrund 128
4.1.2 Experimentelle Strategie 131
4.2 Präparieren der geeigneten Ionisationsbilanz 133
4.3 Spektroskopische Messung und Ergebnisse 138
4.4 Strahlungskühlungsraten 142
4.4.1 Direkt angeregte Übergänge 143
4.4.2 Strahlende Rekombination 147
4.4.3 Dielektronische Rekombination 149
4.4.4 Bremsstrahlung 151
4.5 Ergebnisse und Diskussion 152

Zusammenfassung 159

A Liste der verwendeten Symbole 163

B Brillouin-Radius eines Elektronenstrahls 169

C Vakuum des Gasinjektors 175
C.1 Allgemeine Grundlagen 175
C.2 Eigenschaften eines Zwei-Kammer-Systems 176

D Poisson-Maximum-Likelyhood-Methode 179

Literaturverzeichnis

[1] Christopher J. Fontes, Douglas H. Sampson, and Hong Lin Zhang, Phys. Rev. A **47**(2), 1009–1022 (1993).

[2] B. Edlén and A. Ericson, Nature **125**, 233 (1930).

[3] I. Lindgren, Physica Scripta **59**, 179 (1995).

[4] Yukap Hahn, Theory of Dielectronic Recombination, in *Advances in Atomic and Molecular Physics*, edited by Sir David Bates and Benjamin Bederson, volume 21, Academic Press, Inc., 1985.

[5] W.R. Johnson and G. Soff, At. Data Nucl. Data Tables **33**, 405 (1985).

[6] V. Decaux, P. Beiersdorfer, S.M. Kahn, and V.L. Jacobs, ApJ **482**, 1076 (1997).

[7] D.R. Plante, W.R. Johnson, J. Sapirstein, Phys. Rev. A **49**, 3519 (1994).

[8] B. Edlén and F. Tyrén, Nature **143**, 940 (1939).

[9] H.S. Massey and D.R. Bates, Rep. Prog. Phys. **9**, 62–74 (1942).

[10] R. Geller, *Electron Cyclotron Resonance Ion Sources*, IOP, 1996.

[11] H.F. Beyer, H.-J. Kluge, and V.P. Shevelko, *X-Ray Radiation of Highly Charged Ions*, Atoms and Plasmas, Springer, Heidelberg, 1997.

[12] L. Liljeby, editor, *Proceedings of the 6th International Symposium on Electron Beam Ion Sources and their Applications*, volume T71 of *Physica Scripta*, European Physical Society, 1997, Stockholm, Sweden, June 20-23, 1994.

[13] M.A. Levine, R.E. Marrs, J.R. Henderson, D.A. Knapp, and M.B. Schneider, Pysica Scripta **T22**, 157–163 (1988).

[14] E.D. Donets, V.I. Ilushchenko, and V.A. Alpert, in *Premiére Conf. sur les Sources d'Ions*, page 625, INSTM, 1969, Saclay, France.

[15] E.D. Donets, Nucl. Instrum. Meth. **B9**, 522 (1985).

[16] M.A. Levine, R.E. Marrs, and R.W. Schmieder, Nucl. Instrum. Meth. **A237**, 429 (1985).

[17] C. Litvin, M. Vella, and A. Sessler, Nucl. Instrum. Meth. **198**, 189 (1982).

[18] M.A. Levine, R.E. Marrs, C.L. Bennett, J.R. Henderson, D.A. Knapp, and M.B. Schneider, EBIT: Electron Beam Ion Trap, in *International Symposium on Electron Beam Ion Sources and Their Applications*, edited by A. Hershcovitch, volume 188 of *AIP Conference Proceedings*, page 82, AIP, 1989, New York.

[19] M.P. Stöckli, J. Arianer, C.L. Cocke, and P. Richard, Nucl. Instrum. Meth. **B40/41**, 1020 (1989).

[20] M.B. Schneider, M.A. Levine, C.L. Bennett, J.R. Henderson, D.A. Knapp, and R.E. Marrs, Evaporative cooling of highly charged ions in EBIT, in *International Symposium on Electron Beam Ion Sources and Their Applications*, edited by A. Hershcovitch, volume 188 of *AIP Conference Proceedings*, page 158, AIP, 1989, New York.

[21] D.A. Knapp, R.E. Marrs, S.R. Elliott, E.W. Magee, and R. Zasadzinski, Nucl. Instrum. Meth. **A334**, 305–312 (1993).

[22] J.R. Pierce, *Theory and Design of Electron Beams*, D. van Nostrand Company Inc., Princeton, New Jersey, 2nd edition, 1954.

[23] Ch. Weißmantel und C. Hamann, *Grundlagen der Festkörperphysik*, Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 3rd edition, 1989.

[24] O.W. Richardson and F.C. Brown, Phil. Mag. **16**, 353–376 (1908).

[25] S.Dushman, Phys. Rev. **21**, 623–636 (1923).

[26] C.D. Child, Phys. Rev. **32**, 492–511 (1911).

[27] I. Langmuir, Phys. Rev. **2**, 402–403 (1913).

[28] H. Watanabe, J. Asada, F.J. Currell, T. Fukami, T. Hirayama, K. Motohashi, N. Nakamura, E. Nojikawa, S. Ohtani, K.Okazaki, M. Sakurai, H. Shimizu, N. Tada, and S. Tsurubuchi, Phys. Cos. Jpn. **66**, 3795 (1997).

[29] G. Fußmann, C. Biedermann, and R. Radtke, EBIT: An Electron source for the production and confinement of highly ionized atoms, in *Advanced Technologies Based on Wave and Beam Generated Plasmas*, edited by H. Schlüter and A. Shivarova, volume 67 of *NATO Science Partnership sub-series 3: High Technology*, pages 429–468, NATO, Kluwer Academic Publishers, 1999, New York.

[30] Robert C. Weast, editor, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press, Inc., 66 edition, 1985.

[31] L. Brillouin, Phys. Rev. **67**, 260 (1945).

[32] K.T. Harker, J. of Appl. Phys. **28**, 645 (1957).

[33] A. Ashkin, J. of Appl. Phys. **29**, 1594 (1958).

[34] G. Herrmann, J. of Appl. Phys. **29**, 127 (1958).

[35] M.A. Levine, R.E. Marrs, J.N. Bradsley, P. Beiersdorfer, C.L. Bennett, M.H. Chen, T. Cowan, D. Dietrich, J.R. Henderson, D.A. Knapp, A. Osterheld, B.M. Penetrante, M.B. Schneider, and J.H. Scofield, Nucl. Instrum. Meth. **B43**, 431 (1989).

[36] P. Beiersdorfer, A.L. Osterheld, V. Deacaux, and K. Widmann, Phys. Rev. Lett. **77**, 5353 (1996).

[37] M. Wutz, H. Adam, und W. Walcher, *Theorie und Praxis der Vakuumtechnik*, Friedr. Vieweg & Sohn, 1988.

[38] G.I. Dimov, Pribory I Tekhnika Eksperimenta **5**, 168 –171 (1968), Nuclear Physics Institute, Academy of Sciences of the USSR.

[39] I.G. Brown, J.E. Galvin, B.F. Gavin, and R.A. MacGill, Rev. Sci. Instrum. **57**, 1069–1084 (1986).

[40] I.G. Brown, J.E. Galvin, R.A. MacGill, and R.T. Wright, Appl. Phys. Lett. **49**, 1019–1021 (1988).

[41] I.G. Brown,B. Feinberg, and J.E. Galvin, J. Appl. Phys. **63**, 4889–4898 (1988).

[42] P. Beiersdorfer, private communication.

[43] A. Burgess, Astrophys. J. **139**, 776–780 (1964).

[44] A.H. Gabriel and C. Jordan, Nature **221**, 947 (1969).

[45] J. Dubau and S. Volonté, Rep. Prog. Phys. **43**, 199–249 (1980).

[46] M. Bitter, S. von Goeler, M. Goldman, K.W. Hill, R. Horton, W. Roney, N. Sauthoff, and W. Stodiek, in *Temperature, its Measurement and Control in Science and Industry*, edited by S.F. Schooley, volume 5, page 693, American Institute of Physics, 1992.

[47] R. Bartiromo, F. Bombarda, and R. Giannella, Phys. Rev. A **32**, 531–537 (1984).

[48] Y. Hahn, in *Atomic and Molecular Processes in Fusion Edge Plasmas*, edited by R.K. Janev, page 91, Plenum Publishing Corporation, 1995.

[49] C.J. Cummings, S.A. Cohen, R. Hulse, D.E. Post, and M. Redi, J. Nucl. Mater. **176&177**, 916 (1990).

[50] K.W. Hill, S.D. Scott, M. Bell, R. Budny, C.E. Bush, R.E.H. Clark, B. Denne-Hinnov, D.R. Ernst, G.W. Hammett, D.R. Mikkelsen, D. Mueller, J. Ongena, H.K. Park, A.T. Ramsey, E.J. Synakowski, G. Taylor, M.C. Zarnstorff, and the TFTR Group, Phys. Plasmas **6**, 877–884 (1999).

[51] 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, Phys. Rev. Lett. **71**, 1007 (1993).

[52] D.E. Post, R.V. Jensen, C.B. Tarter, W.H. Grasberger, and W.A. Locke, At. Data Nucl. Data Tables **20**, 397–439 (1977).

[53] V.L. Jacobs, Phys. Rev. A **31**, 383 (1985).

[54] N.R. Badnell and M.S. Pidzola, Phys. Rev. A **45**, 2820–2824 (1992).

[55] D.A. Knapp, P. Beiersdorfer, M.H. Chen, J.H. Scofield, and D. Schneider, Phys. Rev. Letters **74**, 54–57 (1995).

[56] S.L. Haan and V.L. Jacobs, Phys. Rev. A **40**, 80–94 (1989).

[57] Ehud Behar, *Dielectronic Recombination Processes in Highly Ionized Heavy Elements*, PhD thesis, The Hebrew University of Jerusalem, 1999.

[58] I.I. Sobel'man, *Introduction to the Theory of Atomic Spectra*, chapter 4, Pergamon Press, 1972.

[59] A. Bar-Shalom, M. Klapisch, and W.H. Goldstein, The HULLAC Code for Atomic Physics (unpublished).

[60] I.P. Grant, B.J. McKenzie, P.h. Norrington, D.F. Mayers, and N.C. Pyper, Comput. Phys. Commun. **21**, 207 (1980).

[61] K.G. Dyall, I.P. Grant, C.T. Johnson, F.A. Parpia, and E.P. Plummer, Comput. Phys. Commun. **55**, 425–455 (1989).

[62] H.A. Kramers, Philos. Mag. **46**, 836 (1923).

[63] Y.S. Kim and R.H. Pratt, Phys. Rev. A **27**, 2913 (1983).

[64] M. Zimmermann, N. Grün, and W. Scheid, J. Phys. B **30**, 5259 (1997).

[65] L.A. Vainshtein and U.I. Safronova, Phys. Scr. **31**, 519 (1985).

[66] W.R. Johnson, S.A. Blundell, and J. Sapirstein, Phys. Rev. A **37**, 307 (1988).

[67] G. Kilgus, D. Habs, D. Schwalm, A. Wolf, N.R. Badnell, and A. Müller, Phys. Rev. A **46**, 5730 (1992).

[68] W. Spies, O. Uwira, A. Müller, J. Linkemann, L. Empacher, A. Frank, C. Kozhuharov, P.H. Mokler, F. Bosch, O. Klepper, B. Franzke, and M. Steck, Nucl. Instrum. Methods B **98**, 158 (1992).

[69] D.R. DeWitt, R. Schuch, H. Gao, W. Zong, S. Asp, C. Biedermann, M.H. Chen, and N.R. Badnell, Phys. Rev. A **53**, 2327 (1996).

[70] R. Ali, C.P. Bhalla, C.L. Cocke, and M. Stöcli, Phys. Rev. Lett. **64**, 633 (1990).

[71] D.R. DeWitt, *Dielectronic Recombination of Highly Charged Ions Using an Electron Beam Ion Trap*, PhD thesis, University of California, Davis, 1992.

[72] B.M. Penetrante, J.N. Bradsley, D.R. DeWitt, M. Clark, and D. Schneider, Phys. Rev. A **43**, 4861 (1991).

[73] D.A. Knapp, R.E. Marrs, M.A. Levine, C.L. Bennett, M.H. Chen, J.R. Henderson, M.B. Schneider, and J.H. Scofield, Phys. Rev. Lett. **62**, 2104–2107 (1989).

[74] P. Liebisch, Untersuchungen zum Einschluß und zur Entwicklung der Ladungsverteilung in einer Elektronenstrahl-Ionenfalle, Master's thesis, Humboldt-Universität zu Berlin, 1998.

[75] B.L. Henke, E.M. Gullikson, and J.C. Davis, At. Data Nucl. Data Tables **54**, 181–342 (1993).

[76] P. Beiersdorfer, T.W. Phillips, K.L. Wong, R.E. Marrs, and D.A. Vogel, Phys. Rev. A **46**, 3812–3820 (1992).

[77] E.B. Salomon, J.H. Hubbell, and J.H. Scofield, At. Data Nucl. Data Tables **38**, 1 (1988).

[78] S. Baker and R.D. Cousins, Nucl. Instrum. Methods **221**, 437 (1984).

[79] W.T. Eadie, D.Dryard, F.E. James, M. Roos, and B. Sadoulet, *Statistical Methods in Experimental Physics*, North-Holland Publishing Company, 1971.

[80] T. Fuchs, C. Biedermann, R. Radtke, E. Behar, and R. Doron, Phys. Rev. A **58**, 4518–4525 (1998).

[81] I.C. Percival and M.J. Seaton, Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A **251**, 113 (1958).

[82] R.M. Steffen and K. Alder, Angular Distribution and Correlation of Gamma Rays, in *The Electromagnetic Interaction in Nuclear Spectroscopy*, edited by W.D. Hamilton, pages 505–582, North-Holland Publishing Company, 1975.

[83] M.K. Inal and J. Dubau, J. Phys. B **22**, 3329–3341 (1989).

[84] A.S. Shlyaptseva, R.C. Mancini, P. Neill, P. Beiersdorfer, J.R. Crespo-Lopez-Urrutia, and K. Widmann, Phys. Rev. A **57**, 888 (1998).

[85] J.H. Scofield, Phys. Rev. A **40**, 3054 (1989).

[86] M. Pajek and R. Schuch, Phys. Rev. A **45**, 7894 (1992).

[87] W.H. Press, B.P. Flannery, S.A. Teukolsky, and W.T. Vetterling, *Numerical Recipes in C*, chapter 10, Cambridge University Press, 1988.

[88] R.E. Marrs, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B **149**, 182–194 (1999).

[89] P. Beiersdorfer, High-Resolution X-Ray Spectra from Low-Temperature, Highly Charged Ions, in *AIP Conf. Proc. No. 389*, pages 121–135, 1997.

[90] K.B. Fournier, M.J. May, D. Pacella, B.C. Gregrory, J.E. Rice, J.L. Terry, M. Finkenthal, and W.H. Goldstein, in *AIP Conf. Proc. No. 443*, edited by E. Oks and M. Pindzola, page 73, Woodbury, NY, 1998, AIP.

[91] M.J. May, M. Finkenthal, V. Soukhanovskii, D. Stutman, H.W. Moos, D. Pacella, G. Mazzitelli, K.B. Fournier, W.H. Goldstein, and B.C. Gregory, Rev. Sci. Instrum. **70**, 375 (1999).

[92] C. Breton, C. De Michelis, and M. Mattioli, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. **19**, 367 (1978).

[93] W. Lotz, Z. Phys. **216**, 241 (1968).

[94] Y. Hahn, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. **49**, 81 (1993).

[95] Y. Hahn, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. **51**, 663 (1994).

[96] E. Behar and R. Doron, private communication.

[97] M.K. Inal and J. Dubau, J. Phys. B **20**, 4221 (1987).

[98] H.L. Zhang, D.H. Sampson, and R.E.H. Clark, Phys. Rev. A **41**, 189 (1990).

[99] I.I. Sobel'man, L.A. Vainshtein, and E.A. Yukov, *Excitation of Atoms and Broadening of Spectral Lines*, chapter 6, Springer-Verlag, 1971.

[100] H.K. Tseng, R.H. Pratt, and C.M. Lee, Phys. Rev. A **19**, 187 (1979).

[101] A. Müller and E. Salzborn, Phys. Lett. **62A**, 6 (1977).

Lebenslauf

Personalien

Tino Fuchs
geboren am 17.07.1970 in Suhl
ledig, keine Kinder

Schulbildung

07.1977 - 06.1987	Grundschulbesuch in Schmiedefeld.
09.1987 - 06.1989	Abitur in Schleusingen.

Wehr-/Zivildienst

09.1989 - 04.1990	Soldat im Artillerie-Regiment Erfurt.
05.1990 - 08.1990	Zivildienst beim Rat der Stadt Ilmenau.

Studium

09.1990 - 10.1996	Studium der Physik an der Humboldt-Universität zu Berlin mit Abschluß als Diplomphysiker.
01.1997 - dato	Promotion in Physik an der Humboldt-Universität.

Berufspraxis

02.1993 - 08.1993	Werkstudent bei Siemens AG, Anlagenbau Berlin.
04.1994 - 07.1994	Betreuung des Physik-Praktikums für Mediziner.
01.1997 - 12.1999	Doktorand am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Bereich Plasmadiagnostik, Berlin.
04.1998 - 07.1998	Forschungsaufenthalt am Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, USA.

Eigene Veröffentlichungen:

- T. Fuchs, C. Biedermann, R. Radtke, E. Behar, and R. Doron: *Channel-specific dielectronic recombination of highly charged krypton.* Phys. Rev. A, **58**, 4518-4525, (1998).
- C. Biedermann, T. Fuchs, G. Fussmann, and R. Radtke: *The Berlin Electron Beam Ion Trap.* in *Trapping Highly Charged Ions: fundamentals and applications.*, edited by J. Gillaspy, NOVA Science Publishers Inc., (1999).
- C. Biedermann, T. Fuchs, P. Liebisch, R. Radtke, E. Behar, and R. Doron: *X-ray spectroscopic measurements of dielectronic recombination of highly charged krypton ions.* Physica Scripta, **T80**, 303-304, (1999).
- R. Radtke, C. Biedermann, T. Fuchs, G. Fussmann, and P. Beiersdorfer: *Measurement of the radiative cooling rates for high-ionization species of krypton using an electron beam ion trap.* Phys. Rev. E, **61**, 1966 - 1974, (2000).
- und mehrere Tagungsbeiträge (DPG'98, HCI'98, DPG'99, X'99).

Erklärung

Hiermit erkläre ich, Tino Fuchs, diese Dissertation selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt zu haben.

Ich habe mich anderwärts nicht um einen Doktorgrad beworben und besitze einen entsprechenden Doktorgrad nicht.

Ich erkläre die Kenntnisnahme der dem angestrebten Verfahren zugrunde liegenden Promotionsordnung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät I der Humboldt-Universität zu Berlin.

Berlin, den 24. Februar 2000. .....