

Spektroskopische Untersuchungen hochgeladener Krypton-Ionen im Röntgen-Bereich

D i s s e r t a t i o n

zur Erlangung des akademischen Grades

do c t o r r e r u m n a t u r a l i u m
(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, *Physica Scripta* **T22**, 157–163 (1988).
- [14] E.D. Donets, V.I. Ilushchenko, and V.A. Alpert, in *Première 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. Nojikaawa, 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. Stöckli, *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. Gregoroy, 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. Gillaspay, 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.

.....