

文章编号: 1007-4627(2002)02-0117-05

## 溴的类镁离子跃迁谱线和能级扩展分析\*

杜树斌, 江历阳, 李景文, 陈华中, 曾宪堂

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

刘惠萍, 马新文, 王友德

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 用中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器提供的 90 和 130 MeV 的 Br 离子和束箔技术, 研究了波长在 13—29 nm 范围内 Br 的类 Mg 离子的光谱. 识别出 24 条属于 Br XXIV 的“3, 3”跃迁, 即  $3s^2$ ,  $3s3p$ ,  $3p^2$ ,  $3s3d$  和  $3p3d$  组态之间的跃迁谱线, 其中 19 条以前未见报道. 基于实验跃迁谱线, 19 个观测能级得以确立, 其中有 14 个能级此前未见报道. 相对论 Hartree-Fock(HFR)方法的计算结果对所观测的能级进行了解释.

**关键词:** 高离化原子; 束箔技术; 跃迁谱线; 能级

**中图分类号:** O563.3<sup>+</sup>1      **文献标识码:** A

### 1 引言

多年来, 类 Mg 离子的能级结构, 尤其是  $n=3$  组态的结构, 得到了广泛的研究. 例如, Litzén 等<sup>[1]</sup>、Ekberg 等<sup>[2, 3]</sup>、Seely 等<sup>[4]</sup>、Sugar 等<sup>[5, 6]</sup> 和 Churilov 等<sup>[7]</sup> 的文章. 最近的多电荷类 Mg 离子的实验研究大多数采用激光等离子体和聚变等离子体作为光源. 在许多实验中也运用了束箔方法, 但主要是为了测量离子寿命, 如: Träbert<sup>[8]</sup> 和 Hut-ton<sup>[9]</sup> 的文章. 在上述工作中, 绝大部分都提供了能级理论计算的结果. 同时, 也有一些纯理论的文章, 如: Ivanova 等<sup>[10]</sup> 的工作. 我们还注意到了 Curtis 和 Ramanujam<sup>[11]</sup> 所做的半经验研究.

虽然已经有从 Mg I 到 Cs XLIV 的等电子系列的能级实验数据, 但一些离子的实验信息仍然是不完全的, 其中包括本文所要讨论的 Br XXIV. 对于 Br 的类 Mg 离子, Sugar 等<sup>[5, 6]</sup> 测得了在托克马克装置产生的等离子体中 Br XXIV 的 5 条谱线, 其不确定性  $\leq 0.0005$  nm, 并建立了 Br XXIV 的 5 个能级. Ekberg 等<sup>[2]</sup> 和 Churilov 等<sup>[7]</sup> 也分别用等电子系列内插和外推法预言了 Br XXIV 的能级. 在前者

的研究中<sup>[2]</sup>, 介绍了 Ge XXI, Se XXIII, Sr XX-VII, Y XXVIII 和 Zr XXIX 的实验数据; 并基于大量的离子(Ca IX—Zr XXIX)研究了能级的观测值和相对论多组态 Dirac-Fock 计算值的差异; 对于没有实验数据的情况, 给出内插能级值, 其能级不确定性估计小于  $50 \text{ cm}^{-1}$ .

在本工作中, 我们用束箔激发技术研究 Br XXIV 的跃迁谱线和能级, 本文是以前初步结果<sup>[12]</sup> 的扩展分析.

### 2 实验

实验测量是在中国原子能科学研究院端电压为 13 MV 的 HI-13 重离子串列加速器上进行的. 多电离的 Br 离子被加速到 90 和 130 MeV, 然后穿过 25  $\text{m/cm}^2$  厚的碳膜. 当离子能量为 130 MeV 时, 穿过碳膜后的主要电荷态为 +22—+25; 能量为 90 MeV 时, 为 +19—+22. 典型的膜后离子束流强度为 200—500 nA. 束箔激发的离子所发出的光用自建的 2.2 m 掠入射 GIM-957 真空紫外单色仪<sup>[13]</sup> 分析, 在同束流成  $90^\circ$  方向, 光栅为每毫米 600 条刻

收稿日期: 2002-03-20; 修改日期: 2002-04-30

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目; 中国工程物理学院科学基金资助项目; 核工业科学基金资助项目; 中国原子和分子联合体基金资助项目

作者简介: 杜树斌(1966—), 男(汉族), 河北获鹿人, 副研究员, 从事加速器的物理实验及高剥离态原子能级结构研究.

线. 光子用通道电子倍增管并采用单光子探测技术记录, 入射狭缝尽量靠近束流, 离束流中心线约 7.5 mm(束流直径 6 mm). 当入射狭缝宽度为 20 μm 时, 谱线的半高宽约为 0.040 nm. 对大部分谱线, 由此产生的谱线波长不确定性小于 0.005 nm.

### 3 光谱分析

图 1 是测得的 130 MeV Br 的束箔光谱的一部分. 在这个能量点, 类 Mg 的  $3s^2-3s3p$  和类 Na 的  $3s-3p$  共振谱线较强. 谱中含有已经有精确测量结果的类 Na<sup>[14]</sup> 和类 Mg<sup>[5, 6]</sup>  $n=3$  和  $\Delta n=0$  的谱线, 用它们作参照谱线对光谱的波长进行刻度. 在光谱中有一些靠得近的谱线, 用解重峰的程序来分解. 例如: 对 20.5 nm 附近的复杂结构, 可以用这种方法分解成波长分别为 20.491, 20.543 和 20.593 nm

三条谱线, 其中第一条已经确定为 Ekberg 等<sup>[2]</sup> 预言的波长为 20.490 nm 的  $3s3d^3D_3-3p3d^3F_4$  跃迁谱线, 其它两条波长分别为 20.543 和 20.593 nm 的谱线尚未确定.

表 1 中列出了我们观测到的 Br XXIV 的 24 条谱线, 同时也列出了此前观测到的 5 条谱线<sup>[5, 6]</sup> 和在引言中提到的预言的 Br XXIV 跃迁波长. 从表 1 可以看出, 除  $3s3d^1D-3p3d^1F$  19.178 nm 谱线以外, 其它所有已识别的谱线在给出的误差范围内与理论预言相符; 只有  $3s3p^3P_0-3p^2^3P_1$  17.263 nm,  $3s3p^3P_1-3p^2^3P_0$  20.079 nm 和  $3s3p^3P_2-3p^2^3P_1$  20.371 nm 三条谱线在误差限内有微小的差异; 测得的 13.723 nm 的  $3s3p^3P_1-3s3d^3D_1$  谱线尽管与 Ekberg 等<sup>[2]</sup> 的预言在波长值上相符, 但强度太大, 可能与其它跃迁相混了.

表 1 类溴离子 Br XXIV 观测谱线

强度 <sup>a</sup>	$\lambda_{\text{obs}}/\text{nm}$	$\lambda_{\text{obs}}/\text{nm}^b$	$\lambda/\text{nm}^c$	跃迁
	本工作测量值	以前测量值	理论预言值	
1 370	16.677	16.680 5	16.681	$3s^2^1S_0-3s3p^1P_1$
62	25.373	25.371 0	25.372	$3s^2^1S_0-3s3p^3P_1$
95	15.677		15.676	$3s3p^3P_1-3p^2^3P_2$
120	17.263		17.272	$3s3p^3P_0-3p^2^3P_1$
245	17.541	17.540 3	17.242	$3s3p^3P_2-3p^2^3P_2$
125	17.908		17.905	$3s3p^3P_1-3p^2^3P_1$
95	18.433		18.434	$3s3p^1P_1-3p^2^1S_0$
100	20.079		20.071	$3s3p^3P_1-3p^2^3P_0$
90	20.371		20.380	$3s3p^3P_2-3p^2^3P_1$
65	28.735		28.740	$3s3p^1P_1-3p^2^1D_2$
20	13.351		13.349	$3s3p^3P_0-3s3d^3D_1$
40	13.607		13.609	$3s3p^3P_1-3s3d^3D_2$
115bl	13.723		13.724	$3s3p^3P_1-3s3d^3D_1$
610	14.769	147.710	14.771	$3s3p^3P_2-3s3d^3D_3$
60	14.991		14.993	$3s3p^3P_2-3s3d^3D_2$
70	15.135		15.133	$3s3p^3P_2-3s3d^3D_1$
160	15.203	152.025	15.204	$3s3p^1P_1-3s3d^1D_2$
55	19.178		19.195	$3s3d^1D_2-3p3d^1F_3$
350	20.491		20.490	$3s3d^3D_3-3p3d^3F_4$
125	22.807		22.805	$3s3d^3D_2-3p3d^3F_3$
35	23.332		23.338	$3s3d^3D_3-3p3d^3F_3$
55	24.902		24.896	$3s3d^3D_1-3p3d^3F_2$
35	15.260		15.256	$3p^2^3P_2-3p3d^3D_3$
10	15.484		15.484	$3p^2^3P_2-3p3d^3P_2$

a 探测的光子数, 未做与波长有关的效率修正; b 文献[6]给出的测量值; c 文献[2]给出的预言值.

能级的实验值是用表 1 中列出的由我们和 Sugar 等<sup>[5, 6]</sup>识别出来的谱线推算出来的。在处理

过程中, 跃迁波数是根据其各自的波长不确定性加权后, 用 ELCALC 程序<sup>[15]</sup>的最小二乘法拟合的。

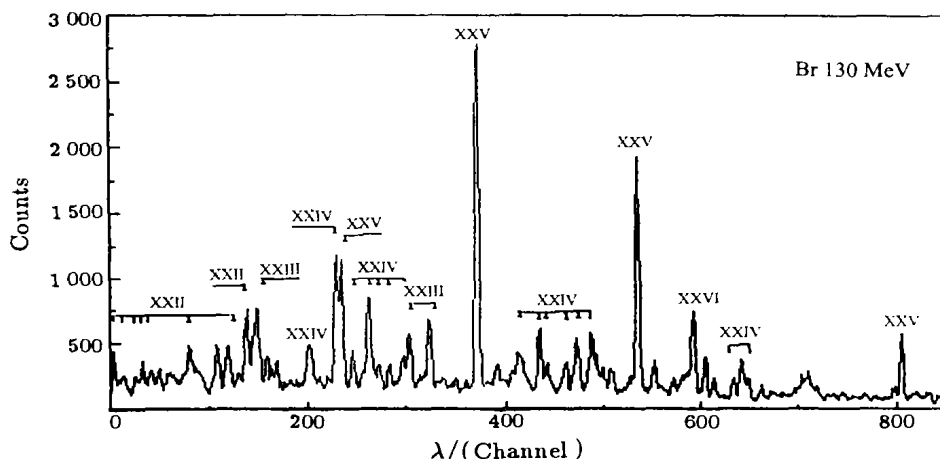


图 1 部分 130 MeV Br 的束箔光谱(10—24 nm)

### 4 能级

我们将测得的能级的值 and 用 ELCALC 计算得到的误差一起列在表 2. 除了  $3p3d\ ^1F$  能级有小差别以外, 其它能级和 Ekberg 等<sup>[2]</sup>的预言在误差范围内一致。

我们测得的能级结构同样可以采用 Cowan 的含相对论修正的 Hartree-Fock 计算来解释. Br XXIV  $n=3$  复合态的能级耦合方式是介于  $LS$  耦合和  $jj$  耦合之间, 略近于  $LS$  耦合. 在表 2 中列出了  $3p^2$  和  $3s3d$  组态能量计算值和实验值的差异. 为了获得相对低的标准偏差,  $183\text{ cm}^{-1}$ , 我们在表 3 中列

出了  $3d^2$  态和它的  $E_{av}$ ,  $F^2(3d3d)$  和  $\zeta_{3d}$  参数(表 3). 同时我们也列出了最小二乘法拟合值和相对论 Hartree-Fock 计算值之比, 用来检验所用方法的可信度. 在表 2 中, 我们也发现了  $^1D$  能级的  $3p^2$  和  $3s3d$  态之间, 及  $3p^2\ ^1D_2$  和  $3p^2\ ^3P_2$  之间存在强混合。

表 2 和表 3 也给出了包括在拟合中的  $3s3p$  和  $3p3d$  组态的类似的数据. 我们注意到这里得到的标准偏差更高 ( $662\text{ cm}^{-1}$ ). 对于没有观测到的能级, 我们采用了 Ekberg 等<sup>[2]</sup>的预言值. 最后我们注意到  $3p3d$  态在  $jj$  和  $LS$  耦合方式中的纯度低于其它观测到的组态。

表 2 Br XXIV 的  $3s^2$ ,  $3p^2$ ,  $3s3d$  和  $3s3p$ ,  $3s3d$  结构能级能量观测值

组态	谱项	$J$	$E/\text{cm}^{-1}$	观测-计算/ $\text{cm}^{-1}$	Eigenvector 组成
			偶 宇 称		
$3s^2$	$^1S$	0	0	0	99%+1% $3p^2\ ^1S$
$3p^2$	$^3P$	0	$892\ 175 \pm 77$	63	87%+12% $3p^2\ ^1S$
$3p^2$	$^3P$	2	$947\ 481 \pm 65$	-32	60%+26% $3p^2\ ^1D$ + 14% $3s3d\ ^1D$
$3p^2$	$^3P$	1	$952\ 793 \pm 102$	-92	100%
$3p^2$	$^1D$	2	$1\ 032\ 036 \pm 30$	68	74%+17% $3p^2\ ^3P$ + 9% $3s3d\ ^1D$
$3p^2$	$^1S$	0	$1\ 141\ 979 \pm 152$	-5	85%+12% $3p^2\ ^3P$ +1% $3d^2\ ^1S$
$3s3d$	$^3D$	1	$1\ 122\ 646 \pm 144$	-63	100%
$3s3d$	$^3D$	2	$1\ 129\ 043 \pm 90$	101	100%

3s3d	<sup>3</sup> D	3	1 138 923±33	-36	100%
3s3d	<sup>1</sup> D	2	1 257 260±33	-2	76%+22% 3p <sup>2</sup> <sup>1</sup> D+1% 3p <sup>2</sup> <sup>3</sup> P
奇 宇 称					
3s3p	<sup>3</sup> P	1	373 572±147	27	100%
3s3p	<sup>3</sup> P	1	394 142±18	-35	95%+4% 3s3p <sup>1</sup> P
3s3p	<sup>3</sup> P	2	461 920±25	7	100%
3s3p	<sup>1</sup> P	1	599 474±24	0	94%+4% 3s3p <sup>3</sup> P+2% 3p3d <sup>1</sup> P
3p3d	<sup>3</sup> F	2	1 524 220±165	-584	81%+17% 3p3d <sup>1</sup> D+13% 3p3d <sup>3</sup> D
3p3d	<sup>3</sup> F	3	1 567 514±78	180	90%+7% 3p3d <sup>3</sup> D+3% 3p3d <sup>1</sup> F
3p3d	<sup>1</sup> D	2	1 586 277	-245	47%+27% 3p3d <sup>3</sup> P+16% 3p3d <sup>3</sup> D
3p3d	<sup>3</sup> D	1	1 613 816 <sup>a</sup>	734	72%+21% 3p3d <sup>3</sup> P+7% 3p3d <sup>1</sup> P
3p3d	<sup>3</sup> F	4	1 626 942±124	483	100%
3p3d	<sup>3</sup> D	2	1 646 220 <sup>a</sup>	123	39%+32% 3p3d <sup>1</sup> D+20% 3p3d <sup>3</sup> D
3p3d	<sup>3</sup> D	3	1 677 864 ±200	-72	88%+9% 3p3d <sup>3</sup> F+3% 3p3d <sup>1</sup> F
3p3d	<sup>3</sup> P	0	1 682 510 <sup>a</sup>	264	100%
3p3d	<sup>3</sup> P	1	1 683 171 <sup>a</sup>	-142	76%+24% 3p3d <sup>3</sup> D
3p3d	<sup>3</sup> P	2	1 687 171±215	-65	52%+43% 3p3d <sup>3</sup> D+4% 3p3d <sup>1</sup> D
3p3d	<sup>1</sup> F	3	1 778 691±150	-78	94%+5% 3p3d <sup>3</sup> D+1% 3p3d <sup>3</sup> F
3p3d	<sup>1</sup> P	1	1 798 822 <sup>a</sup>	-6	91%+5% 3p3d <sup>3</sup> D+3% 3p3d <sup>3</sup> P

a 文献[2]的预言值.

表 3 3s<sup>2</sup>, 3p<sup>2</sup>, 3s3d, 3d<sup>2</sup> 和 3s3p, 3p3d 结构参数

组态	参数	LSF/cm <sup>-1</sup> <sup>a</sup>	HFR/cm <sup>-1</sup>	比值(LSF / HFR)
3p <sup>2</sup>	E <sub>av</sub>	1 010 982(117)	992 025	1.019 1
	F <sup>2</sup> (3p3p)	211 517 (518)	221 471	0.955
	ζ <sub>3p</sub>	59 282 (98)	57 974	1.023
3s3d	E <sub>av</sub>	1 148 162(124)	1 132 080	1.014
	ζ <sub>3d</sub>	6 500(102)	7 087	0.917
	G <sup>2</sup> (3s3d)	157 026(966)	179 184	0.876
3d <sup>2</sup>	E <sub>av</sub>	2 302 978(fixed)	2 302 978	(1.00)
	F <sup>2</sup> (3d3d)	216 063(fixed)	254 192	(0.85)
	F <sup>4</sup> (3d3d)	139 946(fixed)	164 642	(0.85)
	ζ <sub>3d</sub>	6 685(fixed)	7 037	(0.95)
3s3p	E <sub>av</sub>	482 477(613)	457 566	1.054 4
	ζ <sub>3p</sub>	59 255(473)	58 012	1.021 4
	G <sup>1</sup> (3s 3p)	267 441(135 4)	281 262	0.950 8
3p3d	E <sub>av</sub>	1 647 930(221)	1 633 397	1.008 9
	ζ <sub>3p</sub>	58 931(447)	57 833	1.019
	ζ <sub>3d</sub>	6 672(284)	7 066	0.944
	F <sup>2</sup> (3p3d)	199 646(238 1)	221 941	0.896
	G <sup>1</sup> (3p3d)	219 980(903)	238 105	0.924
	G <sup>3</sup> (3p3d)	140 814(209 0)	159 466	0.883

a 括弧内数值表示标准偏差.

## 5 结束语

通过 20 多条已经鉴别的 Br 的谱线, 我们建立了 Br XXIV 类 Mg 离子的 14 条新能级. 这些结果与 Ekberg 等<sup>[2]</sup>用等电子序列内插法预言的值复合的很好, 从而验证了这种方法的适用性.

致谢 我们非常感谢 C. Jupen 博士、J. O. Ekberg 博士和 I. Indrek Martinson 教授在数据分析中的有益的讨论和建议, 感谢串列加速器实验室提供强而稳定的束流.

## 参 考 文 献:

- [1] Litzén U, Redfors A. Revised and Extended Analysis of Transitions and Energy Levels in the  $n=3$  Complex of Mg-like Ca IX—Ge XXI[J]. *Physica Scripta*, 1987, **36**: 895.
- [2] Ekberg J O, Feldman U, Seely J F, *et al.* Transitions and Energy Levels in Mg-like Ge XXI—Zr XXIX Observed in Laser-produced Lisear Plasmas[J]. *Physica Scripta*, 1989, **40**: 643.
- [3] Ekberg J O, Feldman U, Seely J F, *et al.* Analysis of Magnesiumlike Spectra from Mo XXXI to Cs XLIV[J]. *Physica Scripta*, 1991, **43**: 19.
- [4] Seely J F, Ekberg J O, Feldman U, *et al.* Wavelengths for the  $3s^2\ ^1S_0-3s3p\ ^3P_1$  Transition of the Magnesium-like Ions  $Fe^{14+}$  Through  $Nd^{48+}$  [J]. *J Opt Soc Am*, 1988, **B5**: 602.
- [5] Sugar J, Kaufman V, Rowan W L. Resonance Transitions in the Mg I and Ar I Isoelectronic Sequences from Cu to Mo[J]. *J Opt Soc Am*, 1987, **B4**: 1 927.
- [6] Sugar J, Kaufman V, Indelicato P, *et al.* Analysis of Magnesium-like Spectra from Cu XVIII to Mo XXXI[J]. *J Opt Soc Am*, 1989, **B6**: 1 437.
- [7] Churilov S S, Levashov V E, Wyart J F. Expeded Analysis of the  $3d^2-3p3d$  Transitions in the Sequence K VIII—Cu XVIII and Isoelectronic Trends in Mg-like Ions Through Kr XXV[J]. *Physica Scripta*, 1989, **40**: 625.
- [8] Träbert E. Experimental Transition Probabilities of Intercombination Transitions in Mg-like and Al-like Ions of Bromine [J]. *Phys Rev*, 1993, **147**: 3 805.
- [9] Hutton R. Intercombination Lines in Highly Charged Ions[J]. *Physica Scripta*, 1997, **T73**: 25.
- [10] Ivanova E P, Ivanov L N, Tsirekidze M A. Energy Levels of Mg-like Ions[J]. *At Data Nucl Data Tables*, 1988, **35**: 419.
- [11] Curtis L J, Ramanujam P S. Isoelectronic Wavelength Predictions for Magnetic-dipole, Electric-quadrupole, and Intercombination Transitions in the Mg Sequence[J]. *J Opt Soc Am*, 1983, **73**: 979.
- [12] Zeng Xiantang, Li Jingwen, Hu Aidong, *et al.* The Measurements of Highly Stripped Bromine Atom Spectra [J]. *原子与分子物理学报*, 1998, 增刊: 79.
- [13] 曾宪堂, 李景文, 胡爱东等. 2.2 米掠入射 GIM-957 真空紫外单色仪 [J]. *原子与分子物理学报*, 1998, 增刊: 81.
- [14] Reader J, Kaufman V, Suger J, *et al.*  $3s-3p$ ,  $3p-3d$ , and  $3d-3f$  Transitions of Sodiumlike Ions[J]. *J Opt Soc Am*, 1987, **B4**: 1 821.
- [15] Cowan R D. *The Theory of Atomic Structure and Spectra* [M]. Berkeley: U California Press, 1981.

## Expanded Analysis for Spectra and Energy Levels of Mg-like Br XXIV\*

DU Shu-bin, JIANG Li-yang, LI Jing-wen, CHEN Hua-zhong, ZENG Xian-tang  
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

LIU Hui-ping, MA Xin-wen, WANG You-de  
(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The spectrum of Mg-like Br, Br XXIV is investigated by means of beam-foil technique. Bromine ions of 90 and 130 MeV energy from the HI-13 tandem accelerator are used, and the wavelength region 13—29 nm is investigated. In the spectra, 24 Br XXIV transitions within the  $n=3$  complex, i. e. between the  $3s^2$ ,  $3s3p$ ,  $3p^2$ ,  $3s3d$  and  $3p3d$  configurations are identifies, among them 19 have not been reported before. Based on these transition lines 19 energy levels have been determined and 14 energy levels are new ones. The obtained energy levels have been theoretically interpreted by using relativistic Hartree-Fock (HFR) calculations.

**Key words:** highly ionized atom; beam-foil technique; transition line; energy level

\* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China; Science Foundation of Chinese Academy of Engineering Physics; Science Foundation of Nuclear Industry; Chinese Research Association of Atomic and Molecular Data