

文章编号: 1001—4322(2000)05—0639—04

# 高离化氩原子光谱的实验和理论研究

姜仁滨<sup>1</sup>, 王宛珏<sup>1</sup>, 王晓东<sup>2</sup>, 杨祖慎<sup>1</sup>, 沈异凡<sup>1</sup>,  
高 洁<sup>1</sup>, 王 倩<sup>1</sup>, 杨治虎<sup>3</sup>, 刘慧萍<sup>3</sup>

(1. 新疆大学物理系, 乌鲁木齐 830046; 2 西北师范大学物理系, 兰州 730070; 3 中科院兰州近代物理研究所, 兰州 730000)

**摘 要:** 利用兰州重离子加速器将从 ECR 离子源射出的 Ar<sup>4+</sup> 离子加速、剥离, 获得了能量为 93.8MeV 的 Ar<sup>8+</sup> 离子束流, 测量了这些束流通过碳箔后各种离子的发射光谱。根据用全相对论多组态自洽场方法计算出的有关原子数据, 对这些光谱进行了识别和分析。

**关键词:** 束箔光谱; 辐射寿命; GRASP 方法

**中图分类号:** O562.3 **文献标识码:** A

高速束箔技术是获得高离化离子的一种有效方法。用这种方法可获得离化度相当高的离子并易测量出离子束经箔剥离和激发后辐射光强随时间变化的规律, 从而算出离子的辐射寿命。由于从箔后穿出的离子的离化度有一统计分布, 从而可获得多种离化度的离子光谱。离化度的差异虽使光谱复杂化, 但获得的离子信息量也相应增加。为了识别这些离子的光谱, 计算量自然也要同时增加, 我们用全相对论多组态自洽场方法<sup>[1,2]</sup>对 Ar 的类锂一类氩离子的精细结构能级、跃迁波长和辐射寿命进行了计算, 用这些数据识别出了绝大部分谱线。这些谱线绝大多数属于 2p-2s 跃迁。只有一条谱线属于 3p-3s 跃迁且较弱。

## 1 实验方法<sup>[3]</sup>

强度为  $I = 10^{-12}$  A 的 Ar<sup>8+</sup> 离子束入射到厚度为  $39 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  的碳箔上。Ar<sup>8+</sup> 离子的总能量是  $E_{in} = 93.8 \text{ MeV}$ , 平均每核子能量是  $E_{in}/M = 2.345 \text{ MeV}/u_0$ 。从碳箔上出射的能量是  $E_{out} = 92.95 \text{ MeV}$ , 平均每核子能量是  $E_{out}/M = 2.324 \text{ MeV}/u_0$ 。经过碳箔的过程中, Ar<sup>8+</sup> 离子和碳原子发生碰撞电离和碰撞激发。核质量  $M = A u$ ,  $A$  是原子量,  $u$  是核子质量。

出射离子因电离而具有一电荷分布<sup>[4]</sup>

$$F(q) = F(\bar{q}) \exp[-(q - \bar{q})^2/2d^2]$$

其中  $F(q)$  表示离子束中带有电量  $q$  的离子数和总离子数之比,  $F(\bar{q}) = (q\pi d^2)^{-1/2}$ ,  $d = A Z^K (\bar{q}/q)^a (1 - \bar{q}/q)^b$ ,  $A = 1.41$ ,  $K = 0.41$ ,  $a = 0.3$ ,  $b = 0.37$ ,  $Z = 18$ , 平均核电荷  $\bar{q} = 14.37$ 。

由此可知: 出射离子的主要成份是 Ar<sup>16+</sup> - Ar<sup>11+</sup> 离子。如表1所示。

表1 出射离子的电荷态分布

Table 1 The charge distribution of outgoing ion beam

| $q/e$  | 17     | 16     | 15     | 14     | 13     | 12     | 11     | ... |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
| $F(q)$ | 0.0910 | 0.1325 | 0.1616 | 0.1654 | 0.1406 | 0.1022 | 0.0617 | ... |

出射离子所发出的光线经宽度为  $L = 600 \mu\text{m}$  的狭缝进入单色光谱仪。入射光与束流线间有一夹角  $\theta = 102.55^\circ$ 。由于发光离子是快速运动的, 用光谱仪测得的波长有一个 Doppler 位移。据文献[5]给出的公式

$$\lambda = \lambda_0 (1 - \beta \cos \theta) / (1 - \beta^2)^{1/2}$$

式中,  $\lambda$  为实测波长;  $\lambda_0$  为实际波长;  $v$  为出射离子的速度,  $v = 13.9 (E_{out}/M)^{1/2} = 2.119 \times 10^7 \text{ m/s}$ ;  $c$

收稿日期: 1999-12-07; 修订日期: 2000-08-14

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(69968001)

作者简介: 姜仁滨, 男, 1937年7月出生, 教授, 从事原子结构与原子碰撞研究。

为光速;  $\beta = v/c = 0.7063$ 。由此可得:  $\lambda_0 = \lambda / 1.01796$ 。

由于离子穿过碳箔后的出射速度因箔厚度的不均匀和离子与碳原子碰撞情况的不同, 而与平均值有一定的差异, 又由于单色光谱仪的入口有一定的宽度, 使得各入射光线与束流方向间的夹角并非都是同一  $\theta$  角。因而光波波长的 Doppler 位移在其平均值附近有一分布。这就使得谱线进一步加宽。所以实测波长应与谱线的峰值对应。由于峰值的测量有  $0.1\text{nm}$  左右的误差, 所以实测波长和实际波长也都有  $0.1\text{nm}$  左右的误差。

由单色光谱仪测出的光谱如图1所示。由光谱图测算出的  $\lambda$  和  $\lambda_0$  列于表2中。

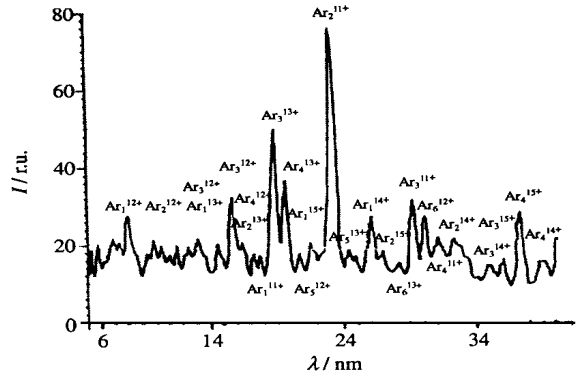


Fig 1 Observed spectrum after interaction

$\text{Ar}^{8+}$  ions with 93.8 MeV and C-boil

图1 93.8 MeV 的  $\text{Ar}^{8+}$  离子与  $39\mu\text{g}/\text{cm}^2$  的碳箔相互作用后观察到的部分谱线

表2  $\text{Ar}$  离子跃迁波长 ( $\text{Ar}^{8+}$  C)

Table 2 The transition wavelengths in Ar ions

| ion               | $\lambda/\text{nm}$ | $\lambda_0/\text{nm}$ | $I/I_0$ | $\lambda/\text{nm}$ | transition  |
|-------------------|---------------------|-----------------------|---------|---------------------|---|
| $\text{Ar}^{15+}$ | 21.4                | 21.0                  | 24      | 21.0076             | $1s2p^2 \left _{3/2} \right. \rightarrow (1s2s) 12p \left _{3/2} \right.$                             |
| $\text{Ar}^{15+}$ | 27.0                | 26.5                  | 22      | 26.4630             | $(1s2s) 2p \left _{3/2} \right. \rightarrow 1s2s^2 \left _{1/2} \right.$                              |
| $\text{Ar}^{15+}$ | 36.0                | 35.4                  | 20      | 35.4883             | $(1s2p \cdot) 2p \left _{3/2} \right. \rightarrow (1s2s) 12p \left _{3/2} \right.$                    |
| $\text{Ar}^{15+}$ | 37.3                | 36.6                  | 33      | 36.6336             | $1s2p^2 \left _{3/2} \right. \rightarrow (1s2s) 12p \left _{3/2} \right.$                             |
| $\text{Ar}^{14+}$ | 26.2                | 25.7                  | 32      | 25.7507             | $1s^2 2p \cdot 2p \left _1 \right. \rightarrow 1s^2 2s2p \cdot \left _0 \right.$                      |
| $\text{Ar}^{14+}$ | 32.4                | 31.8                  | 25      | 31.7980             | $1s^2 2p 3p \left _2 \right. \rightarrow 1s^2 2s3p \cdot \left _1 \right.$                            |
| $\text{Ar}^{14+}$ | 35.1                | 34.5                  | 17      | 34.4908             | $1s^2 2p 3p \left _1 \right. \rightarrow 1s^2 2s3p \left _1 \right.$                                  |
| $\text{Ar}^{14+}$ | 38.9                | 38.2                  | 18      | 38.2513             | $1s^2 2p \cdot 3p \left _1 \right. \rightarrow 1s^2 2s3p \left _1 \right.$                            |
| $\text{Ar}^{13+}$ | 14.6                | 14.3                  | 24      | 14.3113             | $1s^2 2p \cdot 2p^2 \left _{1/2} \right. \rightarrow 1s^2 2s2p^2 \left _{1/2} \right.$                |
| $\text{Ar}^{13+}$ | 17.2                | 17.0                  | 21      | 16.9651             | $1s^2 2p^2 2p \left _{3/2} \right. \rightarrow 1s^2 (2s2p \cdot) 02p \left _{3/2} \right.$            |
| $\text{Ar}^{13+}$ | 18.9                | 18.6                  | 50      | 18.6559             | $1s^2 (2s2p \cdot) 2p \left _{1/2} \right. \rightarrow 1s^2 2s^2 2p \left _{3/2} \right.$             |
| $\text{Ar}^{13+}$ | 19.6                | 19.3                  | 43      | 19.2198             | $1s^2 2s2p^2 \left _{1/2} \right. \rightarrow 1s^2 2s2p \cdot \left _{1/2} \right.$                   |
| $\text{Ar}^{13+}$ | 24.5                | 24.1                  | 22      | 24.0984             | $1s^2 (2s2p \cdot) 12p \left _{3/2} \right. \rightarrow 1s^2 2s^2 2p \cdot \left _{1/2} \right.$      |
| $\text{Ar}^{13+}$ | 28.1                | 27.6                  | 19      | 27.5334             | $1s^2 2p \cdot 2p^2 \left _{1/2} \right. \rightarrow 1s^2 (2s2p \cdot) 12p \left _{1/2} \right.$      |
| $\text{Ar}^{12+}$ | 10.4                | 10.2                  | 23      | 10.1579             | $1s^2 2p \cdot 2p^3 \left _1 \right. \rightarrow 1s^2 2s2p^3 \left _2 \right.$                        |
| $\text{Ar}^{12+}$ | 12.3                | 12.1                  | 23      | 12.0015             | $1s^2 2p \cdot 2p^3 \left _2 \right. \rightarrow 1s^2 (2s2p \cdot) 12p^2 \left _1 \right.$            |
| $\text{Ar}^{12+}$ | 13.2                | 13.0                  | 25      | 12.9910             | $1s^2 2p \cdot 2p^3 \left _1 \right. \rightarrow 1s^2 (2s2p \cdot) 12p^2 \left _1 \right.$            |
| $\text{Ar}^{12+}$ | 15.8                | 15.5                  | 38      | 15.7221             | $1s^2 2s2p^3 \left _2 \right. \rightarrow 1s^2 2s^2 2p \cdot 2p \left _1 \right. (?)$                 |
| $\text{Ar}^{12+}$ | 16.3                | 16.0                  | 24      | 16.0242             | $1s^2 2s2p^3 \left _2 \right. \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^2 \left _2 \right.$                            |
| $\text{Ar}^{12+}$ | 20.7                | 20.3                  | 21      | 20.3448             | $1s^2 2p^4 \left _0 \right. \rightarrow 1s^2 (2s2p \cdot) 12p^2 \left _1 \right.$                     |
| $\text{Ar}^{12+}$ | 30.2                | 29.7                  | 32      | 29.6276             | $1s^2 2s2p^3 \left _1 \right. \rightarrow 1s^2 2s^2 2p \cdot 2p \left _2 \right.$                     |
| $\text{Ar}^{11+}$ | 17.8                | 17.5                  | 20      | 17.4943             | $1s^2 2p^2 2p^3 \left _{3/2} \right. \rightarrow 1s^2 2s2p^2 2p^2 \left _{3/2} \right.$               |
| $\text{Ar}^{11+}$ | 23.3                | 22.9                  | 89      | 22.9972             | $1s^2 2p 2p^4 \left _{1/2} \right. \rightarrow 1s^2 (2s2p \cdot) 13p^3 \left _{1/2} \right.$          |
| $\text{Ar}^{11+}$ | 29.3                | 28.8                  | 37      | 28.8182             | $1s^2 2s2p^2 2p^2 \left _{5/2} \right. \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^2 2p \left _{3/2} \right.$            |
| $\text{Ar}^{11+}$ | 31.2                | 30.7                  | 26      | 30.6413             | $1s^2 2s^2 2p^2 3p \left _{3/2} \right. \rightarrow 1s^2 2s^2 (2p \cdot 2p) 13s \left _{3/2} \right.$ |

根据碳靶移动的距离与光强变化的关系可以算出与谱线对应的跃迁的上能级的辐射寿命。今从实验上测出三条谱线的上能级的辐射寿命:  $\text{Ar}^{14+}$  谱线上能级的辐射寿命  $T_{10} = (1.08 \pm 0.12) \times 10^{-10}\text{s}$ ,  $\text{Ar}^{13+}$  谱线上能级的辐射寿命  $T_{20} = (1.14 \pm 0.09) \times 10^{-10}\text{s}$ ,  $\text{Ar}^{11+}$  谱线上能级的寿命  $T_{30} = (2.28 \pm 0.11) \times 10^{-10}\text{s}$ 。测量寿命的误差除上述原因外, 还受靶速和靶距精度的影响。此外, 一个能级的辐射寿命应由它向所有可能的下能级的跃迁谱线随时间衰减情况来计算。在本实验中由于向其他下能级的

跃迁谱线都很弱, 未能测出而被忽略。这种忽略将使寿命的测量值增大。

## 2 理论解释

根据 Doppler 位移公式由实测波长  $\lambda$  可算出实际波长  $\lambda_0$ 。根据我们用全相对论多组态自洽场方法<sup>[1, 2, 6]</sup>算出的 Ar 的类锂一类氩离子 2p, 3s, 3p, 3d 组态能级和其间跃迁波长  $\lambda$ , 可以识别出与这些实际波长所对应的离子和跃迁, 它们如表2所示。

从图1和表2可知: (1) 波长  $\lambda_0$  大于 10nm 的谱线已经识别出, 包括其中强度很弱的谱线; (2) 出射离子的电荷分布和理论计算值基本相符; (3) 我们用全相对论多组态自洽场方法计算了 Ar<sup>14+</sup>, Ar<sup>13+</sup>, Ar<sup>11+</sup> 离子 2p, 3s, 3p 组态各能级的辐射寿命。计算结果是: Ar<sup>14+</sup> 谱线上能级  $1s^2 2p^2 \ 2p \ |_1$  的辐射寿命是  $T_{1c} = 1.56 \times 10^{-10}$  s; Ar<sup>13+</sup> 谱线上能级  $1s^2 (2s2p^2) \ 12p \ |_{1/2}$  的辐射寿命是  $T_{2c} = 1.08 \times 10^{-10}$  s; Ar<sup>11+</sup> 谱线上能级  $1s^2 2p^2 \ 2p^4 \ |_{1/2}$  的辐射寿命是  $T_{3c} = 1.17 \times 10^{-10}$  s,  $T_{2c}$  和  $T_{20}$  符合得较好; (4) Ar<sup>14+</sup> 是 3p-3s 跃迁谱线。因强度太小未能测出其上能级的辐射寿命。这个上能级辐射寿命的计算值是  $6.92 \times 10^{-10}$  s; (5) 实验上只测出 Ar<sup>14+</sup> 谱线上能级的辐射寿命而没有测出 Ar<sup>12+</sup>, Ar<sup>13+</sup>, Ar<sup>14+</sup> 谱线上能级的辐射寿命, 因其强度小。说明后者比前者布居数少且稳定, 说明 3p 电子对 2p 电子的作用比 2p 电子间的作用强。后三个能级上虽有 3p 电子, 但它们并没有直接衰变为 3s 电子, 而是其中的 2p 电子直接衰变为 2s 电子。说明 3p 电子比 2p 电子稳定。计算表明后者的辐射寿命比前者小二倍多, 故较稳定; 也没有观测到 3s-2p 跃迁。计算表明 3s 组态的辐射寿命约为  $2 \times 10^{-12}$  s, 比 2p 组态和 3p 组态的寿命小两个数量级, 但因 3s 电子的布居数太少, 使 3s-2p 跃迁谱线太弱, 故而观测不到; (6) 从计算中发现: Ar<sup>14+</sup> 的上能级  $1s^2 2s3p^2 \ |_0$  和  $1s^2 2s3p^2 \ |_2$  的辐射寿命约为  $2 \times 10^{-9}$  s, 它的下能级  $1s^2 2s3s^2 \ |_1$  和  $1s^2 2s3s^2 \ |_0$  的辐射寿命约为  $2 \times 10^{-12}$  s, Ar<sup>13+</sup> 的上能级  $1s^2 s^2 3p^2 \ |_{1/2}$  和  $1s^2 2s^2 3p^2 \ |_{3/2}$  的辐射寿命约为  $1 \times 10^{-9}$  s, 它的下能级  $1s^2 2s^2 3s^2 \ |_{1/2}$  的辐射寿命约为  $2 \times 10^{-12}$  s; Ar<sup>11+</sup> 的上能级  $1s^2 2s^2 2p^2 \ 3p^2 \ |_{1/2}$  和  $| \ s^2 2s^2 2p^2 3p^2 \ |_{3/2}$ ,  $1s^2 2s^2 (2p^2 \ 2p^2) \ 13p^2 \ |_{1/2}$  的辐射寿命约为  $8 \times 10^{-10}$  s, 它们的下能级  $1s^2 2s^2 2p^2 \ 3s^2 \ |_{1/2}$  和  $1s^2 2s^2 (2p^2 \ 2p^2) \ 13s^2 \ |_{1/2}$  的辐射寿命约为  $3 \times 10^{-12}$  s。上述离子 3p 组态的辐射寿命都比 3s 组态的辐射寿命大 2—3 个数量级, 是一些很可能实现粒子数反转而辐射激光的能级<sup>[6]</sup>。但这些能级的辐射寿命都没能观测到。如能调节入射离子 Ar<sup>8+</sup> 的能量,

表3 Ar<sup>13+</sup> 离子的精细结构能级和辐射寿命

Table 3 Fine-structure energy levels and radiative lifetime in Ar<sup>13+</sup> ion

| term s                   | J   | levels/cm <sup>-1</sup> | lifetime/s             |
|--------------------------|-----|-------------------------|------------------------|
| 1. $1s^2 2s^2 2p^2$      | 1/2 | 0                       |                        |
| 2. $1s^2 2s^2 2p^2$      | 3/2 | 22563                   | $8.91 \times 10^{-3}$  |
| 3. $1s^2 2s 2p^2$        | 1/2 | 223034                  | $9.80 \times 10^{-10}$ |
| 4. $1s^2 (2s2p^2) \ 02p$ | 3/2 | 231594                  | $5.97 \times 10^{-10}$ |
| 5. $1s^2 2s 2p^2$        | 5/2 | 243048                  | $4.86 \times 10^{-10}$ |
| 6. $1s^2 (2s2p^2) \ 12p$ | 3/2 | 414962                  | $2.78 \times 10^{-10}$ |
| 7. $1s^2 (2s2p^2) \ 12p$ | 5/2 | 415804                  | $1.61 \times 10^{-10}$ |
| 8. $1s^2 2s 2p^2$        | 1/2 | 520292                  | $1.99 \times 10^{-10}$ |
| 9. $1s^2 (2s2p^2) \ 12p$ | 1/2 | 558582                  | $1.08 \times 10^{-10}$ |
| 10. $1s^2 2s 2p^2$       | 3/2 | 569680                  | $9.64 \times 10^{-11}$ |
| 11. $1s^2 2p^2 \ 2p^2$   | 3/2 | 715680                  | $7.44 \times 10^{-11}$ |
| 12. $1s^2 2p^2 \ 2p^2$   | 3/2 | 821035                  | $7.16 \times 10^{-11}$ |
| 13. $1s^2 2p^2 \ 2p^2$   | 5/2 | 822776                  | $6.75 \times 10^{-11}$ |
| 14. $1s^2 2p^2 \ 2p^2$   | 1/2 | 921775                  | $6.28 \times 10^{-11}$ |
| 15. $1s^2 2s^2 3s$       | 1/2 | 3462750                 | $1.96 \times 10^{-12}$ |
| 16. $1s^2 2s^2 3p^2$     | 1/2 | 3578896                 | $1.06 \times 10^{-9}$  |
| 17. $1s^2 2s^2 3p^2$     | 3/2 | 3585096                 | $9.31 \times 10^{-10}$ |

使它们与靶碰撞后,  $3p$  组态的粒子布局数大大增加, 则有可能测出其辐射寿命并和理论值相比较。为节省篇幅, 现仅将  $\text{Ar}^{13+}$  离子的精细结构能级和辐射寿命的计算值列于表3之中, 以供参考。

致 射 作者对兰州重离子加速器运行值班人员的紧密合作和北京应用物理和计算数学研究所的方泉玉研究员在计算过程中给予的大力帮助表示衷心的感谢。

### 参考文献:

- [1] Grant I P, McKenzie B J, Norrington P H, et al A relativistic multiconfiguration Dirac-Fock code[J]. *Comput Phys Commun*, 1980, 21(1): 207.
- [2] Dylla K G, Grant I P, Johnson C T, et al A general-purpose relativistic atom structure program [J]. *Comput Phys Commun*, 1989, 55: 425.
- [3] 王友德, 刘惠萍, 马新文, 等 氖的高离化态离子的实验研究[J]. 原子与分子物理, CAM P-V VIII (西安): 49.
- [4] Betz Hans D. Applied Atomic Collision Physics 1983 1~ 42
- [5] Martinson I The spectroscopy of highly ionised atoms[J]. *Reports on Progress in Physics*, 1989, 52(2): 157.
- [6] 王宛珏, 姜仁滨 类氧镁离子辐射跃迁几率和激发态寿命的 GRASP 计算[J]. 强激光与粒子束, 1995, 7(2): 189~ 194

## Experiment and Theory Research of the Spectrum of Highly Ionised Ar Ions

JIANG Ren-bin<sup>1</sup>, WANG Wan-jue<sup>1</sup>, WAN Xiao-dong<sup>2</sup>, Yang Zu-tian<sup>1</sup>,  
SHEN Yi-fan<sup>1</sup>, GAO Jie<sup>1</sup>, WANG Qian<sup>1</sup>, YANG Zhi-hu<sup>3</sup>, LU Hui-bing<sup>3</sup>

(1. Department of Physics, Xinjiang University, Wulumuqi, 830046, China;

2. Department of Physics, Northwest Normal University, Lanzhou, 730070, China;

3. Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou, 730000, China)

**ABSTRACT:**  $\text{Ar}^{4+}$  ions from ECR ion source are speed up and peel off with Lanzhou Heavy Ions Accelerator, so  $\text{Ar}^{8+}$  ions with energy 93.8 MeV are obtained. According to atom data calculated by the expanded full relativistic multiconfiguration Dirac-Fock (GRASP) code, we have distinguished and analysed those spectrums.

**KEY WORDS:** beam foil spectrum; radiative lifetime; GRASP code