

## Ba 原子 $6s5d^3D$ 与 $6p5d^3F$ 态的超精细结构及 态间跃迁的同位素移动的直接确定

仲嘉琪<sup>1,2,3</sup>, 余庚华<sup>1,2,3</sup>, 王 谨<sup>1,2</sup>, 詹明生<sup>1,2\*</sup>

1. 中国科学院武汉物理与数学研究所波谱与原子分子国家重点实验室, 湖北 武汉 430071
2. 中国科学院冷原子物理中心, 湖北 武汉 430071
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘 要** 提出并演示了一种光泵预选态的原子光谱测量方法, 并对 Ba 原子的  $6s5d^3D$  态与  $6p5d^3F$  态的超精细结构及该跃迁的同位素移动进行了直接测量。首先利用 791 nm 的激光激发 Ba 原子特定同位素及特定超精细结构的  $6s6s^1S_0 \rightarrow 6s6p^3P_1$  跃迁, 并利用  $6s6p^3P_1 \rightarrow 6s5d^3D_2$  的自发辐射有选择地分别将这些同位素制备到  $6s5d^3D_2$  态不同的超精细能级上, 再用 778 nm 的激光扫出对应的  $6s5d^3D_2 \rightarrow 6p5d^3F_2$  跃迁的荧光光谱, 通过这几组光谱之间的对比直接实现了对 22 条超精细谱线的认定和归属, 从而得到了  $^{135}\text{Ba}$  和  $^{137}\text{Ba}$  的  $6s5d^3D_2$  能级与  $6p5d^3F_2$  能级的超精细结构常数及该跃迁的同位素移动。

**关键词** 原子光谱学; 原子超精细结构; 同位素位移; 荧光

**中图分类号:** O562 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)01-0011-04

### 引 言

用激光冷却与囚禁中性原子, 早已在大部分碱土金属原子中实现, 利用激光囚禁的冷原子(如 Sr)已经获得了稳定性很高的光频标。然而, 由于原子能级结构的特殊性, Ba 原子的激光冷却及囚禁直到 2008 年才被荷兰格罗宁根大学的 Willmann 小组使用了 3 个频率的冷却光以及 5 个频率的囚禁光艰难完成<sup>[1]</sup>。如果想要寻找一种对 Ba 原子更加简单有效的冷却方案, 则需要对 Ba 原子的低态能级的结构、能级之间跃迁的分支比等进行细致的研究。

激光光谱分析对于测量原子的超精细结构及跃迁的同位素移动是一种非常有效的方法, 其难点在于谱线的认定和归属。以 Ba 原子为例, 传统的测量方法是先进行放电<sup>[2]</sup>, 将原子制备到感兴趣的长寿名下能级上, 再用激光扫描激发, 得到一张包含所有同位素的所有超精细能级之间跃迁的全谱。这张全谱的谱线常常有几十条之多, 如果不能对它们一一进行准确的认定和归属, 想要得到其超精细结构和跃迁的同位素移动是不可能的。美国的 Schmelling<sup>[3]</sup>首先采用磁共振的方法测量得到了 Ba 原子  $6s5d^3D_1$ ,  $^3D_2$  的磁耦极和电四级

超精细结构常数  $a$  和  $b$ , 随后瑞典的 Olsson 小组<sup>[4, 5]</sup>利用其结果对得到的以  $6s5d^3D_1$  和  $^3D_2$  为下能级的一系列跃迁全谱进行了认定和归属, 得到了  $5d6p^3D$  组态及  $^3F$  组态的  $a$  和  $b$  常数及相应跃迁的同位素移动。而实际上这种“两步走”的方法将不可避免地带来一些不确定性及不可靠因素。

本文以  $6s5d^3D_2 \rightarrow 6p5d^3F_2$  跃迁为例, 提出并演示了光泵选择激发的方法, 利用  $6s6s^1S_0 \rightarrow 6s6p^3P_1$  跃迁, 有选择地分别将 Ba 原子不同的同位素制备到  $6s5d^3D_2$  态不同的超精细能级上, 再扫出对应的  $6s5d^3D_2 \rightarrow 6p5d^3F_2$  跃迁的荧光光谱, 通过这几组光谱之间的对比直接实现了对 22 条谱线的认定和归属, 从而得到了  $^{135}\text{Ba}$  和  $^{137}\text{Ba}$  的  $6s5d^3D_2$  能级与  $6p5d^3F_2$  能级的超精细结构常数及该跃迁的同位素移动。

### 1 实验与结果

本文所涉及 Ba 原子低态能级结构及跃迁如图 1 所示。根据 Brust 和 Gallagher<sup>[6]</sup>的测量结果,  $6s6p^3P_1$  态向下自发辐射会有 17% 的概率到  $6s5d^3D_1$  态, 43% 的概率到  $6s5d^3D_2$  态, 所以可以使用  $6s6s^1S_0 \rightarrow 6s6p^3P_1$  跃迁来代替放电实现  $6s5d^3D_2$  态。这样便可以以有选择地制备某一种特定同

收稿日期: 2011-04-05, 修订日期: 2011-07-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2005CB724501)和国家自然科学基金项目(10827404)资助

作者简介: 仲嘉琪, 1981 年生, 中国科学院武汉物理与数学研究所博士研究生 e-mail: jqzhong@wipm.ac.cn

\* 通讯联系人 e-mail: mszhan@wipm.ac.cn

位素到  $6s5d\ ^3D_2$  态特定的子能级上,再扫出相应的光谱,从而极大地降低光谱的复杂程度,增加可识别性。同时  $6s5d\ ^3D_2$  态为亚稳能级,经估算其能级寿命为 60 s 左右<sup>[7]</sup>,所以其布居数的自发衰减对实验所产生影响可以忽略不计。

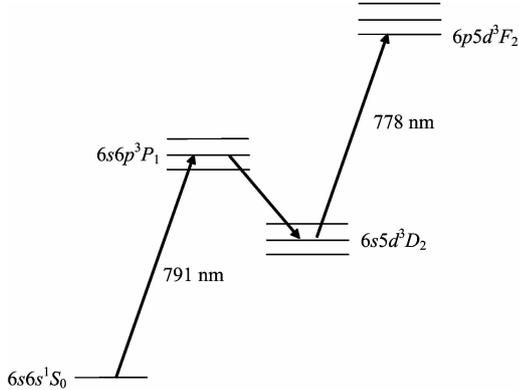


Fig. 1 Low lying energy level diagram of Ba. The related transitions in this work are indicated

具体实验装置如图 2 所示,自然丰度的 Ba 样品放在不锈钢原子炉中加热到 970K 后形成扩散原子束,经过放电区、态制备区后到达探测区。一台半导体激光器 (Toptica DL100) 产生 791 nm 的态制备激光,与原子束垂直作用,将原子制备到  $6s5d\ ^3D_2$  态;一台钛宝石激光器 (Coherent MBR110) 产生 778 nm 的探测光,该激光出射后分成两束,一束用于扫出  $6s5d\ ^3D_2 \rightarrow 6p5d\ ^3F_2$  跃迁的光谱,另外一束注入 300 MHz 的 F-P 干涉仪用于标定激光的频率。两台光电倍增管 (PMT) 分别探测态制备区和探测区的荧光,用于锁定激光频率和采集光谱。

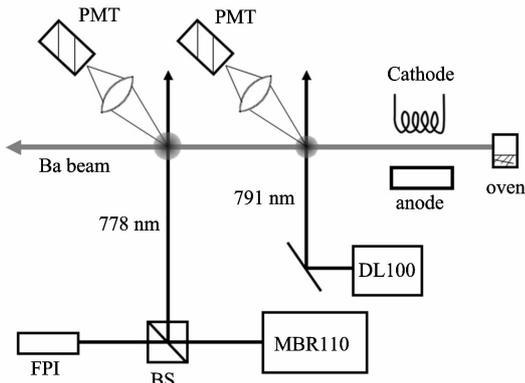


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

首先扫描 791 nm 的态制备光,可以得到  $6s6s\ ^1S_0 \rightarrow 6s6p\ ^3P_1$  跃迁的光谱,如图 3 所示。因为基态  $J$  量子数为零,能级不发生超精细分裂,所以该光谱直接反映了上能级  $6s6p\ ^3P_1$  态的同位素移动及超精细结构。其中  $^{138}\text{Ba}$  和  $^{136}\text{Ba}$  核自旋量子数  $I=0$ ,所以没有超精细结构,各只有一条谱线;  $^{137}\text{Ba}$  和  $^{135}\text{Ba}$  各有 3 条谱线分别对应  $F=3/2 \rightarrow 1/2$ ,  $F=3/2 \rightarrow 3/2$  和  $F=3/2 \rightarrow 5/2$  的跃迁。我们将 791 nm 制备光的频率依次对准其中的一条谱线来选择制备特定的同位素到特定的超精细能级上去,再使用 778 nm 探测激光扫描,就得到

了相应的若干组光谱。根据跃迁选择定则,791 nm 制备光所对准的谱线与最终 778 nm 探测光可能扫出的谱线之间的对应关系如表 1 所示,实验中得到的  $^{135}\text{Ba}$  和  $^{137}\text{Ba}$  各 3 组光谱如图 4(a)和(b)所示。根据表 1 中的相继关系与图 4 各光谱中包含的谱线及由 F-P 干涉仪所标定的间距,我们便可以很确定地实现对所有的谱线进行认定和归属。尽管其中有一些谱线重合的现象,791 nm 激光器有时稍有多模也会连带扫出  $^{138}\text{Ba}$  和  $^{136}\text{Ba}$  的谱线,但这并不影响最终的结果。 $^{138}\text{Ba}$  和

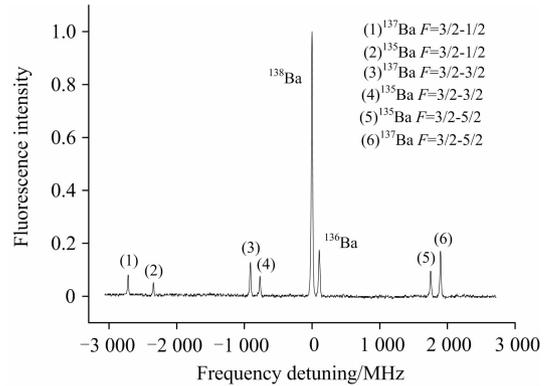


Fig. 3 Spectrum of  $6s6s\ ^1S_0 \rightarrow 6s6p\ ^3P_1$  transition

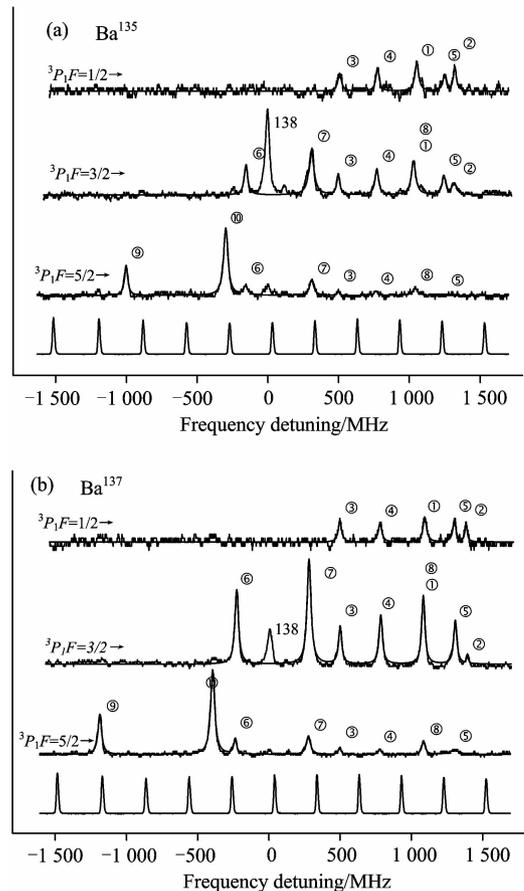


Fig. 4 The spectra of  $6s5d\ ^3D_2 \rightarrow 6p5d\ ^3F_2$  transition taken after the 791 nm selective optical pumping of  $6s6s\ ^1S_0 \rightarrow 6s6p\ ^3P_1$  transition

(a) and (b) is from  $^{135}\text{Ba}$  and  $^{137}\text{Ba}$  respectively

<sup>136</sup>Ba 谱线的出现, 反而可以对定标起到一定的帮助作用。谱线认定及归属的结果采用表 1 中的谱线编号在图 4 中标出。

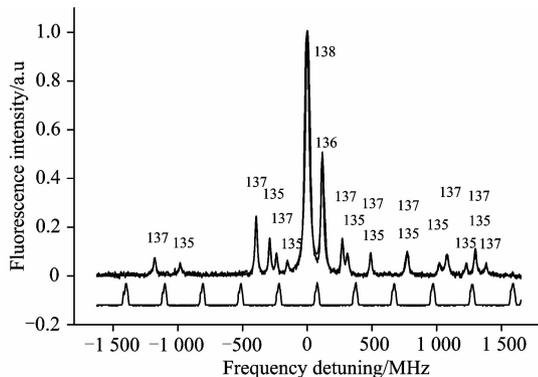
**Table 1 Successive relations between <sup>1</sup>S<sub>0</sub> → <sup>3</sup>P<sub>1</sub> hyper-fine pumping transitions and corresponding detectable lines in <sup>3</sup>D<sub>2</sub> → <sup>3</sup>F<sub>2</sub> probing transitions**

<i>F</i> (6 <i>s</i> 6 <i>p</i> <sup>3</sup> <i>P</i> <sub>1</sub> )	<i>F</i> (6 <i>s</i> 5 <i>d</i> <sup>3</sup> <i>D</i> <sub>2</sub> )	<i>F</i> (6 <i>p</i> 5 <i>d</i> <sup>3</sup> <i>F</i> <sub>2</sub> )	谱线编号
1/2	1/2	1/2	①
		3/2	②
	3/2	1/2	③
		3/2	④
		5/2	⑤
3/2	1/2	1/2	①
		3/2	②
		5/2	③
	3/2	3/2	④
		5/2	⑤
5/2	5/2	3/2	⑥
		5/2	⑦
		7/2	⑧
		1/2	③
		3/2	④
	7/2	3/2	⑤
		5/2	⑥
		7/2	⑦
		5/2	⑧
		7/2	⑨
		7/2	⑩

为了使谱线的认定和归属更加直观并提高定标的准确度, 我们同样采用放电态制备的方法, 得到了包含 <sup>137</sup>Ba, <sup>135</sup>Ba, <sup>138</sup>Ba 和 <sup>136</sup>Ba 四种同位素 6*s*5*d* <sup>3</sup>*D*<sub>2</sub> → 6*p*5*d* <sup>3</sup>*F*<sub>2</sub> 跃迁的全谱, 同时用 300 MHz 的 F-P 干涉仪定标, 如图 5 所示, 最终得到 <sup>136</sup>Ba 相对 <sup>138</sup>Ba 谱线的频率移动为 (118 ± 2) MHz, <sup>137</sup>Ba 和 <sup>135</sup>Ba 各谱线相对 <sup>138</sup>Ba 谱线的能级移动及上下超精细能级各自的劈裂间距如表 2 和表 3 所示。

## 2 数据处理

原子的超精细能级<sup>[8]</sup>



**Fig. 5 Full spectrum of 6*s*5*d* <sup>3</sup>*D*<sub>2</sub> → 6*p*5*d* <sup>3</sup>*F*<sub>2</sub> transition taken after discharge**

**Table 2 Spectral lines' detuning from <sup>138</sup>Ba**

谱线编号	相对 138 移动 /MHz	谱线编号	相对 138 移动 /MHz
135 ①	1 025	137 ①	1 083
135 ②	1 297	137 ②	1 380
135 ③	492	137 ③	492
135 ④	781	137 ④	781
135 ⑤	1 228	137 ⑤	1 297
135 ⑥	-156	137 ⑥	-241
135 ⑦	311	137 ⑦	272
135 ⑧	1 025	137 ⑧	1 083
135 ⑨	-998	137 ⑨	-1 198
135 ⑩	-293	137 ⑩	-401

**Table 3 Splitting spacings between hyper-fine sublevels of <sup>135</sup>Ba and <sup>137</sup>Ba**

精细能级	相邻超精细能级	劈裂间距/MHz
135 6 <i>s</i> 5 <i>d</i> <sup>3</sup> <i>D</i> <sub>2</sub>	<i>F</i> =1/2-3/2	535
	<i>F</i> =3/2-5/2	917
	<i>F</i> =5/2-7/2	1 311
135 6 <i>p</i> 5 <i>d</i> <sup>3</sup> <i>F</i> <sub>2</sub>	<i>F</i> =1/2-3/2	275
	<i>F</i> =3/2-5/2	468
	<i>F</i> =5/2-7/2	713
137 6 <i>s</i> 5 <i>d</i> <sup>3</sup> <i>D</i> <sub>2</sub>	<i>F</i> =1/2-3/2	597
	<i>F</i> =3/2-5/2	1 018
	<i>F</i> =5/2-7/2	1 472
135 6 <i>p</i> 5 <i>d</i> <sup>3</sup> <i>F</i> <sub>2</sub>	<i>F</i> =1/2-3/2	288
	<i>F</i> =3/2-5/2	514
	<i>F</i> =5/2-7/2	804

$$E_F = E_J + E_{M1} + E_{E2} = E_J + \frac{ah}{2}K +$$

$$\frac{bh}{8} \frac{3K(K+1) - 4I(I+1)J(J+1)}{I(2I-1)J(2J-1)}$$

$$K = F(F+1) - I(I+1) - J(J+1) \quad (1)$$

其中  $E_J$  为精细能级,  $E_{M1}$  为原子核磁偶级修正项,  $E_{E2}$  为原子核电四极修正项。a 和 b 分别为磁偶极修正常数与电四极修正常数。

由式(1)可得超精细能级劈裂间距为

$$\Delta\nu_{F,F-1} = \frac{1}{h}(E_F - E_{F-1}) = aF + \frac{3bF[F^2 - I(I+1) - J(J+1) + 1/2]}{2I(2I-1)J(2J-1)}, I, J \geq 1 \quad (2)$$

将表 3 中测得的能级劈裂间距, 代入式(2)进行最小二乘法拟合便得到相应能级的常数 a 与常数 b。<sup>135</sup>Ba 6*s*5*d* <sup>3</sup>*D*<sub>2</sub> 能级的 a 为 370 MHz, b 为 19 MHz; 6*p*5*d* <sup>3</sup>*F*<sub>2</sub> 能级的 a 为 196 MHz, b 为 28 MHz。<sup>137</sup>Ba 6*s*5*d* <sup>3</sup>*D*<sub>2</sub> 能级的 a 为 413 MHz, b 为 27 MHz; 6*p*5*d* <sup>3</sup>*F*<sub>2</sub> 能级的 a 为 217 MHz, b 为 47 MHz。

由式(1)可得同位素的各谱线相对 <sup>138</sup>Ba 谱线的频率移动为

$$\Delta\nu = \nu - \nu_{138} = \frac{1}{h}(E_{F_{up}} - E_{F_{down}}) - \nu_{138} =$$

$$\frac{1}{h}(E_{J_{\text{up}}} - E_{J_{\text{down}}}) - \nu_{138} + \frac{1}{h}(E_{M1_{\text{up}}} + E_{E2_{\text{up}}} - E_{M1_{\text{down}}} - E_{E2_{\text{down}}}) = \Delta\nu_{IS} + \frac{1}{h}(E_{M1_{\text{up}}} + E_{E2_{\text{up}}} - E_{M1_{\text{down}}} - E_{E2_{\text{down}}}) \quad (3)$$

其中  $\Delta\nu_{IS}$  为该跃迁的同位素移动, 后面括号中的各项由  $a$  和  $b$  常数确定。将表 2 中各谱线相对的<sup>138</sup>Ba 谱线的频差分别代入式(3)求解并取平均值, 得到<sup>135</sup>Ba, <sup>137</sup>Ba  $6s5d\ ^3D_2 \rightarrow 6p5d\ ^3F_2$  跃迁的同位素移动分别为  $-186$  和  $-234$  MHz。

### 3 结 论

从实验数据上看, 与文献[3]和[5]中的结果是符合的, 测量精度甚至要稍差一些, 但本工作提出并演示了一种光泵预选态的方法, 在单次实验中直接实现了对所有谱线的认定和归属, 在增加测量可靠性等方面具有很重要的意义, 并且同样适用于测量很多其他原子的能级和跃迁。

### References

- [1] De S, Dammalapati U, Jungmann K, et al. Phys. Rev. A, 2009, 79: 041402(R).
- [2] Ishii S Ohlendorf W. Rev. Sci. Instrum., 1972, 43: 1632.
- [3] Stephen G Schmelling Phys. Rev. A, 1973, 9: 1097.
- [4] Grundevik P, Lundberg H, Nilsson L, et al. Phys. A- Atoms and Nuclei, 1982, 306: 195.
- [5] Grundevik P, Gustavsson M, Olsson G, et al. Phys. A- Atoms and Nuclei, 1983, 312: 1.
- [6] Brust J Gallagher A C. Phys. Rev. A, 1995, 52: 2120.
- [7] Migdalek J, Baylis W E. Phys. Rev. A, 1990, 42: 6897.
- [8] Radzig A A, Smirnov B M. Reference Data on Atoms, Molecules, and Ions. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1985.

## Direct Determination of Hyperfine Structures and Isotope Shifts in the $6s5d\ ^3D \rightarrow 6p5d\ ^3F$ Transitions of Ba I

ZHONG Jia-qi<sup>1,2,3</sup>, YU Geng-hua<sup>1,2,3</sup>, WANG Jin<sup>1,2</sup>, ZHAN Ming-sheng<sup>1,2\*</sup>

1. State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China
2. Center for Cold Atom Physics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China
3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In the present experiments, a new method of atomic spectral measurement using states optical pre-selection was proposed and demonstrated, and the measurement of hyperfine-structures and isotope shifts in the  $6s5d\ ^3D \rightarrow 6p5d\ ^3F$  transitions of Ba I was taken as an example. A 791 nm laser was used to excite the different hyperfine transitions  $6s6s\ ^1S_0 \rightarrow 6s6p\ ^3P_1$  for different isotopes of barium and different hyperfine energy-levels of  $6s5d\ ^3D_2$  for these isotopes were populated by the  $6s6p\ ^3P_1 \rightarrow 6s5d\ ^3D_2$  spontaneous radiations, then the corresponding fluorescence spectra of  $6s5d\ ^3D_2 \rightarrow 6p5d\ ^3F_2$  transitions excited by another 778 nm laser were recorded. Comparing of these spectra, 22 lines were recognized and the hyperfine-structure constants of  $6s5d\ ^3D_2$  and  $6p5d\ ^3F_2$  of <sup>135</sup>Ba and <sup>137</sup>Ba were evaluated consequently while the isotope shifts of these transitions were also determined.

**Keywords** Atomic spectroscopy; Atomic hyperfine-structure; Isotope shifts; Fluorescence

(Received Apr. 5, 2011; accepted Jul. 20, 2011)

\* Corresponding author