

$^{141}\text{Pr}^+$ 波长 569.08 nm 谱线超精细结构测量^{*}

马洪良 陆 江 王春涛

(上海大学物理系, 上海 200436)

(2002 年 1 月 9 日收到 2002 年 6 月 16 日收到修改稿)

利用共线快离子束-激光高分辨光谱学测量了 $^{141}\text{Pr}^+$ 波长为 569.08nm 谱线的超精细结构光谱, 由此得到超精细相互作用常数和参与跃迁激发态、亚稳态能级的超精细能级分裂. 与已有的数据比较, 在实验误差范围内一致, 但测量精度提高了一个数量级.

关键词: 超精细结构, 快离子束-激光光谱学, 磁偶极矩和电四极矩超精细作用常数

PACC: 3280, 3290

1. 引 言

核外电子在原子核处产生电磁场, 这个电磁场与核自旋角动量、高阶电磁多极矩相互作用, 使原子光谱产生比精细结构更小的超精细分裂. 原子的超精细结构包括磁偶极超精细结构和电四极超精细结构. 核磁矩与核处磁场相互作用产生磁偶极超精细结构; 当原子核电荷分布偏离球对称时形成电四极矩, 它与核外电子产生的电场梯度相互作用引起电四极矩超精细结构. 通过测量原子的超精细结构光谱, 得到磁偶极矩和电四极矩常数, 由此确定激发态能级的超精细分裂, 同时提供研究原子核和原子结构两方面的信息.

由于超精细分裂比精细结构更小, 达到 0.001cm^{-1} , 因此利用高分辨光谱学技术测量超精细结构光谱, 主要方法包括傅里叶变换光谱 (Fourier-transform spectroscopy) 仪^[1]、原子束-激光光谱学 (atomic beam-laser spectroscopy)^[2]、共线快离子束-激光光谱学 (collinear fast-ion-beam laser spectroscopy)^[3-6] 和共线激光-射频双共振光谱学 (laser-rf double resonance spectroscopy)^[7,8]. 自 20 世纪 80 年代以来, 由于激光器技术和计算机技术的迅速发展, 超精细结构的研究十分活跃, 许多研究小组发表了关于稀土元素原子、离子的超精细结构的研究工作. Ginibre 小组利用傅里叶变换光谱仪 (Grating photographic spectrograms and Fourier-transform interfero-

grams)^[9] 测量了 $^{141}\text{Pr}^+$ 光谱范围为 $2783-27920\text{cm}^{-1}$ 超精细结构光谱, 假定电四极矩动量为零, 得到了磁偶极作用常数. 日本原子能研究所的一个研究小组利用共线快离子束-结构光谱学测量了 $^{141}\text{Pr}^+ 4f^3 5d^5 G-4f^3 6P^5 H$ 跃迁的超精细光谱, 得到了对应激发态和亚稳态的电四极矩和磁偶极矩作用常数^[2,10], 随后他们测量了 ^{141}Pr 超精细结构光谱^[9] 和放射性同位素 ^{143}Pr ($I = \frac{7}{2}^+$) 的超精细结构光谱^[4]. Hölhe 小组利用快离子束-激光光谱学测量了 $^{139}\text{La}^+ 5d^2$ 和 $5d6s$ 能级的超精细结构常数^[11]. Yong 等人利用共线快离子束-激光光谱学测量了 $^{147,149}\text{Sm}^+$ 亚稳态和激发态的超精细结构^[12]. Uppsala 大学物理系的一个小组利用共线快离子束-激光光谱学测量了 $^{147-150, 152, 154}\text{Sm}^+$ 的同位素位移和超精细结构^[13].

Childs 等人利用原子束-激光-射频双共振光谱学测量了 $^{143,145}\text{Nd I } 4f^4 5d6s$ 组态 $^7L_{5-11}$ 和 $^7K_4$ 亚稳态的超精细结构^[8] 和 ^{159}Tb , $^{161,163}\text{Dy}$, ^{169}Tm 激发态 $4f^N 6s^2$ 组态的超精细结构^[14]. 随后他们利用从头算方法 (*ab initio* calculation) 计算了稀土原子 $4f^N 6s^2$ 组态的超精细结构^[15]. 本文介绍利用快离子束-激光高分辨光谱学测量了 $^{141}\text{Pr}^+$ 波长为 569.08nm 谱线的超精细结构光谱.

2. 快离子束-激光光谱学装置

许多研究小组用共线离子束-激光光谱学方法

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 19874015) 及上海市科学技术委员会青年基金资助的课题.

(collinear fast-ion-beam laser spectroscopy method)^[3,4] 获得了很高的测量精度,其基本原理是 利用与离子束共线的激光把离子从某一亚稳态激发到待研究的激发态,而后记录从这个激发态退激时发射的荧光. 这种方法是在束箔光谱学(存在级联跃迁干涉)和原子束激光光谱学(存在原子速度分布引起的多普勒增宽)基础上发展起来的,具有高分辨率、选择性激发等特点. 可研究多种元素的高电荷态、高激发态离子. 共线快离子束激光光谱学利用聚簇效应和共线条件极大地提高了光谱分辨率.

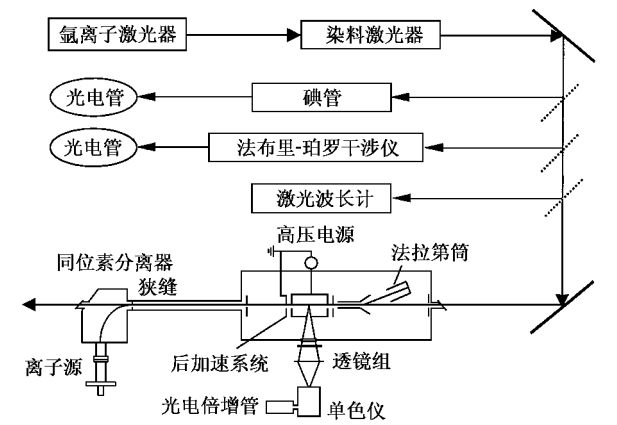


图1 实验装置示意图

图1为共线快离子束-激光光谱实验装置示意图,具有单横模、自动扫描等特点的激光器(CR899-29, Coherent Int.)提供波长可连续调谐的激光,波长范围为 560—620nm (激光器染料为罗丹明 6G),它与来自小型同位素分离器(Danfysik 1080-30)单能、同位素纯的离子束反方向共线,离子在后加速区域通过连续扫描激光频率实现共振激发. 退激荧光通过滤色片射入单色仪,从而限制杂散激光入射到光电倍增管(EMI-9789B). 测量系统同时在线记录来自退激荧光光子信号、激光通过法布里-珀罗干涉仪入射到光电倍增管的信号和激光透过碘蒸气入射到光电倍增管的吸收光谱. 激光选择性地抽运处于亚稳态的离子到激发态,一般存在很多退激通道. 选择记录通道的依据是:退激荧光波长与抽运激光波长相差较大,可以有效地消除杂散激光引起的本底. 退激荧光波长应在光电倍增管灵敏度峰值附近,对于EMI-9789B 光电倍增管,选择记录的荧光波长范围为 370—450nm.

3. 实验结果与讨论

图2(a)给出¹⁴¹Pr⁺ (1005.57)₇⁰→(28009.80)₇跃迁(波长为 569.08 nm)超精细结构光谱. 锆核自旋(*I*)为 5/2,参与跃迁的亚稳态和激发态电子总角动量量子数(*J*)均为 7,耦合总量子数(*F*)均为¹⁹/₂,¹⁷/₂,¹⁵/₂,¹³/₂,¹¹/₂,⁹/₂. 根据跃迁选择规则,共有 16 个跃迁,即满足 Δ*F* = 0 的 6 个跃迁,满足 Δ*F* = ±1 的各 5 个跃迁. 图中可以分辨出所有 16 个超精细分裂共振峰.

在一般情况下,原子电子与原子核之间同时存在磁偶极和电四极超精细相互作用,实验上测量的超精细结构是这两部分作用的叠加. 超精细相互作用引起能量分裂的一般表达式为

$$\Delta E = A \frac{K}{2} + B \frac{\frac{3}{2}K(K+1) - 2I(I+1)J(J+1)}{4I(2I-1)J(2J-1)}, \tag{1}$$

其中 $K = F(F+1) - I(I+1) - J(J+1)$, *A* 和 *B* 分别表示磁偶极超精细作用常数和电四极超精细作用常数. 由此得到波长为 569.08nm 谱线超精细作用常数 *A* 和 *B*, 见表1. 由于¹⁴¹Pr 中子数为 82,核近似球对称分布,电四极矩的作用较小. 根据不同超精细分裂由方程(1)给出的对应方程组,求解上、下能级的 *A*, *B* 和中心波数等 5 个未知量,表1中的误差是求解矛盾方程组的拟合偏差,主要来源包括确定超精细分裂共振峰位置引入的误差、同位素分离器加速电压的微小波动引入的误差和拟合运算引入的误差. 根据表1中超精细相互作用常数给出能级的参与跃迁激发态和亚稳态的超精细分裂,见图2(b).

表1 ¹⁴¹Pr⁺ 波长为 569.08 nm 谱线超精细作用常数

跃迁波长/nm	能级/cm ⁻¹	<i>A</i> /MHz	<i>B</i> /MHz	<i>A_C</i> /MHz [*]
569.08	11005.57	547.0 ± 1.5	9.1 ± 9.8	
	28577.79	530.8 ± 1.1	-4.9 ± 5.4	537 ± 16

^{*} *A_C* 为 Ginibre 发表的实验结果^[9], 假定电四极超精细作用常数 *B* 为零.

与已发表的实验数据比较^[9], 在实验误差范围内一致,但本文的测量精度提高了一个数量级.

Ginibre 利用傅里叶变换光谱仪测量锆低温灯的谱线^[9],由于存在多普勒展宽,一般只能测量核近似球对称分布离子的超精细光谱,不能给出磁偶极超精

细作用常数,但测量的谱线范围较宽.共线快离子束激光光谱学方法具有无多普勒展宽、选择性激发等优点,可以很好地分辨所有超精细分裂共振峰.

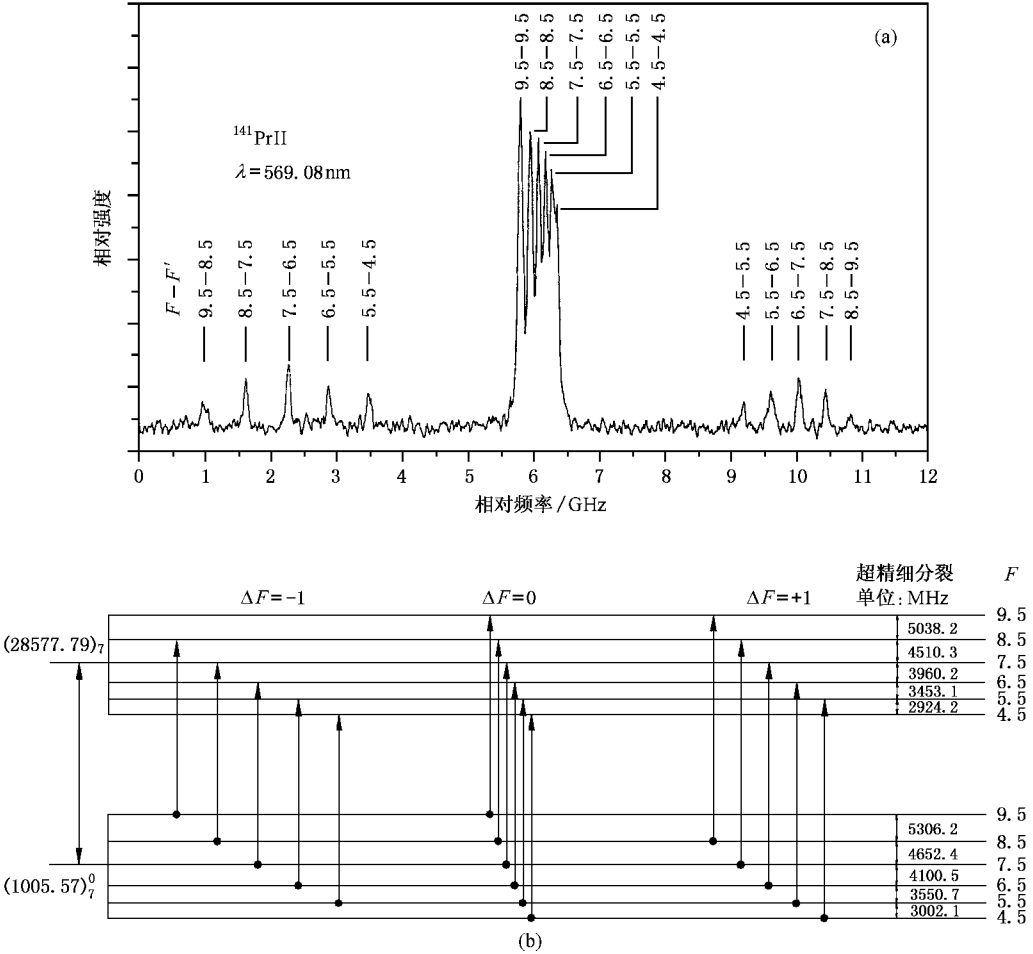


图 2 $^{141}\text{Pr}^+ (1005.57)_7^0 \rightarrow (28009.80)_7$ 跃迁超精细结构光谱 (a) 及参与跃迁的激发态和亚稳态的超精细能级分裂 (b)

超精细结构的测量对于研究原子和原子核的基本相互作用具有重要意义,是研究原子能级结构和能级参数等基本物理特性不可缺少的部分;是天体

物理学、天文物理学中一种有效的测量方法^[16-18],同时也为物理学、化学、生物学的许多现象提供了高分辨测试手段.

[1] George S *et al* 1985 *J. Opt. Soc. Am.* B **2** 1258

[2] Kuwamota T *et al* 1996 *J. Phys. Soc. Japan* **65** 3180

[3] Ma H L *et al* 1999 *J. Phys.* B **32** 1345

[4] Limuza H *et al* 1994 *Phys. Rev. C* **50** 661

[5] Ma H L *et al* 1997 *Acta Phys. Sin.* (Overseas Edition) **6** 677

[6] Ma H L and Yang F J 2001 *Chin. Phys.* **10** 512

[7] Silverans R E *et al* 1986 *Phys. Rev. A* **33** 2117

[8] Childs W J *et al* 1991 *Phys. Rev. A* **44** 760

[9] Ginibre A 1981 *Phys. Scr.* **23** 260

[10] Iimura H *et al* 1990 *J. Phys. Soc. Japan* **59** 4208

[11] Höhle C *et al* 1982 *Z. Phys. A* **304** 279

[12] Yong L *et al* 1987 *Phys. Rev. A* **36** 2148

[13] Villerness P *et al* 1995 *Phys. Rev. A* **51** 2838

[14] Childs W J *et al* 1984 *J. Opt. Soc. Am.* B **1** 22

[15] Cheng K T and Childs W J 1985 *Phys. Rev. A* **31** 2775

[16] Johansson S *et al* 1996 *Astrophys. J.* **462** 943

[17] Leckrone D S *et al* 1993 *Phys. Scr. T* **47** 149

[18] Leckrone D S *et al* 1991 *Astrophys. J.* **377** L377

Measurement of hyperfine structure spectrum in 569.08 nm line of $^{141}\text{Pr}^+$ *

Ma Hong-Liang Lu Jiang Wang Chun-Tao

(*Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200436, China*)

(Received 9 January 2002 ; revised manuscript received 16 June 2002)

Abstract

Hyperfine structure spectrum in 569.08nm line of $^{141}\text{Pr}^+$ was measured by the collinear fast-ion-beam laser spectroscopy. All the spectral lines were resolved. The magnetic dipole and electric quadruple coupling constants, and hyperfine splitting of the metastable levels and excited levels were determined. Our results were in agreement with the published data within experiment uncertainty. The accuracy of the magnetic dipole coupling constants was improved by one order of magnitude compared with the published data.

Keywords : hyperfine structure, fast-ion-beam laser spectroscopy, magnetic dipole and electric quadruple coupling constants

PACC : 3280, 3290

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 19874015), and the Foundation for Young Scientists from the Shanghai Science and Technology Commission, China.