

文章编号 : 0253-2239(2002)07-0893-04

Na-Na 碰撞引起的钠共振荧光线型变异*

张衍亮¹⁾ 赵咏梅¹⁾ 张循利¹⁾²⁾ 孙真荣¹⁾ 丁良恩¹⁾ 王祖康¹⁾

(1), 华东师范大学物理系光谱学与波谱学教育部重点实验室, 上海 200062)
(2), 滨州师专物理系, 滨州 256604

摘要: 在钠原子气体中, 观察到了由激光诱导的光抽运和 Na-Na 碰撞效应引起的钠原子共振荧光的线型变化。运用计及“速度改变碰撞”效应的速率方程计算和讨论了共振荧光的线型变窄现象。

关键词: 速度改变碰撞; 光抽运; 线型变异

中图分类号: O434.14 文献标识码: A

1 引 言

存在于光学厚(optical thick)气体样品中的频繁碰撞过程会导致很多有趣现象的产生。例如, 缓冲气体与样品原子的碰撞可产生“速度改变碰撞”效应^[1]、由这种效应而导致暗态共振线型的变窄和相干捕获的增强^[2,3]、原子烧孔效应的增强及大量极化原子的产生^[4-6]。此外, 在充入缓冲气体的钠和铯样品中, 观察到了由缓冲气体原子与样品原子碰撞而引起的共振荧光线型的变异^[7-9]。可见, 对碰撞过程及其对物理效应影响的研究是非常重要的。

本文实验在未加缓冲气体的高密度原子样品和适宜的光功率密度情况下观察到了由 Na-Na 碰撞引起的共振荧光线型变窄现象, 并运用计及“速度改变碰撞”效应的速率方程进行了计算。理论计算与实验结果符合得很好。

2 实 验

实验装置如图 1 所示, 以半导体激光器(Verdi-10)抽运的环形染料激光器(CR899-29)作为抽运光源, 染料是若丹明 6G, 输出波长在钠 $3S-3P_{1/2}$ 共振激发波长 589.6 nm 附近调谐, 线宽小于 500 kHz; Na 蒸气通过加热十字型热管炉产生, 加热区域长约 10 cm, 工作温度范围为 373 K~613 K; $3P_{1/2} \rightarrow 3S$ 的共振荧光经组合滤波片(透过波长范围 580 nm~610 nm)后由安置在侧向窗口的光电

倍增管 PMT 接收, 信号经锁相放大器放大并输送到计算机进行记录。所记录的碘吸收谱用来监测 CR899-29 输出激光的波长, 其精度为 0.001 cm^{-1} 。

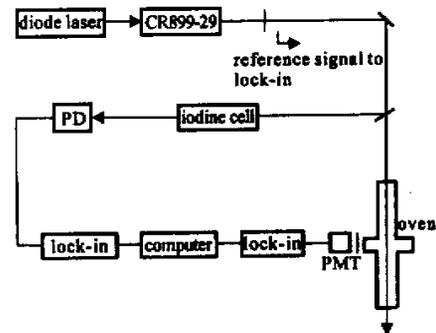


Fig. 1 Experimental setup. PD: photo diode; PMT: photo multiplier tube

图 2 给出了温度为 543 K, 激光功率分别为 0.5 mW、1.5 mW、7 mW、13 mW 和 20 mW 时所测得的钠共振荧光谱。图 2(f)给出了同时运用饱和和吸收技术在 423 K 下测得的对应于 $3S_{F=1} \rightarrow 3P_{1/2}$ 和 $3S_{F=2} \rightarrow 3P_{1/2}$ 的两个吸收峰, 并以此作为两个超精细结构的频标。从图 2 可以看到, 在 0.5 mW 时, 上述两个超精细结构勉强被分辨, 但随着激光功率的增加, 超精细结构已经完全不能分辨。

图 3 是在温度分别为 423 K 和 543 K 下所测得的共振荧光线宽(FWHM)随激光功率的变化图。可以看到, 在 423 K 时, 线宽随激光功率的变化很小, 基本保持 4 GHz 不变。而在 543 K 时, 线宽随激光功率的增大而明显减小。

* 国家自然科学基金(19734003 和 10074015)资助课题。

E-mail: zyanliang@yahoo.com

收稿日期: 2001-07-16; 收到修改稿日期: 2001-09-28

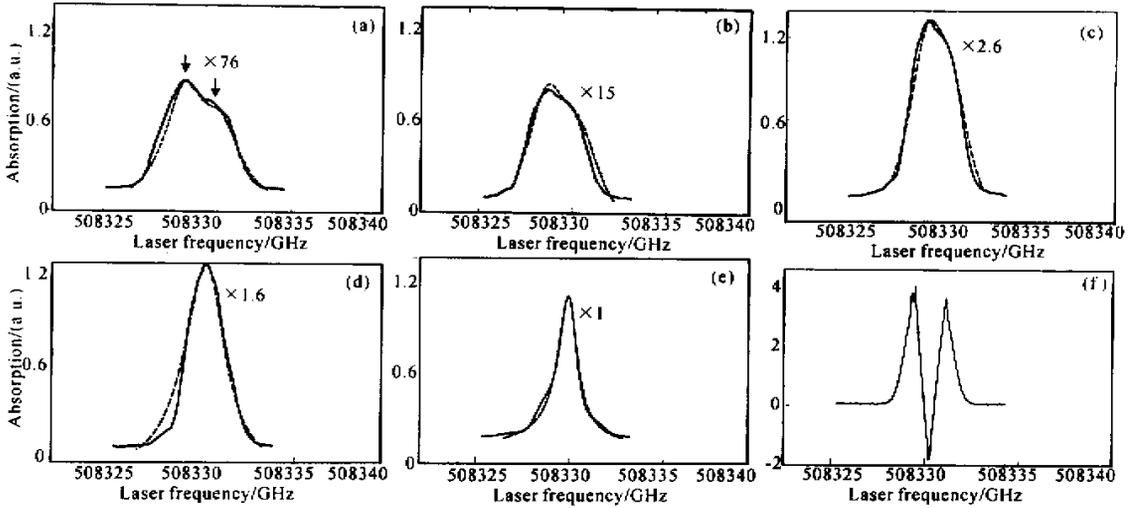


Fig. 2 Observed (solid line) and calculated (dotted line) fluorescence spectra versus laser frequency for the different laser powers at heat pipe temperature $T = 543\text{ K}$; (a) 0.5 mW; (b) 1.5 mW; (c) 7 mW; (d) 13 mW; (e) 20 mW; (f) Recorded saturation absorption spectrum

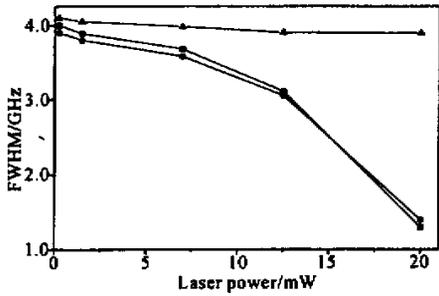


Fig. 3 FWHM of the observed fluorescence lines as a function of laser power for $T = 543\text{ K}$ (squares) and for $T = 387\text{ K}$ (triangles) with calculated FWHM (circles)

3 理论分析

“速度改变碰撞”效应可改变未与激光频率共振的原子速度,使其与激光频率共振而获得激发。这样整个多普勒速度分布的粒子都可以参与激发,从而极大地增强了吸收速率。当不存在“速度改变碰撞”效应时,激光只能激发多普勒速度分布中的一小

部分(Γ/D)基态粒子, Γ 和 D 分别为洛伦兹均匀加宽和多普勒加宽线型的半宽度。在本实验中,虽未加缓冲气体,但由于较高温下的Na原子之间碰撞频繁,亦可产生“速度改变碰撞”效应。

现将基态的两个超精细能级标为能级1和2,而将激发态标为能级3,如图4所示。

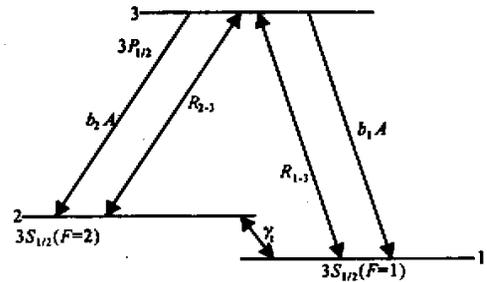


Fig. 4 Schematic representation of the three levels in the theoretical model with the levels 1, 2 and 3

在考虑速度改变碰撞时,速度方程中代表各能级布居分布的项必须对整个速度分布积分^[5]。对速度积分后的速率方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_3}{dt} &= R_{1-3} \left(N_3 - N_1 \frac{g_3}{g_1} \right) + R_{2-3} \left(N_3 - N_2 \frac{g_3}{g_2} \right) - (b_1 + b_2) AN_3 + \gamma_i N_3, \\ \frac{dN_2}{dt} &= R_{2-3} \left(N_2 \frac{g_3}{g_2} - N_3 \right) + b_2 AN_3 - \gamma_i \left(N_2 - \frac{g_2}{g_1 + g_2} \right), \\ \frac{dN_1}{dt} &= R_{1-3} \left(N_1 \frac{g_3}{g_1} - N_3 \right) + b_1 AN_3 - \gamma_i \left(N_1 - \frac{g_1}{g_1 + g_2} \right), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 N_i 为布居数密度,且假定系统总粒子数为 1。 g_i 为相应能级的简并度, R_{i-3} 为抽运速率, A 为自发辐射速率, b_i 为自发辐射的分支比率, γ_i 为原子逃逸出激光束的速率,该速率强烈依赖于样品的温度条件,且 $\gamma_i = V_{th}/r$ (V_{th} 为原子平均运动速度, r 为激光束的半径),抽运速率 R_{i-3} ($i = 1, 2$) 为^[8,9]

$$R_{i-3} = \frac{\pi I_L}{2I_S} b_i A V_i, \quad (2)$$

其中 I_L 为激光强度,而饱和光强 I_S 和佛克脱 (Voigt) 线型函数 V_i 分别为

$$I_S = \frac{h\omega_1^3 \Gamma}{2\pi c^2} \frac{D}{2\sqrt{\ln 2} \Gamma}, \quad (3)$$

$$V_i = \int dx G(x) L(x + \Delta_i, \Gamma_i), \quad (4)$$

其中,归一化高斯函数 $G(x)$ 及归一化洛伦兹函数 $L(x, \Gamma_i)$ 分别为

$$G(x) = \frac{\exp[-(x/V_{th})^2]}{V_{th}\sqrt{\pi}}, \quad (5)$$

$$L(x + \Delta_i, \Gamma_i) = \frac{\Gamma_i}{2\pi[(x + \Delta_i - \omega_1)^2 + \Gamma_i^2]}, \quad (6)$$

这里, $L(x + \Delta_i, \Gamma_i)$ 的半宽度

$$\Gamma_i = \frac{2\sqrt{\ln 2} \Gamma^2}{D},$$

增量为

$$\Delta_i = \frac{2\sqrt{\ln 2}(\omega_{3i} - \omega_1)}{D},$$

多普勒的半宽度

$$D = 7.163 \times 10^{-7} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \omega_1,$$

其中 T 为样品的温度, μ 为 Na 原子的原子量, ω_1 为激光的频率, ω_{3i} 为能级 3 与能级 i ($i = 1, 2$) 间的跃迁频率,钠原子均匀加宽 $\Gamma = 5 \times 10^9 \text{ s}^{-1} \text{ mbar}^{-1[10]}$ 。

R_{i-3} 中含有多普勒加宽的高斯线型与均匀加宽的洛伦兹线型的卷积 V_i ,所以在与原子共振的固定激光频率条件下, R_{i-3} 体现了具有多普勒速度分布的粒子的激发。在稳态条件下得到激发态的布居数

$$N_3 = \frac{1}{\chi(1+f)}, \quad (7)$$

其中

$$f = \frac{(g'_1 + g'_2 - 1)(1+a)g'_1 g'_2 V_1 V_2 W^2 + W[b_1 b_2 (g'_1 V_1 + g'_2 V_2) + a(b_1 V_1 + b_2 V_2)] + a}{(1+a)g'_1 g'_2 b_1 b_2 V_1 V_2 W^2 + (g'_1 b_1 V_1 + g'_2 b_2 V_2) a W} \quad (8)$$

$$g'_1 = \frac{g_1}{g_3}, \quad g'_2 = \frac{g_2}{g_3}, \quad a = \frac{\gamma_i}{A}, \quad W = \frac{I_L}{I_S(1+a)}. \quad (9)$$

因为实验中测得的荧光强度正比于激发态能级的粒子布居数,所以理论计算得到的布居数 N_3 随频率的变化就可以与实验荧光谱对照。图 2 给出了激发态布居在不同的激光功率下随激光频率变化的计算结果。从图中我们可以看出,随着功率的增大,线型变窄十分明显,而且计算与实验符合得很好。荧光谱半线宽随激光功率变化的计算和实验结果也基本一致,如图 3 所示。

总结 在本文的工作中,我们观察到了钠原子共振荧光线型变异和线宽变窄的现象。与以前相类似的实验相比,本工作是在没有充入缓冲气体的情况下实现线型变异和线宽变窄,充分证实了在没有缓冲气体的稠密钠原子气体样品中也存在由 Na-Na 碰撞引起的“速度改变碰撞”效应。而且由于处在辐射囚禁不明显的较低温度条件下,辐射囚禁对线型的影响甚小,使得实验与理论线型符合得很好。

参 考 文 献

- [1] Szöke A, Javan A. Effect of collisions on saturation behavior of the 1.15- μ transition of Ne studied with He-Ne laser. *Phys. Rev.*, 1966, **145**(1):137~147
- [2] Brandt S, Nagel A, Wynands R *et al.*. Buffer-gas-induced linewidth reduction of coherent dark resonances to below 50 Hz. *Phys. Rev. (A)*, 1997, **56**(2):R1063~R1066
- [3] Arimondo E. Relaxation processes in coherent population trapping. *Phys. Rev. (A)*, 1996, **54**(3):2216~2223
- [4] Renzoni F, Windholz L, Xu J H *et al.*. Hole burning in a sodium atomic vapour in presence of high pressure of heavy buffer gas. *Phys. Lett. (A)*, 1997, **227**(6):357~361
- [5] Quivers W W, Jr. Production of highly polarized vapors using laser optical pumping with velocity-changing collisions. *Phys. Rev. (A)*, 1986, **34**(5):3822~3838
- [6] Pappas P G, Forber R A, Quivers W W *et al.*. Polarized sodium nuclei produced by laser optical pumping with velocity changing collisions. *Phys. Rev. Lett.*, 1981, **27**(4):236~239
- [7] Walkup R, Spielfiedel A, Philips W D *et al.*. Line-shape changes due to optical pumping of Na in buffer gas. *Phys. Rev. (A)*, 1981, **23**(4):1869~1873
- [8] Tomasi F de, Allergini M, Arimondo E. Collision-

- enhanced resonance of laser-diode-excited Cs in a buffer gas. *Phys. Rev. (A)*, 1993, **48**(5) 3820~3829
- [9] Tomasi F de , Allergrini M , Arimondo E *et al.* . Lineshape changes in an optically thick Na vapour with a buffer gas. *Opt. Commun.* , 1994 , **112**(5,6) 289~295
- [10] Huennekens J , Gallaghter A. Self-broadening of the sodium resonance lines and excitation transfer between the $3P_{3/2}$ and $3P_{1/2}$ levels. *Phys. Rev. (A)* , 1983 , **27**(4) : 1851~1864

Line-Shape Changes of Na Resonance Fluorescence Due to Na-Na Collisions

Zhang Yanliang¹⁾ Zhao Yongmei¹⁾ Zhang Xunli¹⁾²⁾ Sun Zhenrong¹⁾
Ding Liang'en¹⁾ Wang Zugeng¹⁾

(1) , *Key Laboratory for Optics and Magnetic Resonance Spectroscopy , Department of Physics , East China Normal University , Shanghai 200062*
(2) , *Department of Physics , Binzhou Normal College , Binzhou 256604*

(Received 16 July 2001 ; revised 28 September 2001)

Abstract : In a dense Na vapor , the changes were observed in the Doppler-broadened shape of the resonance fluorescence produced by the combined effect of the induced optical pumping and Na-Na collisions. The observed narrowing of the fluorescence line-shape was explained by a rate equation with “ velocity change collision ” effect.

Key words : velocity changing collision ; optical pumping ; line-shape variation