

原子束在漫射光中的激光减速

陈洪新 蔡惟泉 束伟 李佛生 王育竹

(中国科学院上海光机所量子光学联合开放实验室, 上海 201800)

提要 报道了利用红移漫射光冷却原子的新机制。理论计算了二能级原子在这一光场中所受的辐射压力, 在实验上观测到了钠原子束在负失谐漫射光中的减速。

关键词 漫射光, 辐射压力, 激光减速

1 引言

自从 Hänsch 等提出利用原子与光子的动量交换减速原子速度以来^[1], 人们利用一些方法实现了原子的激光减速, 常用方法为激光频率扫描法^[2]、空间变化磁场法^[3]和利用强固定频率的准共振光或白光法^[4,5]。由于这些方法难度较大, 所以对实验条件要求很高。

本文提出一种利用积分球内漫射光产生的辐射压力实现对原子束减速的新机制, 这一冷却机制是利用漫射光的各个方向的光来补偿原子在减速过程中的多普勒频移, 因而较易实现原子的连续减速。在实验上我们成功地观测到了钠原子束在负失谐漫射光中的减速。

2 理论模型

原子在与光子交换动量而减速原子速度时, 原子与光子的运动方向必须相反。但当激光方向与原子运动方向夹角为 θ 时, 这时原子所感受到的激光频率 ω 为

$$\omega = \omega_1(1 + V/c \cos\theta) \quad (1)$$

这儿 ω_1 为激光频率, V 为原子运动速度, c 为光速。当原子跃迁频率 $\omega_0 = \omega$ 时, 原子激光频率共振, 所以共振频率为

$$V \cos\theta = \Delta c / \omega_1 \quad (2)$$

此处失谐量 $\Delta = \omega_0 - \omega_1$, 这时原子将吸收光子然后自发辐射产生自发辐射力^[6]。对一个二能级系统与一个行波场作用时, 这个自发辐射力为^[6]

$$F(\omega, V) = \hbar k \Gamma \frac{G}{1 + G + [(\Delta + kV \cos\theta) / \Gamma]^2} \quad (3)$$

其中 $G = I/I_{\text{sat}}$ 为饱和参量, I_{sat} 为饱和功率, $I = Uc$, U 为激光射入积分球内时球内漫射光的能量密度^[7], 这个力的方向与行波场的波矢方向相反。

对于一个理想情况下的各向均匀的红移漫射光区域, 由于漫射光有各种角度的光, 所以对

原子束内大部分原子的速度都将可以满足共振条件(2), 因而在原子速度减小时还可将继续减速^[7], 当考虑原子的吸收系数时, 原子在运动方向上所受的辐射压力为

$$F = -\frac{1}{2\pi} \hbar k \Gamma \left(\frac{\Gamma G B}{2kV(0.75 + G)} + \frac{\Delta G(C + D)}{0.75 + G} \right) \quad (4)$$

其中

$$B = \ln \frac{[0.25\Gamma^2 + (kV - \Delta)^2][\Gamma^2(1 + G) + (kV + \Delta)^2]}{[0.25\Gamma^2 + (kV + \Delta)^2][\Gamma^2(1 + G) + (kV - \Delta)^2]}$$

$$D = \frac{1}{kV(1 + G)^{0.5}} \left(\text{tg}^{-1} \frac{kV - \Delta}{\Gamma(1 + G)^{0.5}} + \text{tg}^{-1} \frac{kV + \Delta}{\Gamma(1 + G)^{0.5}} \right)$$

$$C = -\frac{2}{kV} \left(\text{tg}^{-1} \frac{2(kV - \Delta)}{\Gamma} + \text{tg}^{-1} \frac{2(kV + \Delta)}{\Gamma} \right)$$

1) 当 $|kV| \ll |\Delta|$ 时, $B \approx 0$, $D \approx 0$, $C \approx 0$, 则(4)式为

$$F = 0 \quad (5)$$

2) 当 $|kV| \ll |\Delta|$ 时, $|kV| \gg |\Gamma|$, $G \gg 1$, 则(4)为

$$F = \frac{\hbar k \Gamma \Delta}{kV} \quad (6)$$

(6) 式即为作用光强比饱和光强大的多, 且 $V/V_s \gg 1$ 时的辐射压力表达式。 Γ 为原子自发辐射率, V 为原子速度, V_s 为原子吸收一个光子的反冲速度。

图 1 为(4)式在 $\Delta = -850$ MHz, $G = 22$ 时辐射压力与速度的关系。这一辐射压力在大于临界点速度的将近 1000 m/s 的速度范围内都有很大的辐射压力, 所以可见利用这一条件下的辐射压力可以实现大于临界速度原子的连续减速。图 2 为 $\Delta = -140$ MHz 条件下的辐射压力与饱和参量 G 之间的关系, 当 G 增大时, 辐射压力也将增大。

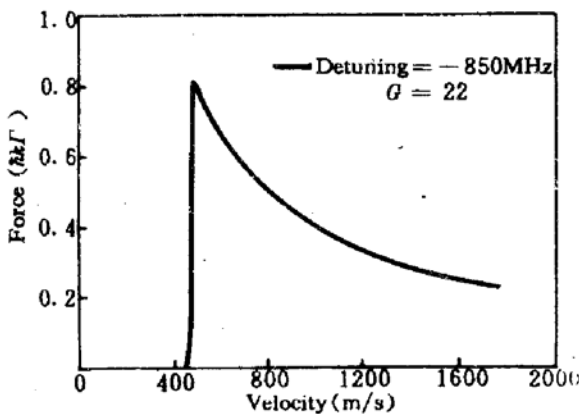


Fig. 1 Resonance-radiation pressure vs velocity with red diffuse light. Here $G = 22$, Detuning = -850 MHz

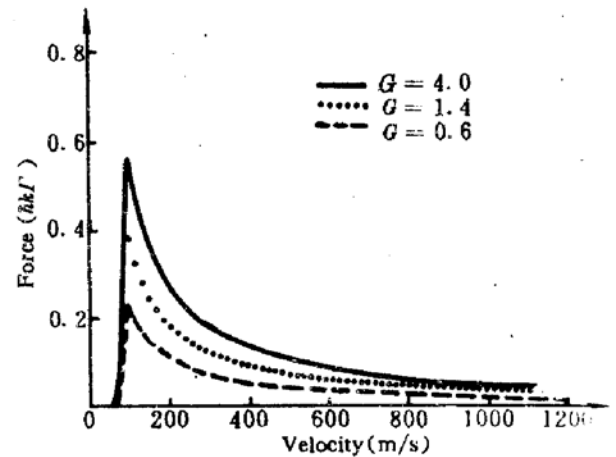


Fig. 2 Resonance-radiation pressure vs saturation parameter and velocity in a diffuse light. Here detuning = -140 MHz

3 实验与结果

3.1 实验装置

图 3 是原子束在漫射光中减速的实验系统。原子束装置是一个长为 200 cm、直径为 22 cm

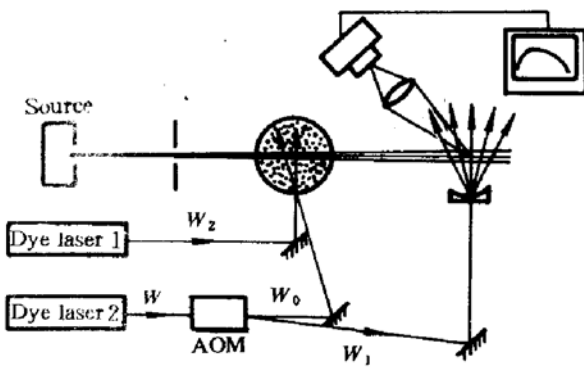


Fig. 3 Experimental setup

的圆柱形真空系统,真空度达 1.33×10^{-4} Pa。钠原子从一个直径为 $500 \mu\text{m}$ 的小孔中喷出形成原子束,在相距炉孔 37 cm 处有一直径为 $500 \mu\text{m}$ 的准直孔。计算可知原子束经准直后的发散角小于 $3 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 。作用区是一个内径为 4.9 cm 的积分球,内涂有高反射膜,反射率约为 93% ,并在球上开有三个直径小于 $800 \mu\text{m}$ 的小孔,分别为原子束进、出孔和激光入射口。当激光射入积分球内时将形成较理想的漫射区域。激光系统为二台连续染料激光器,探测利用负失谐扩束激光的空间诱导荧光光谱方法测量原子速度分布^[8],用 OMA 记录空间荧光分布情况。

实验时,让二个激光分别射入积分球内,并且频率 ω_0 , ω_2 分别对应于钠原子 D_2 线的 $3P_{3/2}$ 至 $3S_{1/2}$ 的 $F = 1$, $F = 2$ 的精细能级,且分别有一 140 MHz 和 -800 MHz 的失谐。在这种情况下不仅有效地克服了光抽运效应,而且 ω_0 , ω_2 激光射入作用区后形成的漫射光将同时减速原子。速度分布的探测将由声光调制器 (AOM) 的 $+1$ 级光来实现。我们在实验上利用 AOM 调制作用,使探测光对应 $3P_{3/2}(F = 3) \rightarrow 3S_{1/2}(F = 2)$ 有一 40 MHz 的失谐量,并用 $\lambda/4$ 片形成圆偏振光,在 $0.5 \times 10^{-4} \text{ T}$ 的磁场中探测原子束空间荧光分布。然后利用文献[8]中的方法把原子的空间荧光分布转换成速度分布。实验上探测光功率为 11 mW , 钠炉温度为 $247 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.2 实验结果

利用上面的实验观得到以下实验结果:

1) 当无作用激光时,可探测到图 3(a) 的原子束速度分布,其最可几速度为 780 m/s 。

2) 当 ω_0 激光射入积分球后(无 ω_2 激光),这时由于光抽运效应,在探测区几乎无荧光,可见 ω_0 的作用使原子都抽运到另一能级上。

3) 再让 ω_2 射入积分球,并使 ω_2 的失谐量为 -80 MHz ,这时在探测区内测得图 4(b), (c) 的结果,可见在这种情况下不仅有效地克服了光抽运效应,而且使原子得到了减速。

4) 当 ω_2 激光功率增大时,原子减速效果增强。图 4 为原子速度减速情况随作用光参量 G 变化的关系。可见在 $G = 3.1$ 时,原子速度分布的最可几速度由 780 m/s 减至 674 m/s 。所以当饱和参量增大时,漫射光对原子的减速效果增大。

在原子与漫射光场作用时在原子束横向方向上由于自发辐射的影响将使原子束发散,但由于减速后的原子最可几速度仍达 674 m/s ,所以这种影响很小,可以忽略。

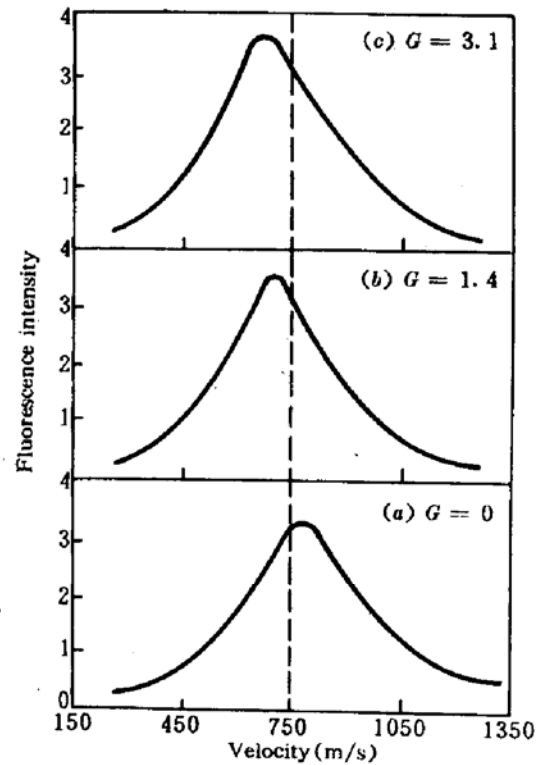


Fig. 4 Laser-cooled velocity distributions for different laser saturation parameter (a) $G = 0$; (b) $G = 1.4$; (c) $G = 3.1$, and the pumping power 25 mW

由此可见,利用红移漫射光可以有效地减速原子速度,当增大作用长度时,原子将进一步被减速。

4 结论

红移漫射光减速原子是利用激光在空间角度变化来实现原子的连续减速。我们在理论上研究了这一冷却机制,并在实验上成功地观察到了原子束在积分球内漫射光作用下的减速情况,原子被减速的速度最大可达 106 m/s。实验结果和理论分析基本一致。这一冷却新机制使人们能利用比较简单的方法获得较低速原子,而且,当利用多个积分球时,将有可能实现原子更低速度的冷却,甚至原子速度可达 40~50 m/s。同时由于更多的能级参与原子的激光减速,这种过程将有助于人们进一步研究多能级的冷却机制^[9]。

致谢 作者衷心感谢刘亮和王笑娟同志的有益讨论。

参 考 文 献

- 1 T. Hansch, A. Schawlow. *Opt. Commun.*, 1975, **13**: 68
- 2 V. S. Letokhov *et al.*. *Opt. Commun.*, 1976, **19**: 72
- 3 W. Phillips, H. Metcalf. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, **48**: 596
- 4 V. Andreav. *JETP Lett.*, 1981, **34**: 442
- 5 S. Gozzini, C. Marinelli, E. Mariotti *et al.*. *SPIE*, 1992, **1726**: 156
- 6 P. D. Lett, W. D. Phillips, S. L. Rolston *et al.*. *J. O. S. A. B*, 1989, **6**(11): 2084
- 7 陈洪新,刘 亮,王育竹. *光学学报*, 1994, **14**(2): 125~129
- 8 Xuzong Chen, Xiaojuan Wang, Zhong Li *et al.*. *Chinese Journal of Lasers (E. E)*, 1992, **1**(6): 509
- 9 Mark Kasevich, David S. Weiss, Erling Riis *et al.*. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **66**(18): 2297

Laser Deceleration of an Atomic Beam by Red Shifted Diffuse Light

Chen Hongxin Cai Wei-quang Shu Wei Li Fusheng Wang Yuzhu

(*Joint Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics*

and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Abstract A new deceleration and cooling mechanism by red shifted diffuse light have been reported. The expression of radiation pressures produced by monochromatic red shifted diffuse light are obtained by solving the two-level atom model and deceleration of Na atoms in an atomic beam have been observed in experiment.

Key words diffuse light, radiation pressures, laser deceleration