

一维 σ^+ $-\sigma^-$ 冷却光和再抽运光对 一维磁光陷阱中的多能级钠原子作用的研究*

刘勋铭 王育竹

(中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学开放实验室, 上海 201800)

摘 要 表述了钠 D_2 线跃迁所包含的 24 个磁子能级的原子在一维 σ^+ $-\sigma^-$ 冷却光和再抽运光中产生的稳态多普勒冷却力。讨论了不同磁场强度、不同再抽运光强和失谐情况下原子的多普勒冷却力及对磁光陷阱中最大捕陷速度、原子数目及温度的影响。

关键词 激光冷却和囚禁, 磁光陷阱, 多普勒冷却力, 多能级原子, 塞曼分裂, 再抽运光。

1 引 言

在磁光陷阱(MOT)囚禁钠原子的实验中, 由于磁四极矩的磁场分布使得原子的磁子能级在空间引起塞曼分裂和布居数发生变化, 在负失谐圆偏振光的作用下导致对原子的囚禁和冷却。

本文将根据文献[1]中建立的钠原子 $3^2S_{1/2} \rightarrow 3^2P_{3/2}$ 跃迁所包含的 24 个磁子能级在存在磁场情况下的原子作用模型, 讨论一维磁光陷阱中 σ^+ $-\sigma^-$ 再抽运光对多普勒冷却力、最大捕陷速度的影响。

2 一维 σ^+ $-\sigma^-$ 冷却光和再抽运光对磁场中多能级钠原子作用的物理模型

一个处在 $|F, m\rangle$ 态原子的能级在弱磁场中将产生塞曼分裂,

$$\Delta E_B = mg_F \mu_B B / h \quad (1)$$

其中 μ_B 为玻尔磁子、 g_F 为朗德因子, 它满足方程

$$g_F = \frac{F(F+1) + J(J+1) - I(I+1)}{2F(F+1)} g_J + \frac{m_e}{M} \frac{F(F+1) + I(I+1) - J(J+1)}{2F(F+1)} g_I \quad (2)$$

其中

$$g_J = 1 + \frac{J(J+1) - L(L+1) + S(S+1)}{2J(J+1)} \quad (3)$$

* 由国家自然科学基金(No. 19392500)及国家科学技术部 95-预-342 项目资助。

收稿日期: 1996-12-16; 收到修改稿日期: 1997-07-02

由于 $\frac{m_e}{M} = 1/1836$, 因此(2) 式的后一项可忽略。钠 D_2 线各 F 态的 g_J 和 g_F 的值可参阅表 1。

Table 1. The table of Landé factors

	F	g_J	g_F
$3^2P_{3/2}$	3	4/3	2/3
	2	4/3	2/3
	1	4/3	2/3
	0	4/3	2/3
$3^2S_{3/2}$	2	2	1/2
	1	2	-1/2

与文献[1]相似, 作如下假定:

1) 冷却光和再抽运光的 σ^+ 光沿坐标的正向, σ^- 光沿坐标的反向。令 $n = 1, 2$ 分别表示 σ^+ 、 σ^- 冷却光, $n = 3, 4$ 分别表示 σ^+ 、 σ^- 再抽运光。

2) 忽略偏振梯度冷却力对原子运动的影响。

3) 基态和激发态布居数分别为 $\Pi_{F_j m_j}$ 、 $\Pi_{F'_i m'_j}$, 而 $F_i (F'_i)$ 和 $m_j (m'_j)$ 分别是基态(激发态)超精细能级和磁光能级, 而 $i (i')$ 和 $j (j')$ 是对应的 F 量子数和磁量子数。设归一化条件

$$\sum_{F_i} \sum_{m_j = -F_i}^{F_i} \Pi_{F_i m_j} + \sum_{F'_i} \sum_{m'_j = -F'_i}^{F'_i} \Pi_{F'_i m'_j} = 1 \quad (4)$$

在存在纵向磁场的情况下, 当某个外加激光场的频率相对于 $F_i \rightarrow F'_i$ 的跃迁频率失谐量为 $\delta_{F_i F'_i}^{(n)}$ 时, 对原子速度 v 而言, 有效失谐可表示为

$$\Delta_{F_i m_j; F'_i m'_j}(v, B) = \delta_{F_i F'_i}^{(n)} + (-1)^n kv - (m'_j g_{F'_i} - m_j g_{F_i}) \mu_B B / h \quad (5)$$

此时饱和参量与磁子能级有关, 其表达式为

$$S_{F_i m_j; F'_i m'_j}^{(n)} = \frac{\Omega_n^2 / 2}{\Delta_{F_i m_j; F'_i m'_j}^2(v, B) + \Gamma^2 / 4} \quad (6)$$

其中 Ω_n 为拉比频率。

由此, 根据文献[1]中(6)式可以得到原子在该光场中受的总多普勒力为

$$f_{\text{Dop}}(v) = \frac{\hbar k \mathcal{Y}}{2} \sum_{F_i} \sum_{q_1 = -1}^1 \sum_{m_j = -F_j}^{F_i} \sum_{n=1}^4 (-1)^{n+1} S_{F_i m_j; F_{i+q_1} m'_{j+(-1)^{n+1}}}^{(n)} \times C_{F_i m_j; F_{i+q_1} m'_{j+(-1)^{n+1}}} (\Pi_{F_i m_j} - \Pi_{F_{i+q_1} m'_{j+(-1)^{n+1}}}) \quad (7)$$

3 讨 论

3.1 存在纵向磁场时再抽运光对原子多普勒力的影响

假定冷却光的光强和失谐量为 $I_{\text{cool}} = 2I_0$, $\delta_{23} = -1.5\Gamma$, 此时, I_0 为饱和光强; 再抽运光的光强和失谐量为 $I_{\text{rep}} = 0.1I_{\text{cool}}$ 和 $\delta_{12} = -\Gamma$ 。通过计算得到了在不同磁场强度情况下原子所受多普勒力、 F_3 和 F_1 能级上粒子数随速度的变化, 如图 1 所示。由图 1(a) 可看出, 在有磁场时多普勒力不但沿速度轴发生移动而且峰值也发生变化, 一般说来磁场的绝对值越大, 峰值越小, 这与不考虑再抽运光的理论模型所得到的结论不同^[2]。通过对图 1(b)、图 1(c) 的分析可得知, 由于再抽运光的影响, 纵向磁场值越大, 则激发态粒子数在多普勒力峰值附近越小, 而基态粒子数越大。图 2 为一维磁光陷阱中原子多普勒力随磁场的变化, 可以看出小速度原子在零磁场附近存在均匀的冷却力和囚禁力。

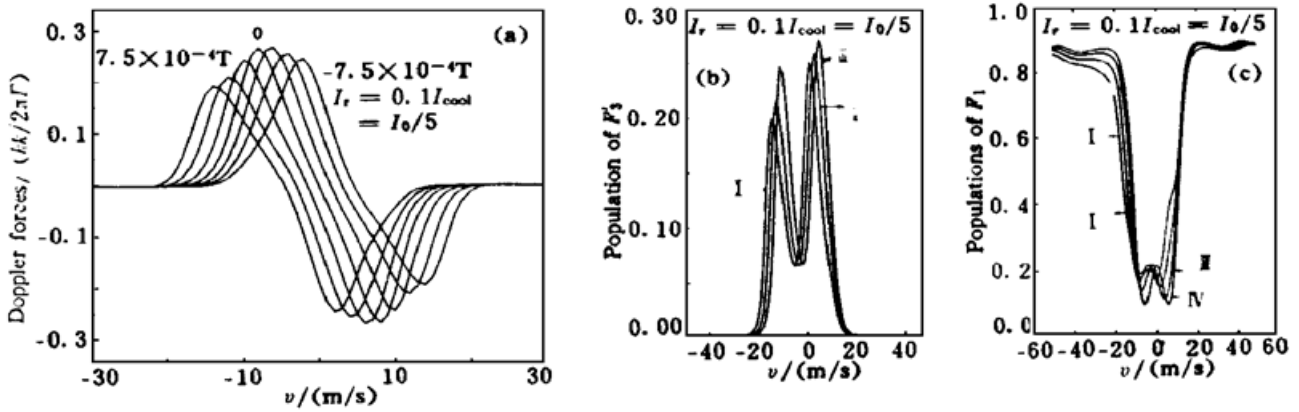


Fig. 1 (a) Scheme of Doppler forces versus velocity in different magnetic fields $7.5 \times 10^{-4} \text{ T}$, $5.0 \times 10^{-4} \text{ T}$, $2.5 \times 10^{-4} \text{ T}$, 0 , $-2.5 \times 10^{-4} \text{ T}$, $-5.0 \times 10^{-4} \text{ T}$, $-7.5 \times 10^{-4} \text{ T}$, the intensity and detuning of trapping light are $I_{\text{cool}} = 2I_0$ and $\delta_{23} = -1.5\Gamma$, where I_0 is saturation intensity; the intensity and detuning of repumping light are $I_{\text{rep}} = 0.1I_{\text{cool}}$ and $\delta_{12} = -\Gamma$, (b) Curves of populations in F_3 level versus velocity in different magnetic fields (I) $7.5 \times 10^{-4} \text{ T}$, (II) $5.0 \times 10^{-4} \text{ T}$, (III) $2.5 \times 10^{-4} \text{ T}$, the other parameters are the same as Fig. 1 (a). (c) Scheme of population distribution in F_1 , the other parameters are the same as Fig. 1 (b). (I) $7.5 \times 10^{-4} \text{ T}$, (II) $5 \times 10^{-4} \text{ T}$, (III) $2.5 \times 10^{-4} \text{ T}$, (IV) 0

3.2 再抽运光对磁光陷阱中囚禁粒子数和温度的影响

由于磁光陷阱中囚禁粒子数与最大捕陷速度 v_c 有关, 可对原子的一维运动轨迹进行计算。设磁场梯度为 $15 \times 10^{-4} \text{ T/cm}$, 光斑半径为 6 mm , $I_{\text{rep}} = I_{\text{cool}} = 2I_0$, 冷却光失谐量 $\delta_{23} = -1.5\Gamma$, 再抽运光的失谐量 $\delta_{12} = \Gamma$ 。对牛顿第二定律

$$F_{\text{Dop}}(v, z) = m \frac{d^2z}{dt^2} \text{ 进行变换可得}$$

$$(dv/dz) = [F_{\text{Dop}}(v, z)/mv] \quad (8)$$

其中 $F_{\text{Dop}}(v, z)$ 由(7)式给出。对一维磁光陷阱而言, 在囚禁区域其磁场数值为 $B = bz$, 其中 b 为磁场梯度。对上述方程用龙格库塔法进行数值计算可得不同初值速度 v_0 的情况下原子穿越光场时速度随坐标的变化, 如图 3(a) 所示, 此处假定最初原子处在 $z = -6 \text{ mm}$ 的光束边缘。可得到最大捕陷速度 $v_c = 21.725 \text{ m/s}$, 大于 v_c 的原子将逃离囚禁势阱, 而小于 v_c 的原子将被冷却和囚禁在磁光陷阱内。当再抽运光的光强变为 $I_{\text{rep}} = 0.1I_{\text{cool}}$ 时, 由图 3(b) 可知最大捕陷速度下降至 $v_c = 20.93 \text{ m/s}$ 。在平衡状态时三维磁光陷阱中囚禁的粒子数为^[3]

$$N_{\text{MOT}} = \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{V^{\frac{2}{3}}}{\sigma} \left(\frac{v_c}{V_m}\right)^4 \quad (9)$$

这里 V 为光束交叠区的体积, σ 为原子的碰撞散射截面, V_m 为背景气体原子的最可几速率。由此可见, 增大再抽运光的光强可使磁光陷阱中囚禁粒子数增多, 但导致激发态粒子数增多而引起囚禁粒子间碰撞加剧。当再抽运光的失谐量发生变化时, 磁光陷阱中囚禁粒子数将发

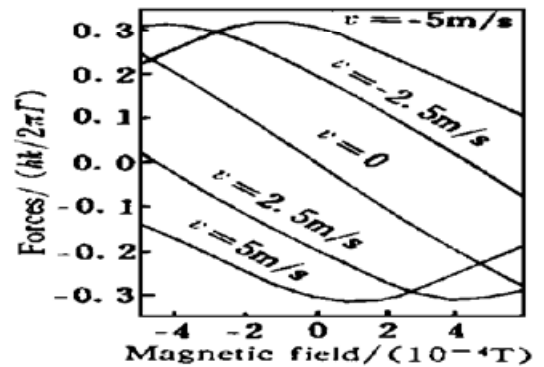


Fig. 2 Scheme of Doppler forces versus magnetic field for atoms having different velocities $-5, -2.5, 0, 2.5, 5 \text{ m/s}$, the intensities of repumping and cooling lights are $I_{\text{rep}} = I_{\text{cool}} = 2I_0$, other parameters are the same as Fig. 1 (a)

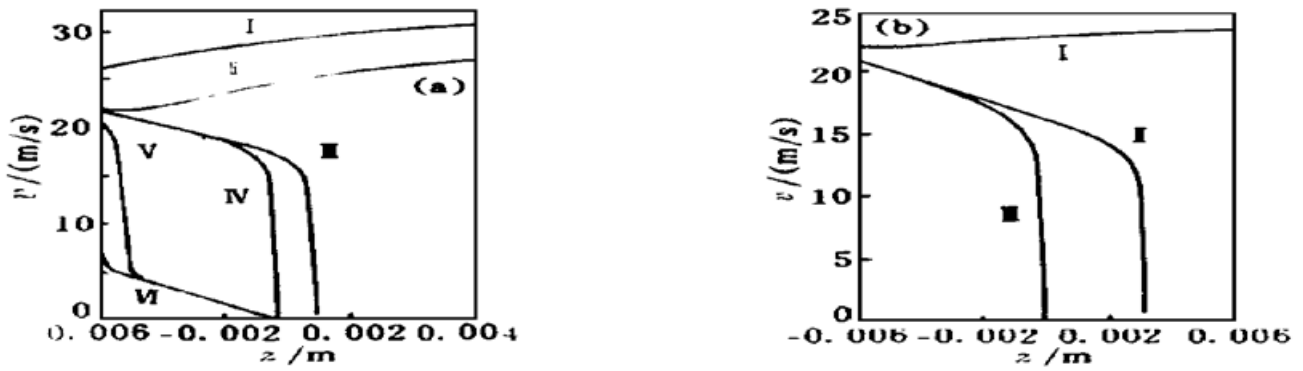


Fig. 3 (a) Scheme of trajectories of velocity versus position for atom passing through the light beams in initial position of -6 mm and different initial velocities, the radius of light beam is 6 mm , the gradient of magnetic field is $15 \times 10^{-4}\text{ T/cm}$, the intensities of repumping and cooling lights are $I_{\text{rep}} = I_{\text{cool}} = 2I_0$, the other parameters are the same as Fig. 1 (a). The maximum capture velocity is $v_c = 21.725\text{ m/s}$, (I) $v_0 = 26\text{ m/s}$, (II) $v_0 = 22\text{ m/s}$, (III) $v_0 = 21.725\text{ m/s}$, (IV) $v_0 = 21.724\text{ m/s}$, (V) $v_0 = 21\text{ m/s}$, (VI) $v_0 = 10\text{ m/s}$, (b) Curves of trajectories of velocity versus position for atom passing through the light beams in initial position of -6 mm and different initial velocities, the intensities of repumping and cooling lights are $I_{\text{rep}} = 0.1I_{\text{cool}} = I_0/5$, the other parameters are the same as Fig. 3 (a). The maximum capture velocity is reduced to $v_c = 20.93\text{ m/s}$. (I) $v_0 = 22\text{ m/s}$, (II) $v_0 = 20.93\text{ m/s}$, (III) $v_0 = 20.92\text{ m/s}$

生变化，由于囚禁粒子数与多普勒力的大小有直接关系，因此当多普勒力保持有效时囚禁粒子数不会有很大变化，而当失谐量很大引起多普勒力有很大的下降时，磁光陷阱中的囚禁粒子数将减少，并且处于激发态的粒子数也将减少。

在小速度和小磁场区域的情况下，力的表达式可近似为

$$F = -m\gamma v - kz \tag{10}$$

因此在囚禁区域对原子的速度形成过阻尼振荡。当原子的动量扩散与冷却平衡时有关系式 $D = \gamma p^2$ ，其中 D 为动量扩散系数， p 为动量。可得原子在磁光陷阱中的平衡温度为

$$k_B T = D_p / m\gamma \tag{11}$$

对一维情况有关系式

$$D = (\hbar k)^2 \Gamma \Sigma \rho_e \tag{12}$$

可见再抽运光的光强的强弱对磁光陷阱原子的温度有影响，温度的影响与激发态粒子数分布成正比，在零磁场时激发态粒子数分布可参见文献[1]。因此强的再抽运光的光强可导致较高的原子温度。

结 论 包含 24 个磁子能级的一维磁光陷阱理论模型能较合理地解释在磁光陷阱囚禁实验中的一些现象。尤其是再抽运光对囚禁原子数和温度的影响。作为理论工具该理论模型能很好地对实验进行分析并在此基础上可对实验中具体实验参数下的粒子数和温度进行数值模拟及估算。

在理论模型的建立上霍芸生副研究员提了不少有益的建议，特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 刘勋铭, 王育竹, 一维 σ^+ - σ^- 冷却光和再抽运光对多能级钠原子作用研究. 光学学报, 1998, **18**(8) : 1153~ 1159
- [2] M. Walhout, J. Dalibard, S. L. Rolston *et al.*, σ^+ - σ^- optical molasses in a longitudinal magnetic field. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1992, **9**(11) : 1997~ 2007
- [3] C. Monroe, W. Swann, H. Robinson *et al.*, Very cold atoms in a vapor cell. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **65**(13) : 1571~ 1574

Effects of One-Dimensional σ^+ - σ^- Cooling and Re-Pumping Light on the Multi-Level Na Atoms in an One-Dimensional Magneto-Optical Trap

Liu Xunming Wang Yuzhu

(Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 16 December 1996; revised 2 July 1997)

Abstract The formulas of populations distribution and Doppler cooling force dependent on the velocity of atoms in a non-uniform magnetic field were described by considering the physical model of one-dimensional σ^+ - σ^- cooling and repumping lights acting on 24-sub-level of Sodium atoms. The influence of velocity-dependent Doppler forces on the maximum capture speed and temperature of atoms were discussed at the conditions of different magnetic field, different intensities and detunings of repumping lights.

Key words laser cooling and trapping, magneto-optical trap, Doppler force, multilevel atoms, Zeeman splitting, repumping light.