

文章编号: 0258-7025(2008)02-0221-04

磁光阱中铯冷原子碰撞损失率系数的测量

王贵平 冀炜邦 马 杰 汪丽蓉 肖连团 贾锁堂

(山西大学物理电子工程学院量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要 利用磁光阱(MOT)技术获得了铯冷原子。通过观测磁光阱在装载过程中冷原子云荧光强度的变化,测量了不同俘获光功率下铯冷原子的碰撞损失率系数。在单个阱中完成了对碰撞损失率系数的测量。同时研究发现铯冷原子的碰撞损失率系数依赖于俘获光功率并随其增加而增大,该实验结果与 Gallagher-Pritchard 理论模型给出的结果一致,验证了辐射逃逸和精细结构交换碰撞是造成磁光阱中原子损失的主要原因,对于进一步提高磁光阱的俘获效率有重要意义。

关键词 原子与分子物理学;磁光阱;碰撞损失率;荧光探测;冷原子

中图分类号 O 562.5;O 431.2 **文献标识码** A

Measurement on Collisional Loss Rate Coefficient of Cesium Cold Atoms in a Magneto-Optical Trap

Wang Guiping Ji Weibang Ma Jie Wang Lirong Xiao Liantuan Jia Suotang

(The State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, College of Physics
and Electronics Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract Cold cesium atoms are obtained using magneto-optical trap (MOT) technology. Under different trapping laser powers, the collisional loss rate coefficients for cold cesium atoms were measured by observing the fluorescence intensity variance of cold atoms clouds when MOT was loading. The experiment was achieved in a single trap, thus it is convenient and easy. In addition, it is found that the collisional loss rate coefficient depends on and increases with trapping laser power, which is in agree with the Gallagher-Pritchard theoretical model. It validates that the radiative escape and fine-structure-changing collisions are the main reasons for cold atoms lossing in a MOT. The results are of significance for further improvement on trapping efficiency of MOT.

Key words atomic and molecular physics; magneto-optical trap; collisional loss rate; fluorescence detection; cold atom

1 引 言

中性原子气室磁光阱(MOT)的实现使得冷原子样品的制备更加简单而有效,磁光阱中的冷原子样品具有速度低、速度分布范围极窄、原子密度较高等特点从而成为研究原子碰撞、原子光学、原子喷泉、高分辨率激光光谱以及量子光学等领域的全新的介质^[1~5]。磁光阱中原子温度达到了微开量级,在如此低的温度下,原子的德布罗意(de Broglie)波长与原子间的间距可以相比,原子之间将存在很强

的相互作用,人们将之称为冷碰撞或超冷碰撞。超冷碰撞是具有极低能量的微观粒子碰撞,它有着与通常的热原子碰撞和高能粒子的碰撞迥然不同的特色,其中最显著的特点就是碰撞截面大和作用时间长于原子激发态的寿命,因此在研究超冷碰撞过程时需考虑原子内态的变化^[1]。超冷碰撞在化学物理、原子、分子和光物理、甚至凝聚态物理^[6]等交叉学科领域有着重要地位,研究超冷碰撞对于原子、分子特性参数的精确测量以及碰撞产物的光操控^[7]都

收稿日期:2007-06-05;收到修改稿日期:2007-08-29

基金项目:国家 973 计划(2006CB921603)、国家自然科学基金(10574084,60678003)和国家重大基础研究前期研究专项(2005CCA06300)资助课题。

作者简介:王贵平(1982—),女,山西人,硕士研究生,主要从事超冷原子分子光谱的研究。E-mail:wgp0006@126.com

导师简介:贾锁堂(1958—),男,山西人,教授,博士生导师,主要从事原子分子物理的研究。E-mail:tjia@sxu.edu.cn

非常重要。

冷原子之间的非弹性放能碰撞将原子的内能转换为原子的动能使原子从势阱中逃逸出来,是在磁光阱中得到高密度的原子云以及实现冷原子长时间俘获的主要限制因素^[8],因此这种非弹性碰撞造成的碰撞损失率成为人们关注的焦点。1989年 Sesko 等^[9]在光学阱中研究发现铯冷原子的碰撞损失率明显依赖于俘获光光强,同时发现在不同的强度范围内将有不同的损失机制起作用。1992年 Hoffmann 等^[10]研究了磁光阱基态铯原子的超精细结构交换碰撞,发现在一定条件下这种碰撞机制是磁光阱中冷原子损失的主要原因。1997年 Fioretti 等^[11]分别在高密度和低密度的磁光阱中直接测量了铯冷原子的精细结构交换碰撞损失率。本文是在高密度磁光阱中,通过观测磁光阱在装载过程中冷原子云荧光强度随时间的变化,计算出铯冷原子总的两体碰撞损失率系数,同时研究了碰撞损失率系数对俘获光功率的依赖性。利用 Gallagher-Pritchard 理论模型^[12]分析了实验结果,二者吻合得很好。

2 实验装置

图 1(a)为实验中相关的能级。粗箭头表示超精细能级跃迁分别对应俘获光与再抽运光的频率。图 1(b)为铯原子磁光阱光路示意图。实验中采用 Toptica 公司生产的 DL100 型光栅反馈半导体激光器和 Newfocus 公司生产的 6017 型外腔可调谐激光器分别作为俘获光和再抽运光源。DL100 激光器的频率通过声光调制器(AOM1)频移后采用饱和吸收光谱技术锁定在铯原子 $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=5)$ 循环跃迁负失谐约两个自然线宽处($\Gamma=5.2$ MHz),这里声光调制器不仅是对光场频率操控的需要,更重要的是作为光路快速开关在实验中对光场进行时序控制。作为再抽运光源的激光器的频率也通过饱和吸收光谱技术锁定在铯 D_2 线 $6S_{1/2}(F=3) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=4)$ 超精细跃迁线处。俘获光通过扩束望远镜扩至直径约 10 mm,经过两组半波片和偏振分束镜(PBS)组成的分光系统分成三束,沿三个相互垂直的方向射入气室,出射光由 0° 全反镜沿入射光反射回去,形成两两对射的六束俘获光。再抽运光的输出功率为 5 mW,并扩束为与俘获光光斑大小相同的光束,由若干 45° 反射镜导引从铯原子磁光阱真空气室的侧面射入气室。铯原子磁光阱的超高真空气室是一个石英玻璃的真空气室,其真空度维持在约 1×10^{-7} Pa。磁光阱所需的

四级磁场由真空气室外部绕制一对反向亥姆霍兹线圈提供,在俘获区域轴向磁场梯度约 15×10^{-4} T/cm。同时实验中还使用了三对矩形的磁场线圈补偿磁光阱区域的地磁场和其他杂散磁场。通过仔细调节各束俘获光的强度以及磁场补偿线圈中的电流,使磁光阱中的冷原子云接近球对称。实验中采用吸收法^[13]测得冷原子云密度约为 4×10^{10} cm^{-3} ,温度约为 100 μK 。

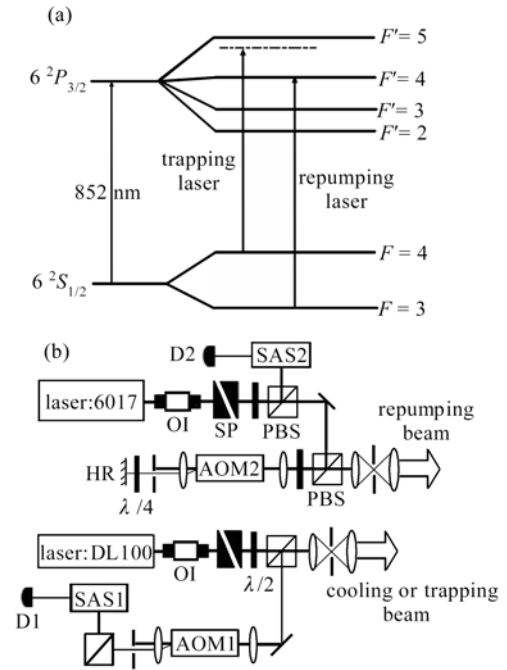


图 1 实验中的相关能级(a)和实验装置图(b)

Fig. 1 Relevant levels in experiment (a) and experimental setup (b)

本文还建立了一套基于计算机控制的时序系统来完成对俘获光和再抽运光的开启、关断操作。实验中可在小于 1 μs 的时间内开启、关断激光场。采用 CCD 成像系统对冷原子云进行实时观测,同时用透镜收集冷原子云荧光并通过光电探测器(Hamamatsn Si APD, S3884)探测。

3 实验结果与分析

为了研究冷原子碰撞损失率,通过开启和关断俘获光和再抽运光测量了不同俘获光功率下磁光阱装载过程中冷原子云的荧光信号随时间的变化,变化曲线如图 2 所示。从图中可以看出,随着俘获光功率的增加,冷原子荧光的饱和强度随着增加,但是装载曲线的特征时间(约 $\tau=4.1$ s)基本没有改变。磁光阱中俘获的冷原子数目 N 随时间 t 变化可以表示为

$$\frac{dN}{dt} = L - \gamma_b N - \beta \int n^2(r, t) d^3 r, \quad (1)$$

式中 L 为装载率, 即单位时间内进入磁光阱且被磁光阱俘获的原子数, $n(r, t)$ 为冷原子的密度, γ_b 为被俘获的冷原子与背景残余原子或分子之间的碰撞损失率, β 为被俘获冷原子之间的碰撞损失率系数。

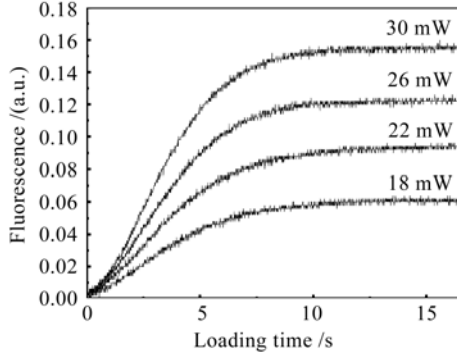


图 2 不同俘获光功率下铯冷原子的装载曲线

Fig. 2 Loading curves for different trapping laser powers

当阱中原子数达到一定数值时 ($N > 10^4$), 冷原子之间会彼此吸收对方自发辐射的散射光子, 从而使得冷原子之间存在不可忽略的排斥力, 在这种情况下冷原子云的密度将为固定值, 只是俘获体积随原子数增多而增大^[14]。在实验中, 通过吸收法测得磁光阱中俘获到的稳态原子数约为 1×10^7 , 满足上述近似, 令 n_c 为冷原子密度, 取定值, 代入方程 (1) 可得

$$\frac{dN}{dt} = L - (\gamma_b + \beta n_c) N, \quad (2)$$

解方程 (2) 并根据初始条件得到

$$\frac{N}{N_0} = 1 - \exp[-(\gamma_b + \beta n_c) t],$$

N_0 为阱中俘获到的稳态原子数。由于在光场的激发下, 冷原子云向空间 4π 立体角内发射荧光, 发出的荧光各向同性, 故探测到的荧光率 f 和磁光阱中俘获的冷原子数 N 之间的关系可以表示为^[15]

$$\frac{f}{N} = G \frac{1}{2\tau} \frac{\Omega_0^2/2}{(\omega_0 - \omega)^2 + (\Gamma/2)^2 + \Omega_0^2/2}, \quad (3)$$

式中 G 为光子收集效率, ω_0 和 ω 分别表示原子跃迁共振频率和入射激光频率, Γ 为自然线宽, Ω_0 为共振拉比频率。从公式 (3) 可以看出磁光阱中俘获的冷原子数与冷原子的荧光强度成正比关系。由于在装载初始时刻, 磁光阱中冷原子密度未能达到稳定的数值, 故在分析中略去了这段时间。图 3 是由图 2 得到的不同俘获光功率下 $1 - N/N_0$ 的自然对数的绝对值与时间 t 的关系图及线性拟合, 其斜率等于 $\gamma_b + \beta n_c$, 这样在知道 γ_b 和 n_c 的情况下便可以求出 β 。

图 3 中的插图是在不同俘获光功率下的 $\gamma_b + \beta n_c$ 的值, 通过线性拟合外推至俘获光功率为零时可以得到 $\gamma_b = 0.0543 \text{ s}^{-1}$ 。

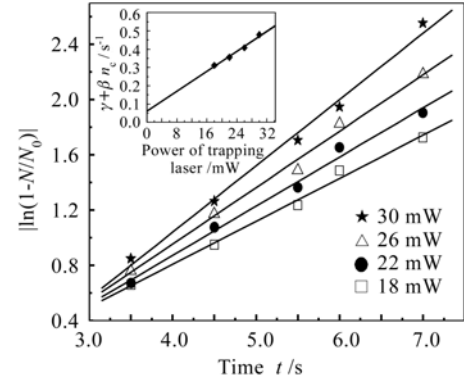


图 3 与图 2 装载曲线对应, $|\ln(1 - N/N_0)|$ 与装载时间 t 的关系图, 插图为 $\gamma_b + \beta n_c$ 与俘获光功率的关系图
Fig. 3 Logarithmic plot [$|\ln(1 - N/N_0)|$ versus time] for the loading curves of Fig. 2, the inset represents [$\gamma_b + \beta n_c$ versus trapping laser power]

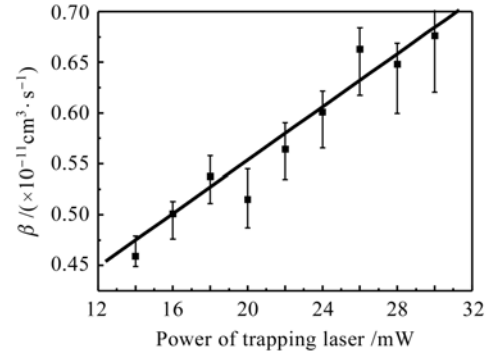


图 4 不同俘获光功率下铯冷原子的碰撞损失率系数
Fig. 4 Collisional loss rate coefficients of cesium cold atoms at different trapping laser powers

图 4 中的点是根据上述结果计算出的不同俘获光功率下的碰撞损失率系数, 它的值随俘获光功率的增加而增大, 实线是线性拟合。图中的误差主要来源于冷原子俘获体积的变化, 造成俘获体积变化的原因主要是俘获光和再抽运光频率稳定度的影响 (在实验中采用饱和吸收光谱技术使二者稳定度优于 1 MHz)。

对于冷原子碰撞过程中的碰撞损失可以利用 Gallagher-Pritchard 模型来描述。在此模型中, 引起磁光阱中冷原子损失的主要有辐射逃逸和精细结构能级交换碰撞^[9, 16, 17]两种物理机制, 可以表示为



式中 A 表示碱金属原子, ω_L 为俘获光频率, $\hbar\omega'$ 表示准分子 A_2^* 自发辐射的光子, $\Delta E_{RE} = \hbar(\omega - \omega')$, ΔE_{FCC} 表示精细结构能级 $A^*(P_{3/2})$ 与 $A^*(P_{1/2})$ 的能量差。即初始状态为基态的冷原子对在长程范围内共振吸收一个光子跃迁为具有吸引势 $-C_3/R^3$ 激发态准分子, 然后在强的偶极力作用下加速靠近至一定距离后, 或者自发辐射或者发生精细结构能级交换, 这样处于激发态分子的能量将有一部分转化为该原子对的动能。如果原子获得的动能大于势阱的深度, 原子将会从阱中逃逸出来造成冷原子数的减少。Gallagher-Pritchard 模型采用准分子近似, 即冷原子之间的两体碰撞可以认为是一个双原子准分子内部的动力学行为。根据文献[7], 磁光阱中原子损失率系数可以表示为

$$\beta = \frac{1}{2} \int_0^\infty dR_0 4\pi R_0^2 R(R_0, \omega_L, I) \times [P_{FCC}(R_0) + P_{RE}(R_0)], \quad (6)$$

式中 $R(R_0, \omega_L, I)$ 为原子对吸收光子生成间距为 R_0 的准分子的跃迁概率, $R(R_0, \omega_L, I) = \left[\frac{(\Gamma_M/2)^2}{(\Delta_M)^2 + (\Gamma_M/2)^2} \right] \frac{I}{\hbar\omega_L} \frac{\lambda^2}{2\pi}$, 其中 $\frac{\lambda^2}{2\pi}$ 是生成准分子的光吸收截面, 它和入射激光的强度成正比。 $P_{FCC}(R_0)$ 为准分子最终发生精细结构交换碰撞的总概率, 而 $P_{RE}(R_0)$ 为准分子发生自发辐射逃逸的总概率。从公式(6)中可以看出, 在 Gallagher-Pritchard 模型中总的碰撞损失率系数 β 和俘获光强度(功率)成正比, 这一结论和实验结果吻合得很好。

4 结 论

利用磁光阱在装载过程中冷原子云荧光强度的变化, 测量了铯冷原子碰撞过程中的碰撞损失率系数。通过改变俘获光的功率, 得到碰撞损失率系数和俘获光功率(光强)的依赖关系。利用 Gallagher-Pritchard 模型对该实验结果进行了理论分析, 二者结论一致。实验是在单个阱中完成了碰撞损失率系数的测量, 比较方便快捷, 并且在俘获光功率比较小的情况下得出了碰撞损失率系数随俘获光功率增加而增大的实验结果, 这对于实验中相关参数的选择有指导意义, 对于超冷碰撞的动力学行为以及冷原子的光缔合率等研究工作也具有一定的意义。

参 考 文 献

1 Fu Junxian, Wang Yiqiu. Experimental properties of cold atoms

- in a magneto optical trap [J]. *Physics*, 2000, **29**(3):156~161
付军贤, 王义迺. 磁光阱中冷原子的实验特性[J]. *物理*, 2000, **29**(3):156~161
- 2 Huang Bingying, Li Tianchu, Lin Pingwei *et al.*. TOF signal in the cesium atomic fountain [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(12):1083~1086
黄秉英, 李天初, 林平卫等. 铯原子喷泉的飞行时间信号[J]. *中国激光*, 2003, **30**(12):1083~1086
- 3 Bian Fenggang, Wei Rong, Lü Desheng *et al.*. Design for microwave cavity in a laser-cooled Rb fountain clock [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1185~1189
边凤刚, 魏 荣, 吕德胜等. 激光冷却铷原子喷泉钟的微波谐振腔设计[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9):1185~1189
- 4 Wang Lirong, Jia Suotang. The formation of ultracold molecules via photoassociation and its spectrum measurement [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2006, **12**(3):143~150
汪丽蓉, 贾锁堂. 光缔合产生超冷分子及其光谱测量[J]. *量子光学学报*, 2006, **12**(3):143~150
- 5 Zhou Shuyu, Long Quan, Wang Yuzhu *et al.*. Interfering fringe of resonant fluorescence from cold atomic cloud in a MOT and its applications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1):41~44
周蜀渝, 龙 全, 王育竹等. 来自磁光阱中冷原子团的荧光干涉条纹及其应用[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1):41~44
- 6 Zhou Ming, Huang Chunjia. Influence of interaction among atoms on squeezing properties of two-mode-atom laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10):1575~1579
周 明, 黄春佳. 原子间相互作用对双模原子激光压缩性质的影响[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10):1575~1579
- 7 J. Weiner, V. S. Bagnato, S. Zilio *et al.*. Experiments and theory in cold and ultracold collisions [J]. *Rev. Modern Phys.*, 1999, **71**(1):1~85
- 8 M. Prentiss, A. Cable, J. E. Bjorkholm *et al.*. Atomic-density-dependent losses in an optical trap [J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(6):452~455
- 9 D. Sesko, T. Walker, C. Monroe *et al.*. Collisional losses from a light-force atom trap [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, **63**(9):961~964
- 10 D. Hoffmann, P. Feng, R. S. Williamson, III *et al.*. Excited-state collisions of trapped ^{85}Rb atoms [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **69**(5):753~756
- 11 A. Fioretti, J. H. Müller, P. Verkerk *et al.*. Direct measurement of fine-structure collisional losses from a Cs magneto-optical trap [J]. *Phys. Rev. A*, 1997, **55**(6):R3999~R4002
- 12 A. Gallagher, D. E. Pritchard. Exoergic collisions of cold Na-Na [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, **63**(9):957~960
- 13 Fu Junxian, Li Yimin, Chen Xuzong *et al.*. A new method for measuring density and temperature of cold atoms in magneto-optical trap [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(4):414~416
付军贤, 李义民, 陈徐宗等. 一种测量磁光阱中冷原子密度和温度的新方法[J]. *光学学报*, 2001, **21**(4):414~416
- 14 T. Walker, D. Sesko, C. Wieman. Collective behavior of optically trapped neutral atoms [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **64**(4):408~411
- 15 L. Marcassa, V. Bagnato, Y. Wang *et al.*. Collisional loss rate in a magneto-optical trap for sodium atoms: light-intensity dependence [J]. *Phys. Rev. A*, 1993, **47**(6):R4563~R4566
- 16 P. S. Julienne, K. A. Suominen, Y. Band. Complex-potential model of collision of laser-cooled atoms [J]. *Phys. Rev. A*, 1994, **49**(5):3890~3896
- 17 P. S. Julienne, Jacques Vigué. Cold collisions of ground- and excited-state alkali-metal atoms [J]. *Phys. Rev. A*, 1991, **44**(7):4464~4485