

DOI: 10.3788/JQO20162201.0008

重力对 ^{87}Rb 冷原子四极磁阱装载的影响

王亚琼, 陈良超, 王鹏军[†], 张靖

(山西大学光电研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要: 文章研究了重力作用下对磁光阱中 ^{87}Rb 原子进行偏振梯度冷却后重新四极磁阱俘获的影响。研究了竖直放置四极线圈和水平放置四极线圈两种情形下, 重力对原子偏振梯度冷却后四极磁阱重新俘获过程的作用, 通过原子自由飞行吸收成像, 观测到了原子的振荡。分析计算了 ^{87}Rb 原子 $|2, 2\rangle$ 态补偿重力时所需的磁场梯度 B' , 探究了磁场参数对于振荡现象的影响, 从而选择了水平放置磁场线圈的方法, 提高了原子偏振梯度冷却后四极磁阱的装载效率。

关键词: 超冷原子; 重力; 磁阱; Rb

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1007-6654(2016)01-0050-08

0 引言

超冷原子因其高度人为可控多自由度的特性, 迅速成为一个量子模拟的理想平台。由于原子数目、不同自旋组分、系统温度、束缚势构造、原子之间的相互作用都可以人为精确控制, 这就为许多前沿课题的研究, 比如研究量子霍尔态、磁单极子等拓扑态以及拓扑绝缘体的制备、超流、Mott 绝缘位相、新奇量子相(FFLO 等)提供了优越的实验系统^[1-4]。

实验中通常采用激光冷却技术^[5-7]及磁、光阱技术^[8-11]来获得冷原子样品, 然后对冷原子进行进一步的蒸发冷却^[12-14]。在原子冷却和俘获过程中, 实验中通常需要用线圈来构造一个四极磁阱^[15], 要求线圈所占体积小可以获得大的通光方向^[16], 线圈的电感小可以实现迅速关断, 可以水冷易于散热保持磁场稳定性。实验上我们采用空

心方铜线绕制四极磁场线圈, 铜线中间空心部分通水冷却控温, 接触横截面积大、电阻较小, 可以实现较大的磁场。同时由于中空部分有效地降低了电流的趋肤效应。

在光学偏振梯度冷却之后, 采用圆偏振光将原子泵浦到原子的低场趋近态上后, 需要重新打开四极磁阱实现原子的装载。在重新装载过程中, 磁场的打开需要一定时间, 原子团在重力作用下会产生一定位置偏离, 所以选择合适的磁场梯度对提高冷原子磁阱再俘获效率十分重要。

本文研究了重力对磁光阱中 ^{87}Rb 原子进行偏振梯度冷却后重新磁阱俘获的影响。主要研究了竖直和水平放置四极线圈两种情形, 由于四极线圈产生的轴向磁场梯度是径向梯度的两倍, 需要考虑两个方向不同的磁场梯度和重力的共同作用对原子样品重新俘获过程中的影响。实验中通

收稿日期: 2015-11-12; 修回日期: 2015-11-19

基金项目: 国家 973 计划(2011CB921601); 国家基金项目(11234008; 61121064)

作者简介: 王亚琼(1990—), 女, 山西大同人, 硕士研究生, 主要从事超冷玻色费米混合气体等方面的研究。E-mail: wangyaqiong90@163.com

[†]通信作者: 王鹏军, E-mail: wpj5255@163.com

过原子自由飞行吸收成像,观测到了竖直放置磁场线圈时原子在重力方向的振荡。从理论上,计算了线圈轴向和径向磁场分布,发现⁸⁷Rb原子产生的振荡主要来自于重力导致磁场中心的偏移,最终导致原子在磁阱的振荡。从而选择了水平放置磁场线圈的方法,提高了原子冷却后磁阱的再俘获效率。

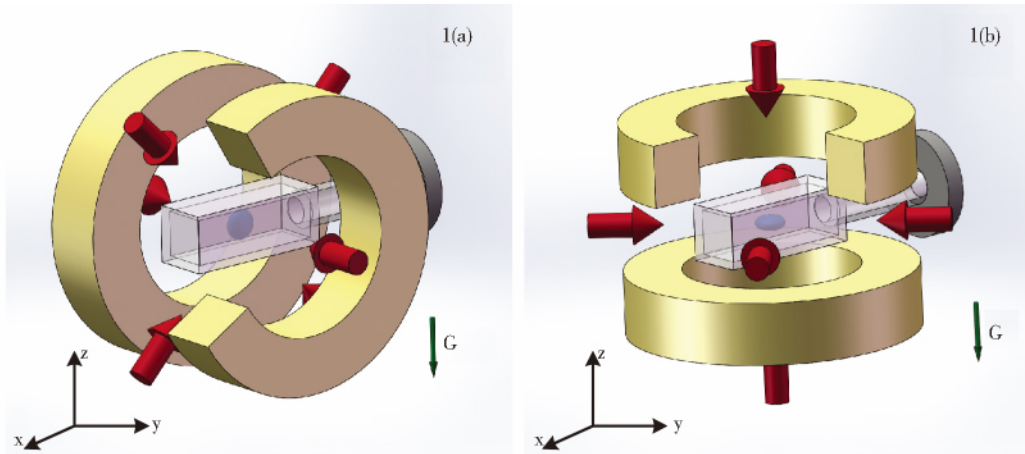


Fig. 1 Experiment setup of 3D MOT: (a) Magnetic field coils are placed vertically; (b) Magnetic field coils are placed horizontally

图1 3D MOT实验装置:(a)磁场线圈竖直放置;(b)磁场线圈水平放置

图1(a)和图1(b)分别为磁场线圈竖直放置和水平放置时的实验装置图。在图1(a)中,经过压缩磁光阱后,通过偏振梯度冷却将⁸⁷Rb原子团的温度进一步降低有利于装载到磁阱中。由于偏振梯度冷却过程对于外界磁场非常敏感,Zeeman分裂会导致原子对 σ^+ 和 σ^- 光失谐不同,造成同等大小光强的两束光对应的辐射压力不等,所以需要Molasses的3对光可以较为精确地调节,冷却光交叉的位置要尽可能与磁阱中心位置重合使得装载过程满足模式匹配。在不外加磁场和平衡的六束激光下,得到在三维空间近似为球形、量级为 10^8-10^9 个的⁸⁷Rb原子光学黏团。

经过CMOT, Molasses等阶段将⁸⁷Rb原子进一步冷却后,要将原子囚禁在磁阱中进行进一步的蒸发冷却。在此之前,需要对原子进行光抽运选态。我们选择将⁸⁷Rb原子制备到磁阱束缚比较强的低场趋近态 $|2, 2\rangle$ 态,这样可以避免自旋交换碰撞,有利于以后磁阱中的蒸发冷却。实验中光抽运的时间要选择合适的,时间过短,会因为

1 实验装置

实验中,真空度约为 10^{-7} Pa的2D MOT作为提供原子束的部分,对⁸⁷Rb原子在两个方向(y方向和z方向)上提供预冷却。冷却后的原子束沿着x轴经过差分管进入真空度约为 10^{-9} Pa的3D MOT玻璃气室(如图1所示)。

抽运不完全而造成原子数目的损耗,时间过长会因为光的散射造成对原子团的加热。此外,通过3D MOT外的3对地磁场补偿线圈可以消除地磁场的影响。

接着在竖直相对放置的磁场线圈中(图1(a))通入大小相等方向相反的电流,从而实现原子在磁阱中的再俘获。磁场线圈是由外包绝缘玻璃丝的空心方铜线绕制而成的,方铜线横截面参数为 $6.7\text{ mm} \times 4.6\text{ mm}$,通水孔参数为 $4.5\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 。磁阱装载过程分为两步,首先快速打开一定磁场梯度的磁阱,用于俘获原子(磁阱快速上升时间),然后再缓慢增加磁场梯度绝热压缩原子团来增加原子的密度(磁阱压缩时间),这样既可以保证原子数目,又能够增加原子密度^[17]。最后通过原子吸收在CCD成像,对两种放置四极线圈的⁸⁷Rb原子在水平和垂直(即重力方向)两个方向进行分别测量。

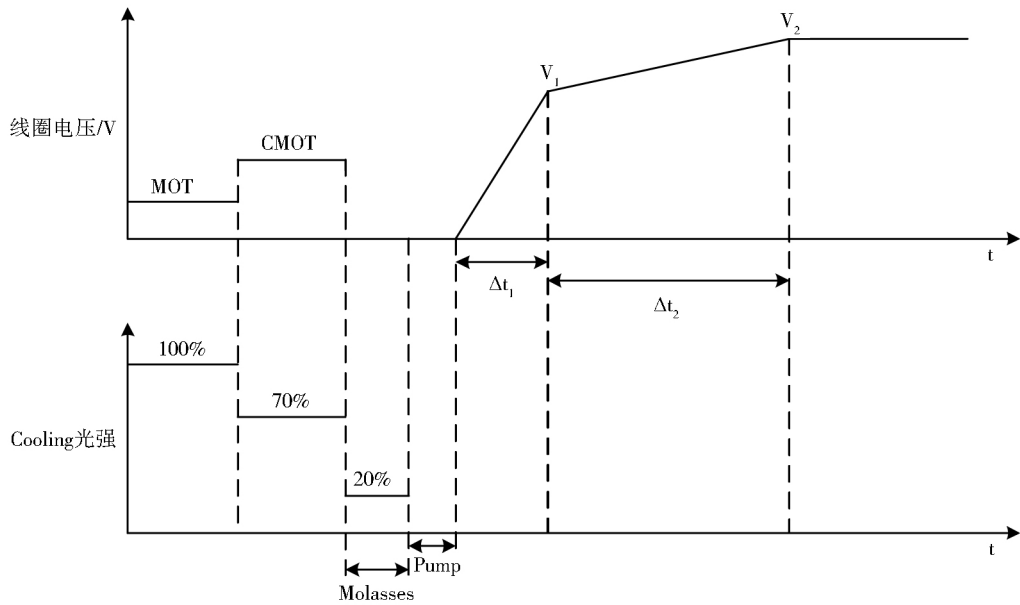


Fig. 2 Time sequence of ⁸⁷Rb atoms in 3D MOT

图 2 3D MOT 中对⁸⁷Rb 原子操作的时序图

图 2 是 3DMOT 中对⁸⁷Rb 原子团进行操控的时序图。如图所示,通过光学黏团冷却后打开泵浦光将⁸⁷Rb 原子制备到低场趋近态 $|2, 2\rangle$ 态。 Δt_1 为磁阱上升时间,对应的过程为磁阱快速装载过程,磁场线圈电压上升到 V_1 ; Δt_2 为磁阱压缩时间,对应的过程为磁阱压缩过程,磁场线圈电压从 V_1 增加到 V_2 。

2 实验结果

2.1 磁场线圈竖直放置时原子振荡现象及再装

载效率

从图 2 吸收成像看出,在 Molasses 和快速装入磁阱后没有加压缩磁场,⁸⁷Rb 原子团在空间中近似为球形如图 3(a)所示。在压缩磁阱过程中,改变磁阱压缩时间 Δt_2 ,观察原子团的行为如图 3 所示。图 3(b)、(c)、(d)为加压缩磁场时观察到的原子团,对应的磁阱压缩时间分别为 60 ms、80 ms、90 ms,且磁阱初始电压均为 $V_1 = 6$ V,对应的电流 $I = 6.67$ A,磁场梯度 $B' = 5$ G/cm,磁阱上升时间均为 $\Delta t_1 = 10$ ms,磁阱终止电压均为 $V_2 = 9$ V。

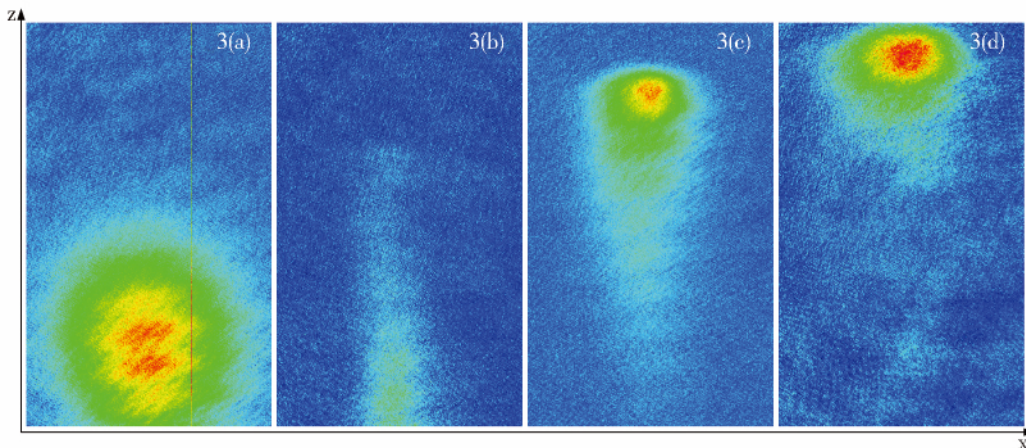


Fig. 3 Influence of compressed magnetic trap time on ⁸⁷Rb atoms

图 3 磁阱压缩时间对⁸⁷Rb 原子的影响

可以看出,原子团先是下落一段距离,随着压缩时间增大,原子团开始上升并形成振荡。在垂直(重力)方向观察原子团,原子团的形状如图4所示。图4对应的压缩时间 $\Delta t_2 = 80 \text{ ms}$,由

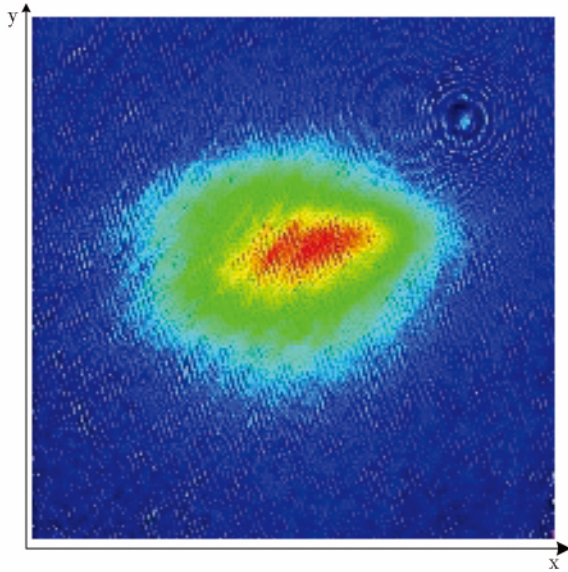


Fig. 4 Vertical view of ⁸⁷Rb atoms

图4 ⁸⁷Rb原子俯视图

于⁸⁷Rb原子团在磁场线圈轴向方向被压缩的程度较强,在垂直(重力)方向观察时,原子团呈现扁的椭圆形,中心位置并没有发生明显变化,并且未观察到明显振荡现象。

综上,当四极磁阱轴向与重力方向垂直,将原子团装载到磁阱的过程中,在重力方向观察原子,原子水平方向没有明显振荡现象。在水平方向观察原子,原子团先下落后向上振荡的现象。由于存在振荡现象,损耗较大,⁸⁷Rb原子再装载效率约为 $\eta_1 = 20\%$ 。

2.2 磁场线圈水平放置时的再装载效率

当磁阱轴向与重力方向一致时,原子团装载到磁阱的过程中没有观察到原子团在重力方向有明显的振荡现象如图5所示,其中图5(a)为水平面(x-y平面)的圆形原子团,图5(b)为垂直面(x-z平面)的椭圆形原子团且在重力(z轴)方向压缩较大,此时原子再装载效率约为 $\eta_2 = 87\%$ 。

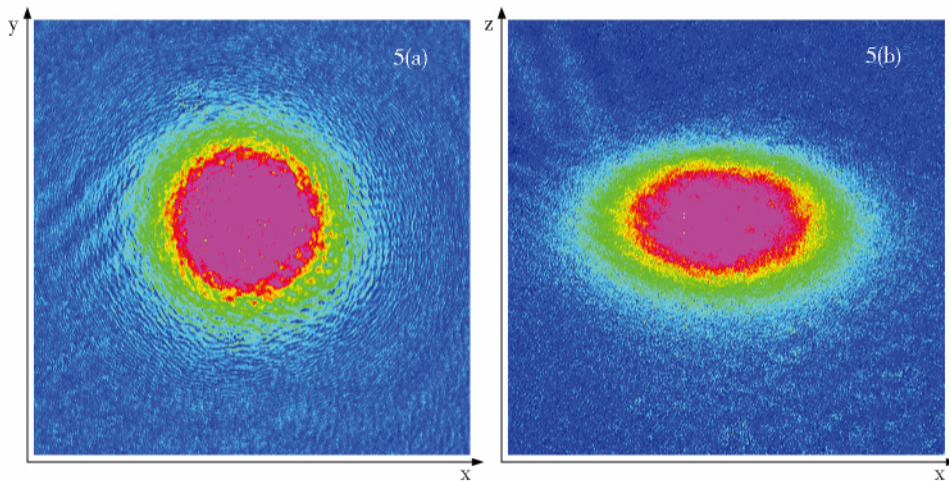


Fig. 5 When the magnetic field coils are placed horizontally, there is no obvious oscillation at vertical (a) and horizontal (b) absorption image

图5 磁场线圈水平放置时的垂直(a)和水平(b)吸收成像,没有明显振荡

3 理论计算

3.1 磁场的分布

为了研究图1(a)四极磁场线圈竖直放置时⁸⁷Rb原子团振荡产生的原因,首先分析四极磁场

的空间分布。

选取坐标空间如图6所示,两个大小相等半径为 R 的线圈正对且互相平行,以双线圈圆心连线方向为 y 轴,两圆心连线中垂面为 $x-z$ 平面,即

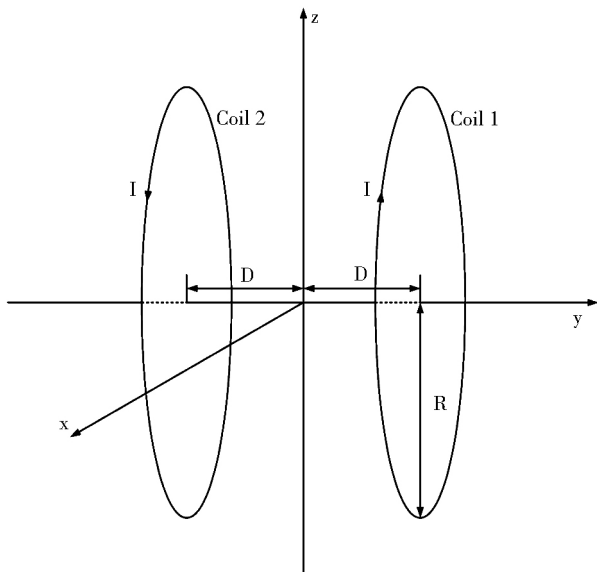


Fig. 6 Coordinates for the magnetic field of anti-Helmholtz configuration

图 6 反向亥姆霍兹线圈磁场坐标轴

y 轴对应线圈的轴向, x 轴和 z 轴对应线圈的径向。圆心到 x-z 平面的距离记为 D, 圆形线圈中通

以方向相反、大小相等的电流 I, 根据单线圈空间磁场分布, 可以分别写出两个线圈的磁场^[18]。

对于线圈一, 有:

$$B_{y_1} = -\frac{\mu I}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{(R+\rho)^2 + (y-D)^2}} \left[K(a) + \frac{R^2 - \rho^2 - (y-D)^2}{(R-\rho)^2 + (y-D)^2} E(a) \right] \quad (1)$$

$$B_{\rho_1} = -\frac{\mu I}{2\pi} \cdot \frac{1}{\rho} \frac{y-D}{\sqrt{(R+\rho)^2 + (y-D)^2}} \left[-K(a) + \frac{R^2 + \rho^2 + (y-D)^2}{(R-\rho)^2 + (y-D)^2} E(a) \right] \quad (2)$$

其中 $K(a)$ 为第一类完全椭圆积分, $E(a)$ 为第二类椭圆积分, $\rho = \sqrt{x^2 + z^2}$, $a = \frac{4R \cdot \rho}{(R+\rho)^2 + (y-D)^2}$ 。

对于线圈二, 将式(1)、(2)中的 I 换成 -I, D 换成 -D 即可得出 B_{y_2} 与 B_{ρ_2} 。

由 Mathematica 软件编程绘图得到双线圈在通以反向电流时的磁场分布如图 7 所示。

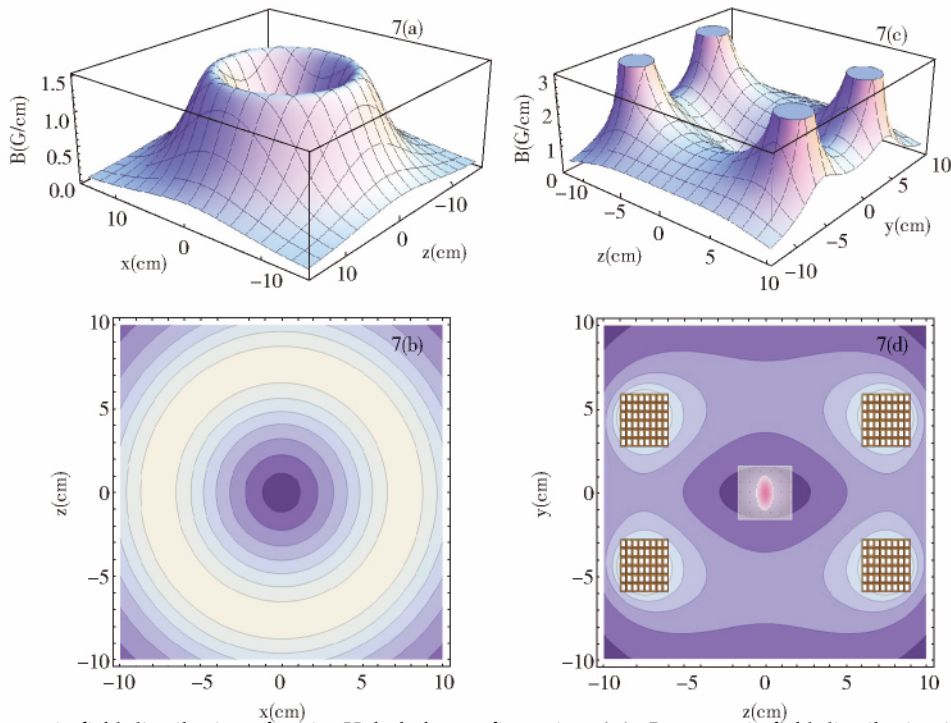


Fig. 7 Magnetic field distribution of anti-Helmholtz configuration; (a) 3D magnetic field distribution in x-z plane;

(b) Contour map of magnetic field distribution in x-z plane; (c) 3D magnetic field distribution in y-z plane; (d) Contour map of Magnetic field distribution in y-z plane

图 7 反向亥姆霍兹线圈磁场分布图:(a) x-z 平面磁场分布 3D 图;

(b) x-z 平面磁场等高图;(c) y-z 平面磁场分布 3D 图;(d) y-z 平面磁场等高图

其中,图 7(a)和(b)分别是 $x-z$ 平面磁场分布 3D 图和对应的等高图,图 7(c)和(d)为 $y-z$ 平面磁场分布 3D 图和对应的等高图,玻璃 cell、原子团以及四极磁场线圈位置如图 7(d)所示。从图 7(a)、(b)可以看出,磁场在 $x-z$ 平面(即线圈径向)具有各向同性,线圈轴向磁场梯度为径向梯度的两倍^[19]。

实验中磁阱快速上升需要一定的时间,在此期间原子团在重力作用下下落,因此原子团中心将与四极阱的中心不重合,同时原子团带有一定初始速度俘获在磁阱中,原子团在重力方向上将产生振荡。磁场线圈水平放置时重力方向的梯度是竖直放置时的两倍,因此在重力方向达到相同磁场梯度所需的电流比竖直放置磁场线圈时要小,对应达到所需磁

场梯度的时间要短。因此水平放置线圈与竖直放置相比,它在重力方向上产生较小的振荡。同时考虑磁阱快速上升过程是一个非绝热装载过程,磁场梯度过大会导致原子加热。考虑水平放置的线圈,在 $x-y$ 水平面磁场梯度同时是重力方向的 $1/2$,因此磁阱快速上升过程中在 $x-y$ 方向上加热较小;而竖直放置的线圈, y 方向的梯度与重力方向的两倍,它会导致在 y 方向上有较大的加热。

3.2 考虑重力磁场等势能面的偏移

在图 1(b)中,线圈水平放置同时考虑重力对原子的作用,四极阱中原子的有效势变为:

$$U(r) = \mu B' \sqrt{\frac{x^2}{4} + \frac{y^2}{4} + z^2} + mGz \quad (3)$$

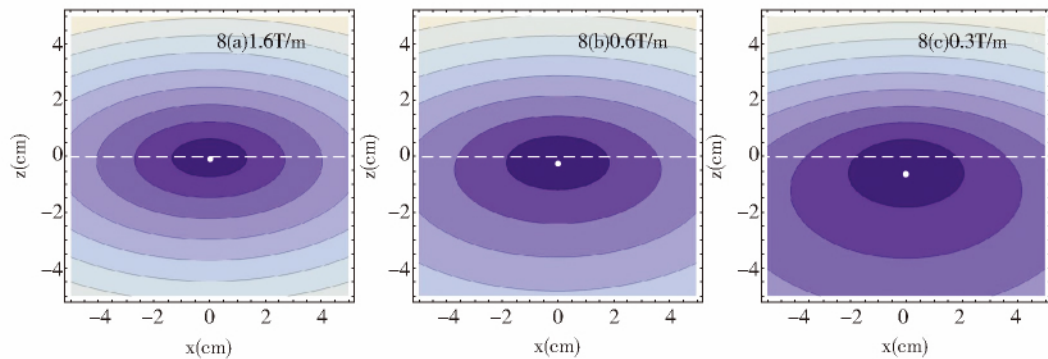


Fig. 8 Offset of equal potential energy surface under different magnetic field gradient when considering gravity($y=0$)

图 8 四极阱内原子考虑重力不同磁场梯度下磁场等势能面的偏移($y=0$)

图 8 均为四极阱考虑重力时的等势能面,其中图 8(a)、8(b)、8(c)对应的磁场梯度分别为 $B' = 1.6 \text{ T/m}$ 、 $B' = 0.6 \text{ T/m}$ 、 $B' = 0.3 \text{ T/m}$,图中白点对应每种情况下的磁阱中心位置。可以看出,考虑重力后磁阱中心以下部分的等势能面间距变大,原子团受的合力较小;在中心以上部分的等势能面间距变小,受的合力变大,磁阱在重力方向呈现非对称。实验中选取的磁场梯度必须大于抵消重力的磁场梯度,但并不是越大越好,在快速打开磁阱时梯度过大非绝热过程会引起原子剧烈振荡、加热损失原子。所以,需要在实验中选择合适的磁场梯度,优化磁阱装载效率。

3.3 抵消重力所需磁场梯度

经过 Molasses 之后得到的⁸⁷Rb 原子团可能会处于不同的态(如 $F=1$ 的基态),为避免原子在磁

阱装载过程时损失,需要对原子进行自旋极化,实验中我们选择了⁸⁷Rb 原子磁阱束缚较强的低场趋近态,即 $|F=2, m_F=2\rangle$ 态,计算此时平衡重力影响所需的磁场梯度 $B'^{[20]}$ 。

由

$$\mu B' = mG$$

可得

$$B' = \frac{mG}{\mu} \quad (4)$$

其中 m 为⁸⁷Rb 原子的质量^[21], G 为重力加速度,已知

$$\mu = g_F m_F \mu_B \quad (5)$$

其中, μ 为原子磁矩, μ_B 为波尔磁矩^[22], m_F 为原子总自旋投影。 g_F 为加上核自旋的 g 因子,

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

$$g_I \frac{F(F+1) + I(I+1) - J(J+1)}{2F(F+1)} \quad (6)$$

其中, g_J 为总角动量的 g 因子, g_I 为核自旋的 g 因子,

$$g_J = g_L \frac{J(J+1) - S(S+1) + L(L+1)}{2J(J+1)} + g_s \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \quad (7)$$

对于 $|F=2, m_F=2\rangle$ 态有 $F=2, m_F=2, L=0, J=\frac{1}{2}, S=\frac{1}{2}, I=\frac{3}{2}$ 。

将(5)、(6)、(7)式以及以上各参数带入(4)式得平衡重力所需的磁场梯度为: $B'=15.2217 \text{ G/cm}$ 。

在实验中,由于要形成磁阱对原子进行束缚,所以磁场梯度仅平衡掉重力是不够的,结合理论计算

(3.2)不同磁场梯度对等势能面偏移的影响,实验室目前采用的快速加载磁场梯度为 $B'=20.8 \text{ G/cm}$,绝热加载磁场梯度为: $B'=52.5 \text{ G/cm}$ 。

4 总结

本文研究了重力对⁸⁷Rb原子进行偏振梯度冷却和重新磁场俘获的影响。实验研究了磁场线圈竖直放置与水平放置时⁸⁷Rb原子的行为,分析了四极磁阱磁场的空间分布,观测到重力导致⁸⁷Rb原子在四极磁阱中的振荡现象。实验上通过选择了水平放置磁场线圈的方法,提高了原子的四极磁阱再装载效率。

参考文献:

- [1] Bloch I, Dalibard J, Zwerger W. Many-body Physics with Ultracold Gases[J]. *Rev Mod Phys*, 2008, **80**:885-964. DOI:10.1103/RevModPhys.80.885.
- [2] Chin C, Grimm R, Julienne P, et al. Feshbach Resonances in Ultracold Gases[J]. *Rev Mod Phys*, 2010, **82**:1225-1286. DOI:10.1103/RevModPhys.82.1225.
- [3] Galitski V, Spielman I B. Spin-orbit Coupling in Quantum Gases[J]. *Nature*, 2013, **494**:49-54. DOI:10.1038/nature11841.
- [4] Ray M W, Ruokokoski E, Kandel S, et al. Observation of Dirac Monopoles in a Synthetic Magnetic Field[J]. *Nature*, 2014, **505**:657-660. DOI:10.1038/nature12954.
- [5] Chu S, Hollberg L, Bjorkholm J E, et al. Three-Dimensional Viscous Confinement and Cooling of Atoms by Resonance Radiation Pressure[J]. *Phys Rev Lett*, 1985, **55**:48-51. DOI:10.1103/PhysRevLett.55.48.
- [6] Sesko D, Fan C G, Wieman C E. Production of a Cold Atomic Vapor Using Diode-laser Cooling[J]. *J Opt Soc Am B*, 1988, **5**:1225-1227. DOI:10.1364/JOSAB.5.001225.
- [7] Paul D L, Richard N W, Christoph I, et al. Observation of Atoms Laser Cooled below the Doppler Limit[J]. *Phys Rev Lett*, 1988, **61**:169-172. DOI:10.1103/PhysRevLett.61.169.
- [8] Grimm R, Weidemüller M, Ovchinnikov Y B. Optical Dipole Traps for Neutral Atoms[J]. *Adv At Mol Opt Phys*, 2000, **42**:95-170. DOI:10.1016/S1049-250X(08)60186-X.
- [9] Raab E L, Prentiss M, Alex C, et al. Trapping of Neutral Sodium Atoms with Radiation Pressure[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **59**:2631-2634. DOI:10.1103/PhysRevLett.59.2631.
- [10] Monroe C, Swann W, Robinson H, et al. Very Cold Trapped Atoms in a Vapor Cell[J]. *Phys Rev Lett*, 1990, **65**:1571-1574. DOI:10.1103/PhysRevLett.65.1571.
- [11] 柴世杰, 王鹏军, 付正坤, 等. 玻色-费米气体量子简并光学偶极阱的设计[J]. *量子光学学报*, 2012, **18**(2):171-177.
- [12] Anderson M H, Ensher J R, Matthews M R, et al. Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor[J]. *Science*, 1995, **269**:198-201. DOI:10.1126/science.269.5221.198.
- [13] Davis K B, Mewes M O, Andrews M R, et al. Evaporative Cooling of Sodium Atoms[J]. *Phys Rev Lett*, 1995, **75**:5202-5205. DOI:10.1103/PhysRevLett.75.5202.
- [14] DeMarco B, Jin D S. Onset of Fermi Degeneracy in a Trapped Atomic Gas[J]. *Science*, 1999, **285**:1703-1706. DOI:10.

- 1016/j.ophtha.2011.02.002.
- [15] Migdall A L, Prodan J V, Phillips W D, *et al.* First Observation of Magnetically Trapped Neutral Atoms[J]. *Phys Rev Lett*, 1985, **54**:2596-2599. DOI:10.1103/PhysRevLett.54.2596.
- [16] 王鹏军, 陈海霞, 熊德智, 等. 实现玻色-费米混合气体量子简并的四极 Ioffe 组合磁阱设计[J]. *物理学报*, 2008, **57**(8): 4840-4845. DOI:10.3969/j.issn.1007-6654.2012.02.011.
- [17] Wolfgang P, Michael H A, Jason R E, *et al.* Behavior of Atoms in a Compressed Magneto-optical Trap[J]. *J Opt Soc Am B*, 1994, **11**:1332-1335. DOI:10.1364/JOSAB.11.001332.
- [18] Bergeman T, Erez G, Metcalf H J. Magnetostatic Trapping Fields for Neutral Atoms[J]. *Phys Rev A*, 1987, **35**:1535-1546. DOI:10.1103/PhysRevA.35.1535.
- [19] Mark G R, Michael F B, Manfred F, *et al.* Experiments with Bose Einstein Condensation in an Optical Box[P]. 2005:165-169.
- [20] XIONG Dezhi, WANG Pengjun, FU zhengkun, *et al.* Transport of Bose-Einstein Condensate in QUIC Trap and Separation of Trapping Spin States[J]. *Opt Express*, 2010, **18**:1649-1656. DOI:10.1364/OE.18001649.
- [21] Michael P B, James V P, Simon R, *et al.* Penning Trap Measurements of the Masses of ¹³³Cs, ^{87,85}Rb, and ²³Na with Uncertainties ≤ 0.2 ppb[J]. *Phys Rev Lett*, 1999, **83**:4510-4513. DOI:10.1103/PhysRevLett.83.4510.
- [22] Daniel AS. Rubidium 87 D Line Data[DB/OL]. 2010:15-23. <http://steck.us/alkalidata>.

The Influence of Gravity's Effect on Loading Cold ⁸⁷Rb Atoms into Quadrupole Magnetic Trap

WANG Ya-qiong, CHEN Liang-chao, WANG Peng-jun, ZHANG Jing

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Devices,
Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: We studied the influence of gravity on ⁸⁷Rb atoms recaptured by the quadrupole magnetic trap after Sisyphus cooling. When the quadrupole magnetic field coils were placed vertically and horizontally respectively, the gravity's effect was investigated on recapturing atoms with the magnetic quadrupole trap. We have observed the oscillation of ⁸⁷Rb atoms in the quadrupole magnetic trap by time-of-flight and absorption image. The magnetic field distribution in both cases was calculated and presented that ⁸⁷Rb atoms' oscillation came from the offset of center of the magnetic field due to gravity. After calculating and analyzing the magnetic field gradient B' to balance the gravity for $|2, 2\rangle$ state of ⁸⁷Rb atom, we explored ⁸⁷Rb atoms oscillation, and chose the configuration with placing the magnetic field coils horizontally to increase the recapture efficiency of quadrupole magnetic trap.

Key words: ultracold atoms; gravity; magnetic trap; Rb