

磁光阱中超冷钠-铯原子碰撞的实验研究

徐润东 刘文良 武寄洲 马杰 肖连团 贾锁堂

Ultracold collisions in a dual species ^{23}Na - ^{133}Cs magneto-optical trap

Xu Run-Dong Liu Wen-Liang Wu Ji-Zhou Ma Jie Xiao Lian-Tuan Jia Suo-Tang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 093201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.093201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.093201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

可控双空心光束的理论方案及实验研究

Theoretical and experimental study of a controllable double-dark-hollow beam

物理学报.2015, 64(5): 053701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.053701>

利用蓝失谐激光诱导微型光学偶极阱中冷原子间的光助碰撞提高单原子制备概率

Improving the single atom probability by using the blue-detuned laser-assisted-collisions between the cold atoms trapped in the far-off-resonance trap

物理学报.2014, 63(2): 023701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.023701>

可操控二种冷原子或冷分子样品的光学双阱新方案及其实验研究

Theoretical and experimental study of a novel double-well optical dipole trap for two-species of cold atoms or molecules

物理学报.2013, 62(23): 233701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.233701>

一种实现冷原子束聚集的微磁透镜新方案

A new mini-magnetic lens proposal for covering the cold atoms

物理学报.2012, 61(22): 223701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.223701>

单原子在两个远红失谐光偶极阱中的转移

Transferring single-atoms between two red-detuned far-off-resonance optical dipole traps

物理学报.2012, 61(20): 203701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.203701>

磁光阱中超冷钠-铯原子碰撞的实验研究*

徐润东¹⁾²⁾ 刘文良¹⁾²⁾ 武寄洲¹⁾²⁾ 马杰^{1)2)†} 肖连团¹⁾²⁾ 贾锁堂¹⁾²⁾

1) (量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学激光光谱研究所, 物理电子工程学院, 山西大学, 太原 030006)

2) (极端光学协同创新中心, 山西大学, 太原 030006)

(2015年12月27日收到; 2016年2月14日收到修改稿)

研究了磁光阱中异核超冷钠铯原子的碰撞机理, 测量了超冷钠原子的碰撞损失率, 得到了钠-铯原子的碰撞损失系数 $\beta_{\text{Na-Cs}}$ 与钠原子俘获光强度之间的关系. 利用多普勒模型计算了不同俘获光强度下的钠原子磁光阱的阱深, 得到了临界光强的理论值, 与实验结果符合得较好.

关键词: 磁光阱, 超冷钠原子, 超冷铯原子, 超冷碰撞

PACS: 32.10.Fn, 34.90.+q, 37.10.De, 37.10.Gh

DOI: 10.7498/aps.65.093201

1 引言

随着激光冷却与俘获原子等技术的应用与发展, 特别是利用磁光阱^[1,2]制备超冷原子技术的成熟, 使得超冷原子的碰撞成为原子分子光物理研究领域中的热门课题^[3-8]. 与常温下原子的碰撞相比, 碰撞过程中相互作用时间较长, 原子将历经多次光子的吸收与自发辐射; 低温下原子的运动速度更低, 德布罗意波长很大; 因此超冷原子之间的碰撞具有显著的量子效应. 基于超冷原子产生的超冷分子, 特别是异核分子, 由于具有较大的电偶极矩, 因此在量子计算等^[9]方面具有重要的应用价值. 而超冷异核原子的碰撞对于获得超冷异核分子^[10,11]乃至制备异核分子BEC等^[12]实验研究具有重要的意义.

磁光阱中超冷原子的碰撞机理, 按照碰撞过程中有无能量损失可以分为弹性碰撞与非弹性碰撞, 按照碰撞原子的种类可以分为同核原子间的碰撞与异核原子间的碰撞; 按照碰撞发生时原子的状态, 可以分为基态-基态、基态-激发态、激发态-激

发态碰撞^[13]. 其中, 基态-基态碰撞, 又称为超精细结构能级改变的碰撞; 基态-激发态碰撞包括精细结构能级改变的碰撞以及辐射逃逸两种类型. 对于同核原子间的碰撞, 基态-基态碰撞的偶极相互作用势满足 $\sim 1/R^6$ (R 为原子间的核间距), 基态-激发态的偶极相互作用势满足 $\sim 1/R^3$. 异核原子间的碰撞与同核原子间碰撞的不同之处在于, 基态-激发态的偶极相互作用依赖于 $\sim 1/R^6$ ^[14] 而不是 $\sim 1/R^3$. 关于基态-激发态碰撞可以用 Gallagher-Prichard 理论模型 (G-P 模型)^[15] 进行描述. 当磁光阱的俘获光强度较大时, 起主导作用的是精细结构能级改变的碰撞以及辐射逃逸. 然而, 当俘获光强度较低时, 磁光阱的阱深很浅, 超精细结构能级改变的碰撞引起原子动能的增加, 导致原子逃逸至阱外造成原子的损失. 此外, 由于俘获光强度较低, 处于激发态的原子很少, 基态激发态碰撞受到抑制, 因此低俘获光强度下, 超精细结构能级改变的碰撞就成为主要的碰撞机理. 关于超冷原子间超精细结构能级改变的碰撞已有许多相关的工作, 例如钠铷原子^[6]、铷铯原子^[16,17]以及钠-钾原子等^[5]. 特别是对于钠-铯原子, 1999年, Shaffer等^[18]只对

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2012CB921603)、长江学者和创新团队发展计划 (批准号: IRT13076)、基金委重大研究计划培育项目 (批准号: 91436108)、国家自然科学基金 (批准号: 61378014, 61308023, 61378015, 11434007)、教育部新教师基金 (批准号: 20131401120012)、国家自然科学基金国家基础科学人才培养基金 (批准号: J1103210)、山西省优秀青年学术带头人和山西省青年科技研究基金 (批准号: 2013021005-1) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: mj@sxu.edu.cn

钠铯原子的精细结构能级改变的碰撞以及辐射逃逸做了相应的研究. 然而, 对于原子间超精细结构能级改变引起的碰撞并没有相关的实验研究见诸报道. 值得注意的是, 在超冷钠铯分子的制备中, 超精细碰撞在导致原子俘获损耗的因素中是极为重要的. 为此, 本文着眼于研究低俘获光强度下钠铯原子超精细结构能级改变的碰撞, 测量了钠原子总的碰撞损失率随俘获光强度的变化, 得到了超冷钠原子与超冷铯原子间的碰撞损失系数 $\beta_{\text{Na-Cs}}$, 并对超精细结构能级改变的碰撞进行了详细分析. 利用多普勒模型^[19] 计算了不同俘获光强度下的钠原子磁光阱的阱深, 将得到的临界光强的理论值与实验结果做了比较, 二者符合得很好.

2 实验装置与实验过程

实验装置如图 1 所示, 我们在一个背景气压约为 10^{-8} Pa 的石英真空腔中, 利用双磁光阱分别俘

获超冷铯原子与超冷钠原子. 铯原子磁光阱的俘获光与再抽运光分别由两台半导体激光器 (Toptica, DL100, 输出线宽 0.8 MHz) 提供. 通过饱和吸收光谱稳频技术将这两台激光器的频率分别锁定在铯原子 $6^2\text{S}_{1/2}, F=4 \rightarrow 6^2\text{P}_{3/2}, F'=5$ 共振频率负失谐 11 MHz 和 $6^2\text{S}_{1/2}, F=3 \rightarrow 6^2\text{P}_{3/2}, F'=4$ 共振跃迁位置, 总的俘获光强度为 5.3 mW/cm^2 , 再抽运光强度为 0.4 mW/cm^2 . 钠原子磁光阱的俘获光与再抽运光由同一台半导体激光器 (Toptica, TA-SHG pro, 输出线宽 500 kHz) 提供, 通过饱和吸收光谱稳频技术将激光的频率锁定至 $3^2\text{S}_{1/2}, F=2 \rightarrow 3^2\text{P}_{3/2}, F'=3$ 共振频率负失谐 16 MHz, 再使激光通过一个声光调制器 (AOM, 一级衍射光偏频 $\sim 1.7 \text{ GHz}$), 将出射的零级衍射光作为俘获光, 正一级衍射光作为再抽运光, 总俘获光强度的范围为 $3.7\text{--}12 \text{ mW/cm}^2$, 再抽运光强度为 1 mW/cm^2 . 构成铯原子磁光阱与钠原子磁光阱所需的四极磁场由同一对反亥姆霍兹线圈产生, 磁场梯度约

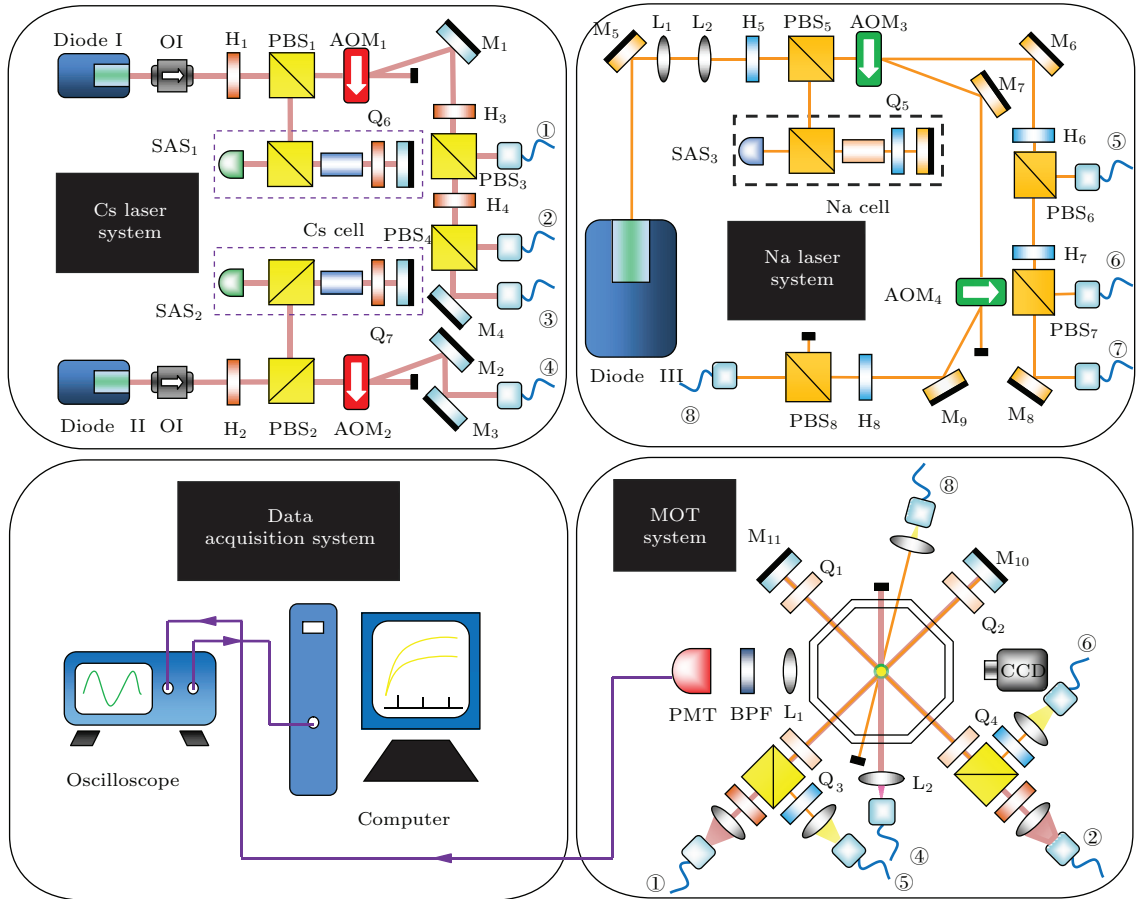


图 1 (网刊彩色) 装置图 OI, 光隔离器; H, 半波片; Q, 四分之一波片; PBS, 偏振分光棱镜; AOM, 声光调制器; SAS, 饱和吸收光谱; M, 反射镜; L, 透镜; BPF, 带通滤波片; PMT, 光电倍增管; CCD, 电荷耦合元件; MOT, 磁光阱

Fig. 1. (color online) Experimental setup: OI, optical isolator; H, half-wave plate; Q, quarter-wave plate; PBS, polarization beam splitter; AOM, acousto-optic modulator; SAS, saturated absorption spectroscopy; M, mirror; L, lens; BPF, band pass filter; PMT, photomultiplier; CCD, charge-coupled device; MOT, magneto-optical trap.

为 12 G/cm. 实验中用来产生圆偏振光的波片, 对于铯原子的俘获光相当于 1/4 波片, 对于钠的俘获光相当于 3/4 波片, 从而使两种原子的俘获光沿同一路径进入真空腔, 并且具有相同的偏振. 为了测量磁光阱中超冷钠原子与超冷铯原子的数目, 我们使用了装有带通滤光片的光电倍增管 (PMT) 以及雪崩光电二极管 (APD) 分别收集钠原子团与铯原子团辐射的荧光, 进而通过荧光法来计算原子的数目^[20]. 在超冷分子实验中, 为了增大钠原子和铯原子的碰撞概率, 形成数量较多的异核分子, 必须确保两个原子团的中心完全重合. 我们采用不同方向放置的两个电荷耦合器件 (CCD) 监视原子团的位置, 进而调节原子的相互位置, 以确保重合, 能有效地测量原子间的碰撞. 同时, 这两个 CCD 还可用来测量原子团的直径, 并据此计算出原子团的密度.

当磁光阱中存在超冷铯原子团时, 超冷钠原子的数目 N_{Na} 与时间 t 的关系满足:

$$\frac{dN_{\text{Na}}}{dt} = L_{\text{Na}} - \gamma_{\text{Na}}N_{\text{Na}} - \beta_{\text{Na}} \int_{V_{\text{Na}}} n_{\text{Na}}^2 d^3r - \beta_{\text{Na-Cs}} \int_{V_{\text{Na}}} n_{\text{Na}} n_{\text{Cs}} d^3r, \quad (1)$$

上式中, L_{Na} 为钠原子磁光阱的装载速率, γ_{Na} 为超冷钠原子与背景气体 (主要是热的铯原子与钠原子) 之间的碰撞损失系数, β_{Na} 为超冷钠原子之间的碰撞损失系数, $\beta_{\text{Na-Cs}}$ 为超冷钠原子与超冷铯原子之间的碰撞损失系数, n_{Na} 与 n_{Cs} 分别为超冷钠原子团与超冷铯原子团的密度, r 为钠原子团中某一点的位置, 式中涉及的积分遍历整个钠原子团. 需要指出的是, 超冷铯原子的数目随时间的变化也遵从类似的方程, 因而对于钠原子碰撞的测量方法, 也同样适用于铯原子碰撞. 严格来讲, 冷原子团的密度是时间与空间的函数, 其表达式可写为 $n(r, t) = n_0(t) e^{-2(r/\omega(t))^2}$, n_0 和 ω 分别为原子的峰值密度与高斯半径. 通常情况下很难对方程 (1) 进行求解, 然而当磁光阱中的原子数目达到一定值时 (约 10^5 个), 由于荧光自陷效应^[21], 超冷原子之间将产生不可忽略的排斥力, 阻碍原子团密度的进一步增加, 使其达到稳态并不再随时间变化, 而原子团的体积随着原子数目的增加不断增大. 基于上述分析, 再通过控制磁光阱的参数使钠原子团完全沉浸在铯原子团中, 就可以在等密度近似^[22] 条件下对方程 (1) 进行简化:

$$\beta_{\text{Na}} \int_{V_{\text{Na}}} n_{\text{Na}}^2 d^3r = \beta_{\text{Na}} n_{\text{Na}} N_{\text{Na}},$$

$$\beta_{\text{Na-Cs}} \int_{V_{\text{Na}}} n_{\text{Na}} n_{\text{Cs}} d^3r = \beta_{\text{Na-Cs}} n_{\text{Cs}} N_{\text{Na}}.$$

通过求解简化后的方程可得:

$$\begin{aligned} N_{\text{Na}} &= N_{\text{Na}}^{\text{S}} \{1 - \exp[-(\gamma_{\text{Na}} + \beta_{\text{Na}} n_{\text{Na}} + \beta_{\text{Na-Cs}} n_{\text{Cs}})t]\} \\ &= N_{\text{Na}}^{\text{S}} \{1 - \exp[-P'_{\text{Na}} t]\}, \end{aligned} \quad (2)$$

上式中, N_{Na}^{S} 为稳态时钠原子的数目, P'_{Na} 为存在铯原子团时钠原子总的碰撞损失率.

我们采用如下方案获得钠-铯原子的碰撞损失系数 $\beta_{\text{Na-Cs}}$. 首先, 断开铯原子的再抽运光, 使背景中没有超冷铯原子, 同时对钠原子进行装载并记录装载过程. 此时 $n_{\text{Cs}} = 0$, 所以方程 (2) 可写为

$$\begin{aligned} N_{\text{Na}} &= N_{\text{Na}}^{\text{S}} \{1 - \exp[-(\gamma_{\text{Na}} + \beta_{\text{Na}} n_{\text{Na}})t]\} \\ &= N_{\text{Na}}^{\text{S}} \{1 - \exp[-P_{\text{Na}} t]\}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中, P_{Na} 为不存在铯原子时钠原子总的碰撞损失率. 之后, 在超冷铯原子团存在的情况下, 同样记录钠原子的装载过程. 最后, 对 (2) 式进行变形: $-\ln(1 - (N_{\text{Na}}/N_{\text{Na}}^{\text{S}})) = P'_{\text{Na}} t$, 利用该式对有铯原子团时钠原子的装载曲线进行线性拟合得到 P'_{Na} . 同理得到 P_{Na} , 再将 P'_{Na} 与 P_{Na} 的差值除以超冷铯原子团的密度就可得到钠-铯原子的碰撞损失率 $\beta_{\text{Na-Cs}}$. 在我们的实验过程中, 铯原子磁光阱的参数始终保持不变 (总俘获光强度为 5.3 mW/cm², 磁场梯度为 12 G/cm), 从而使在不同钠原子的俘获光强度下, 超冷铯原子团具有相同的密度.

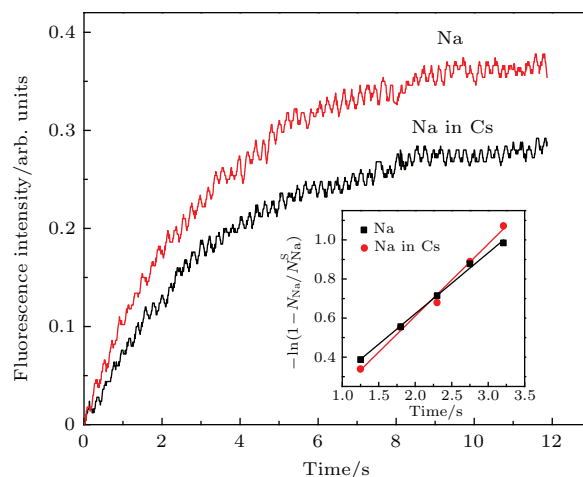


图2 (网刊彩色) 磁光阱中钠原子在有铯原子团时的装载曲线, 插图为两种装载曲线的 $[-\ln(1 - (N_{\text{Na}}/N_{\text{Na}}^{\text{S}}))]$ 与装载时间的关系

Fig. 2. (color online) Typical loading curves of the Na MOT in the presence [black curve] and absence [red curve] of cold Cs atoms. Inset: Logarithmic plot $[-\ln(1 - (N_{\text{Na}}/N_{\text{Na}}^{\text{S}}))]$ versus time for the two loading curves.

图2所示为钠原子在有无铯原子团存在时的装载曲线(钠原子俘获光强度为 7.6 mW/cm^2). 从图中可以看出, 当铯原子团存在时, 稳态时钠原子的数目相比于无铯原子团时下降了约23%. 但对铯原子而言, 钠原子团是否存在对其影响不大, 这是由于铯原子的数目多于钠原子的数目, 并且铯原子的质量比钠原子大, 所以碰撞引起的原子损失数占原子总数的比例很小, 因而无明显变化. 插图为 $[-\ln(1 - (N_{\text{Na}}/N_{\text{Na}}^S))]$ 与装载时间的关系, 通过对其线性拟合就可得到 P'_{Na} 与 P_{Na} (分别为0.45, 0.36), 拟合时略去了初始时段未达到等密度近似条件的部分.

3 实验结果与分析

图3(a)所示分别为不同俘获光强度下, 有无铯原子团时钠原子总的碰撞损失率 P'_{Na} 与 P_{Na} . 实验中俘获光强度的范围为 $3.7\text{--}12 \text{ mW/cm}^2$, 这是

由于当俘获光强度低于 3.7 mW/cm^2 时, 钠原子团的荧光将变得十分微弱, 难以进行探测; 同时, 受激光器输出光功率的限制, 可获得的最大的俘获光强度为 12 mW/cm^2 . 因超冷钠原子与背景气体间的碰撞损失系数 γ_{Na} 主要与背景气体的温度与压强有关, 而温度与压强在实验过程中基本上保持不变, 故可认为(2)式与(3)式中的 γ_{Na} 是相等的. 另外, 通过测量发现, 相同俘获光强度下超冷铯原子团的存在与否对于钠原子团的密度 n_{Na} 影响不大, 可认为 n_{Na} 不变. 根据以上两点, 将 P'_{Na} 与 P_{Na} 的差值除以超冷铯原子团的密度就可以得到钠-铯原子的碰撞损失系数 $\beta_{\text{Na-Cs}}$, 结果如图3(b)所示, 图中误差条表示五次重复实验所得结果的标准差. 实验中的误差主要来自于原子数目以及原子团体积的测量^[16], 从图中可以看出总碰撞损失率 P'_{Na} 的误差要比 P_{Na} 的误差大, 这是由于超冷铯原子团的存在引起的.

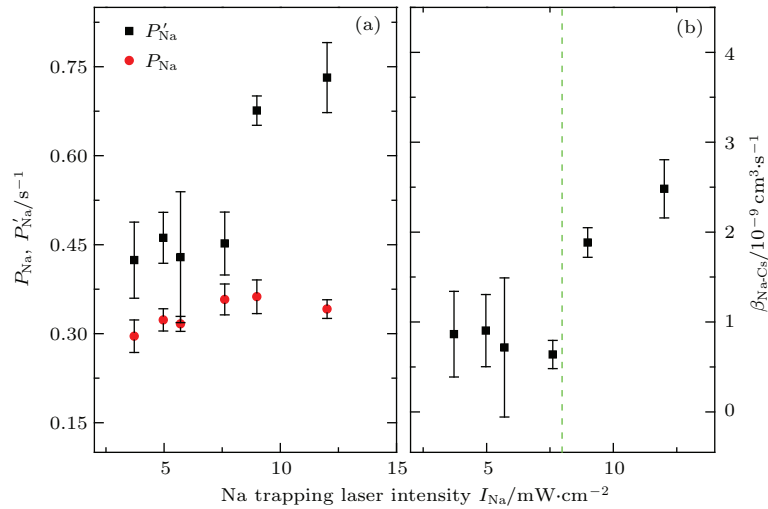
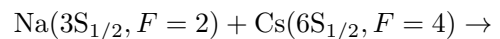
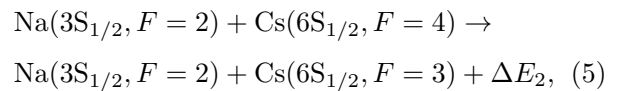
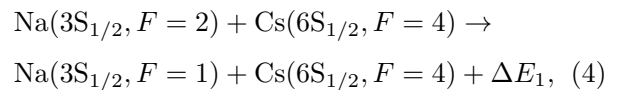


图3 (网刊彩色)(a) 不同钠原子俘获光强度下钠原子在有无铯原子团时总的碰撞损失率 P'_{Na} 与 P_{Na} ; (b) 钠-铯原子的碰撞损失系数 $\beta_{\text{Na-Cs}}$, 虚线代表临界光强的预测值

Fig. 3. (color online) (a) Total loss rates for trapped Na atoms in the absence of trapped Cs atoms (P_{Na}) and in the presence of trapped Cs atoms (P'_{Na}); (b) trap loss rate coefficient $\beta_{\text{Na-Cs}}$, the dashed vertical line in (b) marks the predicted critical intensity.

如前所述, 超冷原子之间碰撞的主要机理为超精细结构能级改变的碰撞、辐射逃逸以及精细结构改变的碰撞. 其中, 辐射逃逸与精细结构改变的碰撞都是基态原子与激发态原子之间的碰撞, 相应的碰撞损失率与俘获光强度成正比. 在本实验中, 由于所使用的两种原子的俘获光都比较弱, 因此辐射逃逸与精细结构改变的碰撞所造成的影响很小, 起主要作用的是超精细结构能级改变的碰撞. 对于钠

原子与铯原子而言, 磁光阱中存在以下三种超精细结构能级改变的碰撞:



$$\text{Na}(3\text{S}_{1/2}, F=1) + \text{Cs}(6\text{S}_{1/2}, F=3) + \Delta E_3, \quad (6)$$

式中, $\Delta E_i (i = 1, 2, 3)$ 为超精细结构能级改变的碰撞所产生的能量, 数值分别为 1.77, 9.19, 10.96 GHz. 该能量在参与碰撞的钠原子与铯原子之间按照 $\Delta E \cdot [m_{\text{Cs}}/(m_{\text{Cs}} + m_{\text{Na}})]$ 与 $\Delta E \cdot [m_{\text{Na}}/(m_{\text{Cs}} + m_{\text{Na}})]$ 的比例进行分配^[23], 则钠原子获得的能量分别为 1.51, 7.83, 9.35 GHz. 当原子获得的能量大于磁光阱的阱深时, 原子将从阱中逃逸, 造成原子的损失. 超精细结构能级改变的碰撞的特点是原子的碰撞损失系数在所获得能量对应的磁光阱的阱深处有一个极小值, 例如铷原子同核^[24]、钠-铷原子异核^[6]以及铷-铯原子异核^[16,17]的超精细结构能级改变的碰撞损失系数都存在极小值. 由于不同俘获光强度下磁光阱的阱深不同, 通常将碰撞损失系数为极小值时阱深对应的俘获光强度称为临界光强.

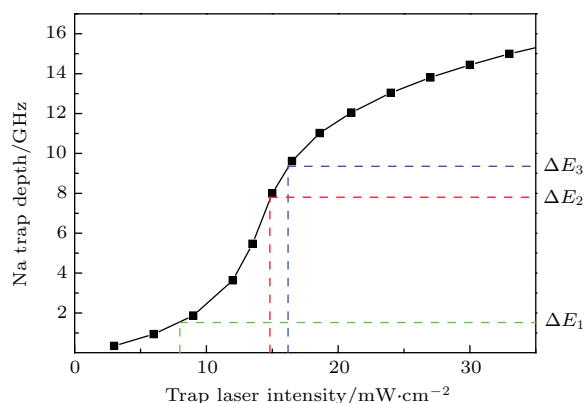


图4 钠原子磁光阱俘获光强度与阱深之间的关系.

Fig. 4. Calculated trap depth for the cold Na atom as a function of the total Na trapping laser intensity.

我们利用多普勒模型^[19]计算了钠原子磁光阱的阱深与俘获光强度之间的关系, 结果如图4所示, 图中用虚线标出的为钠原子通过超精细结构能级改变的碰撞获得的能量所对应的阱深与俘获光强度, 从图中可得临界光强的值分别为 7.98, 14.82, 16.20 mW/cm². 由于实验中所使用的激光器功率的限制, 俘获光的强度只能覆盖住第一个临界光强, 从图3(b)中可看出, 在临界光强附近, 碰撞损失率有明显的极小值存在, 与理论符合得较好.

4 结 论

本文介绍了同时冷却并俘获钠原子与铯原子的磁光阱系统, 测量了磁光阱中超冷钠原子的碰撞

损失率, 得到了碰撞损失系数 $\beta_{\text{Na-Cs}}$ 与钠原子俘获光强度之间的关系, 发现在光强为 5—10 mW/cm² 的范围内碰撞损失系数有极小值, 与超精细结构能级交换碰撞的特征相符. 利用多普勒模型计算了钠原子俘获光强度与其势阱深度之间的关系, 得到的临界光强的值分别为 7.98, 14.82, 16.2 mW/cm², 将第一个临界光强的值与实验结果做了对比, 与实验结果符合得很好. 我们的结果对于研究异核原子间的碰撞以及进一步制备超冷异核基态钠铯分子, 获得钠铯分子振转能级的束缚能数据等具有重要价值.

参考文献

- [1] Raab E L, Prentiss M, Cable A, Chu S, Pritchard D E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 2631
- [2] Wang J Y, Liu B, Diao W T, Jin G, He J, Wang J M 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 053202 (in Chinese) [王杰英, 刘贝, 刁文婷, 靳刚, 何军, 王军民 2014 物理学报 **63** 053202]
- [3] Dutta S, Altaf A, Lorenz J, Elliott D S, Chen Y P 2014 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **47** 105301
- [4] Chen P, Li Y Q, Zhang Y C, Wu J Z, Ma J, Xiao L T, Jia S T 2013 *Chin. Phys. B* **22** 093301
- [5] Santos M S, Nussenzveig P, Antunes A, Cardona P S P, Bagnato V S 1999 *Phys. Rev. A* **60** 3892
- [6] Young Y E, Ejnisman R, Shaffer J P, Bigelow N P 2000 *Phys. Rev. A* **62** 055403
- [7] Zhang J C, Liu Y F, Sun J F 2011 *Chin. Phys. B* **20** 023401
- [8] Anderlini M, Courtade E, Cristiani M, Cossart D, Ciampini D, Sias C, Morsch O, Arimondo E 2005 *Phys. Rev. A* **71** 061401
- [9] DeMile D 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 067901
- [10] Yang Y, Ji Z H, Yuan J P, Wang L R, Zhao Y T, Ma J, Xiao L T, Jia S T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 213301 (in Chinese) [杨艳, 姬中华, 元晋鹏, 汪丽蓉, 赵延霆, 马杰, 肖连团, 贾锁堂 2012 物理学报 **61** 213301]
- [11] Huang L H, Wang P J, Fu Z K, Zhang J 2014 *Chin. Phys. B* **23** 013402
- [12] Santos L, Shlyapnikov G V, Zoller P, Lewenstein M 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 1791
- [13] Mancini M W, Caires A R L, Telles G D, Bagnato V S, Marcassa L G 2004 *Eur. Phys. J. D* **30** 105
- [14] Marinescu M, Sadeghpour H R 1999 *Phys. Rev. A* **59** 390
- [15] Gallagher A, Pritchard D 1989 *Phys. Rev. Lett.* **63** 957
- [16] Ji Z H, Wu J Z, Zhang H S, Meng T F, Ma J, Wang L R, Zhao Y T, Xiao L T, Jia S T 2011 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **44** 025202
- [17] Chang X F, Ji Z H, Yuan J P, Zhao Y T, Yang Y G, Xiao L T, Jia S T 2013 *Chin. Phys. B* **22** 093701
- [18] Shaffer J P, Chalupczak W, Bigelow N P 1999 *Phys. Rev. A* **60** R3365

- [19] Gensemer S D, Villicana V S, Tan K Y N, Grove T T, Gould P L 1997 *Phys. Rev. A* **56** 4055
- [20] Han Y X, Wang B, Ma J, Xiao J T, Wang H 2007 *Acta Sin. Quantum Opt.* **13** 30 (in Chinese) [韩燕旭, 王波, 马杰, 校锦涛, 王海 2007 量子光学学报 **13** 30]
- [21] Walker T, Sesko D, Wieman C E 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 408
- [22] Tiwari V B, Singh S, Rawat H S, Mehendale S C 2008 *Phys. Rev. A* **78** 063421
- [23] Auböck G, Binder C, Holler L, Wippel V, Rumpf K, Szczepkowski J, Ernst W E, Windholz L 2006 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **39** S871
- [24] Wallace C D, Dinneen T P, Tan K N, Grove T T, Gould P L 1992 *Phys. Rev. Lett.* **69** 897

Ultracold collisions in a dual species ^{23}Na - ^{133}Cs magneto-optical trap*

Xu Run-Dong¹⁾²⁾ Liu Wen-Liang¹⁾²⁾ Wu Ji-Zhou¹⁾²⁾ Ma Jie¹⁾²⁾†
Xiao Lian-Tuan¹⁾²⁾ Jia Suo-Tang¹⁾²⁾

1) (State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optic Devices, Institute of Laser Spectroscopy, College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

2) (Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

(Received 27 December 2015; revised manuscript received 14 February 2016)

Abstract

The production and research of ultracold heteronuclear molecules have aroused the great interest recently. On the one hand, these molecules are extremely popular in experiments for exploring the collision dynamic behaviors in threshold, photoassociative spectrum and strong dipole-dipole interactions. On the other hand, ultracold polar molecules populated at deeply bound levels in the singlet ground state are the right candidates to investigate quantum memories for quantum simulation, and to study strongly interacting quantum degenerate gases. The precise knowledge of cold collision processes between two different types of alkali atoms is necessary for understanding and utilizing ultracold heteronuclear molecules, sympathetic cooling, and thus formation of two species BEC.

The goal of the present investigation is to study the collisions between ultracold sodium atoms and cesium atoms. We systematically demonstrate simultaneously trapping ultracold sodium and cesium atoms in a dual-species magneto-optical trap (MOT). The sodium atom trap loss rate coefficient $\beta_{\text{Na-Cs}}$ is measured as a function of Na trapping laser intensity. At low intensities, the trap loss is dominated by ground-state hyperfine-changing collisions, while at high intensities, collisions involving excited atoms are more important. A strong interspecies collision-induced loss for Na atoms in the MOT is observed. In order to obtain the trap loss coefficient $\beta_{\text{Na-Cs}}$, we proceed in two steps. First, the Cs repumping laser is blocked to avoid the formation of ultraold Cs atoms. The loading process of Na atoms is recorded when the Cs trapping laser is on. Second, the loading curves of the Na atoms are obtained as Cs atoms are present with the repumping laser beams. The total losses P_{Na} and P'_{Na} are acquired by fitting the two loading curves of trapped Na

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB921603), the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University of Ministry of Education of China (Grant No. IRT13076), the Major Research Plan of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 91436108), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61378014, 61308023, 61378015, 11434007), the New Teacher Fund of the Ministry of Education of China (Grant No. 20131401120012), the Fund for Fostering Talents in Basic Science of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. J1103210), and the Natural Science Foundation for Young Scientists of Shanxi Province, China (Grant No. 2013021005-1).

† Corresponding author. E-mail: mj@sxu.edu.cn

atoms. Thus, the trap loss coefficient $\beta_{\text{Na-Cs}}$ can be derived from the difference between total losses P_{Na} and P'_{Na} divided by the density of the Cs atoms.

The coefficient $\beta_{\text{Na-Cs}}$ decreases in a range of 5–10 mW/cm², which originates from the hyperfine-state changing (HFC) collision. A Doppler model is used to calculate the Na atom trap depth, in that the atom trap depth and exoergic energy determine the behavior of the collisional trap loss rate coefficient. The three corresponding calculated critical intensities of Na trapping laser are 7.98, 14.82, 16.2 mW/cm² respectively in the Na-Cs HFC collision process. The first calculated critical intensity value agrees well with the experimental result. Our work provides a valuable insight into HFC collision between Na and Cs atoms and also paves the way for the production of ultracold NaCs molecules using Photoassociation (PA) technology. Furthermore, the experimental results lay a great basis for the obtainments of high sensitive heteronuclear NaCs molecular PA spectrum and the creation of deeply bound ground state molecules.

Keywords: magneto-optical trap, ultracold sodium atoms, ultracold cesium atoms, ultracold collisions

PACS: 32.10.Fn, 34.90.+q, 37.10.De, 37.10.Gh

DOI: [10.7498/aps.65.093201](https://doi.org/10.7498/aps.65.093201)