

# 锶光钟 Zeeman 减速器中截止速度对 蓝磁光阱原子数的影响

韩建新<sup>1,2</sup>, 卢晓同<sup>1,2</sup>, 卢本全<sup>1,2</sup>, 王叶兵<sup>1,2</sup>, 孔德欢<sup>1</sup>, 张首刚<sup>1</sup>, 常宏<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院国家授时中心时间频率基准重点实验室, 陕西 西安 710600;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 基于分布函数理论, 分析了 Zeeman 减速器中截止速度对蓝磁光阱装载的影响, 研究了 Zeeman 减速器中截止速度与蓝磁光阱俘获原子数目之间的关系, 对比了分布函数理论和通用理论两种模型的拟合结果, 结果表明, 分布函数理论模型能更好地描述两者之间的关系。利用多匝 Zeeman 减速器对进入蓝磁光阱的热原子束进行减速, 制备了锶光钟的冷原子样品。在光钟系统研制中, 利用分布函数理论对 Zeeman 减速器进行了优化设计, 提高了 Zeeman 减速器的工作效率, 为实现更高效更紧凑的 Zeeman 减速器及光钟小型化提供了参考。

**关键词** 原子与分子物理; 激光冷却; Zeeman 减速器; 速度分布; 截止速度

中图分类号 O436.2; O431.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0702001

## Influence of Cut-off Speed on Atomic Number of Blue Magneto-Optical Trap in Zeeman Slower of Strontium Optical Clock

Han Jianxin<sup>1,2</sup>, Lu Xiaotong<sup>1,2</sup>, Lu Benquan<sup>1,2</sup>, Wang Yebing<sup>1,2</sup>,  
Kong Dehuan<sup>1</sup>, Zhang Shougang<sup>1</sup>, Chang Hong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, National Time Service Center,  
Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710600, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The influence of cut-off speed in a Zeeman slower on the loading of blue magneto-optical trap based on the distribution function theory is analyzed and the relationship between the cut-off speed and the number of atoms trapped by the blue magneto-optical trap is investigated. A comparison between the fitting results from the distribution function theory and that from the general theory indicates that the distribution function theory model can better analyze the relationship between the above two. The cold atomic sample for strontium optical clock is prepared by the usage of a multi-turns Zeeman slower for slowing down the thermal atomic beam entering the blue magneto-optical trap. In the optical clock system, the design of the Zeeman slower is optimally designed based on the distribution function theory and thus the work efficiency of the Zeeman slower is improved. This research lays the foundation to achieve a more efficient and compact Zeeman slower and the miniaturization of an optical clock.

**Key words** atomic and molecular physics; laser cooling; Zeeman reducer; speed distribution; cut-off speed

**OCIS codes** 020.3320; 020.7490; 020.7010

## 1 引 言

近年来光钟发展迅速, 其已被证明比微波钟具

有更高的稳定性和准确度<sup>[1-3]</sup>, 有望成为下一代时间频率基准<sup>[4-6]</sup>。光钟在引力红移探测<sup>[7-8]</sup>、精细结构常数研究<sup>[9]</sup>及精密测量等领域得到广泛应用<sup>[10]</sup>。

收稿日期: 2018-01-04; 收到修改稿日期: 2018-01-31

基金项目: 国家自然科学基金(11474282, 61775220)、中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDB-SSW-JSC004)、中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB21030700)

作者简介: 韩建新(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事光频标方面的研究。E-mail: hanjianxinabc@126.com

导师简介: 常宏(1977—), 男, 博士, 研究员, 主要从事量子光学和光频标方面的研究。

E-mail: changhong@ntsc.ac.cn(通信联系人)

目前,铯原子光钟的测量精度已达  $10^{-19}$  量级,是世界上最精确的原子钟<sup>[11-13]</sup>。

在光钟的研制过程中,冷原子的制备是最重要的组成部分之一,冷原子数目是影响光钟稳定性的一个关键因素<sup>[14]</sup>。在原子冷却过程中,原子被装载至蓝磁光阱(Blue MOT)中,Blue MOT 中冷原子数目越多,意味着最终光晶格中冷原子数目越多,更易实现光钟跃迁探测信噪比的提升。

在制备铯光钟冷原子时,需要将固态铯加热以形成热原子束,之后通过原子束减速,使原子速度由几百米每秒降至几十米每秒,这样才能进行 Blue MOT 的装载,因而原子束减速是影响 Blue MOT 装载的一个重要因素<sup>[15]</sup>。原子束减速一般采用的方法是 Zeeman 补偿法<sup>[16]</sup>,该方法利用随位置变化的磁场补偿多普勒频移以达到持续减速原子束的目的。

外部磁场的产生通常有三种方法:塔状线圈、永磁体组和多匝线圈。使用单根线绕制的塔状线圈构成梯度磁场,这样形成的磁场只针对特定速度分布的热原子束减速,同时需要添加补偿磁场<sup>[17-18]</sup>;采用永磁体组构建磁场,其磁场可细微变化,但可调节范围有限,不可关断且制作工艺复杂<sup>[19]</sup>;使用多匝线圈构建磁场,磁场可大范围调节,并可随时关断。考虑到产生的磁场需要匹配不同截止速度的磁场分布,本文采用多匝线圈构建的 Zeeman 减速器。

像设计其他小型化系统一样,光钟向小型化和可移动方面的发展既需要考虑系统的高效性和可靠性,又要考虑系统的紧凑性<sup>[20]</sup>,包括光学系统的设计<sup>[21-22]</sup>和物理系统的搭建等<sup>[23-24]</sup>。故 Zeeman 减速器的设计在保证较高减速效率的同时,需要减小减速器的质量和体积。本文分析了 Zeeman 减速中截止速度对冷原子数目的影响,为 Zeeman 减速器小型化和紧凑化提供了理论依据和实验参考。Zeeman 减速作为铯光钟原子束减速阶段的重要过程,通常将原子减速至 100 m/s 即可满足要求<sup>[25]</sup>。本文根据分布函数理论设计的 Zeeman 减速器,将原子团速度由 460 m/s 减速至 35 m/s,实验测量了减速中截止速度对 Blue MOT 俘获冷原子数目的影响,实验数据与所提的分布函数理论符合较好,最终根据实际应用情况选定最佳的截止速度为 35 m/s。

## 2 理论分析

### 2.1 原子束的 Zeeman 减速

为使原子炉喷射出的热原子速度减小,需要在原子束喷射方向对射一束激光将原子减速。在原子

减速过程中,原子速度不断减小,但由于多普勒效应,原子会逐渐与减速光脱离共振。解决此问题的常见方法是 Zeeman 补偿法,即利用 Zeeman 效应使原子跃迁频率随空间位置变化,进而对多普勒效应造成的影响进行补偿。

Zeeman 补偿法减速的本质是利用散射力的不断作用使原子速度降低<sup>[26]</sup>,散射力表达式为

$$F = \frac{\hbar k \Gamma}{2} \frac{s}{1 + s + 4\Delta_{\text{eff}}^2/\Gamma^2}, \quad (1)$$

式中  $k$  为减速光的波数; $\Gamma$  为减速光的自然线宽,对铯原子减速过程来说  $\Gamma = 2\pi \times 32$  MHz; $\hbar$  为普朗克常量; $s = I/I_{\text{sat}}$  为饱和因子,其中  $I$  为实际光功率密度, $I_{\text{sat}}$  为饱和光功率密度; $\Delta_{\text{eff}}$  为有效失谐量。当  $\Delta_{\text{eff}} = 0$  时,散射力取最大值,此时作用在原子上的最大加速度为  $a_{\text{max}}$ ,而实际原子束所受到的加速度与最大加速度之间存在比例系数,这一比例系数定义为  $\beta$ ,其满足  $a = \beta a_{\text{max}}$ ,则实际加速度表达为

$$a = \beta \frac{\hbar k \Gamma}{2m} \frac{s}{1 + s}, \quad (2)$$

式中  $m$  为原子质量。联立(1)、(2)式可得到不同轴向位置对应的磁场,即

$$B(z) = \frac{\hbar}{\mu'} \times \left\{ -\delta - k \cdot v(z) + \frac{\Gamma}{2} \sqrt{[1 + s(z)] \cdot \left( \frac{1}{\beta} - 1 \right)} \right\}, \quad (3)$$

式中  $\mu'$  为玻尔磁子, $\delta$  为激光失谐量, $s(z)$  为饱和因子, $v$  为原子速度。由于光束功率密度在空间上有变化,因此饱和因子  $s$  随空间位置的变化而变化<sup>[27]</sup>。基于(3)式设计出最佳的磁场分布,构建磁场使减速光与原子持续作用,从而在 Blue MOT 区得到足够多的低速原子样品。

### 2.2 磁光阱的原子俘获数目

原子炉喷出的热原子经过 Zeeman 减速后,仅有小于某一速度的原子才能被 Blue MOT 俘获,此速度称为 Blue MOT 俘获的临界速度。而在基于(3)式的磁场设计中,原子速度会终止于某一速度而不再减速,该速度称为 Zeeman 减速中的截止速度。

通常理论上只考虑临界速度的条件,对 Blue MOT 俘获的冷原子数<sup>[28]</sup>进行如下估算:

$$N(v_f) = \frac{1}{8} \left( \frac{v_{\text{trap}}}{v_f} \right)^4 \frac{S}{\sigma}, \quad (4)$$

式中  $v_{\text{trap}} = 2|\Delta|/k_{\text{trap}}$  为 Blue MOT 俘获的临界速度,其中  $\Delta$  为俘获光失谐, $k_{\text{trap}}$  为俘获光波数; $S =$

$4\pi r^2$  为俘获光的冷却面积,其中  $r$  为俘获光的光束半径; $\sigma$  为俘获的冷原子与周围背景热原子的碰撞截面; $v_f$  为 Zeeman 减速中的截止速度。

在实际实验中,原子速度分布服从麦克斯韦-玻尔兹曼分布,对低于临界速度的原子进行积分可得到 Blue MOT 俘获冷原子的相对数目<sup>[29]</sup>。当临界速度相同时,改变截止速度可得到不同截止速度下 Blue MOT 俘获冷原子数目的变化。

考虑原子束的玻尔兹曼分布

$$f(v) = \frac{m}{2\pi k_B T} \exp\left(-\frac{m}{2k_B T} v^2\right) v^2, \quad (5)$$

式中  $T = mv_f^2/(2k_B)$ ,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为原子束温度,  $v$  为速度。把  $f(v)$  看作速度  $v$  和截止速度  $v_f$  的函数,对  $v$  从 0 到 Blue MOT 俘获临界速度  $v_{\text{trap}}$  进行积分,对于相同 Blue MOT,  $v_{\text{trap}}$  为常数,则对  $f(v)$  积分后得到的函数即为相对原子数目  $N_1$  关于截止速度  $v_f$  的函数:

$$N_1(v_f) = A[B \exp(C/v_f^2) + Dv_f \cdot \text{erf}(E/v_f)], \quad (6)$$

式中 erf 函数为误差函数,  $A, B, C, D, E$  均为待定拟合参量。考虑到减小截止速度时,进入 Blue MOT 区的总原子数目也同时变少,根据其变化趋势,对(6)式进行修正,在(6)式中添加截止速度因

子<sup>[30]</sup>,这样可得到绝对原子数目  $N_1'$  的表达式为

$$N_1'(v_f) = Av_f[B \exp(C/v_f^2) + Dv_f \cdot \text{erf}(E/v_f)], \quad (7)$$

对比(4)式和(7)式可以看出,在分布函数理论和通用理论中,Blue MOT 俘获冷原子数目分别正比于  $v \cdot \exp(1/v^2)$  和  $1/v^4$ ,两者都呈现随截止速度的增大 Blue MOT 俘获冷原子数目减小的趋势,但截止速度越低(小于 100 m/s),该两种理论的变化趋势可分辨的差别越大。

### 3 实验装置

图 1 所示为实验装置示意图,原子炉内 Sr 原子被加热至 760 K,对应原子束的最可几速度为 460 m/s。热原子蒸气从原子炉喷出,经过二维准直窗口,通过 Zeeman 减速器与减速光共同作用进行原子束减速,最后到达 Blue MOT 真空腔室。设计使用的 Zeeman 减速器总长为 302 mm,由 10 个线圈构成,单个线圈的宽度为 28 mm,各线圈之间用 2 mm 厚的无磁不锈钢板隔开。直径为 1.5 mm 的漆包线缠绕在直径为 16 mm 的真空差分管上构成单个线圈,每层有 18 圈,共计 20 层,改变每个线圈的电流,即可产生具有不同截止速度的原子束。关于铯原子光钟的详细实验装置可参考文献[31]。

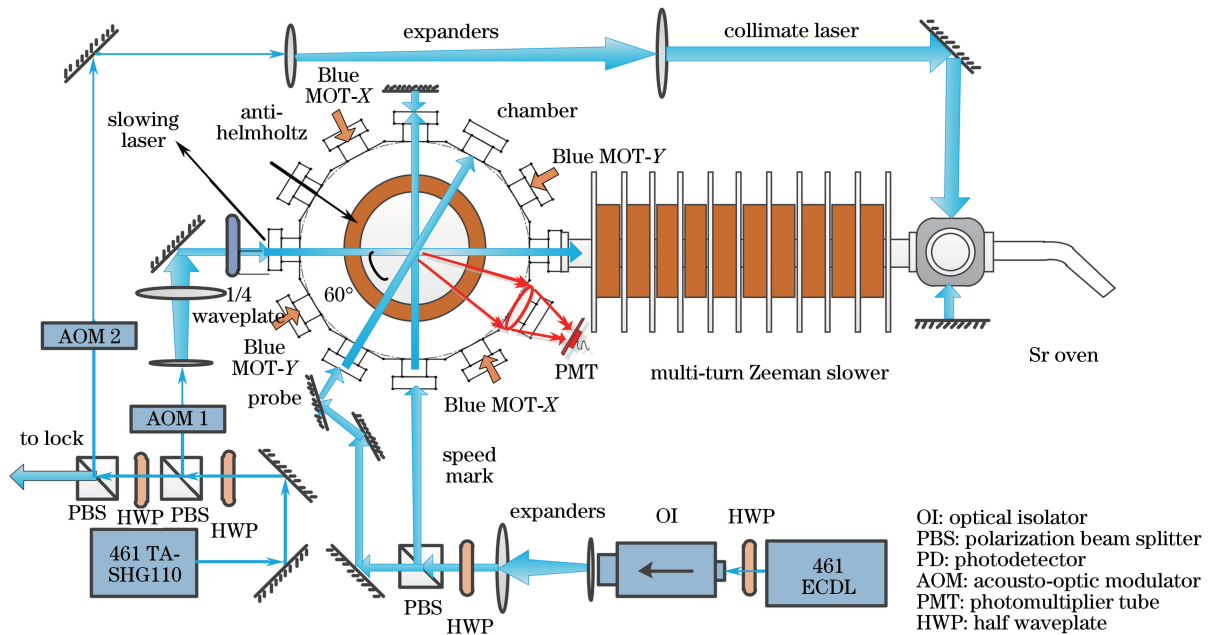


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

减速光功率为 100 mW,由德国 Toptica 公司生产的 TA-SHG110 型激光器产生,减速光光束呈会聚状,入射窗口的光斑直径为 20 mm,传输

1500 mm后到达原子炉处的光斑直径为 5 mm。该激光器的剩余激光作为俘获光和准直光。另一台美国 New Focus 公司的 TLB-6802 型外腔半导体激光

器(ECDL)用于产生探测光和零速标定光。由于<sup>88</sup>Sr在锶原子天然同位素中丰度最高,相对荧光强度最强,因此锁定<sup>88</sup>Sr的 $(5s^2)^1S_0 \rightarrow (5s5p)^1P_1$  (s,p表示轨道,S,P表示轨道能级)跃迁。同时考虑<sup>88</sup>Sr的 $(5s^2)^1S_0 \rightarrow (5s5p)^1P_1$ 与<sup>87</sup>Sr的 $(5s^2)^1S_0 \rightarrow (5s5p)^1P_1$ 跃迁, $F=9/2 \rightarrow F'=7/2$ , $F=9/2 \rightarrow F'=9/2$ 和 $F=9/2 \rightarrow F'=11/2$ ( $F$ 、 $F'$ 分别为基态总量子数、激发态总量子数)三条超精细能级跃迁之间的同位素频移分别为9.7,69.0,51.8 MHz<sup>[32]</sup>,所设计的减速光对应于<sup>88</sup>Sr的 $(5s^2)^1S_0 \rightarrow (5s5p)^1P_1$ 跃迁,线失谐量为-560 MHz,各同位素跃迁频率差以及各激光的失谐量如图2所示。

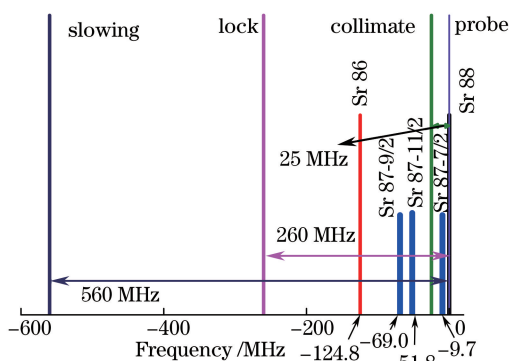


图2 各同位素的 $(5s^2)^1S_0 \rightarrow (5s5p)^1P_1$ 跃迁频率和各激光的频移量

Fig. 2  $(5s^2)^1S_0 \rightarrow (5s5p)^1P_1$  transition frequencies of each isotope and each laser frequency shift

在原子速度分布测量方面,原子到达真空腔室,在腔室水平面上,如图1所示,垂直于原子束喷射方向射入一束激光作为零速标定光,与减速光成60°射入一束探测光对原子速度分布进行测量。探测光和零速标定光处于扫描状态,当激光与原子作用发出荧光时,在真空腔室的正上方对荧光信号收集探测。

Blue MOT由一对反亥姆霍兹线圈和射入真空腔内的六束俘获激光共同构成,这样可以将Zeeman减速后的原子俘获,然后利用日本滨松公司生产的型号为H11706的光电倍增管对Blue MOT俘获的原子荧光进行高精度测量。

## 4 实验测量结果分析

### 4.1 测量原子束减速后原子的速度分布

原子束减速后速度分布的测量是直接检验Zeeman减速器工作效果的方法。图3所示是通过多普勒测速法得到的原子速度分布图,该方法以

<sup>88</sup>Sr和<sup>86</sup>Sr的同位素频移作为频率标准,把<sup>88</sup>Sr的跃迁峰横坐标作为速度零点,并根据多普勒频移关系建立频率与速度之间的转化关系<sup>[27,33]</sup>。其中,曲线1为射入零速标定光同时扫描测量得到的结果,曲线2为Blue MOT腔内射入零速标定光和探测光时测量得到的原子到达Blue MOT区的速度分布情况。

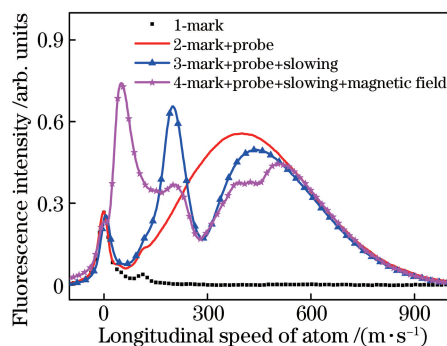


图3 不同实验条件下的原子速度分布

Fig. 3 Atomic speed distributions under different experimental conditions

图3中曲线3为射入减速光得到的速度分布结果,展示了未开启磁场时激光对原子的减速作用。曲线显示,在原子速度为280 m/s的位置有明显的凹陷,证明此速度附近的原子被减速至其他速度。减速光的失谐为-560 MHz,经过推算对应原子速度为 $(280 \pm 17)$  m/s,与实验测量的结果一致。

图3中的曲线4为减速光和Zeeman磁场共同作用时的原子速度分布情况,原子速度分布相较曲线3有明显改变。曲线4中原子速度在50 m/s附近的分布最多,此区域的最可几速度为50 m/s,与Zeeman减速中的截止速度相同。对比曲线4和曲线3,速度分布中右侧高速原子数目变化不大且该速度无法被Blue MOT俘获,因此对于Blue MOT俘获,速度分布50 m/s附近的原子才具有研究意义。从图3中可以看出,设计的Zeeman减速器工作正常且达到了Blue MOT俘获的实验要求。

### 4.2 不同截止速度下原子速度分布的变化

为了衡量减速效果随截止速度的变化情况,测量了不同截止速度下的速度分布。设计初期截止速度为50 m/s,通过调节各线圈的电流,产生具有不同截止速度的磁场,利用各组磁场和减速光分别作用,测量不同截止速度下的速度分布,结果如图4所示。

图4(b)所示是各个截止速度下的原子速度分布,由于50 m/s速度分布区域的变化较小,对图



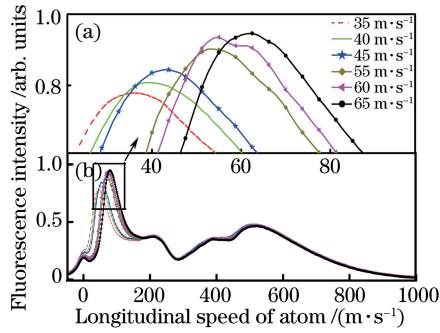


图 4 不同截止速度时的原子速度分布。

(a)局部放大图;(b)全图

Fig. 4 Atomic speed distributions under different cut-off speeds. (a) Local magnification;

(b) whole map

4(b)黑框内区域放大得到图 4(a),以获得更加明显的比较结果。结果显示:在不同截止速度下测量得到的速度分布中,低速原子部分的最可几速度与截止速度对应,随截止速度的减小,原子速度分布也发生相应改变;同时发现减小截止速度,其低速原子部分所包围的面积减小,对应到达 Blue MOT 真空腔的原子通量变小,证明之前理论中关于(6)式的修正合理的。

### 4.3 不同截止速度下的冷原子俘获数目

研究了分布函数理论和通用理论在截止速度增大时 Blue MOT 俘获的冷原子数目的变化,并测量了不同截止速度下的 Blue MOT 装载情况。图 5 所示是不同截止速度下的原子装载曲线,装载曲线到一定时间后达到饱和,表明俘获的冷原子数目不变。在装载过程中,减速光和俘获光在真空腔内散射,因此减去在无 Blue MOT 状态下的基底信号(图 5 所示的 base 曲线)即可得到最终的测量结果。

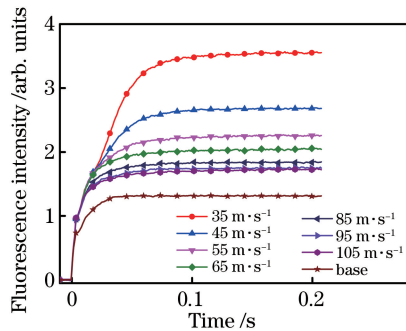


图 5 不同截止速度下的装载曲线

Fig. 5 Loading curves under different cut-off speeds

由图 5 所示荧光信号的变化可知,当截止速度小于 65 m/s 时,随截止速度的增大,荧光信号强度急剧减小;当截止速度大于 65 m/s 时,其变化对荧

光信号强度影响很小,荧光信号的强弱对应 Blue MOT 区域冷原子数目的多少,表明截止速度大于 65 m/s 时 Blue MOT 装载数目的变化较小。截止速度为 115 m/s 下的 Blue MOT 装载数目缩减为 35 m/s 时的 1/4,此截止速度下的 MOT 装载原子数目极少。

图 6 所示为实验测量得到的数据,实线为所提出的由分布函数理论拟合得到的结果,虚线为采用通用理论拟合得到的结果<sup>[28]</sup>。从图 6 可以看出,在通用理论中,截止速度减小时原子的数目变化更快,而所提出的分布函数理论拟合得到的结果与实验结果符合更好。

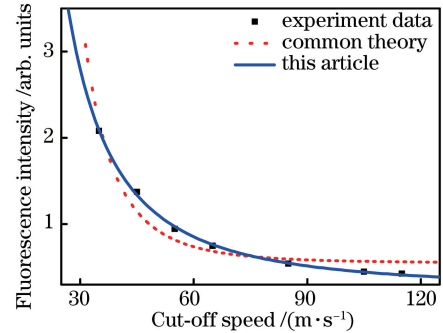


图 6 拟合结果对比

Fig. 6 Comparison of fitting results

对于减速器设计,此实验结果说明:当截止速度大于 100 m/s 时,Blue MOT 俘获的冷原子数目变化不大;当截止速度小于 100 m/s 时,Blue MOT 俘获的冷原子数目呈指数级增长,假设减速中截止速度足够小,俘获冷原子的数目则可以达到最佳的实验结果。

随着截止速度的减小,俘获原子数目急剧增大,但是当截止速度减小时,磁场梯度变大,多匝线圈中末端线圈电流变大,线圈的发热成为制约系统优化的主要因素。尤其是在截止速度小于 35 m/s 的磁场分布时,末端线圈电流大于 4 A,所采用的 1.5 mm 漆包线发热量已不可忽略,因此截止速度的继续减小受到减速器实际设计的制约。Zeeman 减速器需要长期工作,因此发热量这一因素尤为重要,故选择截止速度为 35 m/s 的磁场分布作为最终的实验参数,此时线圈发热量适中,同时相比截止速度为 50 m/s,Blue MOT 冷原子的俘获数目提高了一倍。

## 5 结 论

利用分布函数理论分析了 Zeeman 减速中截止速度对 Blue MOT 俘获冷原子数目的影响,并根据

实验条件对该理论进行了修正。实验中利用多匝 Zeeman 减速器对进入 Blue MOT 之前的镱热原子束进行减速,获得了能被 Blue MOT 俘获的原子。通过改变 Zeeman 减速器的各组线圈电流,对 Zeeman 减速中不同截止速度下的原子速度分布进行了测量。在 Blue MOT 装载后,测量了不同截止速度下的 Blue MOT 俘获冷原子数目,结果表明,俘获冷原子数目随截止速度的增大而迅速减小。利用分布函数理论、通用理论分别对实验数据进行了拟合,结果显示,所提出的分布函数理论能更准确反映截止速度对 Blue MOT 俘获冷原子数目的影响。进一步结合分布函数理论的分析结果和 Zeeman 减速器功耗的限制条件,得到折中的最佳截止速度值为 35 m/s,Blue MOT 俘获冷原子数目比设计初期提升了一倍。根据修正的分布函数理论,优化的 Zeeman 减速器设计方案既可获得足够多的原子数,又能有效减小功耗,对未来实现光钟系统小型化具有重要的现实意义。

## 参 考 文 献

- [1] Ichiro U, Masao T, Manoj D, *et al.* Cryogenic optical lattice clocks [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(3): 185-189.
- [2] Ludlow A D, Boyd M M, J Ye. Optical atomic clocks[J]. *Review of Modern Physics*, 2015, 87(2): 637-692.
- [3] Akamatsu D, Inaba H, Hosaka K, *et al.* Spectroscopy and frequency measurement of the  $^{87}\text{Sr}$  clock transition by laser linewidth transfer using an optical frequency comb[J]. *Applied Physics Express*, 2014, 7(1): 012401.
- [4] Hinkley N, Sherman J A, Phillips N B, *et al.* An atomic clock with  $10^{-18}$  instability [J]. *Science*, 2013, 341(6151): 1215-1218.
- [5] Targat R L, Lorini L, Coq Y L, *et al.* Experimental realization of an optical second with strontium lattice clocks [J]. *Nature Communication*, 2013, 4 (1): 2109-2119.
- [6] Akamatsu D, Yasuda M, Inaba H, *et al.* Frequency ratio measurement of  $^{171}\text{Yb}$  and  $^{87}\text{Sr}$  optical lattice clocks [J]. *Optics Express*, 2014, 22 (7): 7898-7905.
- [7] Will C M. The confrontation between general relativity and experiment a centenary perspective[J]. *Living Reviews in Relativity*, 2006, 9(3): 146-162.
- [8] Kolkowitz S, Langellier N, Pikovski I, *et al.* Gravitational wave detection with optical lattice atomic clocks[J]. *Physical Review D*, 2016, 94(12): 124043.
- [9] Rosenband T, Hume D B, Schmidt P O, *et al.* Frequency ratio of  $\text{Al}^+$  and  $\text{Hg}^+$  single-ion optical clocks; metrology at the 17th decimal place [J]. *Science*, 2008, 319(5871): 1808-1812.
- [10] Lin Y G, Wang Q, Li Y, *et al.* Magnetic field induced spectroscopy of  $^{88}\text{Sr}$  atoms probed with a 10 Hz linewidth laser [J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 30(1): 014206.
- [11] Campbell S L, Hutson R B, Martil G E, *et al.* A Fermi-degenerate three-dimensional optical lattice clock [J]. *Science*, 2017, 358(6359): 90-94.
- [12] Bloom B J, Nicholson T L, Williams J R, *et al.* An optical lattice clock with accuracy and stability at the  $10^{-18}$  level [J]. *Nature*, 2014, 506(7486): 71-75.
- [13] Nicholson T L, Campbell S L, Hutson R B, *et al.* Systematic evaluation of an atomic clock at  $2 \times 10^{-18}$  total uncertainty [J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 6896.
- [14] Zhang W Z, Cheng H D, Ma H Y, *et al.* Scheme of stepped slowing Rb atomic beams by isotropic laser light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27 (8): 1366-1370.
- 张文卓, 成华东, 马红玉, 等. 各向同性光场对原子束的分步减速 [J]. *光学学报*, 2007, 27(8): 1366-1370.
- [15] Raab E L, Prentiss M, Cable A, *et al.* Trapping of neutral sodium atoms with radiation pressure [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 59(23): 2631-2634.
- [16] Phillips W D, Metcalf H. Laser deceleration of an atomic beam [J]. *Physical Review Letters*, 1982, 48(9): 596-599.
- [17] Xiong Z X, Long Y, Xiao H, *et al.* Maximized cooling efficiency for a Zeeman slower operating at optimized magnetic field profile [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(1): 010201.
- [18] Wang X L, Ma Z, Chang H, *et al.* Theoretical and experimental study rising Zeeman slower efficiency use compensatory coils [J]. *Journal of Quantum Optics*, 2011, 17(2): 124-129.
- 王心亮, 马喆, 常宏, 等. 利用补偿线圈提高塞曼减速器效率的理论及实验研究 [J]. *量子光学学报*, 2011, 17(2): 124-129.
- [19] Wang Q, Lin Y G, Gao F, *et al.* A longitudinal Zeeman slower based on ring-shaped permanent magnets for a strontium optical lattice clock [J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(10): 100701.
- [20] Yu Q, Xiong W, Zhang Y, *et al.* Design and implementation of miniaturized frequency-stabilized laser system with low power consumption [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(8): 0801010.

- 于齐,熊炜,张胤,等.低功耗、小型化稳频激光系统的设计与实现[J].中国激光,2016,43(8):0801010.
- [21] Qu Q Z, Xia W B, Wang B, *et al.* Integrating design of a compact optical system for space laser cooling application[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0602003.  
屈求智,夏文兵,汪斌,等.空间激光冷却原子集成光学平台设计[J].光学学报,2015,35(6):0602003.
- [22] Qu Q Z, Wang B, Lü D S, *et al.* Principle and progress of cold atom clock in space[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0902006.  
屈求智,汪斌,吕德胜,等.空间冷原子钟原理样机地面测试结果[J].中国激光,2015,42(9):0902006.
- [23] Shang H S, Zhang X G, Zhang S N, *et al.* Miniaturized calcium beam optical frequency standard using fully-sealed vacuum tube with  $10^{-15}$  instability[J]. Optics Express, 2017, 25(24): 030459.
- [24] Zhang S N, Zhang X G, Cui J Z, *et al.* Compact Rb optical frequency standard with  $10^{-15}$  stability[J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88(10): 103106.
- [25] Loftus T H. Laser cooling and trapping of atomic ytterbium[D]. Eugene: University of Oregon, 2001: 9-22.
- [26] Steane A M, Chowdhury M, Foot C J. Radiation force in the magneto-optical trap[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1992, 9(12): 2142-2158.
- [27] Tao Y, Kanhaiya P, Mysore S P, *et al.* A high flux source of cold strontium atoms[J]. The European Physical Journal D, 2015, 69(10): 1-12.
- [28] Li Y M, Chen X Z, Wang Q J, *et al.* Motion of cesium atom in the one-dimensional magneto-optical trap[J]. Acta Physica Sinica, 1995, 4(10): 727-738.
- [29] Xu X Y, Loftus T H, Hall J L, *et al.* Cooling and trapping of atomic strontium[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2003, 20(5): 968-978.
- [30] Savard T A. Raman induced resonance imaging of trapped atoms[D]. Durham: Duke University, 1998: 88-100.
- [31] Xu Q F, Liu H, Lu B Q, *et al.* Observation of  $^1S_0 \rightarrow ^3P_0$  transition of bosonic strontium in the Lamb-Dicke regime[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(10): 100201.
- [32] Courtillot I, Quessada-Vial A, Brusch A, *et al.* Accurate spectroscopy of Sr atoms[J]. The European Physical Journal D, 2005, 33(2): 161-171.
- [33] Xie Y L, Han J X, Lu B Q, *et al.* Measurement of velocity distribution of strontium atoms with small divergence angle by Doppler anemometry[J]. Journal of Quantum Optics, 2016, 22(4): 363-368.  
谢玉林,韩建新,卢本全,等.利用 Doppler 测速法实现小发散角锶原子速度分布的测量[J].量子光学学报,2016,22(4):363-368.