

激光冷却囚禁亚稳态氪原子同位素

蒋蔚¹, 孙羽¹, 程存峰¹, 成国胜¹, 潘虎¹, 卢征天², 胡水明¹

(1. 合肥微尺度物质科学国家实验室, 中国科学技术大学化学物理系, 安徽合肥 230026;
2. Physics Division, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois 60439;
and Enrico Fermi Institute, The University of Chicago, Chicago, Illinois 60637)

摘要: 高效率地冷却和囚禁亚稳态惰性元素原子, 可用以研究冷原子间的相互作用, 以及通过对放射性同位素的检测实现样品年代测定. 本文主要介绍在中国科学技术大学建设的激光冷却氪同位素原子实验装置. 目前, 我们利用这一装置已经成功地将氪原子的各个稳定同位素进行了激光冷却和囚禁, 获得了高浓度的亚稳态冷原子团, 并且有望进一步提高装载速率等重要指标, 以达到高效率检测应用的需要.

关键词: 冷原子; 激光冷却; 亚稳态氪原子; 磁光阱

中图分类号: O562.3 **文献标识码:** A

Laser cooling and trapping of metastable krypton isotopes

JIANG Wei¹, SUN Yu¹, CHENG Cun-feng¹, CHENG Guo-sheng¹,
PAN Hu¹, LU Zheng-tian², HU Shui-ming¹

(1. Hefei National Laboratory for Physical Sciences at Microscale, Department of Chemical Physics,
University of Science and Technology of China, Hefei 230026 China;
2. Physics Division, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois 60439;
and Enrico Fermi Institute, The University of Chicago, Chicago, Illinois 60637)

Abstract: It is essential to trap metastable noble gas atoms with high efficiency in the studies of interactions between cold atoms and in dating applications through the detection of radioactive isotopes. The experimental setup of the new generation apparatus was introduced for efficient krypton atom trapping and counting. All the stable isotopes of the krypton atoms have been successfully trapped with the setup recently built at USTC, Hefei. More improvements and new applications are expected in the future.

Key words: atom trap; laser cooling, metastable Kr atom; MOT (magneto-optical trap)

对惰性元素的同位素原子进行激光冷却和囚禁, 具有一些重要的基础和应用意义, 例如用来测量特殊的原子核结构^[1], 研究激发原子间相互作用和

冷分子^[2], 以及在年代测定等方面的应用^[3]. 由于惰性元素稳定的物理和化学特性, 并且在大气中有比较稳定的比例, 所以放射性的惰性元素是比较理想

收稿日期: 2008-02-29; 修回日期: 2008-04-28

基金项目: 国家重大研究计划(2006CB922001), 国家自然科学基金委海外杰出青年基金(10728408)和中国科学院重大仪器研制项目(YZ200765)资助.

作者简介: 蒋蔚, 男, 1979年生, 博士. 研究方向: 原子分子物理. E-mail: jwayne@mail.ustc.edu.cn

通信作者: 胡水明, 博士/教授. E-mail: smhu@ustc.edu.cn

的原子标记. 地球上的具有放射性的 ^{81}Kr (半衰期 23 万年, 自然丰度 6×10^{-13}), 主要来源于宇宙射线与大气层上部的相互作用^[4], 十分适于对 5 到 100 万年的空气(以及溶解了空气的水或者冰)样品进行年代测定. 而氦原子的另一个放射性的同位素 ^{85}Kr (半衰期 10.8 年, 自然丰度 1×10^{-11}), 则作为人类核活动的副产物之一, 比较适合于对核活动的监测. 目前常用的测定放射性同位素丰度的方法主要有低水平放射线计数法(LLC)和加速器质谱法(AMS)等. 但是用 LLC 方法测定 ^{81}Kr 是不现实的, 因为它需要的样品太多了(标准条件下 1 升氦气)^[5]. 对于 AMS 方法, 由于需要克服同量异位素(isobar)效应, 需要基于加速器提供的高能离子束^[6], 因此代价高昂, 需要的样品量大约为标准条件下 0.5 毫升氦气, 也还是比较多. 冷原子阱痕量分析(ATTA)是一种新的放射性同位素痕量分析方法^[3]. 它的基本原理是通过激光冷却, 将要分析的同位素选择性地捕获在磁光阱(MOT)中, “数”出被捕获的原子数目, 进而确定该同位素的相对丰度. 该方法因为可以实现单原子水平的计数, 所以具有很高的灵敏度; 由于不同同位素原子对应的激光频率不同, 所以有高度的同位素选择性; 同时这种方法只需要桌面设备即可完成, 代价相对较低. 1999 年美国阿贡国家实验室的研究组首先演示了这种方法, 并随后通过对实际样品的双盲分析, 证明了这种分析方法的可靠性和有效性^[7~9]. 但是该系统目前检测效率仍然不高, 例如为完成对一份样品的有效测量, 需要数微升的氦气, 相当于用几吨水样品提取其中溶解的空气才能得到. 要扩大该方法的适用范围, 分析一些数量更加稀少的样品(例如极地的冰芯样品), 还需要将目前的灵敏度再提高 1~2 个量级, 因此我们在中国科学技术大学建立该实验装置, 以期达到这一目标.

惰性元素原子的第一激发态能量很高(对氦原子为约 10 eV), 由于相应的真空紫外激光的缺乏, 与铷、铯等碱金属原子的激光冷却不同, 我们实际上无法对基态的惰性元素原子直接进行激光冷却, 必须把氦原子首先从基态($^1\text{S}_0$)制备到亚稳态能级 $^2\text{P}_{3/2} 5s[3/2]_2$ (自然寿命约为 40 s), 再通过该能级和 $^2\text{P}_{3/2} 5p[5/2]_3$ 能级间的跃迁(真空波长 811.51 nm)对原子进行冷却和囚禁. 目前制备亚稳态氦原子主要有两种方法, 电离激发和光激发. 电离激发^[10]比较简单, 适用于制备各种惰性元素的亚稳态原子束, 我们目前装置即使用该方法. 光共振激发则有比较

高的选择性, 不会产生离子副产物, 但结构相对复杂^[11]. 图 1 是我们的实验装置示意图. 低压氦气($< 0.1 \text{ Pa}$)从气源腔通过一段直径 1 cm 的石英管, 被射频放电电离, 产生亚稳态氦原子进入横向冷却腔, 被横向的 811 nm 共振激光束压缩, 以减小原子束的发散角, 提高原子束的流量. 原子束再通过塞曼减速管, 被激光不断减速后进入磁光阱, 在这里被六束略微红失谐的 811 nm 激光冷却并囚禁在磁光阱中, 其发射的共振荧光被探测器检测到, 从而确认亚稳态原子被囚禁.

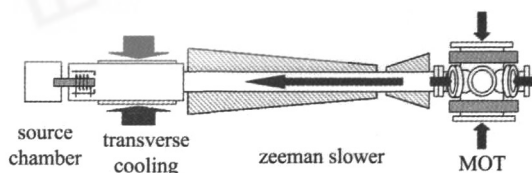


图 1 亚稳态氦原子冷却囚禁系统结构图

Fig. 1 Configuration of the atom trap for metastable krypton

激光锁频: 实验中使用一台钛宝石激光器(Coherent 899)实现激光冷却. 激光器的频率通过频率调制的饱和吸收光谱锁定在 ^{84}Kr 的共振峰上. 如图 2 所示, 氦气池中通过射频放电电离, 产生亚稳态氦原子, 在其饱和吸收的泵浦光路中加入了一个声光调制器对泵浦光进行移频, 其移频驱动信号(110 MHz)上又加载了 100 kHz 的频率调制, 通过氦气池的探测信号和频率调制信号被锁相放大器解调后得到误差信号, 再经过 PI 电路反馈控制钛宝石激光器的频率, 使其稳定在饱和吸收峰上(由于 110 MHz 声光调制器的移频作用, 实际激光稳频频率与 ^{84}Kr 共振线绝对频率差 55 MHz). 如图 2 所示的鉴频曲线, 可以看出, 通过该方法成功地使激光频率漂移从超过 5 MHz 减小到约 0.3 MHz. 最后通过控制另一个声光调制器(380 MHz, 两次通过)的工作频率, 调整激光的相对移频频率, 从而可以实现对激光频率与失谐量的控制和选择.

塞曼减速: 室温下通过射频放电产生的亚稳态原子束的最可几速度约为 300 m/s, 是无法直接被磁光阱捕获的, 为了尽可能地捕获尽量多的原子, 我们设计了塞曼减速器, 以把绝大部分原子减速到约 20 m/s. 塞曼减速器的减速激光红失谐 90 MHz, 通过磁场的塞曼效应来补偿原子平动速度导致的多普勒频移, 磁场采用了两段式设计, 分别为 118 cm 和 20 cm, 两段磁场方向相反, 磁场强度沿着原子束飞行轴线方向的分布如图 3 所示. 这样的设计使得不

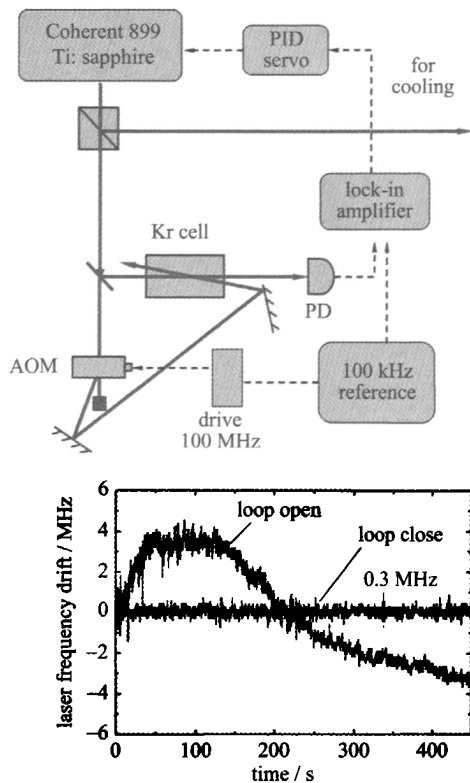


图 2 钛宝石激光器的稳频控制, 系统结构以及控制开路、闭合时分别测得的频率漂移

Fig. 2 The frequency lock of the Ti:Sa laser: configuration, frequency drift when the loop is open/close

需要太大的磁场强度, 同时出口处的磁场可以和磁光阱 MOT 线圈的磁场比较平滑的衔接, 这样可以最大限度的将减速后的原子收集到 MOT 中. 我们的实验结果也表明, 该方法可把原子束中 60% 以上的亚稳态氦原子收集下来.

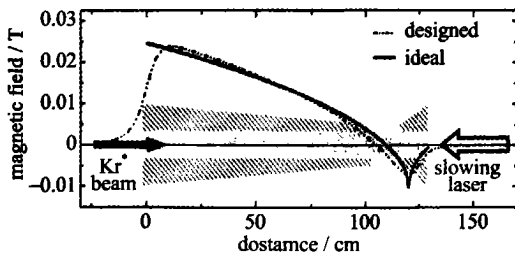


图 3 塞曼减速器磁场设计

Fig. 3 Magnetic field of the Zeeman Slower

磁光阱: 磁光阱 MOT 为一个十通腔体, 工作时背景真空为 10^{-6} Pa, 一对直径约 15 cm 的反亥姆霍兹线圈置于真空腔外, 线圈电流约 3 A. 一束红失谐 10 MHz、功率约 300 mW 的激光经透镜扩束到直径 3 cm, 分成三束, 并经反射形成六束垂直交叉的冷却激光束, 对 MOT 阱中原子进行冷却, 原子发出的共

振荧光经透镜收集, 分别被 CCD 和硅二极管探测器测量. 图 4 显示的是扫描激光器的频率, 依次将同位素丰度分别为 0.35%, 2.25%, 11.6%, 57.0% 和 17.3% 的 Kr-78, Kr-80, Kr-82, Kr-84, Kr-86 同位素原子俘获在 MOT 中.

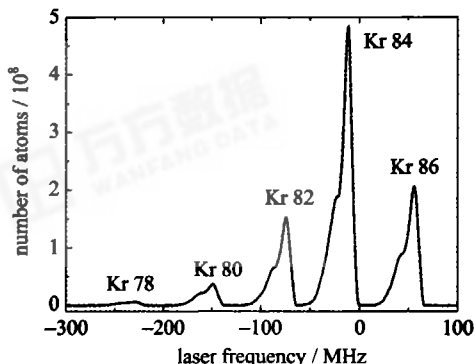


图 4 缓慢扫描激光频率时, 分别囚禁的氦各个同位素的冷原子荧光信号

Fig. 4 Selectively trap different Kr isotopes by tuning the laser frequency

然而, 对于核质量数为奇数的同位素氦原子, 其核自旋不是零, 811 nm 跃迁的上下两个能级都具有超精细结构, 例如对于 ^{83}Kr 原子 (自然丰度 11.5%), 其相关能级如图 5 所示, 实验中需要另外两个频率的回泵光来使激光冷却的循环封闭, 才能将该同位素原子有效冷却和囚禁. 为了产生该回泵光, 我们使用了一个带宽为 1.5 GHz 的行波式电光调制器, 产生分别为 789 MHz 和 1 412 MHz 的激光边带, 由此成功地把 ^{83}Kr 原子冷却囚禁.

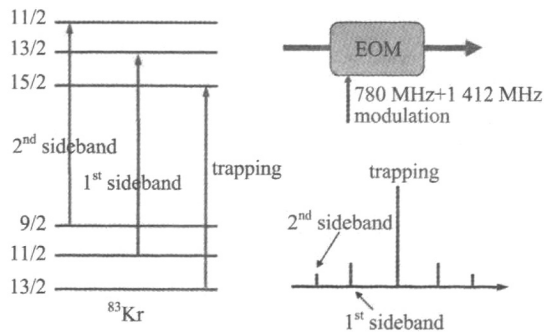


图 5 亚稳态 ^{83}Kr 的超精细能级和激光边带控制
Fig. 5 The hyperfine structure of metastable ^{83}Kr and the production of the laser sidebands

装载速率 (Loading Rate) 的测定: 原子在磁光阱中数目满足以下方程:

$$\frac{dN}{dt} = L - \frac{N}{\tau} - \beta N^2 \quad (1)$$

式中, 右边第一项 L 表示磁光阱的装载速率 (loading rate), 也就是单位时间内可以俘获的原子数, 其他两项表示冷原子的损失过程. 其中前一项来源于原子与背景中的气体原子的碰撞, 可以由一个特征寿命 τ 来描述; 后一项是由于阱中亚稳态冷原子密度较大时, 亚稳态原子间的相互作用会使得原子离开亚稳态, 从而造成冷原子的损失, 它可以由一项正比于原子总数平方的项来表达. 装载速率 L 的大小是检验原子捕获效率的一个重要指标. 以 ^{86}Kr 原子为例, 阿贡研究组的实验系统的总装载速率约为 $2 \times 10^9/\text{s}$, 其中没有横向冷却时的装载速率为 $1 \times 10^8/\text{s}$ [12]. 能否获得更高的冷原子装载速率, 是能否提高痕量同位素原子检测效率, 以达到我们该项目将来目标要求的关键.

为了测定系统的该装载速率数据, 我们采用了以下方法: 利用控制声光调制器驱动信号, 在 $t=0$ 时刻迅速切断用来减速原子的激光, 由于碰撞损失, 原子将逐渐逃出磁光阱, 可以解出, 此过程中冷原子数目将满足方程:

$$N = \frac{N_0}{e^{t/\tau}(1 + \beta N_0 \tau) - \beta N_0 \tau} \quad (2)$$

其中, N_0 是稳定时 ($t=0$) 时磁光阱中的冷原子数. 因为单个原子在本实验条件激光光场中的荧光功率是已知的, 根据探测器的收集和转换效率, 可以推算得到 MOT 中的原子数随时间的变化, 并据此拟合得到参数 τ 和 β . 根据方程 (1) 的稳态解可以知道磁光阱的装载速率为

$$L = \frac{N + \beta N^2}{\tau} \quad (3)$$

图 6 即示例了没有横向冷却时, 实验测得的 ^{86}Kr 原子荧光信号以及数值拟合的结果, 其中冷原子数

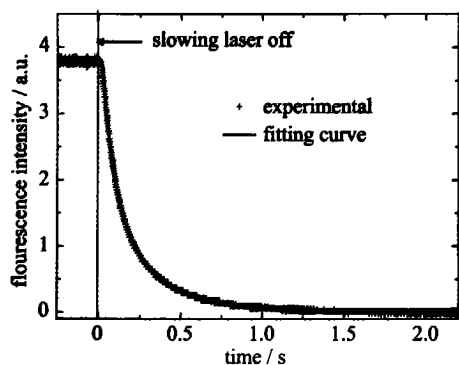


图 6 切断减速激光后囚禁原子数的衰减曲线

Fig. 6 Decay curve of the trapped atoms
when the laser was cut off

$N_0 = 5 \times 10^7$, 原子寿命 $\tau = 0.33 \text{ s}$, 碰撞淬灭系数 $\beta = 3.8 \times 10^{-15}/\text{s}$, 装载速率达 $5 \times 10^8/\text{s}$, 即相当于文献 [12] 的 5 倍.

综上所述, 目前我们已经实现了对所有稳定的氪同位素原子的囚禁和探测, 就我们所知, 这是国内首次对惰性元素实现原子冷却和囚禁. 实验获得了比较满意的冷原子装载速率, 有望大步提高捕获亚稳态氪原子的效率. 目前正进一步改进亚稳态原子束的准直和聚焦, 进一步提高原子束的强度, 以实现放射性同位素 ^{81}Kr 和 ^{85}Kr 的单原子探测.

参考文献 (References)

- [1] Wang L B, Mueller P, Bailey K, et al. Laser spectroscopic determination of the ^6He nuclear charge radius[J]. Phys Rev Lett, 2004, 93:142501.
- [2] Moal S, Portier M, Zahzam N, et al. Lifetime of weakly bound dimers of ultracold metastable helium studied by photoassociation[J]. Phys Rev A, 2007, 75: 033415.
- [3] Chen C Y, Li Y M, Bailey K, et al. Ultrasensitive isotope trace analysis with a magneto-optical trap[J]. Science, 1999, 286:1 139-1 141.
- [4] Oeschger H. Accelerator mass spectrometry and ice core research[J]. Nucl Instr Meth B, 1987, 29:196.
- [5] Loosli H H, Oeschger H. ^{37}Ar and ^{81}Kr in the atmosphere[J]. Earth Planet Sci Lett, 1969, 7:67-71.
- [6] Collon P, Kutschera W, Loosli H H, et al. ^{81}Kr in the Great Artesian Basin, Australia: A new method for dating very old groundwater[J]. Earth Planet Sci Lett, 2000, 182:103-113.
- [7] Du X, Bailey K, Lu Z T, et al. An atom trap system for practical ^{81}Kr -dating[J]. Rev Sci Instrum, 2004, 75:3 224-3 232.
- [8] Du X, Purtschert R, Bailey K, et al. A new method of measuring Kr-81 and Kr-85 abundances in environmental samples[J]. Geophys Res Lett, 2003, 30:2 068.
- [9] Sturchio N C, Du X, Purtschert R, et al. One million year old groundwater in the Sahara revealed by krypton-81 and chlorine-36 [J]. Geophys Res Lett, 2004, 31:L05503.
- [10] Chen C Y, Bailey K, Li Y M, et al. Beam of metastable krypton atoms extracted from a rf-driven discharge[J]. Rev Sci Instrum, 2001, 72:271-272.
- [11] Ding Y, Hu S M, Bailey K, et al. Thermal beam of metastable krypton atoms produced by optical excitation[J]. Rev Sci Instrum, 2007, 78:023103.
- [12] Du X. Realization of radio-krypton dating with an atom trap[D]. Northwest University, 2003.