

磁光阱中冷原子的实验特性*

付军贤 王义遒

(北京大学电子学系 北京 100871)

摘要 冷原子的获得对于原子物理的研究具有重要的意义,文章综述了激光冷却与囚禁原子技术发展以来对磁光阱中中性冷原子特性的研究进展,包括冷原子对光子的吸收与散射,冷原子之间的吸引与排斥导致的超冷碰撞与长程分子状态,冷原子的非线性特性等.

关键词 激光冷却与囚禁原子,超冷原子

EXPERIMENTAL PROPERTIES OF COLD ATOMS IN A MAGNETO- OPTICAL TRAP

FU Jun- Xian WANG Yi- Qiu

(Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract The attainment of cold atoms has had great influence on atomic physics. Experimental studies on the properties of cold atoms in magneto- optical traps since the development of laser cooling and neutral atom trapping techniques are reviewed. The absorption and scattering of photons in a light field, ultracold collisions and long- range molecule states due to the attraction and repulsion among cold atoms, and the nonlinear properties of cold atoms are also discussed.

Key words optical cooling and trapping, cold atoms

1 引言

在原子物理的研究中,为了进行某些物理量的精确测量,往往要求被研究的样品处于一种相对孤立的状态,在这种状态下,外界的影响足够小甚至可以忽略.对于物质的3种经典存在状态:气态、液态、固态,以气体状态存在的物质原子受外界影响最小,可以近似地满足相对孤立的要求.室温下处于气体状态原子的运动速度约每秒几百米到几千米(特别对于碱金属而言),多普勒效应的影响使得原子光谱存在 10^9 Hz量级的谱线增宽和谱线频移,因此原子所固有的许多特征由于这样大的谱线增宽与频移而难于精确测量和观测.为了减小多普勒效应的影响,人们发展了多种消多普勒光谱方法来研究原子的特征,其中比较有效的手段包括饱和和吸收光谱方法和双光子吸收光谱方法等.

但是原子的运动速度决定了利用光谱研究原子特征的最终分辨率,同时渡越增宽,二级多普勒频移、波前畸变等因素也影响光谱的最终分辨率.降低原子的运动速度可以减小这些因素对光谱最终分辨

率的影响^[1].以铯原子为例,当被冷却到 $500\mu\text{K}$ 时所对应的最可几速率为 25cm/s ,进一步冷却到 $5\mu\text{K}$ 时最可几速率就只有 2.5cm/s ,这样的速率所对应的一级多普勒效应非常小,二级多普勒效应几乎可以忽略不计.对于以如此低速运动的原子,谱线的多普勒增宽与频移均小于自然线宽,这是其他原子样品或者常规的测量方法所无法比拟的.

近十几年激光冷却与囚禁原子技术的发展,使得人们可以借助于激光对原子的辐射压力减速原子^[2],从而可以获得温度远远低于常规冷却方法得到的原子样品.利用激光的辐射压力减速原子改变了原子系综的速度分布,由 $k_B T_D = \hbar\Gamma/2$ (k_B 是玻尔兹曼常数, Γ 是自然线宽, \hbar 是普朗克常数)所决定的 T_D 习惯上称为多普勒冷却极限温度,对于碱金属原子而言,在几百个 μK 的数量级.由 $k_B T_r = (\hbar k)^2/2M$ 所决定的 T_r 习惯上称为单光子反冲极限温度,碱金属原子的单光子反冲极限温度在几个 μK 的数量级或更低.温度低于 1mK 的原子被称为

* 国家自然科学基金以及教育部高等学校博士点专项科研基金资助项目

1999-03-23收到初稿,1999-05-17修回

冷原子,习惯上把低于多普勒冷却极限温度的原子称为超冷原子.将不同的冷却机理同时使用,可以将原子的温度降到更低的程度,实际上,对现在发展的理论而言,已经不存在利用激光冷却原子的极限温度.

冷原子和超冷原子为人们开辟了研究原子特征的崭新领域.

2 利用磁光阱获得冷原子

尽管最初获得冷原子是利用激光减速原子束,然后通过光学粘团的方法将减速的原子束缚在光束交叠区域内,但是目前而言,获得冷原子最便宜有效的方法是利用磁光阱实验装置,在真空气室中直接冷却捕获处于室温状态的气体原子,可以省去庞大的原子束装置.自从磁光阱被首次报道^[3]以来,围绕着磁光阱的冷却效率,所能囚禁的原子数以及原子密度极限、平衡时的温度(也就是大量冷原子的速度分布)以及磁光阱本身参数的准确测量等一系列问题,很多科研小组各自开展了富有特色和创新的研 究^[4,5].

在实验中希望获得尽可能多的原子以提高物理量测量信号的信噪比,最有效的方法就是扩大囚禁光束的直径或者加大囚禁光的光强.由于受到设备的限制(主要限制了激光束的直径)和由于激光光强的饱和效应,为了获得尽可能多的原子还需要考虑其他因素可能带来的影响.有人认为囚禁冷却的激光如果带有调制,那么由于调制可以使激光的线宽增加,由此所导致的宽带冷却可以提高冷却囚禁的原子数目^[7],不过宽带冷却是否可以提高冷却囚禁的冷原子数目有待于进一步的实验检验.

在磁光阱中冷却囚禁的原子密度与原子的种类有关.对于较重的铯原子,密度一般在 $10^{10}/\text{cm}^3$ 左右,对于较轻的钠原子或者铷原子而言,密度会高一些,达到约 $10^{11}/\text{cm}^3$ 的量级.限制原子密度进一步提高的主要原因是冷原子团内原子对散射光子的吸收,这种吸收作用导致原子之间存在不可忽略的排斥作用.另外,冷原子之间的碰撞以及冷原子与背景气体原子之间的碰撞可以使得阱中冷原子得到足够的动能逸出阱外,这也是影响原子密度提高的一个重要原因.利用暗磁光阱技术,可以将原子囚禁在不与冷却光直接相互作用的超精细能级上,这样可以在很大的程度上减小由于吸收散射光子而导致的原子之间的排斥和碰撞作用,阱中原子的密度可以比一般磁光阱情况提高两个数量级以上^[5].

在利用磁光阱冷却与囚禁原子的过程中,由于散射光子对原子有等效的加热作用,原子温度的进一步降低也受到限制.没有应用特殊技术的磁光阱,冷却囚禁的原子温度只有几十 μK 到几百 μK 的量级.应用光学粘团方法,原子的温度可以降低到低于一般磁光阱方法所得到的结果^[7,8].对于实际的多能级原子,利用拉曼冷却或者速度选择的相干布居囚禁方法可以获得温度更低的冷原子.

纯光学阱、静磁阱以及交变磁阱等是先于磁光阱被人们研究过的中性原子冷却装置,在很多领域也得到了应用,也是制备冷原子的有效方法.但是因为一般阱深较浅,所以捕获原子的效率较低.在磁光阱冷却与囚禁原子的基础之上,借助静磁阱对阱中的原子可以进一步进行蒸发冷却,获得以前不可想象的极低温度.利用激光冷却发展起来的相关理论和技术手段所获得的最为重大的成就,莫过于1995年实现了几十年前爱因斯坦所预言的玻色-爱因斯坦凝聚这种超自然的物质状态.最近,美国 NIST 的 Phillips 小组在玻色-爱因斯坦凝聚态的基础上,实现了高度可调的原子激光,为激光冷却原子的使用开辟了更加令人兴奋的前景^[20].

3 磁光阱中冷原子的实验特性

当大量原子被冷却到接近绝对零度的低温时,它们具有极窄的运动速度分布,可以表现出与室温下原子不同的特性.研究磁光阱中冷原子的特性除了可以获得原子本身的信息之外,还可以进一步探讨利用磁光阱制备冷原子技术,这有可能获得新型的冷却方法.处于冷却激光场中的原子由于反抽运激光的光抽运作用和冷却光的减速作用,可以在比较短的时间内就以极低的速度分布状态聚集在基态的某个子能级上,这与一般情况下原子在基态子能级上处于热平衡分布的状态有明显的不同,这种不同导致了原子基态性质发生较大的变化.这种变化主要体现在以下的3个方面:谱线特性、原子的分子状态以及非线性特性.

3.1 冷原子对光的吸收与散射

用一束极细(直径约 0.1 mm)极弱(大约为饱和光强的 $1/10$,约 $0.1\text{ mW}/\text{cm}^2$)的探测光探测冷原子团[实验装置见图1(a)],在对探测光的频率进行扫描的情况下,可以得到冷原子的吸收谱.这种吸收谱与缀饰原子(原子和与之有强相互作用的强场不可分割,因此被认为是一种特殊原子状态)的吸收谱有

非常相似的特性.强冷却光场作用下的冷原子,达到平衡后处于基态某子能级上(对于典型的铯原子磁光阱而言^[3],铯冷原子处于 $F=4$ 子能级),对于扫频的探测光会有若干个对应跃迁的吸收峰,不同于一般情况室温下原子的吸收谱.与一般的原子吸收规律更为不同的是,在多普勒吸收线形本底的冷却光频率处出现线宽小于自然线宽的增益和吸收线形——拉曼散射与瑞利散射的共振峰[图 1(b)]^[9-11].

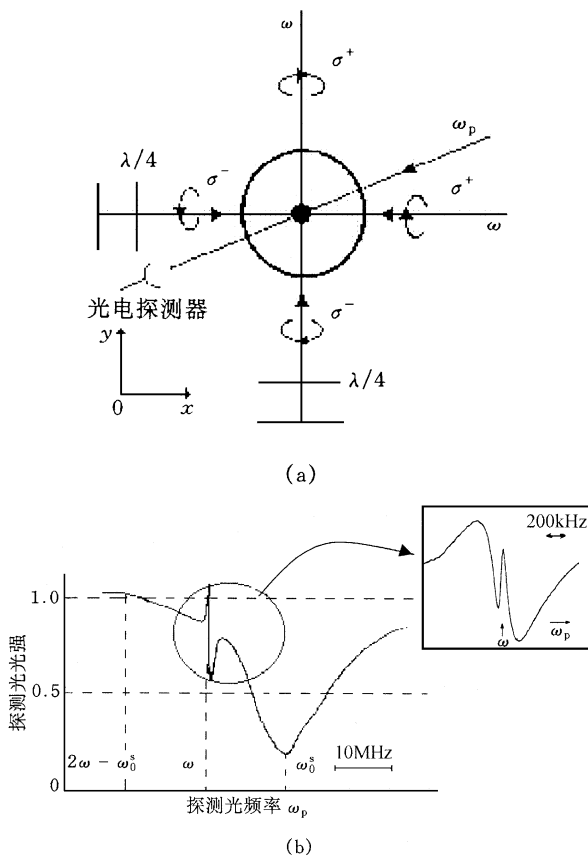


图 1

(a) 冷原子吸收谱的实验装置;
(b) 冷原子的拉曼和瑞利吸收谱

磁光阱中,原子对冷却光、反抽运光以及原子的自发辐射荧光都有强弱程度不同的散射,散射光子对原子的加热作用是限制磁光阱中原子温度进一步降低的主要因素之一.减弱磁光阱中的冷原子对光子的散射可以进一步降低原子的运动速度,这对把原子冷却到更低的温度指出了改进的方向.特殊形状(棍形或者饼形)的磁光阱由于其空间几何形状的特性,从而可以在某一维或几维方向上获得较低的温度.

对磁光阱中冷原子的吸收谱线进行研究时,需要注意到原子吸收谱中的散射线包含弹性散射和非弹性散射两种成分.对入射光子频率为 ω (处于扫频

状态)的状态,散射光子的频率为 ω_s ,原子的共振跃迁频率为 ω_1 ,散射光子频率 ω_s 等于入射光子频率 ω 则表明发生的是弹性散射(瑞利散射),而非弹性散射的散射光子频率与入射光子频率不同.处于基态的冷原子散射光子后如果仍处于基态原有子能级,散射光子中就会含有瑞利散射成分.在 ω 偏离共振频率 ω_1 的情况下,散射光谱中瑞利散射线线宽理论上就是零; ω 接近共振频率 ω_1 时,由于碰撞增宽的影响,散射光子会包含非弹性成分,受到这样的影响谱线就会有一定的宽度.如果原子的终态不是基态而是另一激发态或者是基态的不同子能级,散射光子中相应地就会含有非弹性的散射成分(拉曼散射).理论上瑞利线的线宽为零,拉曼线具有线宽为 $2\gamma_f$ (γ_f 是等效的阻尼参数)的洛伦兹线形.但在室温下由于辐射增宽与碰撞增宽等因素的影响,原子对光子的散射谱谱线存在很大的增宽.磁光阱中的冷原子由于速度低且速度分布窄,可以较明显地观测到接近真正意义上的瑞利和拉曼散射线,两者的线宽由于辐射增宽和碰撞增宽等因素的影响也仅有几十 kHz 和几百 kHz.在室温条件下,直接观察原子对光子的散射谱是一件相当困难的事情,而对于磁光阱中的冷原子,可以在很大程度上减小谱线增宽因素的影响,因而散射谱相对来说易于观测.

在微弱光探测下,磁光阱中冷原子吸收谱线可以发生分裂,这种谱线分裂来源于能级之间的相干性.铯原子 $4 \rightarrow 5$ 线跃迁(典型铯磁光阱的冷却循环跃迁)的饱和光强是 1.1 m W/cm^2 ,而铯磁光阱中冷却光的光强约 10 m W/cm^2 ,是饱和光强的数倍,因此磁光阱中的冷原子基态子能级与激发态子能级有较强的相干作用.在弱光探测下就可以观测到原子谱线的 Autler-Townes 分裂,由冷原子的吸收谱可以测定这个分裂值的大小^[12].利用磁光阱中的冷原子还可以进行多光子吸收和单光子级联吸收光谱的研究^[13,14],这是研究原子激发态的有效手段,特别是双光子吸收谱以及单光子级联跃迁谱对于原子高激发态的研究很有意义.

总的来说,磁光阱中冷原子对光子的吸收和散射等实验现象,反映了强冷却激光场中的原子与场的相互作用,原子与探测光子的相互作用等等.原子在磁光阱中被冷却到几十至几百个 μK 的低温,表现出与室温状态下明显不同的特性.研究这些特性,可以进一步加深磁光阱对中性原子冷却机制的认识.利用磁光阱中囚禁的冷原子对微弱探测光的吸收,可以准确地计算出阱中冷却囚禁的冷原子的数

目,进而准确地确定冷原子团内原子的密度,这几乎是唯一的准确测量原子密度的方法.利用不同探测条件下吸收谱中的谱线分裂的变化,还可以计算磁光阱的阻尼系数 α 和弹性系数 K 等参量.速度分布极窄、速度极低、与之作用的场非常强,这些特点给冷原子带来的特性上的变化,对在特殊条件下研究场与原子的相互作用提供了新思路,这方面理论的发展可以参看文献[11]等.

3.2 磁光阱中原子吸引和排斥——超冷原子碰撞与碱金属双原子长程分子态

磁光阱中的冷原子数目可以达到 $10^7 \sim 10^{10}$,原子密度可以达到 $10^9 \sim 10^{12}/\text{cm}^3$.由此可以估算出,由于磁光阱中的原子处于极低的温度,原子的德布罗意波长($\lambda_D = h/p$,约 $0.1 \sim 1\mu\text{m}$)与原子之间的间距(以 $10^{12}/\text{cm}^3$ 为例,间距约 $1\mu\text{m}$)可比,因此阱中原子之间就会存在很强的相互作用.

冷原子在磁光阱中的运动包括大量无规的随机游走和相对有序的振动,因此原子之间的间距不是相对固定而是不断变化的.当原子间距足够小时,范德瓦耳斯力对接近的原子有较强的吸引作用,相邻的两个原子可以在短时间内构成长程双原子分子状态.在磁光阱中利用光缔合谱方法已经观测到,并且证实存在锂、钠、钾、铷、铯等碱金属冷原子的长程双原子分子状态^[14].传统分子光谱手段利用高压蒸气研究碱金属的双原子分子态,所用的是各能级原子布居数处于热平衡分布状态的原子样品,原子温度很高,电偶极(以及电四极)跃迁的 Franck - Condon 系数极小.在磁光阱中,原子被循环抽运到某个基态子能级上,原子在各个能级上的布居数分布远远偏离热平衡分布,而且运动速度极低,速度分布极窄,因此分子跃迁几率有显著的提高,故磁光阱冷却捕获的冷原子是进行碱金属长程双原子分子态研究的合适样品.

磁光阱中的碱金属双原子长程分子状态不稳定,如果两个原子趋近到足够近的程度时,碰撞将使双原子分子状态消亡.与室温状态的原子碰撞所不同的是,冷原子发生碰撞的碰撞截面大,作用时间长于原子激发态的能级寿命,这种碰撞习惯上被称为超冷碰撞.因此与研究室温度下的原子碰撞相比,超冷原子碰撞的理论模型有明显的不同,需要考虑到原子在碰撞过程中内态的变化以及这种变化对碰撞过程的影响.

目前主要有两种研究阱中冷原子碰撞的理论模型:辐射逃逸理论(radioactive escape, RE)和精细结

构能级交换理论(finestructure state, FS)^[15,16].辐射逃逸的碰撞模型描述阱中原子逃逸速率随着冷却光的光强增加而增加;精细结构能级交换碰撞模型认为,碰撞与自由状态下的分子跃迁有关,可以使得终态处于基态的原子获得足够高的动能从而逃逸出阱外.这两种模型出于理论计算的简化,都有意忽略了超精细结构对超冷碰撞的影响,如果考虑超精细能级转换碰撞(hyperfine changing collision, HCC)可以认为是自旋交换碰撞的一种)的影响,实验结果与理论将会更好地吻合.

冷原子之间的超冷碰撞是造成磁光阱中原子逃逸的一个主要原因,也是限制应用冷原子的原子喷泉频率标准度进一步提高的主要因素.在利用原子喷泉的微波频标中,Ramsey 线形中间峰值的偏移在很大的程度上反映了超冷碰撞的影响.由原子跃迁的微波频谱,可以相当准确地计算出冷原子之间超冷碰撞作用的量级.研究超冷碰撞对于准确评价原子喷泉量子频标的准确度和进一步提高原子的冷却效率有着重要的意义.降低上抛冷原子团的原子数密度可以达到减小碰撞影响的目的,考虑到这个因素,本文部分作者曾提出了应用不对称光学粘团法的原子喷泉方案,并进行了初步的研究^[17].

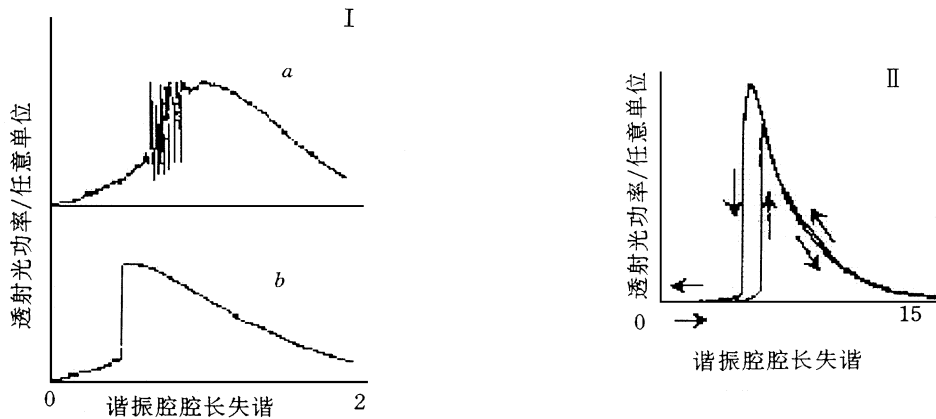
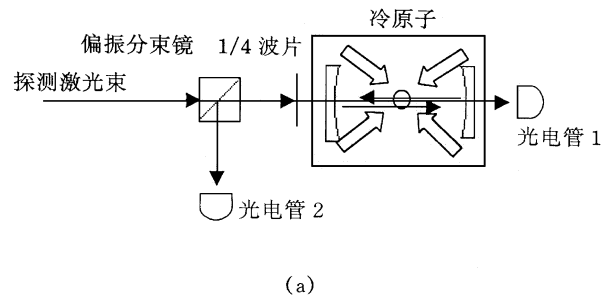
在研究原子的吸引和碰撞中,实验往往对原子密度提出不同的要求.在保证信噪比的前提下,原子喷泉频标中应尽可能降低原子密度,从而减小超冷碰撞影响.进行长程分子状态的光缔合谱研究时,需要尽可能提高原子数密度,光复合几率与原子密度成正比,大的原子密度使得信噪比提高.基于真空室的一般磁光阱所获得的原子密度只有 $10^{10}/\text{cm}^3$,不满足实验要求.利用远共振辐射力阱或者暗磁光阱能够获得较高的原子密度($10^{12}/\text{cm}^3$ 左右)^[14].磁光阱中冷原子之间很强的相互作用可以明显地反映在原子光谱中,通过对原子光谱的分析也能够对超冷碰撞作用强度和长程双原子分子状态的形成与特性有更加深刻的认识.微波谱和光缔合谱为准确地研究冷原子超冷碰撞和碱金属双原子分子状态的性质提供了有效的手段,同时反映了在温度极低情况下原子之间相互作用对原子特性的影响.

3.3 冷原子的非线性特性

利用磁光阱可以获得大量速度分布极窄、密度很高的原子样品,这是一种性能良好的非线性介质.前面已经提到过,在微弱激光束的探测下,可以观测到磁光阱中冷原子对探测光的非线性吸收和散射.

在谐振腔中研究介质的吸收与增益特性是对非

线性介质进行研究的常用手段和方法.将激光冷却囚禁的一团原子置于光学谐振腔中[见图 2(a)],另加一束探测光,观察对谐振腔的腔长进行扫描时探测光在一定的光强下透射的功率,可以观测到扫描腔长的情况下,探测光的透射功率在大小值之间有非常明显的突变[见图 2(b) II],这是一种典型的双稳态.对于探测光的光强较小的情况,扫描谐振腔的腔长可以观测到非稳态现象[见图 2(b) I]^[12].



(b)

图 2

(a) 研究谐振腔中冷原子的非线性特性实验装置;(b) 谐振腔中冷原子的双稳态和非稳态特性曲线(I:双稳态,II:非稳态)

上述实验表现出冷原子的非线性特性,这与多能级原子的超精细能级结构及其在磁场中由于塞曼效应的影响而出现的更为复杂的能级结构有关,还取决于光抽运效应.饱和效应使得多能级原子不同能级上的原子数趋于平衡,因此冷原子介质的折射率随着探测光的光强增加而减小;而光抽运效应可以将原子抽运到某一个磁子能级,使原子在各子能级上的布居数偏离热平衡分布,冷原子介质的折射率就会增加.这两个非线性过程的竞争将使谐振腔中冷原子对探测光的增益和透射出现非稳态现象,也即探测光透射功率对于腔长扫描时在两个状态之间振荡.如果加大入射光的功率使之接近或者大于饱和光强,光抽运速率就会足够大,在非稳态形成以前,原子可以被抽运到一磁子能级,在腔长扫描的情况下,探测光的透射功率仅在特定的腔长处突变.冷原子的这种双稳态现象将有很广泛的应用,与非稳态现象一起构成了冷原子的主要非线性特性.

研究冷原子的非线性特性时,需要考虑的因素很多,很复杂.所有超精细塞曼磁子能级以及能级之间的相干,原子与冷却光场和探测光场之间的强或

弱的相互作用都是影响冷原子特性的重要因素.在某些条件下,多能级原子与二能级系统类似,因此谐振腔中冷原子的非线性机理可以用相对简单的二能级系统来加以说明,理论计算结果与实验相当吻合^[18].考虑到原子的激发态寿命、光抽运速率、达到饱和的时间常数等,探测光的光强大小决定光抽运速率和饱和时间常数,因而决定腔中冷原子处于非稳态或者双稳态.

谐振腔中冷原子的非稳态和双稳态两种状态的存在体现了它们的一种非线性特性,这是原子能级之间光抽运和饱和效应共同作用的结果.冷原子的非线性特性还体现谱线的 Autler - Townes 分裂、对探测光的非线性吸收和放大等之中.

冷原子的非线性特性为进行量子噪声的测量、光学压缩态的研究等提供了性能很好的样品.

4 磁光阱中冷原子的广泛应用背景

研究磁光阱中冷原子特性的来源以及在不同领域的应用,是激光冷却技术发展过程中的重要分支,

有着广泛的应用背景。

冷原子丰富的非线性效应使之成为非线性光学与量子光学研究倍受青睐的对象。人们已经利用冷原子获得了类激光相干原子束,并开展了包括原子干涉、原子全息等在内的原子光学研究。利用冷原子极窄的速度分布已经展开了新型量子频标的研究,目前世界上准确度与稳定度最高的频标就是基于激光冷却的原子喷泉微波频标。冷原子的多普勒频移相对于跃迁线极小,可以进行光频标的研究。用光频测量技术探测钠原子的5P态得到的超精细磁偶极矩常数和电四极矩常数,与传统方法测量结果对比提高了两个数量级^[1]。

高分辨光谱研究,宇称不守恒的验证,极微弱光学过程,新型量子频标,原子激光与原子光学,原子全息术,玻色-爱因斯坦凝聚,量子无损探测,光学压缩态等领域的研究无不得益于冷原子这种新奇的物质状态。冷原子引发了一场物理学领域内涉及面极广的革命,对人类的技术发展与社会进步影响深远。

参 考 文 献

- [1] Fox R W, Gilbert S L, Hollberg L *et al.* *Opt. Lett.*, 1993, 18:1456—1458
- [2] 王义道. 物理, 1990, 19:389—394, 449—460 [WANG Yi-Qiu. *Physics*, 1990, 19:389—394, 449—460 (in Chinese)]
- [3] Raab E L, Prentiss M, Cable A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 59:2631—2634
- [4] Gibble K E, Kasapi S, Chu S. *Opt. Lett.*, 1992, 17:526—528

- [5] Townsend C G, Edwards N H, Zetie K P *et al.* *Phys. Rev. A*, 1996, 53:1702—1714
- [6] Dinneen T P, Wallace C D, Tan K Y N *et al.* *Opt. Lett.*, 1992, 17:1706—1708
- [7] Monroe C, Swann W, Robinson H *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1990, 65:1571—1574
- [8] Weiss D S, Riis E, Shevy Y *et al.* *J. Opt. Soc. Am. B*, 1989, 6:2072
- [9] Grison D, Lounis B, Salomon C *et al.* *EuroPhys. Lett.*, 1991, 15:149—154
- [10] Tabosa J W R, Chen G, Hu Z *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1991, 66:3245—3248
- [11] Lounis B, Courtois J Y, Verkerk P *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1992, 69:3029—3032
- [12] van der Veldt T, Roch J F, Grelu P *et al.* *Opt. Commun.*, 1997, 137:420
- [13] Georgiades N Ph, Polzik E S, Kimble H J *et al.* *Opt. Lett.*, 1994, 19:1474—1476
- [14] Wang H, Gould P L, Stwalley W C *et al.* *Phys. Rev. A*, 1996, 53:R1216—R1219
- [15] Marcassa L, Bagnato V, Wang Y. *et al.* *Phys. Rev. A*, 1993, 47:R4563—R4566
- [16] Julienne P S, Suominen K A, Band Y *et al.* *Phys. Rev. A*, 1994, 49:3890—3896
- [17] WANG Yi-Qiu *et al.* The Fifth Symposium on Frequency Standard and Metrology, Woods Hole, MA, USA, 1995
- [18] Lambrecht A, Courty J M, Reynaud S *et al.* *Appl. Phys. B*, 1995, 60:129—134
- [19] Zhu M, Oates C W, Hall J L. *Opt. Lett.*, 1993, 18:1186—1188
- [20] Haglely E W, Deng L, Kozuma M *et al.* *Science*, 1999, 283:1706

(上接第177页)

强度辐射的特点,可以有效地解决此项困难;其次,光谱图像的空间分辨率受到衍射的限制,紫外可见区的空间分辨率约能达到 $0.2\mu\text{m}$,但该谱区的信息量太少,而中红外和近红外谱区的信息量大得多,但空间分辨率分别只能达到 $3\mu\text{m}$ 和 $1\mu\text{m}$ 左右,需要依靠数学算法提高分辨率;此外,从空间图像中提取空间信息目前还缺少有效的算法,为此还需要将目

前的化学计量学扩展到空间,发展空间化学计量学。

参 考 文 献

- [1] Liwes E N *et al.* *Applied Spectroscopy*, 1996, 50(2):263—269
- [2] Kidder L H *et al.* *Nature Medicine*, 1997, 3(2):235—237
- [3] Pina Colarusso *et al.* *Applied Spectroscopy*, 1998, 52(3):106A—120A