

激光冷却与囚禁原子技术及应用*

吉 望 西 王 义 道

(北京大学无线电系, 北京 100871)

摘要 综述了激光冷却与囚禁中性原子应用研究方面的新进展. 着重从物理图像上介绍了这些应用的机理.

关键词 激光冷却和囚禁原子, 应用

Abstract Progress in the application of laser cooling and trapping techniques are reviewed briefly, with particular emphasis on the underlying physics of the applications.

Key words laser cooling and trapping neutral atoms, application

自从有了气体的动力学理论, 热能及其有关的原子运动的概念便渗透到实验物理的许多方面, 并深刻地影响着这些物理测量. 原子分子碰撞和光谱研究都必须考虑原子运动的影响. 原子的热运动亦是超高分辨率光谱学分辨率理论极限的原因.

早在 1917 年, 在著名的关于黑体辐射的文章中^[1], 爱因斯坦就指出, 在光的吸收和发射过程中, 存在着动量转换. 1933 年 Frisch^[2]进行了用钠光灯改变原子束方向的实验. 虽然光子的动量和原子热运动动量相比非常小, 但由于原子激发态寿命很短, 吸收和自发辐射可多次循环进行, 从而使原子的动量有较明显的变化.

在激光的发明及激光在原子物理学中的成功应用之后, 控制原子运动才有了较大的发展. 实质性的突破始于 70 年代中期, 肖洛^[3]等研究了激光与原子的相互作用, 提出了采用激光冷却原子的思想. 他们认为利用激光的辐射压力可以使气体原子冷却到极低的温度. 到 80 年代中期, 已有实验通过适当调节, 让激光频率接近原子跃迁频率, 使气体原子被冷却到极低的温度. 在原子束横向冷却实验中, 原子束流可以达到前所未有的强度, 原子运动亦可得到精确的控制^[4].

激光冷却原子的物理思想是建立在激光与原子相互作用过程中光与原子间动量交换的基础上的. 通过动量交换达到控制原子运动的自由度和降低原子动能的目的. 早期的冷却机理是多普勒冷却, 在相向传输的激光场中, 作用激光的频率略低于原子的共振频率. 由于多普勒效应, 与原子运动方向相反的激光束更接近于与原子发生共振, 使原子受到阻力, 这就是多普勒冷却. 多普勒冷却极限为多普勒温度 $T_D = \hbar\Gamma/2k_B$, 其中 \hbar 为普朗克常数, k_B 为玻耳兹曼常数, Γ 相当于原子的自然线宽.

但在实验中发现激光冷却可以使原子气体温度低于多普勒温度. 由此人们提出了一系列新的冷却机理, 如偏振梯度冷却、磁感应冷却、速度选择相干态粒子数囚禁等^[5], 并通过各种方法进行囚禁实验研究.

在原子碰撞实验中, 由于准直和通量要求相矛盾而使实验的灵敏度受到限制, 较小的狭缝可以得到准直较好的原子束, 却只能使较少的原子进入靶区. 在采用激光冷却和囚禁原子技术之前, 因为没有任何方法可以增加束流强度, 而实验中的数据获取效率由源束流强度决定. 激光冷却原子技术可以获得具有高束流强

* 国家自然科学基金重大项目.

1995 年 6 月 12 日收到.

度的原子束.通过横向速度压缩,可以加强原子束流强度.在 Nellesen 等^[6]的实验中,原子束流强度达到 $10^9/\text{cm}^3$,比未加强前提高了三个数量级.虽然束流强度很高,但束很细,因而可以进一步控制.同时准直原子束具有较长的横向德布罗意波长,可以进行原子表面散射方面的研究.

由于激光冷却和囚禁原子技术使原子达到前所未有的超冷气体状态,由此而产生了许多新的研究领域.

最新的研究课题是激光原子晶体研究.在驻波场中,光强在 $\lambda/4$ 的空间距离上由波节的零场变为波腹的最大场,这使得原子囚禁于 $\sim \lambda/2$ 的狭小空间.被囚禁的原子其德布罗意波长可与囚禁光波长和阱空间尺度相当.在原子动量为 $2\hbar k$ 时,德布罗意波长 $\sim \lambda/2$.这时原子为非经典运动,须用量子力学来描述.对于动能大于阱深的原子亦可描述为在周期场中运动的量子力学粒子.囚禁原子占据阱中的量子能级形成振动态.产生 Raman 形式的边带谱,这些量子态,可由射频频谱和受激发射光谱进行观察.

对二维激光原子晶体^[7],磁光阱(MOT)中预冷却的原子受到两个垂直相交的驻波作用,驻波偏振垂直于波矢决定的平面,其相对相位可以变化,该光场空间特性与相对相位关系密切.采用弱探测光可以测定原子的空间和速度分布.形成驻波的反射镜可能有微小振动,这将使光场相位有较大变化,从而改变其特性.为了避免这个问题,可采用三束相交夹角为 $2\pi/3$ 的光场来代替驻波场.三束的偏振方向平行于束矢量平面.这样振动或相位变化只引起阱的空间变化而不会引起阱的性质的变化.

由于激光冷却和囚禁的中性原子其波动性成为主要特征,以原子有独立位置和动量自由度为基础的经典理论已不能够正确描述原子的运动,必须使原子质量中心的运动或外坐标系量子化.

所有原子可由德布罗意波来描述,波场占

据空间区域允许的态,波场随空间变化确定了场的模式.与光学相类似,占据空间波场特定模式的场可以发生空间干涉.与光学不同的是原子不都是玻色子,有时只有单个原子占据德布罗意波场的特定模.光控制原子运动,因而有了量子力学特征.

象光学一样,在激光的作用下原子可以被反射、聚焦、衍射、干涉等.由此产生了所谓的原子光学.为了控制原子的运动,亦有光学中同样的器件如反射镜、透镜、分束镜、波带片等.1982年, Cook 等^[8]建议用激光辐射在真空-介质面上产生全反射,利用真空中激光辐射的消逝波的强度梯度产生原子的反射.如果激光负失谐,原子从介质被排斥,形成反射,由于可反射的原子最大垂直速度分量受表面光强度的限制,原子速度不能超过 m/s 的量级.在实验中,阱中被冷却的原子释放出来,落到消逝波上,形成原子的跳动,跳动次数受背景原子碰撞和散射光对原子的影响.原子物质波可由激光驻波场作为光栅进行衍射,但这需要非常苛刻的条件,因为只有不发生自发辐射才能观察到该现象.采用固定的微结构亦可以实现对物质波的衍射.物质波的干涉可由固定的微结构作为干涉狭缝,亦可用横向光束.已有用干涉仪测量原子与光发生作用后的相移的实验报道^[9].

如果原子受横向驻波作用发生吸收和受激发射,原子波可以发生相关分离,这样的分束镜可用于原子干涉量度学方面的研究.为了减小自发辐射的影响,必须通过增大激光失谐,减小自发辐射数量,或减小作用时间,使之小于自发辐射寿命.

当原子有相同的内能态时,原子是不可分辨的,原子之间将发生干涉作用.原子干涉量度的主要优点是原子具有非零的质量、电荷、自旋和内能态,因此可利用各种场如重力场、电场、磁场、电磁场等与原子的作用,利用原子内能级结构采用激光方法控制原子的运动.原子干涉可用于重力测定、航海、原子常数的高精度测量等,亦可用于探索宇称守恒的破坏、重力波、

Berry 相以及第五种力等。

在经典半经典激光冷却理论中,原子运动作为点粒子来考虑,原子同时具有位置和速度,很明显,在原子德布罗意波长与光波长可比时,这个处理不再适合,势的空间尺度与原子尺度可比时,局域原子在势场中上下运动的观点就变得毫无意义。

在量子理论中,就像原子内能态一样,原子运动作量子化处理.激光冷却就变成了光学泵浦过程,把原子泵向较低的动能态,把能量耗散到辐射场.冷却过程涉及到静态量子态而不是经典轨道,光学泵浦和自发辐射耗尽高能态至低能态.激光冷却成为一个运动外态和原子内态的光学泵浦过程.由此产生新的激光冷却理论,而不是阻尼力与动量扩散的竞争理论。

超冷碰撞发生的温度区间称为量子域,在此域中,热原子德布罗意波长大于原子间相互作用的空间尺度,即原子碰撞过程中相互距离小于它们的德布罗意波长.这种量子重叠产生了许多新的现象,如稀薄气体中自旋波现象和泡利不相容原理决定的双极化氦原子气体的超稳特性。

进一步的量子域中,德布罗意波长不仅大于原子的相互作用的空间尺度,而且超过气体中原子间的平均距离,即 $\lambda_{th} > n^{-1/3}$ 这里 n 为气体密度.在此简并量子域中,原子永远处于其他原子的波长之中,简并域弱作用量子气体的实现使人们可以观察玻色-爱因斯坦凝结现象,原子间的碰撞在实现玻色-爱因斯坦凝结过程中起着重要的作用。

也有许多工作研究碱金属原子间的碰撞^[10],在碰撞过程中用近共振激光场激发碰撞的部分原子(有时称为光学碰撞).这对于研究光阱中量子的耗散过程是很重要的.由于碰撞时间与自发辐射时间相当,因此是基本研究内容之一。

原子与激光相互作用的一个最广泛的应用就是非线性光学.原子吸收和散射可产生如多量子效应、Raman 过程和其他有关的现象,这

些研究经常在气室中进行.因为许多情形需要激光失谐足够大,使之超过多普勒线宽以避免共振激发,而在常温下,多普勒线宽为 GHz 量级,激光冷却可以使原子样品有极小的多普勒线宽,这样非线性光学就进入多普勒线宽远小于自然线宽的领域,光学失谐就可降低到几个自然线宽之内.这样将有较大的非线性效应,可以用较弱的光强研究已知的非线性效应,同时亦可探索在常温下无法观察到的非线性效应。

利用单聚焦激光束焦点可以囚禁原子和分子,但这需要满足两个条件:首先激光频率低于被囚禁粒子的自然共振频率,其次由激光束强电场产生的原子分子偶极矩与驱动电场同相位.这时激光强度与偶极矩的相互作用能为负值,所以原子分子就可以被囚禁在激光束焦点上,激光束焦点很容易通过反射镜或透镜控制,这种激光阱称为光学钳. Ashkin^[11]发现光学钳可自由地移动水溶液中的有机体而不使其有明显损伤.在斯坦福大学^[12],在 DNA 分子两端接上聚苯乙烯球以利于光学钳操纵 DNA 分子,给 DNA 分子染色以利于在显微镜下观察.采用摄像机观察和记录 DNA 分子在激光钳操纵下的变化。

激光冷却技术可以使原子钟的精确度提高三个量级.现代原子钟有两个特点:(1)原子具有对应于室温或更高温度的热运动,这意味着多普勒效应占据重要的位置;(2)所需产生基态和激发态原子布居数差的方法较为复杂.商用铯原子钟因此而受到限制,精度不能超过 10^{-14} . 解决这个问题的办法是降低原子运动动能,以便减小多普勒频移,更长的作用时间可以有较窄的共振线宽,采用激光冷却中性原子的方法可以大幅度提高信噪比.这样有利的一方面是基于中性铯原子秒的定义仍可继续采用而不需作较大的改动.冷却原子方法最大的优点是原子束中所有原子均可被利用.而传统磁选态方法中原子束中的 15/16 均作为无用原子被舍弃不用.原子束中原子的充分利用可以在很大程度上提高信噪比.由于压缩了线宽,在保持

同样信噪比时原子钟的稳定性亦可大幅度提高. 现在人们普遍认为, 原子喷泉是最为理想的选择方案, 由于传统原子束源没有足够强度的慢速原子, Zacharias 实验不能成功, 而激光冷却原子可以提供足够强的束流. 冷却原子向上抛射然后落下, 两次通过微波腔中同一作用区, 由两次作用的时间差形成 Ramsey 线型, 其分辨率由时间差决定. 这种方法有极大的优点, 对于相对小体积的仪器, 其作用时间可以有较大的差值. 喷泉的另一个特点就是 Ramsey 作用发生在同一微波腔里, 这将大大减小腔相位误差.

通过计算发现, 采用冷却原子和原子喷泉相结合的方法, 可以使现有原子钟的精度提高三个量级. 精确的计时在许多方面都有意义. 在科研中, 非常准确的频率比较对验证相对论、量子理论、QED 等当代理论是非常有意义的. 高精度的原子钟对军用民用飞机、宇宙飞船导航甚至是未来的全球定位系统(GPS)都是有意义的. 计算机系统、无线电电视广播、电话通信系统等由于时间精度的提高也将会较大的发展.

本文介绍了激光冷却原子技术的几个应用领域和由此产生的新的研究课题. 可以相信, 随着研究的进一步深入, 将会出现更多的新兴研究课题, 激光冷却技术将会在基础研究和应用研究领域发挥愈来愈重要的作用.

参 考 文 献

- [1] A. Einstein, *Physikalische Zeit.*, **18**(1917), 121.
- [2] O. Frisch, *Zeit. f. Phys.*, **86**(1933), 42.
- [3] T. Hänsch and A. Shalov, *Opt. Commun.*, **13**(1975), 68.
- [4] 王义道, *物理*, **19**-7(1990), 389; **19**-8(1990), 449.
- [5] 王育竹、王笑鹏, *物理*, **22**-1(1993), 16.
- [6] J. Nellesen et al. *Opt. Commun.*, **78**(1990), 300.
- [7] A. Hemmerich et al. *Phys. Rev. Lett.*, **70**(1993), 410.
- [8] R. J. Cook and R. H. Hill, *Opt. Commun.*, **43**(1982), 258.
- [9] A. Aspect, *Phys. Report*, **219**-3-6(1992), 141.
- [10] H. Metcalf and P. von der Straten, *Phys. Report*, **244**(1994), 410.
- [11] A. Ashkin et al., *Science*, **235**(1987), 1517.
- [12] S. Chu et al., *Int. Con. on Quan. elec. Tech. Digest*, (1990), 202.

纳米复合材料发展趋势*

牟 季 美

(中国科学技术大学材料系, 合肥 230026)

张 立 德

(中国科学院固体物理研究所, 合肥 230031)

摘要 系统总结了近二三年来国内外纳米复合材料研究的状况, 并对纳米复合材料发展的趋势和新动向进行了评述, 指出它的研制是纳米材料工程的重要组成部分. 由于应用目标明确, 在纳米涂层材料、高力学性能材料、高分子基纳米复合材料、磁性材料、光学材料、高介电材料及仿生材料等方面将有突破性进展, 成为世纪之交纳米材料科学中最为活跃的领域之一.

关键词 纳米复合材料, 纳米材料科学, 纳米材料工程

* 1995年2月14日收到初稿, 1995年4月3日收到修改稿.