

# 激光控制原子运动

黄 青

(中国科学院安徽光学精密机械研究所一室 合肥 230031)

众所周知,运动是物质的基本属性,运动是绝对的,静止是相对的.对于物质运动表现可以划为两种类型:有规运动和无规运动.在物理学中无规运动即热运动,在不少情况下是力图克服的.对于质量较大的粒子,如原子,热运动一旦极大削弱其量子波动性就表现出来,这成了当今物理学家追求的一种趋势.但怎样才能控制原子的运动,使其无规性得以克服呢?显然必须靠力的作用.广义地说,力是作用,而这种作用无非表现为吸引和排斥.吸引和排斥是物质运动的源泉.如何运用这种作用则是控制物质运动形式的关键.

控制原子运动有其困难性和特殊性.由于原子不带电荷,因此不能像电子、离子一样用电磁场控制其运动;但正因其电中性,它也不受杂散电场干扰.当然控制原子运动使其处于超低温,也因为它与中子相比物质波波长短且它的选择多样性和无放射性等优点.在此基础上已经发展起来一门新学科:原子光学.

激光自1960年发明以来因其高亮度、单色性、方向性一直受到科学家的重视并得到广泛的运用.体现在原子运动的控制上利用的是它的较大的光压冷却、捕获、操纵.关于冷却原子的发展简史如下:1968年V. S. Letokhov首先提出用激光驻波捕获原子的思想,并提出激光陷阱的概念.1975年斯坦福的Hansch、A. Shawlow以及华盛顿的D. J. Winelan和H. Dehmelt(Dehmelt, Ramsey与另一位第一

\*\*\*\*\*

息时代发展的主要动力.如果说,光子学及光子技术的出现标志着当今的信息科学已开始步入“光子时代”,也就是说,把21世纪称为“光子时代”是并不过分的.因此,我们有必要发挥基础学科的先导作用.特别要组织好多

个做成中子陷阱的德国科学家W. Paul获1989年度诺贝尔物理学奖)分别独立地首先提出激光冷却原子的建议.从此,用激光控制原子的运动成了各国物理学家致力研究的现实的目标.1978年美国贝尔实验室A. Ashkin等用激光光压梯度力首次实现原子束聚焦;1979年莫斯科光谱所V. I. Balykin等首次用激光使Na原子束减速.到1980以后,这方面的研究得到了充分的发展,特别值得一提的是1985年贝尔实验室的S. Chu等首先把原子冷却到 $240\mu\text{K}$ (当时的理论极限)并囚禁在“光学糖浆”中达0.5秒;1989年斯坦福的M. A. Kasevich、S. Chu等用更复杂的技术做成Na原子束喷泉,得到2Hz线宽的Ramsey信号,这对建立高时基意义重大.另外,美国的D. Pritchard, C. Wieman等,法国的Dalibard, C. Cohen-Tannoudji等人在实验上,尤其在理论上都有重要贡献.中国从事该方面研究颇有成绩的是上海光机所的王育竹.最近有关激光冷却原子的研究又取得重要进展,结合用蒸发冷却的方法,美国科罗拉多联合天体物理实验室(JILA)和国家标准技术局(NIST)已冷却铷-87原子到170nK,并在该条件下实现Bose-Einstein凝聚(BEC),麻省理工学院则冷却钠原子达 $2\mu\text{K}$ ,也完成BEC实验.这是实验物理上的一个重大突破.

## 一、激光场对原子的作用力

激光场本质上是电磁场.粒子(包括原子)

\*\*\*\*\*

个学科:凝聚态物理学科、电子学科、光学学科、计算机与信息学科与材料学科的统一联合基础研究,为促进“光子学、光子技术”的发展,为新一代信息技术的兴起发挥开路先锋的作用.

在场中运动会受到力的作用. 从另一方面说, 激光是由具有波长、偏振性、方向性等性质相同的光子组成的, 当这些光子在与原子相互作用时进行着能量和动量的相互交换和转移, 从而引起原子运动状态的变化. 这种相互作用的形式和大小又与原子内部结构有关, 后者决定了原子“吞吐”光子的能力和过程. 而这种过程以物理的分解来看形式是多样的, 内容是丰富复杂的. 下面我们稍微详细地加以说明.

偶极近似下激光与电中性的原子相互作用能为  $W = -\vec{P} \cdot \vec{E}$ .  $\vec{P}$  是原子感生电偶极矩,  $\vec{E}$  是辐射电场. 对低速运动的原子其平均受力为  $\vec{F} = -\nabla W$ . 用半经典理论的密度矩阵方法处理 (光场经典处理, 原子量子化), 应用二能级原子模型,  $\vec{P} = \vec{\mu}_{21}\rho_{12} + \vec{\mu}_{12}\rho_{21}$ , 其中  $\vec{\mu}_{ij}$  为原子能级  $i-j$  间的电偶极矩矩阵元;  $\rho_{ij}$  为原子密度矩阵非对角元, 它反映原子极化性质; 另外, 密度矩阵对角元  $\rho_{ii}$  表示原子在能态  $i$  上的布居. 一般引入 Rabi 频率描写光场对原子作用的强弱, 它定义为

$g = \vec{\mu}_{21} \cdot \vec{E} / \hbar$ . 它是复数  $g = g_0 e^{i\varphi}$ .  $\varphi$  这里指光场的位相, 但实际一般包含原子、光场两方面的位相信息. 若外加单色光场  $\vec{E}(\vec{x}, t) = \vec{E} e^{-i\omega t}$ , 在旋转波近似的条件下通过解算关于密度矩阵的光学布洛赫方程的稳态情形, 得到

$$\rho_{12} = ig / [\Omega(1+p)] \quad (1)$$

其中  $\Omega = \Gamma/2 - i\delta$ , 失谐量  $\delta = (\omega - \omega_0 \pm \vec{k} \cdot \vec{v})$ ,  $\omega_0$  是共振频率; 饱和参数

$p = 2g_0^2 / |\Omega|^2$

$$p = 2g_0^2 / |\Omega|^2$$

将(1)式代入  $\vec{P}$  再求  $\vec{F}$  得到  $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ , 其中

$$\vec{F}_1 = (h\Gamma \nabla_{\varphi}) / [2(1+p)] = h\Gamma \rho_{22} \nabla_{\varphi}, \quad \rho_{22} \text{ 是上能态的布居数.} \quad (2)$$

$$\vec{F}_2 = (-hp\delta \nabla g_0) / [g_0(1+p)] = h\delta \rho_{22} \nabla I / I, \quad I \text{ 是光强.} \quad (3)$$

$\vec{F}_1$ 、 $\vec{F}_2$  的划分是根据力的来源与性质的不

同. 从物理过程看, 原子吸收激光光子得到光子能量和动量, 但在自发辐射光子时, 由于方向随机性, 失去的平均动量为零, 从而造成原子获得净的动量变化而受力. 故称之为自发辐射力 (也称散射力). 见图 1.(2) 式表明

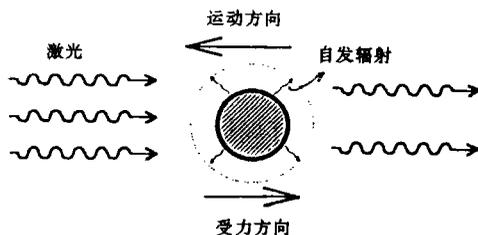


图 1 平面波中原子受散射力

该力沿着激光光子运动方向 (光纵向压力), 具有共振性和饱和性. 以钠原子为例, 当共振激光足够强, 其产生加速度最大为重力加速度的几十万倍.  $\vec{F}_2$  的产生根源在于光场的多模性. 原子与光场相作用时不断地受激吸收和受激发射不同模、即不同动量的光子而获得了力, 因为是受激过程, 故为受激辐射力; 也称为感应力或偶极力. 从光强不均匀性看, 又一般称梯度力. (3) 式表明, 它大小由光强梯度决定, 但方向取决于失谐正负. 正失谐 ( $\delta > 0$ ) 时力把原子拉向光弱处, 负失谐则把原子拉向光强处. 这种力具有非共振性, 一般也不出现饱和效应. 对负失谐时高斯光场中原子受力分析见示意图 2.

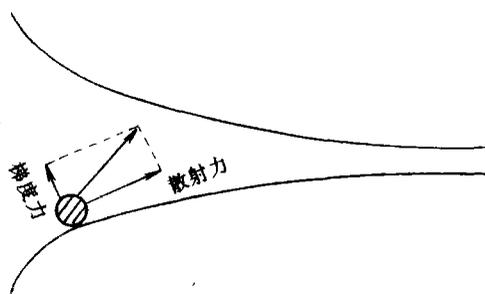


图 2 高斯光场中原子受力分析

以上分析了原子准静态时的受力. 当原子在光场中运动时是一种与速度有关的粘滞力.

$$d\vec{E}(\vec{x}, t) / dt = \partial \vec{E}(\vec{x}, t) / \partial t + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{E}(\vec{x}, t) \quad (4)$$

由(4)结合密度矩阵的光学布洛赫方程可以得到速度依赖的一阶近似的粘滞力,这对激光陷阱是必需的:

$$\vec{F} = h p (1 + p)^{-1} (\Gamma / 2) \vec{k} \{ 1 + 2\delta(\vec{v} \cdot \vec{k}) / [|\gamma|^2(1 + p)] \} \quad (5)$$

现讨论几种典型的激光场.在平面波光场中,只有散射力作用.对高斯激光束,正失谐的激光所产生的梯度力使原子束发散,而负失谐的激光其梯度力将原子拉往光束腰,即焦点.比较复杂的是平面驻波时的情形.此时,若  $\delta \approx g \gg \Gamma$ , 则有  $|\vec{F}_1| / |\vec{F}_2| \approx \Gamma / \delta$ , 即  $|\vec{F}_1| \gg |\vec{F}_2|$ . 在辐射强度很高时,与原子运动速度有关的力的作用不可忽视.此时受力情况为(利用(5)式)

$$\vec{F} = h p (1 + p)^{-1} [\delta \vec{k} \tan(\vec{k} \cdot \vec{x})] \times \{ 1 + [(\Gamma)^2 (1 - p) - 2p^2 |\gamma|^2] (\vec{v} \cdot \vec{k}) \tan(\vec{k} \cdot \vec{x}) / [|\gamma|^2 (1 + p)^2] \}.$$

一种物理解释是用交流斯塔克效应,由于光强空间分布周期变化导致光场-原子缀饰态能级周期性移动,原子运动其间不断“爬坡”把动能通过发射光子而消耗,从而达到冷却的目的.

原子在光场中的受力虽基本由上述分析定性给出,但实际上是十分复杂的.这牵涉到具体原子与各种类型的光场以及其他如外磁场的作用过程.基于各种复杂过程,已经提出了各种控制原子运动特别是冷却捕获原子的新机制,如偏振梯度激光冷却机制,磁感应冷却机制,速度选择相干态粒子数捕获机制,拉曼跃迁速度选择机制等.像在麻省理工学院新近发明的磁光阱(MOT,被认为是目前最深的陷阱)以及前面提到的“光学糖浆”中,原子的受力都是较复杂的.图3是原子喷泉实验简图.

## 二、应用与意义

激光控制原子运动具有重要意义,并有许多潜在的应用.被激光冷却的原子因极大地消除光谱中的多普勒加宽、相对论频移、渡越加宽可用于高分辨光谱研究,使量子频标进入崭新时代.有关超冷原子的物理问题,如物质波相

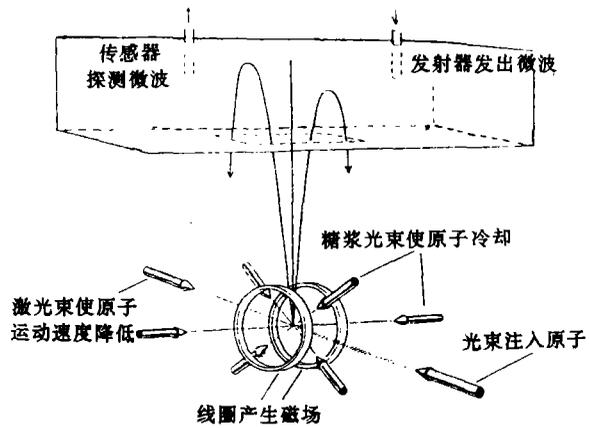


图3 原子喷泉实验

关的新的原子碰撞过程,量子统计物理所预言的爱因斯坦-玻色凝聚现象(依靠激光冷却原子实验现已观察到该现象,对之深入而有趣的研究正在进行中)等.控制原子运动,可使其准直、聚(散)焦成象、反射、衍射、干涉.这类原子光学器件现都在实验室中研制出来了.图4示例地给出原子反射镜光路图.目前,原子光学正处于蓬勃发展中.还有一与此相关的激动人心的应用是激光对生物粒子的操纵.利用光梯度力的所谓“光钳”能够把单个DNA分子拉直,能够进行细胞融合实验,能够对染色体进行捕捉和收集,等等.这将对生物科学产生重大而深远的影响.

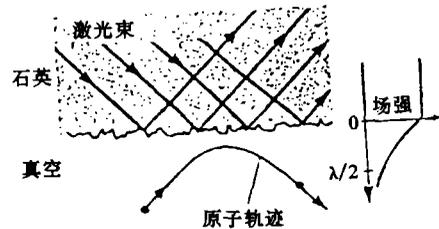


图4 激光原子反射镜光路图

以上可见,事物运动、变化、发展的形式是很复杂的,事物运动形式变化的动力来自外部的力的作用,而作用力的形式也是很复杂的.为了达到各种目的的物质运动,人们必须深刻认识物质运动的规律,掌握控制运动的各种手段,通过实践探索才能找到有效的解决问题的方法.而这正体现了科学研究一般的方法.