

随着科学技术的深入发展，特别是六十年代激光诞生，使光学领域发生了一次重大飞跃。它不仅开创了光学技术的新局面，而且几乎没有那一门自然科学不感受到激光的巨大魅力的影响。与此同时，作为对光自身性质的研究，人们对光的力学效应产生了浓厚的兴趣。每个光子具有的动量虽小，但高亮度的激光束所表现出来的动量则可产生令人惊叹的宏观效应。目前已做到将 Na 原子的运动速度从 600m/s 冷却到平均速度近似为零。将原子冷却到  $10^{-4}K$  后进一步采用磁陷阱、射频陷阱或激光陷阱等把原子囚禁其中。用激光偏转原子束，已可辨别几个光子动量所产生的原子动量变化，这可用于验证各种光的力学效应的理论、各种光冷却和捕获原子的新思想以及成为验证物理规律的有效工具。

### 激光陷阱

单个光子的动量微乎其微，那么激光束究竟能显示出多大的宏观作用力呢？如果把一束  $P = 1W$  的连续激光束 ( $\lambda = 5461 \text{ \AA}$ ) 聚焦成尺寸为波长量级的光斑，将密度为  $1\text{gm/cc}$  的绝缘球置于光束焦点处，那么该球将承受

$$F_{rad} = 2qP/C = 6.6 \times 10^{-3}$$

达因的辐射压力。其中  $q$  为小球对光反射的后向有效部分光的反射系数。如设  $q = 0.1$ ，这时光所施加给小球的作用力所产生的加速度  $= 1.2 \times 10^8 \text{ cm/sec}^2 \approx 10^7 g$  ( $g$  是重力加速度)。此力之大，简直令人不可置信，然而这是千真万确的。这种巨大的作

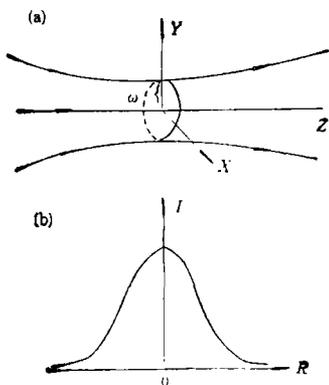


图1 高斯光束

- (a) TEM<sub>00</sub> 高斯光束 ( $w_0$  为束腰)  
(b) 高斯光束横截面的光强分布

用力正是来源于激光的高度空间相干性、单色性和高亮度(高光子简并度)的特性。

特别引人入胜的是聚焦的激光束具有一个任何其

它光源无法比拟的特点。它存在一个非常高的强度梯度从而导致巨大的梯度力产生。运转于 TEM<sub>00</sub> 模(基模)的激光器的输出是高斯光束(如图 1-a 所示)。设光束沿  $z$  轴传播， $W_0$  是焦点处光束束腰的半径，在垂直于  $z$  轴的截面上，光束的强度分布以  $z$  轴为对称

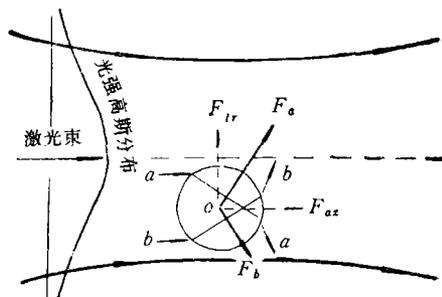


图2 粒子在高斯光束中 XY 面受力分析

轴，光强随离轴心距离  $R$  而改变并成高斯函数分布(如图 1-b 所示)，因此，光斑的中心明亮，离中心越远亮度越低。

设想有一个透明的约几十  $\mu\text{m}$  的球状粒子(假定球的折射率大于周围介质的折射率)置入上述讨论的 TEM<sub>00</sub> 模高斯光束的光场中，粒子受到光的辐射压力后其结果如何呢？根据几何光学原理，激光对透明粒子产生的作用力主要来之高斯光束中象  $a$  和  $b$  那样的光线(图 2)，这些射线穿过球而发生折射。从而在动量变化的方向上产生作用力  $F_a$  和  $F_b$ 。鉴于高斯光束在  $a$  处的强度比  $b$  处高，因而  $a$  处比  $b$  处有更多的光线。所有在上半球入射的光线所施加的合作力为  $F_a$ ，而所有在下半球入射的光线合作力为  $F_b$ ，故  $F_a > F_b$ 。不难看出， $F_a$  和  $F_b$  的合力即净作用力有二个分量，一个指向光线轴向(传播方向)即轴向力  $F_{ax}$ ，另一个是横向梯度力  $F_{ay}$ 。对于典型的光束直径，梯度力可大到与光的轴向力相当。就目前激光器的功率水平而言，这两个力可大到粒子重量( $mg$ ,  $m$  是粒子的质量)的几千倍。高斯光束的梯度力

$F_{ay}$  始终将粒子推向光轴(即光强最大处)，粒子在光轴横向方向上的运动受到该梯度力的约束，这便是高斯光束的二维势阱，阱的中心在光轴上，一旦粒子落在光斑处就会被俘获在此阱之中，除非它具有足够的动能以克服梯度力  $F_{ay}$ 。当然，由于存在轴向力，二维势阱并不能将粒子束缚在一点，粒子在  $F_{ax}$  作用下将沿光轴传播方向移动。可见二维势阱还不具备完全捕获粒子的条件。若采用强聚焦的高斯光束，使得束腰半径  $W_0$  足够的小，造成光轴方向上也形成一个光强度梯度，也



产生一个指向焦点处的梯度力。这个力达到克服轴向力而在焦点附近产生一个稳定的平衡点，这便形成了一个三维的光学势阱。利用这个激光势阱就可以成功地俘获生物等微小的宏观粒子了。

### 生物粒子的俘获

早在1968年苏联光谱学家 Letokhov 首先提出了用光场强度梯度对原子的作用力来限定原子的设想，然而开创这项实验研究的却是美国贝尔电话实验室的 A Ashkin。他于1970年用一束 TEM<sub>00</sub> 高斯激光束照明溶液中的透明粒子，发现透明粒子被拉向光束中心并被束缚在光束中心线上。然而只有当粒子折射率大于媒质折射率时才会出现这种束缚现象，若粒子折射率小于媒质的折射率，粒子会被斥离到光束之外。他还观察到粒子越小，产生上述现象所要求的激光功率则越大。在获得这令人鼓舞的实验结果之后，他又设计了一种双光束势阱，亦称驻波阱。这种阱采用两束反向传播的 TEM<sub>00</sub> 高斯光束，使两束光同轴、中心重合且分别聚焦。在这种势阱下，他成功地在水溶液中俘获了小玻璃球。1971年他尝试一种称之为光漂浮的光学势阱，该势阱只使用一束竖直放置的弱聚焦的 TEM<sub>00</sub> 高斯光束，在轴向他巧妙地利用了粒子自身所受的重力来对抗轴向的推力以达到粒子的稳态俘获。并且借助于移动光束来拖动粒子。初步实现了光学摄子的设想，开辟了光压力的新的应用前景。

上述诸方案都证实了激光俘获粒子的可行性，但实验装置较复杂，使用不方便。1978年 Ashkin 提出利用单束激光造成空间三维势阱的设想。这一设想引起了物理界的广泛注意和高度重视。但直到1986年，Ashkin 等人才在实验上证实了单束光阱的存在。

Ashkin 的一系列实验研究成果无可置疑地告诉我们，由激光形成的光学势阱不仅能为光谱学精细结构和低能粒子等研究提供一种能够避免热动能影响的有效手段，同时也将为病毒学、细胞医学、细菌等研究提供了有效的实验工具。用它来捕获单个生物粒子可以做到无损伤地进行操作，我们称之为光学摄子。正是这种潜在的、具有不可估量的应用能力使众多的专家投入对它的研究。面对国际上的迅速发展，中国科学技术大学物理系于1989年成立了一个研究组，开展“激光俘获和操纵生物粒子”的研究工作。

中国科技大学物理系的研究人员首先从理论上分析单束激光势阱的特性，为实验研究提供了可靠的依据。对于诸如细菌类这种尺寸较大的透明粒子，几何光学的近似是成立的。理论计算的结果表明，透明粒子在光轴方向所受的力与人射光波长和直径关系不大，但与粒子的折射率  $n$  和高斯光束的束腰  $W_0$  紧密相关。图3是在适当条件下粒子轴向受力的计算曲

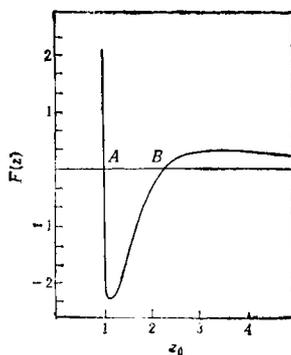


图3 粒子在光轴方向受力曲线

线。处于位置 A 和 B 的粒子受力为零。在 A 点处，粒子稍偏离都会受到一个指向 A 点的恢复力，故 A 点是稳定的平衡点。而 B 点则是一个非稳定平衡点，一旦粒子离开 B 点，它所受到的作用力会进一步使之远离 B 点。因此 A 点才是单束激光势阱的阱底。在 A 点附近的粒子，它不仅受到横向梯度力的作用因而被束缚在光轴上，而且被固定在稳定平衡点 A 处。理论计算结果还表明，当粒子折射率  $n$  过大，将不会有稳定的平衡点，势阱消失，即三维阱变成了二维阱。激光束腰  $W_0$  太大或太小也会出现类似情况，影响势阱的形成和捕获成败。因此实验参数务必权衡各种因素，选择恰当才能获得最佳俘获效果。1990年，这个组在国内首次将理论付诸于实践，把一束 TEM<sub>00</sub> 模 6328 Å 高斯激光束引入高倍生物显微镜，经 100 倍油浸物镜的强聚焦作用(封面图)，在显微镜观察的焦平面附近造成一个能捕获某些生物粒子的三维光学陷阱。(彩色图 1 为势阱中无粒子时的光场；图 2 为俘获粒子时的光场)。他们成功地用它捕捉了水中悬浮的脂肪小球 (3—5 μm)、某些细菌(红葡萄球菌)和原生小动物(鞭毛虫等)。观察被捕的生物粒子在阱中生物活性的变化及存活时间。他们将某些生物粒子保持在阱中几十秒钟而未发现被损伤，并且做到了钳住粒子慢速平移，使某细胞与其群体分离，实现了对粒子的操纵。这些工作促进了我国光的力学效应的研究，开拓了激光在生物细胞学等领域的应用前景。

### 《现代物理知识》第一届知识竞赛试题(五)

(一) 1947 年，黄昆在\_\_大学，发现了有名的\_\_，被德国人\_\_在\_\_年所证实。我国学者\_\_等应用\_\_技术，也获得同样结果。

(二) 30 年代，卢鹤绂在美国\_\_大学，发现并准确测定铯 7 铷 6 天然丰度比为\_\_，这一成果于\_\_年发表在\_\_杂志上。

(三) 中国科大物理系于\_\_年，把一束\_\_高斯激光束引入高倍\_\_，经\_\_倍\_\_物镜的\_\_作用，造成捕获生物粒子的\_\_。

(四) 北京师范大学试制两台 X 光透镜，一台叫\_\_，另一台叫\_\_。

· 参赛标记 ·



张树梓 制作