

# 单光束俘获微粒模型

陈中 朱雷 王深义 杨远龙  
(复旦大学物理系, 上海 200433)

## A model of single laser beam trapping

CHEN Zhong, ZHU Lei, WANG Shenyi, YANG Yuanlong  
(Physics Department, Fudan University, Shanghai 200433)

**Abstract** A polymer dielectric microsphere will "suffer" radiation pressure in the electric field of laser beam. In this paper, geometry optical method is used to describe this three dimensional force field. Due to the special properties of this force field, it gives us a novel tool to trap and manipulate microspheres, such as biological cells.

**Key words** laser tweezers, laser trapping, gradient force, radiation pressure

## 1 引言

单光束俘获提供了一个有效且无损地控制生物细胞的新方法。A. Askin 首先发现细菌或者微米大小的非导电介质球能够用这一简单技术实现俘获<sup>[2]</sup>。今天这一技术已被运用到各种各样的实验系统上<sup>[3~5]</sup>。

当一束光到达微粒表面时,它将被反射产生辐射压力,辐射压力可以被折射光产生的力相抵消,两者的合力称为梯度力。在某些情况下,梯度力的方向与光束入射方向相反,微粒就有可能被俘获。我们考虑一浸在水中半径  $R$  为 5 微米的介质球,用一波长为  $1.06 \mu\text{m}$  的激光束进行俘获。同时小球还受到重力和浮力,两者合力为  $F$  (约  $2 \times 10^{-8} \text{dyn}$ ),因此有效梯度力的最小值为  $F$ 。

## 2 计算方法

在图 1 中,光束沿  $-z$  轴引入,  $A$  为腰部,由于对称性的关系,小球只受轴向力。假定俘获力的正方向沿  $+z$  轴,梯度力必须大于  $F$ ,才有俘获现象。

当光束 1 到达球面上  $B$  点时,它将被反射(光束 2)和折射(光束 3),同样光束 3 也会被反射(光束 4)和折射(光束 5),因为在我们的讨论中小球和水的折射率相仿,绝大部分的光子被折射,所以光束 4 很弱,可以忽略它的反射和折射。我们用方向矢量来描绘每一条光束的方向,例如  $(K_1[1], K_2[1], K_3[1])$  表示光束 1 与  $x, y, z$  三个坐标轴的夹角的方向余弦。当这些光束的方向矢量确定后,那么动量的改变及冲力的大小就能很容易得到。在  $B$  点梯度力的大小  $F_B$  为

$$FB = -nR_0(K_3[2] - K_3[1])hn_1/\lambda - n(1 - R_0)(K_3[3]hn_2 - K_3[1]hn_1)/\lambda \quad (1)$$

其中  $n$  是单位时间内到达  $B$  点的总光子数,  $R_0$  是  $B$  点的反射率,  $n_1, n_2$  分别是水和介质球的折射率, 且  $n_1 = 1.35$ ,  $h$  是普朗克常数。我们对  $FB$  在整个球面上积分便能得到总梯度力的大小。不同的偏振态的入射光, 其反射率不一样, 我们取两者的平均值作为该点折射率的值。

对于高斯光束, 曲率半径  $R(Z)$  满足

$$R(Z) = Z[1 + (\pi W_0^2/\lambda Z)^2]^2 \quad (2)$$

其中  $Z$  为腰部到  $B$  点的垂直距离。因为  $R(Z)$  总是大于  $Z$ , 所以光束好似从腰部后面的  $A$  处发出, 由此可以决定光束 1 的方向矢量  $K_i[1]$  ( $i = 1, 2, 3$ )。对于光束 2, 3, 它们分别满足折射和反射定理, 并且和光束 1 共面, 它们的方向矢量也可以决定, 光束 4, 5 的方向矢量也用同样的方法得到。这些工作由计算机程序完成。

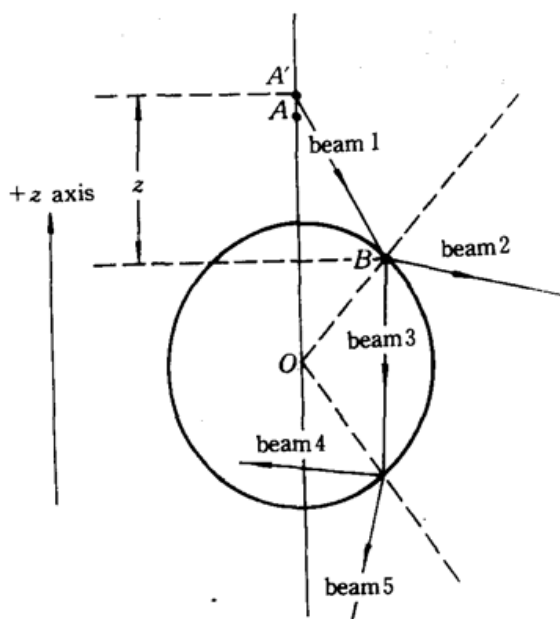


Fig. 1 Geometrical model

由于光斑在空间很快地扩展, 随着距离的增大绝大部分的光子将不会到达小球的表面, 计算表明当小球离开光束焦点  $40 \mu\text{m}$ , 光束腰半宽为  $0.6 \mu\text{m}$  时, 仅有 10% 的光子能打到小球表面, 俘获力显然只能在很小的范围内才起作用。

### 3 计算结果及分析

#### 3.1 不同实验参量的影响

由上面的分析知道, 俘获力的大小必然与这些参量有关: 高斯光束的腰部半宽  $W_0$ , 小球的半径  $R$ , 小球的折射率  $n_2$ , 输入激光的功率  $P$ , 下面对此进行讨论。

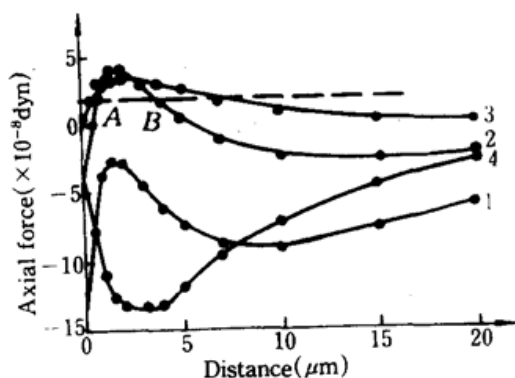


Fig. 2 Axial trapping force versus distance for four different refractive index of microsphere ( $P = 5 \text{ mW}$ ,  $W_0 = 0.6 \mu\text{m}$ ,  $R = 5 \mu\text{m}$ )

图 2 显示了小球的折射率同俘获力的关系, 图中的虚线为最小的俘获力  $F$ 。折射率分别为 1.4, 1.6, 1.8, 1.2 (曲线 1, 2, 3, 4)。当  $n_2$  (1.8) 比水的折射率  $n_1$  大很多时, 反射部分增大, 因此俘获力就减小, 而当  $n_2$  (1.4) 与  $n_1$  过于接近时, 折射光的方向改变很小, 因此也会降低俘获力,  $n_2 = 1.6$  时我们能得到最大的俘获力。以曲线 2 为例, 在  $A, B$  点俘获力的大小等于重力和浮力的合力  $F$ , 但是  $B$  点是不稳平衡, 最后位于  $AB$  段内的小球将被“吸”至  $A$  点。 $A$  点在焦点下约  $1 \mu\text{m}$  处, 而俘获的半径  $AB$  段为  $3 \mu\text{m}$  (不考虑聚焦在球内部的情况)。

而当  $n_2$  (1.2) 小于水的折射率  $n_1 = 1.33$  时, 在界面上将会发生全反射, 使散射力增大, 俘获力只有极小值而没有极大值而且均为负值。因此当我们研究如水中的空气泡一类的俘获情况时, 俘获力将表现出极其不同的性质。所以对这一类的生物细胞进行俘获时可以采用光束自下而上引入, 这类实验被称为“光学悬浮”, 这时俘获力的符号将要倒转, 从而能实现俘获。

另一必须指出的是,折射率小于水的介质球受到的横向力也是完全不同的,小球将被推离光场的中心,为此应采用  $TEM_{0,1}$  的模式,这种模式的光强分布具有中央小的特点,因此能俘获住这类介质小球。

当光束的  $W_0$  减小时,俘获力增大;俘获力的大小也成正比入射的光功率  $P$ ;小球的半径变化时,俘获力没有明显的改变;这些结论与[1]相一致。

### 3.2 三维力场

以上我们讨论了小球的中心位于光轴上时轴向的力。但在具体的实验时,应考虑小球位于溶液的各处,即其除受轴向的力外,还受横向力的作用。我们用  $Y_0$  和  $Z_0$  表示小球与光束腰部的横向和纵向的相对位置,给出其所能“感受”的三维力场。

图 3(a), (b) 分别是三维轴向力(俘获力)和横向力的分布,小球在任一点( $Y_0, Z_0$ ) 所受的力为这两种力的合力。图中的虚线为最小的俘获力。当  $Y_0 = 0$ , 即小球位于光轴上时,它所受的横向力为零,也就是说它可以稳定在光轴上。当  $Y_0 \neq 0$ , 小球受一横向力的作用,这横向力表现为类似回复力的性质,它把小球拉回到光轴。但当  $Y_0$  过大(大于  $8 \mu\text{m}$ ) 时,横向力是负的,小球将被推离光轴,位于这些位置的小球就不能被俘获。当小球被拉回到光轴后,如果它正好位于 AB 段内时,它将被稳定地俘获于 B 点,因此 B 点是这个光场下的一个稳定平衡点。从横向力和轴向力的大小上,我们可以知道横向的俘获更深,如果小球由于某种涨落(光强的起伏,布朗运动的影响等)而脱离俘获,一般将发生在轴向的脱离。当小球被俘获于 B 点后,如果缓慢地沿横向或纵向移动光束,由于力场在这两个方向均有类似回复力的特殊性质,小球将跟着这光场一起移动,好象被光场粘住一样,这被称为“激光镊子”效应,藉此我们可以对小球任何的平动进行控制。

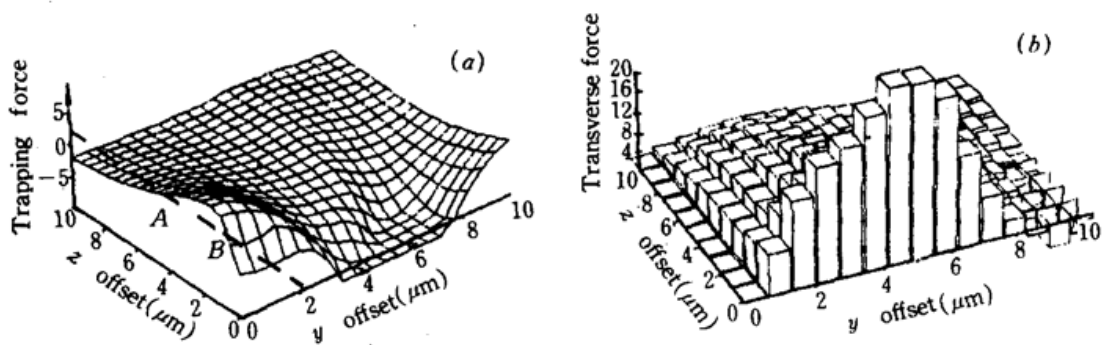


Fig. 3

(a) Axial trapping force versus  $z$  offset and  $y$  offset ( $P = 5 \text{ mW}$ ,  $W_0 = 0.6 \mu\text{m}$ ,  $R = 5 \mu\text{m}$ ,  $n_2 = 1.6$ );

(b) Transverse force versus  $z$  offset and  $y$  offset (unit of force :  $10^{-8} \text{ dyn}$ )

小球所受的力矩作用类似于图 3(b)。当小球不在光轴上时,小球所受的力对于球心 O 的不对称性,它将受到一个沿  $x$  方向的力矩  $L-X$ 。这意味着小球在被俘获的过程中将发生旋转。只有在光轴上才不受力矩的作用。这就是说小球边旋转边回复到 B 点,并在粘滞力的作用下静止下来。利用这一性质,我们可以对小球的转动进行控制,实现对小球的各个侧面的观察。

### 3.3 不同激光横模的影响

光场的分布对力场是至关重要的。图 4 中分别对 (0,0), (1,1), (2,2) 三种模式(分别用 A, B, C 表示) 的俘获力作了比较。从 A 到 C, 这三种模式的光强分布越来越散布, 光斑在空间上越

来越快地扩展,因此梯度力将会限制在更小的范围内。不同的模式对应不同的光束入射角,入射角将决定反射率和折射光的偏转角这两方面来影响梯度力的大小。(1,1)模式可以得到最大的梯度力,但它的俘获范围比(0,0)模的小。(1,1)和(2,2)横模在径向不对称,因此横向回复力在径向也具有不对称性,使问题复杂化。

### 3 结 论

以上的计算及分析表明,单光束俘获确能为我们提供一个生物学实验的有效手段,它能对一个“活”的生物体在不离开其生存环境的情况下,不会因布朗运动而脱离视野,进行长时间的观察和各种操作,可和激光切割等手段共同使用,在生物学的领域必将得到广泛的应用。

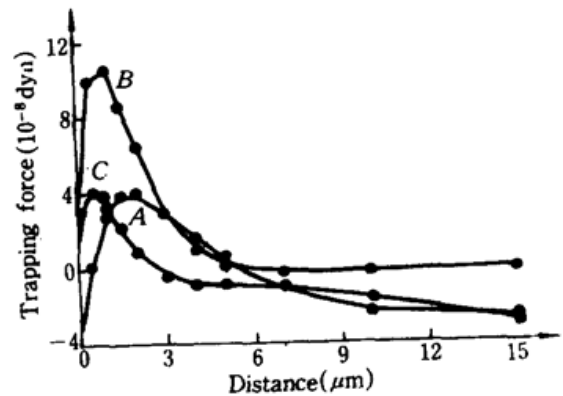


Fig. 4 Trapping force versus distance for three different laser mode ( $P = 5 \text{ mW}$ ,  $W_0 = 0.6 \mu\text{m}$ ,  $R = 5 \mu\text{m}$ ,  $n_2 = 1.6$ )

### 参 考 文 献

- 1 W. H. Wright *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-26**, 2148(1990)
- 2 A. Ashkin, *Phys. Rev. Lett.*, **40**, 729(1978)
- 3 A. Ashkin, J. M. Oziędzic, *Science*, **235**, 1517(1987)
- 4 T. N. Buican *et al.*, *Appl. Opt.*, **26**, 5311(1987)
- 5 S. M. Block *et al.*, *Nature*, **338**, 514(1989)

(收稿日期:1992年6月19日;收到修改稿日期:1992年8月31日)