

光的力学效应及光阱 PN 力的测量

廖荣

中国科学技术大学 物理学院, 合肥 230026

合肥国家实验室, 合肥 230088

1 实验原理

1.1 光镊——单光束梯度力光阱

以透明电介质小球作模型来讨论光与物体的相互作用。若小球的大小明显大于光波长, 可以采用几何光学近似。设小球的折射率 n_1 大于周围媒质的折射率 n_2 。

离开球的光传播方向有改变, 这些光传递给球一个与它们动量改变等值, 但方向相反的一个动量。与之相应的有力 F_a 和 F_b 施加在小球上。

若入射光束截面上光强是均匀的, 则各小光束(光线)给予小球的力在横向(XY 方向)将完全抵消。但有一沿 Z 方向的推力。

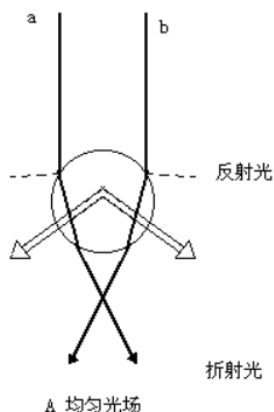


图 1: 均匀光场中的透明小球

如果小球处在一个非均匀光场中, 沿 Z 方向传播, 自左向右光强增大的光场。右边较强的光线 b 作用于小球, 使小球获得较大的动量, 从而产生较大的力 F_b 。结果总的合力在横向不再平衡, 而是把小球推向右边光强处。小球在这样一个非均匀的光场中所得到的指向光强强地方的力称之为梯度力 (F_g)。如果光束中间光强大, 粒子将趋向于这一区域, 也即在横向被捕获了。

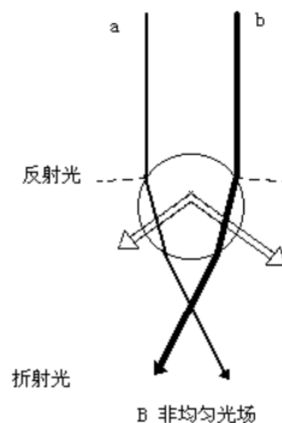


图 2: 不均匀光场中的透明小球

高度会聚的光束锥, 经小球折射, 将施加一梯度力在小球上。设小球的折射率为 n , 液体的折射率为 n_1 , 当 $n > n_1$ 时, 光锥中所有光线施加在小球上的合力指向焦点 f 。当小球的球心 O 和焦点 f 间有偏离时, 合力 F 总是使小球趋向焦点。实际上, 当光穿过小球时, 在小球表面也产生一定的反射, 这将施加一推力于小球, 此力常称之为散射力 (F_s)。只有焦点附近的梯度力大于散射力时才能形成一个三维光学势阱而稳定地捕获微粒。

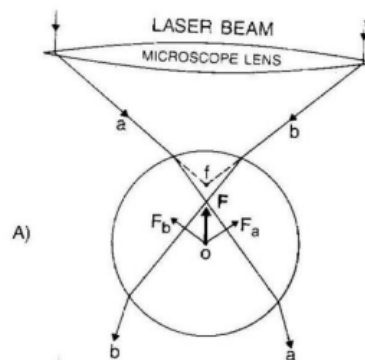


图 3: 单光束梯度力光阱原理

1.2 光阱力的测量

实验中用流体粘滞阻力间接测量光阱力，粘滞阻力公式如下：

$$f = 6\pi\eta rV \quad (1)$$

2 实验装置

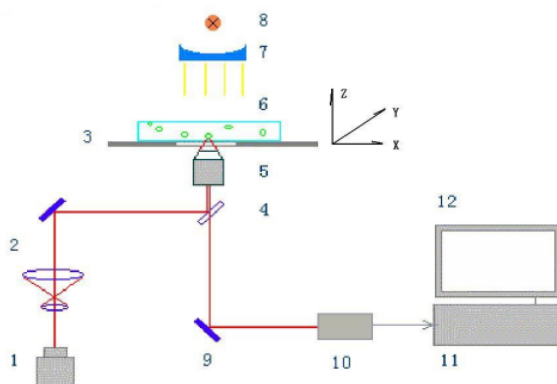


图 4: 1 光镊光源 2 光学耦合器 3 自动样品台 4 双色分束镜 5 聚焦物镜 (NA1.25) 6 样品池 7 聚光镜 8 照明光源 9 反射镜 10. 数码摄像头 11. 计算机主机 12. 显示器

3 实验内容和结果

3.1 光阱力作用范围的测量

阱域半径三次测量的结果分别为 $6.601\mu\text{m}$, $5.388\mu\text{m}$, $6.708\mu\text{m}$, 统计结果为 $(6.232 \pm 0.599)\mu\text{m}$ 。

3.2 最大光阱力的测量

微粒半径的三次测量的结果分别为 $4.116\mu\text{m}$, $4.108\mu\text{m}$, $4.264\mu\text{m}$, 统计结果为 $(4.163 \pm 0.072)\mu\text{m}$ 。

微粒逃逸速度的三次测量的结果分别为 $66.098\mu\text{m/s}$, $100.945\mu\text{m/s}$, $130.850\mu\text{m/s}$, 统计结果为 $(99.30 \pm 26.46)\mu\text{m/s}$ 。

室温 20°C , 粘滞系数为 $1.005 \times 10^{-3} \text{N/m}^2 \cdot \text{s}$ 。
根据粘滞阻力公式计算得到光阱力大小为：

$$\begin{aligned} f &= 6\pi\eta rV \\ &= 6\pi \times 1.005 \times 10^{-3} \times 4.163 \times 99.30 \times 10^{-12} \\ &= 7.831 \times 10^{-12} \text{N} \\ &= 7.831 \text{pN} \end{aligned}$$

4 思考题

4.1 光捕获微粒，基于什么原理，如何从实验上实现。

基于几何光学的折射反射定律，和光具有动量的原理，在实验上可以用聚焦激光束实验。

4.2 说明影响光阱捕获效果的因素。

样品和样品周围介质的折射率，激光的波长，聚焦激光的高斯光束束腰大小。

4.3 试定性说明强会聚的光束对于实现 Z 方向捕获的作用。

强汇聚的光束使 Z 方向的趋向于焦点的力更大，光势阱更深。

4.4 若光阱同时捕获了 2 个球形微粒，则这 2 个微粒最可能以什么形式排列，为什么？

在 Z 方向上对称于焦点排列，因为只有这样每个粒子在 XY 平面内受力均匀，落在光阱内，Z 方向上两个粒子对称，此时势能最小，趋于此种状态。

4.5 试说明光阱技术的特点，你将利用光阱技术在那些领域开展工作。

光阱技术使用微小力以非接触式方法囚禁或操纵微观粒子。可以利用光阱技术做激光冷却制备超冷原子，利用其谱线精确标定时间。

4.6 现在我们使用的光源为高斯光束的激光，考虑用一种环形光束的光源，在距轴心距离 r 内光强为零，试定性说明环形光束光阱对比于高斯光束光阱的优劣。

高斯光束的光阱势能面为中心最低的对称曲面，粒子落入阱内后自发移向阱中心；环形光束的光阱势能面为阶梯平面势阱，粒子落入阱内后不能逃逸出阱，但在阱内仍可以做布朗运动自由漂移。

4.7 实验中，我们用 100 倍油浸物镜，为什么要滴油？

在物镜前透镜和标本盖玻片之间的空隙中填充浸没液体可提高物镜的分辨率。当光从一种介质传递到另一种介质（例如，通过玻璃到空气）时会发生折射。任何折射到空气中的光线、被盖玻片反射的光线或被物镜前透镜的金属外壳实际阻挡的光线都不会对成像产生贡献。浸没液体的目的在于减少光在标本上形成的折射和反射，并提升物镜捕捉这些偏离光的能力。

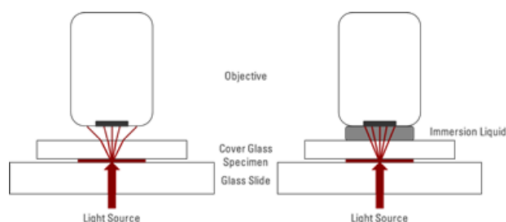


图 5: 左图: 当光通过不同折射率 (RI) 的两种介质 (例如, 通过玻璃到空气) 时, 它会折射。任何折射到空气中的光线、被盖玻片反射的光线或被物镜前透镜的金属外壳实际阻挡的光线都不会对成像产生贡献。右图: 使用折射率与盖玻片和标本所用介质的折射率相匹配的浸没液体, 可以减少标本的折射和反射。

4.8 实验结束后, 当关闭激光后, 酵母会从哪个方向逃逸, 为什么?

各个方向均可能, 撤去激光后酵母主要做布朗运动, 方向随机。

5 实验收获、体会和建议

实验用到的油浸润物镜分辨率高, 电动位移台精度高, 保证了实验便捷顺利的开展。

但实验中对微粒逃逸速度的测量误差较大, 主要原因为 CCD 相机采样率低, 导致一次曝光时间大于粒子逃逸弛豫时间, 不能精准估计逃逸速度, 建议提高采样率以进一步提高精度。

实验还可以结合边缘检测, 图像识别等技术, 对待测微粒进行大小和位移的监测。