

光的力学效应实验报告

姓名：杨博涵 学号：PB20000328 实验日期：2023 年 4 月 15 日

一、实验原理与目的（具体内容已在预习报告中体现）

光具有动量和能量，因此可以与物质发生相互作用和动量交换，也即表现为对物体施加一力，这就是光的力学效应。本次实验的目的就是要直观的展示光的力学效应，测量光阱域并利用流体力学的知识测最大光阱力。

在特定的光场分布下，光对物体的作用力可以是拉力或推力，从而形成束缚物体的势阱。比如对一个电介质小球（波长远小于小球线度，可认为是几何光学），入射两条光线 a, b，光在进入和离开球表面时会产生折射，由于动量守恒，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，此时小球受到的光对它的作用力就是光束中所有光线作用于小球的力之和。当两光强不等的时候，合力在横向上就不再平衡，而是把小球推向右边光强较强处。为了达到三维捕获，我们还需要在 z 轴上施加拉力，所以在实验中我们采用一束强汇聚的激光束来捕获，形成三维的非均匀光场，粒子会受到一个指向焦点的力，将粒子束缚住。

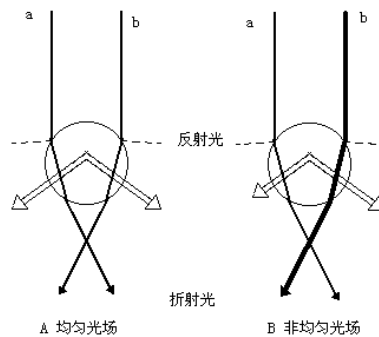


图 1 均匀光场与非均匀光场中的透明小球

高汇聚的光束产生的梯度力总是指向焦点 f ，当球心 o 与 f 有偏离时，合力会把小球推回焦点。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。也就是说，这样的光束可以像镊子一样夹持微粒，移动并操控微粒。

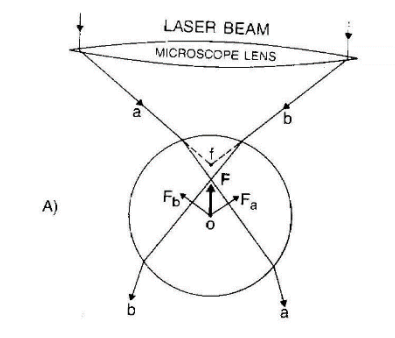


图 2 单光束梯度力光阱原理

光阱的力学参量也是十分重要，尤其是最大捕获力，本实验采用流体力学法测量。当微粒相对液体运动时会受到阻力，当阻力大于束缚力时粒子会逃逸出来。所以找到最大相对速度 V ，结合 stokes 公式 $f = 6\pi\eta r v$ 便可得到最大束缚力 F_{\max} 。

二、实验数据与计算

室温：22°C

粘滞系数(线性插值): $\left(1.005 + \frac{1.005-0.894}{20-25} * (22-20)\right) * 10^{-3} N * m^{-2} * s = 0.961 * 10^{-3} N * m^{-2} * s$

测阱域：(单位为像素，1 像素为 60nm)

| x_1 | y_1 | x_2 | y_2 | R |
|-----|-----|-----|-----|--------|
| 425 | 385 | 376 | 570 | 191.38 |
| 429 | 389 | 482 | 354 | 63.51 |
| 424 | 390 | 352 | 530 | 157.43 |

阱域半径平均值： $\frac{191.38+63.51+157.43}{3} * 60\text{nm} = 8.25\mu\text{m}$

测最大光阱力：

微粒半径：

| x_1 | y_1 | x_2 | y_2 | r |
|-----|-----|-----|-----|-------|
| 385 | 396 | 469 | 389 | 40.38 |
| 461 | 367 | 397 | 418 | 40.92 |
| 456 | 423 | 402 | 357 | 42.63 |

微粒半径平均值： $\frac{40.38+40.92+42.63}{3} * 60\text{nm} = 2.48\mu\text{m}$

逃逸速度：(xy 单位为像素，t 单位为 ms)

| t_1 | x_1 | y_1 | t_2 | x_2 | y_2 | v |
|--------|-----|-----|--------|-----|-----|--------|
| 115900 | 424 | 389 | 116000 | 433 | 224 | 1.6525 |
| 121800 | 430 | 386 | 122100 | 792 | 397 | 1.2072 |
| 126600 | 425 | 388 | 126800 | 437 | 105 | 1.4163 |

代入 stokes 公式： $f = 6\pi\eta rv$

三次计算得到的 f_{max} ：

$$v_1 = 99.15\mu\text{m} * \text{s}^{-1}, f_1 = 4.45\text{pN}$$

$$v_2 = 72.43\mu\text{m} * \text{s}^{-1}, f_2 = 3.25\text{pN}$$

$$v_3 = 84.98\mu\text{m} * \text{s}^{-1}, f_3 = 3.82\text{pN}$$

最大光阱力平均值： $\frac{4.45+3.25+3.82}{3} \text{pN} = 3.84\text{pN}$

三、思考题

1. 光捕获微粒，基于什么原理，如何从实验上实现。

A: 光捕获微粒基于光具有动量的原理，通过光与物质的动量交换来对物体施加作用力，并且使折射产生的恢复力与反射的推力形成一个指向焦点的合力，形成了一个光阱来束缚物体，其实验上实现可以使用高功率强会聚的激光束照射微粒，通过光线的偏转和反射等方式束缚微粒位置来实现光阱。

2. 说明影响光阱捕获效果的因素。

A: 影响光阱捕获效果的因素包括光束的功率、波长、微粒大小和形状、环境温度、压力、环境与微粒折射率、微粒浓度等因素。

3. 试定性说明强会聚的光束对于实现 Z 方向捕获的作用。

A: 强会聚的光束在焦点处的光强最大，并且光锥内一对典型的光线 a 和 b 经折射后产生力 F_a 和 F_b ，它们的矢量和是指向焦点 f 的。实际上，光锥中所有光线施加在小球上的合力 F 也是指向焦点 f 的，所以光束的强会聚可以使微粒被束缚在焦点附近。而对于 Z 方向的捕获也是如此，强会聚的光束可以提供对微粒的 z 方向的恢复拉力来平衡反射光的推力，使其在 z 方向上始终保持在焦点附近，从而实现三维捕获。

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？

A: 因为光阱会使两个微粒都向焦点靠近，最终的结果最可能是两个微粒以某种平衡位形在焦点处同时

捕获，比如 z 方向重合或者都在 xy 焦平面内。

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。

A: 光阱技术具有非接触、非侵入性、高分辨率、高选择性等特点，可用于生物、物理、化学等领域的颗粒精细控制、分离、定位等相关研究，比如我可以利用光阱探索活体（小老鼠）体内的细胞活动。

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。

A: 高斯光束相比于环形光束在 z 方向的捕获能力较差，这是因为光在微粒边缘的折射角大而在中心的折射小（直接透射），但是高斯光束的光强反而是中心大外围小，所以力学效应不明显，而环形光束则没有这个问题，在折射最强的地方有着很强的光强，可以产生很好的捕获效果。

7. 实验中，我们用 100 倍油浸物镜，为什么要滴油？

A: 油浸物镜可以增大介质折射率，从而提高显微镜的放大倍数，同时滴油可以减少光的折射损失，从而增加亮度便于观察。

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？

A: 在关闭激光后，酵母会从 z 方向即光束传播方向逃逸。这是因为光阱最薄弱的方向就是 z 方向， z 方向的恢复力比 xy 方向低一个数量级。因此当激光关闭后，酵母失去限制力而沿着最松弛的方向即 z 方向运动，最终逃离光阱。

四、收获与建议

通过本次实验，我直观的看到了光的力学效应，对光具有动量这一写在书本上的性质有了形象的理解。在实验中通过捕获酵母并测量阱域和最大光阱力，使我对光镊有了定性和定量的理解，将课本上的知识具体实现让我感到十分兴奋，并且这一知识会在我之后的工作中提供更多的实验灵感。

建议：可以加入探索最大光阱力与光强关系的实验，使学生对光的力学效应有着更深的理解。