

# 光的力学效应及光阱PN力的测量.预习报告

唐延宇, PB22030853, 20250327

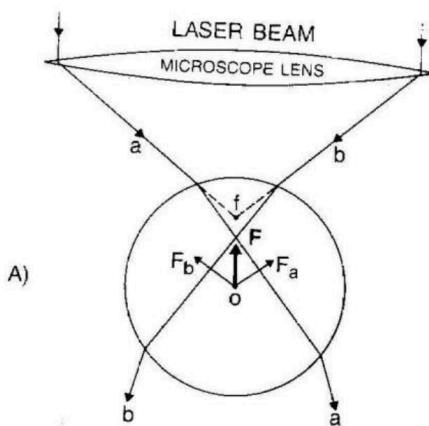
## 实验目的

- 光的力学效应: 光与物质相互作用时动量交换产生力, 表现为光压或光拉力。
- 研究意义: 激光技术(如光镊)使微小粒子操控成为可能, 推动多学科交叉应用(如生物医学、量子操控)。
- 实验目标:
  - 验证光具有动量;
  - 演示光镊捕获与操控微粒;
  - 测量光阱最大捕获力。

## 实验原理

### 1. 光镊原理

- 梯度力 ( $F_g$ ): 非均匀光场中, 微粒受指向光强最大区域的力。
- 散射力 ( $F_s$ ): 光反射或折射产生的轴向推力。
- 光阱形成条件: 梯度力 > 散射力, 实现三维捕获 (公式:  $F = F_g + F_s$ )。



### 2. 光阱力测量(流体力学法)

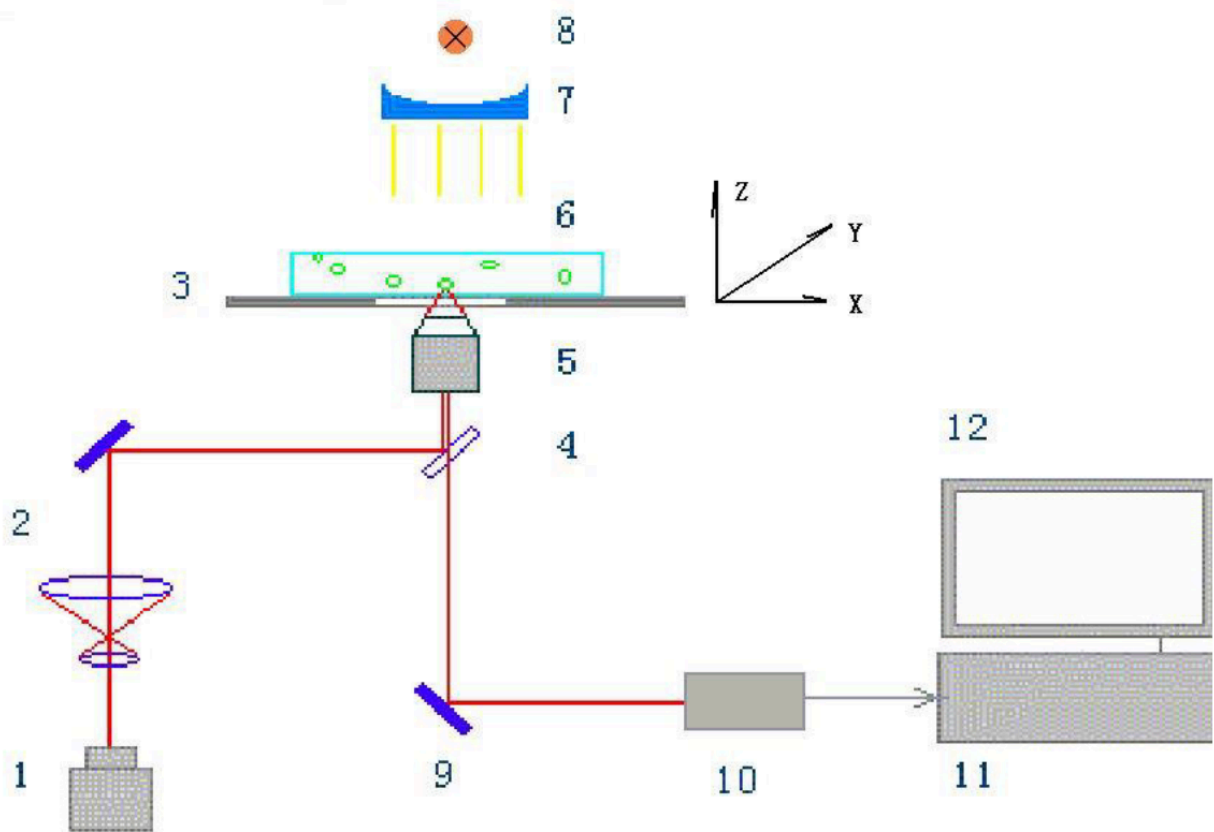
- 逃逸速度法: 微粒逃逸时粘滞阻力  $f_{\max}$  等于最大阱力  $F_{\max}$ , 计算公式:

$$F_{\max} = 6\pi\eta r V_{\max}$$

其中  $\eta$  为液体粘滞系数,  $r$  为微粒半径,  $V_{\max}$  为逃逸速度。

## 实验装置

- **核心组件:** 半导体激光器、光学耦合器、自动样品台、双色分束镜、高NA物镜 (NA=1.25)、CCD摄像头、计算机。
- **样品:** 聚苯乙烯小球 (1-3  $\mu\text{m}$ ) 或酵母细胞 (4-5  $\mu\text{m}$ )，悬浮于匹配折射率的液体中。



## 实验内容

1. **光陷阱效应:** 观察微粒被捕获至光阱中心的过程, 估算阱域范围。
2. **横向操控:** 移动样品台, 观察被捕获微粒相对于背景的静止状态。
3. **纵向操控:** 调节物镜焦距, 实现微粒轴向移动。
4. **最大阱力测量:**
  - 逐步增加样品台移动速度, 记录逃逸临界速度  $V_{\max}$ ;
  - 查表获取  $\eta$  (粘滞系数随温度变化), 代入斯托克斯公式计算  $F_{\max}$ 。

# 光的力学效应与皮牛力的测量

唐延宇\* PB22030853

2025 年 4 月 7 日

## 摘要

本实验利用光阱完成了对酵母菌微粒的捕获与操控,并实现了对于皮牛量级的光阱横向阱力的测量.通过实验,我们对激光的力学效应、激光的动量等物理内容有了更深刻的认识,也对这一技术在前沿物理以及其他交叉学科领域的应用有了一定程度的了解.

关键词: 光的力学效应; 光阱; 皮牛力测量

## 1 引言

### 1.1 实验目的

光与物质相互作用时,它们的动量交换产生力,表现为光压或光拉力.当今迅速发展的激光技术(如光镊技术)使微小粒子的精确操控成为可能,推动生物学、纳米技术和量子操控等多学科交叉应用.本实验的目标即为验证光具有动量,观察光镊捕获与操控微粒的现象,并测量光阱的最大捕获力.

### 1.2 实验原理

**光镊** 在强激光光场中,微粒会受到激光的作用力:

- 梯度力 ( $F_g \propto \nabla I$ ): 在非均匀光场中,微粒受到指向光强最大区域的力;
- 散射力 ( $F_s$ ): 光反射或折射作用在微粒上的推力,通常沿光传播方向;
- 当梯度力  $F_g$  大于散射力  $F_s$  时,可实现三维稳定捕获,表达式如下:

$$F = F_g + F_s. \quad (1)$$

---

\*近代物理系, 19942431972, [yanyutang@mail.ustc.edu.cn](mailto:yanyutang@mail.ustc.edu.cn)

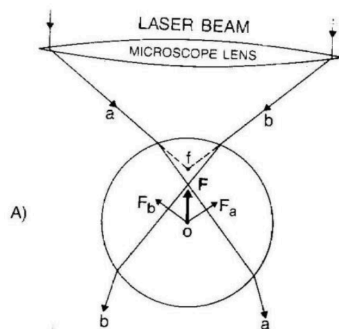


图 1: 光阱原理示意图

**光阱力测量（流体力学法）** 在液体介质中, 当微粒从光阱中逃逸时, 我们认为其所受粘滞阻力  $f_{\max}$  等于最大阱力  $F_{\max}$ , 即

$$F_{\max} = 6\pi\eta r v_{\max}, \quad (2)$$

其中  $\eta$  为液体粘滞系数,  $r$  为微粒半径,  $v_{\max}$  为逃逸速度.

### 1.3 光镊技术的前沿研究应用

光镊技术在多个领域有着广泛的应用, 主要包括:

- 生物医学:

- 研究单细胞力学特性, 探究细胞的变形能力;
- 捕获和操控细菌、病毒, 用于疾病诊断;
- 研究 DNA、蛋白质等生物大分子相互作用.

- 纳米操控:

- 通过光镊实现纳米颗粒的精确排列与装配;
- 研究胶体体系的动力学特性和相变行为.

- 量子光学与量子信息:

- 使用光镊冷却和操控单个原子, 研究量子力学基本原理;
- 在量子计算中, 利用光镊精确操控离子阱或中性原子, 进行量子比特操作.

## 2 实验装置与内容

### 2.1 实验装置

本实验用到的仪器主要如下

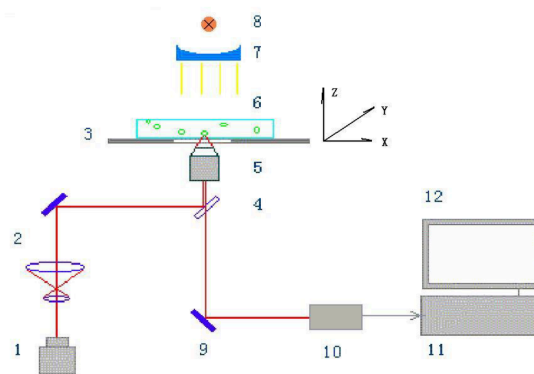


图 2: 实验光路示意图

- 光路相关: 半导体激光器、光学耦合器、自动样品台、双色分束镜、高数值孔径物镜 (NA=1.25)、CCD 摄像头、计算机;
- 样品: 聚苯乙烯小球 (1-3  $\mu\text{m}$ ) 或酵母细胞 (4-5  $\mu\text{m}$ ), 悬浮于匹配折射率的液体中.

## 2.2 实验内容

本实验主要内容为:

1. 观察微粒被捕获至光阱中心的过程, 估算阱域范围.
2. 移动样品台, 观察被捕获微粒相对于背景的静止状态.
3. 调节物镜焦距, 实现微粒轴向移动.
4. 最大阱力测量:
  - 逐步增加样品台移动速度, 记录逃逸临界速度  $V_{\text{max}}$ ;
  - 查表获取  $\eta$  (粘滞系数随温度变化), 代入斯托克斯公式计算  $F_{\text{max}}$ .

## 3 实验结果与数据处理

**阱域测量** 在实验中, 我们先将酵母菌移动到距离光阱中心一定距离的位置, 再缓慢逐步将酵母菌向中心移动, 直到某一位置酵母菌被光阱吸引. 我们分别记录下酵母菌被光阱捕获前与捕获后的位置坐标, 它们两点之间的距离

$$R = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

即为光阱的阱域范围半径. 具体在实验中, 我们测量了三组数据, 原始数据参见报告后附的原始数据表格, 对三次实验的结果取平均可得

$$R = \frac{78.23 + 90.14 + 89.07}{3} \times 60 \text{ nm} = 5.149 \mu\text{m}$$

即为本实验测得的光阱域半径的估计值.

**最大光阱横向力测量** 首先, 我们直接利用 CCD 相机的成像粗略估算酵母菌的半径, 具体方法为: 将酵母菌视为球体, 在其上寻找三组近似直径的两个端点, 从而

$$r = \frac{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}{2}$$

故有

$$r = \frac{23.12 + 21.05 + 25.46}{3} \times 60 \text{ nm} = 1.393 \mu\text{m}$$

之后, 我们利用微粒逃逸前两帧内酵母菌中心的距离除以两帧间的时间来计量微粒在光阱中的最大逃逸速度, 即  $v_{\max} = \frac{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}{t}$ , 同样重复实验三次取平均值, 有

$$v_{\max} = \frac{2.280 + 2.511 + 2.481}{3} \text{ ms}^{-1} \times 60 \text{ nm} \times 10^3 = 145.4 \mu\text{m/s}$$

如此, 根据 Stokes 公式, 最大光阱横向力可如下计算

$$F = 6\pi\eta r v_{\max} = 6\pi \times 1.055 \times 10^{-3} \times 1.393 \times 10^{-6} \times 145.4 \times 10^{-6} \text{ N} = 4.028 \text{ pN}$$

其中  $\eta = 1.055 \times 10^{-3} \text{ N/m}^2/\text{s}$  为实验室温度  $18^\circ\text{C}$  时对应的水的粘滞系数.

## 4 实验讨论（思考题）

### 4.1 光捕获微粒的原理及实验实现

**原理:**

- 光学镊子(Optical Tweezers)最核心的作用力是光的梯度力(gradient force). 当激光通过高数值孔径物镜聚焦后, 形成强烈的光强梯度, 介质微粒会被吸引到光强最强的区域, 从而实现捕获.
- 此外, 微粒还会受到散射力(scattering force), 该力主要沿着光传播方向, 通常会将粒子往远离光源的方向推. 但在稳定捕获时, 梯度力大于散射力并将粒子束缚在焦点附近.

**实验实现:**

- 使用高数值孔径(NA)的物镜(例如  $NA=1.2$  或  $1.3$  的油镜), 将激光光束强力聚焦.
- 将待捕获的微粒(通常悬浮在水或适当介质中)放置在聚焦区域, 通过显微系统观察.
- 微粒进入焦点附近后, 在合适的激光功率下, 即可实现对其的三维稳定捕获.

## 4.2 影响光捕获效果的因素

- **激光功率**: 功率过小, 捕获力不足; 功率过大, 可能造成样品受热或损伤.
- **微粒尺寸与折射率**: 微粒尺寸与光波长、折射率与介质的折射率差异越大, 梯度力越显著.
- **物镜数值孔径 (NA)**: NA 越大, 聚焦光斑越小, 光强梯度越大, 捕获能力越强.
- **光束模式**: 如高斯光束、Bessel 光束等, 不同模式对捕获稳定性和捕获范围有不同影响.
- **介质性质**: 溶液黏度、温度以及其他杂散光环境等也会影响捕获效率.

## 4.3 实现对 Z 方向的捕获及其力的来源

- 要实现对粒子在 Z 方向(光轴方向)的稳定捕获, 需要在轴向也具有较强的光强梯度.
- 对于高斯光束, 在焦点处形成三维光强分布, 轴向上光强也会迅速衰减, 从而在焦点前后形成较大的梯度力.
- 轴向捕获力通常来源于聚焦后的电磁场梯度(即与径向捕获相同的梯度力机制), 只是在光轴方向上与散射力竞争, 合力在某点为零并表现为稳定平衡位置.

## 4.4 若光阱同时捕获了两个球形微粒, 则这两个微粒最可能以什么形式排列, 为什么?

当光阱同时捕获两个球形微粒时, 它们最可能沿光轴方向(Z 轴)排列. 其主要原因如下:

- **光学梯度力作用**: 光场在焦点区域形成强烈的梯度力, 使得微粒受到指向光强最大区域的吸引力, 稳定在光轴附近.

- **散射力对齐效应**: 沿光传播方向, 光的散射力会推动微粒朝向同一方向排列, 形成稳定的链状结构.
- **光学双极作用**: 在强聚焦光场中, 光诱导的偶极相互作用使得微粒趋向能量最低的排列方式, 即沿光轴方向.

#### 4.5 光阱技术特点以及可能的应用

光阱技术特点:

- **非接触操控**: 利用光学力捕获微米级甚至纳米级粒子, 无需物理接触, 避免样品污染或损伤.
- **高精度控制**: 可以实现对单个微粒的三维操控, 精度可达纳米级别.
- **广泛适用性**: 适用于生物细胞、胶体颗粒、纳米材料等多种物质.
- **可结合光谱分析**: 可用于单细胞研究、动力学分析、分子识别等应用.

光阱技术应用领域:

- **生物医学**: 单细胞操作、DNA 操控、蛋白质相互作用研究等.
- **纳米技术**: 纳米颗粒的组装、材料表面修饰与精密操控.
- **流体力学**: 研究悬浮微粒在不同介质中的动力学行为.
- **量子光学**: 光镊技术可用于冷却和操控单原子、探索量子调控机制.

#### 4.6 环形光束与高斯光束在高数值孔径下的比较

在传统的高斯光束光阱中, 光强在焦点处达到最大值, 形成明显的光强梯度, 因而能在三维空间内产生较强的梯度力, 从而将微粒吸引至焦点. 然而, 采用环形(或空心)光束的光源, 其特点在于中心区域(距离轴心  $r$  内)光强为零, 环状区域具有较高的光强. 基于这种分布, 可以做如下定性分析:

- **优势**:
  - **低光学损伤及热效应**: 由于被捕获的粒子位于低光强区域, 受到的光照射较弱, 因此可显著降低因光吸收引起的局部加热和光化学损伤, 适用于对生物样品要求较高的实验.
  - **潜在的“暗区”捕获**: 环形光束可构造出一个暗陷阱, 利用周围较高光强区域形成的势垒来间接约束粒子, 适合于需要长时间稳定操控且避免光损伤的应用.



- 劣势:

- 梯度力较弱: 由于中心无光, 直接依赖环状高光强区产生的梯度力来捕获粒子, 捕获效能可能不如高斯光束那样直接、强烈, 尤其在捕获初期需要粒子进入环形区域时, 稳定性可能较低.
- 对准要求高: 粒子必须精确位于低光强的中心区域, 否则容易受到环状区域不均匀光场的扰动, 导致捕获位置偏移或逃逸.

因此, 相对于高斯光束光阱, 环形光束光阱在减少光损伤和控制光热效应方面具有一定优势, 但其捕获稳定性和梯度力的形成可能略逊一筹, 需要在具体实验设计中权衡使用.

## 4.7 实验中使用 100 倍油镜成像, 为何要滴油?

- **匹配折射率:** 油浸物镜需在物镜前端与载玻片或盖玻片之间使用与玻片材料(通常为玻璃)折射率相近的浸油, 以减少球差和其它像差.
- **提高分辨率:** 折射率匹配可使有效数值孔径增大, 从而提升显微成像分辨率和光学捕获效率.
- **减少光损失:** 若不滴油, 空气介质与玻片之间的折射率差会导致更多的光反射和散射, 影响聚焦质量.

## 4.8 激光关闭后酵母逃逸方向

在实验结束时, 当逐渐降低电流直至关闭激光后, 光阱中的捕获力随之消失, 此时酵母细胞因受到了外界力(如重力、粘滞阻力及微流动等)的作用而脱离光阱. 由于在光阱中通常存在较强的轴向散射力(沿激光传播方向), 该方向上原先构成了较深的势阱边缘, 一旦激光关闭, 势垒消失, 酵母会优先沿着原来散射力较强、势阱相对较弱的方向逃逸.

- 一般来说, 光阱的轴向(光传播方向, 即 Z 轴)捕获深度通常较横向(X-Y 面)要浅. 关闭激光后, 由于光阱的约束在轴向迅速消失, 酵母细胞更容易沿光轴方向逃逸.
- 此外, 实验中如存在重力作用, 若样品密度略大于介质, 则酵母细胞也倾向于沿重力方向(通常为竖直向下)运动. 但主要原因还是由于原有的散射力主要沿光轴起作用, 关闭激光后, 该方向上的势垒消失, 使得逃逸更容易发生.

综上所述, 激光关闭后, 酵母细胞更可能沿着光轴方向(通常也是重力方向, 如向下)逃逸. 同时, 由于液体介质的随机性扰动, 酵母菌仍有可能存在一定布朗运动特征.

## 5 实验收获与体会

本实验让我直观感受了光的力学效应, 观察了光阱对微粒的捕获与操控过程, 深入理解了光阱的工作原理和应用. 同时, 通过对实验数据的处理与分析, 我也提高了对实验数据的敏感度和分析能力. 实验中遇到的问题让我意识到细节的重要性, 例如在制备样品、调节物镜焦距、调节样品台位置时都需要小心谨慎, 否则便会影响实验结果. 此外, 实验还让我体会到了团队合作的重要性, 大家共同努力才能顺利完成实验. 在实验过程中, 我也对光阱技术在生物医学、纳米技术等领域的应用有了更深入的了解, 激发了我对前沿科学研究的兴趣.

## 参考文献

- [1] 中国科学技术大学物理实验教学中心. 光的力学效应与光阱皮牛力的测量实验讲义. url: <http://pems.ustc.edu.cn/>