

光的力学效应及光阱 PN 力的测量

摘要：利用光镊技术直观地演示了光的力学效应，介绍了光镊原理，装置和光阱力的测量方法。

一. 科学背景与实验目的

光具有能量和动量，光的动量是光的基本属性。携带动量的光与物质相互作用，它们间会有动量的交换，从而表现为光对物体施加一力，作用在物体上的力就等于光引起的单位时间内物体动量的改变。并由此可引起的物体的位移，速度状况的变化，我们称之为光的力学效应。

显然，研究光的力学效应对认识光的基本属性以及如何运用光的力学效应具有重要的学术意义。但是，由于单个光子动量很小，普通光源的力学效应微乎其微，人们研究光的力学性质受到了很大限制。历来的物理学教科书对光具有动量这一重要属性仅作简短的知识介绍，也一直没有一个合适的教学实验，来演示光具有动量这一基本属性，来展示光的力学效应和它的应用前景。从对光的认识和物理教学体系来讲这无疑是一个非常大的缺憾。

60 年代初激光的发明，使人类将光的利用推到一个崭新的阶段。有了激光这种高亮度的新光源，光的力学效应开始显示其强大的生命力。人们开始对光的辐射压力和光的力学效应进行全面和深入的研究。70 年代，朱棣文等人利用光压原理发展了用激光冷却和囚禁原子的方法，获得了 1997 年度诺贝尔物理学奖。这一研究成果也为荣获 2001 年度诺贝尔物理学奖的玻色—爱因斯坦凝聚方面的工作提供了有效的实验手段。与此同时，人们也在探索光对微小的宏观粒子的力学效应。1986 年，A. Ashkin 等成功地利用一束强汇聚激光束实现了对生物微粒的三维捕获。这一发明被形象地称为光阱或光镊。成了这一尺度范围的粒子特有的操控和研究手段。多年来，光镊不但在生命科学领域，在其它涉及微小宏观粒子的研究领域都取得了重要应用。A. Ashkin 本人也因为在光镊及光镊应用研究做出的巨大贡献而在 2018 年获得诺贝尔物理学奖的殊荣。

激光力学应用非常之广，涉及到物理、化学、材料、机械、生物、医药等领域。激光力学已成为多学科交叉的基础。利用光的力学效应，开拓学科交叉，也是 21 世纪跨学科研究的前沿领域。科学发展已赋予光力学新的内涵和意义，需要我们在教学中，进一步阐明光具有动量，光与物质相互作用会产生力学效应，以及这种力学效应的巨大应用前景。

光镊的发明为直观生动地演示光的力学效应提供了极好的手段。利用光镊技术建立演示和观测光的力学效应的实验，其目的就是阐明光力学原理，使学生亲自感受光的力学效应，加深对光有动量这一基本物理事实的认识，并对这一性质可能的应用有所体会。

学生们接触到了当今科技的最前沿领域中，开拓了同学们的思路和视野。

光镊是目前对微米量级粒子进行操控的最有效可行的手段之一，光镊技术已经应用于多种学科领域，前景广阔。因此这门实验值得推荐给不同学科的理工科大学生。各个学科将从其自身学科特点出发进行“激光力学效应”实验，学生在学习期间就可直接参与和感受交叉学科的实验研究。

二. 实验原理

1. 光镊——单光束梯度力光阱

光作用于物体时，将施加一个力到物体上。由于光辐射对物体产生的力常常表现为压力，因而通常称之为辐射压力或简称光压。然而，在特定的光场分布下，光对物体也可产生一拉力。从而有可能某种特定光场来形成束缚粒子的势阱。

我们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 。

首先考虑一束平行光与小球的相互作用。如图所示，当一束光穿过小球时，光在进入和离开球表面时会产生折射（黑粗线表示）。在图示的情形，入射光沿 Z 方向传播，即光的动量是沿 Z 方向的。然而，离开球的光传播方向有了改变，也即光的动量有了改变。图中画出了光束中代表性的两条光线 a 和 b 。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（图中的空心线）。与之相应的有力 F_a 和 F_b 施加在小球上。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。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。如图 1A 所示。

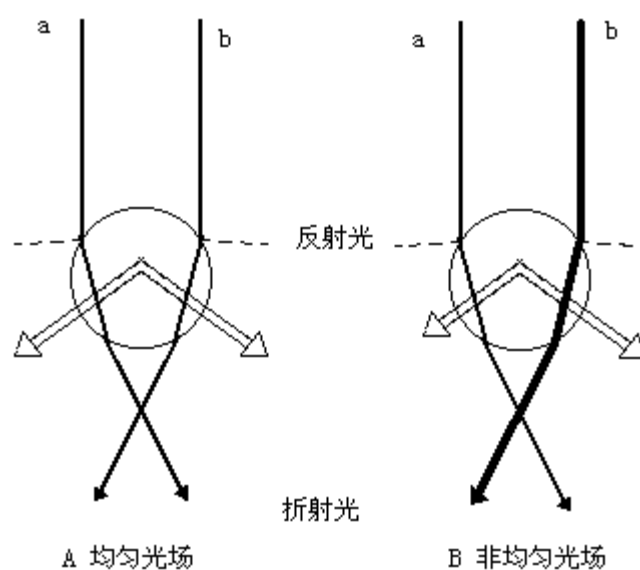


图 1 均匀光场与非均匀光场中的透明小球

如果小球处在一个非均匀光场中，例如（图 1B），沿 Z 方向传播，自左向右光强增大的光场。与左边的光线 a 相比，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（即强度分布存在梯度）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。

上面的情形，都存在一个轴向（ Z 方向）的推力。要用一束光同时实现横向和轴向（或纵向）的捕获，还必须要有拉力。实际上，上述光场力（梯度力）指向光场强度大的地方

这一结论，可以推广到更一般的光场强度分布的情形。

所谓光镊，即单光束梯度力光阱，就是由一束强会聚的激光束构成的。在这样的光场中，粒子（其折射率 n_1 大于周围媒质的折射率 n_2 ）将受到一指向光最强点（焦点）的梯度力。也就是说光对粒子不仅有推力还可以有拉力。这样，粒子就可能被约束在光最亮点附近。

图 2 显示了高度会聚的光束锥，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，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。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。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。

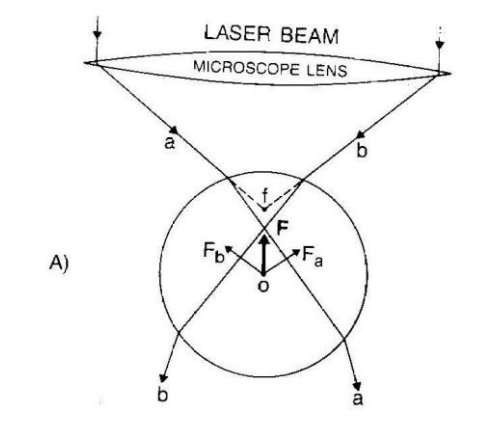


图 2 单光束梯度力光阱原理

综上所述，透明微粒在光场中受到的力包括梯度力和散射力 ($F = F_g + F_s$)。光阱主要是依靠光梯度力形成的。稳定的捕获是梯度力和散射力平衡的结果。散射力总是沿光线方向推跑微粒，而梯度力则是把微粒拉向激光的聚焦点处。

所谓的光镊其实是比拟宏观机械镊子对光的势阱效应的一种形象而通俗的描绘。所以当我们在研究光镊自身的物理性质时往往采用“光捕获阱”、“光梯度力阱”或“光学势阱”等物理术语。而在利用这一物理性质形成的一种技术手段或工具时，我们赋予它相应于机械镊子而又不失其本质的这样一个独特的命名——光镊。

3. 光阱力测量的流体力学法

光镊可以捕获和操控微粒，也可以测量作用在微粒上的力。光镊形成的势阱（光阱）的力学参数在实际应用中十分重要。特别是它的最大捕获力或最大阱力。

光阱力的测量方法大体上有二类：热运动位移法和流体力学法。由于流体力学法具有简单直观的优点，本实验采用了流体力学法。其基本原理如下：

光阱操纵微粒相对流体运动时，微粒将受到液体的粘滞阻力 f 。随着相对速度的增大，粘滞阻力 f 也随之增大。当速度超过一定的临界值，粘滞阻力 f 将大于光阱的最大束缚力 F ，粒子就要从这光阱中逃逸出来。所以最大阱力 F_{\max} 的测量是基于找出光阱操纵微粒所能达到的最大速度 V_{\max} ，即所谓的逃逸速度。光阱最大阱力 F_{\max} 的大小就等于这一速度下的粘滞阻力 f_{\max} ，但方向相反。在这一速度下的粘滞阻力 f_{\max} ，可由流体力学中的 Stokes 公式计算：

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

其中 η 为粘滞系数， r 为微粒的半径， V_{\max} 为逃逸速度。

三. 实验装置

图 3 为本实验所用装置（称之为激光力学参数测量装置）的示意图，包括一个作为光

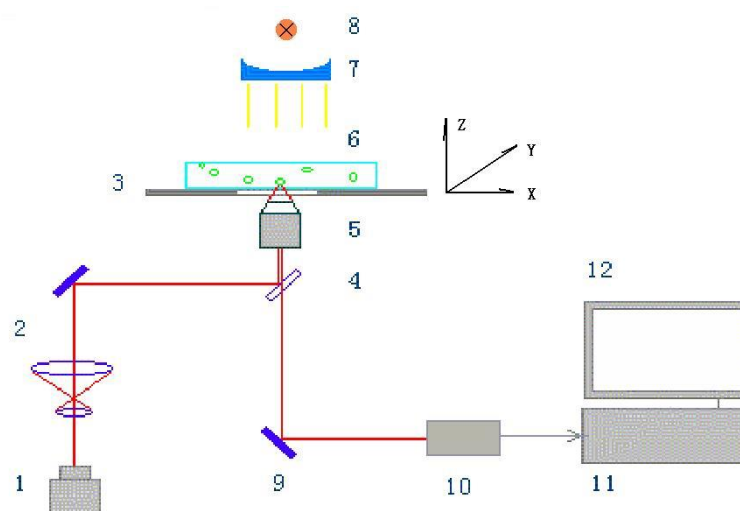


图 3 激光力学参数测量装置

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

镊光源的半导体激光器，显微镜，自动样品台，激光器与显微镜的光学耦合光路，以及一套观察和记录光阱对微粒的操作过程的实时监测系统。

由半导体激光发出的激光束，经过光学耦合光路扩束整形后，入射到双色分束镜上，被反射至物镜聚焦在样品池中形成光阱。捕获和操控过程的观察，类似于普通的显微镜。

照明光通过聚光镜照明样品池，池中的微粒被捕获和操控的图象经物镜后，透过双色分束镜，被反射镜反射到 CCD 数码摄像头，由显示器显示。也可通过目镜进行观察。数码摄像头获取的信息可以由计算机采集和处理。

实验中所用的样品有很大的挑选余地。只要对所用的激光吸收很小，折射率比周围液体的大，尺度在微米量级就可以。我们实验中用的是悬浮于液体中的 1-3 微米的聚苯乙烯小球或 4-5 微米的酵母细胞。

四. 实验内容

为了直观生动地显示光的力学效应，又能对阱力的大小有个数量上的概念。本实验安排了下列内容。

1. 光陷阱效应

光陷阱效应表现为当粒子靠近光阱中心，到一定距离时，就受到阱力的作用，被吸引到光阱的中心，也就是说粒子被光阱捕获了。实验中光阱在空间中是固定的，通过移动样品台，使视场中某个微粒接近光阱，观察光阱对粒子的捕获过程。记录粒子被光阱捕获前后的位置，可计算出阱域的大小，即光阱的作用力范围。图 4 中“十”字叉丝的中心为光镊的阱位（下同）。

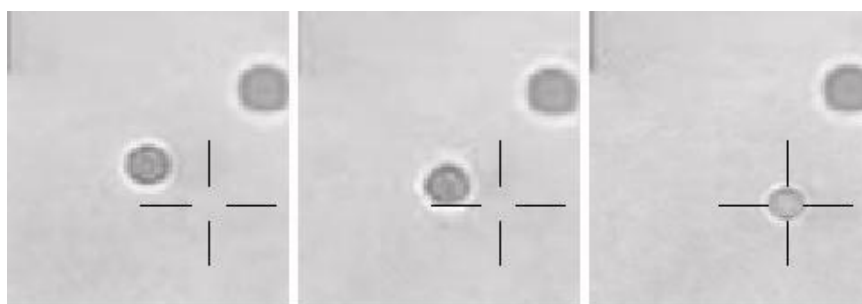


图 4 微粒陷入阱中的过程

2. 光镊在横向（X-Y 平面）操控微粒

如图 5 所示，光镊已捕获了样品池中的一个粒子。实验中固定光束（即光镊不动），沿 X-Y 平面移动样品台（池）。这时可以观察到背景的粒子也跟随平台相对光束移动，而被捕获的粒子不动，即实现了光镊操控小球的横向运动。

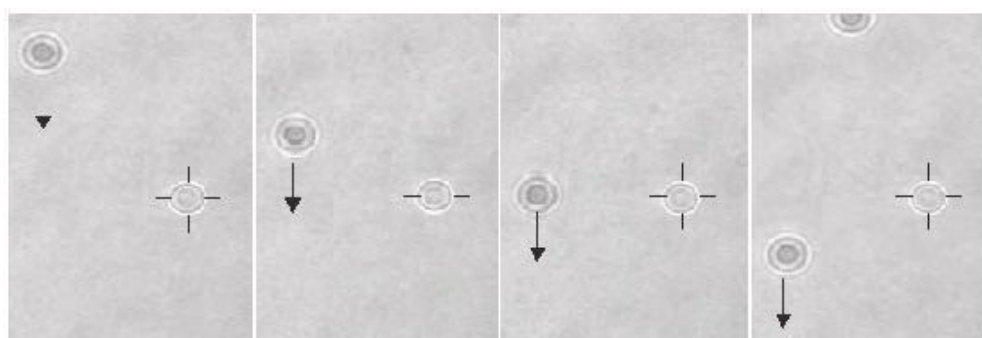


图 5 光阱横向操控微粒（图中箭头表示背景相对于光镊的运动方向）

3. 光镊在纵向（Z 轴方向）操控微粒

如图 6 所示，光镊捕获了一微粒。调节物镜与样品台的距离，也即改变了光阱在纵向的位置。这时被捕获的粒子也随之移动，因而它的像依然清晰，而背景中的粒子并不移动，这意味着它们偏离了成像清晰的平面，它们的图像就变得逐渐模糊了（图 6b）。这一现象表明光镊实现了对粒子的纵向操控。

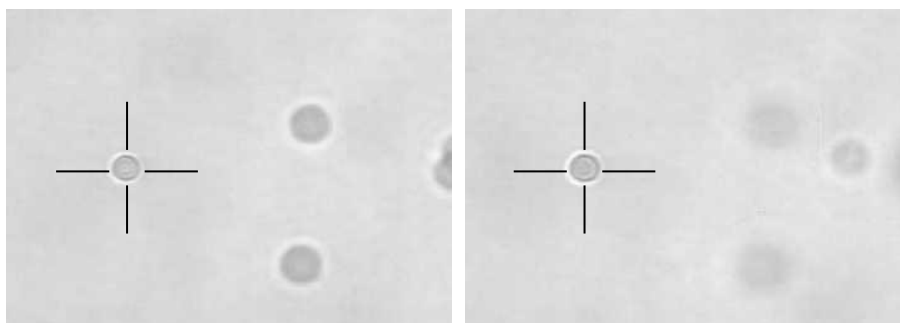


图 6 光阱纵向操控微粒（右图中背景清晰度与左图的不同）

4. 光镊最大横向阱力的测量

在相对静止的液体环境中，用光镊捕获一个微粒，并提升到离样品池底一固定高度处（参考图 4），然后用计算机控制样平台在水平面上产生定向运动（参考图 5），运动速度由计算机控制。刚开始平台以较小速度运动，如果微粒仍在光镊中处于被捕获状态，则逐步加大平台运动速度，重复上述操作。直到平台速度达到某临界值，微粒从光镊中逃逸出去，此时的平台运动速度即为逃逸速度。将它代入 Stokes 公式（见二.4 节），即可算得光镊的最大捕获力。粒子在光阱中受到的力与粒子偏离光阱中心的距离有关。原则上可以测量阱力与位移的关系。位移的测量对实验装置的要求较高，本实验只测量这个最大捕获力。

由于自动平台代价较高，本实验中也可采用手动平台。用手动操控平台的移动，直到粒子逃逸出光阱。用 CCD 摄像机，采集整个过程。用粒子逃逸前的二帧图像，测出样品池上某一固定点（可以是粘底的小球或池底上的污点）的位移，除以二帧间的时间间隔，也可粗测逃逸速度。该方法虽然精度低，但不失为一种直观方便的方法

五. 实验要求

实验预习

预习实验讲义，掌握显微镜原理、光捕获原理。了解实验设备及其各部件的性能用途及操作要求，以便正确安全使用。

本实验是由科研成果转化过来的，调研光镊的研究状况，光镊研究的特点。

实验步骤：

- (1) 配置样品。
- (2) 将样品注入样品池中，置于显微镜下。调节显微镜至 CCD 上清晰成像。
- (3) 开启激光，设定某一光强/电流值。使用光阱捕获样品中的一个微粒。记录捕获过程。计算阱域。
- (4) 操纵微粒横向运动。

- (5) 操纵微粒轴向运动。
- (6) 测量最大横向阱力。
- (7) 实验完毕整理仪器至初始状态。

查表得粘滞系数 η 。：根据斯托克斯公式求出阱力的大小。

粘滞系数与温度的关系

温 度 t °C	$10^3 \cdot \eta$ N/ m ² · s	温 度 t °C	$10^3 \cdot \eta$ N/ m ² · s	温 度 t °C	$10^3 \cdot \eta$ N/ m ² · s	温 度 t °C	$10^3 \cdot \eta$ N/ m ² · s
0	1.792	15	1.140	30	0.801	45	0.599
5	1.519	20	1.005	35	0.723	50	0.549
10	1.308	25	0.894	40	0.656	60	0.469

六. 思考题

- 1 光捕获微粒，基于什么原理，如何从实验上实现。
- 2 说明影响光阱捕获效果的因素。
- 3 试定性说明强会聚的光束对于实现 Z 方向捕获的作用。
- 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？
- 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。
- 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。
- 7 实验中，我们用 100 倍油浸物镜，为什么要滴油？
- 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？

参考文献

- [1] 李银妹编译， 楼立人 鲁润龙 审校《生命科学新技术—光镊原理、技术和应用》。
合肥：中国科学技术大学出版社，
1996
- [2] Ashkin A Dziedzic J M, Bjorkholm J E and Chu S. Opt. lett., 1986 , 11:288-290
- [3] Ashkin A Dziedzic J M. Science, 21, March 1975, 187:1073-1075
- [4] Bakker Schut T C, Hesselink G, de Grooth B G, and Greve J. Cytometry, 1991, 12: 479-485