



中山大學 物理与天文学院
SUN YAT-SEN UNIVERSITY SCHOOL OF PHYSICS AND ASTRONOMY

近代物理实验 II 实验报告

黄罗琳 戴鹏辉 杨舒云 丁侯凯

中山大学物理与天文学院，中国珠海市大学路 2 号，519082

珍重！

2025 年 6 月 17 日

E6：散射光成像实验

实验时间： 2025 年 5 月 30 日、6 月 6 日

实验地点： A102

环境信息： 室温 23°

实验人 1： 黄罗琳 22344001

实验人 2： 戴鹏辉 22344016

实验人 3： 杨舒云 22344020

实验人 4： 丁侯凯 22344009

指导老师 刘忆琨

注意事项

实验报告由预习、实验和分析与讨论三部分组成，并附封面页与附件。预习报告要求课前深入研读实验手册，掌握实验原理，熟悉仪器设备及其使用方法，完成实验思考题，并提前准备实验记录表（可参考实验报告模板打印）。实验记录需客观、详细地记录实验条件、现象及数据，须使用圆珠笔或钢笔书写并签名（铅笔记录无效）。原始记录必须完整保留，包括错误和修改内容，错误更正需按标准程序进行。实验记录不得录入计算机打印，但可扫描手写笔记后打印，实验结束前须经指导教师检查并签字。数据处理与分析环节需对原始数据进行处理（除以仪器学习为主的实验外），评估数据的可靠性和合理性，并以标准格式呈现（图表需编号并规范引用）。此外，还需分析实验现象，回答实验思考题，规范引用数据，并最终得出实验结论。实验报告需在实验结束后一周内提交（特殊情况不超过两周）。

特别说明

本实验报告模板基于 MIT License 许可协议进行分发和使用，使用本模板即表示您同意遵守相关条款。本模板由组内成员 pifuyuini 与 Jade Moon 共同开发，随着我们步入高年级阶段的近代物理实验课程，实验报告的书写要求也随之提升——不再局限于套用固定格式的模板，而是更加注重参考学术论文的结构与风格来完成实验报告，这也是本模板设计的初衷。因此，与基础物理实验课程中学院提供的“标准模板”相比，本报告在架构和行文风格上均作出了一定的调整。如本报告的格式或内容与老师或助教的阅读习惯存在差异，敬请谅解。

目录

1 预习报告	3
1.1 实验概述	3
1.2 实验用具	3
1.3 原理概述	3
1.3.1 点扩散函数 (Point Spread Function, PSF)	3
1.3.2 角度光学记忆效应 (Angular Memory Effect)	4
1.3.3 平移光学记忆效应 (Translational Memory Effect)	4
1.3.4 解卷积算法	5
1.4 前思考题	6
2 实验	7
2.1 实验系统搭建	7
2.2 数据处理原理	7
2.3 记忆效应范围测量	8
2.4 实验二：散射光成像的影响条件	10
2.4.1 旋转记忆效应	11
2.4.2 焦距的影响	12
2.4.3 工作距离	14
2.4.4 不同散射片	15
2.4.5 总结	16
3 附录	17
3.1 实验分工	17
3.2 个人签名	17
4 参考文献	17



预习报告

1.1 实验概述

本实验通过测量散射介质的点扩散函数和利用解卷积原理，定性探究散射光成像的机理。实验内容包括搭建几何光学成像装置、测量点扩散函数、采集未知物散斑，并利用维纳滤波等方法恢复图像，同时探讨光学记忆效应对成像恢复的影响。

1.2 实验用具

表 1：实验用具清单

编号	仪器用具名称	数量	主要参数（型号、规格等）
1	绿光 LED	1	作为光源
2	镂空板	1	作为成像目标物
3	散射片	4	0.5°, 1°, 5°, 10°
4	相机	1	用于记录图像
5	镜头	1	用于扩大视场

1.3 原理概述

1.3.1 点扩散函数 (Point Spread Function, PSF)

定义：光学系统的点扩散函数是指一个物面理想点光源通过光学系统后在像面上形成的三维光强分布。

物理意义：由于光的波动性（衍射效应）及光学系统的像差，物面上的理想点光源（可用 δ 函数描述）在像面上会形成有限大小的光斑。PSF 即为光学系统对点光源的脉冲响应函数，是评价光学系统成像质量的重要指标。

作用：在空间平移不变的非相干成像系统中，成像过程可表示为物体与 PSF 的卷积运算：

$$I_{\text{image}}(x, y) = O_{\text{object}}(x, y) * \text{PSF}(x, y)$$

通过测量 PSF 可以定量评估系统的分辨率、调制传递函数 (MTF) 等性能参数。在计算成像中，PSF 是图像复原的关键先验知识。

影响因素：

- ▶ 衍射极限： $\text{PSF}_{\text{diffraction}}(r) \propto \left[\frac{J_1(\pi r / \lambda F\#)}{\pi r / \lambda F\#} \right]^2$

- ▶ 几何像差（球差、彗差、像散等）
- ▶ 散射效应（介质不均匀性）

1.3.2 角度光学记忆效应 (Angular Memory Effect)

定义：当入射光在散射介质表面发生 $\theta \leq \lambda/(2\pi L)$ 的角度偏转时 (L 为散射介质厚度)，出射散斑图样不会完全重构，而是产生刚性平移的现象。该现象说明了散射系统在小角度扰动下仍保留了部分“记忆”。

物理机制：该效应源于散射介质中传播矩阵的统计特性。当入射角发生微小变化时，光在介质内部的传播路径仅发生微调，导致出射场的分布形状保持不变，仅平移而已。在数学上，出射场之间的相关性可以表示为：

$$C(\Delta\theta) = \langle E(\theta)E^*(\theta + \Delta\theta) \rangle \approx \text{sinc}^2\left(\frac{kL\Delta\theta}{2}\right)$$

其中， $E(\theta)$ 为入射角 θ 时的出射电场， $k = 2\pi/\lambda$ 为波数， $\langle \cdot \rangle$ 表示对不同散斑点的平均。该表达式表明，当 $\Delta\theta$ 足够小时， $C(\Delta\theta)$ 保持较高的相关性，即出射图样相似；而超过一定角度后，相关性迅速衰减。

记忆角度范围：该效应通常在角度偏转 $\Delta\theta \lesssim \lambda/L$ 的范围内显著。角度越小，记忆越强，平移特征越明显。

应用：

- ▶ **透过散射介质成像：**利用散斑图的角度记忆特性，在不知道介质内部结构的前提下，通过偏转入射角实现目标信息的重建，即记忆效应成像。
- ▶ **光学相位共轭：**结合角度记忆效应，可实现散射场的逆传播与波前重构，有助于散射环境下的光学自聚焦。
- ▶ **散斑自相关成像：**在 $\Delta\theta < \lambda/L$ 条件下，输出散斑的自相关函数包含目标物信息，可实现无透镜散斑成像。

1.3.3 平移光学记忆效应 (Translational Memory Effect)

定义：当入射光束在空间上沿横向方向发生微小平移时（而非角度偏转），在一定条件下，出射的散斑图样仍不会发生完全重构，而是随入射光束同步平移的现象，被称为“平移光学记忆效应”。

物理机制：该效应的存在依赖于散射介质中 ** 散射路径的空间相干性 **。当光束的横向位移 Δx 小于某一相关长度（即光束在介质内部的散射路径投影仍有显著重合）时，介质对入射波前的响应仍具有较强的保真性，因此出射散斑场的结构保持不变，仅发生横向平移。理论上，其相关函数可表示为：

$$C(\Delta x) = \langle E(x)E^*(x + \Delta x) \rangle \approx \text{sinc}^2\left(\frac{k\Delta x\theta}{2}\right)$$

其中， x 为入射位置， Δx 为空间平移， θ 为散射角度， $k = 2\pi/\lambda$ 为波数。

有效平移范围：有效的平移范围受限于入射光束的空间相干长度以及介质的厚度与散射强度。在高度多次散射的厚介质中，该效应通常不如角度记忆效应明显，平移范围较小。

应用：

- ▶ **光束扫描成像：**利用入射光的横向平移与出射散斑的对应平移关系，可以实现快速无透镜成像。
- ▶ **波前调控优化：**结合平移记忆效应与角度记忆效应，可用于提升波前优化算法对整个视场的泛化能力。
- ▶ **光学神经网络训练：**基于平移不变性的训练机制，可以提升系统对空间位移的鲁棒性。

1.3.4 解卷积算法

成像模型表示为：

$$I(x, y) = [O * \text{PSF}](x, y) + N(x, y)$$

其中 $N(x, y)$ 为加性噪声。

常见算法：

1. 维纳滤波：

$$\hat{O}(u, v) = \left[\frac{\text{PSF}^*(u, v)}{|\text{PSF}(u, v)|^2 + K} \right] I(u, v)$$

其中 $K = S_N(u, v)/S_O(u, v)$ 为噪声-信号功率比

2. Richardson-Lucy 算法（最大似然估计）：

$$O^{(k+1)}(x, y) = O^{(k)}(x, y) \left[\left(\frac{I}{\text{PSF} * O^{(k)}} \right) * \text{PSF}(-x, -y) \right]$$

3. 稀疏约束解卷积：

$$\min_O \|I - \text{PSF} * O\|_2^2 + \lambda \|\Psi O\|_1$$

Ψ 为稀疏变换（如小波、TV 正则化）

实验注意事项：

- ▶ PSF 标定需使用亚分辨率荧光微球（直径 $< \lambda/2\text{NA}$ ）
- ▶ 信噪比 (SNR) 需大于 20dB 以保证解卷积稳定性
- ▶ 需考虑光学系统的空间变化性（非均匀 PSF）

1.4 前思考题

Reflection Question 1.1:

为什么只有在记忆效应范围内才能恢复成像？

光学记忆效应之所以存在有效范围限制，本质上是由散射介质中光传播的波矢相关性决定的。当入射光角度变化在 $\theta \leq \lambda/(2\pi L)$ 范围内时（ L 为散射介质厚度），散射介质传输矩阵的本征模式仍保持较强的空间相关性，使得出射光场与入射光场之间维持确定的线性变换关系。这一特性保证了光学系统点扩散函数（PSF）的空间平移不变性，从而使成像过程可表示为物函数与 PSF 的卷积运算，这是所有解卷积算法得以适用的数学基础。

一旦超出该角度范围，多重散射导致的相位积累 $\Delta\phi \sim kL\theta^2$ 将超过 π 弧度，使得传输矩阵的不同本征模式之间完全解耦。此时散斑图样会发生本质性改变而不仅是刚性平移，破坏了 PSF 的空间不变性，卷积模型不再成立。此外，从信息论角度看，超出记忆效应范围后，散射过程引入的熵增使系统信道容量急剧下降，导致物体信息被不可逆地淹没在噪声中。实际成像还受光学系统数值孔径的限制，有效视场 $FOV \approx \lambda/(2NA)$ 需与记忆效应范围匹配，才能保证在可恢复区域内既有足够的光学信息量，又能维持准确的卷积关系。

Reflection Question 1.2:

请简述卷积定理。

卷积定理指出，两个函数在时域（或空域）中的卷积等价于它们在频域中的乘积，反之亦然。具体表述为：

设 $f(x)$ 和 $g(x)$ 是两个可积函数，其傅里叶变换分别为 $F(\omega)$ 和 $G(\omega)$ ，则它们的卷积 $h(x) = (f * g)(x)$ 的傅里叶变换 $H(\omega)$ 等于各自傅里叶变换的乘积：

$$H(\omega) = F(\omega) \cdot G(\omega)$$

反之，两函数在时域中的乘积的傅里叶变换等于它们各自傅里叶变换的卷积：

$$\mathcal{F}\{f(x) \cdot g(x)\} = F(\omega) * G(\omega)$$

数学体现：

- ▶ 空域卷积： $I(x, y) = O(x, y) * \text{PSF}(x, y)$
- ▶ 频域乘积： $\mathcal{F}\{I\} = \mathcal{F}\{O\} \cdot \mathcal{F}\{\text{PSF}\}$



实验

2.1 实验系统搭建

本实验根据几何光学成像原理搭建光路系统，具体步骤如下：

1. 器件安装与距离设置 将绿光 LED、镂空板、镜头、相机依照几何光学成像装置的基本结构安装在面包板上。
 - ▶ LED 与镂空板间距为 38.5 cm
 - ▶ 镜头前端距离镂空板为 68 cm
 - ▶ 镜头光圈设置为 F5.6，焦距约为 70 mm
2. 成像调焦与散斑引入
 - ▶ 移除散射片，设置镜头光圈为 F5.6，并调节视场至最小（即放大率最大）
 - ▶ 关闭 LED 光源，调节镜头对焦环，使显示屏中的字母清晰成像
 - ▶ 打开 LED 光源，插入 1° 散射片
3. 调节放大率调节镜头的放大率环，使字母图像刚好被散斑覆盖。完成此步骤后，LED、镂空板、镜头和相机的位置不再调整，系统搭建完成。

2.2 数据处理原理

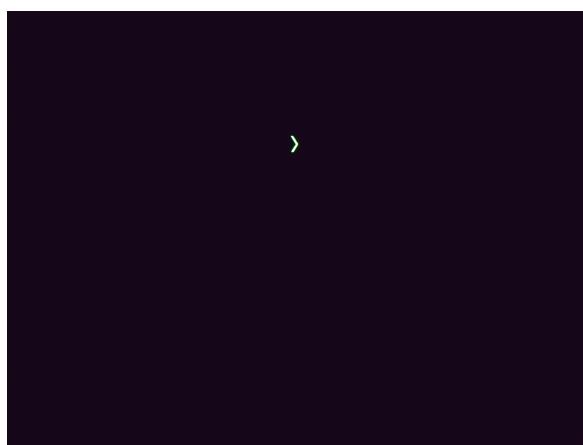


图 1：参考物

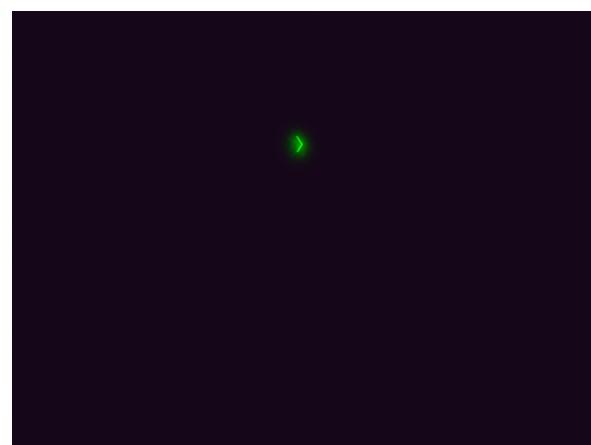


图 2：参考散斑



图 3: 图像对比图

我们首先将字母遮挡一半，作为参考物（图 1）和参考散斑（图 2），用于求解点扩散函数；随后去掉遮挡，作为我们的未知物散斑，并使用刚刚求解的点扩散函数进行图像重建（图 3）。

2.3 记忆效应范围测量

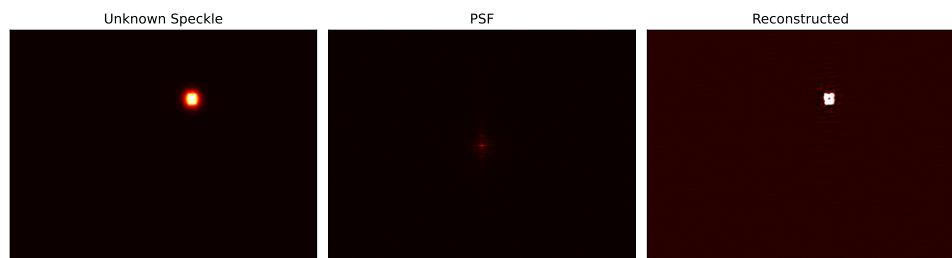


图 4: -4mm 图像对比图

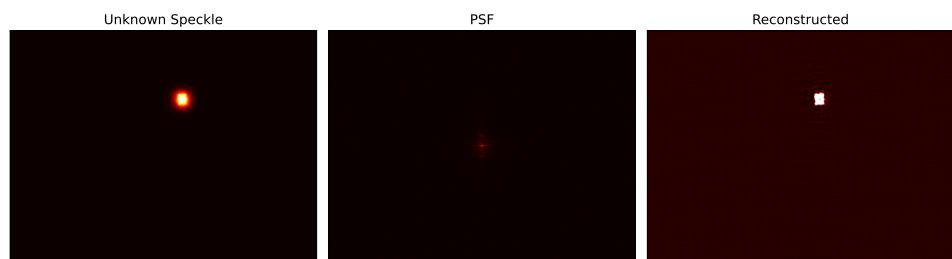


图 5: -3mm 图像对比图

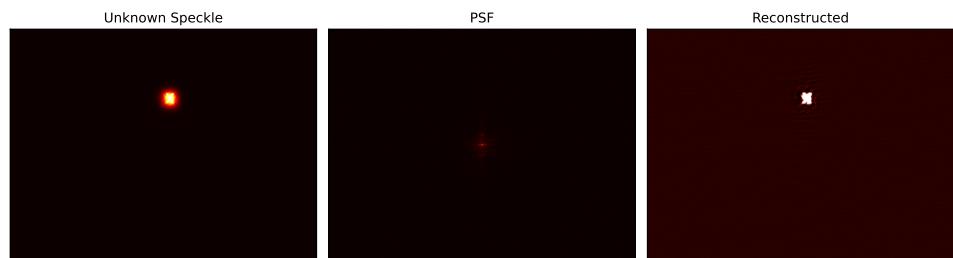


图 6: -2mm 图像对比图

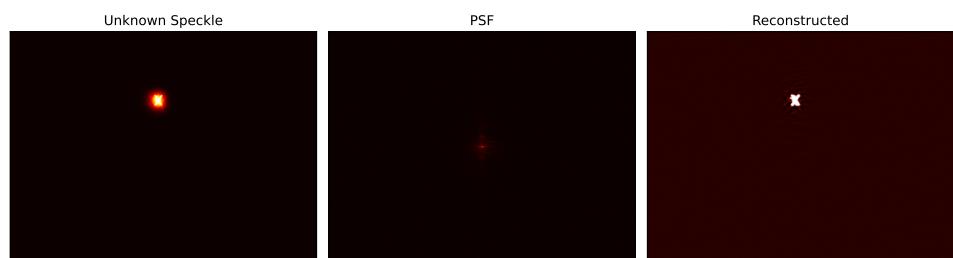


图 7: -1mm 图像对比图

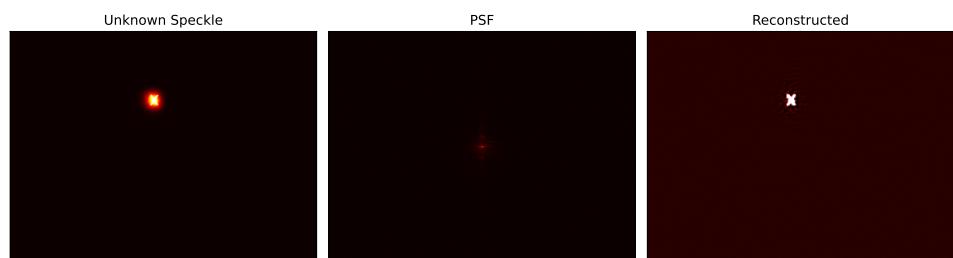


图 8: 0mm 图像对比图

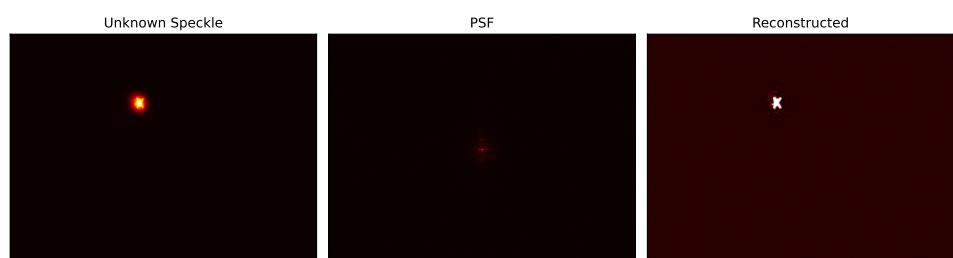


图 9: +1mm 图像对比图

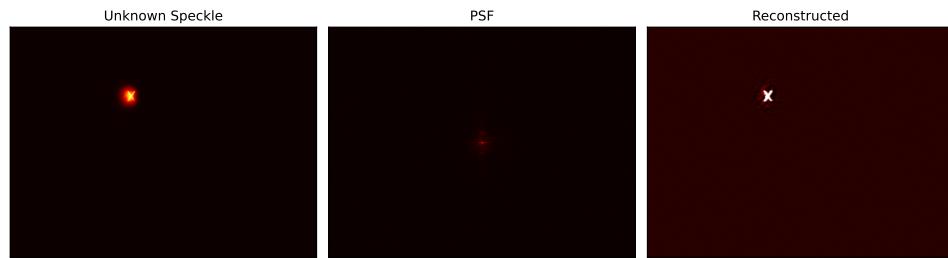


图 10: +2mm 图像对比图

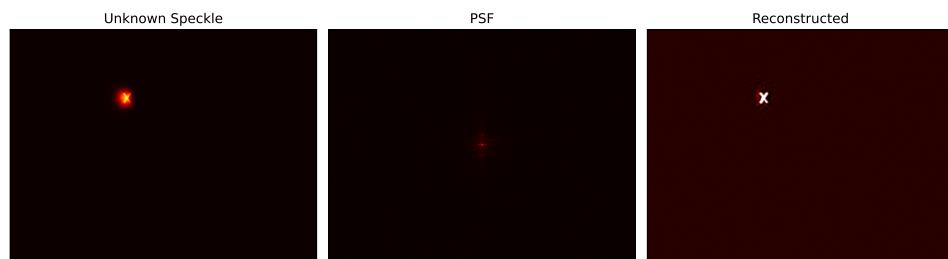


图 11: +3mm 图像对比图

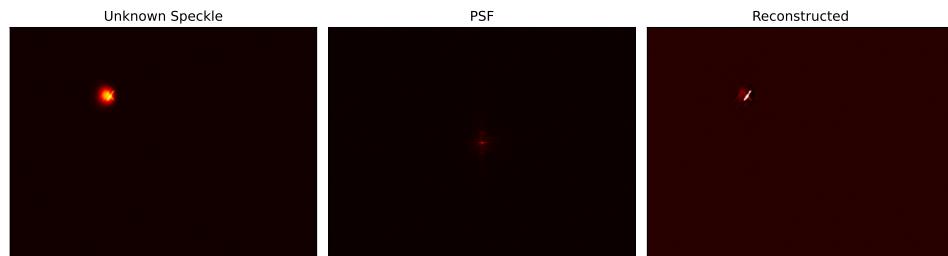


图 12: +4mm 图像对比图

在记忆效应范围测量实验中，我们将字母板左右平移，分别测量不同位置的散斑，并使用未平移时所求解的点扩散函数进行图像重建，结果如（图 4–图 12）所示。

观察重建图像的效果可知，在平移范围在 ($\Delta x \in (-1, +3)\text{mm}$) 内，图像重建效果均较好，说明该光学系统的记忆效应范围大约为 ($\pm 2\text{mm}$)。

但是我们发现，该记忆效应范围区间没有关于 0 对称，这是因为我们的字母在“0mm”位置时并不在光轴上。

2.4 实验二：散射光成像的影响条件

2.4.1 旋转记忆效应

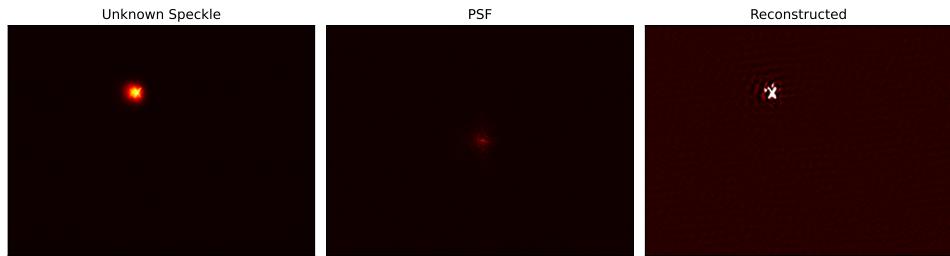


图 13: 大角度旋转图像对比图

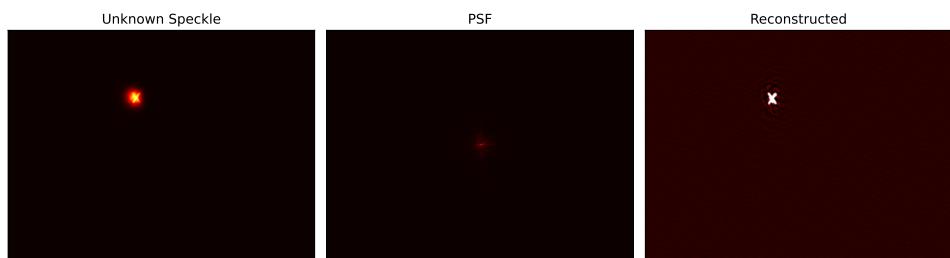


图 14: 小角度旋转图像对比图

旋转记忆效应是指当散射片绕垂直于光传播方向的轴发生微小旋转时，出射散斑图不会完全改变，而是整体发生旋转，保持一定的空间相关性。在实验中轻轻旋转散射片时图像仍能重建，说明系统处于旋转记忆效应有效范围内；但若旋转角度过大，相关性丧失，重建将失败。因此，适度旋转下的成像稳定性体现了散射系统的旋转记忆能力。

根据实验结果来看，小角度和大角度均可以分辨出图像，但是从效果上来看，小角度的成像效果是优于大角度的。

2.4.2 焦距的影响

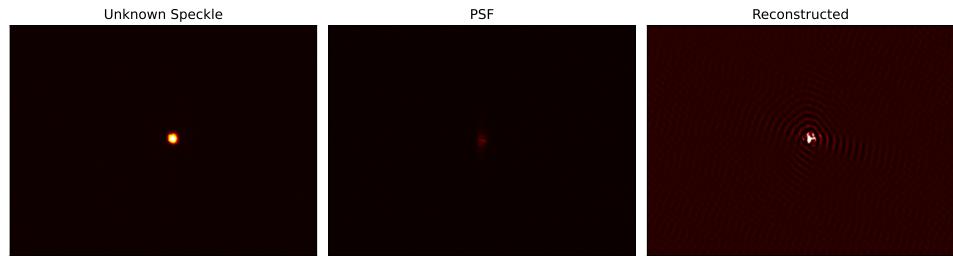


图 15: 工作距离 50cm-焦距 18mm 图像对比图

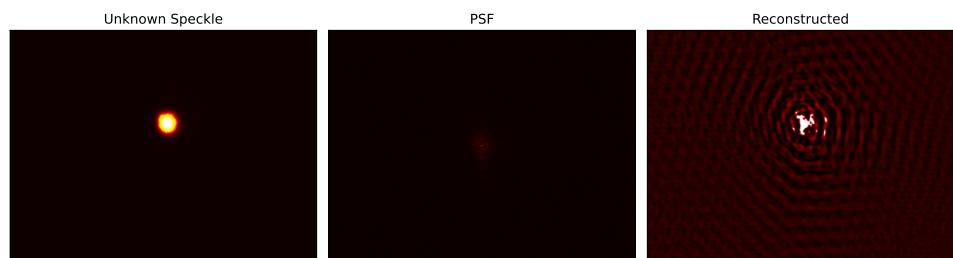


图 16: 工作距离 50cm-焦距 40mm 图像对比图



图 17: 工作距离 50cm-焦距 108mm 图像对比图

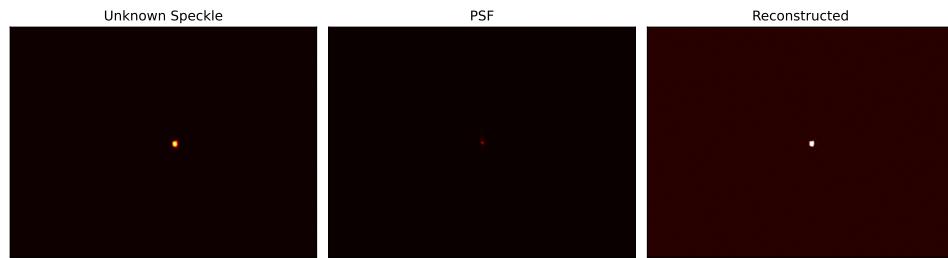


图 18：工作距离 68cm-焦距 18mm 图像对比图

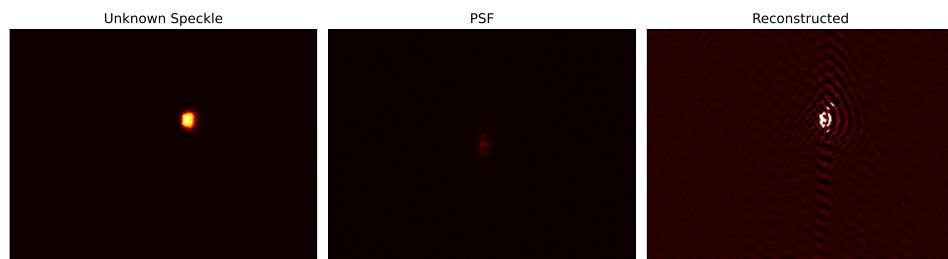


图 19：工作距离 68cm-焦距 40mm 图像对比图

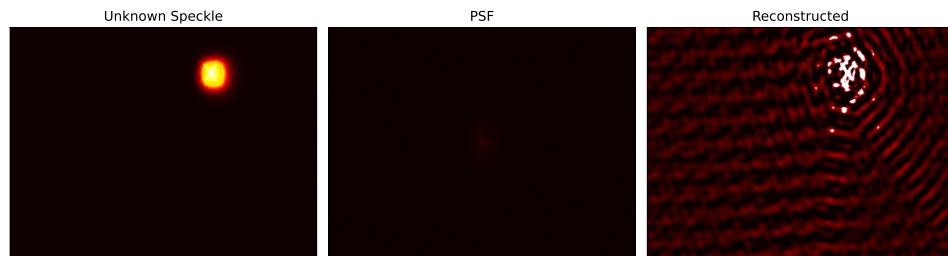


图 20：工作距离 68cm-焦距 108mm 图像对比图

镜头焦距决定了成像系统的放大倍率和视场大小，从而影响对散斑图的采集能力。在散射光成像中，较短焦距提供较大的视场和更高的光通量，有助于获取完整的散斑图结构，但角度分辨率较低，不利于微小扰动下的成像重建；而较长焦距则提高了角度分辨率和对细节的敏感性，使记忆效应下散斑图的微小位移更加明显，有利于图像恢复，但光强降低、视场变小，对系统稳定性要求更高。因此，焦距的选择需在视场范围、分辨能力与信噪比之间权衡，以获得最佳重建效果。

观察我们的数据可知，我们选择不同的焦距均没有成功重建图像，主要是因为在改变不同实验条件时，没有调整为共轴。

2.4.3 工作距离

► 第一次实验

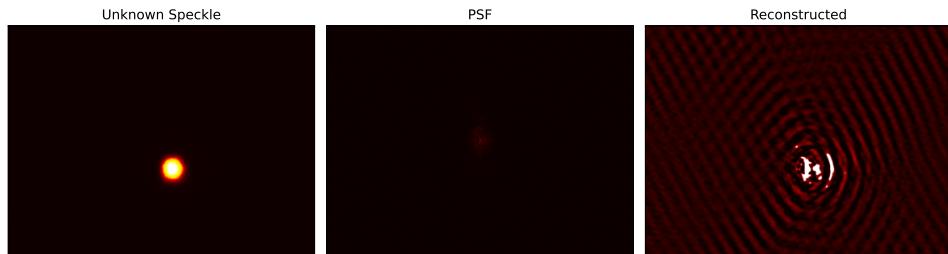


图 21: 工作距离 50cm 图像对比图

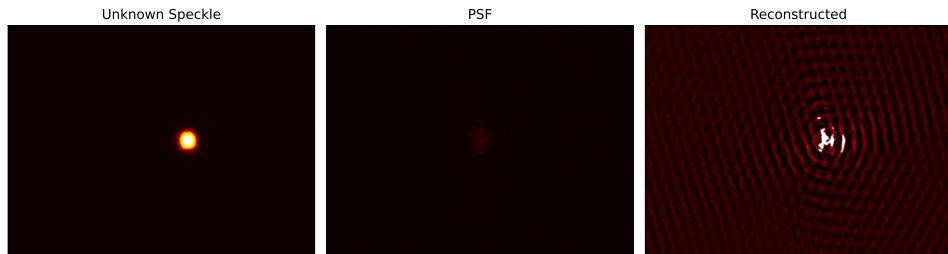


图 22: 工作距离 60cm 图像对比图

根据实验图像来看，均无明显的较好效果。分析原因后，我们发现主要是两个原因导致重建失败，一个是“图像过曝”，导致高频的信息缺失；一个是整个光路未对齐，导致出现像差，使得散斑所携带的信息被识别成了噪声。

之后我们重新调整了光路，重新测量了这部分实验内容，见后。

► 第二次实验



图 23: 工作距离 50cm 图像对比图

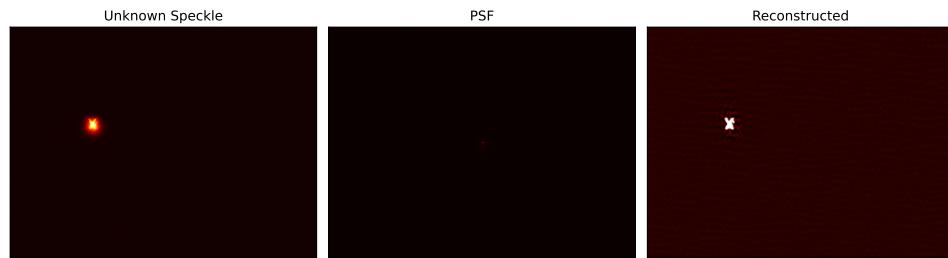


图 24: 工作距离 55cm 图像对比图

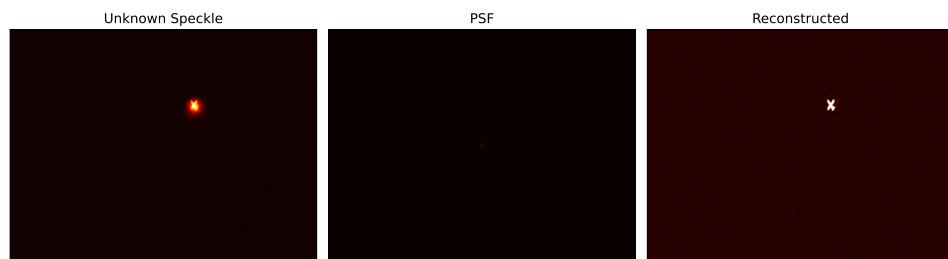


图 25: 工作距离 60cm 图像对比图

理论上，工作距离决定了系统对散斑图的角度分辨能力和信噪比，从而显著影响图像重建效果。距离过短时，角度扰动引起的散斑位移不明显，难以利用记忆效应重建图像；而距离过长虽可放大角度响应，有利于记忆效应的利用，但信号衰减严重，噪声上升，系统更易受干扰。因此，应在角度灵敏度与信噪比之间取得平衡，选择适中的工作距离以获得最佳重建效果。

由我们的实验结果可知，在我们的实验条件下，工作距离范围较大，在 $(L \in (50, 60)\text{cm})$ 的范围内均能够重建图像。

2.4.4 不同散射片

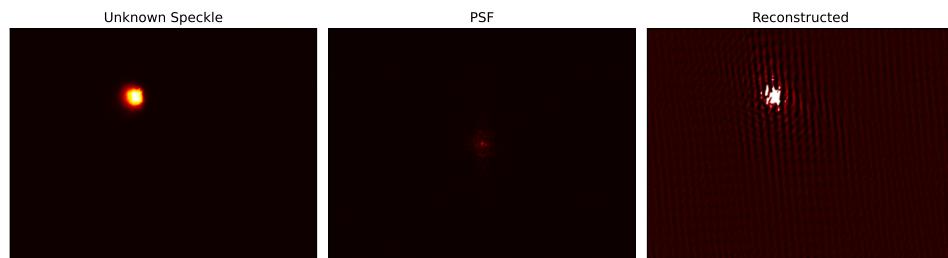


图 26: 0.5° 散射片图像对比图



图 27: 5° 散射片图像对比图



图 28: 10° 散射片图像对比图

在本实验中，我们通过更换不同度数的散射片，探究不同条件对散射光成像的影响。

可以看到，在实验一中，我们使用 1° 的散射片进行相关测量，能够成功重建图像；在此实验中，我们更换了 0.5°、5°、10° 的散射片，均不能成功重建图像。

对于 5°、10° 两种散射片，其散射过强，入射光经过大量多次散射，路径混合，所以微小角度或位移改变不会导致出射场的规律性移动，而是完全重构，导致出射光场中不再保留可用于重建的信息；对于 0.5° 的散射片，我们认为其被过度使用导致其实际散射效果超过标称的 0.5°，导致重建失败。

2.4.5 总结

本实验通过改变旋转角度、焦距、工作距离及散射片种类，分析了不同条件对散射光成像效果的影响。

结果表明：轻微旋转散射片仍能保持较高的散斑相关性，图像可重建，体现了旋转记忆效应；适当焦距有助于平衡视场和角度分辨率，提升成像质量；合适的工作距离可增强角度扰动对散斑的响应，利于图像恢复；而散射角过大将破坏图像重建条件，1° 散射片在保持足够散斑特征与空间相关性的同时，实现了较好的重建效果。