

复杂结构的衍射

DIFFRACTION OF SOPHISITICATE STRUCTURES

2023春光学小论文答辩

汇报人: 胡珈豪

目录

CONTENTS

01 二维结构

02 三维结构

03 算法原理

04 总结与展望

Part 01

第一部分

二维复杂结构 的衍射

设计、制作或采集复杂结构，
研究其衍射与干涉特点



复杂结构的衍射



核心问题



研究什么样的**复杂结构**?

如何实现复杂结构的衍射?

如何定义复杂结构?

如何实现实验结果图?

如何设计复杂结构?

如何实现仿真模拟图?



规律

研究什么样的复杂结构？

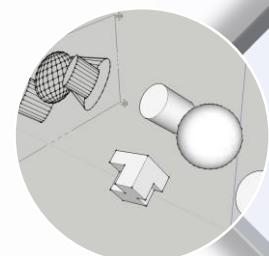


复杂结构的定义

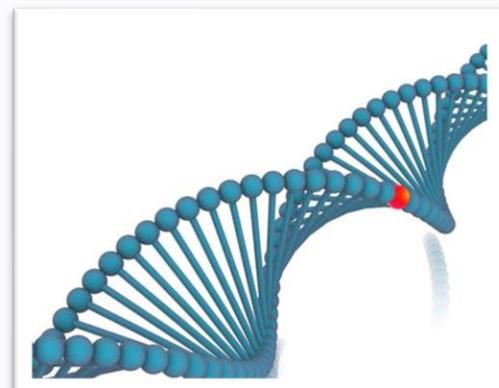
在某种意义上体现出**重复性，相似性**的非常规结构



人为设计



三维的结构



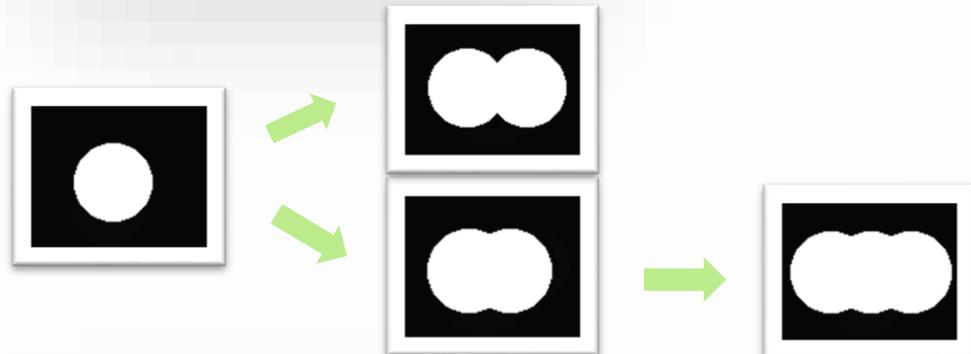


基础设计

-- 设计不同操作、操作的复合

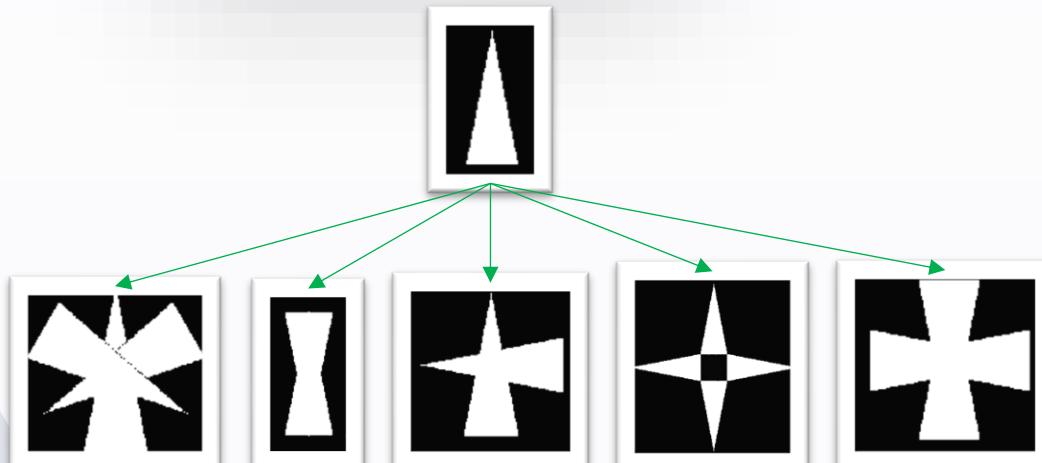
★ 设计一：平移

图像与其复制在中心连线上平移



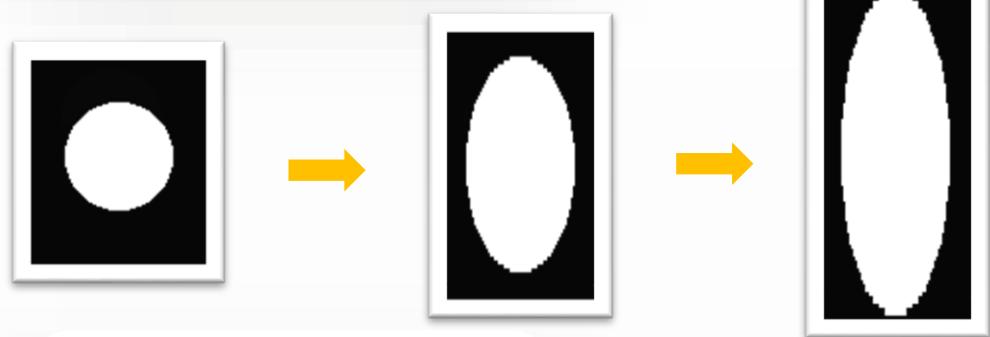
★ 设计二：旋转

将某种图形进行一定角度的旋转，再按某种组合放置



★ 设计三：拉伸

在某一方向上以一定比例拉伸/压缩图像



★ 设计四：残缺

挖去一定角度扇形区域中的图案





设计的组合

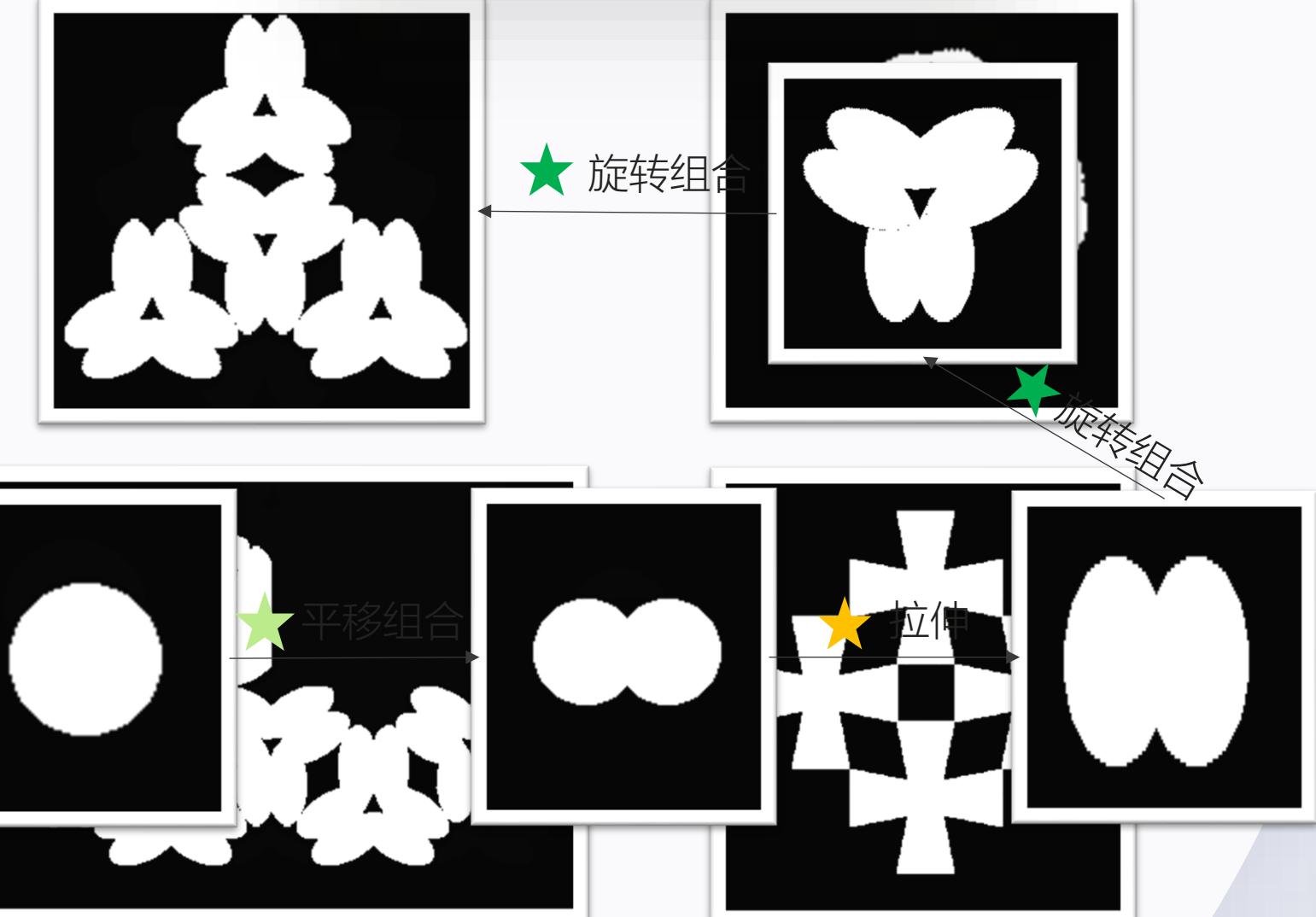
★ 设计的组合



复杂
结构



化简为繁 从常规到复杂



如何实现复杂结构的衍射?



可行的两种方案

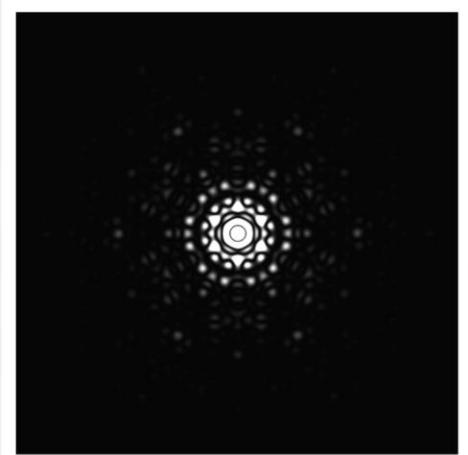
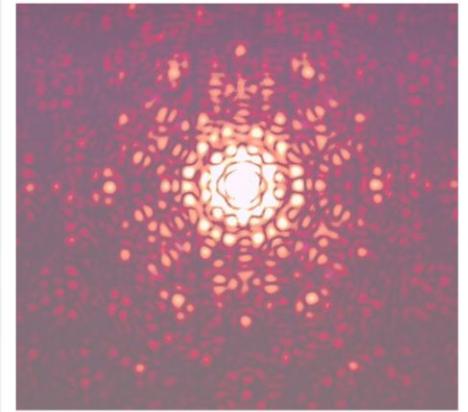
本部分讲解实验部分，模拟分析等单独放在最后一部分



设计实验



模拟分析

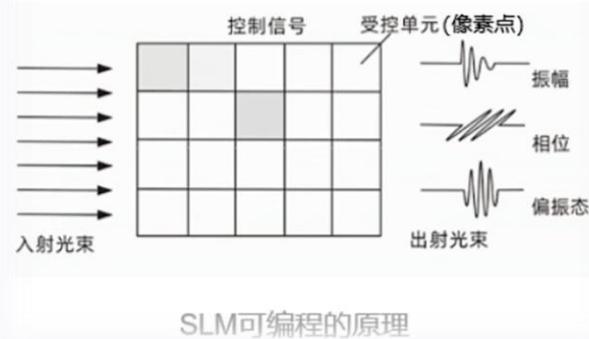
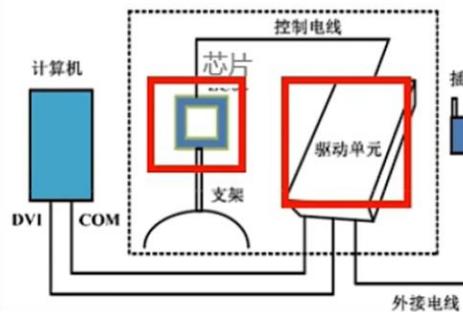


空间光调制器

关键实验器件

空间光调制器

原理：利用液晶的**双折射效应**，线偏振光在液晶中分为传播速度不同的O光和E光，在出射方向重新合成的偏振态取决于O光与E光的相位差，相位差可以通过像素**电压**实现**调控**，在出射方向放置偏振片，根据**马吕斯定律**可以实现对振幅的调节



相关参数

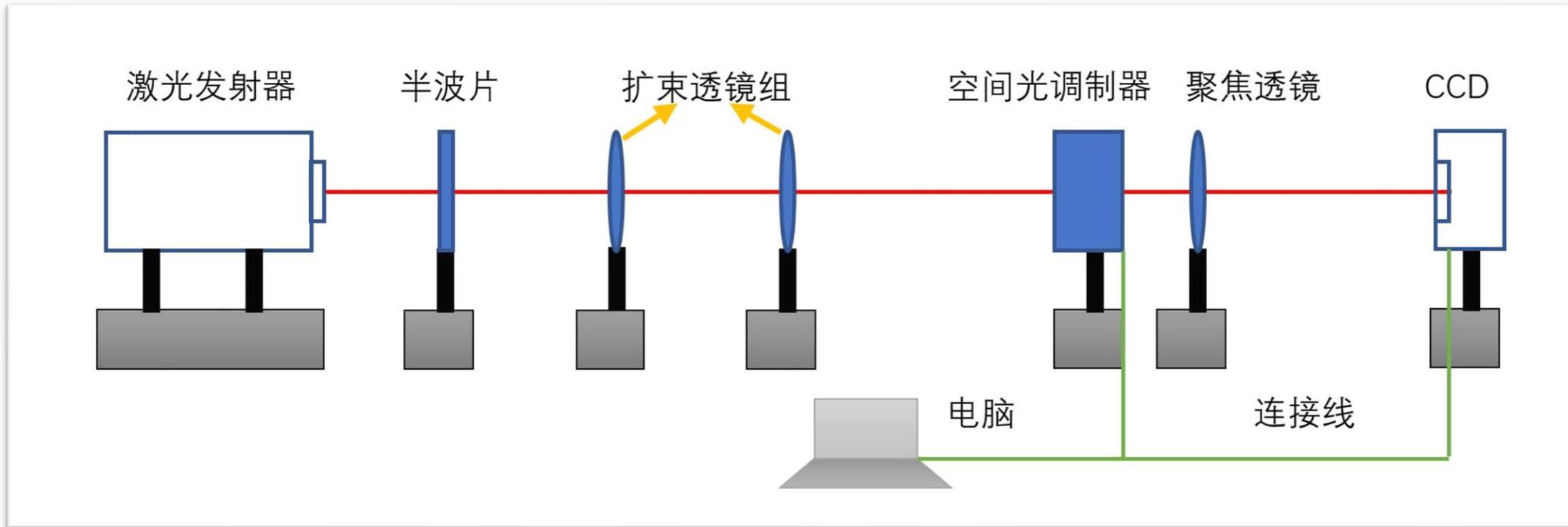
像元大小: 8.5um

有效区域: 16.3mm x
9.18mm

刷新频率: 60Hz

空间光调制器分辨率:
1920x1080

实验设计

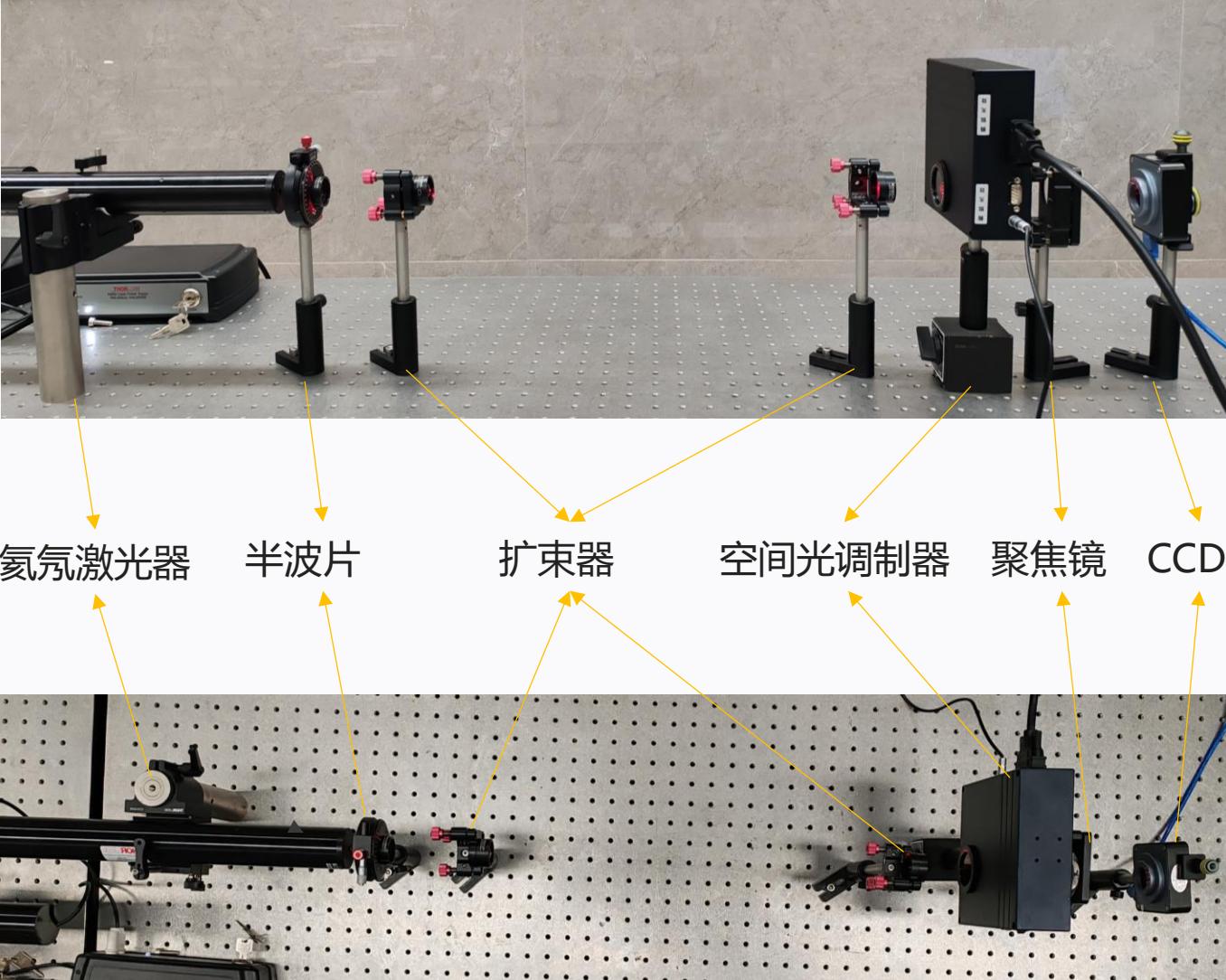


激光源 → 半波片 → 扩束器 → 复杂结构 → 聚焦镜 → 接收器

$$I(\theta) \propto \left| \int_{\Sigma} U(x, y) e^{ik(r \sin \theta)} dS \right|^2$$

电脑

实验装置



复杂结构的干涉衍射实验

仪器清单

仪器清单

图片	仪器名称	规格、成本 性能指标	图片	仪器名称	规格、成本 性能指标
	激光发射器	额定电流: 6.0mA 成本: 2000		CCD摄像机	画面: 1080p*60fps 成本: 500
	振幅型空间光调制器 (全套)	成本: 5000		可升降载物平台	升降范围: 63~120mm 成本: 100
	半波片	成本: 20		单弹簧 (中性笔) 若干	倾角: 8.0° 外径: 4.2mm 成本: 4
	透镜组	成本: 100		光屏	尺寸: 150*150mm 成本: 50

成本合计:7772 (元)

理论实验对比



形状

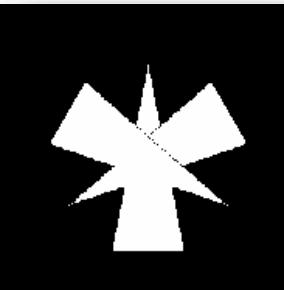
理论分析图与实验结果图在
极大分布方面**相似度较高**

光强

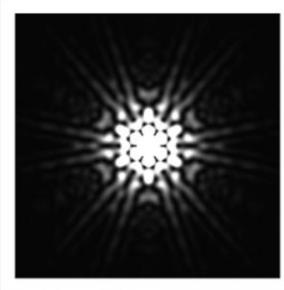
结构**较小时**
实验结果图光强衰减较快

结构**较大时**
理论分析图光强衰减较快

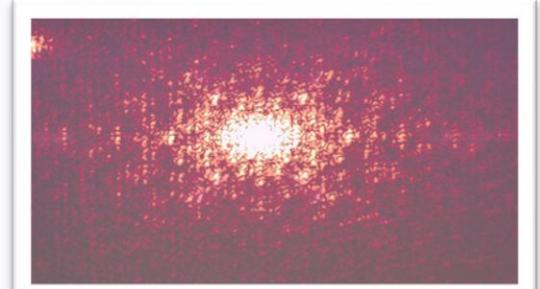
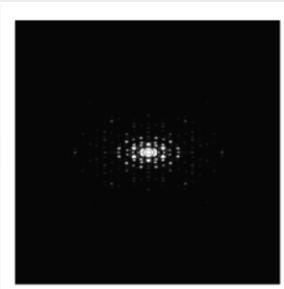
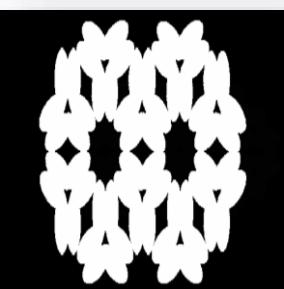
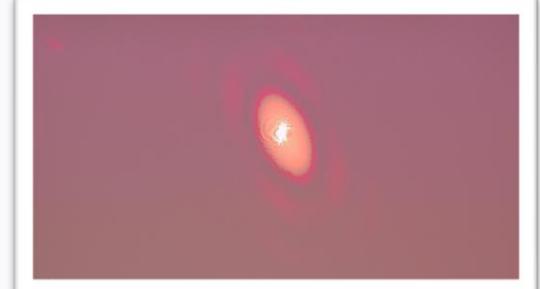
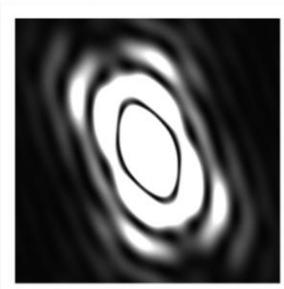
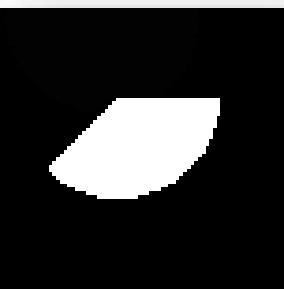
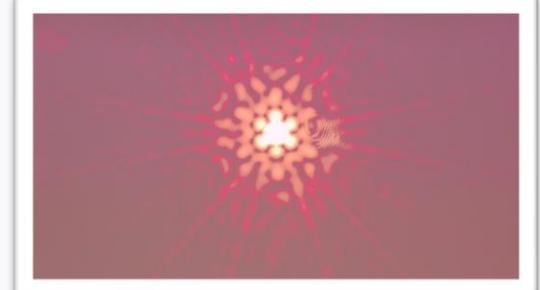
复杂结构



理论分析图



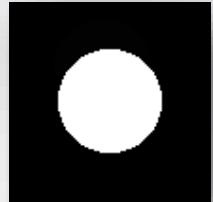
实验结果图



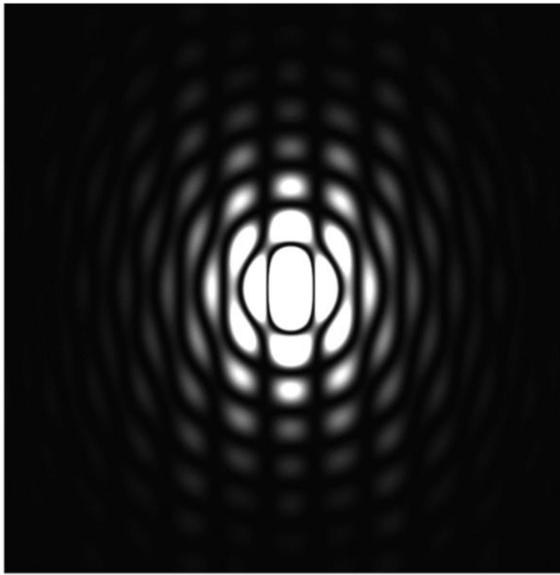
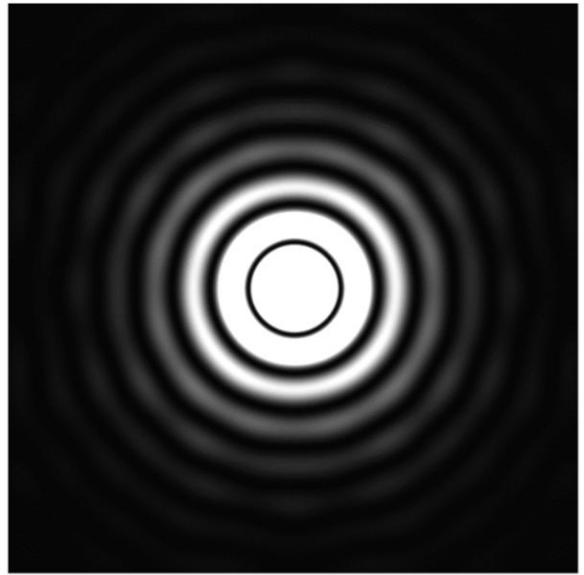
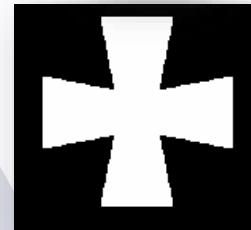


规律探索

★ 平移



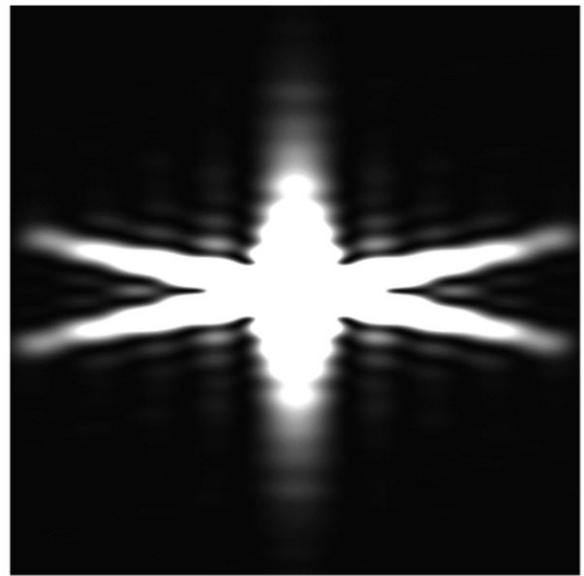
★ 旋转



纵向的**干涉条纹**

倾斜到竖直

光强分布**更不集中**

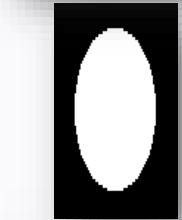
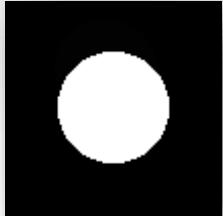


体现出旋转的
角度与组合方
式

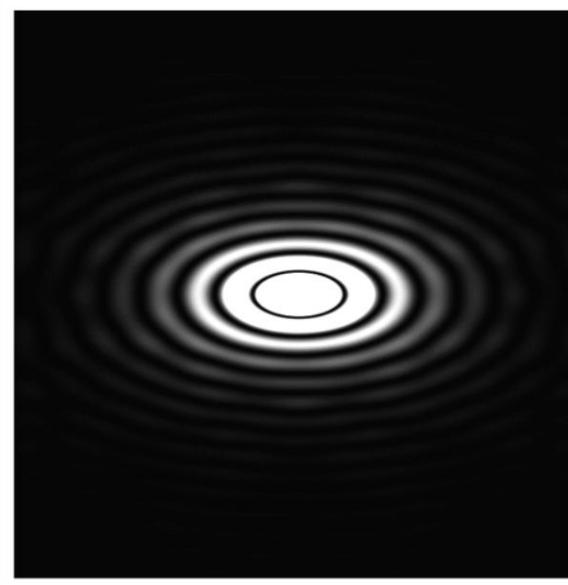
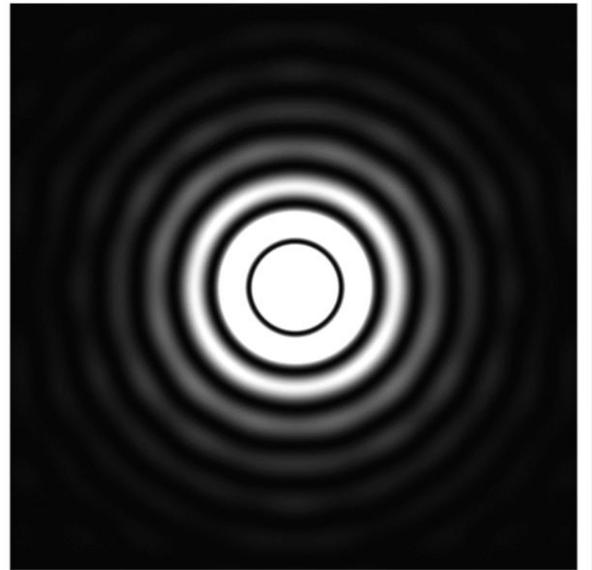
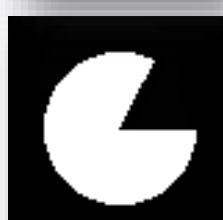
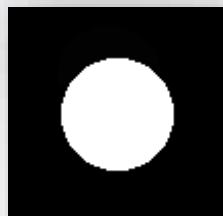


规律探索

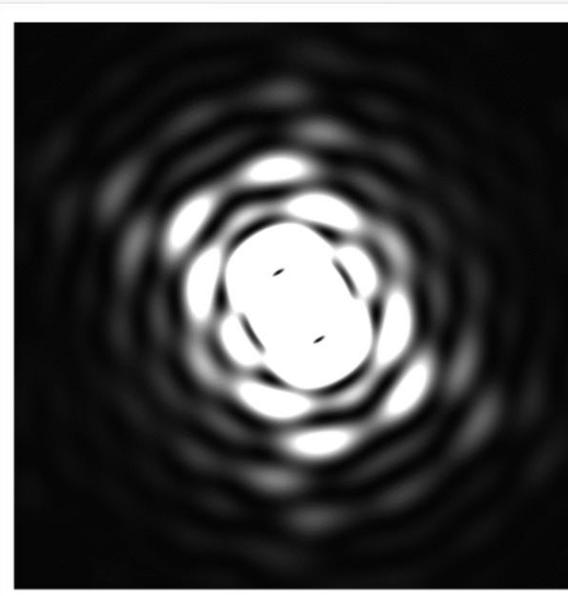
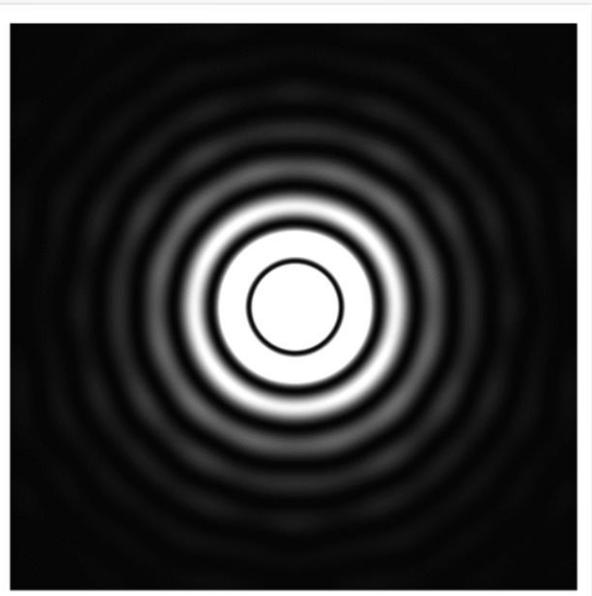
★ 拉伸



★ 残缺



在拉伸方向上
压缩 \times 倍



对称轴垂直方向：
条纹的**粗细间隔分布**；
对称轴方向上：衍射条
纹位置间隔性相反，即
会出现**棋盘状的纹路**；



规律探索



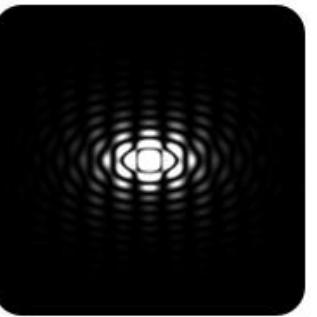
设计的组合



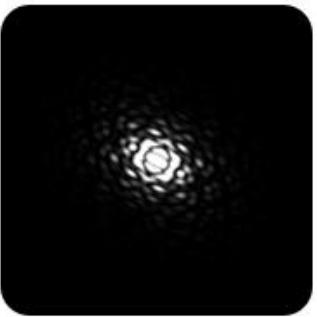
圆孔衍射



纵向出现干涉条纹



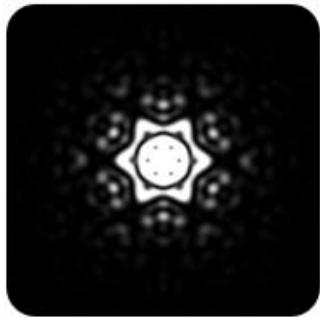
纵向两倍压缩



两个: $2/3\pi$

每一步的变

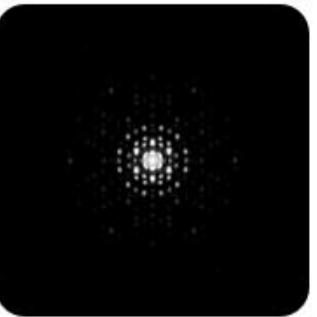
换都十分符



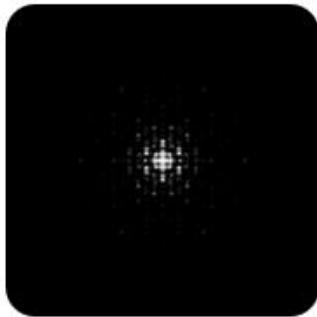
三个: $2/3\pi$



六个: $1/3\pi$



纵向出现衍射条纹



横向出现颜色和条纹

合前文发现

的规律

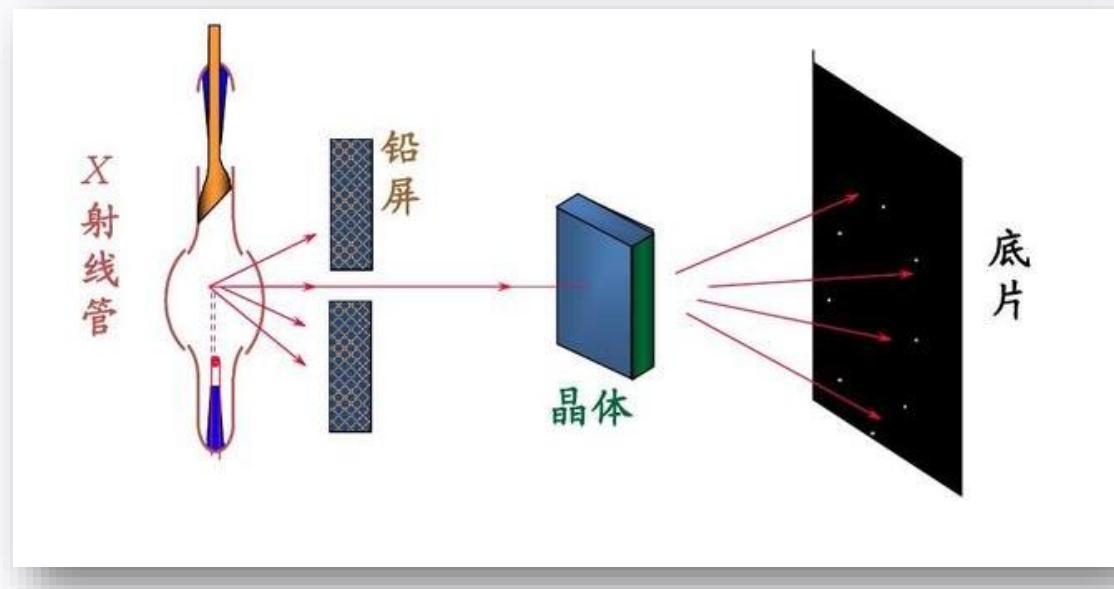
Part 02

第二部分

三维复杂结构

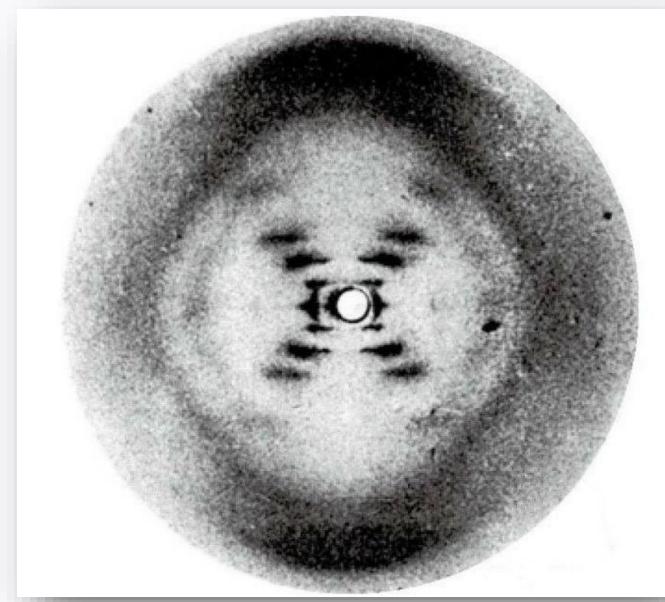


三维的结构



1953年2月，Watson、Crick看到了一张十分漂亮的DNA晶体X射线衍射照片，这一下激发了他们的灵感。他们不仅确认了DNA一定是**双螺旋结构**，而且分析得出了**螺旋参数**，就此开启了分子生物学时代

自1895年W.K.伦琴发现X射线，因为**X射线**的波长与晶体的原子间距离相近，晶体可以做为X射线的衍射光栅。目前，X射线衍射已经成为测定**3维晶体结构**的重要方法。

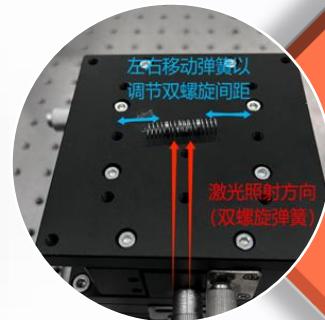


如何实现三维螺旋的衍射?



可行的三种方案

单弹簧取自自动笔；
而选择降维成二维
结构后的研究方法
同之前。

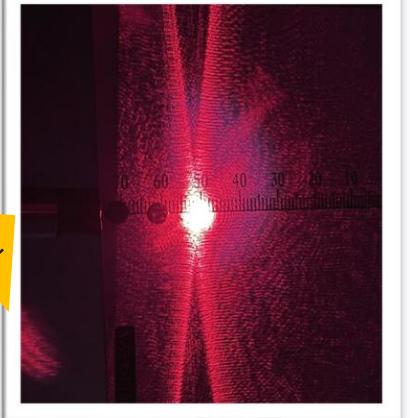


设计实验直
接用单弹簧

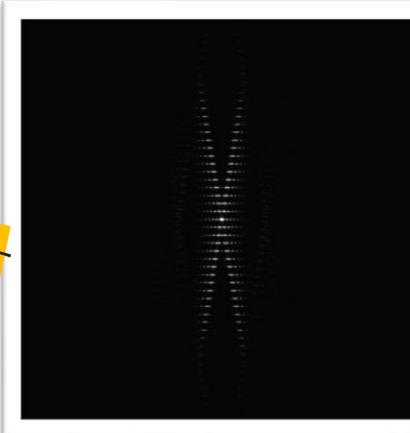


降维成二维
结构

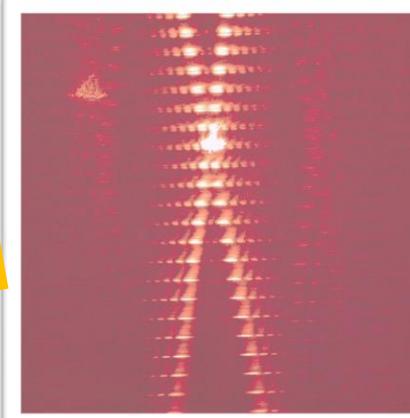
三维实验



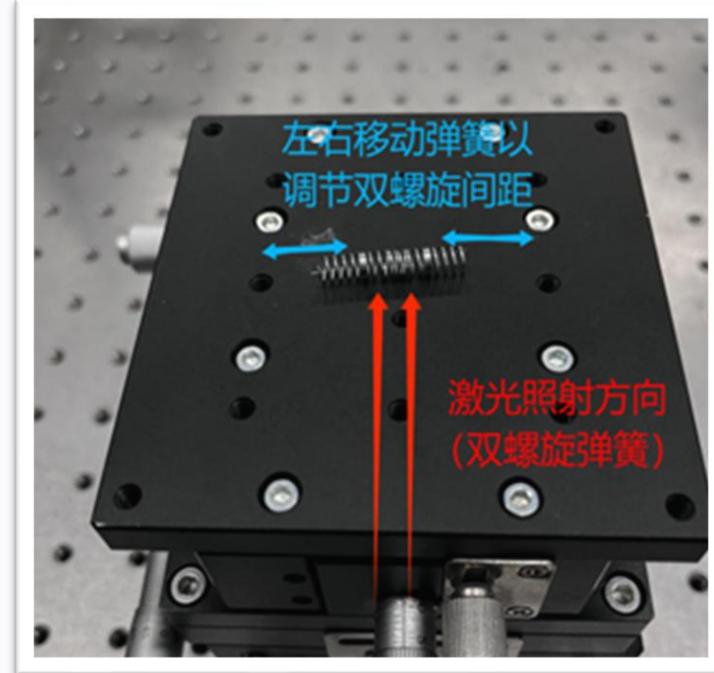
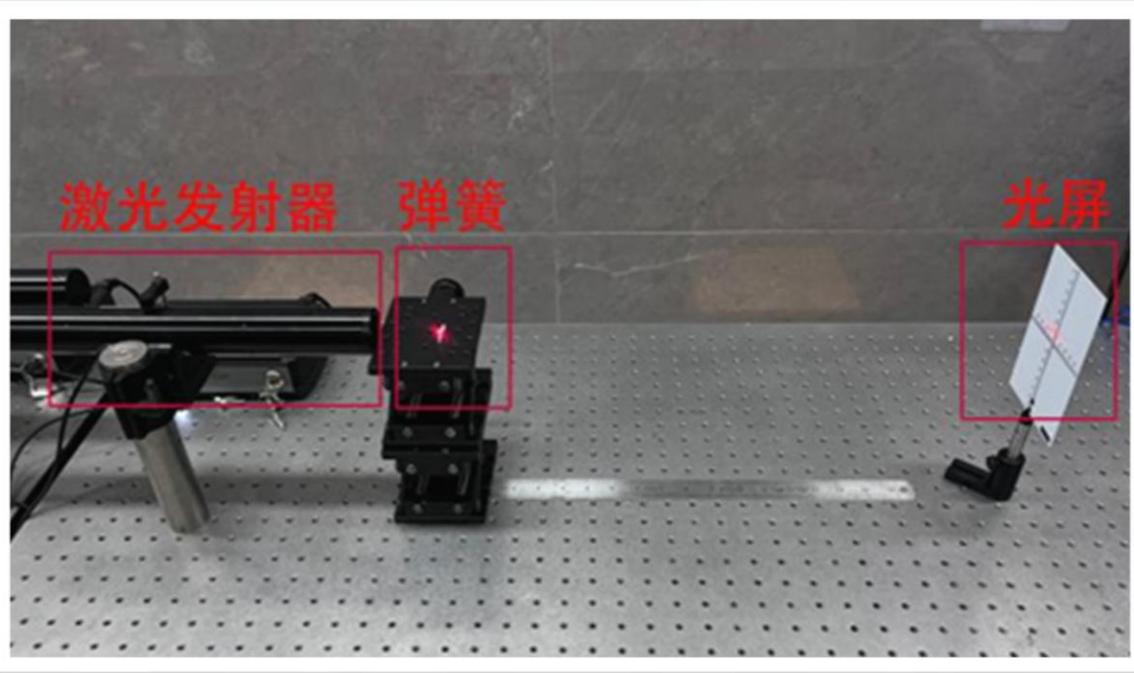
二维模拟



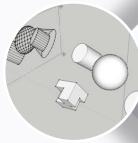
二维实验



三维衍射实验设计

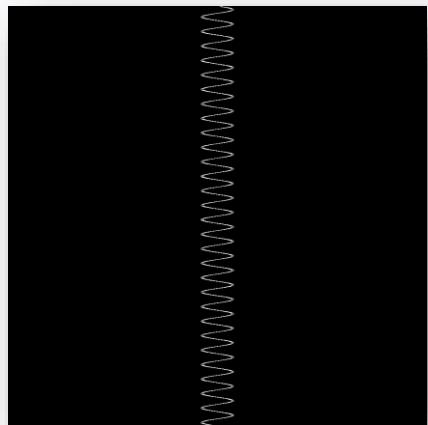


激光源 → 弹簧 → 光屏



螺旋结构

复杂结构

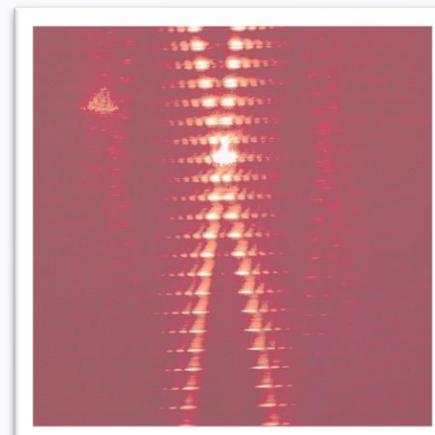


单螺旋

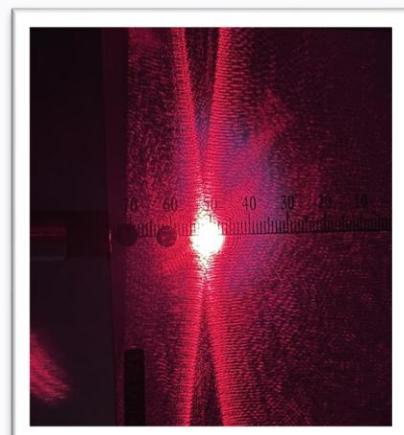
理论分析图



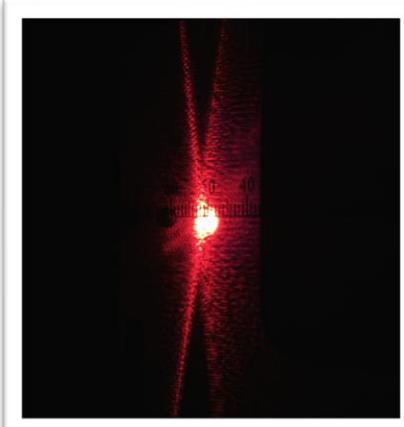
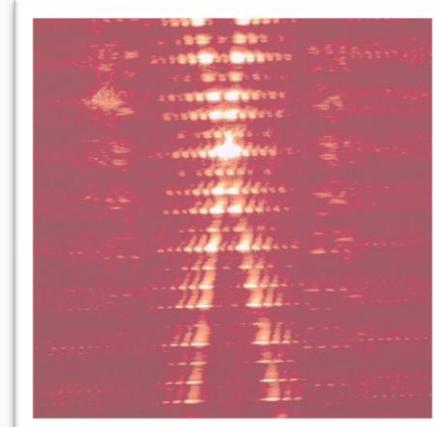
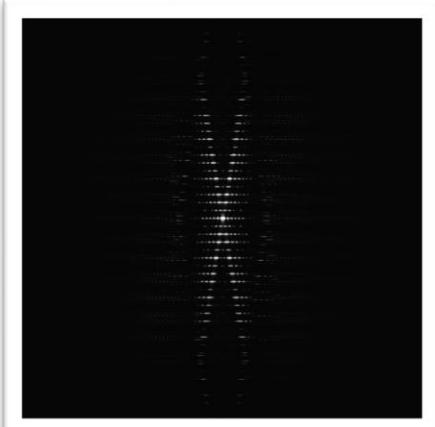
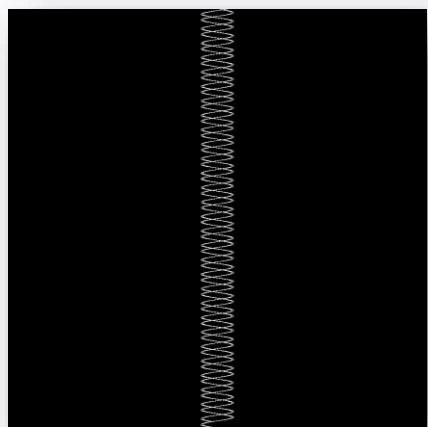
SLM实验图

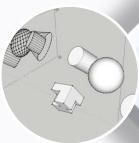


实物实验图



双螺旋





实验现象

(现象1)

衍射花样: **X样貌**

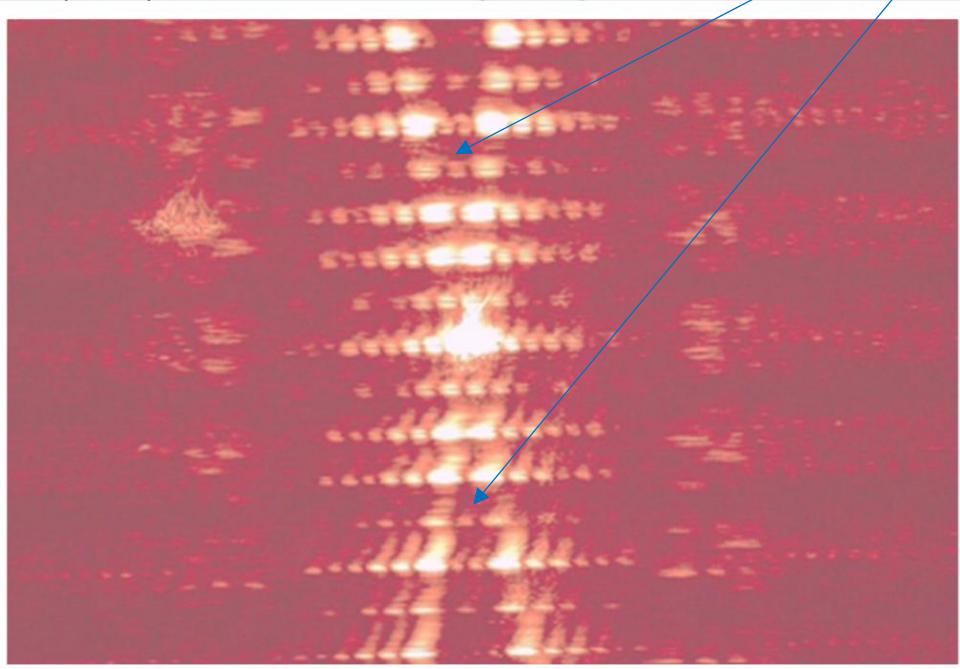
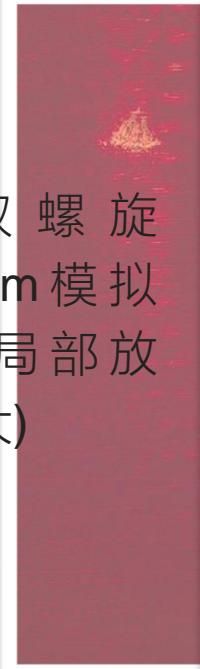
(现象2)

双螺旋衍射 : 极大有个别缺失 (缺极现象) ,

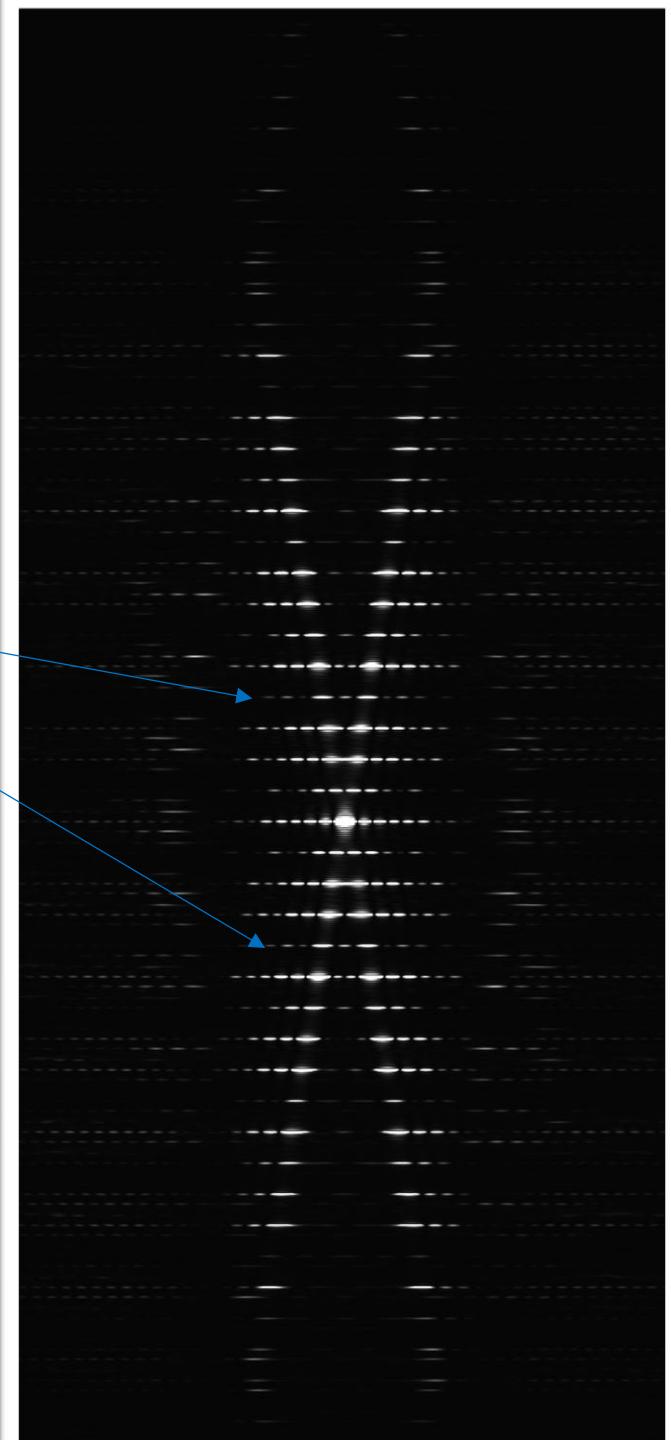
单螺旋slm模拟

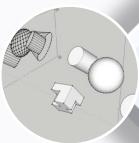
双螺旋slm模拟

双螺旋
slm 模拟
(局部放大)



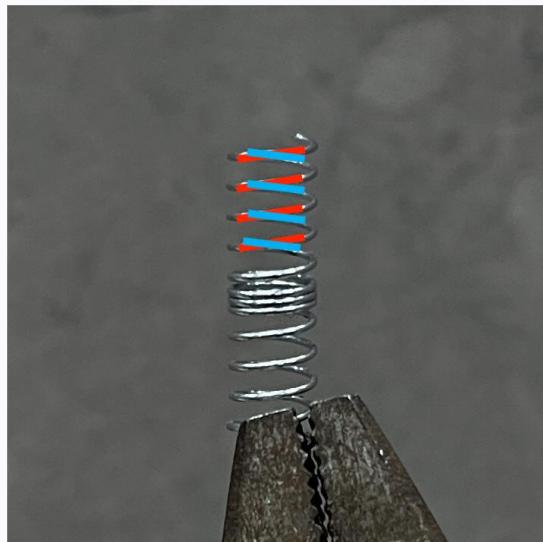
双螺旋
matlab
光学仿
真



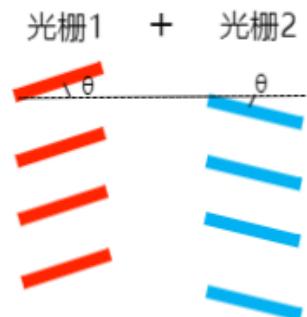


实验现象一解释

单螺旋结构



等效光栅



单螺旋SLm模拟



干涉条纹

单个光栅



两个光栅

两列夹角为
 2θ 的干涉条
纹

夹角测量
模拟解

	1	2	3	4	5	6
锐 夹角值	$16.2 \pm 0.1^\circ$	$15.9 \pm 0.1^\circ$	$16.9 \pm 0.1^\circ$	$16.5 \pm 0.1^\circ$	$15.9 \pm 0.1^\circ$	$16.2 \pm 0.1^\circ$

实验

	1.	2	3	4	5	6
锐 夹角值	$15.7 \pm 0.1^\circ$	$17.2 \pm 0.1^\circ$	$16.8 \pm 0.1^\circ$	$15.2 \pm 0.1^\circ$	$15.9 \pm 0.1^\circ$	$16.0 \pm 0.1^\circ$

实物衍射

	单弹簧	双弹簧
锐 夹角值	$16.8 \pm 0.1^\circ$	$17.5 \pm 0.1^\circ$

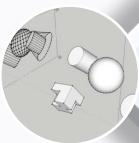
锐夹角值:

$16.3^\circ \pm 0.1^\circ$

弹簧金属丝倾角 θ :

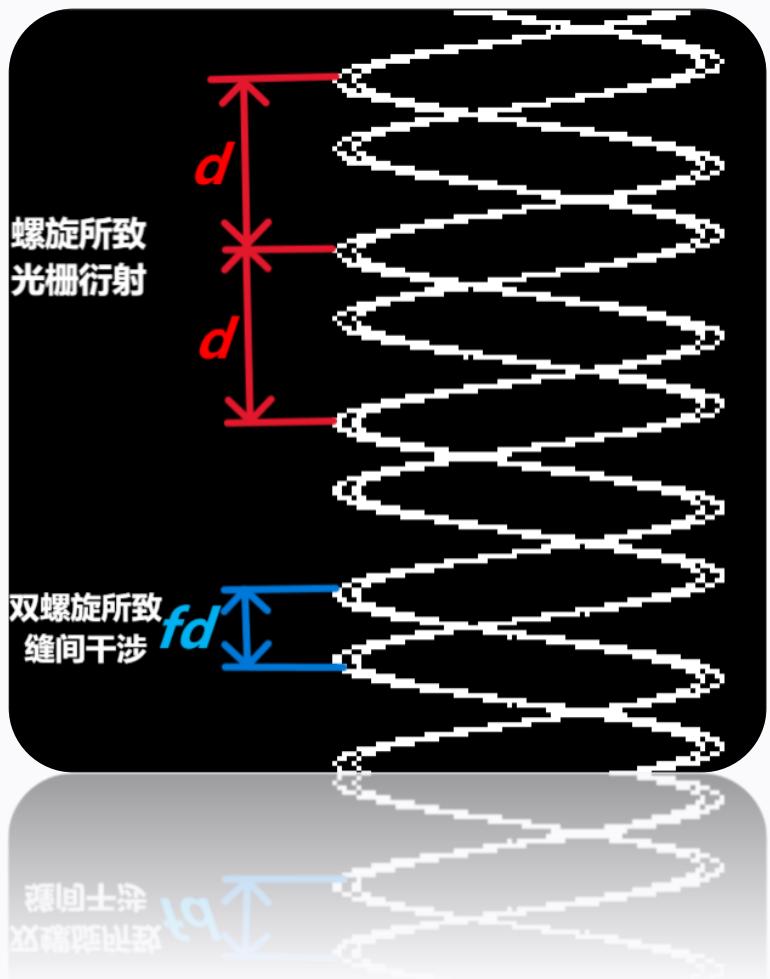
$8.0^\circ \pm 0.1^\circ$

相对误差: **1.9%**



实验现象二 解释

双螺旋结构



对于单螺旋:

$$m \lambda = d \sin \phi$$

第m极大 双螺旋的干涉产生的极小

$$(2k + 1) \frac{\lambda}{2} = (fd) \sin \phi \quad (1) \leftarrow$$

$$dsin \phi = m\lambda \quad (2) \leftarrow$$

m : 第m极大
λ : 波长
d : 螺距
φ : 衍射角
f : 两螺旋间距/螺距



$$m = 2f(2k + 1) \quad k = 1, 2, 3 \dots$$

Part 03

第三部分

算法程序原理

干涉衍射积分公式

$$I(\theta) \propto \left| \int_{\Sigma} U(x, y) e^{ik(r \sin \theta)} dS \right|^2$$

-  积分区间无法表示
-  积分计算难度大 指数、复数、双重积分、根号关系
-  方法不具有普适性 需要对多种结构进行多次计算

理论分析

菲涅尔衍射积分

$$U(x, y, d) = \frac{\exp(jkd)}{j\lambda d} \exp\left[\frac{jk}{2d}(x^2 + y)^2\right] \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_0(x_0, y_0, 0) \exp\left[\frac{jk}{2d}(x_0^2 + y_0^2)\right] \exp[-2\pi(\frac{x}{\lambda d}x_0 + \frac{y}{\lambda d}y_0)] dx_0 dy_0$$

$$F_1(f_x, f_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy$$

$F_1(f_x, f_y)$ 为 $f(x, y)$ 的傅里叶变换

令 $F_1(f_x, f_y)$ 为 $U_0(x_0, y_0, 0) \exp\left[\frac{jk}{2d}(x_0^2 + y_0^2)\right]$ 的傅里叶变换

$$f_x = \frac{x}{\lambda d}, \quad f_y = \frac{y}{\lambda d}$$

$$U(x, y, d) = \frac{\exp(jkd)}{jd} \exp\left[\frac{jk}{2d}(x^2 + y)^2\right] *_1 (f_x, f_y)$$

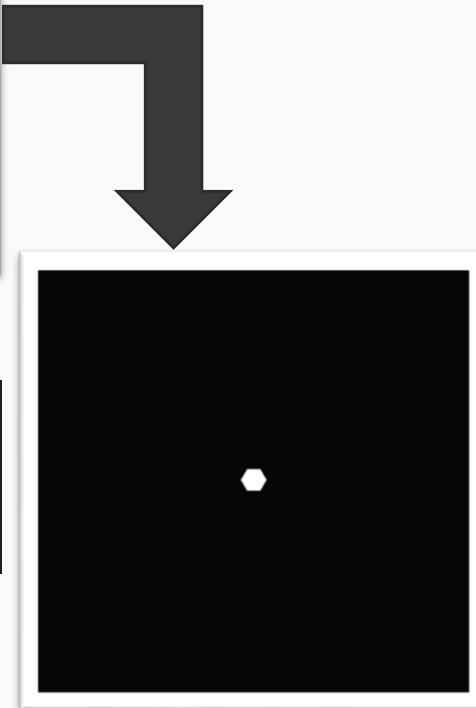
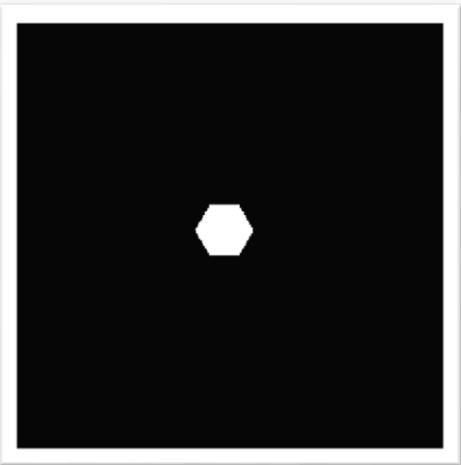
菲涅尔衍射积分的S-FFT算法

流程图

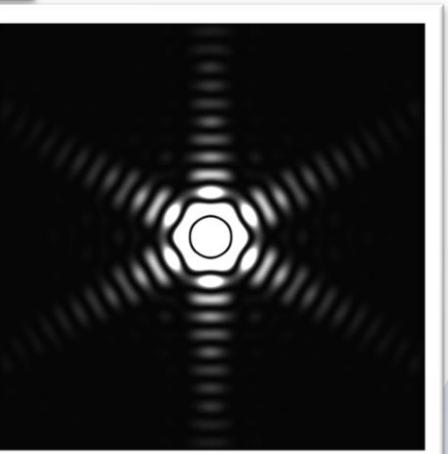
输入

对图片进行缩放，
使衍射图样更完
整或更清晰

```
if abs(A)<1
    U0(N/2-M1/2+1:N/2+M1/2,N/2-N1/2+1:N/2+N1/2)=U1(1:M1,1:N1)/A;
else
    U0(1:N,1:N)=U1(M1/2-N/2+1:M1/2+N/2,N1/2-N/2+1:N1/2+N/2)/A;
end
```



```
fx = (-N Ana/2:N Ana/2-1)/(N Ana*delta);
[x2,y2]=meshgrid(h * Dz * fx);
U_out=exp(1j*k*Dz)*exp(1i*k/(2*Dz)*(x2.^2+y2.^2))...
    ./(1j*k*Dz).*fftshift(fft2(U0,N Ana,N Ana));
LI=U_out.*conj(U_out);
```



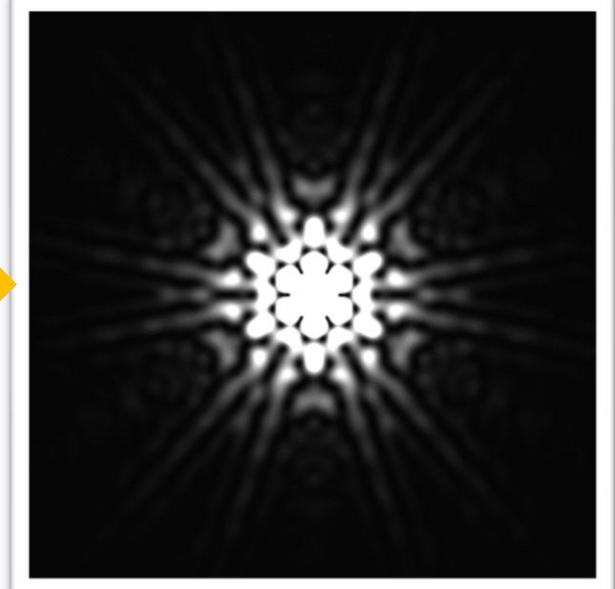
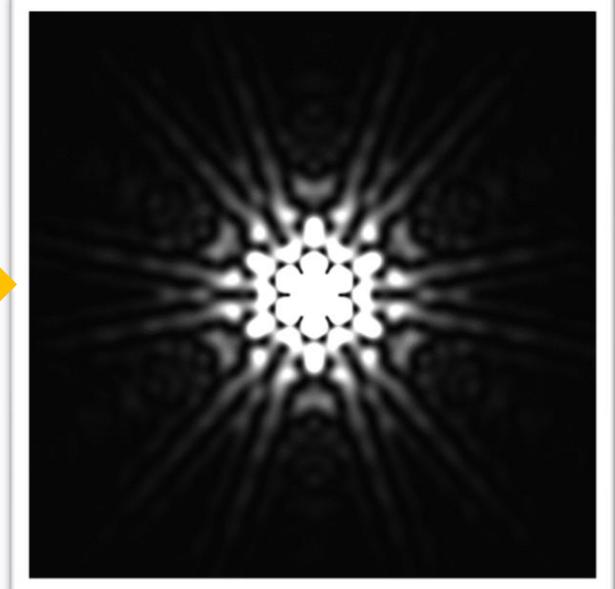
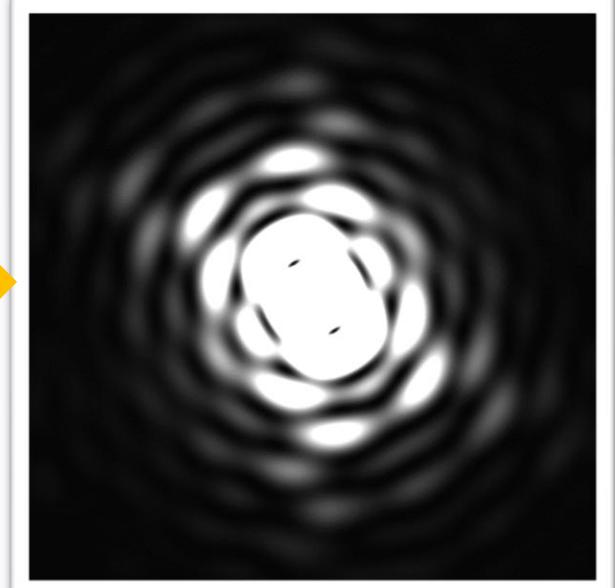
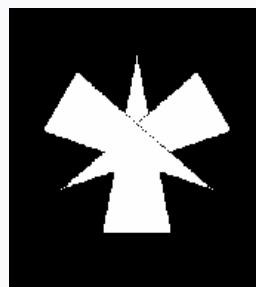
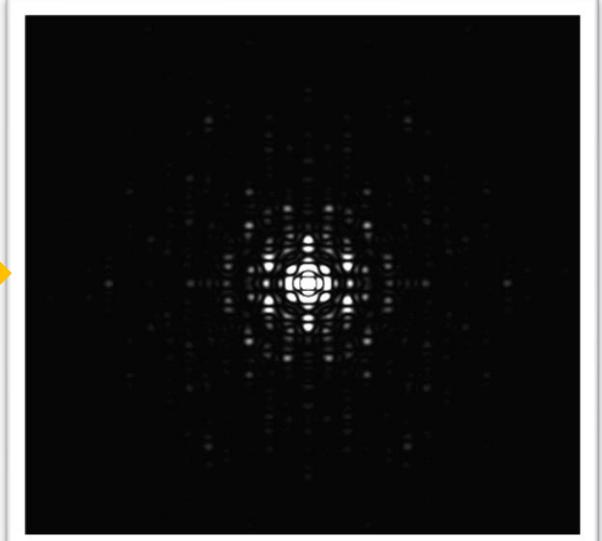
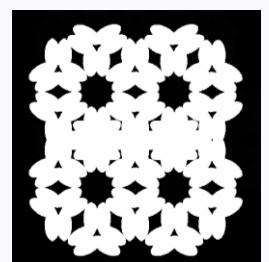
$$U(x, y, d) = \frac{\exp(jkd)}{j\lambda d} \exp\left[\frac{jk}{2d}(x + y)^2\right] * F_1(f_x, f_y)$$

模拟结果

```

success_FFT.m * + %
1 % h—波长(mm);
2 % U0—初始光波场的复振幅;
3 % U_out—衍射光波场的复振幅;
4 % L—衍射光波场的光强矩阵;
5 clear;close all;clc;
6 rep=1; % 更改rep可反复执行本程序
7 for i=1:rep
8
9     % 以下为图像输入
10    input_folder='useful\output_gray\pic1\' ;
11    % input_folder为输入图像的文件夹
12    [nom,input_folder]=fileparts([input_folder,".*"],'输入图像',100,100);
13    [XRGB,MAP]=imread([input_folder,nom]);
14    % X0=rgb2gray(XRGB); % 若输入图片为RGB图像，则调用本行将其转换为灰度图像
15    X0=XRGB;% 若输入图片为灰度图像，则调用本行
16    filename=strcmp(nom,".bmp");
17    % ".bmp" 根据输入图像文件名进行更改
18    filename_output=filename+"gray"+".bmp";% 输出图像文件名
19    N=660; % 调节输入图像大小
20    % 此处为调用本程序末尾处的自动生成图形函数的接口
21    % L=1e-3;
22    % I=fractal();% 可根据需要修改本行调用的函数
23    X0=mat2gray(I);
24
25    % 以下为参数设置
26    A=0.5; % 频率缩放倍数
27    h=0.6328e-3; % 波长(mm)
28    k=2*pi/h;
29    Dz=0.02; % 衍射屏到接收屏的距离(m)
30
31    % 以下为图象大小调整
32    [M0,N0]=size(X0);
33    N1=max(M0,N0);
34    X1=imresize(X0,N/N1);
命令行窗口
警告：使用 'x' 和 'y' 作为位置参数已过时，将被忽略。
> 位置: uigetputfile_helper/parseArguments (第 147 行)
位置: uigetputfile_helper (第 28 行)
位置: uigetfile (第 133 行)
位置: success_FFT (第 12 行)
警告：当用作索引时，冒号运算符需要整数操作数。
fx > 位置: success_FFT (第 37 行)

```



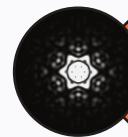
Part 04

第四部分

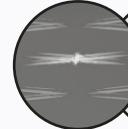
总结与展望

总结

如何设计**复杂结构**?



拉伸、重叠、残缺等操作及它们的复合对干涉衍射图样的影响

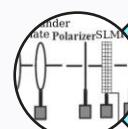


通过重叠、交叉、重复的操作实现了(弹簧)三维衍射结构，并通过二维的衍射进行了验证,研究了螺旋参数

如何**实现**复杂结构的干涉衍射?



利用`sfft`函数实现了仿真模拟二维结构的干涉衍射



利用空间光调制器实现了任意二维复杂结构的干涉衍射

展望

- 实验的**普遍性**有待提高, 应加强关于图片本身性质对变换结果影响的研究, 应加强**解析角度**的分析
- 二维结构衍射所得结论**偏唯象**, 缺乏更为定量、优雅、统一的结论
- 三维结构衍射实验较为粗糙, 缺乏**设计**, 精度有待提高
- 尝试消除空间光调制器带来的**底光与零级光**, 优化实验结果

Reference

- [1]J. Thompson, G. Braun, D. Tierney, L. Wessels, H. Schmitzer, B. Rossa, H. P. Wagner, W. Dultz; Rosalind Franklin's X-ray photo of DNA as an undergraduate optical diffraction experiment. Am. J. Phys. 1 February 2018; 86 (2): 95–104.
- [2]Lucas, A. A. (2002). Rosetta Stone of the genetic language. International Journal of Quantum Chemistry, 90(4-5), 1491–1504. doi:10.1002/qua.10351
- [3] Yuwei Cui, Wei Zhang, Junhong Wang, Meina Zhang and Shuyun Teng; Fresnel diffraction of aperture with rough edge J. Opt. 17 (2015) 065607 (11pp)
- [4]吕波, 许志军. 基于任意形状衍射屏的光学夫琅禾费衍射仿真. 西南师范大学学报(自然科学版), 2018
- [5]赵凯华, 钟锡华. 光学 (重排本) [M].北京大学出版社, 2017

致谢

致谢

感谢大学物理实验中心提供的优秀实验平台

感谢指导老师认真负责的指导

感谢彭简杰、李杭骏同学的协助

感谢观看

Thanks for watching

请批评指正!

