



# 光学方法探索样品的空间结构

## ——第21届亚洲物理奥林匹克竞赛虚拟实验第2题

刘丽飒 宋 峰

(南开大学物理科学学院 300071)

第21届亚洲物理奥林匹克竞赛于2021年5月16日至24日在中国台湾地区举行。由于疫情原因,比赛以虚拟设备、远程线上考试形式在各国本地进行。

本届竞赛的实验考试时间总计5小时,总分20分。第一题:悬臂梁弹性,10分;第二题:光学方法探索样品的空间结构,10分。本文对第二题“光学方法探索样品的空间结构”题目进行详细介绍,对软件各部分操作中现象的变化规律以及观察时的关注点进行必要的提示。

### 1 在线考试软件程序

在线考试需要安装win10系统及8Gb内存的计算机。实验考试软件程序等在指定时间上传至2021亚洲物理奥赛网站。

本题使用软件中2A-2E部分答题。考试软件实验概述页面如图1所示。

### 2 实验背景简介

微球在生物医学测量领域有许多应用。利用具有结构和图案设计的载体注入微球,可用于制造相关的光电传感元件。本次在线实验旨在模拟上述实验框架,进行相关测量,

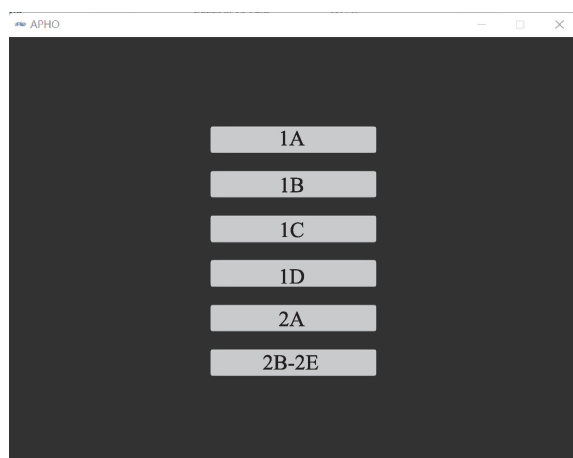


图1 考试软件实验概述页面

推断出微球的直径、结构图案的大小,最后描述样品的空间结构。

有一个用于生物医学检测的样本。该样品由许多直径相同的透明玻璃微球组成,成二维密集堆积条件排列。这些微球彼此紧密相连,排列方向不知何故不一致(如图2所示)。这些微球被填充成一个矩形阵列网格,其尺寸大于微球的直径,具有一个旋转角度。为了了解该样品的所有图案结构,本次实验设计(如图3所示)采用激光光源照射样品,观察衍射现象。从衍射图样的结构分析中,可以知道样品的对称性和结构尺寸。

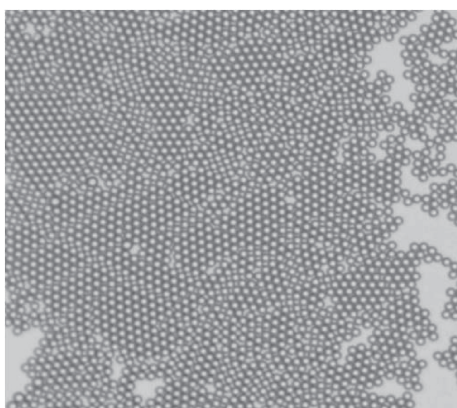


图2 微球排列示意图

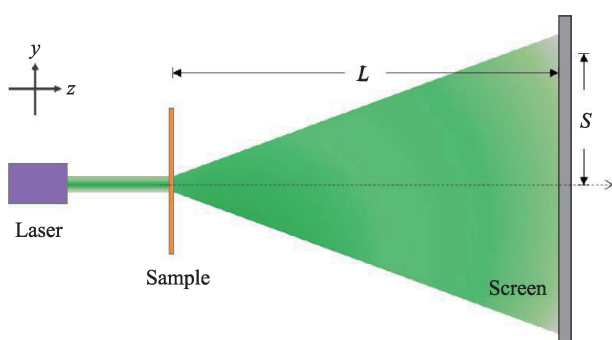


图3 实验装置

### 3 软件使用说明

在实验概述页面中点击2A,进入图4页面,其中各部分的作用与操作方法,如下:

A. 回到实验概述页面:注意,在实验过程中使用此按钮将清除所有实验状态和数据。

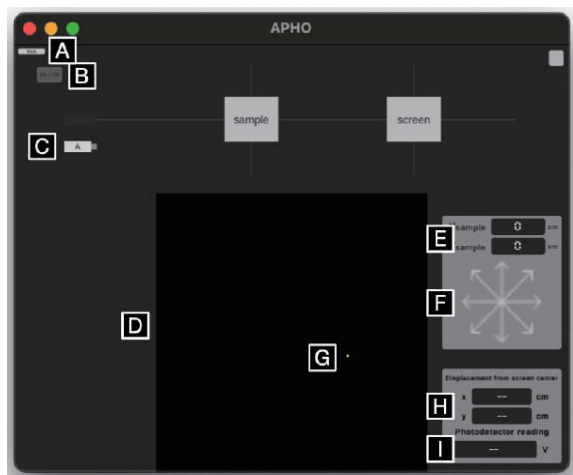


图4 题目A部分软件操作界面

B. 激光电源开/关:当激光在光学轨道上时,用这个按钮打开/关闭激光。当激光被激活时,轨迹上会显示一条光迹。

C. 激光源:可拖放到或拖离光轨道。注意当一个新的激光源被放置到轨道上时,会显示“Installing”(安装)来指示安装进度。

D. 投影屏幕:激光首先照射样品,然后将得到的图案投射到轨道右侧的屏幕上。在A部分实验中,屏幕被固定在离样品50厘米的位置。

E. 样品坐标显示:以100 μm的增量显示轨迹中间样品的坐标  $X_{sample}$  和  $Y_{sample}$  (样品的X和Y坐标)

F. 样本坐标调整:点击,以100 μm的增量调整样品坐标。长按可连续移动。对角箭头以100 μm的增量在两个轴上移动样品。

G. 光电探测器坐标调整:点击投影屏幕,在点击的位置放置光电探测器。使用键盘上的方向键来调整位置。

H. 光电探测器坐标显示:以0.01 cm的增量,数值显示光电探测器相对于原点的位置(x, y)。光电探测器以0.01 V为增量的电压读数。注意仪表的量程是不能调节的。

在实验概述页面中点击2B-2E,进入图5页面,其中各部分的作用与操作方法,如下:

J. 多波长的激光源:可拖放到或拖离光轨道。注意当一个新的激光源被放置到轨道上

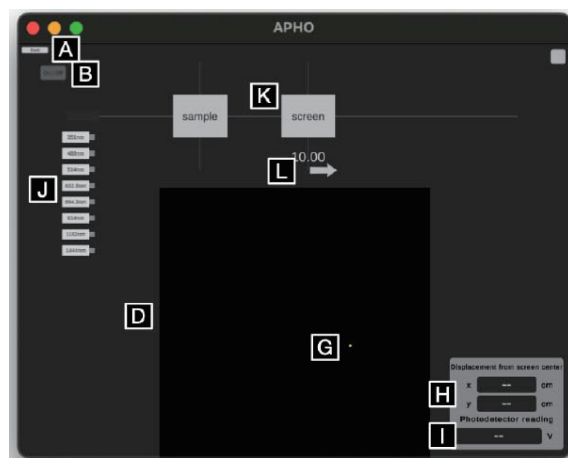


图5 题目B-E部分软件操作界面

时,会显示“Installing”(安装)来指示安装进度。

K. 投影屏:激光首先照射样品,然后将得到的图案投射到轨道右侧的屏幕上。在B部分到E部分的实验中,投影屏幕到样品的距离是可调节的。

L. 投影屏调整:用鼠标水平拖动箭头。这将以1.0 cm的增量调整投影屏幕到样本的距离。可调范围为10.0 cm至100.0 cm。

## 4. 实验

### A部分:光与样品的准直(1.0分)

为了使激光正确照射样品,采用双狭缝作为样品进行光校准。如果激光在双狭缝的中心进行适当的准直照射,则可以在屏幕上观察到清晰的干涉条纹。双狭缝的原始位置为 $(X_{sample}, Y_{sample})=(0,0)$ ,该值将显示在软件界面上。样品有一个固定的 $z$ 位置。通过充分调整双缝沿 $x$ - $y$ 平面的位置,就可以观察到屏幕上显示的干涉条纹。请找出双缝的最佳位置 $(X_{sample}, Y_{sample})$ ,确定干涉条纹的正确间距。

A.1 确定双缝样品的最佳位置值 $((X_{sample}, Y_{sample}))$ 。(0.5分)

A.2 根据最佳位置值,绘制观察到的干涉条纹,记录一、二阶暗条纹的位置 $(x, y)$ 和位置 $(x, y)$ 到原点的距离 $S$ 。请确定相邻两个暗条纹之间的间距 $\Delta S$ 。(0.5分)

【分析】A部分在实际实验中对应对着光路的调节环节,应该做到激光正入射到实验样品中央上,在接收屏上取得左右对称的衍射图样,如图6所示。双缝样品的最佳位置,正是基于这一现象确定的。数据的记录和处理中应该体现对称测量,见表1。由于图形中暗体条纹比较细锐,所以标记暗条纹,探索双缝样品的最佳位置需要参考衍射图像的亮度分布,对中心级次的位置进行估计,进行严格细调使其与D.投影屏幕中心重合。进行本题B-E的部分

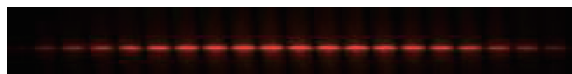


图6 参考答案中给出的衍射花样

表1 A.2 实验数据记录表

级次,条纹	-2,暗	-1,暗	1,暗	2,暗
$(x,y)$				
$S(\text{cm})$				
$\Delta S(\text{cm})$				

都是基于这样的理想光路条件下进行的实验。

### B部分:样品结构尺寸探索(3.0分)

假设整个系统的光路处于最佳状态,激光位置和样品位置是固定的。只需改变激光波长和屏幕 $L$ 的位置,在屏幕上就可以看到相应的衍射图案。每个微球之间对应的距离 $d$ ,可以通过 $\lambda$ 、 $L$ 、 $S$ (位置 $(x,y)$ 与原点之间的距离)的关系来确定。请参考图2中微球排列示意,使用可见光范围内的三种激光光源估算微球的直径 $a$ 。

B.1 给出指示微球距离 $d$ 的公式,用 $\lambda$ 、 $L$ 、 $S$ 表示。(0.5分)

B.2 在选择屏幕 $L$ 到适当位置后,记录微球在屏幕上衍射图样的坐标 $(x,y)$ ,在可见范围内选三个激光源,计算出距离 $S$ 和 $\tan^{-1}(S/L)$ (单位:弧度)。(在同一环上记录5个点,得到平均值 $\bar{S}$ ) (1.5分)

B.3 利用公式计算出三种激光源实验中每个实验所对应的微球之间的距离 $d$ 、微球直径 $a$ 和平均直径 $\bar{a}$ 。(1.0分)

【分析】B部分是对样品中的微球间距以及微球直径的探测。微球间距由实验中对一组圆形分布衍射点位置测量和B1解答中推导出的公式得到的。微球的直径由二维密集堆积条件下的微球直径和微球间距之间几何关系得到。

依据题面,样品中微球的尺寸小于矩形网格,所以由微球产生的衍射花样点与点之间的间隔大于由矩形网格产生的衍射花样点与点

之间的间隔。对某一激光光源,在屏幕 $L$ 与样品之间间距逐渐加大的过程中,应说先看到由微球产生的衍射花样点。软件提供的激光器波长有351、488、514、623.8、694.3、914、1152和1444 nm。其中处于400~700 nm可见光波段的有488、514、623.8、694.3 nm四种。在屏幕 $L$ 与样品之间间距相同的情况下,波长越长所观察到的由微球产生的衍射花样点与点之间的间隔越大。

由于微球的排列方向不一致,来自不同排列方向的衍射会叠加等原因,在判断同一组圆形分布衍射点时要考虑到光斑位置分布,大小以及亮度等多个因素来确定,题目要求记录5(奇数)个点的坐标,见表2,用这些点与原点之间的距离来进行数据处理而不是常规的对称测量。为减小误差,屏幕 $L$ 与样品之间间距选择以获得衍射点小而亮、便于测量的位置为最佳。

表2 B.2实验数据记录表

数据	1	2	3	4	5
$(x,y)$					
$S(\text{cm})$					
$\bar{S}(\text{cm})$					
$\tan^{-1}(\bar{S}/L)$					

### C部分: 样品结构尺寸的探索(2.5分)

这个样本是旋转了一定角度的矩形网格阵列。在每个矩形中,有许多透明玻璃微球以二维密集堆积条件排列。从屏幕上的图案中,可以看到矩形网格阵列的规则排列所产生的交叉衍射条纹。请选择一个可见激光器进行实验,并尝试从衍射图样中推导出矩形结构的尺寸和对应的取向角。

C.1 选择一种可见激光器进行实验。将屏幕与样品的距离固定在 $L=90\text{ cm}$ ,观察衍射图样。请在两个轴向上标记出4到7阶亮条纹的坐标 $(x,y)$ ,计算出相应的距离 $S$ ,并算出 $\tan^{-1}(\bar{S}/L)$ 的对应值(单位:弧度)。(0.8分)

C.2 根据C.1的数据计算相邻亮条纹的距离

$\Delta S_x$ 和 $\Delta S_y$ 。并计算单个矩形的长边( $l$ )和短边( $w$ )的长度。(0.7分)

C.3 计算取向角:做出一条线来估计角度。要标出亮纹的四个坐标 $(x,y)$ 。估计单个矩形的长边相对于水平轴的方向角 $\phi$ 。(1.0分)

【分析】C部分是对样品中的矩形网格尺寸以及方位角进行探测。选择488、514、623.8、694.3 nm四种之一进行实验。题目要求屏幕与样品的距离固定在 $L=90\text{ cm}$ ,这个距离是测量由矩形网格产生的衍射花样点与点之间的间隔的实验条件。据此可以推断B2部分选定的距离一定小于90 cm。通常矩形网格产生的衍射光斑为十字交叉的点状态分布,可以参考图7.低级次的衍射斑较大,还会和由微球产生的衍射花样混杂,故此题目要求标记两个轴向4到7阶亮条纹坐标的数据记录,见表3。未要求对称测量。长边所产生的衍射花样点与点之间的距离比短边所产生的衍射花样点与点之间的距离小,需要依据这一点判断成直角交叉衍射条纹,那个方向是长边对应的。 $\phi$ 就是由对应方向衍射点所成直线与水平轴的夹角,可以由对应数据拟合的直线斜率求得。

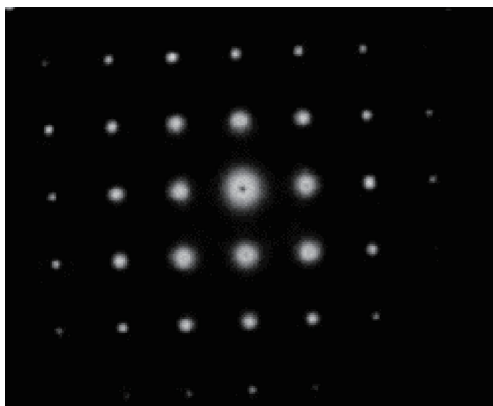


图7 矩形网格衍射花样示例(非参考答案)

表3 C.1实验数据记录表

级次,条纹	4,明	5,明	6,明	7,明
$(x,y)$				
$S(\text{cm})$				
$\tan^{-1}(\bar{S}/L)$				

**D部分: 样品结构尺寸探索(2.5分)**

在前面的问题中用可见光范围内的入射光,屏幕上交叉的明亮条纹内有更精细的衍射斑图案,不容易识别。为了获得更清晰的样品衍射斑图,需要用波长更长的激光。请使用红外激光器对样品进行照射,生成精细的衍射斑图。由于红外线是看不见的,所以需要有一个光电探测器来找到衍射斑的位置。试通过衍射斑的图案来确定样品的网格结构。

D.1 请将屏幕位置设置在 95 cm,选择一台红外激光器进行实验,使用光电探测器识别屏幕上细小的衍射斑图案。表 4 中写下屏幕上一组 4×4 的精细衍射亮点的激光波长和衍射亮点中心坐标。画出 4×4 的光斑图案,表示图中相邻光斑之间的距离  $\Delta S_x$  和  $\Delta S_y$ ,并计算数值。(1.9分)

D.2 根据红外实验结果确定样品网格的间距  $d_x$  和  $d_y$ 。(0.6分)

表 4 D.1 实验数据记录表

激光波长 $\lambda$ =			
4×4 精细衍射亮点的中心坐标(x,y)			

【分析】D 部分是对样品中的矩形网格间距进行探测。选择 914、1152 和 1444 nm 三种之一进行实验。题目要求屏幕与样品的距离固定在  $L=95\text{ cm}$ ,这个距离与测量由矩形网格产生的衍射花样点与点之间的间隔接近,但是波长数值增加。据此可以推断现象中衍射矩形网格产生的衍射花样的尺寸以及点分布间隔相较于 C 部分时观察的结果,基本是按两次使用的波长比放大以后的结果。所以 4×4 的精细衍射亮点可以用光电探测器分辨。电探

测器可显示出指示位置处的光强,衍射亮点中心强度最高。

**E. 样品结构尺寸探索(1.0分)**

该样品由许多透明玻璃微球组成,成二维密集堆积条件排列状态(如图 2 所示),并填充在具有特定旋转角度的矩形阵列网格中。这些微球彼此紧密相连,排列方向不知何故不一致。除了微球的规则排列外,该样品还有其他大于微球直径的矩形阵列。根据 C 部分和 D 部分的问题,通过观察衍射条纹获得的结构尺寸和方向信息,确定了样品的具体结构网格。

E.1 画出样品的周期排列:请用 3×3 的矩形阵列表示,并用符号( $l, w, d_x, l_y, \phi$ )在图案中标出 C 部分和 D 部分题目对应的尺寸( $l$  和  $w$ )、间距( $d_x$  和  $d_y$ )和方向角  $\phi$ 。(1.0分)

【分析】E 部分是对 C、D 部分得到的矩形网格尺寸、间分布距以及角度的图形化。注意对应的几何关系不要扭曲颠倒就可以完成。

\* \* \* \* \*

欢迎读者朋友参与“物理奥赛”系列专题的有奖竞答活动,并在答案公布前将您的解答发送至 aosai@ihep.ac.cn 邮箱。对于参与并答对每期题目的前 20 名读者,编辑部将赠阅 1 年《现代物理知识》杂志。

