



“真问题”对物理大概念教学的启示

——以几何光学和波动光学下的“小孔成像”为例

吴增瑜

(南京师范大学教师教育学院 江苏 南京 210023)

钟鸣

(南京师范大学物理科学与技术学院 江苏 南京 210023)

(收稿日期:2023-05-24)

摘要:以小孔成像这一“真问题”为例,从几何光学推导了小孔成像的原理和条件,明晰了“像”的实质为小光斑的集合;从光的电磁波本性出发,将光的直线传播理解为衍射不明显时的极限表现,进一步探讨如何从波动光学看待小孔成像.整合光现象与光本质,探讨大概念视角下的物理教学.

关键词:大概念;小孔成像;几何光学;波动光学

我国《普通高中课程方案(2017年版)》中明确强调“以学科大概念为核心,使课程内容结构化,促进学科核心素养的落实”^[1].大概念作为学科的核心、整合的桥梁、迁移的源头,是发展学生核心素养的有效途径^[2].因此,教师应有意识地将大概念理念落实到具体的教学活动中.“真问题”则为开展大概念教学提供了切实可行的抓手.

所谓“真问题”,是指在物理教学中引入的来源于生活实际的物理现象和物理问题.例如,在初中的几何光学中,“小孔成像与孔的形状无关”是一个基本结论.然而,实际生活中树阴下的光斑形状并非都是圆形,有叶间缝隙的形状,还有一些与两者都明显不同^[3].由此可见,由于知识范围和数理基础的限制,教学中对一些“真问题”的解释往往是不全面、过于简单和理想化的.教师若具备大概念理念,从多个视角系统、深入地审视问题,就能借“真问题”引导学生构建起物理概念、规律之间的联系,发展科学整体观.

本文以小孔成像为例,分别从几何光学和波动光学对相关问题进行阐释,进而将光的波动性与直

线传播建立联系,立足光的本质来洞悉光现象.相关结论不仅为广大物理教师提供理论基础,更为教师转变教学方式,以大概念视角开展教学提供参考和借鉴.

1 从几何光学看小孔成像

1.1 小孔成像的理想化模型

小孔成像是指光源所发出的光线经过小孔后,在光屏上形成光源的倒立实像的现象.为解释该现象,构建如图1所示的理论模型:将光源看成许多点光源的集合体,每个点光源都会发出一条具有代表性的光线,在光屏上得到对应的像点.因此,光屏上呈现出由一个个像点组成的图样,即光源的倒立的“像”.由于此模型不考虑小孔的几何尺寸,将小孔视作理想的点,故称为小孔成像的理想化模型.

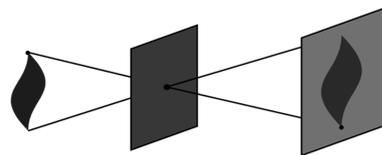


图1 小孔成像的理想化模型

作者简介:吴增瑜(2000-),女,在读硕士研究生,研究方向为学科教学(物理).

通讯作者:钟鸣(1974-),女,博士,教授,研究方向为统计物理与凝聚态理论、物理教育.

1.2 从大孔成斑到小孔成像的条件

实际上,小孔必然存在一定的几何尺寸,所以物点会在光屏上形成光斑而不是光点.如图2所示,光斑的形状反映了小孔的形状,当孔径较大时,相邻光斑之间就会互相交叠,导致“像”的失真.在不同孔径、物距、像距下,“像”的形状可能与光源的形状相似,也可能与孔的形状相似,或者与二者形状都明显不同^[4].这个现象被总结为:大孔成斑,小孔成像.下面,定量探讨能使小孔成像的条件.

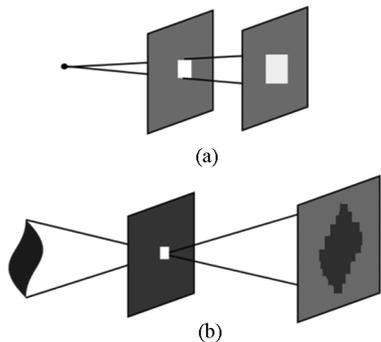


图2 孔径影响像的形状示意图

如图3所示,选取光源在竖直方向上的线段BC进行研究,记线段长度为 h , u 、 v 分别表示物距和像距.

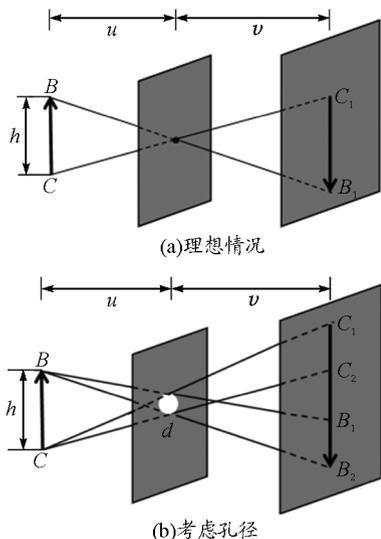


图3 小孔成像截面光路图

图3(a)是小孔成像的理想模型,不考虑小孔的尺寸,则所成“像”的形状应该与光源形状严格一致,“像”的大小仅仅取决于像距和物距的比值.可以将这一比值定义为像的理想缩放倍数 α ,即

$$\alpha = \frac{B_1C_1}{h} = \frac{v}{u} \quad (1)$$

图3(b)中的小孔直径为 d ,则光源BC在光屏上能照亮的全部范围是 C_1B_2 .此时,像的实际缩放倍数 α' 应为^[4]

$$\alpha' = \frac{C_1B_2}{h} = \frac{v}{u} + \frac{v}{u} \cdot \frac{d}{h} + \frac{d}{h} = \alpha \left(1 + \frac{d}{h} \right) + \frac{d}{h} \quad (2)$$

由式(2)可知,在实际情况下,除了像距与物距之比 α 之外,孔径 d 、物径 h 也会影响到“像”的大小和形状:

(1) 当 $\frac{d}{h}$ 不可忽略时,由于不同方向上的孔径与物径之比不同,于是“像”在各个方向上的缩放倍数也不同,导致“像”既无法复刻光源形状,又与孔的形状不相似;

(2) 若 $\frac{d}{h} \ll 1$,即孔径远小于物径时,则 $\alpha' \approx \alpha$,此时各方向上“像”的实际缩放倍数趋近于理想的缩放倍数,故“像”的形状能够与光源保持一致,实现了“小孔成像”;

(3) 而“大孔成斑”对应的条件则是 $\frac{d}{h} \gg \alpha$,即孔径与物径之比远大于像距与物距之比,此时 $\alpha' \approx \frac{d}{h}(1 + \alpha)$,各个方向上的“像”的长度 $\alpha'h$ 都为孔径 d 的 $1 + \alpha$ 倍,故“像”等比例放大孔的形状,而不是光源的形状.

综上所述,小孔成像需要满足的条件是:孔径远小于物径.

1.3 小孔所成“像”的实质

需要指出的是,关于光束穿过小孔之后能“成像”的表述是有待商榷的.在几何光学中,成像是指同心光束经过光学系统后变换形成另一同心光束,又根据变换后的光束是汇聚光束还是发散光束,将像分为实像和虚像^[5].而小孔成像没有经历同心光束之间的变换,只是发散光束的某一部分直接通过小孔并在光屏上留下一定的明亮区域,这与光斑没有本质上的不同.因此,小孔成“像”更确切的说法应该是小孔成“斑”.“像”实际上是由无数个与小孔形状相似的小光斑的叠加^[6].

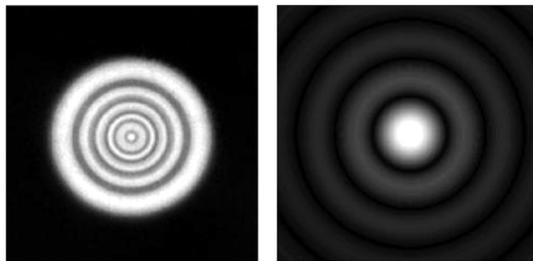
此外,实像的像点位置是唯一的,为同心光束之

“心”所在位置,光屏只能在这个位置接收到清晰的像.而小孔成的“像”的位置是不确定的,光屏在一定距离内都能接收到“像”,只不过“像”的大小和明暗不同.这一点更能说明小孔成的“像”与实像在性质上的显著不同.

2 衍射对小孔成像分辨率的影响

不考虑光的波动性时,孔越接近没有几何大小的点,成像越完美.然而,光本质上是电磁波,当孔径缩小到一定程度时,需要考虑衍射对像质产生的影响.

发生明显衍射现象需要满足的条件是:衍射屏上的孔(或障碍物)的线度在 $10 \sim 1000\lambda$ 之间^[7].可见光的波长在 $400 \sim 760 \text{ nm}$,因此,当孔径缩小至 0.76 mm 以下时,需要考虑衍射带来的影响.一般来说,在实验室中进行的小孔成像实验满足近场衍射的条件,即光源和接收屏距离衍射屏为有限远,故采用菲涅尔圆孔衍射模型进行考虑.而当光源、接收屏或者二者之一与衍射屏的距离足够大时,近场衍射将过渡到远场衍射^[8],此时可以应用夫琅禾费圆孔衍射模型.图4分别展示了两种圆孔衍射的图样,无论是哪种情况,衍射效应都会影响小孔成像的像质.



(a) 菲涅尔圆孔衍射 (b) 夫琅禾费圆孔衍射

图4 圆孔衍射图样

仍然将光源看成许多点光源的集合,各物点通过小孔后发生衍射.衍射效应使得几何光斑的边界处不再亮暗分明,并向四周扩散^[9],相邻衍射图样之间互相交叠、难以分辨,即像的分辨率下降,人眼观察到的像变模糊.

在几何光学视角下,孔径越小则成像越清晰;在波动光学视角下,一定范围内孔径越小则衍射效应越显著,所成像的分辨率越低.综上,必定存在一个临界值能够使像分辨率最高^[9].由此可见,用波动光

学看小孔成像问题,能够补充并解释几何光学视角的局限性.

3 从波动光学看小孔成像

3.1 从光的衍射到光的直线传播

实际上,光的衍射在任何情况下都能发生,与光的直线传播并不矛盾.只是由于光的波长非常小,故日常生活中难以观察到明显的衍射现象,表现出沿直线传播的特点.不妨在大概视角下将两者统一起来,提炼出更上位的观点:将光的直线传播看作衍射不明显时的一种极限表现^[10].

下面,分别在近场和远场情况下对光从衍射到直线传播的极限条件进行讨论.

(1) 从近场衍射到光的直线传播

如图5所示,利用菲涅尔半波带法,衍射场中心轴线上某一点 P 的光强应为各半波带发出的子波在 P 点振动的叠加.

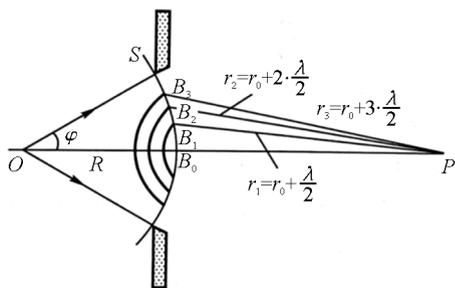


图5 菲涅尔半波带

根据理论推导, P 点的光强 $A(P)$ 为

$$A(P) = \frac{1}{2}(a_1 \pm a_k) \quad (3)$$

a_1, a_2, \dots, a_k 分别表示第1、第2、 \dots 、第 k 个半波带在 P 点的振幅, a_k 随着 k 的增加缓慢减小.半波带数 k 决定了 P 点处的光强:当 k 为偶数时, a_1 与 a_k 振动相位一致,式(3)中取正号,中央衍射图样为亮斑;当 k 为奇数时, a_1 与 a_k 振动相位相反,中央衍射图样则为暗斑.而半波带数 k 与圆孔半径 d 、光的波长 λ 、点光源的波面半径 R 、 P 点与波面上极点 B_0 之间的距离 r_0 之间有如下关系

$$k = \frac{d^2}{\lambda} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r_0} \right) \quad (4)$$

由式(4)知, k 随着孔径的扩大而增大,当 $\frac{d^2}{\lambda} \rightarrow \infty$ 时, $k \rightarrow \infty$,则 $a_k \rightarrow 0$,那么此时 $A(P) \rightarrow \frac{a_1}{2}$,这就

意味着无遮蔽的整个波面在 P 点的合振幅等效于第一个半波带在该点的振幅的一半. 由于半波带的面积非常小, 且轴上各处的光强相等, 不发生明暗交替变化, 因此, 没有遮蔽的整个波面的光能传播几乎可以看作是沿直线 OP 进行的. 这就是近场条件下光从衍射过渡到直线传播的极限情况.

(2) 从远场衍射到光的直线传播

点光源的夫琅禾费圆孔衍射的零级衍射斑称为艾里斑, 集中了 83.8% 的光能, 是一个非常亮的圆斑[如图 4(b)]. 艾里斑的半角宽度 $\theta_0 = 1.22 \frac{\lambda}{D}$ (D 为圆孔的直径), 可以度量衍射光束的发散程度, 半角宽度越小, 则表示衍射效应越不明显. 当圆孔直径 $D \rightarrow \infty$ 时, 艾里斑的半角宽度 $\theta_0 \rightarrow 0$. 当艾里斑恰好收缩至几何光斑的边界时, 此时光即表现为沿直线传播, 这就是远场条件下衍射效应可忽略的极限情况.

3.2 从光的衍射看小孔成像

前面我们讨论过, 小孔所成“像”的实质就是汇聚的光斑. 几何光学视角下, 光斑是由光沿直线传播时遇到障碍物形成的, 而在波动光学视角下, 光沿直线传播又可以看成光衍射的极限行为. 所以, 小孔成像的过程实质上也是一个衍射过程^[11]; 物点通过小孔衍射后在光屏上形成一个相应的衍射图样, 当衍射效应不明显时, 该衍射图样与几何光斑十分接近, 且边缘也趋于分明. 对于一个成像物体, 每一物点都将如此在光屏上形成各自的衍射斑, 这许许多多的衍射斑的集合就构成了物体的像.

于是, 借助小孔成像这一经典光学问题, 我们将几何光学与波动光学联系起来, 整合了光现象和光本质, 对光的传播过程形成了深刻、全面的理解.

4 开展大概念教学的相关思考

4.1 以“真问题”整合知识

与“树阴下的光斑”问题类似, 生活中还有许多非理想情况下的“真问题”与中学物理课程紧密联系. 真问题源于生活实际, 往往会涉及多方面的影响因素, 因此, 需要联系大量物理概念、规律等进行考虑, 并通过一定的逻辑关系将其组织成特定的知识结构, 这也正是大概念产生的重要前提. 教学中应该

培养教师从实际情况中发现、提取“真问题”的习惯, 以“真问题”为抓手, 构建知识的内在联系, 发展学生的核心素养.

4.2 从“多视角”提炼大概念

在教学中, 小孔成像作为验证光在均匀介质中沿直线传播的证据, 理解起来并不复杂, 但若教师只着眼于单个知识点的教学, 便难以将大概念理念渗透于课堂教学深处. 教师可以尝试从不同视角分析问题, 寻找多视角下物理知识的关联, 逐步提炼出更上位的概念, 生成学科大概念. 大概念理念的目的不仅是让学生知道专家结论, 更要渗透专家思维, 培养整体、多元、变通的思维方式^[12].

4.3 用“高观点”审视问题

在初中阶段, 我们根据光沿直线传播的规律, 建立了“光线”模型来认识小孔成像; 到了高中, 则可以进一步延伸和拓展, 考虑衍射效应对像分辨率的影响; 而在大学物理的观点下, 才能真正将光的直线传播理解为衍射的极限情况, 将几何光学和波动光学联系起来. 由此可见, 教师站的层次越高, 越能把握物理学科的本质, 从整体视角构建物理学科知识体系, 并渗透思维和方法, 给学生构建一个完整的物理世界.

参考文献

- [1] 中华人民共和国教育部. 普通高中课程方案(2017年版)[M]. 北京: 人民教育出版社, 2018.
- [2] 李凯, 范敏. 素养时代大概念的生成与表达: 理论诠释与行动路径[J]. 全球教育展望, 2022, 51(3): 3-19.
- [3] 盛将. 小孔成像形状问题解决的教学实践[J]. 物理教师, 2020, 41(10): 45-47.
- [4] 陈宝军. “大孔成斑, 小孔成像”的定量研究[J]. 物理教学, 2022, 44(8): 37-39.
- [5] 郭永康. 光学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2017: 15-16.
- [6] 席桑田. 小孔成像成的是像吗? [J]. 物理教师, 2004(7): 35-37.
- [7] 唐大旺. 光发生明显衍射的实验探究与分析[J]. 物理通报, 2020(1): 114-115, 122.
- [8] 袁宇博, 赵小侠, 郭钊, 等. 基于圆孔的光近场远场衍射实验研究[J]. 大学物理实验, 2022, 35(1): 7-12.
- [9] 潘志民, 金凯文, 潘开欣. 关于“小孔成像”的研究[J]. 物理与工程, 2018, 28(4): 102-108.

(下转第 38 页)



图8 电势能模拟碰撞动能损失的等效模型

3 总结

本文以U型学习模式为立足点,从培养学生的核心素养出发,设计问题串引导学生对碰撞过程进行探究,旨在帮助学生把握碰撞本质,将前后内容融会贯通.以碰撞过程中的动能损失为出发点,以建立碰撞等效模型收尾,由点及面,将碰撞过程升华,达到知识的上浮与应用.采用逻辑性较强的问题串引导学生自主探究,加深学生的物理观念,培养学生的科学思维和科学探究能力,使学生形成解决复杂问题的核心素养.

在新课教学时,如果直接采用此探究过程,对学

生要求较高,开展难度较大,可以根据实际情况对不同部分进行调整.在教学实践中发现此探究过程更适合高三复习,能为学生创设问题情境,使学生在解决问题的过程中复习碰撞相关知识,加深对碰撞过程的理解,并实现知识的升华,以达到深度学习的目的.

参考文献

- [1] 刘月霞,郭华.深度学习:走向核心素养(理论普及读物)[M].北京:教育科学出版社,2018.
- [2] 中华人民共和国教育部.普通高中物理课程标准(2017版2020年修订)[S].北京:人民教育出版社,2020.
- [3] 李思敏,朱巧萍.基于学科核心素养的U型教学模式——以“气体的等温变化”为例[J].物理通报,2022(3):57-61.
- [4] 周伟波,李红伟,张建奋.体验式教学下碰撞模型的建构与迁移[J].中学物理教学参考,2022(28):14-16.

(上接第34页)

- [10] 张明霞.从光的衍射看光的直线传播及像质问题[J].天水师范学院学报,2001(5):15-17.
- [11] 元华.从光的衍射看小孔成像与大孔成影[J].物理通

报,1998(9):23-24.

- [12] 陈克超,冉洁,戴浩.基于课程标准之高中物理大概念解读与建构[J].物理教师,2020,41(9):11-14.

The Enlightenment of “True Problems” on the Teaching of Big Concepts of Physics

——Taking “Small Hole Imaging” under Geometric Optics and Wave Optics as an Example

WU Zengyu

(School of Teacher Education, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210023)

ZHONG Ming

(School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210023)

Abstract: Taking the “real problem” of keyhole imaging as an example, this paper deduces the principle and conditions of keyhole imaging from geometrical optics, and makes it clear that the essence of “image” is a collection of small light spots; Considering that the essence of light is electromagnetic wave, the linear propagation of light is understood as the limit performance when the diffraction is not obvious, and keyhole imaging is further discussed from the point of view of wave optics. This paper integrates the phenomenon and the essence of light, and discusses the physics teaching from the perspective of big concept.

Key words: big concept; keyhole imaging; geometrical optics; wave optics