

第二节 教学设计的案例

案例三 “以解决生活中的物理问题为中心的物理实验教学” 案例设计方案

课程的性质和定位

高级物理实验课程（区别于大学一、二年级的普通物理实验）是南佐治亚大学物理专业本科生的必修课，两个学分。该实验课程分两个学期授课。通常第一个学期做安排好的实验，第二个学期做自选实验，自选实验的授课时间为每周六个学时。授课的对象是大学物理专业三、四年级本科生。

教学设计理念

开放式的实验教学授课方式 培养学生自由理念及对学生进行社会文化的熏陶。

教学设计

教学目标

- 1) 以解决生活中的物理问题为中心 培养学生将物理概念学以致用能力；
- 2) 将实验教学与科研相结合， 培养学生动手能力和逻辑思维能力；
- 3) 将科研训练引入到教学中， 通过建立模型培养学生的数学基础和归纳能力。

教学过程与方法

教学内容 1：自聚焦透镜、海市蜃楼与热传导—折射率连续变化的研究：

夏天柏油马路上为何会出现海市蜃楼？

物理概念：

光的折射现象：根据费马原理，当光线在同一密度的均匀介质中传播时，光的速度不发生改变，光线沿直线传播。当光线由一种介质斜入射进入另一种密度不同的介质时，光的速度会发生改变，光线行进的方向也会发生弯折，产生光的折射现象。

自聚焦透镜：Gradient-index (GRIN)

是利用径向渐变折射率玻璃材料制成的。其工作原理是：当光线通过渐变折射率玻璃材料传输的时候，光线会自动往折射率较大的方向弯折（弯曲），随着这种弯折的不断延续，光线在这种以中心轴线为最大折射率，沿径向逐渐减小的柱状透镜中，会按一定的周期呈正弦曲线传输，自聚焦透镜跟传统的光学透镜功能是一样的，如图 1.所示。

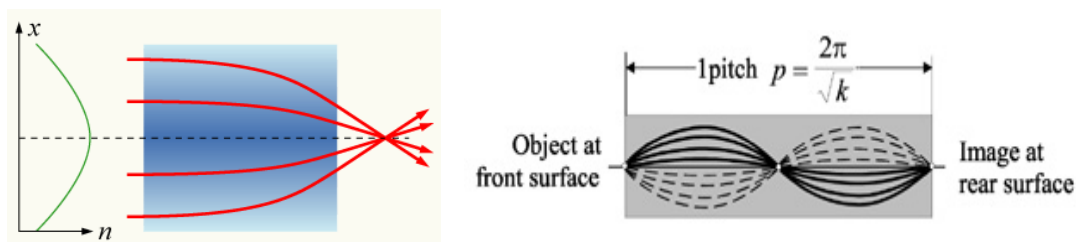


图 1.自聚焦透镜

海市蜃楼：有时地表的空气并不是一个均匀的介质，密度随高度变化，导致了折射率的不同。当光线穿过不同的空气层时，会引起折射，导致光线弯曲。一个常见的例子就是**夏季柏油马路表面引起的海市蜃楼现象**。柏油马路因路面颜色较深，夏天在灼热阳光下吸收很多热量，散热时造成路面上的空气的密度梯度，使穿过空的光线发生了弯折，使地面物体成像，形成蜃景，如图 2.所示。

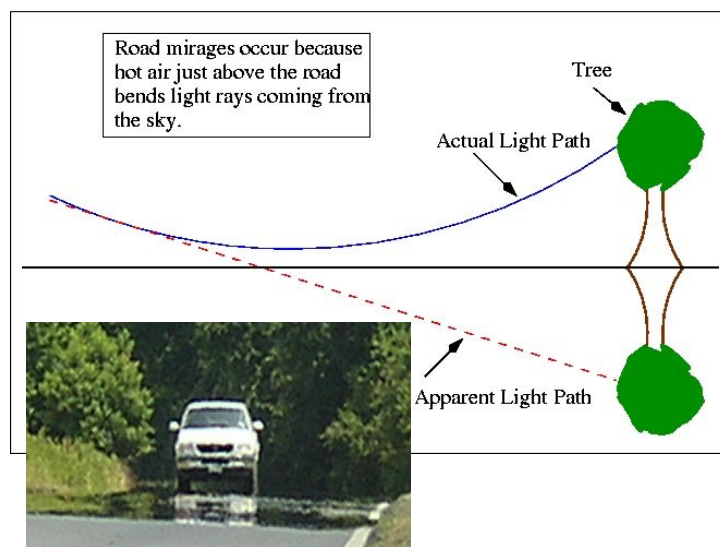


图 2.柏油路面海市蜃楼成因

研究问题：热的空气如何使光线发生弯折。

实验器材：激光笔、三脚架、绳子（较长，50英尺约150米）、泡沫板、卷尺

模型建构：将一定高度的空气层等间隔分成不同的区域进行数据测量

实验操作：

- 1) 将激光笔固定在三脚架上用来瞄准路面上的海市蜃楼；
- 2) 由于可逆性原则，激光的光束沿着海市蜃楼光线的路径行进；
- 3) 将激光笔发出的激光斑点放置在预先标记的水平位置并记下它的位置坐标；
- 4) 用泡沫板制作的屏观察激光斑点的位置，并用卷尺测量记下它的高度；
- 5) 用一根50英尺的绳子来预先标记激光斑点的水平位置，这种办法我们认为比用GPS定位系统更准确。

数据分析：

通过上述的测量数据进行空气折射率的确定。

- 1) 将数据进行拟合二次曲线；
- 2) 将人为分割的路面上方的空气层看作是由不同的薄层组成；
- 3) 每个薄层内与指定路径相切的直线被看作入射到下一个薄层界面；
- 4) 接下来在薄层的界面应用折射定律求出下一个薄层空气的折射率，如图5所示；
- 5) 重复上述的计算，直到求出光线的最终路径，如图4所示；

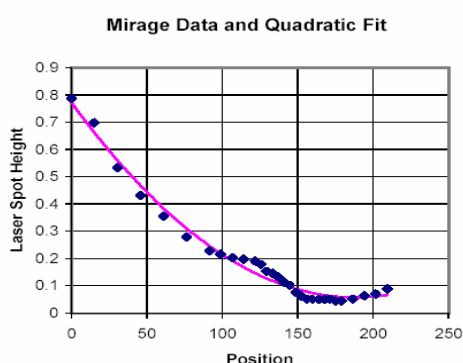


图3.实验数据及拟合曲线

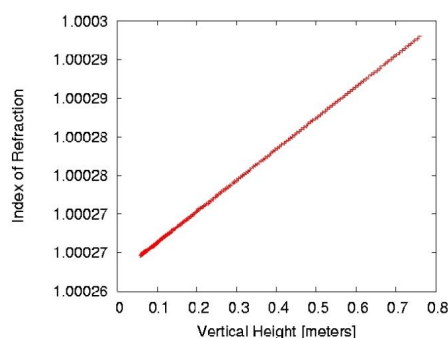


图4.空气折射率与高度的关系曲线

- 6) 假设光线行进的初始点为一个给定的值，该假设确定了垂直轴的刻度；
- 7) 该结果为与高度有关的空气的折射率，如图4所示。

建立模型：空气折射率模型的建立。

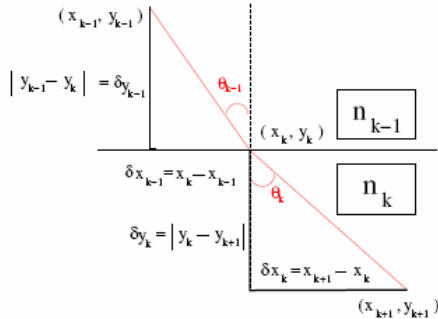


图 5.薄层界面处的折射定律

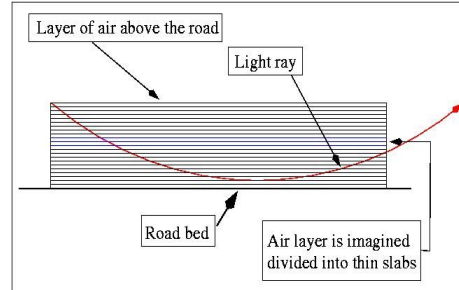


图 6.将空气分成薄层进行研究

1) 空气的折射率与空气的密度有关:

$$\rho = \beta(n-1)$$

2) 将光线行进的空气分成薄层进行研究，如图 6.所示;

3) 在垂直高度 y 的薄层是与温度 $T(y)$ 有关的理想气体，有

$$\frac{N}{V} = \frac{P}{k_B T(y)} = \rho$$

4) 如果温度 $T(y)$ 是 y 的函数，热传导方程式为:

$$\kappa \nabla^2 T(\vec{r}, t) = \frac{dT(\vec{r}, t)}{dt}$$

则有：
$$T(y) = \frac{T_h - T_o}{h} y + T_o$$

空气折射率的简化形式：

1) 对前面的假设进行整理，有

$$n(y) = 1 + \frac{(n_{air} - 1)}{\left(1 - \frac{T_o}{T_h}\right) \frac{y}{h} + \frac{T_o}{T_h}}$$

上式中 n_{air} 为垂直高度为 h 处的空气折射率, T_o 和 T_h 分别是高度为 0 和高度为 h 处空气的温度;

2) 假设 T_o 和 T_h 是与数据处理中的所用的值相同, n_{air} 是该简化形式中唯一的可调参数;

3) 如图 7.所示, T_o 的测量值为 120 华氏度;

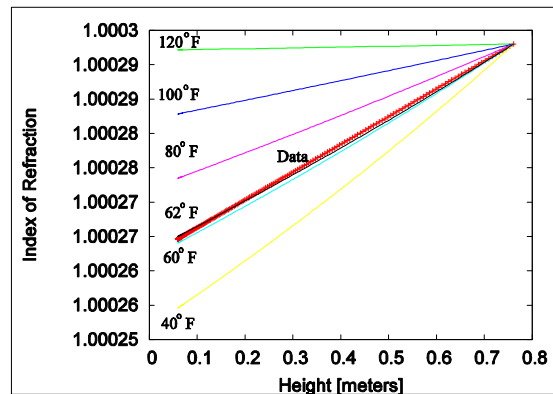


图 7.空气折射率随高度和温度的变

路面海市蜃楼小结:

- 1) 该实验使用激光笔测量了路面海市蜃楼的光线行进;
- 2) 用该光路确定了路面上方空气的折射率与高度有关, 是高度的函数;
- 3) 折射率的测量结果和在假设空气为理想气体状态下简化的折射率模型公式及标准的热传导方程计算的结果进行了比较,
- 4) 实验测量结果和理论验证假设模型计算的结果吻合的很好;
- 5) 该模型的建立对路面海市蜃楼的预测具有很大的意义。

教学内容 2: 瞬态热传导的光探针

介绍:

通过测量激光光束的偏转, 我们研究了瞬态热传导对光路中激光光束作为时间的函数的影响。通过这些测量的结果, 我们可以给出作为时间函数的热梯度。通过研究可以得到该实验中激光束的偏转与热梯度成正比例的关系。实验结果与理论吻合的很好。

实验背景:

光通过任何介质时,光的传播速度要比光在真空中行进的速度慢。光在真空中行进的速度常数与光在介质中行进的速度比值定义为介质的折射率定义。我们可以近似地把折射率看作是介质材料密度的函数并且与函数成比例关系。进一步而言,折射率与温度有关,也就是说,介质温度的增加将导致介质密度的减小,因而引起折射率的降低。因此可以通过热梯度的建立而得到折射率梯度。

实验方法:

用有机玻璃盒子内所装矿物油作为研究的液体样品,将盒子底部垫起放在一个如图 8.所示的冰水共存 0°C 的容器中。每次实验之前都要将盒子和矿物油放在没有影响的实验室内至少 24 个小时以上,保证实验液体样品与室温之间达到热平衡。放置激光使其垂直入射到样品。

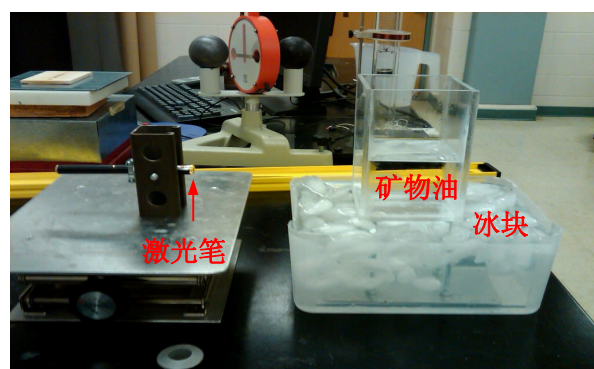


图 8.实验仪器装置

实验装置图:

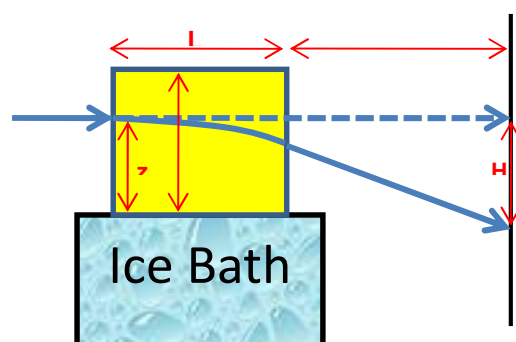


图 9.实验装置

理论分析:

与冰块接触后, 热量将从样品转移到冰块。我们知道, 水传导热的效率比空气大很多, 可以不考虑空气和样品之间存在的热对流。因此样品的温度只在与冰块接触的平面, 即垂直方向 Z 内发生变化。我们开始用热方程 $T(Z,t)$ 确定所有时间样品内每一点的温度变化。

传导方程:

热传导方程为:

$$h = -LR \frac{dn}{dz} = -LR \frac{dn}{dT} \frac{\partial T}{\partial z}$$
$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

其中, D 是介质的热扩散率。

初始条件: $T(z, 0) = T_a$ T_a 是溶化的环境温度 (或者室温)

边界条件: $T(0, t > 0) = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$
 $\partial T(H, t) / \partial z = 0$

H 为油面的高度

计算结果:

分离变量, 级数解及系数的确定:

$$T(z, t) = Z(z)\tau(t) \Rightarrow$$
$$\frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} = \frac{1}{D\tau} \frac{d\tau}{dt} = -k^2$$
$$T(z, t) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{1}{\pi} \frac{2T_a}{p + \frac{1}{2}} \sin \left[\left(p + \frac{1}{2} \right) \frac{\pi z}{H} \right] \exp \left[- \left(p + \frac{1}{2} \right)^2 \frac{\pi^2 D t}{H^2} \right] \text{ or}$$
$$\frac{\partial T}{\partial z} = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{2T_a}{H} \cos \left[\left(p + \frac{1}{2} \right) \frac{\pi z}{H} \right] \exp \left[- \left(p + \frac{1}{2} \right)^2 \frac{\pi^2 D t}{H^2} \right]$$

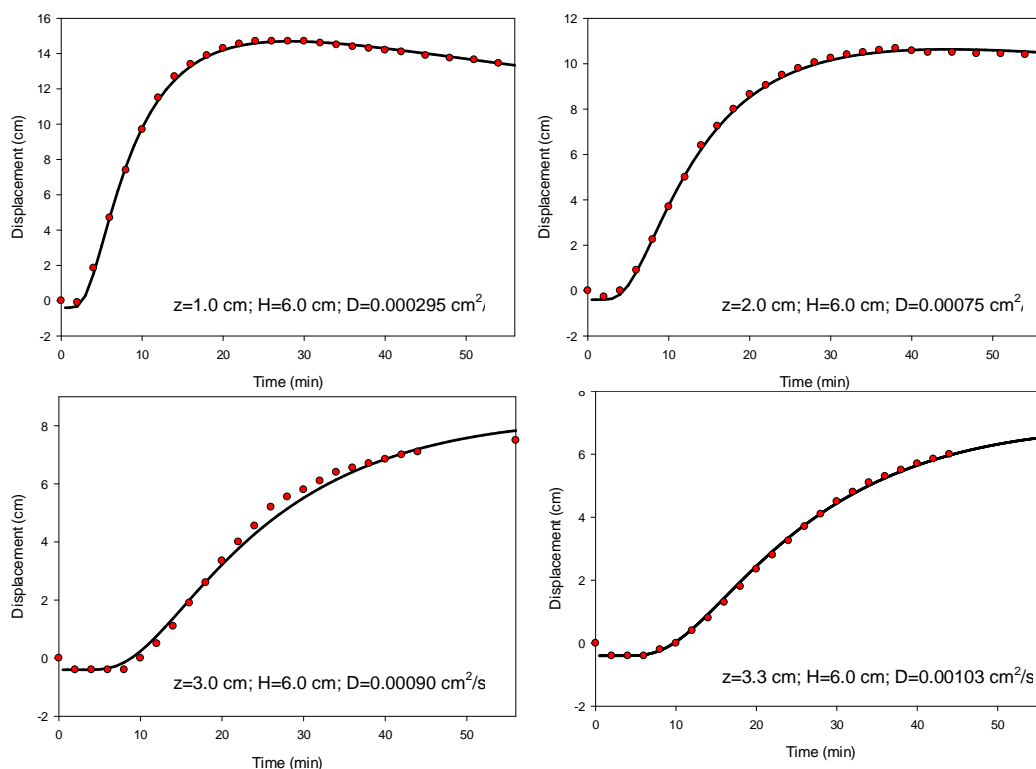
进行计算和参数的拟合:

$$h_{theory} = -LR \frac{dn}{dT} \frac{\partial T}{\partial z}$$
$$h_{exp} = h(z, t), \text{ 不同 } z \text{ 值}$$

激光束的偏转 h 与折射率梯度、介质的长度及介质到接受屏的距离成正比， dn/dT 为距离底部高度 Z 处液体样品的折射率梯度， L 为样品的长度， R 为样品到接受屏的距离，负号表示激光束偏转的方向向下。

拟合参数： $D, dn/dT$ 没有自由可调参数。

理论模拟和实验数据：



上述实验对学生进行的训练主要有以下方面：

- 1) 光的折射、费马原理及斯涅尔定律（折射定律）；
- 2) 自聚焦透镜、海市蜃楼、折射率变化及应用；
- 3) 热传导及扩散；
- 4) 偏微分方程及求解；
- 5) 数据拟合及计算机程序处理；
- 6) 误差分析。

实验拓展：

激光阵列的研究；

色散的研究；

其它边界条件的研究；

冷峰移动研究；

.....

感谢：

- 1) 南佐治亚大学物理系的 **Mark Edwards 教授**；
- 2) 高级物理实验课学生 **Allen Miller, Lucas Houser** 及历年注册此课程的学生。

参考文献：

- 1) B. Nelsen, L.M. Debeer, J. English, J.M. LoBue, and M. Edwards, “Study of Road Mirages as an Undergraduate Physics Project,” Private Communication (2004)
- 2) J. Brody, P. Andraea, and C.A. Roberson, “A Simple Optical Probe of Transient Heat Conduction” *American Journal of Physics* 78, 529-531 (2010)
- 3) A.J. Barnard and B. Ahlborn, “Measurement of refractive index gradients by deflection of a laser beam” *American Journal of Physics* 43, 573-574 (1975)
- 4) http://www.hk-phy.org/iq/mirage/mirage_e.html
- 5) http://www.hk-phy.org/iq/mirage/mirage_e.html

授课教师：马力，王笑军， 美国南佐治亚大学物理系教授

整 理 人：李金环 东北师范大学物理学院

【案例点评】

该教学设计案例的特点在于，开放式的实验教学授课方式培养学生自由理念及对学生进行社会文化的熏陶。以解决生活中的物理问题为中心，培养学生将物理概念学以致用能力；将实验教学与科研相结合， 培养学生动手能力和逻辑思维能力；将科研训练引入到教学中，通过建立模型培养学生的数学基础和归纳能力。