

文章编号:1005-4642(2023)04-0044-05

学  
生  
园  
地



## 基于 Phyphox 验证朗伯-比尔定律和 测多溶质溶液的浓度

施家凯<sup>†</sup>, 沈雅琪<sup>†</sup>, 马松山, 束传存

(中南大学 物理与电子学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 利用红/绿激光笔、手机、水槽等简单器材, 搭建了光度计模拟实验装置. 基于 Phyphox 软件, 利用手机的光敏传感器测量透射光的光强, 获得溶液层的吸光度随溶液浓度和厚度的变化关系. 结果表明: 溶液层的吸光度与溶液浓度及厚度成正比, 验证了朗伯-比尔定律. 以  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  溶液和  $\text{KCr}(\text{SO}_4)_2$  溶液为例, 测量了含有 2 种溶质的混合溶液各溶质的浓度.

**关键词:** 浓度; 多溶质溶液; 朗伯-比尔定律; Phyphox 软件

**中图分类号:** O436.2

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.19655/j.cnki.1005-4642.2023.04.007

Phyphox 软件是德国亚琛工业大学设计开发的基于手机传感器的物理实验软件, 可以实现对光强、加速度、磁感应强度、声音振幅、声音频率等多种物理量的测量<sup>[1-5]</sup>. 因此, 利用 Phyphox 软件, 可以很方便地实现利用日常生活中简单的器材, 设计实验装置, 开展实验, 探索、揭示物理规律的目的.

本文基于 Phyphox 软件, 利用手机的光敏传感器, 设计了实验装置, 实现了对朗伯-比尔定律的验证, 并进一步利用该装置, 测量多溶质混合溶液的浓度. 由于实验器材简单, 贴近生活, 该实验有利于学生自主设计实验, 激发其探索兴趣, 从而可实现培养学生分析问题、解决问题的能力并提高勇于创新、积极进取的科学素养的目的.

### 1 实验原理及思路

#### 1.1 朗伯-比尔定律

朗伯-比尔定律是光吸收的基本定律, 当单色光射入吸收介质, 由于介质的吸收, 通过一定厚度后, 光的强度减弱, 且吸收介质的浓度越大, 介质

的厚度越大, 则光强度的减弱越显著. 该现象可表示为<sup>[6-8]</sup>

$$A = \lg \frac{I_0(\lambda)}{I_t(\lambda)} = \epsilon(\lambda)bc, \quad (1)$$

其中,  $A$  为吸光度,  $I_0(\lambda)$  为入射光强度,  $I_t(\lambda)$  为透射光强度,  $\epsilon(\lambda)$  为吸光系数,  $b$  为介质的厚度,  $c$  为吸收介质的浓度.

#### 1.2 朗伯-比尔定律在多溶质溶液中的应用

当有多种吸光介质时, 若各介质互不发生化学反应, 则各介质的吸光度可以叠加, 其吸光度可表示为<sup>[9]</sup>

$$A = \lg \frac{I_0(\lambda)}{I_t(\lambda)} = \sum_i \epsilon_i(\lambda) b_i c_i, \quad (2)$$

其中,  $\epsilon_i(\lambda)$  为第  $i$  种介质的吸光系数,  $b_i$  为第  $i$  种介质的厚度,  $c_i$  为第  $i$  种吸收介质的浓度.

对于含有  $n$  种组分的混合溶液, 用  $n$  种不同波长的光分别入射, 则有:

$$\begin{cases} A_1 = b[\epsilon_1(\lambda_1)c_1 + \dots + \epsilon_n(\lambda_1)c_n], \\ A_2 = b[\epsilon_1(\lambda_2)c_1 + \dots + \epsilon_n(\lambda_2)c_n], \\ \dots \\ A_n = b[\epsilon_1(\lambda_n)c_1 + \dots + \epsilon_n(\lambda_n)c_n], \end{cases} \quad (3)$$

**收稿日期:** 2022-11-03; **修改日期:** 2022-12-11

**基金项目:** 湖南省普通高等学校教学改革研究重点项目 (No. HNJG-2021-0015); 中南大学教育教学改革研究项目 (No. 2020jy075); 中南大学大学生创新训练项目 (No. 202321078)

**作者简介:** 施家凯 (2001-), 男, 安徽蒙城人, 中南大学物理与电子学院 2019 级本科生. E-mail: 8202190610@csu.edu.cn

沈雅琪 (2001-), 女, 湖南辰溪人, 中南大学物理与电子学院 2019 级本科生. E-mail: syq8305190919@csu.edu.cn

**通信作者:** 马松山 (1971-), 男, 湖南隆回人, 中南大学物理与电子学院副教授, 博士, 研究方向为低维体系电子输运、量子调控. E-mail: songshan@csu.edu.cn

束传存 (1981-), 男, 安徽舒城人, 中南大学物理与电子学院教授, 博士, 研究方向为量子调控. E-mail: cc.shu@csu.edu.cn

<sup>†</sup>: 共同第一作者, 对本文贡献相同.

其中,  $A_i$  为第  $i$  种波长的光入射时的吸光度. 从式(3)中可以看出, 只要有足够多种类的单色光, 就能测量多种溶质的浓度.

## 2 实验过程与结果分析

### 2.1 实验装置与实验准备

以溶液为研究对象, 研究其光吸收规律, 并实现对多溶质溶液中各溶质浓度的测量. 考虑到朗伯-比尔定律是实验定律, 其适用条件为<sup>[7]</sup>:

- a. 入射光为平行单色光且垂直照射;
- b. 吸光物质为均匀非散射体系;
- c. 吸光物质之间无相互作用;
- d. 光与物质的作用仅限于光吸收, 无荧光和光化学现象发生;
- e. 吸光度适用范围在 0.2~0.8 之间.

实验过程中, 基于上述条件, 在实验精度允许的范围内, 就地取材, 利用简单的器材, 搭建实验装置, 实验装置实物图如图 1 所示. 实验器材主要包括: 激光笔、手机、透明水缸、铁架台、量筒、电子秤、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  粉末、 $\text{KCr}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  粉末、纯净水. 入射光通过红、绿激光笔获得, 其中红、绿激光笔最大功率为 10 mW, 峰值波长分别约为 650 nm 和 520 nm, 可近似视为单色光光源. 采用安装 Phyphox 软件和具有较灵敏光敏传感器的华为 nova4 型号手机, 可以探测可见光波长范围的光强. 水缸为透明玻璃材质, 长方体形状, 底为 16.8 cm × 22.8 cm. 水缸中溶液厚度  $b$  可通过加入缸中的液体的总体积除以水缸底面积得到. 吸光介质采用  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  溶液和  $\text{KCr}(\text{SO}_4)_2$  溶液,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  和  $\text{KCr}(\text{SO}_4)_2$  易溶于水而适于配制溶液, 形成均匀的非散射体系, 且无化学反应, 无荧光吸收.

实验器材的选择对实验精度有影响, 主要表现在:

1) 手机的光敏传感器. 手机的光敏传感器很小, 在手机面板较小的区域内, 对激光光路很敏感, 如系统略有震动即会导致光强示数发生变化, 影响实验精度.

2) 激光笔. 实验使用的红、绿激光笔出射激光并非严格意义的单色光, 其波长分布有一定范围, 从而对测量结果产生影响.

3) 待测溶液性质.  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  和  $\text{KCr}(\text{SO}_4)_2$  溶液对红色激光和绿色激光具有合适的吸光度,

但  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  溶液易水解产生  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  沉淀, 从而会对实验产生干扰. 实验过程中,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  溶液需要静置后, 取上层的溶液进行实验, 尽可能避免  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  沉淀对测量精度的影响.

4) 溶质、溶液的称量误差和器皿规格的误差也对精度有所影响.

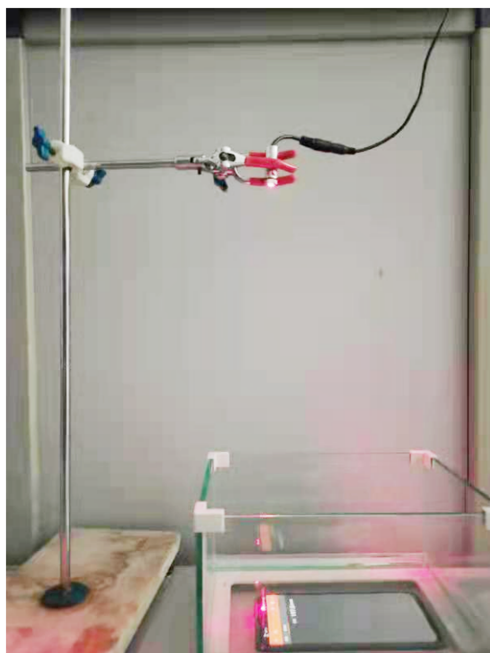


图 1 实验装置实物图

按图 1 实验装置将激光、装有清水的水缸以及手机依次组装, 打开激光笔, 让光线垂直射入水中, 在水缸下方利用手机测量透射光的光强. 考虑到激光笔出射光斑为高斯光斑, 中心能量最高, 而手机光敏传感器位于前置摄像头, 实验时让激光笔直射手机前置摄像头, 移动手机, 当手机接收到的光强示数达最大值时, 即可认为激光笔出射光已对准手机光敏传感器. 对于入射光线是否垂直入射, 可通过观测反射光线与入射光线是否重合来判断. 如存在反射光线与入射光线的偏移, 可调整激光器方向, 直至反射光线与入射光线重合, 即可认为入射光线垂直入射.

### 2.2 验证朗伯-比尔定律

首先对朗伯-比尔定律进行验证. 考虑到手机光敏传感器接收到的光强实际为经过空气、溶液、玻璃吸收及反射损耗后的光强  $I_1$ , 即有:

$$\lg \frac{I_0}{I_1} = \epsilon_1 b_1 c_1 + \epsilon_2 b_2 c_2 + \epsilon_3 b_3 c_3 + R, \quad (4)$$

其中,  $\epsilon_1 b_1 c_1$  为溶液的吸光度,  $\epsilon_2 b_2 c_2$  为空气层的

吸光度,  $\epsilon_3 b_3 c_3$  为玻璃层的吸光度,  $R$  为考虑反射因素的修正项. 实验过程中, 可忽略溶液浓度改变导致的反射率的变化, 同时, 考虑到空气吸收很小, 可以忽略  $\epsilon_2 b_2 c_2$ . 此外, 实验仪器组装好后, 只改变溶液层厚度和溶液浓度, 而玻璃层及反射因素对吸光度的影响保持不变. 因此, 可以把玻璃层的吸光度及反射因素修正项视为常量  $K$ , 故式(4)可改写为

$$\lg \frac{I_0}{I_t} = \epsilon_1 b_1 c_1 + K. \quad (5)$$

因激光器出射光强  $I_0$  过大, 直接测量超出了手机光敏传感器的可测范围, 实验中以待测溶液浓度  $c_1 = 0$  时的透射光强  $I_{10}$  作为定标光强, 即有

$$\lg \frac{I_0}{I_{10}} = K, \quad (6)$$

结合式(5)~(6), 可得

$$\lg \frac{I_{10}}{I_t} = \epsilon_1 b_1 c_1 = A. \quad (7)$$

基于 Phyphox 软件, 利用手机光敏传感器测出  $I_t$  随溶液浓度和厚度的变化关系, 即可验证朗伯-比尔定律.

为了验证溶液浓度对吸光度的影响, 以峰值波长为 520 nm 的绿光作为入射光, 量取 383 mL 的纯净水, 其厚度正好为 1 cm, 记录初始状态下的定标光强  $I_{10}$ , 添加一定质量的溶质, 并且忽略添加溶质对溶液体积的改变, 得到不同浓度下  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  溶液和  $\text{KCr}(\text{SO}_4)_2$  溶液的光强  $I_t$ , 得到吸光度与溶液层浓度的变化关系, 如图 2(a) 所示.  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  的直线拟合方程为

$$A = 0.006 0c - 0.08,$$

$\text{KCr}(\text{SO}_4)_2$  的直线拟合方程为

$$A = 0.008 8c + 0.06.$$

为了验证溶液层厚度对吸光度的影响, 在溶液浓度保持不变的情况下, 改变溶液体积, 可实现溶液层厚度的改变. 测量溶液体积从 200 mL 开始, 每增加 50 mL 记录 1 次数据, 直到吸光度约为 0.8 时停止记录, 结果如图 2(b) 所示, 其中  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  的直线拟合方程为

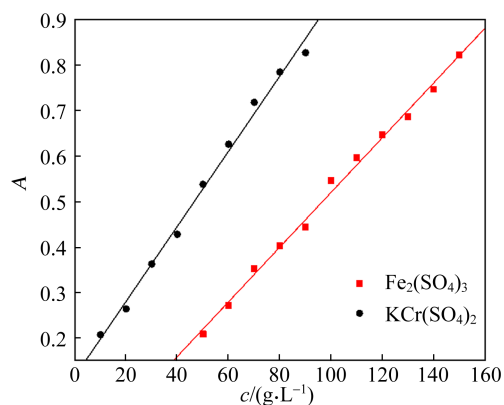
$$A = 0.60b - 0.05,$$

$\text{KCr}(\text{SO}_4)_2$  的直线拟合方程为

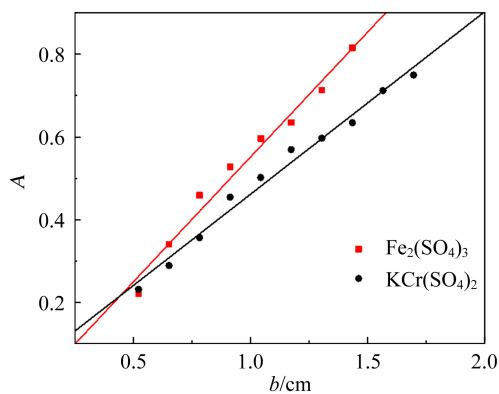
$$A = 0.44b + 0.02.$$

由图 2 可知, 溶液的吸光度均随溶液浓度和溶液层厚度的增大而增大. 实验结果表明: 在误差允许范围内, 拟合直线的截距可以忽略, 上述实

验装置可以验证吸光度与溶液层浓度和溶液层厚度满足正比关系, 即验证朗伯-比尔定律.



(a) 溶液层浓度的影响



(b) 溶液层厚度的影响

图 2 峰值波长为 520 nm 的绿光的吸光度与溶液层浓度和厚度的变化关系

### 2.3 混合溶液中各溶质浓度的测量

利用上述实验装置, 可以测量混合溶液中各溶质浓度. 以溶液只包含 2 种溶质的情况为例, 介绍测量混合溶液中各溶质的浓度的方法.

当溶液含 2 种满足朗伯-比尔定律适用条件的溶质时, 式(7)可表示为

$$\begin{cases} \lg \frac{I_{101}}{I_{t1}} = b\epsilon_1(\lambda_1)c_1 + b\epsilon_2(\lambda_1)c_2, \\ \lg \frac{I_{102}}{I_{t2}} = b\epsilon_1(\lambda_2)c_1 + b\epsilon_2(\lambda_2)c_2, \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $c_1$  和  $c_2$  分别为溶质 1 和溶质 2 的待测浓度,  $I_{101}$  和  $I_{102}$  分别为波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  单色光在待测物质浓度为 0 时的定标光强,  $I_{t1}$  和  $I_{t2}$  分别为波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  单色光经过待测混合溶液吸收后的透射光强,  $\epsilon_1(\lambda_i)$  和  $\epsilon_2(\lambda_i)$  ( $i=1, 2$ ) 分别为溶质 1 和溶质 2 对不同波长的单色光的吸光系数.

将峰值波长分别为 650 nm 和 520 nm 的红、绿激光近似视为单色激光,即认为  $\lambda_1 = 650$  nm,  $\lambda_2 = 520$  nm. 根据溶液浓度对吸光度的影响,确定红、绿激光透过  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  和  $\text{KCr}(\text{SO}_4)_2$  溶液的吸光系数. 具体过程如下:

1) 当溶液层厚度一定的情况下,改变溶液浓度,得到吸光度随浓度变化的线性关系. 测量结果如图 2(a)和图 3 所示. 图 3 中,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  的直线拟合方程为

$$A = 0.00151c - 0.03,$$

$\text{KCr}(\text{SO}_4)_2$  的直线拟合方程为

$$A = 0.0088c + 0.03.$$

2) 由所测得的吸光度随溶质浓度的变化关系,求出其斜率,即为特定波长下相应溶液的吸光系数,测量结果如表 1 所示.

3) 测待测浓度的  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  和  $\text{KCr}(\text{SO}_4)_2$  混合溶液在红激光、绿激光入射下的透射光强,测量结果如表 2 所示,其中混合溶液层的厚度为 1 cm.

4) 根据式(8)计算混合溶液各溶质的浓度.

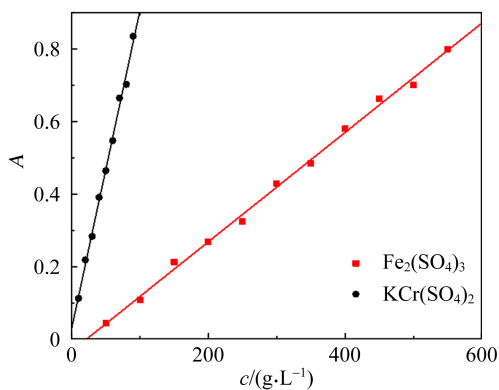


图 3 峰值波长为 650 nm 的红光时溶液吸光度随溶质浓度的变化关系

表 1  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  溶液和  $\text{KCr}(\text{SO}_4)_2$  溶液的吸光系数

$\lambda/\text{nm}$	$\epsilon/(\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1})$	
	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{KCr}(\text{SO}_4)_2$
650	1.506	8.763
520	6.013	8.807

表 2  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  和  $\text{KCr}(\text{SO}_4)_2$  混合溶液的透射光强

$\lambda/\text{nm}$	$I_0/I_x$	$I_1/I_x$
650	12 252	5 454
520	19 406	4 562

由式(8)得:  $c_1 = 61.24$  g/L,  $c_2 = 29.59$  g/L. 配置  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  和  $\text{KCr}(\text{SO}_4)_2$  混合溶液真实浓度  $c_1 = 60.00$  g/L,  $c_2 = 30.00$  g/L, 测量相对偏差分别为 2.07% 和 1.37%, 实验偏差均在 3% 以内. 利用该方法,可以对包含更多溶质类型的混合溶液的各溶质浓度进行测量,由式(3)可知,如果混合溶液中含有  $n$  种溶质,则只需要预先选定  $n$  种不同波长的单色光(如果需要提高实验精度,可以在入射激光前加装滤光片,让特定波长的光入射进入溶液),测出各单溶质溶液在不同单色光下的吸光系数,然后再测出不同单色光下进入溶液前的定标光强及经过多溶质混合溶液吸光后的透射光强,即可利用简单器材测量混合溶液各溶质浓度.

### 3 结束语

通过使用简单的器材及手机 Phyphox 软件,展示了如何使用光度计模拟装置验证朗伯-比尔定律,并且基于该装置测量了混合溶液中的各溶质浓度. 该实验装置和原理简单,实验操作方便易行,适合学生就地取材,开展自主探索实验,为培养学生的创新精神和科学研究兴趣提供了可行性参考.

### 参考文献:

- [1] 钱婷婷. 基于 Phyphox 软件的阻尼振动实验研究[J]. 物理教学探讨, 2021, 39(8): 47-48.
- [2] 王锦辉, 孙存英, 周红, 等. 利用智能手机磁传感器研究单摆运动[J]. 大学物理, 2021, 40(3): 33-37.
- [3] 景佳, 卯涛, 丁晓波, 等. 基于 phyphox 的重力加速度与海拔和纬度的关系探究[J]. 内江科技, 2021, 42(2): 104-105.
- [4] 伍科, 张旺. 基于 Phyphox 程序的“电磁感应定律”定量探究实验改进[J]. 物理通报, 2021(3): 108-110.
- [5] 易伟松, 余泉雄, 夏媛惠, 等. 基于智能手机研究无人机飞行高度与垂直速度[J]. 物理通报, 2021(8): 126-129.
- [6] 辛伍红. 朗伯-比尔定律的适用条件与限制[J]. 化工时刊, 2020, 34(7): 49-51.
- [7] 曹国庆, 钟彤. 仪器分析技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 9-11.
- [8] 皮埃尔·布格, 约翰·海因里希·朗伯, 奥古斯特·比尔. 朗伯比尔定律[J]. 数理化学学习(教研版), 2020(5): 2.



- [9] Li J W, Tong Y F, Guan L, et al. A turbidity compensation method for COD measurements by UV-vis spectroscopy [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2019,186:129-136.

## Verifying Lambert-Beer law and measuring the solute concentration of multi-solute liquids using Phyphox software

SHI Jiakai<sup>†</sup>, SHEN Yaqi<sup>†</sup>, MA Songshan, SHU Chuancun

(School of Physics and Electronic Science, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** A self-designed experimental instrument was set up using some simple devices, such as red and green laser pointers, mobile phone, sink, and so on. Based on the Phyphox software of mobile phone, the light intensity sensor of mobile phone was used to measure the light intensity of transmitted light. It was shown that the absorbance of the solution layer varied with the concentration and thickness of the solution. The results showed that the absorbance of the solution was proportional to the concentration and thickness of the solution, which verified Lambert-Beer law. Taking  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  and  $\text{KCr}(\text{SO}_4)_2$  solutions as the examples, the concentration of each solute in the mixed solution containing two solutes was measured.

**Key words:** concentration; multi-solute liquids; Lambert-Beer law; Phyphox software

[责任编辑:任德香]

## 公 告

为了充分发挥《物理实验》多年根植于大学、中学物理实验教育领域的优势,杂志决定将“物理实验(中学)”公众号与“物理实验”公众号进行整合,打通大学、中学物理教育之间的壁垒,加强大学与中学教师、学生间的学习和交流,探索大学物理教育与中学物理教育更好衔接的途径,从而深入推进“大中衔接”,完善基础学科人才贯通培养,健全人才成长链条。



“物理实验”公众号二维码

物理实验杂志

2023-04-06