

•科普•

doi: 10.3866/PKU.DXHX202304035

www.dxhx.pku.edu.cn

多彩的糖——旋光追踪蔗糖水解反应

司俊涛¹, 沈佳龙², 吴强华³, 吴红³, 江国顺³, 朱平平³, 冯红艳³, 金邦坤³,
王晓葵³, 李红春^{3,*}, 王钰熙^{3,*}

¹中国科学技术大学化学与材料科学学院材料科学与工程系, 合肥 230026

²中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家研究中心, 合肥 230026

³化学国家级实验教学示范中心(中国科学技术大学), 合肥 230026

摘要: 蔗糖溶液原本是无色透明的溶液, 在偏振片的帮助下, 可以使蔗糖溶液呈现出多彩的颜色。本文利用偏振片这一特性, 观测在不同浓度下蔗糖溶液分光能力的差异, 追踪蔗糖溶液在酸性条件下的水解过程, 并介绍了实验现象背后的科学道理。

关键词: 蔗糖; 旋光; 色彩; 水解反应

中图分类号: G64; O6

Colorful Sugar: Optical Rotation Tracking of Sucrose Hydrolysis Reaction

Juntao Si¹, Jialong Shen², Qianghua Wu³, Hong Wu³, Guoshun Jiang, Pingping Zhu³,
Hongyan Feng³, Bangkun Jin³, Xiaokui Wang³, Hongchun Li^{3,*}, Yuxi Wang^{3,*}

¹ Department of Materials Science and Engineering, School of Chemistry and Materials Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China.

² Hefei National Research Center for Physical Sciences at the Microscale, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China.

³ National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China.

Abstract: Initially colorless and transparent, the sucrose solution exhibited a stunning array of colors when viewed through a polarizer. This study utilized polarization characteristics to explore the variations in beam split capacity among different sucrose solution concentrations, while also tracking the hydrolysis process of sucrose under acidic conditions. The paper further elucidates the scientific principles underlying these experimental phenomena.

Key Words: Sucrose; Optical rotation; Colors; Hydrolysis reaction

人们可以通过颜色变化、沉淀或气体的产生、发光、放热等现象感知体系是否发生了化学变化。除了这些我们可以直接观察到的变化, 化学反应体系中因为新物质的生成, 体系的物理性质也随之发生了变化, 而这些变化并非仅用肉眼就可以直接观察到, 它们一般隐藏得更为隐秘, 需要通过使用一些技术手段去发现。这些物理性质通常包括光、电、声、磁等, 在大学物理化学实验中, 就会

收稿: 2023-04-11; 录用: 2023-07-12; 网络发表: 2023-08-17

*通讯作者, Emails: lihc@ustc.edu.cn (李红春); wangyuxi@ustc.edu.cn (王钰熙)

基金资助: 安徽省高等教育重大决策部署研究项目(2022jcbs066); 中国科学技术大学本科教学改革项目(2022xjyxm042, 2021xjyxm075); 首批教育部虚拟教研室(大学化学实验课程群虚拟教研室)

借助这些物理性质追踪在化学反应体系中物理信号随时间的变化,进行数据处理和理论分析得到不同状态下的体系的化学信息。

中国科学技术大学化学实验教学中心(国家级实验教学示范中心,以下简称为中心)设计并开发了演示型科普实验项目“多彩的糖——旋光追踪蔗糖水解反应”。该科普项目中,以蔗糖水解反应为例,以旋光度为被探测物理信号,赋予这个无色的化学反应以绚丽的色彩。

1 实验材料与装置

1.1 实验材料

实验材料包括蔗糖、白光照明光源、一套偏振片(Φ 200 mm)、玻璃缸(27 cm $\times$ 8.5 cm $\times$ 8 cm)、样品管(50 mL)。在实验探究部分使用了分析天平(CP323S)和旋光仪(WXG-4目视旋光仪)。在追踪蔗糖水解反应部分使用了盐酸。

1.2 演示装置

将光源、起偏器、样品池(管)、检偏器按顺序摆放,如图1所示。图1(a)的演示装置用于观察色彩以及追踪蔗糖水解反应,图1(b)的演示装置用于浓度探索部分。

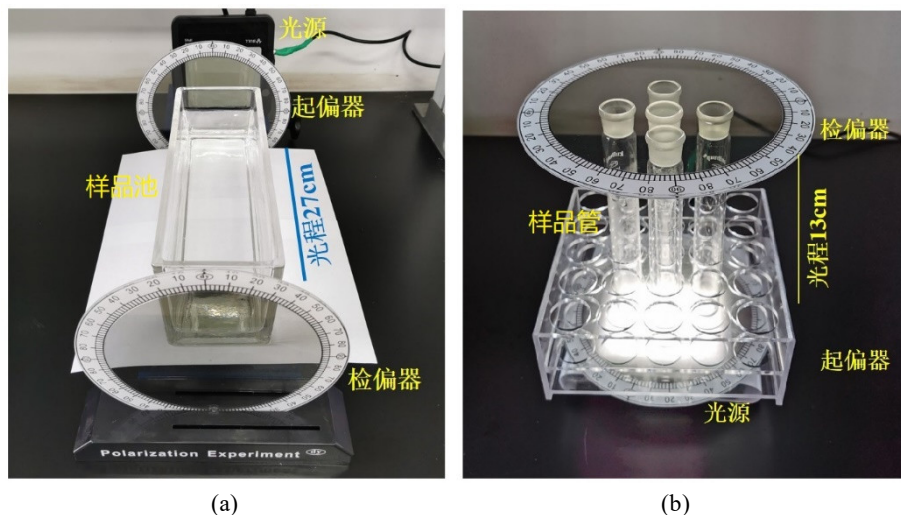


图1 演示装置图

(a) 用于观察色彩以及追踪蔗糖水解反应; (b) 用于浓度探索

1.3 测试装置

实验中采用WXG-4目视旋光仪进行旋光值的精确测量。钠光光线从光源经过起偏镜后,变成线偏振光,再经过半波片分解为寻常光与非寻常光,使得观测视场出现三分视野。样品管的溶液如果具有旋光性,会将平面偏振光旋转一个角度。转动检偏镜,从观测视场观察三分视野直至视场照度(暗视场)相一致时,度盘上可读出旋光值,用 φ 表示。振动面偏转的角度 φ 与溶液的浓度 c 以及光线在液体中通过的距离 L 有关。可表示为如下关系式:

$$\varphi = [\alpha]_D^t \cdot c \cdot L \quad (1)$$

这里, φ 为溶液的旋光值, $[\alpha]_D^t$ 为单位浓度和单位长度下的旋光值,称为比旋光度, t 代表温度, D 代表入射光波长,常规的钠灯光源波长为589.3 nm。

2 蔗糖的色彩

蔗糖变色探究之旅第一站的任务就是要找到被蔗糖藏起来的色彩,首先配制得到0.42 g·mL⁻¹的蔗糖溶液,使用WXG-4目视旋光仪测得其温度为25 °C、光程为10 cm的旋光值,根据式(1),换算得

到光程为27 cm时旋光值为78.4°, 将该糖溶液置于演示装置的样品池中(图1(a)), 我们直接观察到的蔗糖溶液是无色透明的液体, 然而通过检偏器却可以观察到绚丽的色彩变化, 如图2所示。

转动检偏器, 将检偏器与起偏器的透振方向从垂直转至平行, 在这个过程中, 颜色连续不断地变化, 如图3所示, 从蓝色系开始, 黄色系结束, 经历多种美丽的色彩。

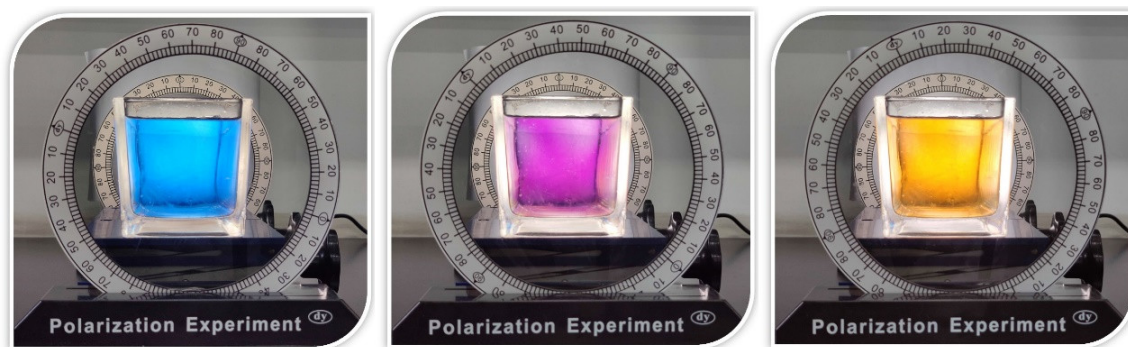


图2 转动检偏器时溶液所呈现色彩

从左到右, 起偏器与检偏器之间的夹角分别为110°、138°、154°

电子版为彩图, 下同



图3 转动检偏器时蔗糖溶液的颜色呈现图

从左到右, 从上到下, 起偏器与检偏器之间的夹角分别为85°、90°、96°、108°、115°、122°、126°、127°、130°、131°、132°、140°、144°、148°、151°、162°

蔗糖溶液的色彩现身了, 这个现象既神奇又美丽。其实验原理要从旋光性说起, 19世纪, 化学家们发现, 手性物质具有旋光性。手性物质指的是镜面对称但不能重合的分子, 比如含有手性碳的分子。手性碳指的是一个碳原子上连了四个不同的基团, 由于基团连接顺序的不同会导致分子的对映异构现象。如图4所示, 可以看到这两个分子虽然镜像对称, 碳原子上连接的基团也完全相同, 但却仅仅因为基团连接顺序的不同而无法重合, 就好比是我们的左手与右手。分子的旋光性最早在19世纪由巴斯德发现。他发现酒石酸固体存在两种不同的结晶形态, 这两种不同形态的结晶形成的溶液时会使光往相反的方向旋转, 因而发现分子有左旋与右旋的不同结构。令人难以置信的是, 当年巴斯德竟然是在显微镜下, 将左旋与右旋的酒石酸晶体一点一点地挑选开来的^[1], 这也启示我们做科学研究要有足够的勇气和耐心。

蔗糖就是一种手性物质, 具有旋光性。当光经过蔗糖溶液后, 光线的偏振方向会发生旋转, 而且波长不同的光线旋转的角度也不同, 这就是旋光现象。实验中使用的是白光光源, 包含着在垂直于传播方向上沿一切方向振动的光。当光经过起偏器后, 所包含的所有波长的光均变为同一偏振方向的平面偏振光, 可以认为不同波长的光都站到了同一起跑线上, 起跑线的标准是“偏振方向”。

紧接着,平面偏振光进入蔗糖溶液,偏振方向发生变化,如图5所示。可以想象为各波长的光沿着偏振方向这条赛道上起跑,因物质旋光值与波长成反比^[2],故蓝光跑的角度大,黄光跑的角度小。经过一定光程,到达检偏器时,他们具有了不同的偏振方向,当然,蓝光的偏振方向旋转角度更大。比赛结束后,到“颁奖”的时间了,从第一名——蓝光开始,到最后一名——黄光为止,各种颜色的光站上颁奖台,依次亮相!对应到我们的实验操作呢,就是转动检偏器,改变检偏角,使得符合透振方向的波长的光依次透过,就会依次显示出如图3所示的色彩变化。

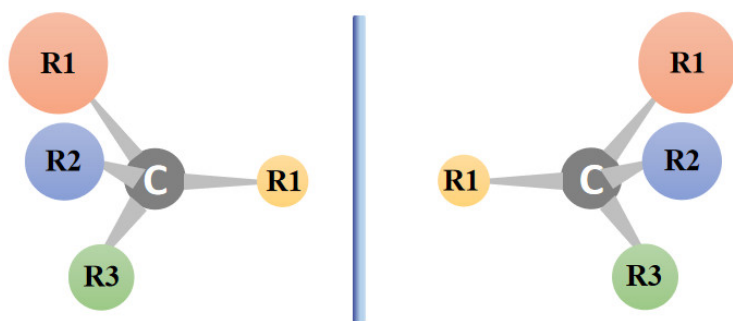


图4 手性碳示意图

C是碳原子, R1-R4分别是四个不同的基团

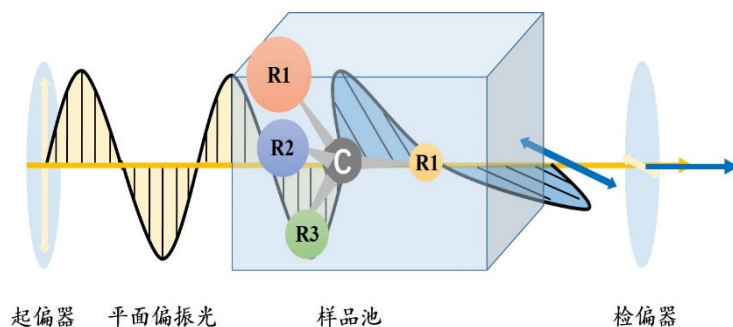


图5 平面偏振光通过旋光物质后的偏振方向旋转示意图

在起偏器和检偏器的帮助下,我们让原本无色透明的蔗糖溶液展现出多彩的颜色。除了蔗糖之外,生活中还有很多其他常见的物质都具有旋光性,比如蜂蜜、水果中提取的柠檬酸等,感兴趣的小伙伴们可以自己动手尝试尝试!

3 浓度的影响

成功找到被蔗糖隐藏起来的色彩后,继续我们的探究之旅,这一站的任务是探究蔗糖浓度对溶液分光能力的影响。我们配制了浓度分别为0.00、0.06、0.12、0.18、0.24、0.30 g·mL⁻¹的蔗糖溶液,并测试了室温下光程为13 cm时各溶液的旋光值,分别为0.0°、5.3°、10.7°、15.6°、21.0°、27.0°。将各个浓度的蔗糖溶液放置于样品管中,通过演示装置(图1(b))观察色彩。如图6所示,蔗糖浓度越大,旋光值越大,旋转检偏器溶液所能呈现的色彩越丰富,说明旋光值越高的溶液分光能力越强。

为什么不同浓度的溶液分光效果会有如此大的差异呢?其实,背后的本质原因还是在于旋光值。在一定光程下,旋光值与溶液浓度成正比。蔗糖溶液浓度越高,旋光值越大,意味着不同波长的光通过溶液后偏振方向的旋转角度差别更大,故分光能力越强,在旋转检偏器时所呈现的颜色也就越多。

同时我们也发现,保持起偏器与检偏器透振方向的夹角不变,不同浓度的蔗糖溶液所呈现的颜色也不相同,如图6的每张小图所示。这也是很好理解的,正如上面所说,固定起偏器与检偏器透振方向的夹角时,不同浓度的蔗糖溶液的旋光值是不同的,光程一定的情况下,符合检偏器透振方向的光线颜色也是不同的,所以呈现出的颜色不同。

通过对浓度的探索,我们可以得到两个重要的结论:(1)通过增加蔗糖溶液的浓度,可以增大旋光值,使得溶液分光能力增强,可呈现的颜色越多。(2)固定起偏器与检偏器透振方向的夹角,不同浓度的蔗糖溶液会呈现不同颜色。



图6 起偏器与检偏器透振方向从垂直到平行的转动过程中,不同浓度蔗糖溶液的不完全显色呈现

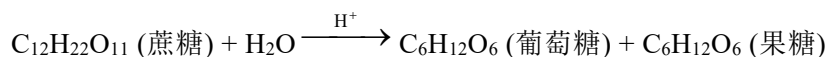
8张小图的中间管为 $0.30 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$,上管为 $0.24 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$,左管为 $0.18 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$,下管为 $0.12 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$,右管为 $0 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$;

从左到右、从上到下,起偏器与检偏器之间的夹角分别为 90° 、 78° 、 70° 、 64° 、 59° 、 57° 、 55° 、 44°

4 追踪蔗糖水解反应

现在我们可以向蔗糖变色探究旅程的最后一站——追踪蔗糖水解反应进发了。首先配制高浓度的蔗糖溶液(为了获得好的分光效果,以便观察到更连续的色彩变化),采用图1(a)的演示装置,调节检偏器的角度使得初始颜色为淡蓝色后,固定好起偏器与检偏器的夹角。加入一定量的稀盐酸并混合均匀,作为反应的起始点开始计时。反应体系中,蔗糖的初始浓度为 $0.36 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$,旋光值为 67.2° ,盐酸浓度为 $0.17 \text{ mol}\cdot\text{mL}^{-1}$,反应温度在 55°C 左右。

蔗糖水解反应式如下:



反应物蔗糖为右旋物质,比旋光度为 $+66.6^\circ$,产物中,葡萄糖为右旋物质,比旋光度为 $+52.5^\circ$,而果糖是左旋物质,比旋光度为 -91.9° ,随着反应的进行,体系的旋光值不断减小。为了方便观察,我们在演示装置(图1(a))的左侧设置了对比实验,左侧样品池中进行着条件相同的反应。从0 min开始,每隔一段时间记录下蔗糖溶液的颜色,如图7所示。

随着反应的进行,体系的旋光值逐渐下降,导致透过检偏器的光的颜色从一开始的淡蓝色变成深蓝色,而后变为紫色,最终变为淡黄色。如果没有偏振片这双眼睛,我们难以觉察到这无色透明的液体正在发生反应。其实啊,化学反应体系在物质结构发生变化的同时,它也在透过自己的光、电、热、声、磁等物理性质,向外界述说着自己的多姿多彩,只是,一切都藏得很隐秘,你,准备好去发现它了吗?

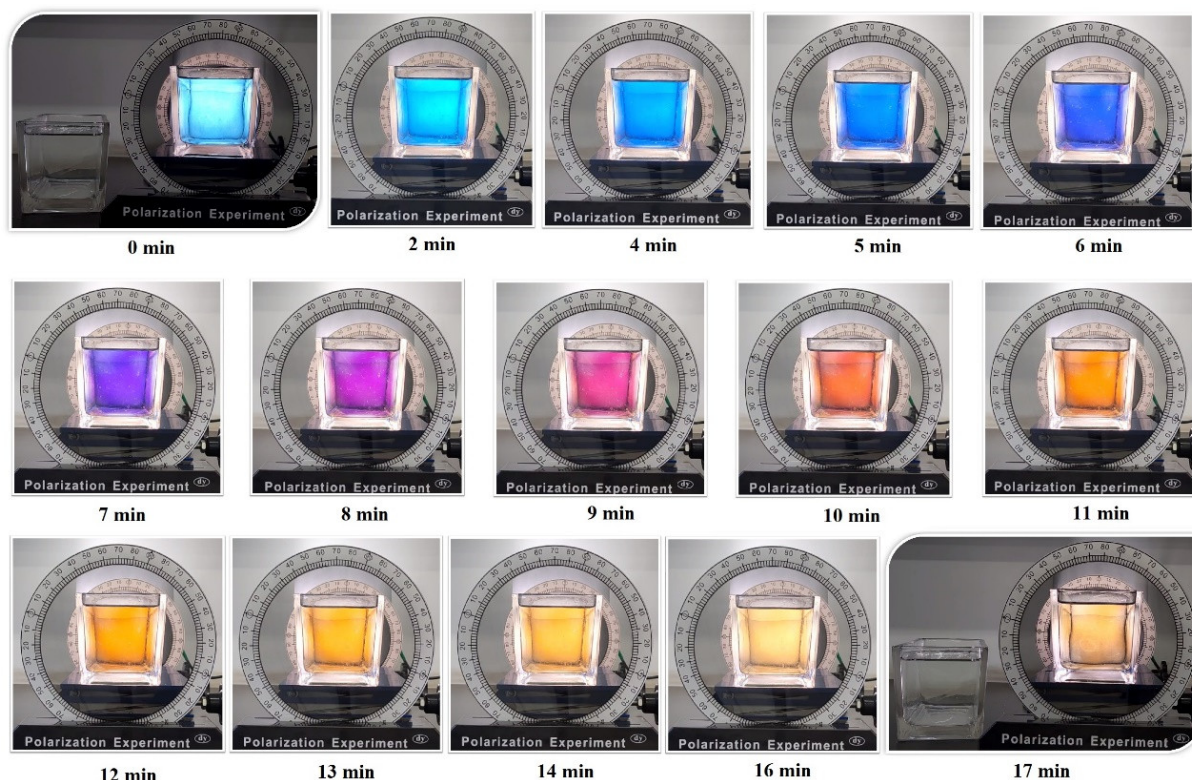


图7 蔗糖水解过程中颜色变化图

5 结语

蔗糖分子含有手性碳而具有旋光性，光穿过蔗糖溶液后的偏振方向发生旋转，且不同波长光线偏振方向的变化程度不一样，改变起偏器与检偏器的夹角，则可以观察到色彩的变化。体系的旋光值越高，则分光能力越强，色彩变化越连续。另外，固定起偏器与检偏器透振方向的夹角，不同浓度的蔗糖溶液会呈现不同颜色，我们利用这一点将其用于追踪蔗糖的水解反应，让原本肉眼看不出变化的化学反应呈现出多彩的颜色变化。该科普实验在本校物理化学基础实验反应动力学实验模块中作为演示内容，很好地激发了同学们的实验兴趣。

在2021年，“多彩的糖”参加科技周直播活动，该活动接受了新华社报道，见图8。在2022年，该科普实验参与了“美食与化学”主题直播活动，该活动同时在新华网、央视频、中国科大本科招生Bilibili站账号同步直播，深受观众喜爱。该科普实验具有以下特点。

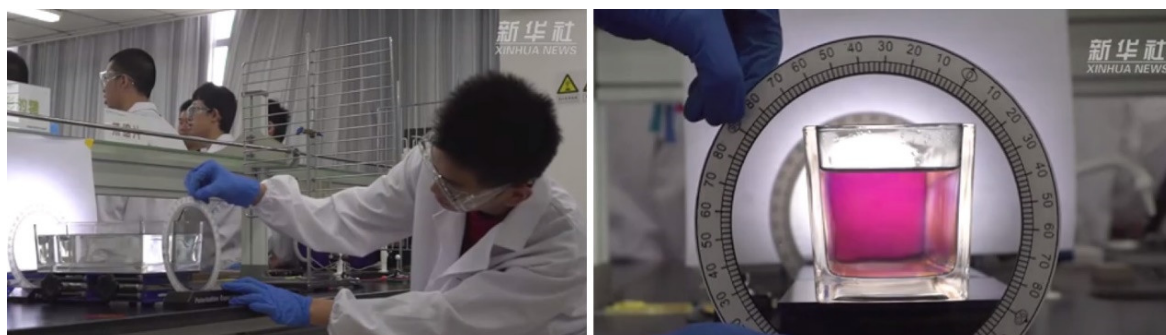


图8 中心科技周直播活动新闻片段

5.1 实验简单，易于操作

蔗糖的色彩和浓度的影响这两部分的实验材料安全易得，实验装置简单，易上手操作，可以作为居家实验，由家长带着孩子操作。追踪蔗糖水解这一部分内容，因为需要在短时间看到明显的色彩变化现象，需提高反应速率，我们使用了盐酸作为催化剂，且选用了较高的反应温度，更适合作为演示实验。

5.2 现象明显，易于观察

在偏振片的帮助下，我们让原本无色透明的蔗糖溶液展现出各种色彩，能引起小孩子的好奇心。在科普周活动中，可以邀请小孩子们选择不同浓度的蔗糖溶液，转动偏振片观察现象，体会科学的奥秘。

5.3 原理深刻，引人思考

“多彩的糖”科普实验背后隐藏着丰富的物理化学知识，当我们将深刻的原理转化为直观而又美丽的颜色变化后，不免会让孩子们思考实验现象背后究竟蕴含了怎样的科学道理，会在他们心中埋下一颗学习科学知识的种子。

参 考 文 献

- [1] Pasteur, L. *Paris* **1848**, 26, 535.
- [2] 王钢, 廖德驹. 物质旋光率随光波波长变化的研究//全国高等学校第十届物理演示实验教学研讨会论文集. 全国高等学校第十届物理演示实验教学研讨会, 天津, 2011年7月26-28日. 天津, 2011: 180-182.