

各种色光都是由三原色光合成的吗

杨大卫

(河北师范大学 050024)

《国家中小学智慧教育平台》(<https://www.zxx.edu.cn/>)播放的《课程教学》初中八年级物理(人教版上册)第四章第五节“光的色散”中授课教师在课堂总结时说:“各种不同颜色的光都是由三原色(红、绿、蓝)光按一定比例混合而成的。”(这节课视频总时长为24分52秒,该句出现自23分43秒至23分53秒。)

这种说法源于初中物理课本的叙述:“红、绿、蓝三种色光按不同比例混合后,可以产生各种颜色的光。”(见图1上述平台的《教材》物理人教版八年级上册)

这句话应纠正为:“红、绿、蓝三种色光按不同比例混合后,可以产生各种色光的视觉效果。”

为了说明这一纠正,我们可以通过实验验证和视觉生理分析两方面进行。

不过为了使教材编辑更易于接受这一纠正,我们可以先将“光与视觉”跟同一教材中的“声与听

觉”相对比,做些铺垫。

声可以传递信息和能量,光也能传递信息和能量。人教版初中课本的第二章强调“声既可以传递信息又可以传递能量”,还介绍了听觉器官的构造与工作原理,可在第四章却不谈光也能传递信息和能量,不讲视觉器官的工作原理。这不仅彼此不相呼应,而且不符合新课标对信息和能量的学习要求。

初中生知道,人接收可闻波靠听觉器官,接收可见光则靠视觉器官。声既有响度强弱的区别,又有音调高低的差异,响度决定于振幅,音调决定于频率。

类似地,可见光也是既有亮度明暗的区别,又有颜色艳素的差异,亮度亦决定于振幅,颜色亦决定于频率(表1)。

我们的听觉既可以识别可闻波响度的强弱,也可以识别可闻波的音调的高低。类似地,我们的视觉既可以觉察可见光亮度的明暗区别,也可以分辨可见光颜色艳素的差别。

色光的混合

人们发现,红、绿、蓝三种色光,按不同比例混合,可以产生各种颜色的光,因此把红、绿、蓝三种色光叫色光的三原色(图2.5-3)。

彩色电视机画面上的丰富色彩就是由三原色光混合而成的(图2.5-4)。



图2.5-3 色光的三原色

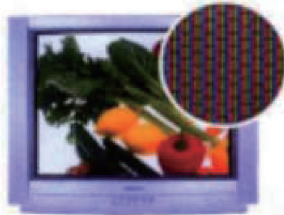


图2.5-4 电视画面的颜色是由红、绿、蓝三种色光合成的

图1

表 1

可见光的光谱		
颜色	真空中的波长	频率
红色	约 625—740 nm	约 480—405 THz
橙色	约 590—625 nm	约 510—480 THz
黄色	约 565—590 nm	约 530—510 THz
绿色	约 500—565 nm	约 600—530 THz
青色	约 485—500 nm	约 620—600 THz
蓝色	约 440—485 nm	约 680—620 THz
紫色	约 380—440 nm	约 790—680 THz

在对视觉、听觉类比的基础上,我们再进行实验,找出二者器官功能的不同。

[实验一] 由两支固有频率不同的音叉混响的听觉效果,不会与任何一支具有其他固有频率的音叉单独奏响的听觉效果相同。

例如低音 $\dot{6}$ 和高音 $\dot{6}$, 其频率分别为 220 Hz、880 Hz, 但二者不会合成为频率为 440 Hz 的中音 $\dot{6}$ 。也就是说, 它们的唱名虽然都是“la”, 但低音 la ($\dot{6}$) 与高音 la ($\dot{6}$) 不仅不会合成为中音 la ($\dot{6}$), 而且二者也不会被我们的耳朵同时接收后感觉为中音 la ($\dot{6}$)。听觉仍然能够分辨它是二者的复合音。

结论: 声波符合波传播的独立性原理。

[实验二] 由红光与绿光混合照射得到的视觉效果, 可以与单色黄光照射的视觉效果相同, 看起来似乎是红光与绿光复合后形成了“黄光”。难道光波不符合波传播的独立性原理?

[实验三] 由红光与绿光混合照射所形成的所谓“复合光”仍可被三棱镜分解还原为红光和绿光, 其中根本找不到一丝一毫黄光; 而单色的黄光无论如何也不会被分解为红光和绿光。

结论: 光波亦符合波传播的独立性原理。

实验证明了无论是人教版初中物理教材所写“红、绿、蓝三种色光按不同比例混合后, 可以产生各种颜色的光”, 还是上述视频课中所说的“各种不同颜色的光都是这三种色光按一定比例混合而成的”, 这两种说法都是错误的。

那么, 问题出在何处呢? 明明看到红光与绿光混合后产生了“黄光”, 难道眼见不为实吗? 是的, 眼见不一定为实! 问题就出在视觉上。由红光与

绿光混合照射后产生的视觉效果是生理效应, 而不是真正的物理效应。

让我们了解一下视觉器官的生理结构及其工作原理。

视觉器官感受亮度的功能叫做视觉器官的光感, 辨别颜色的功能叫做视觉器官的色觉。光感与色觉是由视觉器官中两套相互独立的系统来执行的, 色盲症患者虽色觉不全但光感仍可以正常, 就说明了这一点。而听觉器官感受声强与辨别音调的是同一个系统。

光感功能由暗视系统完成, 以视网膜中的杆状视神经细胞为接收器(对 505~510 nm 的光最敏感), 在低照度情况, 只有杆状细胞才能被可见光辐射所触发, 产生对照度明暗的视觉; 在强光下, 杆状细胞的灵敏度会大为降低, 故它主要在弱光下工作。

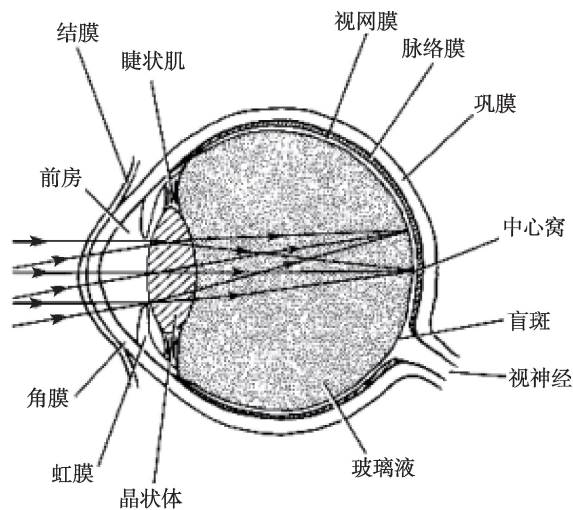


图2 人眼纵截面的水平光路图

而色觉功能由明视系统完成, 以视网膜中的锥状视神经细胞为接收器(综合响应对 550~555 nm 的光最敏感), 主要在较强光下工作。锥状细胞又含 L、M、S 三种, 分别对波长为 664、534 和 420 nm 的光最敏感(大约对应红色、绿色和蓝紫色, 图4)。

这三种响应并不是恰好分别覆盖对红色(625~740 nm)、绿色(500~565 nm)和蓝色(440~485 nm)的响应, 而是可以分别对三原色(红、绿、蓝)光各自产生不同强度的响应。如果 L 细胞受到的刺激略大于 M 细胞, 人的感觉是黄色; 如果 L 细胞受到的刺

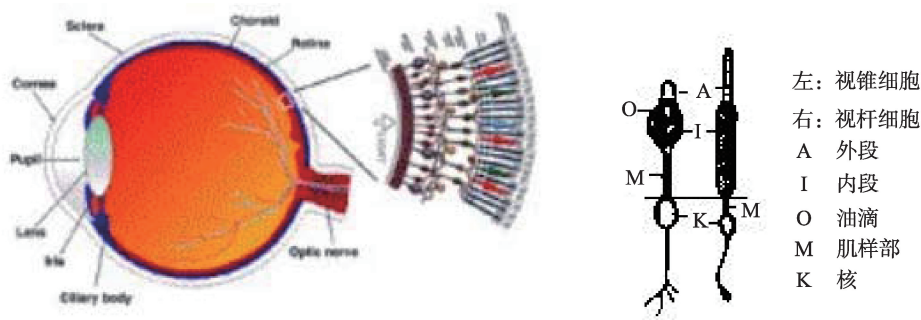


图3 视网膜的结构以及视网膜中的杆状细胞和锥状细胞

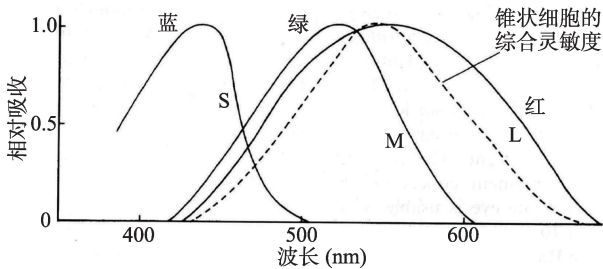


图4 三种锥状细胞各自的响应以及综合响应

激大大高于M细胞,人的感觉是红色。将三原色光以不同的比例复合后,人的眼睛对复合光可以形成与该比例对应的某单一频率的可见光等效的色觉。例如,红光与绿光按某种比例复合,对三种锥状细胞刺激后产生的综合色觉可与视网膜对单纯的黄光的色觉等效。

所以,红光与绿光混合后并不能生成另一种频率的新光——黄光,二者的混合光波中的红光和绿光仍然各自存在,只是其色觉与黄光相同。即由红、绿混合光对锥状视觉细胞的刺激反映到大脑,跟黄光对锥状细胞的刺激反映到大脑后的效果相同。

所以,把红、绿、蓝三种色光按不同比例混合后,并不能产生各种颜色的光,只是产生了与某种色光相应的视觉效果。”也就是说,所谓色光的“合成”并不是物理效应,它只是光频的生理效应。

更进一步,揭其本质,听觉之所以不能起到类似的效果(两支不同频率的音叉混响的听觉效果,不会与某支其他频率的音叉独响的听觉效果相同),不仅是由于听觉的传感器与视觉的传感器的构造不同,而是由于二者工作原理的不同,后者是复杂的光化学原理,而前者仅是简单的机械原理。

所以,不会像“三原色”似的有“三原声”。

那么所谓的光化学原理又是什么呢?

对明暗(黑白)感受具有较高灵敏度的杆状细胞,光先通过神经结合处的外层,再到达这些感受器中的色素物质。在杆状细胞中有一种叫做视紫质(rhodopsin)的色素(其颜色看起来是紫色的),该色素是一种分子量约为40000 amu的复杂蛋白质,其吸收曲线如图5所示。该分子在柱状细胞内分层排列,大约20 nm厚500 nm宽,重量可达该细胞净重的35%。在光辐射的影响下,其中一小片会脱离,这一小片载色体(chromophore),是一种维生素A的衍生物,被称作视黄醛(retinaldehyde),其分子量为286 amu。其双键中的一条会在1皮秒(10^{-12} s)内吸收光子从折拐构型变为贯穿构型(图6)。

剩下的部分是一种叫做视蛋白(opsin)的无色蛋白质。在视紫质(rhodopsin)分子分裂过程中的某个阶段会产生瞬间的视觉刺激。这种反应引起感受细胞膜对钠离子渗透性能的改变,进而导致细胞电势的改变。这一电势变化通过神经细胞传播到大脑。此后,视紫质分子会缓慢地再生。

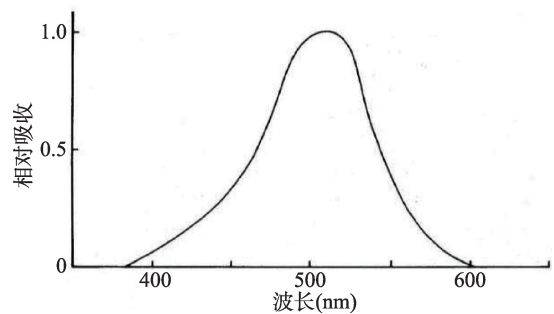


图5 杆状细胞的响应曲线

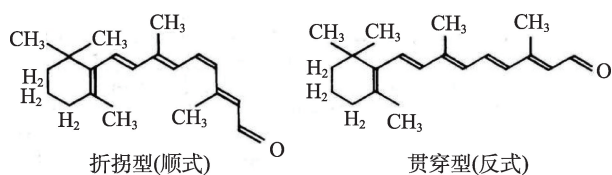


图6 通过吸收一个波长约 500 nm 的光子，
杆状视觉细胞中视黄醛的分子构型变化

锥状细胞的响应大概也有类似的机制。在锥状细胞发现了一种叫作视青质(iodopsin)的色素,这种色素所含的视黄醛基(retinaldehyde group)有三种,各自具有不同的分光灵敏度特性(图4),作为比较,锥状细胞的综合灵敏度曲线也一并画出。

在强光下,杆状细胞中的许多视紫质分裂为视蛋白和视黄醛,因而其灵敏度大为降低。尽管锥状

细胞的灵敏度仅为杆状细胞最高灵敏度的1%左右,可色视觉还主要是由锥状细胞提供的。三种锥状细胞的联合作用才产生了对颜色的视觉。在低照度情况,只有杆状细胞才能被可见光所触发,产生对(黑白)明暗的视觉。杆状细胞和锥状细胞的综合灵敏度曲线是不同的(图5和图4),前者的峰值大约为 505 nm 至 510 nm,而后者为 550 nm 至 555 nm。

当然,上述的光化学反应所产生的电信号都要通过视神经传递给大脑。

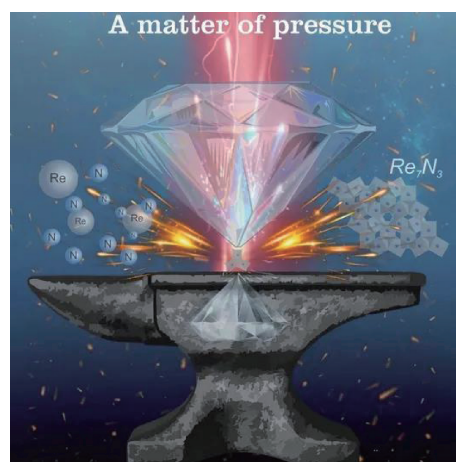
综上所述,通过波传播的独立性原理实验、视觉器官的生理机制及其光化学本质,说明了各种色光实际上并不是由三原色光合成的,视觉效果不能代表物理本质。

科苑快讯

在类似天王星中心的极端压力下进行材料合成研究

材料在极高压力和高温下的结构和性能在很大程度上仍然是“未知领域”。德国拜罗伊特大学(University of Bayreuth)巴伐利亚实验地球化学和地球物理研究所(Bavarian Research Institute of Experimental Geochemistry and Geophysics, BGI)的列奥尼特·杜布罗文斯基(Leonid Dubrovinsky)教授及其合作者,使用他们建造的激光加热两级金刚石压砧来合成太帕(terapascal, 1 太帕 = 1000 吉帕 = 10^{12} 帕斯卡)范围内的材料。利用原位单晶 X 射线衍射同步对材料进行结构表征。新方法首次实现了太帕范围内的材料合成研究。

这一发表于《自然》(*Nature*)期刊上的实验,为高压晶体学开辟了全新的维度:现在可以在实验室中创造和研究那些只存在于浩瀚宇宙中极高压下的材料。他们将高压和高温研究的界限推向了宇宙尺度,天王星的中心就存在这种极高压,比地球中心的压力还高 3 倍多。研究所涉及的化合物是一种新型氮化铼(Re_7N_3)和一种铼氮合金。这些材料是在极端压力下,在一个由激光束加热的两级金刚石砧池中合成的。



论文的另一位主要作者、拜罗伊特大学晶体学实验室(Laboratory of Crystallography)的娜塔莉亚·杜布罗温斯基亚(Natalia Dubrovinskaia)教授说:“如果我们在未来将高压晶体学应用于太帕范围,可能会在这个方向上有更多令人惊讶的发现。”

(高凌云编译自 2022 年 12 月 29 日 SciTechDaily 网站)