



改变光颜色的魔术



——波长位移质及其在粒子探测中的应用

朱永生

一、一个小小的魔术

紫红色的帷幕徐徐升起，在悠扬的音乐声中魔术师手持一盏灯走上舞台。“大家知道，白光由红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七色光组成。但这是一盏紫外灯，只发出紫光及人眼看不到的紫外线”。他接通灯的电源，并将一个封闭的涂黑金属匣将灯罩上，只在匣子侧面露出一个小孔，一束耀眼的紫光透过小孔射出匣外(见图1)。

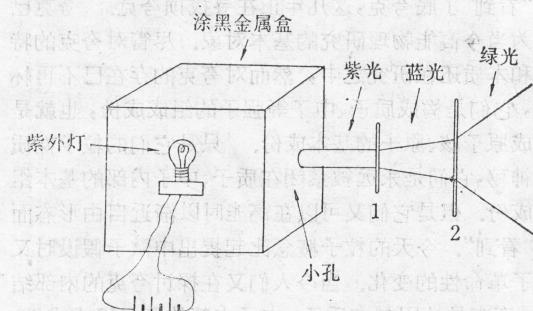


图1 光变颜色“魔术”，1, 2是含波长位移质薄膜的玻璃片

魔术师从口袋里取出一片透明的玻璃，将它放在小孔上。“玻璃对紫光是透明的，所以玻璃片后面仍然是紫光”。他解释道，同时举起手中的玻璃片。“如果我把它翻一个面再放到小孔上，情形当然不会有变化”。说着他将手中的玻璃片迅速地翻了一个面，慢慢地将它向小孔伸去。随着音乐节奏的加快，玻璃片伸到了射出紫光的小孔，但玻璃片后的光不是紫的——而是绿光！

魔术师再次将玻璃片举起：“我们重新试一遍，看看又会出什么花样！”重复了一遍先前的动作之后，随着一声呼唤“变”，果不其然，玻璃片后是一片橙红光！观众席上掌声四起。

“一片玻璃能够把光的颜色变来变去，两片玻璃一定更好看了。”他又一次如法泡制，结果玻璃片后出现了蓝光。然后又从口袋中摸出一块大些的玻璃片放到第一片玻璃后稍远一些的地方，于是第二片玻璃片后面呈现一片绿光(见图1)。观众席爆发出更热烈的掌声。

二、光为什么会变色

在这个小魔术里，除了魔术师做了一点“小动作”之外，还有科学道理。魔术师“做假”只是在将玻璃片翻面的时候，他的身手当然迅捷无比，在那一瞬间，其实已经把手上的玻璃片换成另外一片了。“戏法”的其余部分则完全是真实的。

光的颜色为什么会改变呢？其原因是魔术师“变”出来的玻璃片的一面涂上了含波长位移质的树脂薄膜。波长位移质也有人称为移波质。大家知道不同颜色的光实际上是波长不同的光波。图2中画出了不同颜色光的大致波长区间。顾名思义，波长位移质能使光的波长发生位移，也就是将颜色改变了。

紫外	紫	蓝	绿	黄	橙	红	红外
100	3900	4350	4920	5770	5970	6220	7700

图2 各种颜色光的大致波长范围。

$$1\text{ \AA} = 10^{-8}\text{ cm.}$$

当然这样的说法是很肤浅的。事实上光波长的改变由波长位移质的光学特性所决定。设想将一个黑纸盒罩在白炽灯外面，光完全不能透出纸盒外。假定我们只考虑可见光，那么黑纸盒吸收了所有不同波长的可见光(从红光到紫光)，这就是黑纸对光的吸收特性。如果用曲线来表示，可以画成图3那样，这条曲线称为黑纸的吸收谱，吸收率100%表示射在黑纸上的光全部被它吸收而不能透过。同样，实验也可以测定波长位移质的吸收谱。例如一种称为BBQ的波长位移质

的吸收谱示于图 4(a)。在吸收谱中，吸收率高所对应的波长光被吸收得越强烈，反之则吸收得较少。波长

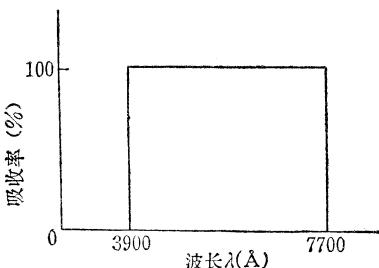


图 3 黑纸的(假想)吸收谱。

位移质吸收了入射光的能量之后，自身又发光，发出的光有一定的波长分布称为发光光谱或发射光谱，它与自

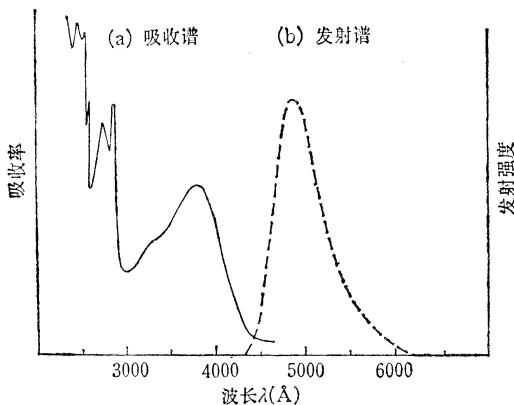


图 4 BBQ 的吸收谱和发射谱

己的吸收光谱完全不同，而且一般说来发射光谱的平均波长比吸收谱的平均波长要长一些。BBQ 的发射谱画在图 4(b) 中。发射强度高对应的波长光强度就大，反之亦然。因此波长位移质“改变”光颜色实际上是它吸收入射光和再发射的过程，由于吸收谱和发射谱的差别导致光颜色的改变。下表中我们列出了几种波长位移质薄膜的吸收和发射特性。

	吸收特性	发射特性
“兰膜”	吸收谱波长 $\leq 4000 \text{ \AA}$ (紫外光, 紫光) 在 $\sim 3200 \text{ \AA}$ 处有吸收峰	发射峰中心波长 $\sim 4350 \text{ \AA}$ (蓝光)
BBQ	吸收谱波长 $\leq 4400 \text{ \AA}$ (紫外, 紫, 蓝) 在 $\sim 4000 \text{ \AA}$ 附近有吸收峰	发射峰中心波长 $\sim 5000 \text{ \AA}$ (绿光)
Rhodamine (罗丹明)	吸收谱波长 $\leq 4600 \text{ \AA}$ (紫外, 紫, 蓝)	发射峰中心波长 $\sim 6200 \text{ \AA}$ (橙红光)

现在我们能够清楚地了解光改变颜色的魔术了。紫光(实际上还包括紫外光)变成绿光、橙红色光和蓝

光的奥秘是玻璃片上分别涂有 BBQ、罗丹明和“蓝膜”的缘故，而如果在蓝光后再放一块含 BBQ 的玻璃片，则能形成图 1 那样的三色光段。

当然，科技工作者不是为了变戏法才研究波长位移质的，而是因为它们在科学技术乃至生产中有一定的用途。波移质是一些相当特殊的有机材料，例如 BBQ 的英文全称是 Benzimidazo Benziso Quinoline-7-on，“蓝膜”中包含三种移波质，称为 PT, PPO, Bis-MSB，它们的中文译名分别是对联三苯、2, 5-二苯基噁唑和 1, 4 双 [二甲基苯乙烯基] 苯。移波质的制造、提纯是相当复杂、困难的，而且它们中的一些是致癌物质，处理和操作必须很小心。仅仅为了变魔术完全不必去冒这个险。

三、闪烁光和契伦科夫辐射，光电倍增管

粒子物理和核物理的研究对象是各种各样的粒子，依照它们是否带电可分为带电粒子。(如电子、正电子，质子，带电介子等)和中性粒子(如光子，中子，中微子，中性介子等)。带电粒子通过一种称为闪烁体的物质时，一部分能量损失其中并使闪烁体发光，闪烁体也有它自己的发射光谱。一个带电粒子穿过就产生一次闪烁光。如果用某种仪器收集闪烁光并加以测量，就可以知道有多少个带电粒子从什么地方穿过闪烁体，这就使我们知道了肉眼无法观测的带电粒子的“踪迹”。

利用契伦科夫辐射还可以测量带电粒子的速度。大家知道真空中的光速是每秒三十万公里，通常用 c 表示。而在透明的介质如水、甘油、有机玻璃中光速为 $c/n < c$ ， n 称为折射率而且总大于 1，由介质种类决定。比如一根筷子插在水中，在水与空气的界面上筷子好象打了一个折，成为二段折线，这就是由于空气和水的折射率不同造成的 ($n_{\text{空气}} \approx 1.003, n_{\text{水}} = 1.33$)。能量非常高的粒子速度接近于光速，而且与介质种类无关。因此在 $n > 1$ 的透明介质中高能粒子的速度 ($\sim c$) 可以超过其中的光速 (c/n)，这时带电粒子发射一种称为契伦科夫的辐射。这种辐射有两个特点：它的辐射谱从紫外延伸到近红外，但随着波长的增加强度很快减小，即大部分辐射是紫外光。其次它有显著的方向性，即辐射光与带电粒子方向成一定角度 θ ，形成一个窄的光锥， θ 由粒子速度 v 和介质折射率 n 确定：

$$\cos \theta = \frac{c}{nv}.$$

如果知道了粒子入射方向，介质折射率，用某种仪器在一定角度 θ 上测到了契伦科夫辐射，就可以“感觉”到渺不可见的带电粒子的存在，并知道它的飞行速度。

不过闪烁光和契伦科夫辐射用普通的仪器很难测量，因为它们委实太弱了。举例来说，一个电荷为 1 (即携带的电荷量等于 1 个电子的电荷量) 的带电粒子穿过 1 厘米厚的有机玻璃 ($n=1.5$)，当其速度接近光

速 c , 它产生的契仑科夫辐射在波长4000—7000 Å范围内只有约250个光子。同样的带电粒子穿过同样厚的塑料闪烁体大约产生约10000个光子。看起来光子数似乎不少, 实际上光量很弱, 我们可用直观的现象作比较。1瓦小灯泡的光不算强。假定它的电能仅有10% 转变成光能, 每秒发射的光子数竟达到 3×10^{17} 个。用肉眼观测金星, 每秒射入瞳孔的平均光子数约为 7×10^6 /秒。人的肉眼算得上是极其灵敏的“光子探测器”, 可以在黑夜里看到十公里外划火柴闪亮的火光, 能直接观察到六等星(星等数越大, 亮度越小), 观看一颗六等星每秒进入瞳孔的光子数约为550个。

当然我们不能用眼睛来观测粒子物理实验中的闪烁光和契仑科夫辐射, 因为实验中每秒钟带电粒子产生的闪烁光或契仑科夫辐射可以高达几万、几十万次。我们利用一种称为光电倍增管的装置来探测闪烁光或

契仑科夫辐射。图5是一种类型的光电倍增管的示意图。光子在光阴极上打出电子, 由于各次阴极间加上一定的电位差, 电子在次阴极间被加速, 在下一次阴极上打出更多的电子来, 称为倍增。经过重复的倍增过程, 最后大量电子收集到阴极上, 并在输出端形成幅度近毫伏特的电脉冲, 脉冲持续时间短到 $\sim 10^{-7}$ 秒。这种脉冲用电子仪器记录很方便。

四、波长位移质在粒子探测中的应用

照第三节所说, 利用光电倍增管探测闪烁光或契仑科夫辐射, 不就能探知带电粒子的存在了吗? 波长位移质有何用处呢?

在粒子物理实验中, 闪烁体往往很大, 而光电倍增管的接收面积很小, 两者之间要用透明的光导来连接, 将闪烁体中的光导向光电倍增管。掺杂有波长位移质的光导能够减小光在传输中的损失。(参阅本刊1985年第三期李金的文章“波长位移技术和BBQ”)

在契仑科夫辐射的探测中, 波移质的作用更为重要。前面已经说到契仑科夫辐射光子大部分集中于紫外部分, 而光电倍增管只对可见光有较高的灵敏度。利用适当的波长位移薄膜可以将紫外光转变成光电倍增管“看得见”的可见光。例如图6是“蓝膜”的吸收光谱, 发射光谱以及国产光电倍增管GDB型的灵敏探测区。这样在光电倍增管光阴极前的玻璃上涂以“蓝膜”, 紫外光被蓝膜所吸收, 而它的发射谱恰好落在光电倍

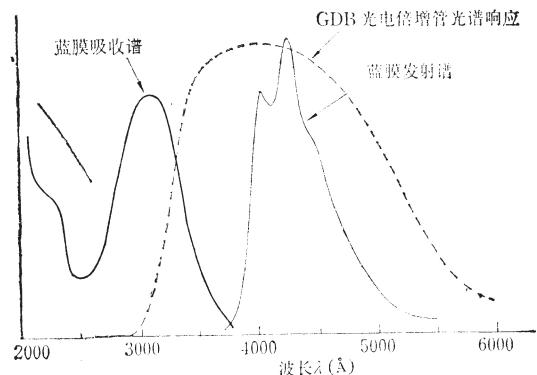


图6 蓝膜的吸收谱、发射谱, GDB型
光电倍增管的光谱响应

增管的灵敏波长区内; 而契仑科夫辐射中的可见光则能透过蓝膜被光电倍增管所接收。因此光电倍增管便能同时探测到契仑科夫辐射中的紫外部分和可见部分, 大大提高契仑科夫辐射的探测灵敏度。

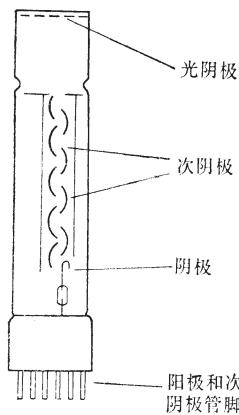


图5 光电倍增管结构示意图

冲, 脉冲持续时间短到 $\sim 10^{-7}$ 秒。这种脉冲用电子仪器记录很方便。

四、波长位移质在粒子探测中的应用

照第三节所说, 利用光电倍增管探测闪烁光或契仑科夫辐射, 不就能探知带电粒子的存在了吗? 波长位移质有何用处呢?

在粒子物理实验中, 闪烁体往往很大, 而光电倍增管的接收面积很小, 两者之间要用透明的光导来连接, 将闪烁体中的光导向光电倍增管。掺杂有波长位移质的光导能够减小光在传输中的损失。(参阅本刊1985年第三期李金的文章“波长位移技术和BBQ”)

在契仑科夫辐射的探测中, 波移质的作用更为重要。前面已经说到契仑科夫辐射光子大部分集中于紫外部分, 而光电倍增管只对可见光有较高的灵敏度。利用适当的波长位移薄膜可以将紫外光转变成光电倍增管“看得见”的可见光。例如图6是“蓝膜”的吸收光谱, 发射光谱以及国产光电倍增管GDB型的灵敏探测区。这样在光电倍增管光阴极前的玻璃上涂以“蓝膜”, 紫外光被蓝膜所吸收, 而它的发射谱恰好落在光电倍