

出品：科普中国

制作：李瑞（大阪大学）

监制：中国科学院计算机网络信息中心

说到巧克力的颜色，除了巧克力色，就是一些色素调制的简单彩色。但近日，瑞士苏黎世理工大学的科研人员开发了一种使巧克力具有光泽色彩的方法，整个过程中不需要添加任何着色剂或添加剂。并且，在不同的角度观察到的巧克力，颜色还会发生变化。

△作者：Giulia Marthaler/ETH Zurich

这一制作工艺的灵感就来源于生活，比如，从不同角度看开屏孔雀的羽毛，看到的颜色也会发生变化。

色彩鲜艳的巧克力，鲜艳的孔雀羽毛，它们呈现的颜色并不是直接由色素决定，而是与它们表面的微观结构有关。这种由结构特点形成的颜色叫做结构色，是世界丰富色彩的重要组成部分。

那么，什么是结构色，它有着怎样的特点，科学家们又是如何利用它做出虹彩巧克力的呢？

自然界的虹彩们基本都属于“结构色”

当照射于物

体表面的可见光发生反

射进入人眼，就会在人脑中形成颜色

。具体形成怎样的颜色，主要由反射光的波长所决定，例如植物主要吸收红光蓝光而反射绿色光，因此才会形成苍翠欲滴的绿色。

日常生活中的各种物体，除了植物一类本身具有特定的颜色，还可以通过形形色色的染料来获得多变的色彩。染料有很多种形式，镀层、色素、涂料等等，但归根结

底，染料所能呈现的颜色，与染料中含有的着色颗粒对特定波长光的反射有关。

在古代，人类基本没有利用化学工业手段合成人工染料的能力，着色需求完全依赖于天然染料。而生物界中也确实不乏着色高手，紫胶虫和胭脂虫就是其中的佼佼者。人类数千年历史中相当长的一段时间内，它们都是红色系染料的重要来源。

不过，自然界中还有一些将色彩运用到极致的“大师”们，紫胶虫之流在它们面前完全就是弟弟。除了孔雀开屏时的雍容华美，还有蛱蝶穿花时的奇幻多姿，螺钿与珍珠的交相辉映...

...这些大师们的杰作，甚至可以不

依赖染料，而仅仅只靠身体表面的特殊结构

，就“天然”地呈现出流光溢彩的效果。这种不依赖于染料，而仅仅凭借微观结构就能呈现颜色的现象就是“结构色”。

△自然界中的各种结构色

光的物语——结构色的奥秘

结构色能够呈现千变万化的颜色，

自然是因为它可以反射各种波长的光线

，从而形成虹彩。但是与普通的色彩相比，因为不依赖于染料，结构色的色彩不会因时间的流逝而消失，能够长期保持鲜艳的色泽

，例如古代的螺钿工艺品即便拥有几百年的历史仍然熠熠生辉。

此外，结构色在不同的观察角度下，虹彩的色泽还会发生变化，这又是因为什么原因呢？

结构色的表面，

存在若干规整排列的微细纳米构造

。由于这些构造本身的尺度大约是数十到数百纳米，与可见光的波长处于同一级别，因此当光线入射到构造色表面时，就会发生明显的干涉现象。

△蓝闪蝶翅膀表面的纳米沟槽（上），人造虹彩材料（下），来源：参考文献2

所谓干涉是指光线在物体表面发生反射时，

发生的特定波长的光加强或者减弱的现象

。具体增强和减弱的幅度与膜厚、入射光波长以及入射角等因素有关。虽然听起来好像有点复杂，但结合实例来看就会比较好理解了。

虹彩巧克力就属于结构色的一种应用，比如某一瞬间当我们看到虹彩巧克力表面呈现蓝色光泽，这就说明此时得到干涉加强的是蓝色光

。当你转换观察角度，或者将这颗巧克力稍作旋转（入射角发生了细微的变化），可能就

会呈现绿色光

泽，此时得到加强的就是绿

色光。当然，一般情况下，

同一时刻巧克力表面将有不同波长的光线同时在若干区域得到加强，于是就会呈现出绚丽的虹彩。

△作者：Giulia Marthaler/ETH Zurich

殊途同归的结构色

从

自然

界中的实

例来看，能够形成

结构色效果的纳米结构种类非常丰富

。首先是单层纳米薄膜

，五颜六色的肥皂泡就是由单层薄膜形成，光线在薄膜的上下表面分别发生反射，随即出现干涉效果。

除了单层，多层薄膜结构

同样有效，贝壳和甲虫呈现的绚丽光泽分别来自于碳酸钙和几丁质的层叠构造，热带鱼类身上常有的亮银色装饰条带则是由皮肤表层细胞质中鸟嘌呤结晶形成的多层构造反射而来。

蛱蝶以及CD碟片和虹

彩巧克力等人工制品的结构色主要依靠表面的纳米级沟槽

形成。这些沟槽的深度大约在数十到数百纳米间，相互间隔也在类似量级。光线入射时，射到沟槽顶部和底部的光线间就将产生光程差，从而满足发生干涉的条件（具体解析可以参考高中物理课本）。

除了薄膜和沟槽，密集的球状结构

同样有类似的效果。例如欧泊中含有无数密集排列的纳米级硅酸盐晶体，它们对光线的干涉就形成了宝石的美丽色泽。人工光子晶体依据的原理也与之相似，晶体内部无数的细微子晶最终在宏观上表现出对光线的区别反射，形成五彩斑斓的外观。

彩蛋：虹彩巧克力完全制作攻略

通过上面的原理介绍，我们明白了虹彩巧克力色彩的秘诀在于它表面细微的纳米级沟槽。虽然听起来很高大上，但其实我们在生活中也能做到，只需要一片贴哪哪闪亮的全息虹彩魔术贴，就能解决纳米沟槽的问题。

全息

贴纸恐怕

是人类对结构光现

象最成功的直接应用了，它的原理非

常简单，常见的全息贴纸一般由三层薄膜构成

，从表面向下，分别是树脂保护层、纳米沟槽加工层和粘胶层。作为核心的纳米沟槽加工层通常是用易于加工出纳米沟槽的高反射率材料制成，比如铝箔。在铝箔表面挖出沟槽的具体方式也有很多种，激光和电子束都可以在很短的时间内绘出高精度纳米沟槽。当然，这肯定无法在家操作了。

△全息虹彩贴纸结构示意图，作者自制

全息贴纸有很多种类，不少应用在防伪领域的全息贴纸同时还结合了全息影像技术，具有极高的印刷精度，令伪造变得非常困难，也因此广泛地出现在货币、信用卡和贵重商品的包装上。我们制造虹彩巧克力时不用使用这么高档的全息贴纸，小朋友们的玩具就足以提供丰富的图案供我们选择。

首先，我们需要将图案表面的保护膜剥离出来，再将其作为模具给巧克力转印图案。直接撕下保护膜显然不是好办法，撕取过程中，纤细的沟槽结构会遭到破坏，印制出的图案效果也将大打折扣。我们的解决方案是先把保护膜表面用胶水固定在玻璃板上，再用氢氧化钠溶液（务必戴好防护手套和护目镜）将背面的胶层和铝膜同时溶解，成功后就能得到带有图案的磨具（示意图中的树脂层）。吹干磨具表面水分后，如果能看到全息贴纸图案，就证明这一步取得了成功。

之后，我们再将购买好的巧克力融化在烧杯中，温度约50摄氏度即可，温度过高过低都会影响巧克力填充磨具的效果。你可以根据自己的喜好调整颜色和口味，不过不推荐白巧克力和添加果仁。前者的颜色会让虹彩图案难以辨别，而果仁则会造成表面不光滑以及磨具填充度变差等后果。最后，将化好的巧克力浆冷却到30度上下（粘度接近于花生酱），再铺展到模具表面，冷却后小心除去模具，再将边缘形状精修一下即可。一切顺利的话，全息贴纸上的图案将会转印在巧克力表面，虹彩巧克力正式大功告成。

△由苏黎世理工创办的企业制作的虹彩巧克力模型以及成品，来源：参考文献3

虽然精致程度赶不上工厂专业制作，但这份自制的虹彩巧克力，作为节日礼物，也不失为一种好的选择。这么看来，结构色在我们的生活中还真的是应用广泛呢。

参考文献

1.https://spectrum.ieee.org/nanoclast/semiconductors/nanotechnology/researchers-create-shiny-rainbows-of-nanotech-chocolate?utm_source=feedburner

2.<https://www.eudonev.com/portfolio/structural-color/>

3.<http://www.morphotonix.com/chocolate>

4.<https://www.youtube.com/watch?v=UsDnkrDvkBo&app=desktop>