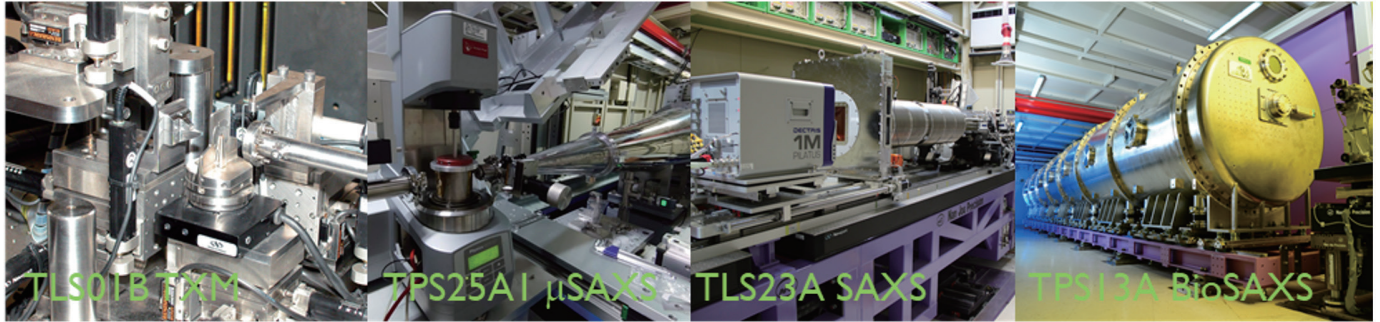


從羽毛的結構看見未來色彩顏料： 仿生結構色的秘密與應用

莊偉綜副研究員

國家同步輻射研究中心軟物質科學小組



當我們欣賞一隻鳥時，很容易被牠們那一身穩定而鮮豔的藍綠色羽毛所吸引。然而，這些亮眼的色彩其實並不是由染料或色素所產生，而是來自羽毛中極為精巧的奈米結構。這類被稱為「結構色彩 (structural color)」的現象，在自然界中廣泛存在，其背後的原理和功能，正啟發著當代材料科學家打造未來的高功能性材料。

由國輻中心 (莊偉綜、王俊杰、蔡一葦、鄭有舜、林智敏、陳軍佑和周哲民等) 與國內多所大學組成的跨校團隊 (清華大學洪毓珽教授、臺灣科技大學洪伯達教授、中山大學蔣西旺教授和成功大學孫亞賢教授)，發表了一項創新研究：開發出一種結合導電性與結構性色彩的水性墨水，既能畫圖又能傳導電流，適用於智慧穿戴裝置、電子布料與創意電子藝術。[1]

從無序中看見有序：鳥羽毛的非虹彩結構色

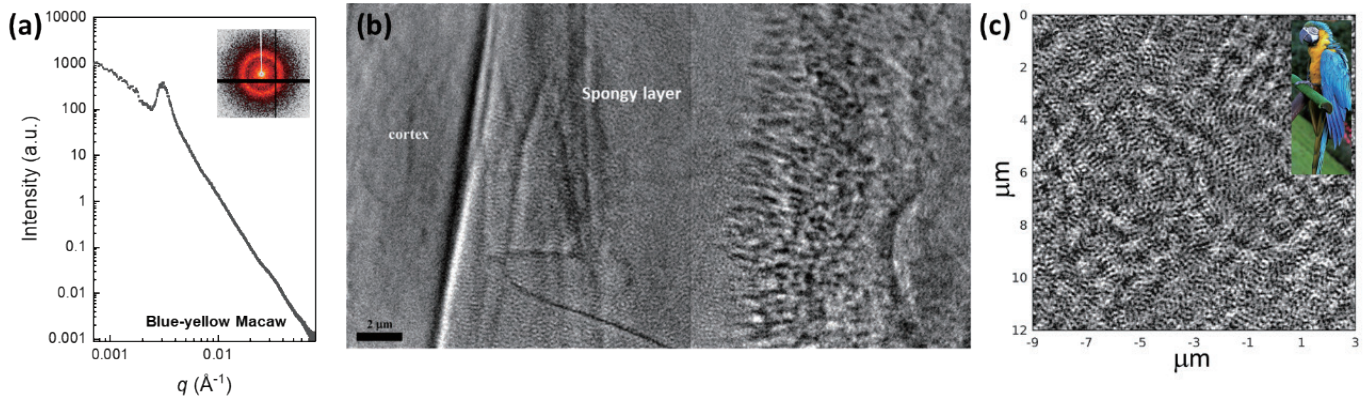
在結構色彩材料中，「虹彩性」與「非虹彩性」的差異，根源於內部奈米結構的排列方式。光子晶體 (photonic crystals) 具有高度規則、可見光波長的週期性結構，類似於三維晶體中原子的排列。這樣的長程有序排列會導致光在其中發生布拉格繞射，反射波長依照入射角改變，因此形成隨觀察角度變化的虹彩色彩。蝴蝶翅膀與某些甲蟲鱗片就是自然界光子晶體的例子。相對地，光子玻璃 (photonic glass) 則是由尺寸均勻、但排列隨機的膠體或奈米粒子所構成，僅具有短程有序、長程無序的結構。這種排列可選擇性散射特定波長的光，形成色彩穩定、不具角度依賴性的非虹彩結構色。例如翠鳥或金剛鸚鵡的羽毛就屬於光子玻璃型態

的結構色。簡言之，光子晶體造就閃爍多變的虹彩效果，而光子玻璃則創造出從任何角度看都一樣的純淨色彩，兩者皆為自然與材料科學中極為重要的光學結構。

在自然界中，部分鳥類羽毛展現的顏色並非因含有色素，而是來自羽毛內部的微觀結構對光的選擇性反射。以金剛鸚鵡為例，其羽毛中的海綿層由角蛋白與空氣孔洞交織而成，孔洞大小約幾百奈米，與可見光波長相當。這些空隙並非排列成完美的晶體結構，而是以一種介於有序與無序之間的方式存在—無序中的有序。這種「短程有序」的結構在學術上被稱為「最大無規最密堆積 (Maximally Random Jammed Packing)」(圖一)。這種排列雖不具長程對稱性，卻也能有效選擇性地反射特定波長光線，同時不隨角度改變產生虹彩，因而造就了穩定、柔和且飽和的非虹彩結構色。

同步輻射技術：揭開鳥羽結構色的秘密

若要從仿生邁向真正可控制的材料設計，僅有靈感還不夠，關鍵在於能否精確重現自然界的結構細節。這就需要從「仿生」進一步走向「仿真」，不只模仿外觀，更要理解與再現其奈米尺度的結構排列邏輯。在這方面，同步輻射 X 光技術提供了無可取代的工具。透過小角度 X 光散射 (SAXS)、X 光散射成像 (ptychography) 與 X 光三維斷層掃描 (TXM tomography)，使得該團隊得以觀察如鳥羽毛中非虹彩結構色所依賴的最大無規最密堆積的短程有序奈米團簇結構，並量化其排列距離、孔洞大小與局部對稱性 (圖一)。此種最大無規最密堆積團簇在鳥羽非虹彩結構色扮演了關鍵角色。這是一種看似隨機、實則高度緊密的排列方



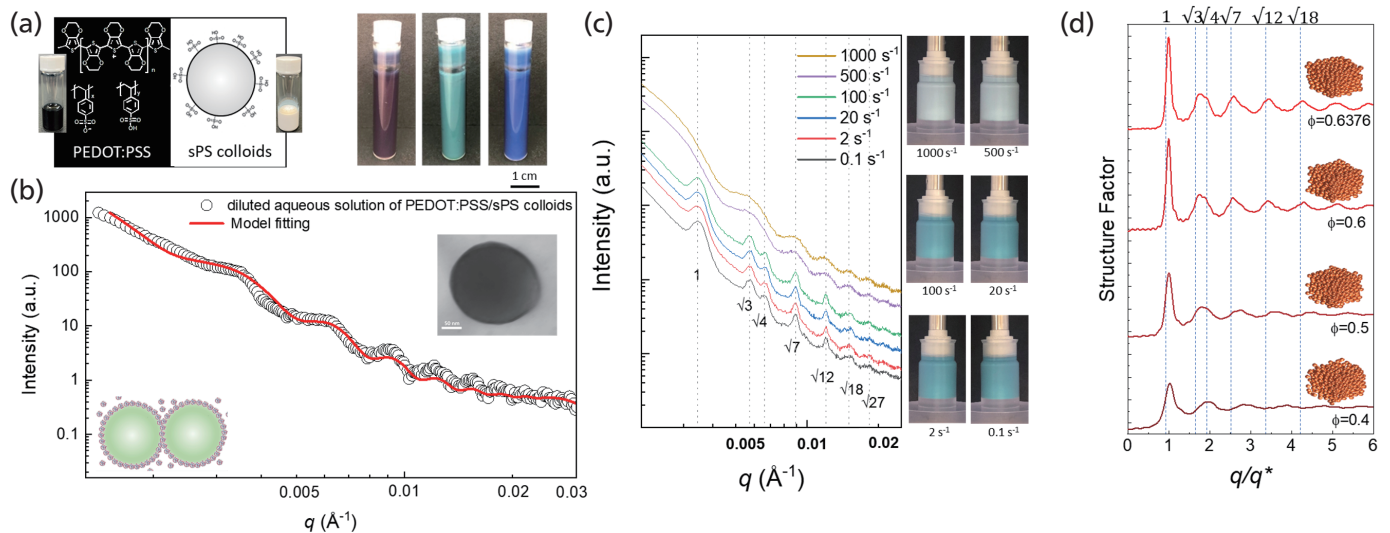
圖一 藍黃金剛鸚鵡羽毛結構分析：(a) 小角度 X 光散射、(b) 穿透式 X 光顯微影像和 (c) X 光散射成像。

式，能在無需長程有序的前提下，產生穩定的短程結構。這些同步輻射 X 光技術不僅揭示自然設計背後的物理規律，更成為仿生材料進行數值模擬、反射光譜預測與結構優化的基礎，使研究團隊不只是模仿自然，而是能理性建構出具有類似性能甚至超越自然的人工結構色材料。因此，若要讓仿生真正走向可工程化的仿真與應用，同步輻射技術的精密結構解析，無疑是通往自然設計密碼的關鍵鑰匙。

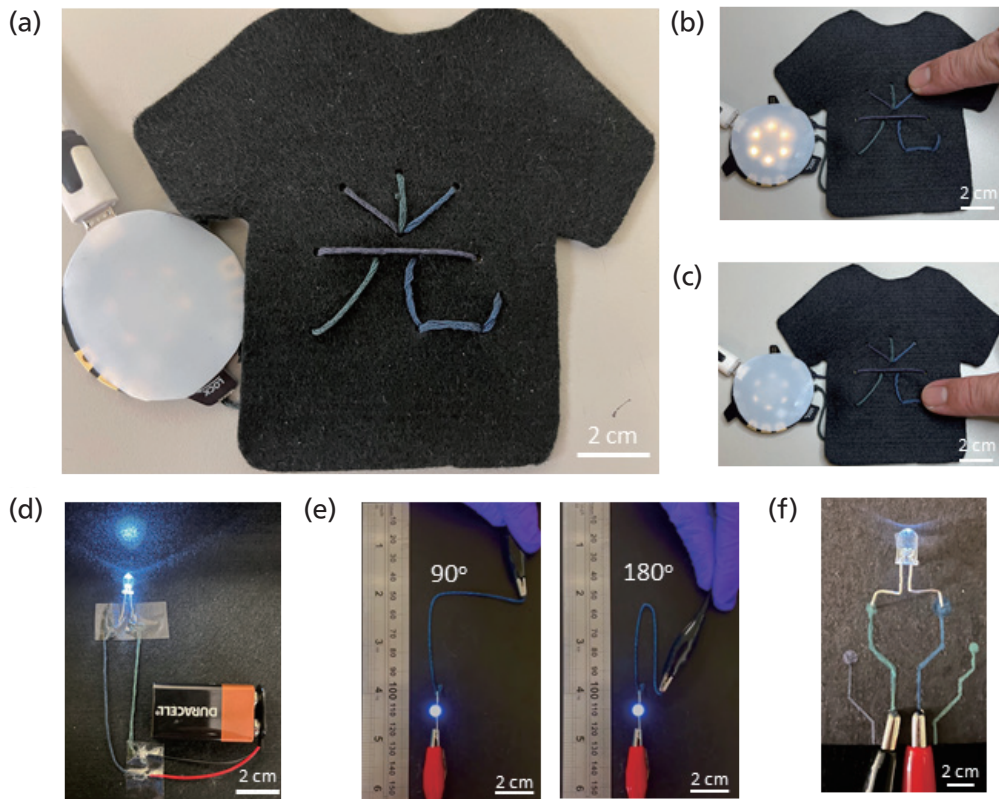
仿生材料創新：在水中自組裝的導電結構色墨水

理解大自然的原理後，接下來就是如何「模仿自然」。要製造出穩定、鮮明、又不隨角度改變的結構色彩，材料中的奈米結構必須非常講究地排列。而這裡的關鍵就是**最大無規最密堆積**，這種堆積模式，乍看之下像是「亂中有序」：微小的球形粒子（像是膠體）雖然排列得像隨機倒入罐中的彈珠，但在這個亂中，其實每顆粒子都被緊緊擠壓到不能再移動的位置，形成一種「最緊密但仍保有隨機性」的結構。

在受到這些羽毛結構色的啟發，研究團隊設計出一種以水為基底、可自組裝的導電彩色墨水。他們將白色膠體粒子 sPS(磺酸化聚苯乙烯) 作為核心，外覆黑色導電高分子 PEDOT:PSS，形成「核 - 殼型微粒」(圖二 (b))。這些微粒在水中透過靜電交互作用力可以自發形成類似**最大無規最密堆積**的排列，此時雖然缺乏晶體般的週期性，但其局部間距仍能選擇性反射特定波長的光，形成不隨角度改變的結構色彩。這種排列方式不僅避免了過度雜亂造成的灰白混濁，也排除了光子晶體所產生的彩虹效應，是非虹彩色穩定呈現的最佳幾何基礎。如圖二 (a) 所示導電墨水產生角度不變的紅、綠、藍結構色彩。此外，最大無規最密堆積結構可透過膠體自組裝自然形成，無需繁複製程，展現出自然啟發與永續材料設計的完美結合。同時，導電高分子 PEDOT:PSS 提供良好的導電性，使這種墨水兼具「視覺美感」與「電功能性」。墨水可透過書寫、塗布等方式應用在柔性基材上，乾燥後仍保有穩定色彩與導電性。更令人驚喜的是，這些色彩具有「可逆性」—搖晃後顏色消失，靜置後又會自動重現，展現出仿自然材料的動態自組裝特性 (圖二 (c,d))。



圖二 (a) 磺酸化聚苯乙烯膠體粒子 (sPS) 與導電高分子 PEDOT:PSS 混合形成紅、綠和藍色墨水。(b) 小角度 x 光散射圖譜與電子顯微影像證實為導電墨水內的膠體粒子核 - 殼型微粒。(c) 流變場下導電墨水的小角度 x 光散射圖譜。(d) 理論模擬不同堆疊密度下的結構因子，其中 $\phi = 0.6376$ 為最大無規最密堆積。



圖三 彩色導電墨水在電子裝置中的應用。(a) 以彩色導電線繡製中文字「光」所形成的觸控開關，可用來控制 LED 裝置。(b) 與 (c) 當手指觸碰字的上半部時，LED 亮起；觸碰下半部時，LED 熄滅。(d) 利用彩色導電線構成電路的 LED 照明裝置。(e) 對藍色導電線進行 90° 與 180° 彎折測試，以評估其導電穩定性。(f) 將導電墨水塗畫於紙面形成圖案電路的 LED 照明裝置。

這種結構色導電墨水的應用潛力極廣，不僅可用於柔性電子元件、可觸控衣物、智慧紙張電路，還能透過浸泡棉線等方式製成彩色導電線，用於繡在布料上的開關或電源線（圖三）。由於墨水成分為水性且無毒，整體製程不需高溫、不產生污染，極具永續性，也符合現今材料開發對環保與個性化的雙重追求。

未來展望

這項來自鳥羽毛的仿生設計提醒我們，自然不只美麗，也充滿智慧。透過觀察自然、理解結構、創新材料與實踐應

用，我們能創造出更環保、更美觀、更有功能的未來科技。在這樣的科技路上，大自然既是靈感來源，也是最佳老師。同步輻射不只是分析工具，更是從「仿生」邁向「仿真」的關鍵技術，讓我們得以精確量化自然結構，作為後續材料設計與模擬的依據。在未來的衣櫃裡，衣服不只會發光、會感應、還會隨你風格呈現各種顏色——這不再是科幻，而是來自台灣研究團隊的最新科技突破！

參考文獻

1. W. T. Chuang *et al.*, ACS Appl. Mater. Interfaces **16**, 52856 (2024).

