

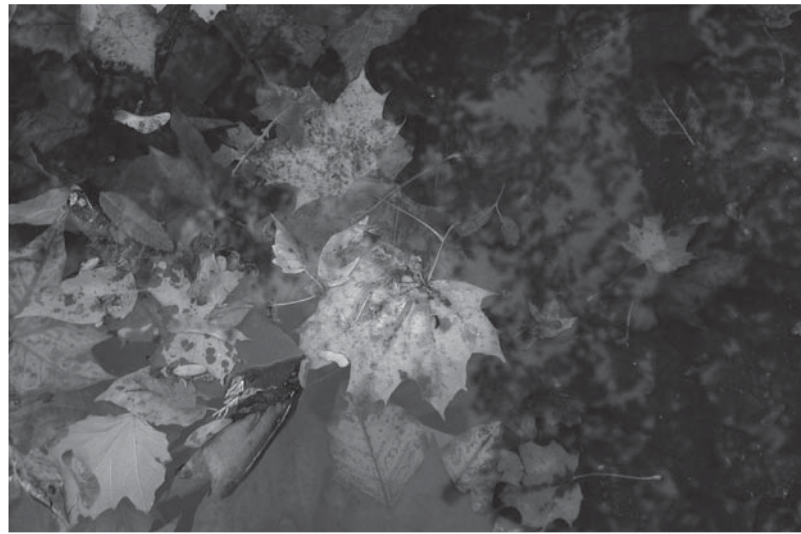
顏色讓你錯覺了

顏色所引發的錯覺，比線條錯覺更令人迷惑。最新的錯覺研究更發現，顏色與形狀、深度的知覺密不可分。

撰文 沃納 (John S. Werner)、平納 (Baingio Pinna)、
斯皮爾曼 (Lothar Spillmann)
翻譯 黃榮棋



泉水裡的秋葉與倒影，景象一旦變成黑白，許多深度與細節就不見了，凸顯出顏色對視覺的影響。



沒有顏色的世界，就像少了關鍵元素，而事實也是如此。顏色不僅讓我們看得更精準，還創造出黑白世界所沒有的特性。例如左頁的彩色照片，顯示著秋水裡的落葉，上面還有樹木與午後蒼穹的倒影。但同樣的景色若換成黑白，秋葉就不再清晰、蒼穹不復存在，光的反射變弱、連池水也差堪可見，而天空、樹木與浮葉間的視深，則消失殆盡。

不過，人們對顏色這個角色，甚至是顏色的本質，卻沒有足夠的認識。許多人相信，顏色是界定物體的要素，完全決定於物體反射出來的光波長；但這是錯誤的觀念，其實顏色是大腦創造出來的感覺。如果我們所看到的顏色是由反射光的波長決定，那麼物體的顏色將隨著一天中照明的變化或陰影而有巨大的改變。能讓物體顏色在多變環境中維持不變的，反倒是大腦活動的模式。

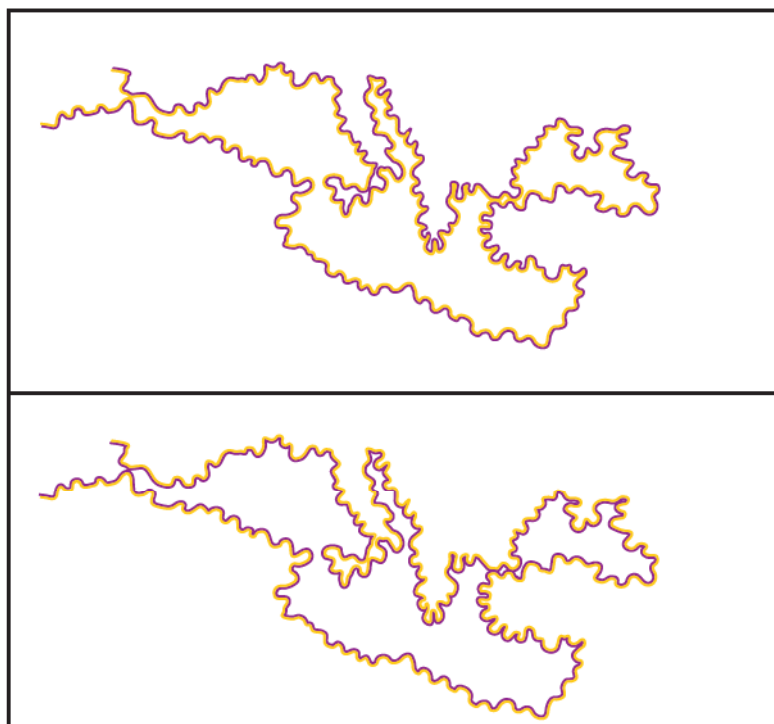
研究視覺的人大多同意，當亮度差異不足以協助分辨物體時，顏色可以。但有些人甚至認為顏色是多餘的奢侈品：畢竟，全色盲的人以及許多種動物，就算沒有大多數人類所擁有的這般色覺，也可以活得很好。例如，腦中負責方向與運動的神經路徑基本上與顏色無關；因為中風而變成色盲的人，其他視覺功能似乎一切正常。這些現象都支持顏色的訊息是獨立處理的，意味著顏色與深度及形狀的訊息處理無關——簡而言之，顏色只與色度、彩度與亮度有關。

但「錯覺顏色」（會讓大腦產生錯覺的顏色）的研究證實，大腦在處理顏色訊息時，是與處理其他物體特性（像是形狀與分界）密不可分的。在我們長達10年、試圖了解顏色如何影響人們對其他物體特性的知覺實驗中，研究過多種新的顏色錯覺，包括許多由我們自己發展出來的錯覺。這些錯覺協助我們了解到，顏色的神經處理如何凸顯出物體的形狀與邊界。在開始討論這些錯覺之前，我們必須先複習一下人類視覺系統如何處理顏色。

錯覺之路

視覺始於視網膜裡的錐細胞與桿細胞對光的吸收——或更精確的說，是吸收稱為「光子」的不連續能包（參見第96頁〈看見顏色〉）。錐細胞用於晝視，桿細胞負責夜視。錐細胞的反應取決於其接收的光子數目，並將反應傳給兩種不同的神經元：執行on或off功能的雙極細胞。之後，這些雙極細胞再將訊號傳給視網膜裡比鄰而居的on或off節細胞。

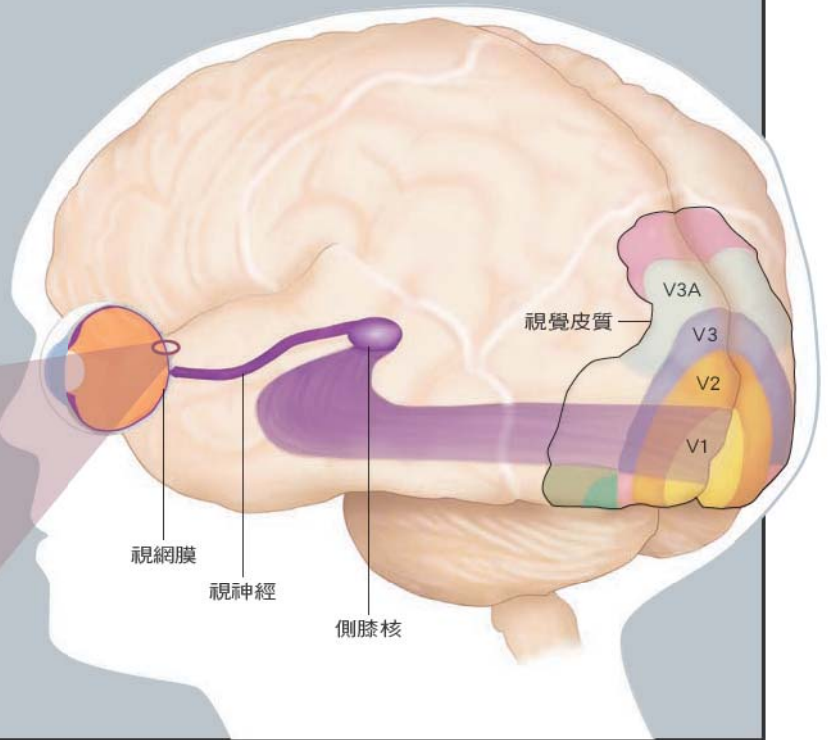
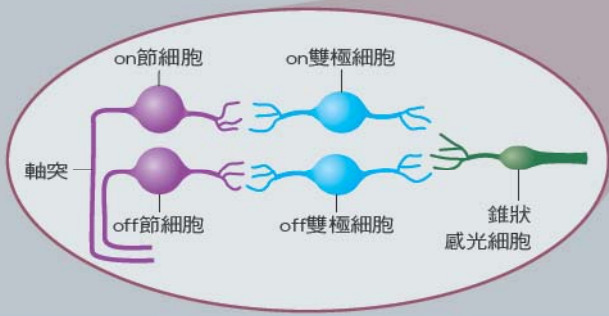
節細胞有所謂的「中央周邊接受區」（center-surround receptive field）。視覺相關神經元的接受區，指的是可影響



水彩效應（兩色中較亮的一種顏色看起來會擴散開來）顯示出顏色對於辨別圖形的大小與形狀有多麼的重要。原先似乎填滿整個圖形內部的淡黃色（上圖）一旦改往外圍擴散（下圖），凹陷的地中海圖形就出現了。

看見顏色

色覺開始於視網膜裡的錐細胞吸收光線。錐狀感光細胞只有一種反應，但其活性由on雙極細胞與off雙極細胞兩種不同神經元傳送。雙極細胞再將訊號傳給on節細胞與off節細胞，節細胞的軸突會將訊號轉送到大腦，先到側膝核，之後再到視覺皮質。



該神經元活性的物理空間區域。有著中央周邊接受區的神經元，其反應會隨接受區中央與周邊的相對光量而變。

接受區中央的光強度若大過周邊，則on節細胞就會產生最大的發射活性（高頻率）；如果整個接受區接受均勻光照，則其活性會是最低。off節細胞的反應剛好相反，當接受區中央比周邊暗時，活性最高；而若中央與周邊光照相同時，活性則一樣最低。這種中央與周邊的拮抗作用，意味著節細胞會對對比產生反應，並藉此加強了大腦對邊緣與界線的反應。

大部份的節細胞軸突（亦即神經纖維）會將訊息轉送到大腦，尤其是丘腦（約在腦的中央）的側膝核（lateral geniculate nucleus），之後再從側膝核傳到視覺皮質（位在腦背）。不同群的節細胞對不同的刺激面向，例如運動與形狀，或多或少會有不一樣的敏感度，而且神經纖維傳導的速度也有所不同。例如顏色訊息，就是由比較慢的神經纖維傳送。

據信，人腦約有40%以上的部位與視覺有關。在視訊處理初期會受到刺激的腦區（視覺皮質的幾個部位，稱為V1、V2與V3），其神經元組織而成的圖譜，提供了視野的點對點投射。視訊再從這兒發送到由300個以上的線路連接而成的30個以上的不同區域。這裡每一個區域都有其特定的功能，像是處理顏色、運動、深度與形狀，但沒有任何一個區域完全只針對某一感覺特性。所有這些訊息終將會整合在一起，讓我們對物體產生統一的感覺，辨認出特定的形狀與顏色。神經科學家還不清楚這其中的細節。

有趣的是，某些視區若雙側都受損，就會造成形狀與顏色的感覺缺失，這提供了物體的顏色與其他特性並非完全脫離的另一項證據。物體的顏色訊息與形狀訊息在大腦裡混合處理，所導致的結果可能無法單由分析物體的反射光波長來預測——我們的錯覺經驗，已清楚指出了這一點。

雙色輪廓的水彩效應

我們在早期做過一個錯覺顏色實驗，指出了顏色對於辨別圖形範圍與形狀的重要。在某些特定狀況下，顏色會因環境的顏色而變；它可以變得更不一樣（稱為對比）或更像（稱為同化）。相似顏色的擴散只會出現在相當狹窄的區域，這與大腦視覺神經元大多短距連線的發現一致。所以我們才會驚訝地發現到，未上色區域如果被兩種不同顏色的邊界輪廓包圍住——內輪廓比外輪廓亮——色調就會從裡面的輪廓擴散到整個區域，甚至可以擴散很長的一段距離（見第95頁的插圖）。

色覺的魔力

- 長久以來，研究視覺的人一直認為，大腦將顏色訊息與其他特性（如深度與形狀）分開來處理。
- 不過，錯覺顏色的研究證實，色覺會創造出形狀與深度的特性。
- 特別的是，我們選用一種稱為耶蘭史坦錯覺（Ehrenstein illusion）的圖形，證明了大腦將顏色、形狀與型式連結在一起，產生對視覺世界的感覺。

因為顏色就像一層薄紗，如水彩畫中所見，因此我們稱這種錯覺為「水彩效應」。我們發現，擴散需要有兩個相鄰的輪廓，暗顏色形同屏障，限制亮顏色只能往內擴散並阻止往外擴散。由這種錯覺水彩畫出的圖形，看來較為緻密且稍稍凸起，將這雙層輪廓的顏色互換之後，則同樣的區域看起來會較冷白且稍稍凹陷下去。

水彩效應對於何為圖形、何為背景的界定能力，要比20世紀初期完形心理學（Gestalt psychology）所發現的，像是鄰近、連續、封閉、對稱等特性，都要來得強而有力。雙輪廓的亮色邊將亮色向內擴散，視為圖形，而暗色邊則視為背景，這種不對稱因而有助於消除不確定性。這個現象使人想起圖形背景研究先驅魯賓（Edgar Rubin），在他的想法中，邊界屬於圖形而不屬於背景。

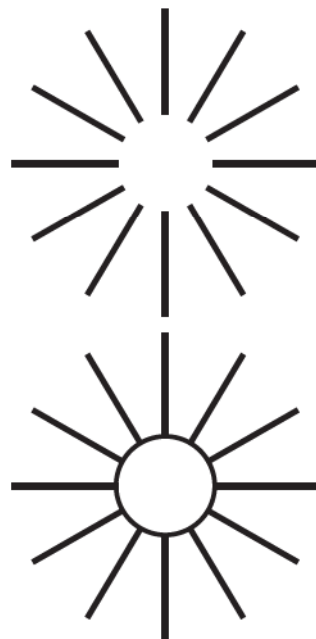
水彩錯覺一個可能的神經學解釋是，亮輪廓與兩側暗輪廓（位於更亮背景）的組合，刺激了只會對內側較亮輪廓有反應或只會對外側較暗輪廓有反應的神經元，而不會同時刺激這兩種神經元。邊界歸屬問題，最有可能在視覺皮質（像是在V1與V2腦區）處理訊息的初期就已決定了。神經生理學家在猴子的實驗中發現，視覺皮質約有一半的神經元會對對比的方向（不論是變亮或變暗）產生反應，因此可以將邊界區分出來。同樣這些神經元也在深度視覺扮演一角，這可能有助於辨別圖形與背景。

我們的研究指出，曲折的線條比直線更能產生水彩擴散，可能是因為曲折的邊界刺激了更多對方向有反應的神經元。這些曲折邊線所具有的顏色，勢必傳送到負責大視野的皮質區，讓顏色持續擴散，直到該封閉區域的另一邊，由對邊界敏感的細胞提供了屏障，才停止擴散。顏色與形狀因而註定在大腦中要綁在一起，這個層次的知覺皮質分析也是一樣的。

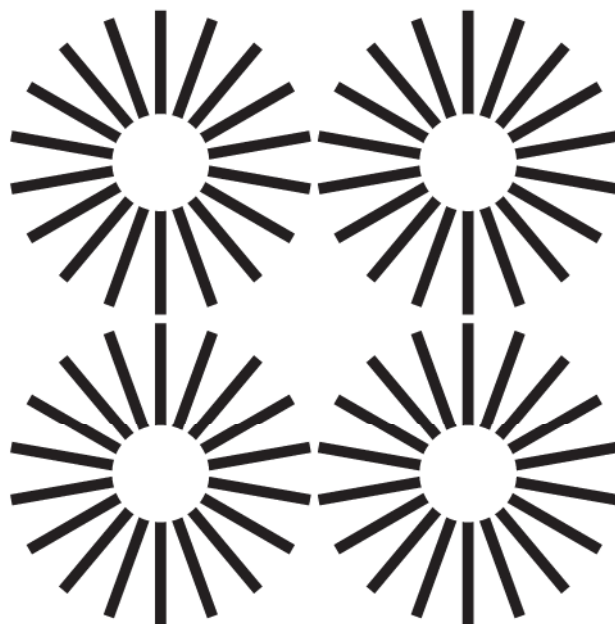
輻射線影響對比色？

輻射線錯覺更進一步提供證據，證明顏色在辨別圖形與背景所扮演的角色。1941年德國心理學家耶蘭史坦（Walter Ehrenstein）證實，呈輻射狀排列的直線所形成的中央缺口，會由亮圓塊所填滿，但中間部位與外圍的圓形邊界並沒有相對應的實質刺激，這只是個錯覺；而明亮的錯覺表面，似乎會稍微浮出於輻射線上方（見本頁最上面的插圖）。

這種錯覺現象的強度，取決於輻射線的長度、寬度、數目以及對比。造成這種錯覺所必需的線條空間組合，暗示



1941年德國心理學家耶蘭史坦所發現的「耶蘭史坦圖形」，為後來的錯覺研究提供了基礎。畫上圓圈（上圖下）之後，中央的明亮圖形錯覺就消失了。



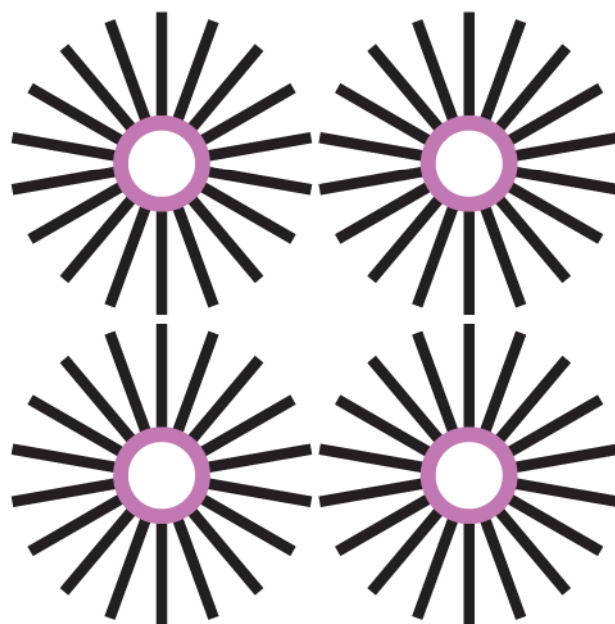
① 修改版的耶蘭史坦圖形，產生的錯覺更加強烈，中央的缺口會形成一個亮圓盤。

有某些神經元會對線條端點產生反應。這些稱為「端點神經元」(end-stopped neuron)的細胞，已經在視覺皮質區找到，或許可以用來解釋這種現象。這些局部訊號會結合成為其他(次級)神經元的輸入訊號，然後以強化亮度的方式填入中央區域。

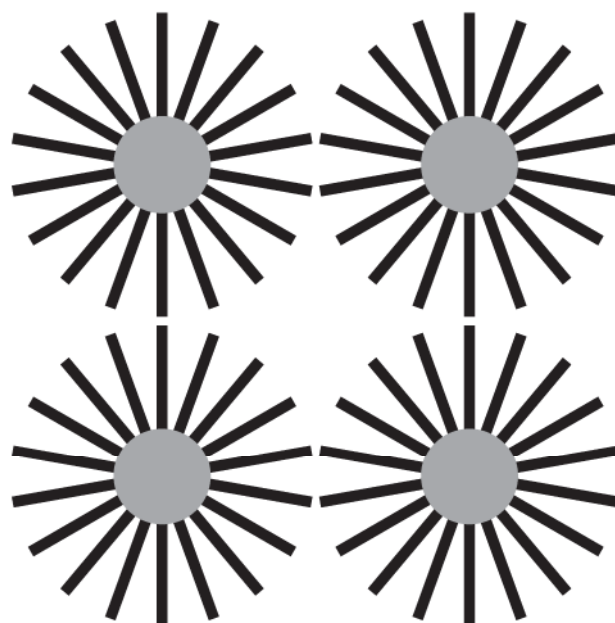
我們在研究耶蘭史坦錯覺時，改變了輻射線的數目、長度與寬度後評估結果，本文舉出的是我們發現到效應最顯著的例子(見有標號的插圖)。每個插圖由四個圖樣並排，以加強效果。當我們確定會造成最亮中央圓圈的輻射線特性^①之後，就開始改變中央缺口的色度。首先我們為耶蘭史坦圖形加上一個黑色圓環，結果中央缺口的亮度就全然消失——錯覺不見了，就像耶蘭史坦指出過的情形(參見97頁上方插圖的下圖)。我們懷疑，這是因為圓環讓代表端點的細胞沉靜下來的緣故。

不過，圓環要是上了色，或許就可以活化其他細胞。當我們加上彩色圓環時^②，白色圓盤不僅看來要比原先的耶蘭史坦圖形亮得多(自行發光)，同時看來更緻密，就像是在紙上貼了一塊白色的東西一樣。這個現象讓我們感到驚訝；自發光性與表面質感通常不會同時出現，有人甚至認為這是相對、不能並存的外觀。我們稱這個現象為「異常明亮誘覺」(anomalous brightness induction)，就像水彩效應一樣，造成這種錯覺的，可能是處理初期視訊的皮質區細胞。

之後，我們在耶蘭史坦圖形的中央缺口加上了灰色圓盤^③，於是產生了我們稱為「閃爍光澤」(scintillating luster)的現象，這時不再是錯覺明亮，而是每當圖樣或眼睛移動時，會出現光澤微閃的感覺。閃爍也許來自on與off系統的競爭：線條誘發的明亮(錯覺減少)與圓盤的暗灰色(實質增加)互相競爭。如果將彩色環內的中央白色圓盤換成黑色圓盤，並用黑色背景^④，則黑盤會比一樣黑的背景看來更黑。黑盤的黑不像白盤的白那樣看來會自行



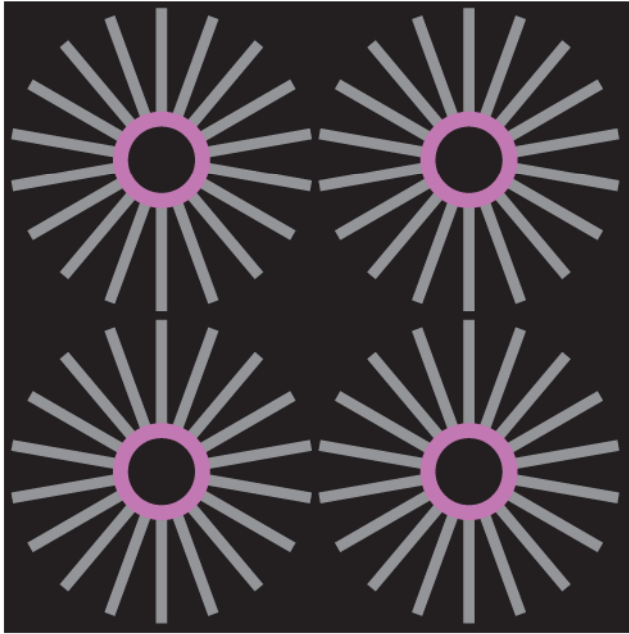
② 異常明亮誘覺：加入彩色圓環後，錯覺圓塊看來更為明亮。



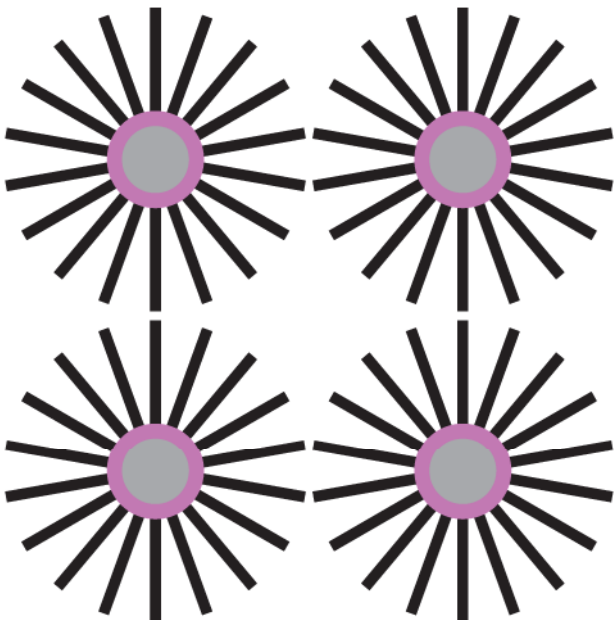
③ 閃爍光澤：填入灰色後，中央缺口的圓盤會微微閃爍。

關於作者

沃納、平納與斯皮爾曼過去10年來合作研究本文中敘述的錯覺。沃納是美國布朗大學的心理學博士，畢業後在荷蘭應用科學研究院(TNO)的知覺研究所進行研究，他現在是美國加州大學戴維斯分校的教授。平納是義大利薩沙里大學的教授，他畢業自帕多瓦大學與研究所。斯皮爾曼是德國夫來堡大學視覺心理物理實驗室的主持人，在美國麻省理工學院待過兩年，並在視網膜基金會與麻州眼耳專科醫院待了五年。平納與斯皮爾曼兩人都有視錯覺作品，展示於舊金山的探奇博物館。



4 異常黑暗誘覺：彩色環內的黑盤，看起來會比一樣黑的背景要黑得多。



5 閃爍異常顏色對比：前後移動圖樣或眼睛時，紫色環內的灰盤看起來像是綠黃色的閃光燈。

發光，而像是有個空洞或黑洞，吸收了所有光線。

當彩色環內的中央圓盤從黑或白變成灰色時⁵，圓盤看似染上了圓環的互補色——例如圓環是紫色時，圓盤看起來會是綠黃色（可與左頁的灰色圓盤比較）。而且，每次眼睛移動時，或者圖樣前後移動時，圓盤看起來都像是在閃爍，並對背景做出相對運動。「閃爍異常顏色對比」（flashing anomalous color contrast）就像其他效應一樣，依賴輻射線與彩色環，但也有其特質，不像是其他已知效應的單純組合。就這種錯覺而言，誘導出的顏色似乎同時會自行發光、也會閃爍。令人注意的是，它看起來像是飄浮在其他影像上方。表面的顏色與自發光色並未混合在一起，其一來自書頁上的灰盤，另一則像是由刺激的其他特徵組合後而浮現出來的。

閃爍異常顏色對比中的輻射線，或許活化了局部的端點神經元，如同用來解釋填入中央缺口的錯覺輪廓，但這些細胞的活性無法同時完全解釋閃爍與互補色。輻射線是否會直接影響顏色對比，以及顏色的鮮明是否間接來自輻射線與中央灰色組合而成的微光與閃爍，我們還不清楚。

目前對大腦的了解，無法完全解釋這種錯覺的所有事情，其複雜度意味著這種錯覺不太可能源自單一特性，卻有可能代表大腦試圖從來自多種特殊路徑、互相競爭的訊息中取得妥協。顯然對於大腦如何知道外在世界，科學家還有一段很長的路要走；幸運的是，目前進行中的錯覺顏色研究，將會為複雜的人類視覺系統，持續開啟一扇誘人的大門。

SA

黃榮棋 長庚大學醫學系生理暨藥理學科副教授，主要研究的題目為哺乳動物生物時鐘與離子通道表現。

延伸閱讀

1. *Sensory Experience, Adaptation and Perception*. Edited by Lothar Spillmann and Bill R. Wooten. Lawrence Erlbaum Associates, 1984.
2. *Visual Perception: The Neurophysiological Foundations*. Edited by Lothar Spillmann and John S. Werner. Academic Press, 1989.
3. **Neon Color Spreading: A Review**. P. Bressan, E. Mingolla, L. Spillmann and T. Watanabe in *Perception*, Vol. 26, No. 11, pages 1353–1366; 1997.
4. **The Watercolor Effect: A New Principle of Grouping and Figure-Ground Organization**. B. Pinna, J. S. Werner and L. Spillmann in *Vision Research*, Vol. 43, No. 1, pages 43–52; January 2003.
5. *The Visual Neurosciences*. Edited by L. M. Chalupa and J. S. Werner. MIT Press, 2004.
6. **Figure and Ground in the Visual Cortex: V2 Combines Stereoscopic Cues with Gestalt Rules**. F. T. Qiu and R. von der Heydt in *Neuron*, Vol. 47, No. 1, pages 155–166; July 7, 2005.
7. **The Watercolor Illusion and Neon Color Spreading: A Unified Analysis of New Cases and Neural Mechanisms**. B. Pinna and S. Grossberg in *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 22, No. 10, pages 2207–2221; 2005.