

白色的光線經過三稜鏡以後，會變成7種顏色的光線：紅、橙、黃、綠、藍、靛、紫。

## 解析千變萬化的顏色

究竟在人類的世界裡，顏色是如何組成的？

它的呈現方式又是如何？其中有著什麼樣的奧妙？

我們又是怎樣去獲得、解讀？

且讓我們共同來探索與追尋吧！

尚景賢

你喜歡哪些顏色呢？每一種顏色都蘊藏許多奇妙的訊息。經由色彩，可以察覺個人的人格特質、內心世界及潛意識。不同的色彩各具獨特的力量，分別影響我們的思想、性情、情緒，每一種顏色都蘊藏著無限潛力。光和顏色是一體的，對人類有著極大的影響。

在西元前1,900年左右，巴比倫人就已經顯示了對色彩的高度興趣，認為「色」是物體的本性，一如硬度或重量。在西元前四百多年，希臘哲學家恩佩多克

利斯說：「物體放出一些會透過眼睛的微粒，產生色感反應。」亞里斯多德則最先體認：「沒有光就沒有色。」

在中國古代，也把顏色當成了方位的代稱：東青龍（青色）、西白虎（白色）、南朱雀（紅色）、北玄武（黑色），再加上中心（黃色），可以對應到五行（依序是木、金、火、水、土）及五臟（依序是肝、肺、心、腎、脾），而成爲命理和中醫的根本。

有一句大家耳熟能詳的廣告詞，「肝如果不好，人生是黑白

的；肝如果好，人生是彩色的。無論是文學、藝術或生活，都充滿了五顏六色，豐沛了人生的色彩，造就了千變萬化、色彩繽紛的花花世界，你我都身處其中，無法抗拒地接受了它的誘惑。

在人類的世界裡，顏色到底是如何組成的？它的呈現方式又是如何？其中有著什麼樣的奧妙？我們又是怎樣去獲得、解讀？且讓我們共同來探索與追尋吧！

### 人們對顏色的看法

千百年來，人們對於顏色一直有著一個難解的謎，那就是太陽光。誰看了它，都會說只是一種顏色，無論是白色、黃色、橘色或紅色。可不知在雨後的天空中，怎麼會突然出現一條七色彩虹呢？於是眾說紛紜，有人說這是一條長龍彎身下海吸水；有人說這是一座彩橋，仙人踏空而過；剛登上王位的人，就說這是吉兆，上天呈祥；寶座不穩的人，就懷疑是江山氣數已盡，終日惶惶不安。反正，誰也說不清楚，道不出一個所以然來。

中國古代早已注意到虹是陽光與水珠的變幻。甲骨文裡虹是「日」加「水」。唐代張志和的《玄員子》中，也記載著：「昔日噴乎，水成虹霓之狀。」意思是手中端著一碗水，背向太陽用力一噴，眼前竟也能現出一條多彩的小練。然而，這噴出的霓，伸手一抓卻是一把濕氣，想多看一會兒又稍縱即逝，既不能抓在手中把玩，

更不能用力把它剖開，終究還是搞不清楚這顏色到底是怎麼來的。

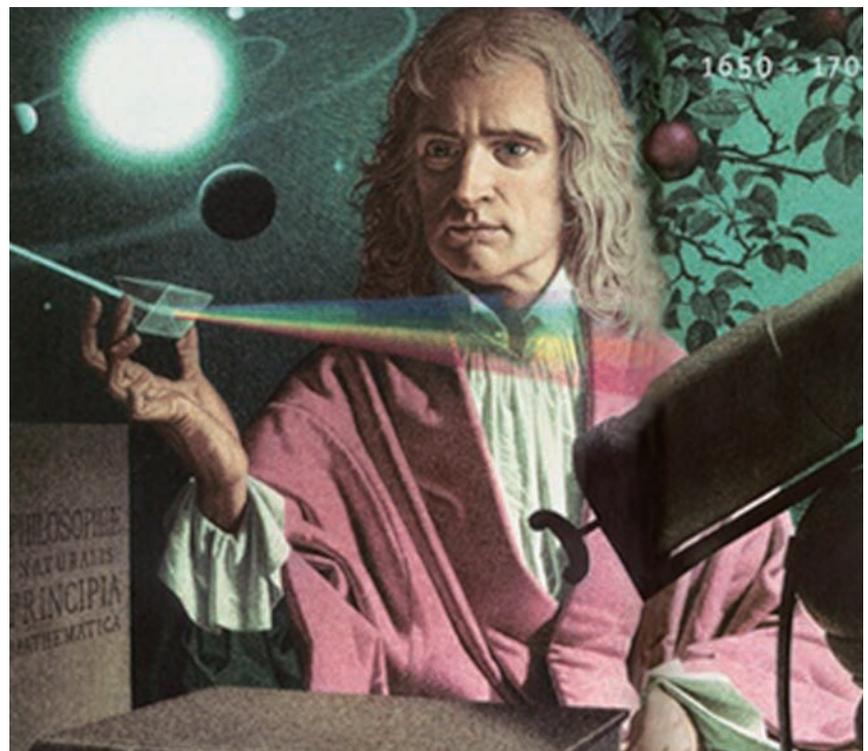
至於平時紅的花、綠的葉、五顏六色的雜物，人們更不知到底是怎麼一回事。笛卡兒說：「顏色是許多小粒子在轉，轉速不同，顏色也就不同。」波以耳說：「光是許多極小粒子向我們的眼睛視網膜上撞，撞的速度不同，看到的顏色也就不同。」反正，為了解開這個謎題，有不少人都想來試一試。當中，運氣最好的就是牛頓了。

早在1666年，牛頓還在劍橋大學當窮學生時，在鄉下因為看到蘋果落地而想到萬有引力。他回到學校以後，又因為看到門縫裡的光，而解決了光學中的顏色問題。那是在一個假日裡，牛頓正在房中推演萬有引力的公式，抬頭看到緊

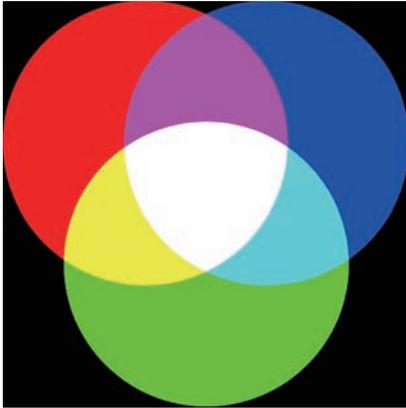
閉的門縫透進一縷細細的陽光。他想著這樣細的光絲，不知是否可以再切割得更細呢？

牛頓隨手從抽屜裡拿出三稜鏡截住那絲細光，回頭看見牆上竟然出現一道彩色光帶。他移動鏡子選出一個最佳點，天上的彩虹便清楚地出現在他的眼前。他依照古希臘哲學家的想法，選擇了7種顏色來區分，以便和音符、7大行星、一周7天，相互映襯。正因為如此，魏納認為靛色不應該被視為基本顏色，因為它只不過是藍色和紫色的濃淡程度不同的區間而已。這些顏色到底如何構成的呢？

在1802年，楊格利用3台投射器，把分別通過紅綠藍三色濾色鏡的3道光投射在白色螢幕上。他發現在二色相疊處，產生



牛頓利用三稜鏡把一絲細光分解成彩色光帶



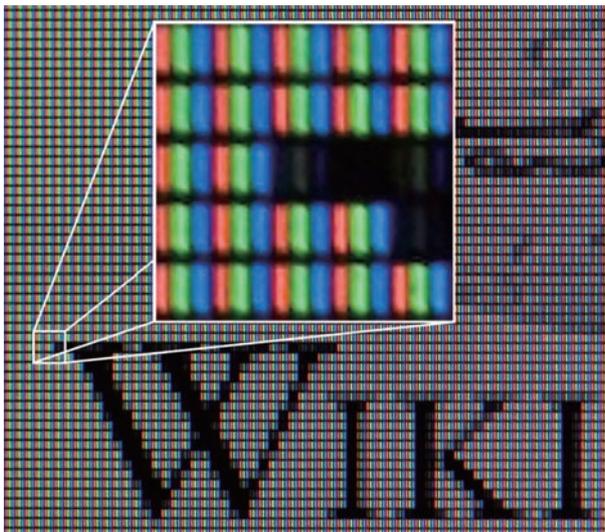
利用光的三原色—紅、綠、藍，可以調配出所有的顏色。



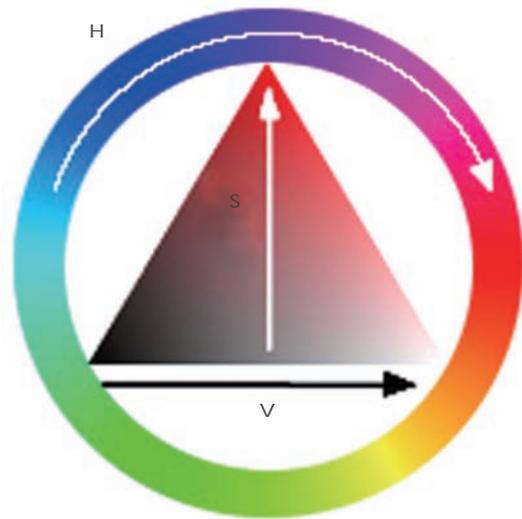
RGB 十二色相環



伊登十二色相環



電腦螢幕上的某一區域光點（像素）所含的 3 種基本顏色示意圖，每一個光點都是由 RGB 三個原色組合成的。



HSV 色輪可讓使用者簡易且快速地選出顏色

了青、洋紅、黃三色，中間的三色重疊處則是白色。如果再進一步調整紅綠藍的亮度，便會產生千變萬化的色感。因此，他推論人眼應該具有 3 種感光的構造，但是當時並無實驗基礎來證明。到了 19 世紀末，赫姆霍茨才由醫學的觀點闡揚這一理論，並且用實驗來證實它。

在 1849 年，麥克斯威爾在愛

丁堡求學期間，協助物理學家福比斯進行顏色混合的實驗。他們在陀螺上貼扇形的顏色紙片，旋轉起來就可以得到顏色混合的效果。他們認識到光的三原色是紅、綠、藍，而不是繪畫上的洋紅、黃、青。麥克斯威爾用實驗證明，顏料的混合是一種以吸收光譜為基礎的顏色減法，和顏色陀螺的加法混合是不一樣的。到了 1861 年，

麥克斯威爾利用上述理論基礎，製作了第 1 張彩色照片。從此，一般人都接受了三色色覺神經論。

## 人類的色覺系統

人類色覺系統是以三色神經為基礎，色覺是動物高度發展的特徵，具有色覺的動物可以分辨出環境中的不同顏色，進而學習到它所代表的意義，增加個體的適

人類色覺系統是以三色神經為基礎，色覺是動物高度發展的特徵，具有色覺的動物可以分辨出環境中的不同顏色，增加個體的適存能力。

存能力。色覺指的是動物具有可以分辨不同波長色光的能力，而且不會受到光強度改變的影響。

除了人以外，其他的動物是否具有色覺呢？在已知的科學研究中，發現在脊椎類動物中，以魚類及鳥類的色覺較為豐富，牠們能分辨的顏色範圍較廣。在哺乳類動物中，除了靈長目以外，其他動物的色覺就比較差了，甚至根本沒有辨別色彩的能力。至於在無脊椎類動物中，由於辨色行為的訓練困難，大多數仍缺乏深入的研究，只有少數的昆蟲，如蜜蜂與蝴蝶等，是目前已經證實具有色覺的無脊椎類動物。

人類的色覺系統究竟是如何運作的呢？現今對於色覺神經系統的局部作用機制已經有所了

解，但是，在整體上色覺神經訊號的處理流程是什麼？人腦如何計算？到目前為止，所知仍極為有限。已經知道的是，人類色覺神經系統傳輸訊號的路徑是從視網膜開始，經過側膝核，最後抵達大腦後方的色覺皮層。所有的訊息，包含顏色、形狀、運動、遠近，都是透過這樣的一個過程來處理與辨識的。

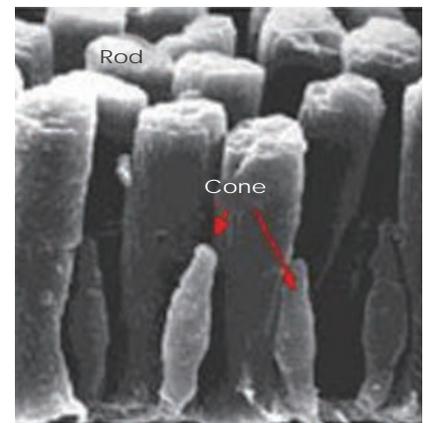
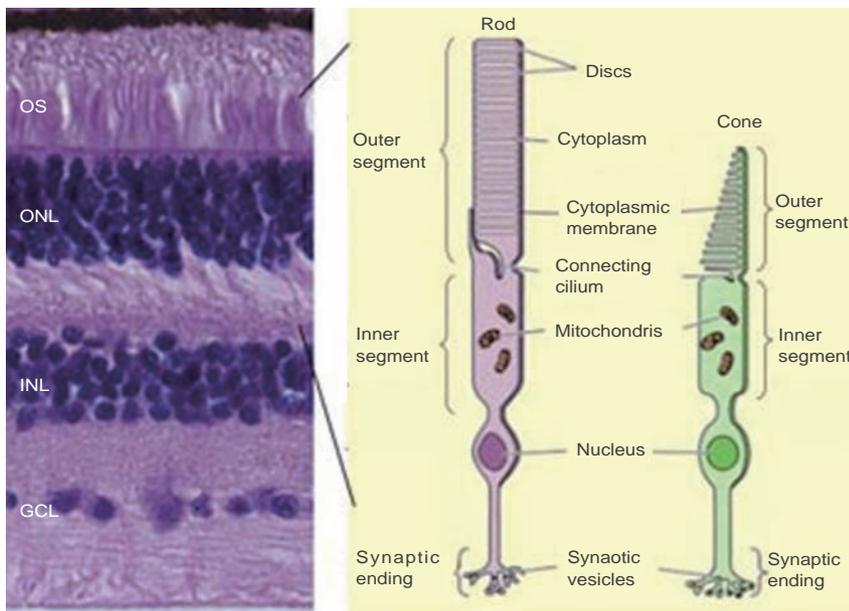
然而，如此豐富多樣化的色覺訊息，卻僅由視網膜上的4種感光細胞來處理，包括處理明暗的桿細胞和處理顏色的3種錐細胞。這些錐細胞包括短波段錐細胞、中波段錐細胞及長波段錐細胞。這4種感光細胞把對外部光線的反應傳輸給大腦的訊號，便是一切色覺訊息的原始資料的來源。另

外，視網膜也可以區分為感光細胞層（錐細胞、桿細胞）、雙極細胞層及G細胞層3個層次。

## 錐細胞和桿細胞

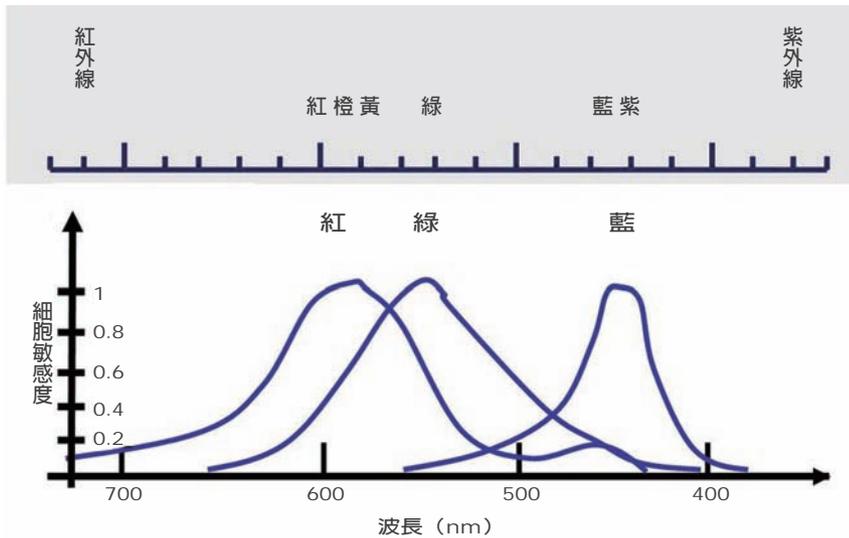
視網膜上大約有1億2千萬個桿細胞、6百萬個錐細胞。桿細胞主要在低光度的環境下運作，負責暗色覺。例如，在白天進入漆黑的房間，會瞬間完全看不到任何東西，但經過一段時間，慢慢就可以看見房間內家具的輪廓、形狀。這個過程就是視網膜上的工作由錐細胞轉移到桿細胞的過程。桿細胞色覺是一種非色差的色覺，只有明暗區分。由於桿細胞對微光刺激的反應較遲緩，因此我們在暗處的反應也較慢。

數量較少的錐細胞則提供更為豐富的色覺訊息。錐細胞在較高光度的環境下運作，負責白天或照明環境下的色覺。錐細胞可以區分為3種。



正常人的視網膜有4種感光細胞，處理各種顏色的視覺。這些感光細胞包括處理明暗的桿細胞和處理顏色的3種錐細胞：短波段錐細胞、中波段錐細胞及長波段錐細胞。

除了人以外，其他的動物是否具有色覺呢？在已知的科學研究中，發現在脊椎類動物中，以魚類及鳥類的色覺較為豐富，牠們能分辨的顏色範圍較廣。



可見光波長與3種細胞敏感度

短波段錐細胞（又稱S錐細胞）：反應波長範圍大約在380～550奈米，反應峰值約落在445奈米。

中波段錐細胞（又稱M錐細胞）：反應波長範圍大約在400～650奈米，反應峰值約落在535奈米。

長波段錐細胞（又稱L錐細胞）：反應波長範圍大約在450～760奈米，反應峰值約落在575奈米。

3種錐細胞涵蓋波長範圍是380～760奈米，這便是人類可見光的波長範圍。L錐細胞的活動主要在紅色系；M錐細胞的活動主要在綠色系；S錐細胞的活動主要在藍色系。因此，L錐細胞又稱紅錐細胞，M錐細胞是綠錐細胞，S錐細胞是藍錐細胞。但是這種說法容易引起誤導，以為L錐細胞只對紅色波段有反應，

M錐細胞只對綠色波段有反應，S錐細胞只對藍色波段有反應。其實，決定顏色並不是單一錐細胞的作用，而是3種錐細胞反應程度的相對性比較。

直覺上，負責反映外界的不同物理面向的3種錐細胞系統，應該各自獨立地把訊息傳遞給腦去計算。但是事實上，3種錐細胞系統是彼此連結地在傳輸訊號。負責連結錐細胞系統的是水平細胞與A細胞，透過HII型水平細胞，S錐細胞主要和其他S錐細胞連結，比較少與M、L錐細胞系統連結。儘管有橫向的連結，各錐細胞系統的訊號輸出的獨立性還是未被混淆，反而更加強化。特定的錐細胞只反應特定波段的光刺激，並傳輸對應的訊號給腦部。

## 雙極細胞和G細胞層

錐細胞的光反應訊號首先傳遞給視網膜上第2層的雙極細胞，雙極細胞又把訊號傳輸給第3層的G細胞。傳送到了G細胞以後，色覺訊號便沿著視神經索離開視網膜前往大腦了。

從雙極細胞到G細胞的這一階段，神經訊號在G細胞裡轉換成頻率訊號傳輸出去。也就是說，在感光細胞和雙極細胞中，主要是以高低電位差的方式來處理反應訊號。但是到了G細胞中，便進行編碼轉換成為頻率式的訊號。一般認為，頻率式的訊號是人腦在進行訊號傳輸、運算時的訊號編碼模式。對人腦計算有意義的訊號是神經訊號的頻率快慢，而非離子電位（伏特）的高低或離子電流（安培）大小。

腦內訊號傳輸選用頻率模式有何好處呢？一般認為腦內神經元、軸突、樹突間的傳輸會因為細胞電阻、漏電等因素造成衰減，以頻率的模式傳輸訊號，比較容易克服腦內遠距傳輸的訊號衰減問題。

## 視覺訊息傳輸過程

在視網膜上，所有G細胞的軸突先全部匯聚在視網膜上的一點，集合而成為一條視神經索。然後，再延伸到腦中央視丘上的

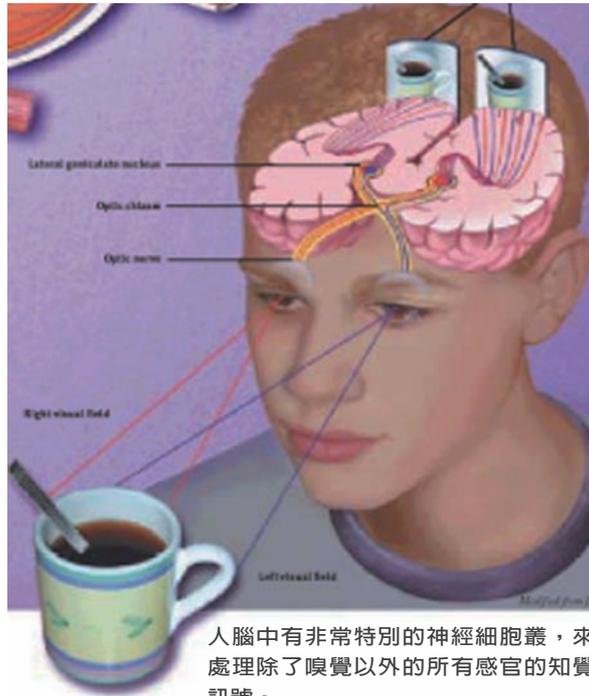
在視網膜上，所有G細胞的軸突先全部匯聚在視網膜上的一點，由於G細胞軸突匯集處沒有任何感光細胞，因此會形成視覺盲點。



視神經離開背部小腿眼（夾層）

側膝核。最後再送到大腦視覺皮層完成訊息的傳輸。由於G細胞軸突匯集處沒有任何感光細胞，因此會形成視覺盲點。

側膝核具有6層結構，其中的4層是P細胞層，兩層是M細胞層。P細胞層接收來自視網膜色質系統的訊號，M細胞層則接收來自相位系統的訊號。側膝核是腦中央視丘的一部分。視丘是人腦中非常特別的神經細胞叢，除了嗅覺以外，所有感官的知覺訊號在抵達大腦以前，都會先集中到這個位置，再傳送到大腦皮



人腦中有非常特別的神經細胞叢，來處理除了嗅覺以外的所有感官的知覺訊號。

層的相關區域。例如，視網膜G細胞訊號就是先傳送到側膝核，再傳送到大腦色覺皮層的V1區。

到現在，我們仍然不清楚視丘與側膝核的功能，一般認為它僅僅負責訊息的前置處理，或者只是集中這些訊號而已。感官知覺，如顏色、聲音等，是在訊號

抵達大腦皮層並經過處理後才會發生。也就是說，感官知覺是發生在大腦皮層，而非視網膜上。

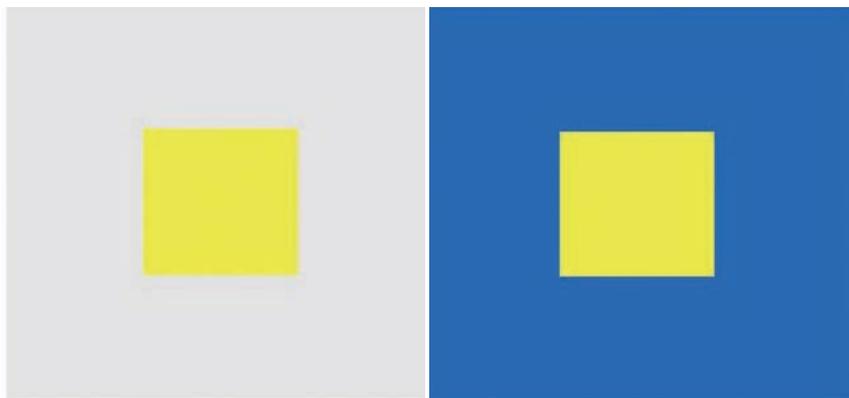
大腦色覺中顏色的計算與形成，估計至少有100萬種，這些組合包括明暗、彩度差異等。但是，如何從簡單的3種通路的訊號，演變出100萬種的神經訊號？

人類的色覺具有的豐富結構，計算過程究竟是如何完成的呢？從目前有關的研究所知仍然有限，有待持續地探索與深入地剖析。尤其是基本的顏色判讀，很可能在還沒有進入視網膜以前，就因為一些背景條件不同而產生一些差異，增加了研究的複雜度。

不同的背景會造成人對色彩的錯覺，不僅造成顏色（色相）的錯誤感覺，也會造成灰度錯誤的感覺。這些在色彩學上形成相當大的困擾，非常不好處理。因此，人們發展很多的色彩色貌模式來處理這個問題。

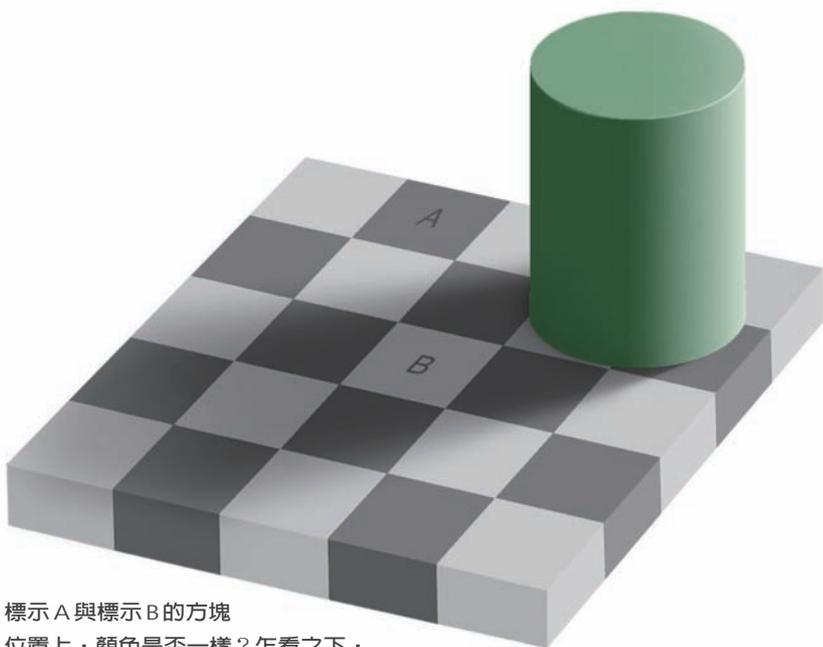
## 色盲

正常人對顏色辨別的差異並



不同的背景會造成人對色彩的錯覺，不僅造成顏色（色相）的錯誤感覺，也會造成灰度錯誤的感覺。

不同的背景會造成人對色彩的錯覺，不僅造成顏色（色相）的錯誤感覺，也會造成灰度錯誤的感覺。這些在色彩學上形成相當大的困擾，非常不好處理。



標示 A 與標示 B 的方塊

位置上，顏色是否一樣？乍看之下，

好像不同。其實，如果把周圍的方塊全部去除，你會發現到兩者顏色竟然是相同的。那是因為背景所造成的視覺差異，因此眼見並不見得為憑哦！

不大，可是，有些人由於色覺系統中的某些部分出現了問題，所見到的影像就會發生很大的變化，甚至會影響到日常生活。在一般的習慣上，我們會稱這種現象為色盲。

色盲是先天基因缺陷造成

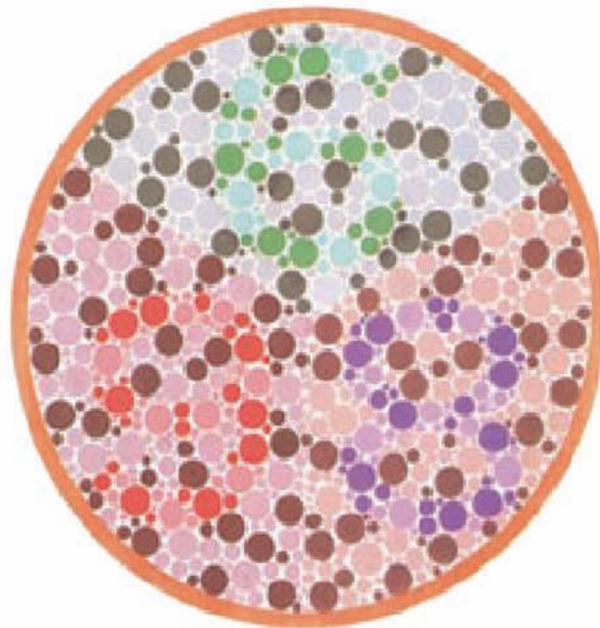
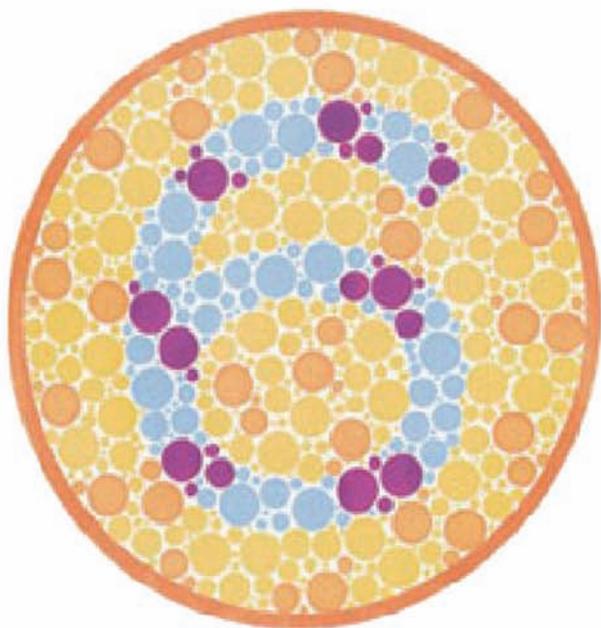
的，生理上對於色彩感測或色差處理機制發生病變，因而導致色覺異於常人。相對於正常人而言，色盲者好比生活在一個「變了色的世界」中。色盲者的色覺缺陷對色盲表的觀測、交通號誌的辨識，以及手術時動靜脈血管

的分辨，尤其明顯。即使到現在，臨床上對於色盲的問題也僅能進行檢測，尚無有效的治療方法。色盲大約占總人口的 8.4%，也就是總人口的 1/12 左右，其中男性占 8.0%，女性只有 0.4%。

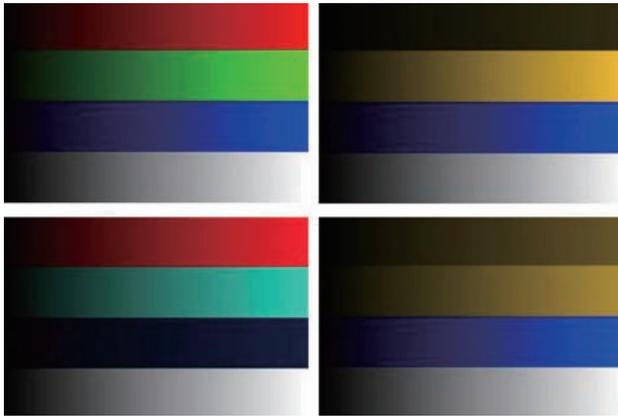
色盲依照生理病變的程度，可以區分為 3 大類。色弱：3 種色彩的感測細胞都異常，涵蓋長波感測細胞的異常、中波感測細胞的異常及短波感測細胞的異常，這部分占總人口的 6.3%。單色色盲：一種色彩感測細胞或色差處理機制缺乏，剩餘的 2 種色彩的感測細胞異常，這一個部分占總人口 2.1%。其他：主要是因為桿狀細胞缺乏，或者錐細胞缺乏，占總人口 0.005%。

### 眼見真的為真嗎

透過以上的分析與討論，可以了解其實人類眼睛看到的，只



在左圖中看到的是 6，右圖的上左右分別是 698，如果你看不到，那就很可能有色盲的現象哦！



由上而下紅綠藍白4種顏色，色盲者所看見的圖像顏色不同：左上是正常、左下是藍色盲、右上是綠色盲、右下是紅色盲。

不過是光波的頻率透過色覺系統轉換，由大腦想像與建構而成的影像。它很容易受到本身的組織構造、器官、物體的背景等的影響。

鳥類的色覺系統運用了4種與人類不同的錐細胞，人類根本不可能知道鳥類看到的是什麼樣的顏色，鳥類不僅可以看到近紫外光，還看得到我們無法想像的顏色。而人與人之間也存在著相同的問題，只是差異程度的大小

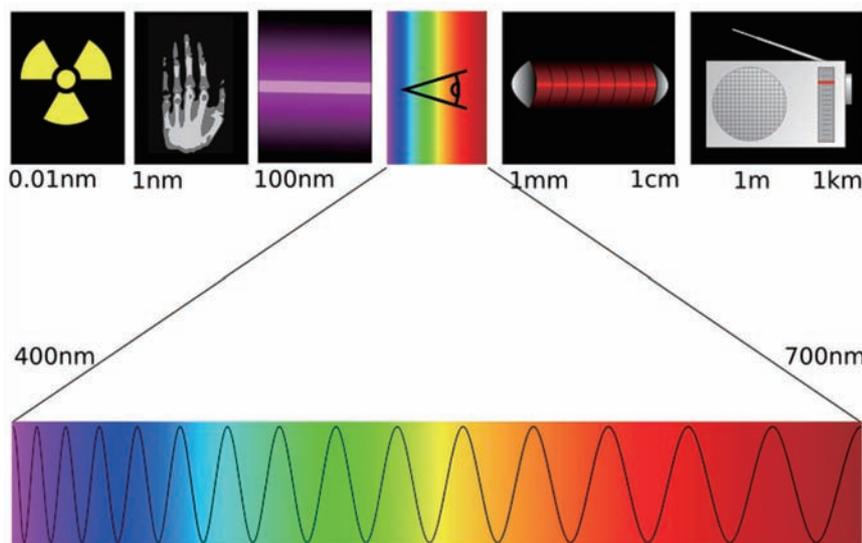
罷了，你怎麼能夠說你所見才是正確的呢？

物體吸收了光線中的某些波長，而反射其餘波長，我們看到的物體顏色與它反射出來的波長有關。顏色並非光的性質，也不是把光反射回來的物體的性質。

我們現在看到的世界的顏色，在其他生物眼裡可能不是這樣子，很可能樹不是你看到的綠色，花也不是你看到的紅色。人類的色覺顯色並不是最準確的，人類一輩子也無法想像，擁有十幾對色彩感受器的系統所感知的世界會是怎樣。

### 腦部電極移植

2007年5月，美國哈佛大學



可見光的波長在400 nm和700 nm間，可見光頻譜的左邊是紫外線到輻射線，右邊則是從紅外線到收音機使用的無線電電波。

醫學院的裴札利斯（John S. Pezaris）研究團隊，在《美國國家科學院院刊》上發表他們以猴子進行的研究報告。

首先，他們把電極植入正常猴子腦丘內的側膝核，並訓練猴子在黑暗中看螢幕的光點。當螢幕在不同地方顯示光點時，猴子目光會隨著光點移動。裴札利斯接著刺激對螢幕特定位置光點會有反應的側膝核區塊，發現螢幕相對位置雖然沒有出現光點，猴子仍會望向那個地方。

裴札利斯表示：「我們不知道那些光線看起來像什麼，因為沒有辦法問猴子，但絕對有些東西出現。」裴札利斯說，只有單一光點可能是不夠的，未來將嘗試讓猴子面對8個光點（組成垂直或水平的形狀）時進行研究，等收集到更多具體成果以後，就可以展開人體的測試了。

雖然，裴札利斯團隊尚未進行人體測試，但是近年來為了治療帕金森氏症展開的腦部深層刺激研究，已經研發出在距側膝核約1公分的腦部區塊，進行電極移植手術的技術。在不久的將來，這一項技術或許也能應用在腦丘電極移植。腦部植入電極，或許能夠提供眼疾或創傷失明者重見光明的機會。研究雖然還在初步階段，但是科學家認為，假以時日這種電極移植必將為數百萬眼疾患者或失明者帶來希望。 □

### 尚景賢

空軍航空技術學院教務處